

学号 D98034分类号 F123密级 无UDC (DDC) 658

河海大学

博士学位论文

水资源承载力分析与应用

孙富行

指导教师姓名：郑垂勇 教授 河海大学商学院南京市西康路 1 号申请学位级别：博士 专业名称：技术经济及管理论文提交日期：2005 年 11 月 21 日 论文答辩日期：2006 年 3 月 23 日学位授予单位和日期：河海大学 2006 年 月 日答辩委员会主席：章仁俊 论文评阅人：曲福田、张智光、谭清美、陈建敏、周之豪、施国庆、唐德善。

2006 年 3 月 中 国 南 京

分类号(中图法) F123 UDC(DDC) 658 密级 无

论文作者姓名 孙富行 学号 D98034 单位 河海大学

论文中文题名 水资源承载力分析与应用

论文中文副题名 无

论文英文题名 Analysis and Application of Carrying Capacity of  
Water Resources

论文英文副题名 无

论文语种 汉语 论文摘要语种 汉、英 论文页数 131 论文字数 12.5(万)

论文主题词 水资源承载力、可持续发展、水资源可持续利用、  
量化评价方法、指标体系

申请学位级别 博士 专业名称 技术经济及管理

研究方向 水资源技术经济

指导教师姓名 郑垂勇 教授 导师单位 河海大学商学院

论文答辩日期 2006年3月23日

# **Analysis and Application of Carrying Capacity of Water Resources**

Dissertation Submitted to

**Hohai University**

In Fulfillment of the Requirement

For the Degree of

**Doctor of Administration**

By

**Sun Fuhang**

**(Business School)**

Dissertation Supervisor: Professor Zheng Chuiyong

March, 2006

Nanjing, P. R. China

**学位论文独创性声明：**

本人所呈交的学位论文是我个人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。尽我所知，除了文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果。与我一同工作的同事对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示了谢意。如不实，本人负全部责任。

论文作者（签名）：\_\_\_\_\_

2006 年 3 月 26 日

**学位论文使用授权说明：**

河海大学、中国科学技术信息研究所、国家图书馆、中国学术期刊(光盘版)电子杂志社有权保留本人所送交学位论文的复印件或电子文档，可以采用影印、缩印或其他复制手段保存论文。本人电子文档的内容和纸质论文的内容相一致。除在保密期内的保密论文外，允许论文被查阅和借阅。论文全部或部分内容的公布(包括刊登)授权河海大学研究生院办理。

论文作者（签名）：\_\_\_\_\_

2006 年 3 月 26 日

# 目 录

图表目录.....	V
前 言.....	VII
摘 要.....	IX
ABSTRACT .....	X
第一章 绪论.....	1
1.1 研究背景与意义 .....	1
1.1.1 承载力抽象概念的起源.....	1
1.1.2 水资源承载力研究的必要性.....	2
1.1.3 理论意义.....	6
1.1.4 实践意义.....	7
1.2 水资源承载力研究现状综述 .....	8
1.2.1 国外研究现状.....	8
1.2.2 国内研究现状.....	13
1.3 主要研究内容、总体思路与创新点 .....	26
1.3.1 主要研究内容.....	26
1.3.2 总体思路.....	27
1.3.3 创新点.....	28
第二章 水资源承载力的概念、内涵和分析基础.....	29
2.1 水资源承载力的概念、内涵和目标 .....	29
2.1.1 水资源承载力的概念和内涵 .....	29
2.1.2 水资源承载力研究的目标函数 .....	31
2.1.3 水资源承载力系统结构和功能 .....	33
2.1.4 水资源承载力系统特性 .....	33
2.1.5 水资源承载力研究的空间规定 .....	34
2.1.6 水资源承载力与水环境承载力 .....	35
2.2 可持续发展理论是水资源承载力研究的指导思想 .....	35
2.2.1 可持续发展理论的提出 .....	35
2.2.2 可持续发展理论的概念和内涵 .....	36
2.2.3 可持续发展的量化评价方法 .....	37
2.2.4 水资源的可持续利用与水利可持续发展 .....	38
2.2.5 水资源承载力与可持续发展的辩证关系 .....	39
2.3 生态经济系统理论是水资源承载力的研究基础 .....	39
2.3.1 资源、环境相关的概念及定义 .....	39
2.3.2 生态经济系统理论内涵 .....	40
2.3.3 水资源承载力研究以生态经济系统理论为基础 .....	41
2.4 资源承载力 .....	41

2.4.1 资源承载力定义、内涵和特点 .....	41
2.4.2 土地资源承载力 .....	43
2.4.3 矿产资源承载力 .....	45
2.4.4 旅游资源承载力 .....	46
2.4.5 水资源承载力与其它资源承载力研究的异同 .....	46
2.5 水资源的特点 .....	47
2.5.1 水循环 .....	47
2.5.2 水资源的定义和特性 .....	48
2.5.3 水资源概况 .....	49
2.5.4 中国水资源概况 .....	50
2.5.5 中国水资源特点和评价 .....	51
2.5.6 中国水资源短缺原因分析 .....	52
2.6 小结 .....	53
<b>第三章 水资源承载力分析模型和综合分析方法 .....</b>	<b>54</b>
3.1 水资源承载力影响因素分析 .....	54
3.2 水资源承载力的研究内容 .....	56
3.2.1 水资源承载力的研究内容 .....	56
3.2.2 水资源承载力的量化表达形式 .....	57
3.2.3 水资源狭义承载力和广义承载力 .....	58
3.2.4 水资源相对承载力和绝对承载力 .....	59
3.2.5 水资源合理配置和水资源承载力的关系 .....	59
3.3 水资源承载力分析模型 .....	60
3.3.1 系统动力学模型概述 .....	60
3.3.2 各态历经假说 .....	61
3.3.3 水资源承载力分析模型 .....	62
3.4 水资源承载力研究的方法与途径 .....	63
3.4.1 研究方法选择原则 .....	64
3.4.2 研究方法的比较分析 .....	65
3.4.3 水资源承载力分析框架和途径 .....	66
3.5 水资源承载力综合分析方法 .....	67
3.5.1 水资源承载力量化计算和指标评价的综合分析体系 .....	67
3.5.2 水资源承载力静态和动态评价 .....	67
3.6 小结 .....	68
<b>第四章 水资源承载力量化计算分析 .....</b>	<b>69</b>
4.1 水资源承载力量化计算方法 .....	69
4.1.1 水资源承载力基础指标选择 .....	69
4.1.2 水资源承载力基础指标量化计算方法 .....	70
4.1.3 水资源承载力基础指标量化计算步骤 .....	72
4.1.4 水资源承载力量化计算方法的改进 .....	73
4.2 水资源承载力分析的边界条件 .....	74

4.2.1 社会经济发展目标 .....	75
4.2.2 人口发展和城镇化进程预测 .....	75
4.2.3 社会经济发展预测 .....	76
4.2.4 生态环境需求预测 .....	76
4.2.5 水资源开发利用和供需发展预测 .....	77
4.3 小结 .....	80
<b>第五章 水资源承载力指标体系设计和评价 .....</b>	<b>81</b>
5.1 水资源承载力指标体系的构建 .....	81
5.1.1 水资源承载力指标体系的概念和作用 .....	81
5.1.2 水资源承载力指标体系设计原则 .....	82
5.1.3 水资源承载力指标体系构建需要注意的问题 .....	83
5.1.4 指标体系设计方法 .....	84
5.1.5 指标体系构成 .....	84
5.2 水资源承载力指标体系设计 .....	86
5.2.1 社会人口子系统指标 .....	86
5.2.2 社会经济子系统指标 .....	86
5.2.3 生态环境子系统指标 .....	86
5.2.4 水资源子系统指标 .....	86
5.3 水资源承载力指标体系评价和测度 .....	87
5.3.1 水资源承载力指标体系评价方法选择 .....	87
5.3.2 水资源承载力层次分析法评价 .....	87
5.3.3 水资源承载力指标体系评价步骤 .....	90
5.4 小结 .....	90
<b>第六章 提高水资源承载力的途径与方法 .....</b>	<b>91</b>
6.1 资源性提高水资源承载力 .....	91
6.1.1 水利工程措施 .....	91
6.1.2 跨流域调水工程 .....	92
6.1.3 海水淡化 .....	92
6.1.4 虚拟水资源 .....	92
6.1.5 污水资源化 .....	93
6.2 结构性提高水资源承载力 .....	93
6.2.1 控制人口增长 .....	93
6.2.2 调整产业结构 .....	93
6.2.3 重视生态环境保护 .....	93
6.3 经济和技术性提高水资源承载力 .....	94
6.3.1 节水 .....	94
6.3.2 水资源市场 .....	95
6.3.3 水资源统一管理 .....	95
6.3.4 加强水资源开发利用管理的法规和宣传工作 .....	95
6.4 小结 .....	96

<b>第七章 海河流域水资源承载力评价实例研究</b>	<b>97</b>
7.1 海河流域基本情况和特点	97
7.1.1 海河流域自然地理、水文气象概况	97
7.1.2 海河流域社会经济状况	98
7.1.3 海河流域水资源特点	99
7.2 海河流域水资源开发利用现状	100
7.2.1 海河流域水利设施状况	100
7.2.2 海河流域水资源开发利用现状	100
7.2.3 海河流域水资源开发利用存在的主要问题	102
7.3 海河流域水资源承载力分析的边界条件	103
7.3.1 海河流域社会经济发展目标	104
7.3.2 海河流域人口发展和城镇化进程预测	104
7.3.3 海河流域社会经济发展预测	105
7.3.4 海河流域生态环境需求预测	107
7.3.5 海河流域水资源需求预测	108
7.3.6 海河流域水资源供给预测	111
7.3.7 海河流域水资源供需分析和水资源合理配置	113
7.4 海河流域水资源承载力综合评价	114
7.4.1 海河流域水资源承载力基础指标量化计算	114
7.4.2 海河流域水资源承载力指标体系评价	115
7.4.3 海河流域水资源承载力综合评价分析	119
7.5 小结	120
<b>第八章 总结与展望</b>	<b>121</b>
8.1 总结	121
8.2 研究展望	122
<b>参考文献</b>	<b>124</b>
<b>攻读博士学位期间发表的论文和主要科研情况</b>	<b>130</b>
<b>致    谢</b>	<b>131</b>



## 图表目录

图 1.1 量化水资源承载力的系统关系示意 <sup>[97]</sup>	17
图 1.2 水资源二元演化模式下的区域水资源承载能力计算流程 <sup>[94]</sup>	23
图 1.3 水资源承载力研究总体思路	27
图 2.1 自然资源构成 <sup>[18]</sup>	43
图 3.1 水资源承载力影响关系图	55
图 3.2 水资源承载力分析模型	63
图 3.3 水资源承载力综合分析构成	67
图 4.1 水资源承载力量化分析步骤	73
图 5.1 水资源承载力指标体系结构	85
图 5.2 水资源承载力指标体系评价步骤	90
表 2-1 地球水储量	49
表 2-2 地球年水量平衡表	50
表 2-3 中国分区年降水、年河川径流、年地下水、年水资源总量统计	50
表 2-4 世界各主要国家年径流量、人均和单位面积耕地占有量	51
表 2-5 我国主要流域年径流及人均、亩均占有量	51
表 5-1 水资源承载力评价指标体系	87
表 5-2 1-9 标度法	89
表 7-1 海河流域主要河流河长、流域面积表	98
表 7-2 海河流域社会经济情况表	98
表 7-3 海河流域多年降水量和水资源量 (1956-1998)	99
表 7-4 海河流域 2003 年各分区水资源总量	100
表 7-5 海河流域 2003 年供水和用水量统计表	101
表 7-6 海河流域 2003 年用水指标	101
表 7-7 海河流域 2002 年各分区水资源总量	101
表 7-8 海河流域 2002 年供水和用水量统计表	101
表 7-9 海河流域 2000 年各分区水资源总量	102
表 7-10 海河流域 2000 年供水和用水量统计表	102
表 7-11 海河流域现状人口与城镇化进程	105
表 7-12 海河流域人口预测	105
表 7-13 海河流域城镇人口和城镇化率预测	105
表 7-14 海河流域 GDP 预测	105
表 7-15 海河流域人均 GDP 预测	106
表 7-16 海河流域产业结构预测	106
表 7-17 海河流域工业发展预测	107
表 7-18 海河流域灌溉面积预测	107

表 7-19 海河流域生活需水量预测 .....	108
表 7-20 海河流域农业需水量预测 .....	109
表 7-21 海河流域工业需水量预测 .....	109
表 7-22 海河流域生态环境需水量预测 .....	110
表 7-23 海河流域总需水量预测 .....	111
表 7-24 海河流域污水回用可供水量 .....	111
表 7-25 海河流域海水淡化可供水量 .....	112
表 7-26 海河流域供水预测 .....	112
表 7-27 海河流域水资源供需平衡 .....	113
表 7-28 海河流域狭义水资源承载力状况（调水前） .....	115
表 7-29 海河流域广义水资源承载力状况（调水后） .....	115
表 7-30 指标基础数据和标准值 .....	117
表 7-31 指标体系的权重系数 .....	118
表 7-32 平均随机性指标 R.I. 对照表 .....	118
表 7-33 海河流域水资源承载力综合评价 .....	119
表 7-34 海河流域水资源承载力综合评价等级标准 .....	119

## 前 言

**论文的背景和意义。**目前水资源已成为制约国民经济发展的瓶颈，研究和采取有效措施解决日益短缺的水资源问题是水资源可持续利用乃至社会可持续发展的重大方略。在经济和科技高度发展、人类逐步走上可持续发展道路的今天，人类生活、工农业生产和生态环境保护对水的依赖程度越来越高，一个地区、一个流域的水资源到底能够支撑多大社会规模，就成了制定区域发展规划和目标的基础性尺度和指标，衡量水资源承载力的大小对一个国家或地区综合发展以及发展规模有至关重要的影响。

在水资源可持续发展研究领域，水资源承载力是水资源合理配置的基本度量，也是水资源可持续利用的度量，任何一个关于水与经济社会、水与可持续发展的研究问题都必将涉及到实质上是水资源承载力问题，因此研究水资源承载力是解决度量水资源可持续利用等诸多水问题的需要。

随着人口的增长和经济快速的发展，人们开始认识到人类在享受改造自然过程中取得巨大成就的同时，却同样面临着自然给人类以沉重的报复和教训。环境恶化、水土流失、洪涝灾害以及干旱缺水等给人类发展设置了重重障碍，因此人类不得不重新思考，调整生存和发展方式，人与自然和谐发展就成为必然选择。水资源作为环境和资源要素的双重身分，对自然、生态环境保护起到了核心作用，人与自然和谐共处的关键问题在于人类社会的发展不能超过资源和环境的承载能力，而水资源承载力是核心问题。在人与自然和谐共存的指导方针下，以保护自然、保护地球生命支持系统的承载能力为基础，对水资源承载力理论进行深入的研究，对正确处理好水资源的开发与保护、开源与节流势必起到十分重要的作用。因此水资源承载力的研究，对优化水资源配置，协调区域生态建设、人民生活和工农业发展与水资源的关系，实现区域可持续发展，不仅理论意义重大，而且更具有紧迫的现实意义。

**论文的主旨和目的。**目前对水资源承载力的研究缺乏系统性，对它的研究仍处于探索阶段，从当前研究成果来看，除了水资源承载力的概念与内涵界定不很清楚、水资源承载力理论基础和研究方法缺乏公认和统一认识外，还没有形成一个完整的理论体系。本文将就水资源承载力分析和应用问题进行比较全面和系统的研究，在大量搜集分析资料的基础上，综述国内外有关水资源承载力研究现状和进展，分析资源承载力和水资源承载力研究的起源、目的、方法和方向，发现目前水资源承载力研究的不足，建立研究的方法和过程；分析资源承载力研究相关的基础理论和支撑理论，将水资源承载力的研究恰当地定位，明确水资源承载力研究与可持续发展、生态经济系统和资源承载力的相关关系，指导水资源承载力的概念、内容和研究方法等体系的建立；建立水资源承载力的系统构成和研究模型，提出水资源承载力的研究方法。研究中遵循循序渐进、综合实用的原则，力争提出区别于有关水资源供需预测、水资源可持续利用评价的研究方法，

相应地提出提高水资源承载力的有效途径；在水资源承载力量化和评价方法的基础上，进行流域水资源承载力实例分析，验证研究结果的合理性，并提出解决海河流域水资源承载力问题的建议。

**论文的主要创新。**本选题将可持续发展理论、生态经济系统理论和资源承载力理论同水资源承载力研究充分结合起来，为水资源承载力研究从指导思想到支撑理论以及课题研究分类给予比较恰当的定位；系统地定义了水资源承载力的概念、内涵和目标，提出了水资源承载力的综合研究方法，即将生态环境从承载条件改为承载对象、将定义内涵与结果相对应的综合表达方式，以及采用对目标承载对象的实现概率来表达水资源承载力。做到了定性定量分析相接合、简化和综合相结合、定义和结果表达相对应，有效地解决水资源承载力的度量问题，同时反映出水资源承载力与水利可持续利用和水资源供需预测等研究方法的异同；建立了水资源承载力研究综合分析模型，确定了水资源承载力的基础指标量化和分类指标体系评价方法：以两组测算指标即基础指标和分类指标来度量水资源承载力，基础指标包括人口和水资源供需数量的简单、明确指标，分类指标为反映水资源和承载因素之间的协调程度的一组指标体系，用静态和动态比较和分析来表示水资源承载现状和目标的人口、社会经济和生态环境发展的实现程度；并根据水资源构成的不同，讨论了广义和狭义水资源承载力、水资源相对承载力和绝对承载力的含义和应用；按上述水资源承载力的量化和评价综合分析方法，对海河流域进行了较全面系统的水资源承载力计算和评价，并提出提高水资源承载力的方法和对策；在进行水资源承载力计算边界条件计算过程中，即进行人口、水资源、社会经济和生态环境现状和发展预测中，参照了《现代化研究报告》的定义方法，即采用了各态历经学说和趋势法相结合，确定人口、水资源、社会经济和生态环境的“零增长”为水资源承载力的目标状态，用层次分析法建立了不同时段的水资源承载力的实现概率的计算测定方法。

## 摘 要

在全面分析国内外研究现状的基础上,探讨了水资源承载力分析的必要性和重要意义,研究了水资源承载力的基础理论和支撑理论。系统地分析和定义了水资源承载力的概念和内涵,重点探讨了水资源承载力的定义与量化评价结果的一致性,提出了用满足程度或实现概率来表示水资源对人口、社会经济和生态环境的承载能力的表达方法,并将生态环境系统由承载条件转变为水资源的直接承载对象。在量化方法上进行了重点研究,提出了用量化指标和承载实现程度来表达水资源承载力的量化方式,并详细分析和提供了水资源承载力量化计算方法,有效地解决了水资源承载力量化以及定义与结果的一致性问题。通过研究水资源承载力影响因素以及系统模型分析方法,建立了水资源承载力综合分析模型,确定了水资源承载力的基础指标量化计算和分类指标体系评价的两步骤相结合的综合分析方法,量化指标简单、明确,评价指标全面、综合,静态和动态地表达了水资源承载现状和目标的人口、社会经济和生态环境发展的实现和协调程度。对水资源承载力量化计算所需要的边界条件进行了论述,提供了人口、社会经济、生态环境和水资源供需发展目标趋势与各态历经学说相结合的预测方法。对水资源承载力各子系统构成指标进行了筛选,建立了水资源承载力评价指标体系,经比较选取了层次分析法对指标体系进行评价。对应水资源承载力的分析框架,有针对性地从资源性、结构性、经济性、技术性和管理性方面入手,分析了提高水资源承载力的方法和策略。在分析海河流域水资源开发利用的基础上,根据研究成果,进行了海河流域人口、水资源、社会经济和生态环境发展趋势预测以及水资源供需分析,并进行了水资源承载力量化计算和指标体系综合评价,验证了分析方法的实用性。

**[关键词]** 水资源承载力、可持续发展、水资源可持续利用、量化评价方法、指标体系

## ABSTRACT

On the basis of full analysis of research actuality in China and abroad, this paper probes into the necessity and significance of water resources carrying capacity (WRCC) analysis; investigates the basic and supporting theory of water resources; analyzes systematically the concept and connotation of WRCC with the emphasis on coherence of definitions and quantified assessment results; exhibits WRCC for populations, social-economy and eco-environment by degree of satisfaction and probability of realization; and involves eco-environment system into direct carrying object of water resources. Method of quantification is improved. It is pointed out that quantification method of WRCC may be expressed by quantified indices and realization degree of carrying, and it also analyzes the calculation method of quantification, which effectively solves the problem of measurement and coherence. Based on the analysis of influential factor and system model, it establishes the integrated model, and method of comprehensive analysis which is joined by quantification calculation of basic WRCC indices, and assessment of group index system. The ordinary and specific quantification index, and the comprehensive and integrative assessment index, statically and dynamically express the status quo of WRCC, and the degree of realization and harmony of populations, socio-economy and eco-environment target. It also analyzes boundary conditions of quantification calculation method, proposes prediction method combined with target trends of populations, socio-economy, eco-environment and water resources development regarding supply and demand, and undergoing theory of each form, screens constitutive index, set forth assessment index system for WRCC, and construes assessment approaches of analytic hierarchy process. Started from resources, structure, economy, technology and management, method and strategy for improvement of water resources carrying capacity are illustrated corresponding to WRCC analytic frame. Based on water resources development and utilization analysis of Haihe River Basin, development trends of populations, water resources, socio-economy, eco-environment, and analysis of water resources supply and demand in Haihe River Basin are predicted according to research findings, and implementations of the quantification calculation and index system assessment are carried out to validate practicability of WRCC analysis method.

**Keywords:** water resources carrying capacity, sustainable development, sustainable utilization of water resources, quantification assessment method, index system

# 第一章 绪论

## 1.1 研究背景与意义

水资源是基础自然资源,是生态环境的控制性因素之一;同时又是战略性经济资源,是一个国家综合国力的有机组成部分。探讨21世纪水资源的国家战略及其相关科学问题,是世纪之交全球共同关注和各国政府的重点议题之一<sup>[1]</sup>。目前,水资源已成为制约国民经济发展的瓶颈,国民经济的增长趋势,直接依赖于水资源开发利用决策的优劣<sup>[2]</sup>,研究和采取有效措施解决日益短缺的水资源问题是水利可持续发展以及国民经济可持续发展的重大方略。那么,水资源短缺是如何产生的?水资源短缺是如何对社会经济进行影响的?一定区域的水资源究竟能承载多大的社会发展规模?因此,在人类社会走上可持续发展道路的历史背景下,研究水资源可持续利用、分析水资源对人口、社会经济和生态环境发展的承载力、解决水资源安全问题是我国现代化建设重要而又迫切的课题。

### 1.1.1 承载力抽象概念的起源

承载力,又称承载能力、承受能力,英文为 Carrying Capacity ,或 Bearing Capacity ,最初它是物理学中力学的概念,结构物如地基、柱体、构筑体等根据自身的密度、质量、体型、空间各向尺寸和相对位置等力学特性,对外部或其他结构物的抵抗能力,具有力学中压强的量纲如  $\text{kg}/\text{cm}^2$ 、 $\text{N}/\text{cm}^2$ ,是衡量结构物内在构成和联系的属性,反映结构物对外部环境贡献的相对能力的大小。如土力学中基础承载力,表示某种岩土地基单位面积对外界物体的承受能力。随着科学的发展、人类文化的进步和思想观念的更新,承载力的概念逐渐延伸到心理学、环境、生态、资源等领域,如俗称的心理承受能力、生态承载能力、经济承载能力、资源承载能力、土地资源承载力等等,它们已经没有了力学的量纲,是抽象的概念。这些概念虽然都有一个共同的含义,即试图表达出受体对载体的贡献大小,但在各个领域都有各自特定的、狭义的定义,量纲、表达方式并不统一。

从物理概念到生态、资源的抽象概念,承载力经过了逐步演化的复杂过程。承载力抽象概念的起源可以追溯到马尔萨斯时代,马尔萨斯是第一个看到环境限制因子对人类社会物质增长过程有重要影响的科学家,他的资源有限并影响人口增长的理论不仅反映了当时社会形式,而且对后来的科学研究都产生了广泛的影响<sup>[3]</sup>。随后用容纳能力指标反映环境约束对人口增长的限制作用可以说是现今研究承载力的起源,在人类活动与生态环境之间的矛盾关系日益突出的今天,人们意识到人类社会系统只是生态系统的一个子系统,人类社会系统结构和功能的好坏取决于生态系统的结构和功能的状态,生态系统提供的资源和环境支撑起整个人类社会系统。因此在讨论生态系统所提供的资源和环境与人类社会系统之间的关系时,突破了以前的环境容纳能力的概念,提出了承载力这一抽象的概念。

最初借用承载力一词的其他学科是群落生态学<sup>[3]</sup>，其含义是“某一特定环境条件下（主要指生存空间、营养物质、阳光等生态因子的配合），某种生物个体存在数量的最高极限”。承载力理论在实践中的最初应用领域是畜牧业。在北美、南美及亚洲草原地区，由于草地开垦、过度放牧等原因，土地开始退化，为有效管理草原和取得最大经济效益，一些学者将承载力理论引入到草原管理中，随之草地承载力、最大载畜量等相关概念相继被提出。随之出现的另一概念是土地承载力，这一概念的提出是在全球人口不断增加，耕地面积日趋减少，人类面临粮食危机的背景下产生的。同样人口的增长和工业化的快速发展使资源的消耗急剧增加，承载力的概念逐渐被资源领域所采纳。水资源承载力是随着全国乃至全球范围内水问题的产生、水资源的紧缺严重影响了人类发展的情况下应运而生的。

### 1.1.2 水资源承载力研究的必要性

#### 1.1.2.1 研究水资源承载力是确定流域或区域社会发展的基础和前提

水是人类社会赖以生存和发展的基础。水是生命之源，是人类和一切生物赖以生存和发展的而又不可替代的自然资源，又是自然环境的重要组成部分。水作为资源，为人类提供生活用水，没有水人类就不能生存。同样，水也是人类进行创造财富生产的必不可少的基础资源，工农业生产、水利发电、航运、养殖以及娱乐环境等等都离不开水。

人类文明的发展都与水有着不可分割的联系，世界上几乎没有一个文明发源地不是傍依河湖而发展起来的<sup>[4]</sup>。古埃及文明孕育于尼罗河，古印度文明发源于恒河，古巴比伦文明诞生于底格里斯河和幼发拉底河两岸，而黄河则成为孕育中华文明的母亲河。水利兴而天下定，天下定而人心稳，人心稳则百业兴<sup>[5]</sup>。在与水旱灾害的斗争中，人们对水的开发利用从朴素的自发行为逐渐上升为有理论指导的自觉行为，善治国者均以治水为重，或者说善为国者必先除水旱之害，治水成为历代统治者治国平天下的头等大事。无论是秦皇汉武、唐宗宋祖，还是清朝的康熙、乾隆皇帝，每一个有作为的统治者都把水利作为治国安邦的大事<sup>[6]</sup>。水利自古以来就是人类生存的基础产业，通常讲的中华民族的历史是水文化的历史，反映出水对人类社会进步的巨大作用。人类社会的发展史，就是对水的认识和利用斗争的历史。从西方《圣经》中关于“诺亚方舟”的传说，到中国古代的“大禹治水”，人类治水的传统与人类的历史一样源远流长。

在人类进入了高度发展的工业时代和即将进入信息时代的今天，水资源已成为制约人类社会发展的瓶颈。如果说过去一个地区由于水的问题造成社会兴衰是“盲目”的自然法则的话，那么在科技高度发展的今天，就需要“精确”的、“可预见”的自然规律了。国家生产力布局和地区社会经济的发展是一个地区的地理位置、资源条件（包括水资源）和社会条件的综合产物，水资源是其中的重要条件<sup>[7]</sup>。因此，现今工业、农业、生活和生态环境的发展对水的依赖程度越来越高，一个地区、一个流域的水资源到底能够支撑多大社会规模的现状和发展，就成了制定区域发展规划研究的基础性的尺度和指标。衡量



水资源承载力的大小对一个国家或地区综合发展以及发展规模有至关重要的影响。

#### 1.1.2.2 研究水资源承载力是解决度量水资源可持续利用等诸多水问题的需要

如何解决水资源可持续利用、水资源合理配置的度量问题是当今水利界普遍关心和研究的热点课题<sup>[8]</sup>。目前,社会可持续发展理论仍然偏重于定性分析,缺少权威性的定量分析模型,在定量上如何评价和把握人口、经济、资源和生态环境等主要考核指标之间是否在协调发展的范围之内仍是待深入研究的问题。社会可持续发展主要是一种政策导向和指导方针,而构成其要素的各方面的可持续发展研究也存在着类似问题。资源的可持续利用是社会可持续发展研究的重要方面,资源承载力是资源可持续发展度量的核心问题之一。同样,在水资源可持续发展研究领域,水资源承载力是水资源合理配置的基本度量,也是水资源可持续利用的度量,任何一个关于水与经济社会、水与可持续发展问题都必将涉及到实质上是水资源承载力问题,各种研究方法只是突出重点和表现形式不同。

通俗和直接的表达水资源社会需求的描述是:在一定的限定条件下,可再生利用的水资源究竟能够支撑多大规模的社会经济发展?也就是说:水资源对社会到底有多大的承受能力?因此,水资源承载力比水资源可持续发展、水资源可持续利用、水资源与国民经济协调发展等说法更能明确地表达水资源有用性的含义。以往研究的水问题偏重于宏观、定性分析,水资源承载力则偏重于定量分析,注重可操作性。

#### 1.1.2.3 研究水资源承载力是谋求人与自然和谐发展规律的基本内容之一

界限或阈值是自然界普遍存在的客观问题。构成人类生存物质基础的资源、生态和环境都在某种程度上存在量和度的界限,水是资源的一种,尽管是可再生的资源,但仍有限和短缺的资源。很久以来,人们错误地认为由于水循环的往复进行,水是取之不尽、用之不绝的,在人们的思维方式和保护力度上都没有采取更有效的预防措施,致使目前水资源短缺成为世界性问题。

生态系统退化存在界限。人类生存依赖能够持续提供生存资源的健康的生态系统,但是,现存的社会、经济增长模式,和资源的消耗利用方式逐渐对生态系统造成越来越大的压力。环境破坏、生物种类减少、乱伐森林和社会经济系统危机等都显现出生态系统退化的迹象。受资源过度开采的威胁和废物排放超过吸收能力的影响,生态系统会逐渐失去恢复弹性并可能突然崩溃变成另外一种缺少恢复弹性的不同状态的系统。这说明生态系统退化存在一个界限,当降低的程度达到这一界限时生态系统就会破坏<sup>[9]</sup>。承载力的概念能够解释和度量这一关键界限或阈值问题,承载力表示在不降低自然环境质量以及社会、经济和文化系统水平的前提下,生态系统所能支撑的有限人口数量,是一种间接量度方法反映生态系统能够维持破坏的最大水平。人类活动应限制在承载力范围之内,系统才能维持持续稳定的发展<sup>[10]</sup>。

发展是人类永恒的主题,是人类满足自身需要的实践活动的全部过程和结果<sup>[11][12]</sup>。资源是人类社会生存的物质基础,人类是通过开发利用资源、利用科技手段创造财富满

足自身之所需。人类从原始社会的刀耕火种，到现代农业的优质高产，从小手工业的简单社会化生产，到工业革命带来的高效的工业化，人类从发展和经济效益中得到了满足，骄傲地面对着取得的巨大物质和精神财富。人类本性决定了人类要靠自身的智慧和力量，获取更多的知识和财富。今天，人类面临环境退化与经济发展两难境地<sup>[13]</sup>，但是，不论面临的困难和危险有多大，人类总是不断探索和完善自己，得到更好的生存环境和利益，满足自己日益增长的物质和文化需求，在发展中找生存、在发展中谋求更大的发展。

人与自然必须和谐共存。面临环境的破坏和资源的短缺，人类正逐步审视和改变着与自然的关系。人类正在走过工业化时代，并逐步进入信息化时代，从传统的粗放式经济发展模式逐渐向集约发展模式过渡，经济的全球化、信息化、知识化和市场化已成为不可逆转的大趋势<sup>[14]</sup>。然而，传统的经济观念造成资源的大量浪费和过度消耗，因为传统的经济理论和经济指标，对经济如何破坏和摧毁地球的自然系统不做解释<sup>[15]</sup>，人类认为资源没有价值，是取之不尽用之不竭的，人类通过自身的智慧和能力，与天斗与地斗，能够改造自然。然而，随着人口的增长和经济取得了快速的发展，人们开始认识到人类在享受改造自然、战胜自然的过程中取得了巨大成就的同时，却同样面临着自然给人类以沉重的报复和教训。环境恶化、水土流失、生态失去平衡、沙尘暴连年增多、洪涝灾害、干旱缺水等给人类发展设置了重重障碍，因此人类不得不重新思考，调整生存和发展方式，改变与自然对立的思维、把自然作为朋友，人类与自然应成为对象型关系，而不是谁战胜谁的问题。资源是有限的也是有价的，人与资源必须和谐共存，共同发展。

水资源作为基础的自然资源，由于得不到合理利用，导致产生各种危害人类社会本身的生态与环境问题，进而制约人类社会经济的发展，此时人类社会就进入既要学会合理用水，又要保持与水相互协调的阶段<sup>[16]</sup>。因此，研究水资源有关社会、经济和生态环境方面开发和利用的界限问题，就是水资源的承载力问题，正确处理好水资源的开发与保护、开源与节流问题的关键是在人与自然和谐共存的指导方针下，以保护自然、保护地球生命支持系统的承载能力为基础<sup>[17]</sup>，走可持续发展的发展模式。

#### 1.1.2.4 研究水资源承载力是延伸资源承载力理论的需要

自然资源是人类赖以生存和发展的物质基础，无论是可再生的自然资源，还是不可再生的自然资源都是有限的<sup>[18]</sup>，因此存在着界限问题，也就是资源承载力问题。分析和评估各种资源对可持续发展的支持能力，特别是找出瓶颈资源的承载能力是可持续发展研究的一项重要内容<sup>[19]</sup>。承载力概念的演化与发展是对发展中出现问题的反应与变化结果。研究和完善资源承载力理论必然需要资源的各构成要素的承载力问题，在不同的发展阶段，产生了不同的承载力概念和相应的承载力理论。如针对环境问题，人们提出了环境承载力的概念，针对土地和水资源短缺问题，人们提出了土地资源承载力和水资源承载力的理论。

资源承载力是表达资源对人类社会和经济发展支撑能力的明确指标，能反映出资源对人类社会和经济发展的贡献和限制，能够动态表达人类社会和经济发展不同时段的状态。

况和变化趋势。水资源承载力是一个国家或地区持续发展过程中各种自然资源承载力的重要组成部分。水资源承载力理论研究和实践对资源承载力理论的完善有不可替代的作用和支撑。

#### 1.1.2.5 研究水资源承载力是水资源研究理论的拓展

水利发展理论研究是逐步深化的。随着人类社会的进步和科技的发展,经济全球化和资源和环境问题日趋严重,水利事业已演化到了目前以防洪、供水、排水、灌溉、发电、航运、养殖、水土保持和美化生态娱乐环境等为主要任务,为国民经济提供水量、水能和旅游等水商品和水服务为主要目的的理论研究、工程建设和管理及政策等更广大的范围<sup>[20]</sup>。可见,水问题的研究范围和深度在不断扩大,从工程水利扩展到资源水利,再到水资源、社会、经济协调发展的理论和方法研究;从当代水资源的供给和需求的配置研究扩展到代际配置问题;从国家、地区水资源问题扩展到全球性的水资源问题。相应地,其研究内容和方法也是随历史发展和人类认识水平提高而逐步深化的,水利理论也是从偏重于定性分析的水利可持续发展、水资源合理配置、水资源可持续利用理论,发展到了定性定量分析相结合的、偏重于定性分析的社会经济系统水循环研究、水安全问题和水资源承载力等理论的研究。过去,我国水利行业重点研究的是工程水利,以建设水利工程来进行防洪、供水、排水、灌溉、发电、航运、养殖,来满足相对低水平的经济发展。目前,在经济高速发展、资源短缺和生态退化的环境下、以及可持续发展的理念应运而生的背景下,水利工作的重点已由增加供给转变为需求管理,水利行业研究的热点问题是水利可持续发展。将来,为适应新时期人类社会和经济发展状况,新的水利理论和研究课题必将出现,新理论、新事物的出现总是对过去理论、事物的扬弃。

准确划分和理解水利事业的主要任务和研究理论,有助于揭示新的水利研究课题和解决不同性质问题的针对性。目前水利行业热点问题是水利可持续发展、水资源可持续发展、水资源可持续利用、水安全问题、社会经济系统水循环研究、水资源合理配置和水资源承载力研究等。这些研究内容实际上都是相互交叉相互联系的研究问题,有些属于宏观与控制的理论范畴,有些是微观和具体的支撑理论。无论实行水资源可持续发展,还是保证水资源安全,都应力求达到水资源合理配置,将水资源的开发和利用控制在水资源承载力范围内。

水利可持续发展是指使水事活动既满足当代人的需求,又不损害后代人满足其需要的能力的水利发展<sup>[21]</sup>。它是可持续发展思想在水利行业的具体应用,是关于水问题研究的诸多问题的指导思想。水利可持续发展包括水利工程的建设与管理,也包括水资源的优化配置与调度,还包括各类水利法规的建立与完善,水利科技发展与人才培养,水知识的传播及其他相关的水事活动。

水资源可持续利用定义为水资源持久地利用,不仅要满足当代人的用水需求,而且又要为后代人继续利用创造条件,维持世代代的持续利用<sup>[22]</sup>。水资源可持续利用重点体现水资源在同代人之间和下一代人之间公平使用,使可利用水资源的数量和质量满足

人口增长和经济发展的需要，以及地区人均用水量差别的缩小、各用水部门之间合理配置的前提条件下，使水使用的经济效益、社会效益和生态环境效益最大化。

社会经济系统水循环研究指社会经济系统对水资源的开发利用及各种人类活动对水循环的影响<sup>[23]</sup>。包括水资源社会经济研究、人类活动对水循环的影响、水循环、水资源可持续管理和综合管理等内容。

水安全问题指相对人类社会生存环境和经济发展过程中发生的水的危害问题<sup>[24]</sup>。洪涝灾害、干旱缺水和水污染问题是目前水利制约中国可持续发展的主要因素，并经危及人类基本环境和生存问题和国家发展利益的安全问题。水资源安全问题是水安全问题研究最为重要的一个方面，是指水的供需矛盾产生对社会经济发展、人类生存环境的危害问题。

水资源合理配置是在一个特定地域内，以可持续发展为原则，通过工程与非工程措施对不同形式的水资源在各用水户之间进行的科学分配<sup>[25]</sup>。水资源合理配置是研究如何利用好水资源，是由工程措施和非工程措施组成的综合体系实现的，对水资源这一稀缺资源进行分配时要求目标、愿望和效益最大化。

水资源承载力的研究目的是试图以水资源这单维资源作为约束条件来反映水资源对社会、生态环境和经济的贡献，从一个侧面来表征水资源与社会、生态环境和经济的协调发展特性，是水资源可持续利用的量的限制和测度。水资源承载力是关于人口、水资源、社会经济和生态环境多方面的内部特征和相互关系的综合指标，是研究人口、水资源、社会经济和生态环境等方面的边缘学科。水资源承载力体现可持续发展的基本思想。水资源承载力代内公平指水资源在现状条件下，水资源对人口、生态环境和经济的支撑能力，静态地表现水资源与人口、资源、环境的协调关系。水资源承载力代际公平指水资源在不同时间断面的状态下，水资源对人口、生态环境和经济的支撑能力，动态地表现不同时期、不同技术条件和不同经济发展水平下的水资源与人口、资源与环境的协调关系。水资源承载力体现资源承载力基本特点，按生态经济系统理论，反映水资源供给和需求为约束条件的社会、生态和经济运行规律。

上述理论实际上是水利可持续发展研究的本质相同、目的相同、表现形式不同和侧重点不同的代表性理论，涵盖了水利主要任务的各个领域和水的质、量、时、空不断变化的规律性。水资源可持续利用是可持续发展观点在资源可持续发展方面的具体应用，水资源合理配置、水资源承载力和水安全等问题是水资源可持续利用的具有工程特点、经济特点、和水循环特点的、反映不同切入点的研究方向。无论采用那种侧重点不同的研究方法，都必须利用社会科学、自然科学和技术科学对水的发展规律加以思考和研究，弄清水与人的关系，人类可利用水资源在自然科学和技术科学的不断发展过程中的变化情况，以及社会经济发展对水的需求增长程度和性质的变化方式和程度。

### 1.1.3 理论意义

(1) 系统地探讨资源承载力的一般概念、内涵和理论。通过分析可再生资源 and 不可再生资源承载力的不同特性, 审视资源承载力研究对深化资源合理配置理论的必要性; 明确资源经济的局限性、以及环境和自然资源的长期承载能力对经济可持续发展的重要性。

(2) 突破长期以来水资源承载力理论的局限性, 深化和完善水资源承载力的概念、内涵和理论研究。通过水资源承载力分析不仅揭示水资源对人口、经济和生态环境可持续发展的支撑和制约的作用机理, 建立一套水资源这一基础支撑资源如何影响和改变经济结构的机理分析方法, 更重要的是通过研究水资源这一单一资源的承载力的特点, 反映生态经济大系统中各要素之间的相互依赖和共同发展的关系。

(3) 分析界限或阈值在人类社会发展中存在的必然性, 从而揭示发展和保护的辩证关系、以及和谐共存的客观规律性。水资源承载力是界限或阈值理论在水问题方面的具体应用, 在水资源的有效开发、利用和治理的同时, 特别要重视水资源的优化配置、节约和保护问题。

(4) 探讨水资源可持续发展诸多研究问题的量化分析方法, 完善水资源研究理论。通过初步探讨水资源承载力的技术经济分析方法、以及水资源绝对和相对承载力的概念, 为拓展了水资源承载力分析方法、建立起统一的水资源承载力研究理论提供一定帮助。

#### 1.1.4 实践意义

目前我国一半以上城市的发展受到水资源短缺的制约, 因此对这些作为当地政治、经济、社会发展中心所主导的地区水资源承载力进行研究, 优化水资源配置, 协调区域生态建设、人民生活、工农业发展与水资源的关系, 实现区域可持续发展, 不仅理论意义重大, 而且更具有紧迫的现实意义。

(1) 通过水资源承载力评价, 建立水资源对社会进步和经济发展的支撑理论, 为我国建立小康社会提供理论支持和政策导向。

(2) 明确水资源承载力是区域社会经济发展的基础和前提条件。一个流域、一个经济管理行政区域根据地域内水资源时、空、质、量分布特性和变化规律, 人口、环境、社会经济发展现状和趋势, 以及技术、管理水平和能力, 不断分析、测算水资源承载力, 建立水资源对人口、社会经济和生态环境的支撑和预警系统, 不断调整发展方向和节奏, 协调社会经济的健康稳定的发展。

(3) 作为后起国的发展优势, 避免重蹈先污染后治理的覆辙。我国经济发展还处于社会主义初级阶段, 属发展中国家, 但我们正可以借鉴发达国家经济发展的经验和过程, 调整经济发展的节奏和步伐。在解决好经济发展与资源环境保护的关系问题上, 就应在经济发展之初, 从总体上做好环境规划, 对人们的经济活动提出合理的安排<sup>[26]</sup>。为此, 应该研究环境对人们活动的承受能力, 使人们的活动对环境造成的压力不超过环境对人们活动的承受能力。水资源作为环境和资源要素的双重身分, 对它的承载力理论进行较

深入的研究，为环境规划工作提供科学的依据，势必起到十分重要的作用。

## 1.2 水资源承载力研究现状综述

### 1.2.1 国外研究现状

目前，国际上水资源承载力的单项研究成果较少，大多将其纳入可持续发展理论中<sup>[27]</sup>，或者仅是在可持续发展问题中得到泛泛的讨论。国外往往使用“可持续利用水量”<sup>[28]</sup>、水资源的生态限度或水资源自然系统的极限<sup>[29]</sup>、水资源紧缺程度指标等来表述类似的涵义，且一般直接指天然水资源数量的开发利用极限<sup>[30]</sup>。

国际上水资源承载力的研究少但关于承载力的研究很多，目前，承载力概念在人口、自然资源管理及环境规划和管理等领域都得到了广泛的应用和研究。总的来说，国际上除进行单项承载力如土地承载力、旅游承载力、生物种群承载力等问题外，大多研究的是承载力的宏观概念，多限于承载力的广义研究，如人口承载力，地球承载力、环境承载力和生态承载力等概念。其中承载力研究重点在人口承载力方面，地球上的各种资源和生产潜力最大能支撑多少人口，在土地承载力的概念、内涵和量化模型等方面也取得了很多的成果。

关于承载力的研究主要有两个研究领域：一是在应用生态学中，承载力概念用于特定栖息地、生态系统如牧场、野生动物的管理以及旅游管理等领域<sup>[31]</sup>；二是在人类生态学中，承载力被用来讨论人口增加、消费水平提高的生态影响和限制<sup>[32][3]</sup>，从具体应用上，还可主要归纳为自然资源或环境对人口的承载力、某生境对特定生物的承载力和娱乐旅游承载力等三类<sup>[30]</sup>。另外，有些研究讨论的是承载力在经济领域和生态领域的概念界定问题，经济学家认为自然对人类的发展是有限制的，强调发展的重要性，而生态学家则强调生态、资源和环境都有承载力问题，强调人类不可无限发展<sup>[33]</sup>。概括而言，(自然资源或环境对人口的)承载力是一个与资源禀赋、技术手段、社会选择和价值观念等密切相关的、具有相对极限内涵和伦理特征的概念，它本质上是不固定的、非静态的和非单一关系的<sup>[30]</sup>。

很多文献认为承载力的概念来源于生态学的研究。早在 1921 年帕克和伯吉斯就在有关的人类生态学研究，提出了承载力的概念。他们认为，可以根据某地区的食物资源来确定区内的人口承载力<sup>[34]</sup>。世界上研究承载力问题是在 20 世纪 60 年代末、70 年代初逐渐多起来，原因是人口急剧膨胀和经济快速增长造成世界范围内食品、饮用水等资源出现严重短缺的情况。70 年代后期和 80 年代初期，联合国粮农组织（FAO）和教科文组织（UNESCO）先后组织了承载力的大型研究，提出了一些承载力定义和量化方法。80 年代后期，可持续发展概念和思想得以提出，承载力被认为是它的一个固有方面，并与之相结合而获得新的发展<sup>[30]</sup>。1995 年，诺贝尔经济学奖获得者 Arrow 与其他国际知名的经济学家和生态学家一起，在 Science 上发表了“经济增长、承载力和环境”一文<sup>[35]</sup>，在学界和政界均引起极大的反响，美国生态学会 (ESA) 更是以此为主题，在 1996 年的

Ecological Applications 组织了由众多专家参加的国际性研讨论坛引起了承载力研究的新热潮<sup>[30]</sup>。

对承载力的研究最具影响的应该是马尔萨斯的人口理论和 Meadows 等人的《增长的极限》所反映出的思想内容。18 世纪末期, 马尔萨斯发表了著名的《人口原理》, 为承载力概念赋予了现代性内涵, 并带来了深远的影响<sup>[36]</sup>。关于承载力概念的起源可以追溯到马尔萨斯时代, 马尔萨斯是第一个看到环境限制因子对人类社会物质增长过程有重要影响的科学家, 他的资源有限并影响人口增长的理论不仅反映了当时社会形式, 而且对后来的科学研究都产生了广泛的影响<sup>[37]</sup>。因此, 承载力的研究一般基于马尔萨斯的人口理论之上, 马尔萨斯理论的核心, 一是人类生存的基础是食物, 只要有足够的食物, 人类就可以持续地发展下去; 二是人口增长是按几何增长的; 三是生产发展如食物等是线性增长的。基于此人口的膨胀必将超出资源的生产和供给, 人口发展是有极限的, 相对而言食物生产对人口是有承载能力的。Meadows 等人所著的《增长的极限》所提出的全球性问题, 如人口问题、粮食问题、资源问题和环境污染问题(生态平衡问题)等, 早已成为世界各国学者专家们热烈讨论和深入研究的重大问题。这些问题也早已成为世界各国政府和人民不容忽视, 亟待解决的重大问题。对此, 在思想上必须高度重视, 在实际行动上必须高度负责, 切实解决, 否则, 人类社会就难以避免在严重困境中越陷越深, 为摆脱困境所必须付出的代价将越来越大<sup>[38]</sup>。

水资源承载力是承载力概念在水资源领域的具体应用, 是承载力与水资源研究的自然结合。虽然国外水资源承载力单项研究少, 但可以吸取承载力研究的方式方法, 为水资源承载力的研究提供借鉴和帮助。下面是几个有代表性的有关于承载力的定义和应用的论述。

Joardor 等从供水的角度对城市水资源承载力进行了相关研究, 并将其纳入城市发展规划当中<sup>[39]</sup>; Harris 着重研究了农业生产区域水资源农业承载力, 将此作为区域发展潜力的一项衡量标准<sup>[40]</sup>。Rijiberman 等在研究城市水资源评价和管理体系中将承载力作为城市水资源安全保障的衡量标准<sup>[41]</sup>。Hardin 和 Daily 等还进一步提出了生物物理承载力(Biophysical carrying capacity)<sup>[42]</sup>、文化承载力(Cultural carrying capacity)和社会承载力(Social carrying capacity)等概念<sup>[43]</sup>。Saro<sup>[44]</sup>就地中海的海生物喂养承载力进行了研究, Albert<sup>[45]</sup>、Antonio<sup>[46]</sup>、Willem 在可持续发展--全球重组<sup>[47]</sup>一文中研究了环境承载力问题。Roy<sup>[48]</sup>探讨了地球承载力问题, Satoru<sup>[49]</sup>探讨了生态承载力问题, Richard<sup>[50]</sup>通过分析水环境给人类带来娱乐活动, 探讨了生态承载力问题, Antje<sup>[51]</sup>探讨了牲畜承载力问题, Michael<sup>[52]</sup>探讨了鸟类承载力问题, R.L. Burdett<sup>[53]</sup>探讨了铁路承载力问题。F.Szabo 在牛场可持续养殖<sup>[54]</sup>的论文中分析了牛场的饲养承载力问题。

美国国家研究协会 NRC 对 Florida Keys 地区进行了承载力分析, 研究内容包括建立一个能够为当地和政府提供技术工具的承载力模型, 以便确定 Florida Keys 地区的生态系统以及各种构成子系统的抵御逐步增加的土地开发活动的影响<sup>[55]</sup>。

在 Joardor 的印度城市基础设施规划的承载力和标准一文中这样论述<sup>[39]</sup>，根据合理的标准对城市中心基础设施开发进行实际承载力的细致评价，这对确定建设规模和投资是非常必要的，这不但能够为居民提供最低标准的生活保证，也能为跨地区潜在的城市工业发展需求提供支撑。跨地区城市工业可持续发展需要通过供给管理和需求管理策略降低供需差距或基础设施资源的承载能力。该论文尝试建立一组城市关于供水和污水处理设施承载力指标以及相关的参数，这些指标和参数应能够量度城市的基础服务。在跨地区城市可持续发展规划中，应预先建立这种应用承载力的量度框架。

在 Kammerbauer 的热带山区发展指标建立和自然资源政策设计应用一文中论述到<sup>[56]</sup>，当传统的耕作方式使流域承载力达到生态极限时，就必须建立新的可持续发展策略性。也就是说，由于人口增长和有限的耕地面积，传统的耕作方式需要逐渐抛弃。

D.Sun 和 D.Walsh 在澳大利亚娱乐和旅游对环境影响<sup>[57]</sup>一文中强调了对影响研究和管理应在环境承载力评价和人的活动对场地和资源产生影响的风险评价的基础上进行。

在 William 的再论承载力—区域可持续发展指标<sup>[33]</sup>一文中，定义了人口承载力为在不损害生态系统的生产和功能的整体性而使人类持续生存的条件下，资源利用和消耗的最大速率，这一定义告诉我们，不管技术水平如何，人类依靠自然提供的各种生态物质和服务来保持可持续发展，前提是随着人口和人均资源消耗量的增长，这些物质和服务也能在数量上满足需求。

在 Wetzel 的给地球定尺寸--识别经济承载力一文中指出<sup>[58]</sup>，经济承载力定义为可持续生态系统所能提供的最大地球经济福利，有限土地的生态系统特性和经济变革的现状决定了地球的经济承载力。

2000 年 3 月，在荷兰海牙(Hague)召开了“第二届世界水论坛及部长级会议”。会议主题是：水的安全：从洞察到行动，全世界 140 多个国家首脑或部长，3000 名科学家出席会议。海牙(Hague)部长级会议声明中提出了，并在南非约翰内斯堡的联合国可持续发展政府首脑论坛上秘书长题为：没有水就没有未来<sup>[59]</sup>(No Water No Future :A Water Focus For Johannesburg)的讲话中强调的，21 世纪水安全面临 7 个主要挑战(The seven challenges of The Hague Ministerial Declaration, March 2000):(1) 满足基本需求(Meeting Basic Needs): 通过水管理的有效途径，使人类认识到安全充分的水供应和卫生环境是人类基本需求，也是健康和安宁的关键，尤其是对妇女。(2) 保障食品供应(Securing the Food Supply): 通过食品生产的更有效的宣传和利用，以及更合理的用水分配，提高食品安全，尤其是贫穷落后人群的食品供应。(3) 保护生态系统(Protecting Ecosystems): 通过水资源的可持续利用，确保生态系统的完整和健康。(4) 共享水资源(Sharing Water Resources): 通过流域可持续利用和其他合理的途径，促进不同层次、不同时期、流域内和流域间、不同国家等各水用户间的稳定的协作和发展协同。(5) 处理灾害(Managing Risks): 提供防范洪水、干旱、污染和其他水害的安全



措施。(6) 重视水的价值(valuing water): 水管理朝向反映水使用的经济、社会、环境和文化等价值, 并逐步形成反映水供给成本的水价核算体系。这一发展趋向应考虑用水公平性和贫穷落后人群的基本需求。(7) 科学管水(Governing Water Wisely): 确保良好的管理, 以使全部水事有关的公共设施和利益都纳入水资源管理的范畴内。

Kyushik 的使用城市承载力评估系统决定发展密度<sup>[60]</sup>文章中论述了城市承载力问题。随着城市人口的增长, 以及过度发展和集中, 现有设施已不能为过度的人口提供良好的服务, 环境问题尤其是空气和水污染问题, 已经成为城市规划首要考虑的问题。解释这些环境问题, 引入承载力的概念管理城市问题是比较实用的方法。它的研究目的是建立一个根据现有设施和土地使用密度能够评估城市承载力的综合研究框架。

Neil Mitchell 的理性的风景决策: 提高可持续土地管理的适度气候景观分析的工具<sup>[61]</sup>一文中, 分析了土地可持续管理和开发的复杂性。在 GIS 技术的成熟发展的情况下, 导致了土地的可持续使用规划的精细化, 超出了人们直观控制当地活动的的能力, 所以开发一种适度的分类技术帮助管理着制定简化的基准去控制适度的可持续土地使用是必要的, 只有简明的方法能识别环境的开发限度, 才能达到土地的可持续利用和不超出当地环境的承载力范围内。

Shaleen 在印度工业开发区的规划管理<sup>[62]</sup>一文中论述到, 目前工业开发区被许多国家当作发展策略的一个重要部份, 在较小区域和非计划性的大面积工业开发区的集中建设, 对环境造成的影响会成为对地方和全球性的可持续发展严重的威胁。论文探讨了工业和谐发展和承载力概念的相关关系, 提出了基于承载力、绿色工业城镇构想和工业开发区环境评价系统的印度综合工业开发方式。

Anthony 的人口、环境、疾病和生存<sup>[63]</sup>一文中论述到, 人类在探讨可持续发展的实质, 逐渐地我们意识到人口的健康不但是社会经济发展的产物, 而是实质性的可持续发展的结果。长久以来疾病和长寿反映出了环境的条件的变化以及承载力的存在, 人口的增长和消费的压力开始严重损害地球的生存环境系统。指出人口健康科学才是对可持续发展工程的关键贡献。

Roberta 在城市发展经济--生态模型<sup>[64]</sup>一文中, 探讨了城镇可持续性发展的规模问题, 并提出了城市承载力的概念。

Dieter Schuller 在德国西北地区农业的可持续土地使用<sup>[65]</sup>一文中论述了土地的可持续使用问题, 指出研究生态稳定性与农业精耕细作的平衡问题是德国西北地区土地可持续使用的恢复工程, 遵循的原则在于要使土地可持续利用, 先决条件是满足土地的承载力允许的调整范围。

Gerhardus 在农村可持续发展的关键环境指标<sup>[66]</sup>一文中指出, 可持续发展规划一定要根据有效定义发展潜力和环境限制的环境和生态的响应标准。文章讨论了自然资源生产承载力的定义和基础准则的作用, 以及清楚地定义环境的污染极限或影响标准用来定义公众的危险宽容极限和承载力限制是非常必要的。

Jeroen 空间的可持续性：贸易和指标：生态足迹的评价<sup>[67]</sup>一文中论述到，目前可持续发展框架和指标体系的研究很多，但象空间尺度和国际贸易的作用却没有引起特别的重视，因此采用生态足迹的方法强调生态和经济分析指标中贸易对环境的积极和消极的影响。

Asa Sundkvist 在能量流分析做为研究可持续发展社会的工具<sup>[68]</sup>中，通过瑞典一岛屿的能量法实例分析，指出为取得社会可持续发展，需要有效的工具分析人类活动和生态的关系以及自然资源的承载力，经过估算能量和资源分析，该岛屿的社会消耗以超过了它的承载力，并为其发展提出了建议。

Khanna 在承载力是可持续发展的基础<sup>[69]</sup>一文中，指出承载力的概念是可持续发展研究的工具，定义地区承载力为，在保持目标的环境质量和生态健康的前提下，为取得更高的公平性的生活质量，当地有限的资源能够生产设想产出的能力。

Kathryn 在新的生态足迹方法用于新西兰经济研究<sup>[70]</sup>一文中，指出可持续发展研究的主要难点是缺少可靠的量度可持续发展目标进程的指标，生态足迹方法是一种评估一定人口一定资源消耗水平下用地范围的有效方法。

Jan 在基于风险分析的生命周期影响评价<sup>[71]</sup>中，研究了消耗品供应和污染吸收的环境的承载力对于预测开发和污染水平进行生命周期影响评价的方法问题。

Ni-Bin Chang 在多目标模糊评价方法在水库优化管理中<sup>[119]</sup>的应用一文中，用土地承载力和水库同化能力作为系统分析中使用的两个主要界限，并用多目标模糊评价进行评价，比较成功地反映了系统的复杂性和可靠性的管理特点。

Khanna 在环境科学融入政策优化<sup>[72]</sup>一文中，论述了可持续发展概念的出现，引起人类意识到发展必须在生态环境承载力的限度以内取得和谐发展，以承载力为基础的规划发展是根据生态承载能力协调发展目标的战略之一。

海洋渔业的环境影响：面向可持续发展的未来<sup>[73]</sup>一文，论述了海洋渔业要实现可持续发展，海洋的污染一定不超过水体的承载力。

Ernest 的工业生态学和工业化生态系统<sup>[74]</sup>一文论述到，工业生态是一种新兴的环境管理框架，目的是寻求向工业化系统转化，以满足投入产出都应满足地球和当地的承载力。

Kessler 的人口承载力的概念在半干旱地区土地使用的生态可持续评价中的应用<sup>[75]</sup>一文中，比较详细地描述了承载力的概念。承载力来源于动物生态学，并广泛应用到各种管理领域用于评价可持续生存问题，土地承载力定义为在不造成土地退化而使可持续发展的可再生资源的最大开发水平。人口承载力也是基于自然资源的可持续供应和生态系统的弹性界限。

基于承载力的可持续发展：一种环境保护的战略<sup>[76]</sup>一文，指出经济发展没有与环境可持续性相一致而造成环境退化的加速，承载力概念的出现为使生物、社会经济和环境系统的综合开发和规划以达到可持续的环境要求提供了一种框架。

面向可持续的发展发展<sup>[77]</sup>一文,探讨了可持续发展的概念和条件问题,也探讨了可再生资源的最大可持续产量、地区承载力和水体的同化容量问题。

Bill 环境影响评价:拓宽的分析框架<sup>[78]</sup>一文,指出拓宽环境影响评价的分析框架应包括准则和框架的制定须在生态环境可持续发展的指导思想下进行,并使最终目的达到人类活动范围不能超出环境的承载力。

Bryan 转变澳洲的监督和政策应用达到可持续发展<sup>[79]</sup>一文,讨论了澳洲的可持续发展问题应通过经济评价、政策规划、环境评价和污染控制来实现,特别强调了污染的控制应根据环境吸收废物的承载力的概念上进行。

J.O. Ngana 在坦桑尼亚东北部水资源管理发展战略<sup>[80]</sup>中,探讨了这些地区的水资源管理的核心问题是自然资源没有得到可持续利用和管理,其主要原因之一是缺乏流域管理的方式,以及牲畜数量超过了土地的承载力。

在报告四个城镇环境承载力<sup>[81]</sup>中,论述了环境承载力问题。环境承载力是在没有损害水体质量的条件下,湖水能够容纳污染的一种评价方法。

城市可持续发展政策的社会多目标评价<sup>[82]</sup>一文,探讨了来自生态方面的概念如城市环境承载力、生态足迹,来自经济方面的概念如成本效益、成本效率分析等问题,将社会多目标评价方法作为城市可持续发展政策的多目标框架。

Lawrence 的合理利用野生物的习性改进生态风险评价的相关性<sup>[83]</sup>一文,介绍了生态风险评价模型中使用野生物的习性模型预报承载力,对改进评价提供了有价值的信息。

Tony 在国家公园承载力模型设计<sup>[84]</sup>一文中,介绍了国家公园系统的承载力的定义和量化方法问题,并开发了一承载力模型系统,使公园管理者用量化方法决定公园的现状生态系统是否符合建立的承载力标准。

Scott<sup>[85]</sup>在关于老龄社会的可持续发展问题的文摘中讨论了有关自然环境的概念,如可持续性、自然资金、承载力和生态足迹等概念。

Olaf<sup>[86]</sup>在关于景观分类的地区规划文章中,探讨了自然景观的评价要考虑到人类活动、自然平衡功能、承载力以及景观管理的目标等因素。

Ulrich 在人口增长的生态挑战<sup>[87]</sup>一文中,讨论到人类社会的在克服自然的限度增长,结果导致了人口增长几乎超出了地球的承载力,据此人类应当采取措施保持环境和人口的均衡。

Bobbi 在人和生态系统的相互作用:一种动态综合模型<sup>[88]</sup>一文中,建立了一个关于生态和经济相互作用的模拟模型,模型中用到了最大可持续收获率相关的承载力概念。

Perrin S 在承载力:一种逻辑上变化的限度<sup>[89]</sup>一文中,介绍了广泛使用的逻辑斯谛增长模型的扩展,即承载力的概念,并将这种动态承载力模型应用到简单的增长模型,也应用到两个人口增长的实际模型。

### 1.2.2 国内研究现状

水资源承载力研究是近些年来受到国内学者重视、并逐步广泛开展起来的有关人口、资源、水资源、社会经济和环境的交叉学科研究。我国自 78 年实行改革开放政策以来，社会、经济、科技、教育和外交等在 20 多年里发生了翻天覆地的巨大变化，人民生活水平大幅度提高。作为迅速发展的工业化经济国家和人口大国，伴随着经济的高速发展，环境污染、资源短缺与人口膨胀等问题日渐明显，人们将重新评估人类赖以生存的自然环境、自然资源究竟能够担负多大规模的人口和经济的发展，承载力的概念诸如土地承载力、环境承载力和水资源承载力等等应运而生。

国内水资源承载力方面研究的文献较多，但目前对于其定义、特征、评价指标以及计算方法还没有统一的认识。在较早的文献中出现过关于承载力的概念，但我国最早开展水资源承载力研究是在 1985 年，新疆水资源软科学课题组首次对新疆的水资源承载能力和开发战略对策进行了研究，大量水资源承载力研究的文章出现还是近几年居多。目前国内有关研究在概念方面主要集中在广义范围的水资源承载力，如区域、流域水资源承载力问题，和狭义范围的水资源承载力，如城市、地下水、缺水地区、岩溶地区水资源承载力等两大类，在研究方法上主要是单一指标和多目标的指标体系的差别。

水资源承载力的研究大多是在资源承载力、环境承载力等概念的基础上进行延伸和拓展。承载力的概念被延展并应用至整个自然界，使得在不同的发展阶段，产生了不同的承载力概念，承载力概念和意义也发生着相应的变化<sup>[90]</sup>。在各种自然资源承载能力研究中，由于自然资源的不同特性，如可再生资源 and 不可再生资源，决定了各种自然资源承载能力研究方法上既存在着共性，又有很大的差异。关于水资源承载力的定义，不少学者都提出了自己的观点，给出了水资源承载力的定义，一定程度上反映了水资源承载力的内涵，但水资源承载力至今还没有一个普遍接受的定义。概念上差异较大，反映在研究方法和评价方法上，更是百花齐放。

#### 1.2.2.1 关于水资源承载力定义和内涵

目前，许多学者给出了水资源承载力的定义，水资源承载力一词也广泛应用于研究某一地区尤其是缺水地区的工业、农业、城市乃至整个地区的经济发展所需要的水资源供需平衡和生态系统保护，但水资源承载力迄今仍是一个外延模糊、内涵混沌的概念，其内涵的界定尚存在一定的分歧和不足<sup>[91]</sup>。分析这些定义，主要可以归纳为三种类型，第一种观点是水资源开发规模论，水资源开发规模论认为水资源承载能力是在一定社会技术经济阶段，在水资源总量的基础上，通过合理分配和有效利用所获得的最合理的社会、经济与环境协调发展的水资源开发利用的最大规模<sup>[90]</sup>。“水资源承载能力是水资源可开发利用量，必须首先满足维护生态环境的起码用水要求，以及合理分配国民经济各部门的用水比例<sup>[92]</sup>”；“在一定的技术经济水平和社会生产条件下，水资源可最大供给工农业生产、人民生活 and 生态环境保护等用水的能力，也即水资源最大开发容量<sup>[93]</sup>”。第二种观点是水资源承载最大人口论，水资源承载力为：在某一具体的发展阶段下，以可以预见的技术、经济和社会发展水平为依据，以可持续发展为原则，以维护生态环境良性发

展为前提,在水资源合理配置和高效利用的条件下,区域社会经济发展的最大人口容量<sup>[94][90][95]</sup>。第三种观点是水资源支撑社会经济系统持续发展能力论,持这种观点的学者较多,虽然承认水资源承载力最终要以一定的人口总量规模为落脚点,但进一步认为这种人口规模是与最大的生活水平也就是人均综合效用水平相对应的,换言之,在可持续发展的前提下,“最大”的含义就是对应着最优的发展水平<sup>[30]</sup>。认为水资源承载力是“某一地区的水资源在某一具体历史发展阶段下,以可预见的技术、经济和社会发展水平为依据,以可持续发展为原则,以维护生态环境良性循环发展为条件,经过合理优化配置,对该地区社会经济发展的最大支撑能力<sup>[96]</sup>”,“在一定的水资源开发利用阶段,满足生态需水的可利用水量能够维系有限发展目标的最大的社会-经济规模<sup>[97]</sup>”。

另外,有些学者结合水资源承载力的概念,研究了地下水资源承载力<sup>[98]</sup>、城市水资源承载力<sup>[99]</sup>、缺水地区水资源承载力<sup>[100]</sup>、岩溶地区水资源承载力<sup>[101]</sup>等类似问题,这些研究只是对水资源的限定范围不同,定义和研究方法大同小异。

选取几个有代表性定义的例子列举定义、内涵和特点如下。

\* 新疆水资源软科学课题研究组<sup>[92]</sup>1985年提出:水资源承载能力是水资源可开发利用量,必须首先满足维护生态环境的起码用水要求,以及合理分配国民经济各部门的用水比例。经测算,新疆水资源可开发利用的水量为916亿 $\text{m}^3$ ,其中生态环境用水240亿 $\text{m}^3$ ,用于人民生活和发展国民经济的水量676亿 $\text{m}^3$ ,再按用水定额法预测出新疆水资源对工农业的承载力是:工业总产值2487亿元,农业总产值1066亿元,灌溉面积达12947万亩,对新疆人口的承载力是不超过3000万人为宜。该课题对水资源承载力的研究还处于初步阶段,没有对水资源承载力进行系统性的论述。

\* 惠泱河在水资源承载力评价指标体系研究<sup>[96]</sup>中定义为:某一地区的水资源在某一具体历史发展阶段下,以可预见的技术、经济和社会发展水平为依据,以可持续发展为原则,以维护生态环境良性循环发展为条件,经过合理优化配置,对该地区社会经济发展的最大支撑能力。认为水资源承载力体现在一定社会经济条件和一定状态下水资源系统可以承载一定程度和方式的人类活动的指标,在这些指标所允许的范围和程度之内的人类经济发展活动作用下,水资源系统结构组合特征,功能状态不会发生质的变化,这是水资源具有承载力的内在原因;由于上述指标在量上是有限度的,当某一指标消耗过大(例如地下水超采),会影响水资源系统的整体结构水平,进而导致功能失常。因此,水资源系统的物质、能量的输入存在限度,水资源承载力具有极限。影响水资源承载力的主要因素包括水资源的数量质量及开发利用程度、生产力水平、消费水平与结构、科学技术、人口与劳动力、其它资源潜力、和政策、法规、市场、宗教、传统、心理等因素。

\* 许有鹏在干旱区水资源承载能力综合评价研究<sup>[93]</sup>中提出:水资源承载力是指在一定的技术经济水平和社会生产条件下,水资源可最大供给工农业生产、人民生活 and 生态环境保护等用水的能力,也即水资源最大开发容量,在这个容量下水资源可以自然循环

和更新，并不断地被人们利用，造福于人类，同时不会造成环境恶化。因此，水资源承载力的评定是要在对本区水资源特征、保证程度、开发利用情况以及工农业生产、人民生活 and 生态环境对水资源的需求等方面综合分析基础上，经过多个因素分析评价而得出。仅从地区需水量和供水量简单地供需平衡计算还不足以全面反应其承载能力。

\* 国家“九五”科技攻关项目“西北地区水资源合理配置与承载能力研究<sup>[94]</sup>”定义水资源承载力为：在某一具体的发展阶段下，以可以预见的技术、经济和社会发展水平为依据，以可持续发展为原则，以维护生态环境良性发展为前提，在水资源合理配置和高效利用的条件下，区域社会经济发展的最大人口容量。课题提出了水资源“天然-人工”二元水循环理论和分析模式，即考虑了人工侧支水循环和天然水循环，且考虑了两者的相互作用。应用这一拓展在水资源承载力的研究上，首先在内陆干旱地区，必须将水土资源和生态系统的水资源保障条件同步考虑，其次还必须同步考虑产业结构的调整和市场条件的变化对水资源承载力的影响。认为水资源承载力具有动态性、相对极限性、模糊性和被承载模式的多样性等特点。动态性是指水资源承载力与具体的发展阶段有直接关系，不同的发展阶段有不同的承载能力；相对极限性是指在某一具体历史发展阶段水资源可能达到的最大承载能力特性；模糊性是指由于系统的复杂性和不确定因素的客观存在，以及人类认识的局限性，决定了水资源承载力在具体的承载指标上存在着一定的模糊性。被承载模式的多样性是指社会发展的多样性。

\* 阮本青在区域水资源适度承载能力计算模型研究<sup>[95]</sup>中，对水资源承载能力作如下定义：在未来不同的时间尺度上，一定生产条件下，在保证正常的社会文化准则的物质生活水平下，一定区域(自身水资源量)用直接或间接方式表现的资源所能持续供养的人口数量。水资源作为人类社会所不可替代的宝贵资源，除人类生活所必不可少外，其承载能力的研究更大程度上是在资源支持经济社会发展的潜在能力之上。并且要考虑水资源的持续发展和永续利用，水资源支持下的区域经济发展规模和人口载量，应当有一个适度的概念，即在良性循环的基础上，取得较大的水资源综合利用效益。

\* 冯尚友在水资源持续利用与管理导论<sup>[19]</sup>中对水资源承载力的定义是，在一定区域内、在一定物质生活水平下，水资源所能够持续供给当代人和后代人需要的规模和能力。水资源承载力的定义应当具有系统的观点和综合的观点。系统的观点是指水资源承载力是一个地区水资源系统的承载力，不但要考虑用水量，还要考虑消纳污水所需要的水量即水环境的承载能力。对水资源承载力的理解应遵循下列的事实：第一，必须把它置于可持续发展战略框架下讨论，离开或偏离社会持续发展模式是没有意义的；第二，要把它作为生态经济系统的一员，综合考虑水资源对地区人口、资源、环境和经济协调发展的支撑能力；第三，要识别水资源与其他资源不同的特点。最后，水资源承载力受自然因素影响外，还受许多社会因素影响和制约，如受社会经济状况、国家方针政策（包括水政策）、管理水平和社会协调发展机制等影响。因此，水资源承载力的大小是随空间、时间和条件变化而变化，且具有一定的动态性、可调性和伸缩性。

\* 夏军在水资源安全的度量：水资源承载力的研究与挑战<sup>[97]</sup>一文中，结合中国科学院知识创新工程有关项目初步研究，将水资源承载力定义为：在一定的水资源开发利用阶段，满足生态需水的可利用水量能够维系有限发展目标的最大的社会-经济规模。因此，水资源承载力是一个度量区域社会经济发展受水资源制约的阈值，它通常用满足生态需水的可利用水量与社会经济可持续发展有限目标需求水量的供需平衡退化到临界状态所对应的单位水资源量的人口规模和发展规模（如 GDP）等指标体系表达。显然，水资源承载力受水的供需矛盾双方影响，它需要从受自然变化和人类活动影响的水循环系统出发，通过“自然生态-社会经济”系统对水的需求和流域能够提供的多少可利用水资源量的“支撑能力”方面加以量度。一种概化的水循环与水资源供需关系如图 1.1 所示意。核心问题是：在一定的水资源开发利用阶段和生态环境保护目标下，一个流域、区域的可再生利用的水资源量究竟能够支撑多大规模的社会经济系统发展？如何合理管理有限的水资源（开源与节流），维持和改善陆地系统水资源承载能力？

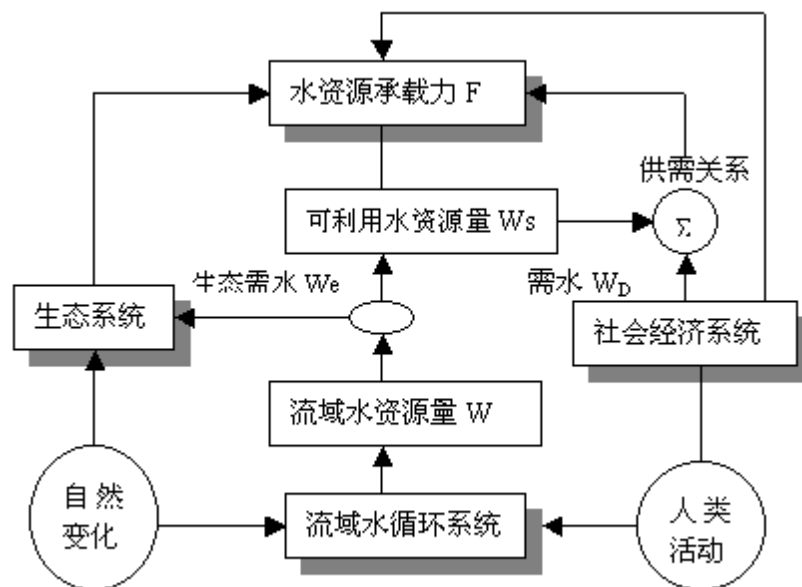


图 1.1 量化水资源承载力的系统关系示意<sup>[97]</sup>

\* 余卫东在水资源承载力研究的进展与展望<sup>[102]</sup>中认为：对于水资源承载力的定义应当具有系统的观点和综合的观点。系统的观点是指水资源承载力是一个地区水资源系统的承载力，不但要考虑用水量，还要考虑消纳污水所需要的水量即水环境的承载能力。综合的观点是指水资源承载力是对社会经济发展和生态环境的综合承载能力，是可以承载人口、经济发展和生态服务功能发挥的综合反映。区域水资源承载力是一个具有自然-社会双重属性的概念，既反映了水资源系统满足社会经济系统能力，也与社会经济系统开发自然水资源系统的深度有关，其概念应该兼顾社会、经济、技术和生态。影响水资源承载力大小的因素取决于区域自然环境、水资源量、社会经济技术水平、社会经济结构和承载驱动力大小等诸多因素，在多数情况下并不完全某一区域的是某种数值，它很大程度上取决于水资源管理者对水资源的利用目标。衡量一个地区水资源承载力的大小，

应当重点考察下面几个方面的因素：一是资源因素，二是社会经济发展与科学技术发展因素，三是生态环境状况与生态系统服务功能的发挥，四是制度因素等。水资源承载力有这样几个特点，有限性：水资源有限性是指在某一具体的历史阶段，水资源承载力具有有限的特性，即存在可能的最大承载上限，主要是因为自然条件和社会因素的约束。动态性：水资源承载力的动态性体现在两个方面：一方面随着经济发展和技术进步，人类开发利用水资源的能力越来越强，因而可利用的水资源越来越大；另一方面由于节水和技术进步，提高水资源利用率，从而增加了单位水量的承载力。多目标性：水资源承载力多目标性体现在区域发展模式和水资源开发利用方式的多样性上，承载力数值不仅与区域发展模式有关，也与水资源配置模式有关。不确定性：水资源系统本身受天文、气象、下垫面以及人类活动的影响，造成水文系列的变异，使人们对它的预测目前无法达到确定的范围。区域社会和经济发展和环境变化，是一个更为复杂的系统，决定着需水系统的复杂性及不确定性。

\* 贾嵘的区域水资源承载力研究<sup>[103][100]</sup>中，将水资源承载力定义为：水资源承载力是指在一个地区或流域的范围内，在具体的发展阶段和发展模式条件下，当地水资源对该地区经济发展和维护良好的生态环境的最大支撑能力。水资源承载力的特点动态性、多目标性和极限性。动态性体现在两个方面：一方面随着经济发展和技术进步，人类开发利用水资源的能力越来越强；另一方面由于节水和技术进步，单方水的利用效率越来越高，可生产出更多的粮食及工业品。多目标性体现在区域发展模式和水资源开发利用方式的多样性上，这些多样性使得某一区域的需水量和供水量均不相同，且相关的发展指标差异也很大，从而导致承载力数值不仅与区域发展模式有关，也与水资源配置模式有关。极限性主要体现在某一可预见的发展阶段中，在水资源合理配置的条件下对经济发展和生态环境保护的最大支撑能力。

\* 程国栋在承载力概念的演变及西北水资源承载力的应用框架<sup>[37]</sup>中，经过水资源承载力概念的萌芽阶段-环境容纳能力概念的提出，到发展阶段-容纳能力概念中强调资源和环境与种群增长之间的状态均衡，最后是完善阶段-承载力的概念强调人文价值选择，强调环境与种群(人口)之间状态的均衡-容纳能力的推理，将水资源承载力定义为：某一区域在具体的历史发展阶段下，考虑可预见的技术、文化、体制和个人价值选择的影响，在采用合适的管理技术条件下，水资源对生态经济系统良性发展的支持能力。相比以前关于水资源承载力的定义，新的定义在如下几个方面对原有定义的涵义和内容进行了扩展：(1) 强调水资源承载力是水资源对生态经济系统良性发展的支持能力，其研究对象和范围除水资源自身的循环转移规律外，主要还包括经济系统各组分之间结构和功能的协调，这比前两种定义在一定程度上都有所扩展。强调水资源的支持能力，就是需要从水资源量和质两种角度综合考虑对生态经济系统发展的支持情况；(2) 强调生态经济系统的良性发展，因此需要制定相应的环境健康与可持续发展状况评价的标准，强调文化、体制和个人价值选择的影响，是指在具体制定评价标准时，需要协调这些因素之间的关



系，因此水资源承载力应是一种范围估计；(3) 强调合适的管理技术，将水资源承载力的合理配置等技术方面的问题，上升到了管理的角度和层次。认为水资源承载力具有如下特点：动态性、有限性、社会性、不确定性、振荡性。

\* 张丽在流域水资源承载能力浅析<sup>[90]</sup>一文中采用水资源承载力定义为：在某一具体历史发展阶段下，以可预见的技术、经济和社会发展水平为依据，以可持续发展为原则，在水资源得到合理开发利用下，在保证其社会文化准则的物质生活水平条件下，某地区的水资源（包括数量、质量）能够持续支持该地区的人口数量。

\* 李令跃在试论水资源合理配置和承载能力概念与可持续发展之间的关系<sup>[25]</sup>中定义水资源承载力为：某一历史发展阶段，以可预见的技术、经济和社会发展水平为依据，以可持续发展为原则，以维护生态良性循环发展为条件，在水资源得到合理开发利用下，该地区人口增长与经济发展的最大容量。

\* 韩俊丽在城市水资源承载力研究现状及其趋势<sup>[104]</sup>一文对水资源承载力的解释是：在特定的历史发展阶段。以可持续发展为原则，以维护生态良性发展为条件，以可预见的技术、经济和社会发展水平为依据，在水资源得到适度开发并经优化配置前提下，区域(或流域)水资源系统对当地人口和社会经济发展的最大支持能力。据此，城市水资源承载力可定义为：在城市发展的特定时期，以城市可持续发展为原则，以维护城市生态良性发展为条件，以可预见的技术、经济和社会发展水平为依据，在水资源合理开发并经优化配置的前提下，该城市水资源系统对城市人口和社会经济发展规模的最大容量。并分析了城市水资源承载力研究的发展趋势将以水资源可持续利用为中心，以大系统、多目标综合研究为趋势、量化模型的随机与动态化相结合、由静态分析走向动态预测、由单一资源承载力研究向资源环境综合承载力研究发展。

\* 唐曲在民勤盆地水资源承载力指标体系及评估<sup>[105]</sup>一文中，结合研究区域(民勤盆地)的特殊性，定义水资源承载力为：在一定区域或流域范围内，在一定的发展模式和生产条件下，当地水资源在满足既定生态环境目标的前提下，能够持续供养的具有一定生活质量的人口数量，或能够支持的社会经济发展规模。从影响水资源承载力的各因素分析出发，通过指标体系的构建，力图全面地反映在社会、经济、环境、生态各子系统组成的复杂大系统中，水资源承载力所受到的方方面面影响，并以所建立的指标体系为基础，对民勤盆地水资源承载能力进行初步估算。

\* 徐良芳在区域水资源承载力计算问题探讨<sup>[106]</sup>中，将区域水资源承载力定义为在一定时期某区域在一定的社会经济发展水平下，在维持水资源系统本身完整性和满足生态系统可持续发展对水资源的需求条件下，最大可利用水资源对区域社会经济发展的支撑能力。并分析了现有区域水资源承载力研究中存在的问题，阐明区域水资源承载力与可持续发展的关系，指出水资源承载力是区域最大可利用水资源支持条件下获得综合效益最大的社会经济与环境发展模式，建立了区域水资源承载力计算模型，并提出水资源承载力计算中应解决的几个问题。

\* 雷学东在区域水资源承载力研究现状与发展趋势<sup>[107]</sup>中,认为区域水资源承载力可定义为:在可持续发展原则下,在一定的区域范围内,在一定的水资源开发利用阶段,满足生态需水的可利用水量能够维系有限发展目标的最大的社会—经济规模。对于水资源承载力的观点可以概括为:区域水资源承载力一定意义上等同于区域供水量;区域水资源承载力就是区域现状水资源负载状况;区域水资源承载力可以用区域内所能供养人口的数量和经济规模来刻画。通过对比这些定义发现,尽管水资源承载力定义在表述上各有不同,但其基本思路并无本质上的差异,都强调了支撑能力的概念。在可持续发展观念的指导下,为了突出生态用水特征,因此区域水资源承载力可理解为是一个度量区域社会经济发展受水资源制约的阈值,它通常采用满足生态需水的可利用水量和社会经济可持续发展有限目标需求水量的供需平衡,退化到临界状态所对应的单位水资源量的人口规模和经济规模等指标体系表达。

\* 贺中华在岩溶地区枯水资源承载力概念与理论的讨论<sup>[108]</sup>一文中,定义岩溶地区枯水资源承载力是指某一岩溶地区枯水资源在某一具体历史发展阶段下,以可以预见的经济、技术和社会发展水平为依据,以可持续发展为原则,以维护生态环境良性循环为条件,经过合理优化配置,对该岩溶地区社会经济发展的最大支撑能力。目前,国内外对非岩溶地区水资源承载力的研究很多,则基于岩溶地区水资源承载力的研究相对较少,而对岩溶地区枯水资源承载力的研究则未曾有学者研究,文献在系统地论述了岩溶地区枯水资源承载力的内涵及其特性的基础上,构建了岩溶地区枯水资源承载力的指标体系;以先进的 GIS 数据库管理系统为基础,建立岩溶地区枯水资源时空分布数据库,并提出岩溶地区枯水资源承载力的计算模型;同时利用该模型对贵阳地区进行枯水资源承载力的计算,得出严重缺乏的枯水资源,对贵阳地区国民经济的发展已造成严重的影响。

#### 1.2.2.2 关于水资源承载力研究和评价方法

水资源承载力的研究涉及到水资源、生态系统、社会、经济系统、资源、科技水平和道德伦理等等方方面面的研究领域,属大系统、多目标、多层次优化问题,因此,在研究上一般采用多指标或多目标分析方法。在充分分析水资源承载力相关因素的基础上,建立分析模型、和指标体系,然后采用不同的评价方法进行量化分析。目前主要采用的方法为系统动力学方法、层次分析法、常规趋势法、背景分析法、动态模拟递推算法、状态空间法、模糊评价方法、主成分分析法等。

选取几个有代表性定义的例子列举研究和评价方法如下。

\* 1985 年新疆水资源软科学课题研究组<sup>[92]</sup>作为较早对水资源承载力进行研究的课题,没有提出系统的水资源承载力研究方法。它是按新疆地区可开发利用水量为基本依据,在满足生态环境系统用水量的起码要求以及合理分配国民经济各部门的用水比例的前提下,适当考虑建设节水型农业和节水型社会,最后计算出新疆地区水资源所承载的工、农业及人口等发展规模。

\* 惠泱河在水资源承载力评价指标体系研究<sup>[96]</sup>中采用了密切值法进行了水资源承载

力评价。在分析确定了水资源承载力所涉及的社会、经济、环境、生态、资源在内的纷繁复杂的大系统中的各种影响因素后，建立了评价指标体系，并采用了密切值法对指标体系进行了评价。密切值法能综合考虑诸多因素，是进行水资源承载力评价的理想方法，其主要原理如下：用判断矩阵分析法确定权重、建立方案的多目标评价矩阵、对评价矩阵规范化、按密切值法排序。通过密切值计算和排序可以得出这个意义下的各个方案的相对优劣，密切值愈小，方案愈优。在实例研究中，选取关中水资源进行了承载力评价指标体系评价，根据研究区域的实际情况，并考虑到可操做性，拟定如下方案评价指标：粮食产量、国内生产总值、人口、BOD 排放量、国内生产总值增长率、供水量、工业供水效益、工农业供水效益等。运用已建立的评价模型，得到不同方案下不同水平年水资源承载指标值与理想值的密切值，以此来选择与可持续发展相协调的最优方案及水资源持续利用模式。

\* 许有鹏在干旱区水资源承载能力综合评价研究<sup>[93]</sup>中提出：水资源承载能力的评定是要在对本区水资源特征、保证程度、开发利用情况以及工农业生产、人民生活 and 生态环境对水资源的需求程度等供需诸方面综合分析基础上，经过多个因素分析评价而得出的结论。若仅从地区需水量和供水量简单地供需平衡计算还不足以全面反映其承载能力，必需要对那些影响干旱区水资源供需主要因素作全面分析，从不同角度和不同方面加以考虑，同时使干旱区水资源和土地资源开发以及环境保护协调平衡。模糊综合评判方法可为上述研究提供一种有效途径，它可以在对影响水资源承载能力的各个因素进行单因素评价基础上，通过综合评判矩阵对其承载能力做出多因素综合评价，并建立了一套适合干旱地区水资源承载能力的综合评价模型和分析计算方法。同时以和田河为典型，应用评价模型对该流域水资源承载能力进行评价分析。综合评判模型大致为：设给定两个有限论域  $u = \{u_1, u_2, \dots, u_n\}$ ； $V = \{V_1, V_2, \dots, V_n\}$ ，其中  $u$  代表综合评判的因素所组成的集合， $V$  代表评语所组成的集合，则模糊综合评判即表示为下列模糊变换  $B=A \times R$ ，式中  $A$  为  $u$  上的模糊子集，而评判结果  $B$  则是  $V$  上的模糊子集。并且可表示为  $A = (a_1, a_2, \dots, a_n)$ ， $0 \leq a_i \leq 1$ ； $B = (b_1, b_2, \dots, b_n)$ ， $0 \leq b_j \leq 1$ ，其中  $a_i$  为  $u_i$  对  $A$  的隶属度，它表示单因素  $u_i$  在总评定因素中所起作用大小的变量，也在一定程度上代表根据单因素  $u_i$  评定等级的能力，而  $b_j$  则为等级  $V_j$  对综合评定所得模糊子集  $B$  的隶属度，它们表示综合评判的结果。评判矩阵  $R=[r_{ij}]_{m \times n}$  中  $r_{ij}$  表示因素  $u_i$  的评价对等级  $V_j$  的隶属度，因而矩阵  $R$  中第  $i$  行  $R_i = (r_{i1}, r_{i2}, \dots, r_{in})$  即为对第  $i$  个因素  $u_i$  的单因素评判结果。评判因素的选取、分级和评分根据干旱区水资源及其利用特点，将其各影响因素全面分析，选取了耕地率，水资源利用率，供、需水模数，人均供水量和生态用水率等 6 个主要因素作为评价因素，对干旱区水资源承载能力的影响程度进行了评价。

\* 傅湘在区域水资源承载力进行综合评价<sup>[109]</sup>中，针对模糊综合评判法在综合评价中存在的主观随意性问题，采用主成分分析法对区域水资源承载力进行了综合评价，并以陕西汉中平坝区的水资源统计资料进行实例研究，证实主成分分析法的科学性，从而为

区域水资源合理利用提供决策依据。主成分分析方法的基本思想是根据原指标间的相关性,通过降维的技术把原来的多个指标约化为  $p$  个综合指标。具体来说,每一个综合指标就是一个主成分,记为  $PRIN_i$  ( $i=1, 2, \dots, p$ ),每一个主成分用原来指标的线性组合来表示,使这些主成分既能尽可能地反映原指标的信息量,又使各个主成分彼此不相关,达到消减指标间信息重迭的目的。这  $p$  个主成分从原来指标所提供的信息总量中所提取的信息量依次递减,每个主成分  $PRIN_i$  所提取的信息量用方差来度量,且主成分方差的贡献就等于原指标相关矩阵相应的特征值  $\lambda_i$ ,每一个主成分的组合系数就是相应特征值  $\lambda_i$  所对应的特征向量  $t_i$ ,方差的贡献率  $f_i = \lambda_i / \sum \lambda_i$ ,若  $f_i$  越大,则说明相应的主成分综合信息的能力越强。主成分分析的目的之一是减少指标个数,在实际应用中,一般取累计贡献率  $\sum f_i \geq 85\%$  的前  $m$  个主成分就够了。另外,每一个主成分都分别代表特殊意义,能说明研究对象的某一方面特征。如果人们只对研究对象的某一特征关心,则可以按这一主成分进行排序,从中获取所需的信息。

\* 贾嵘的区域水资源承载力研究<sup>[103][100]</sup>中采用多目标分析评价核心模型方法对水资源承载力进行了评价,认为水资源承载力研究是属于评价、规划与预测一体化性质的综合研究,它以水资源评价为基础,以水资源合理配置为前提,以水资源潜力和开发前景为核心,以系统分析和动态分析为手段,以人口、资源、经济和环境协调发展为目标。由于受水资源总量、社会经济发展水平和技术条件以及水环境质量的影响,在研究过程中,必须充分考虑水资源系统、宏观经济系统、社会系统以及水环境系统之间的相互协调与制约的关系。在水资源系统,通过对区域水资源的现状评价、水资源的潜力和水资源的优化配置的研究,确定在不同水平年、不同配置方案下的可供水量大小。在宏观经济系统,通过对工业、农业和社会的发展规模水平的研究,确定在不同水平年、不同产业结构和生活标准及节水水平下的各部门用水定额和用水效率的大小。在水环境系统,根据不同的经济社会发展水平,预测 BOD 排放率及排放总量大小。在以上研究的基础上,建立水资源、经济、人口、环境、社会相联系的水资源承载力多目标核心模型,以可供水量、用水水平和 BOD 排放总量为模型入口,研究不同水平年、不同策略方案下的水资源所能承载的经济、人口规模。将模型计算得出的水资源承载力与经济社会发展目标相比较,若发展目标高于水资源的承载能力,则需调整战略,提高水资源承载力,承载力提高到本年度的最大时,若发展目标还高于水资源的承载能力,则说明制定的发展目标已超过水资源的承载能力,需适当调低;若水资源承载力与发展目标相协调,可得到与水资源承载力相协调的国民经济社会发展规模、发展速度以及保证水资源可持续利用、国民经济社会可持续发展的各种战略和方案。

\* 阮本青在区域水资源适度承载能力计算模型研究<sup>[95]</sup>中,建立了区域水资源适度承载力计算模型。模型立足于本区域水资源的可能性,以区域经济可持续发展、水资源可持续利用为准则,在考虑不同规划水平年的生产能力、技术条件及生活水平等限制条件下,水资源综合利用效益最大为目标函数。约束条件为:水资源供需动态平衡约束、供

水能力约束、行业取用水量约束、人均粮食产量约束、耕地面积约束、人均经济收入约束、非负约束等。并以黄河下游沿黄地区为例进行实证研究。

\* 国家“九五”科技攻关项目西北地区水资源合理配置与承载能力研究<sup>[94]</sup>中采用基于流域水资源二元演化模式为基础的水资源承载力计算，实际上是多指标分析方法的水资源承载力评价。按可比性指标、均衡性指标、效率性指标和极限性指标建立了水资源承载力指标体系，具有实际操作意义，全面反映国民经济发展、生态环境保护以及水资源开发利用方式的状况与进程。进行水资源承载能力计算时，不仅考虑了作为被承载客体的社会经济系统的用水格局、用水效率和用水的投入产出效率，即水资源对社会经济系统的承载能力，同时还考虑了作为承载主体的资源环境系统为达到可持续利用目的而发生的自身用水需求，即对脆弱生态系统的承载能力，以及生态系统对经济系统的承载作用。

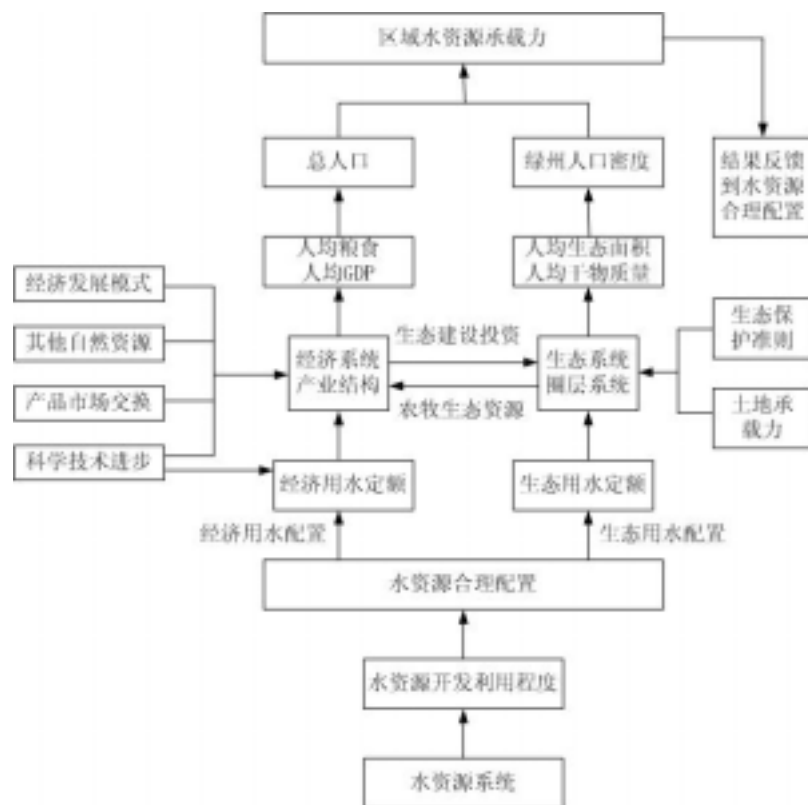


图 1.2 水资源二元演化模式下的区域水资源承载能力计算流程<sup>[94]</sup>

\* 冯尚友在水资源持续利用与管理导论<sup>[19]</sup>中采用系统分析方法—动态模拟递推算法对水资源承载力进行了分析。动态模拟递推法主要是通过水的动态供需平衡计算来显示水资源承载力的状况和支持人口与经济发展的最终规模。其实质是模拟法，将动态模拟和数学经济分析相结合，利用计算机模拟程序，仿造地区水资源供需真实系统运动行为进行模拟预测，根据逐年运行的实际结果，有目的地改变模拟参数或结构，使其与真实系统尽可能一致。当水资源供应能力达到零增长(对水资源紧缺地区)或地区人口增长和经济增长均达到零增长(对水资源丰裕地区)时，水资源承载力按定义已达最大。

\* 毛汉英区域承载力定量研究方法探讨<sup>[110]</sup>中采用状态空间法对区域承载力进行了定

量研究。状态空间法是欧氏几何空间用于定量描述系统状态的一种有效方法。通常由表示系统各要素状态向量的三维状态空间轴组成,应用状态空间法可作为定量地描述和测度区域承载力与承载状态的重要手段。在三维状态空间包括作为受载体的人口及其经济社会活动和作为承载体的区域资源环境三个轴。利用状态空间法中的承载状态点,可表示一定时间尺度内区域的不同承载状况。不仅不同的人类活动强度对资源环境的影响程度差别十分悬殊,而且不同的资源环境组合所对应的人类活动强度也不相同。所有这些状态空间中由不同资源环境组合形成的区域承载力点构成了区域承载力曲面。根据区域承载力在状态空间中的含义,任何低于该曲面的点代表某一特定资源环境组合下,人类的经济社会活动低于其承载能力,而任何高于该曲面的点则表明人类的经济社会活动已超出该特定资源环境组合的承载能力。

\* 陈兴鹏系统动力学在甘肃省河西地区水土资源承载力中的应用<sup>[111]</sup>文献中用系统动力学方法对水资源承载力进行了深入研究。系统动力学方法解决问题的步骤大体分五步:首先,用系统动力学的理论、原理和方法对研究问题进行系统分析;其次,进行系统的结构分析,划分系统层次与子块,确定总体的与局部的反馈机制;第三步,建立数学的、规范的模型;第四步,以系统动力学理论为指导,借助模型进行模拟与政策分析可进一步剖析系统得到更多的信息,发现新的问题,然后又反过来再改造模型;第五步,检验评估模型。该方法的优点是:能定量地分析各类复杂系统的结构与功能的内在关系,能定量分析各种特性,擅长处理高阶、非线性问题,适宜于客观的长期动态趋势研究。系统动力学实质上是通过设置变速率方程对系统的一系列因果反馈回路进行动态模拟,从而定量出系统的整体行为表现。正因为水土资源承载力研究涉及资源、人口、生态环境、社会经济、以及技术、政策等诸多方面,是一个因子众多、复杂的反馈系统,其大量的数据交叉重叠混合,主次互相隐含,而随时间的不断变化而相应变化。所以,应用系统动力学进行系统的整体分析,剖析系统所有要素的因果反馈关系,综合模拟、分析、调整既必需又可行。同时由于系统动力学能够全面模拟分析系统诸因素变化以及模拟不同决策下的长远动态。因而,可对长周期性的战略措施进行有效的分析和提供相应的依据。由此表明应用系统动力学对水土资源的承载力进行定量分析具有明显的优点。

\* 孟凡德在北京市水资源承载力的现状及驱动力分析<sup>[112]</sup>一文中,归纳了错综复杂的影响水资源承载力的因子,认为有社会经济和自然因素两方面,从北京市水资源变化的实际情况来看,人类活动是主要影响因素,这些因素不仅与水资源量之间存在着相关关系,而且相互之间耦合关联。如果用单纯的相关分析,有可能存在一定的误差冗余,因此采用主成分分析法比较适合分析水资源承载力变化的主要驱动力。影响北京市水资源承载力变化的10个因子可归纳为经济动态压力和社会系统压力两大类,从单个因子来看,人口和GDP是影响水资源承载力变化的主要驱动因子,人口增长,GDP增加,居民生活水平的提高带来的居民生活用水的迅速增长,城市建设、环境质量的提高以及服务业的蓬勃发展造成的公共用水的增加,共同推动了北京市需水量的迅速增长,水资源承载力的

压力加大。经计算北京市水资源的承载能力为：最佳人口规模 133.33 万人，最大人口规模 235.29 万人。而 2001 年北京市人口总量已达 1367.78 万人，为水资源最大承载人口的 5.81 倍。再加上工农业的发展，已经大大超过了北京市水资源的承载力。因为北京市的水资源短缺是资源性的，因此单靠节约用水不能从根本上解决问题，所以要实行开源和节流并重的政策。南水北调进京后每年从长江引水 12 亿  $\text{m}^3$ ，将会使北京市水资源承载力得到缓解。

\* 邱林在区域水资源承载力分析<sup>[113]</sup>中，在总结水资源承载力研究现状的基础上，采用模糊综合评判模型计算区域水资源承载力，根据隶属函数的性质确定了综合评判矩阵的计算方法，并将模型运用于具体地区水资源承载力的计算，验证了模型的正确性、合理性。文章认为一般的水资源承载力计算方法仅从需水量和供水量两方面简单地进行供需平衡分析，并不能全面的反映水资源承载能力，模糊综合评判方法在对影响水资源承载能力的各个因素进行单因素评价的基础上，可通过综合评判矩阵对水资源承载力作出多因素综合评价，从而得出水资源承载能力的大小程度。

\* 陈进在水资源承载力的弹性区间<sup>[114]</sup>一文中，根据我国的实际情况，讨论了影响水资源承载力的自然、技术和社会等方面的因素；提出一些评价水资源及水环境承载力的指标及这些指标可能变化区间；讨论承载力区间受各种影响因素的弹性系数。水资源的承载能力在不同国家、不同地区和经济发展的不同阶段应该有不同的含义，即使在同一地区同一时间，采用不同的政策也会有不同的数值，因此，水资源的承载能力有一定的弹性区间。并结合长江流域的特点，从整体上分析长江流域水资源承载能力的状况及对策。

\* 王友贞在区域水资源承载力评价指标体系的研究<sup>[115]</sup>论文中，从区域水资源社会经济系统结构分析入手，围绕水资源承载力研究的核心问题——水资源承载力评价指标体系，提出水资源承载力可以用宏观指标和综合指标来衡量。指标体系应能回答以下几方面的问题：水资源的供需平衡状况、承载状况及其开发利用潜力，并能给出水资源系统能够承载的最大经济规模和人口规模；既要反映水资源的数量与质量、可利用量、开发利用状况及其动态变化对水资源承载力的影响，又要反映被承载的社会经济发展规模、结构及发展水平变化对承载力的影响；应反映水资源社会经济系统之间的协调状况。宏观指标从供需平衡角度描述水资源系统能够支撑的经济规模和人口数量；综合指标反映水资源社会经济系统的承载状态和协调状况。与评价指标相适应，建立了水资源承载力的计算模型与方法。将这一指标体系、模型与方法运用于实际，取得了较好的结果。

### 1.2.2.3 研究中存在的问题

通过以上列举和分析可以看出，尽管当前对于水资源承载能力的定义和分析计算方法很多，研究也取得了一定的进展，但均存在不同程度的不足和问题：

(1) 对水资源承载力的研究缺乏系统性和统一性，对它的研究仍处于探索阶段。从当前研究成果来看，除了水资源承载力的概念与内涵界定不很清楚、水资源承载力理论

基础和研究方法缺乏公认和统一的认识外，还没有形成一个完整的理论体系。即水资源承载力的定义不统一，有多个表现形式，有承载人口的、有最大供水规模的、还有承载人口、社会经济和生态环境规模的；定义与表现形式不统一，承载力的单位不明确。因此应用上缺乏足够的可行性，实施和操作性还不强。

(2) 静态的评价较多，动态的评价较少。即对地区水资源承载力的现状描述的多，对未来的变化和发展状况评价少，没有完全反映出水资源随时间的变化过程，因此对地区因水而引起的社会和经济的逐步变化的指导和预测作用小。水资源承载力研究的目的不但着眼于现在，更重要的是要着眼于将来，不但要反映同一时间的水资源承载力状况，还要反映不同时间的水资源承载力变化过程，这样才能充分反映出水资源系统、宏观经济系统、社会系统以及生态环境之间的相互协调、相互制约和合理配置的关系。

(3) 对水资源承载力定性和定量指标的研究不够充分，没有准确反映出水资源承载力简单量化和多目标综合评价的结果。也就是说，水资源承载力的研究目的之一是能够在诸多的水问题研究课题中明确、清晰表示水对社会和经济的支撑情况，而不是象水利可持续发展、水资源合理配置、水资源可持续利用等那样，宏观、概括性地说明问题。

(4) 虽然研究中都要以可持续发展理论为基础，但如何将可持续发展理论融入水资源承载力的研究中尚不够明确。另外，既然水资源承载力是在以往的水问题课题研究上的拓展和发展，那么，它的研究基础和支撑理论就应该相应变化和提升，即将资源、生态问题纳入到国民经济核算的生态经济系统理论作为水资源承载力的理论基础，从经济学的角度研究水资源承载力问题，研究的结果将更系统和合理。

(5) 水资源作为单一资源对社会经济系统的作用如何定位强调的不够。水资源承载力对人口、社会经济和生态环境是支撑作用，是关键因素之一而不是决定因素，以往的研究不够明确。社会和经济的发展要靠各种资源的合理配置，以及生态、环境、政治、历史、制度等诸多因素的合理配置，才能达到社会经济可持续发展的目的，不能忽略各承载因素之间的相互促进、相互制约的关系。

(6) 目前的水资源承载力研究中，以最大供水规模、承载最大人口规模为量化结果的，没有脱离开供水预测的模式；以指标体系进行评价的研究方法，没有与水资源可持续利用或水利可持续发展的研究模式有多大的区别。

## 1.3 主要研究内容、总体思路与创新点

### 1.3.1 主要研究内容

(1) 分析资源承载力和水资源承载力国内外研究现状，掌握水资源承载力一般的研究方法，明确水资源承载力的研究目的、研究范围和研究方向。

(2) 揭示水资源承载力与可持续发展理论的内在联系，结合水资源可持续利用思想和水资源承载对象，完善水资源承载力与相关的水循环、资源承载力、生态经济系统等基础理论和支撑理论之间的相互关系的系统研究。



(3) 对照和应用系统动力学的方法、层次分析法、定性研究与定量研究相结合的多变量分析方法、多目标规划等方法, 结合水资源的特性, 以及各态历经学说, 确定水资源承载力研究方法。

(4) 在充分研究水资源承载力现状、支撑理论和研究方法的基础上, 建立水资源承载力的概念体系和模型, 提出水资源承载力度量方法、评价指数体系、评价标准和综合分析方法, 并探讨广义和狭义水资源承载力、水资源相对和绝对承载力等概念。

(5) 根据水资源承载力研究成果, 有针对性地从资源性、工程性、经济性、管理性等方面入手, 研究提高水资源承载力的方法和策略。

(6) 通过对海河流域水资源承载力的实证综合评价, 验证建立的水资源承载力指标体系的实用性; 分析海河流域的现状和目标水资源承载能力静态、动态指标和特征; 预测海河流域水资源供需发展趋势及测度监控; 找出当地提高水资源承载力途径和解决水资源短缺问题方法。

### 1.3.2 总体思路

在可持续发展原则指导下, 在知识经济的时代背景之下, 以“自然-经济-社会”生态经济系统为基础, 分析资源尤其是水资源短缺的原因、演变过程和趋势, 发现和分析与水资源承载力问题相联系的内在因素和外部条件, 并归纳分清主次, 划分出反映水资源承载力问题不同层次的评价指数。采用定量和定性分析相结合的方法, 分别建立相应的模型、计算方法, 明确了水资源承载力研究的主要目标不是水资源需求预测, 而是水资源对社会经济系统的支撑和协调能力的评价; 不是水资源自然属性的评价, 而是水资源经济和价值属性的评价。



图 1.3 水资源承载力研究总体思路

首先, 在大量搜集、整理和分析资料的基础上, 综述国内外有关水资源承载力研究现状和进展, 分析资源承载力和水资源承载力研究的起源、目的、方法和方向, 发现目前水资源承载力研究的不足, 建立本论文研究的方法和过程。

其次, 分析资源承载力研究相关的基础理论和支撑理论, 将水资源承载力的研究恰当地定位, 明确水资源承载力研究和可持续发展、生态经济系统和资源承载力的相关关系, 指导水资源承载力的概念、内容和研究方法等体系的建立。

再次, 建立水资源承载力的系统构成和研究模型, 提出水资源承载力的研究方法。研究方法要以定性和定量相结合为原则, 突出水资源承载力简单清晰和量化明确的表达方式, 以及大系统多目标系统的综合评价的特点。围绕水资源承载力研究中预测、量化、评价为一体的中心思想, 选择相关的预测、计算和指标体系评价方法。研究中遵循循序

渐进、综合实用的原则，力争提出区别于有关水资源供需预测、水资源可持续利用评价的研究方法，相应地提出提高水资源承载力的有效途径。

最后，在水资源承载力量化和评价方法的基础上，选取海河流域为代表进行流域水资源承载力实例分析，验证研究结果的合理性。并提出解决海河流域水资源承载力问题的建议。

### 1.3.3 创新点

(1) 本选题为水资源承载力研究从指导思想到支撑理论以及课题研究分类给予比较恰当的定位，将可持续发展理论、生态经济系统理论和资源承载力理论同水资源承载力研究有机结合起来，系统地定义了水资源承载力的概念、内涵和目标：将生态环境子系统从承载条件转变为承载对象、将定义内涵与量化评价结果相对应，有效地解决了水资源承载力量化以及定义与结果的一致性问题的。

(2) 重点在量化方法上进行了研究，提出了采用对目标承载对象的量化指标和承载实现程度或实现概率来表达水资源承载力的量化方式，并详细分析和提供了水资源承载力量化计算方法。做到了定性定量分析相接合、简化和综合相结合、同时能反映出水资源承载力与水利可持续利用和水资源供需预测等研究方法的异同。

(3) 建立了水资源承载力研究综合分析模型，确定了水资源承载力的基础指标量化和分类指标体系评价的两步骤相结合的综合分析方法，基础指标包括承载水量、人口、社会经济和生态环境的简单、明确指标；分类指标为反映水资源和承载因素之间的协调程度的一组指标体系，用静态和动态比较和分析来表示水资源承载现状和目标的人口、社会经济和生态环境发展的实现程度。

并根据水资源构成的不同，讨论了广义和狭义水资源承载力水资源相对承载力和绝对承载力的含义和应用。

(4) 选取海河流域为研究对象，对水资源承载力量化计算所需要的边界条件进行了论证，采用各态历经学说和趋势法相结合的预测方法，以人口、水资源、社会经济和生态环境的“零增长”为水资源承载力的目标状态，提出了人口、社会经济、生态环境和水资源供需发展预测方法。按上述水资源承载力的预测、量化和评价综合分析方法，对海河流域进行了较全面系统的水资源承载力计算和评价，并提出提高水资源承载力的方法和对策。

## 第二章 水资源承载力的概念、内涵和分析基础

水资源承载力的研究目的是试图以水资源这单维资源作为约束条件来反映水资源对社会、生态环境和经济的贡献，从一个侧面来表征水资源与社会、生态环境和经济的协调发展特性，是水资源可持续利用的量的限制和测度。水资源承载力是关于人口、水资源、社会经济和生态环境多方面的内部特征和相互关系的综合指标，是研究人口、水资源、社会经济和生态环境等方面的边缘学科，涉及到多方面的技术问题，是一个复杂的生态经济巨系统。

因此，研究水资源承载力这一系统问题，就需要按系统科学原理，分析相关基础理论和支撑理论，分析其结构、功能和特性，对正确理解、合理建立水资源承载力指标体系和度量模型、恰当地度量区域水资源承载力对社会、环境、经济的支撑容量，完善水资源承载力从基础理论、概念、量化和评价，到实际应用的一整套系统体系是十分必要的。

### 2.1 水资源承载力的概念、内涵和目标

#### 2.1.1 水资源承载力的概念和内涵

一个国家或地区的资源承载力是指在可以预见到的期间内，利用本地能源及其自然资源和智力、技术等条件，在保证符合其社会文化准则的物质生活水平条件下，该国家或地区能持续供养的人口数量<sup>[19]</sup>。在吸收水资源承载力各种研究成果并结合水资源自身的特点的基础上，本文提出水资源承载力的定义为：在一定流域范围内，一定生活水平和一定科学技术条件下，水资源能够满足现状和目标的人口、社会经济和生态环境需求的最大支撑能力。

对水资源承载力内涵的理解应从其承载对象、承载条件、表现形式和研究范围等四方面来理解。

(1) 从承载对象上来看，根据定义水资源承载力的承载体是水，被承载体是人口、社会经济和生态环境。水资源承载力将生态环境作为被承载体来对待，与人口和社会经济系统相并列考虑，突出表现了人口、社会经济和生态环境这些被承载体之间的用水分配和协调关系，更接近水资源承载力支撑目的的客观性，弥补了以往水资源承载力研究中将生态环境的需求作为承载条件而不作为承载体的不足，突出了生态经济系统是水资源承载力研究基础的特点。但由于生态环境与水资源的定量关系目前研究地不够广泛，这种表现和研究方式对水资源承载力的研究难度加大。

一般意义上生态环境的定义很广泛，它包括生态系统和环境系统，包括了人类和水资源等自然资源的内容。在本文提出水资源承载力定义中的生态环境不包括人类和水资源，因为人口和水资源是水资源承载力研究的主要因素和内容，是从生态环境系统中分

离出来的独立变量，不能混淆，因此，定义中的水资源、人口、社会经济和生态环境等内容都是相对独立、不相互交叉的概念。这里的生态环境应主要指与水有关的不包括人类和水资源等自然资源在内的人类赖以生存和发展密切相关的自然环境，水资源承载力研究的生态环境用水的内容，应指为使生态环境不再恶化并逐渐改善而需要消耗的水资源总量，计算的主要目的是为了流域和区域水资源优化配置，即生态环境用水是针对我国 2.81 亿  $\text{m}^3$  水资源总量而言的<sup>[137]</sup>。

承载力的度量是反映承载体和被承载体之间的需求、配置和协调关系，承载体和承载对象、以及承载对象之间并不是完全相互独立的，而且是存在一定的关联。因此，不但对承载体和被承载体各构成因素之间进行不同层次深度的理解和内部相关关系的分析，而且还需要研究被承载体之间的关系，如人口的发展变化不但对水资源的供需有影响，对经济和生态环境都有很大的影响，这样将有助于揭示水资源承载力的内涵，有助于合理构建度量方法和评价体系。

(2) 从承载条件来看，水资源承载力应反映不同地点、不同时间、不同生活条件和不同科技发展水平情况下的水资源对承载体的支撑程度。

水资源承载力一般应限定在一个流域范围内研究才有意义，在这个流域内水资源承载力计算边界条件是相对稳定的，水文气象环境有一定规律、水资源量相对稳定、易于度量等。目前，我国水管理是以流域为单元，从自然角度看，流域是一种典型的自然区域，流域是以河流为网络的，分水岭包围的在地域上具有明显边界的区域，从经济角度讲，流域又是组织结合管理国民经济的、进行水资源开发为中心的区域。实践证明流域经济区已经成为很多国民经济发展的重要区域<sup>[10]</sup>。

不同时期的水资源对人口、生态环境和经济的承载能力是不同的，这样才能反映水资源承载力是水资源的可持续利用和社会可持续发展的思想，即水资源承载力反映的水资源分配利用的代内公平和代际公平。定义中虽然没有直接提到时间的概念，但却间接包含着不同时期、代内公平和代际公平等要点。首先从条件上看是反映一定时期的经济生活、科学技术条件，另外，是承载现状和目标的人口、生态环境和经济能力。

水资源承载力在同一流域、相同水资源的条件下，承载的人口、生态环境和经济的数量是不同的，这是因为人口、生态环境和经济所涉及到的生活水平、环境水平和科学技术发展水平是不同的。不同的生活方式和水平对于水的质量和数量的需求程度是不一样的。农村人口和城镇人口用水、南方和北方人的用水习惯、收入高低、产业结构、经济发展水平等都决定了对水的消耗量的不同。承载什么样的人口、需要什么样的环境，工业、农业、第三产业、城市化率等等对水资源的要求都存在着很大差异，换言之，某一流域的水资源能承载的现有人口、生态环境和经济，但不是某一高度发达国家的相同数量、规格的人口、生态环境和经济。同理，水资源承载力在不同流域、相同水资源的条件下，承载的人口、生态环境和经济的数量也是不同的。

科学技术发展水平对水资源承载力的影响也是非常显著的，一定时期的科学技术发

展水平决定了水资源开发、利用和管理水平,决定了一定的社会经济的发展水平。因此,科学技术发展水平从多方面影响着同一区域、同一水文气象、地理环境下水资源承载力的不同。虽然一个地区内的水资源量是相对稳定的,但可开发利用的水资源量是随着水开发科学技术发展水平不同而相差悬殊,水工程的建设数量、合理程度,水污染排放量和治理能力,用水指标和节水程度都对水资源承载力有很大程度的影响。

(3)从承载力的表现形式来看,应从以下两方面来理解。首先,明确水资源是对人口、社会经济和生态环境是支撑,是关键因素之一而不是决定因素。尽管水资源是人类社会和生态系统赖以生存和不可替代的资源,但人类社会的发展还要依靠土地、矿产、森林等资源,依靠地理、环境、政治、文化、政策等等诸多的因素和条件,同时,一定时期的人类社会的发展状况是人类历史长期演变而来的,一种条件和因素很难突然改变历史发展的进程和轨迹。水利是我国社会经济发展的基础,水资源制约着我国国民经济的发展,其影响是重要的,但是这种影响是渐变、互补的,从水资源的制约和人类反制约的矛盾转化过程中,人类总是以有效的手段,找出解决水资源短缺的途径、协调国民经济各部门的生产关系和利益冲突,使社会更加健康稳定地发展。

其次,水资源承载力是度量水资源支撑社会可持续发展的量化指标,应突出定量、简单、明确的特点,宜采用单一指标或少量的指标。但水资源承载力是反映人口、水资源、社会经济和生态环境之间关系的典型的生态经济系统,具有大系统多目标的特点,因此单一指标或少量的指标不能全面反映和表示水资源承载力承载的对象和目标,多指标评价或优化系统也是必然选择。单一指标很难反映它的全部内涵,多指标又不能突出简单和量化问题,如何简单而又综合地表达这种度量,是研究的重点之一。

(4)从承载力研究的范围来看,水资源承载力是从水资源的角度来研究对人口、社会经济和生态环境的贡献,包括水的数量、质量和分布,不包括如何进行水利工程开发和建设、如何防洪和灌溉、如何进行水污染管理等内容,既不研究工程措施。水资源承载力是从水资源管理、合理配置和技术经济角度来评价水资源的供需矛盾问题,水资源承载力是关于人口、水资源、社会经济和生态环境多方面的内部特征和相互关系边缘学科。

总之,水资源承载力将定性和定量地反映一个地区水的数量、质量、不同时段、不同空间地点的供需协调的综合能力,同时反映社会可持续发展在水利行业的具体表现,即水资源可持续利用的代内和代际公平的基本思想,反映人口、资源、社会经济和生态环境的生态经济系统复杂的大系统、多目标特点,水资源是对流域人口、资源、社会经济和生态环境总体上协调发展的支撑能力。

### 2.1.2 水资源承载力研究的目标函数

进行地区水资源承载力研究的目的在于发现、评估并确定地区水资源与人口、环境、社会、经济发展的定性和定量的关系,找出水资源对社会经济发展的控制和制约因素,以协调水资源与人口、环境、社会经济各要素的合理配置,及时调整经济布局,使社会

环境建立在人口、资源、社会经济和生态环境和谐发展的基础上，保证经济社会的可持续发展。

根据定义，水资源承载力分析的目标函数为

$$CCWR = F(P, EE, E, WA) | T, I, a, t \quad (3.1)$$

式中，

CCWR 为水资源承载力，Carrying Capacity of Water Resources 的缩写；

主要因素：P 为人口，EE 为生态环境，E 为社会经济，WA 为可利用水资源量；

限制条件：T 为科学技术水平，I 为生活水平，a 为评价流域或地区，t 为评价的时间。

上式表明，一个流域的水资源承载力可以表示为由水资源和若干承载对象的函数，而 P，EE，E，WA 又可表示为各自构成因素的函数。

水资源承载力一般是对某一发展阶段的评价，即某一时间某一流域的水资源承载力，这种评价是现状评价，采用的参数是当地、当时的科学技术水平、生活水平条件下产生的水资源开发量、经济部门用水、生活用水、环境用水、污染物排放量等指标。当采用目标的上述参数时，目标承载力或潜在承载力的评价结果就完全不同。因此，水资源承载力是建立在一定的社会发展和经济水平基础上的，是有条件的，水资源承载力是最大承载力、极限承载力还是最优承载力都是相对而言。

(1) 现状承载力：按当时的水资源合理配置情况，以当时的现状的科学技术水平、生活水平条件下产生的水资源开发量、各部门用水量 and 排污量等指标计算的水资源承载力。它是对当时条件下，对水资源和人口、资源、社会经济和生态环境协调关系的实际评价。

(2) 极限承载力：当水资源承载力构成因素中相对稳定因素部分如人口数量、经济规模等采用的指标是当时的现状指标，可变因素如效率和效益指标等采用的是理想或当时可接受的最优指标时，计算的水资源承载力就是极限承载力。

(3) 目标承载力：这是一个流域或地区的社会发展过程中，社会发展水平逐渐逼近到某一阶段目标时，按当时的参数和条件进行的承载力评价。例如，2030 年海河流域将实现现代化建设目标，按当时的水资源开发量、经济部门用水、生活用水、环境用水、污染物排放量等指标参数进行水资源承载力的评价是 2030 年的水资源目标承载力。注意的是社会发展目标是由国家发展规划决定的，从某种意义上讲是历史发展的必然，水资源条件应该是发展规划的依据条件之一。

本论文所涉及的水资源承载力评价是在现状评价标准和设计的评价标准的基础上进行现状水资源承载力和目标水资源承载力评价。现状水资源承载力将采用流域现状统计指标，进行承载力计算。目标水资源承载力按国民经济规划规定的目标，预测水资源承载力构成因素的指标，然后进行承载力计算。

那末，水资源承载力的“最大支撑能力”如何反映呢？按照水资源可持续利用原则，

满足水资源分配的代内和代际公平，谋取效用最大化，在各用水部门水资源的合理配置上，由此得出的水资源承载力即反映了“最大支撑能力”；或者，调整部分用水效率、效益和发展程度指标，进行动态分析，在满足效用最大化的条件下，也可得出的水资源承载力的“最大支撑能力”指标。

### 2.1.3 水资源承载力系统结构和功能

水资源承载力系统结构。依据水资源承载力的定义，水资源承载力是关于人口、水资源、社会经济和生态环境多方面的内部特征和相互关系的综合指标，是研究人口、水资源、社会经济和生态环境等方面的边缘学科，涉及到多方面的技术问题。它所表达的是关于水资源-人口-生态环境-经济的特定的复杂巨系统的概念，而任何系统的存在，都有其相应的结构<sup>[19]</sup>。水资源承载力研究系统的结构是指系统内部各要素之间的相互作用方式与关系。主要体现在水资源子系统、人口子系统、生态环境子系统和社会经济子系统的各自特性、相互之间的作用和联系关系，每个子系统又包含若干层次的子系统，根据研究的需要和精度，水资源承载力的子系统层次将达到设定的水平。

水资源承载力系统结构是网状结构，即水资源承载力、人口、水资源、社会经济和生态环境之间，以及构成因素之间都有某种关系，它们之间既互相联系又互相影响，形成错综复杂的网状结构。

水资源承载力系统功能。任何系统均具有一定的结构和相应的功能，二者是相互统一的整体。系统的结构决定系统的总体功能，功能的好坏又成为检验系统结构是否合理的尺度，系统结构是系统内在因素有序合成的反映，功能则是系统外在特性与能力的表现<sup>[19]</sup>。水资源承载力是水资源这一单维资源对人口、社会经济和生态环境可持续发展贡献综合指标，是水资源可持续利用量的限制和测度。它的功能是及时评价水资源对人口、水资源、社会经济和生态环境的支撑状况，反馈并调整系统结构和协调匹配关系，以及调整各子系统的发展水平和发展方向。

### 2.1.4 水资源承载力系统特性

分析水资源承载力的特性有助于理解它的内涵，把握其分析和评价方法。水资源承载力的特性主要包括相对性、动态性、公平性、极限性、多目标性和协调性等六个方面，这些反映的是主要特性，其他的诸如社会性、模糊性、不确定性、振荡性、系统性和定量性等等是次要特性，不明显代表水资源承载力的研究特征，这里不做论述。

水资源承载力的相对性是指水资源承载力是在一定生活条件和一定科技水平下的量度和指标，在水资源条件、人口数量和经济发展状况相同时，不同生活条件和不同科技水平会产生不同的承载力。相对性是反映同一时间段、不同地理位置的水资源承载力的差异，反映的是沿时间坐标横断面方向水资源承载力的变化情况。如相同水资源条件下、相同的流域特性能承载一个国家或地区一定数量的人口、社会经济和生态环境，但不能承载另一发达国家或地区的具有相同数量的人口、社会经济和生态环境。

水资源承载力的动态性是指反映在不同时间段、同一地理位置的水资源承载力的差别,水资源承载力的指标表现出随时间动态变化的特征。一方面,随着经济发展、技术进步和节水意识的增强,水的利用效率越来越高。同时人类的生活水平越来越高,生活用水和生态环境用水量都在变化。另一方面,人类开发利用水资源的能力越来越强,可利用水资源的数量在发生变化。动态性主要反映的是沿时间坐标方向纵断面水资源承载力的变化情况,也说明了水资源承载力象其它事物一样,总是处于不断发展变化的历史过程中。

水资源承载力的公平性是指水资源承载力一定要反映可持续发展的指导思想,即水资源的有效利用和配置不仅反映代内公平,还要反映代际公平。在同一时间段水资源在人口、社会经济和生态环境等不同用水领域按公平和可持续原则进行配置,在不同时间段也要按公平和可持续原则进行配置。尤其是对水资源承载力反映代际公平问题的理解是近些年来关于资源合理配置研究的焦点。

水资源承载力的多目标性体现在结果上,即承载目标的多样性,水资源承载体是人口、生态环境和经济发展等大系统多目标的优化问题,而不是仅仅承载人口或者最大供水容量或者只承载经济发展等单一指标的优化问题。社会和经济问题的复杂性决定了相关研究的表达方式的多样性。

水资源承载力的极限性主要体现在某一时间段的发展过程中,在水资源合理配置的条件下对人口、经济发展和生态环境保护的最大支撑能力。水资源承载力是沿用力学中的承载力概念抽象而来,承载力的基本特性具有极限性,类似地,水资源承载力也应具有极限性的属性。根据水资源承载力的定义,它是对人口、社会经济和生态环境的最大支撑能力,显然具有极限性。但理解极限性应考虑到是一定时间和区域内的相对概念,即相对极限性,而不是绝对极限性。

水资源承载力的协调性反映的是通过水资源承载力的分析计算,更合理地进行水资源在人口、资源、社会经济和生态环境中的有效配置,协调各领域、各部门之间的用水分配问题,正确把握人与自然的协调,经济与环境的协调关系。由水资源承载力任务和目的的规定性和水的特殊性决定了水资源对人口、生态环境和经济的较大程度的协调作用。由于水资源承载力突出定量性,水资源承载力作为一种尺度,不断动态衡量、准确地反映水资源在部门间和代际间的供需矛盾情况,以便制定相应对策,达到动态平衡。

#### 2.1.5 水资源承载力研究的空间规定

每一个研究课题都需要确定边界条件,水资源承载力研究的空间规定是水资源承载力的边界条件,它是指什么范围内的水资源承载力问题。水资源承载力研究必须具备一定的实施时间和空间边界条件,水资源承载力的研究空间可以是一个国家、一个流域、或者是具有一定水文和经济规模的地区,但一般不能无限缩小到一个县、一个乡。随着经济全球化、信息化的发展,科技水平决定了社会经济等研究问题的边界越来越大、越



来越广，以往某一问题的优化在一个较小的范围内是成立的，但在更大的范围内就可能不准确，是局部最优问题。水问题的研究和其他经济问题一样，现在研究的边界越来越大，范围越来越宽，科技发展为获得优化的更高精度提供了可能。因此，选取适当的空间边界有助于解决精度问题。

目前流行的可持续发展理论研究中对流域的概念重视的还不够，可持续发展应该以流域为研究单元，离开流域的大背景谈行政区域的可持续发展一般缺少必要的边界条件和制约条件。从水的形成来看，水资源承载力以流域为边界条件最合适，因为水资源的流域特征清晰、独立和完整。从社会经济角度划分来看，以行政区域、经济区域为边界，表现水资源承载对象的特征比较明显，如省市的社会经济目标规划最能体现水资源承载对象的状况，相对地，该省市的水资源边界条件却较难确定。因此，水资源承载力的边界条件应以流域为主，以行政区化分析水资源承载力可参照以流域为边界的分析方法，但资料的采集和精度都有一定程度的降低。

#### 2.1.6 水资源承载力与水环境承载力

水环境承载力是水资源承载力的重要组成部分，研究水资源承载力包括水环境承载力问题。水环境承载力是指一定水域、一定时期内，为了维持水域生态环境和人类健康环境，实施设定的水质和环境质量目标对人类活动的支持能力<sup>[19]</sup>。它是水资源承载力研究的主要内容之一，水环境承载力应纳入到水资源承载力的含义之中。

以往的水资源承载力研究将生态和环境作为承载力的支撑条件来对待，即水资源在满足生态环境用水的前提下，水资源对人口和社会经济的支撑能力，因此，为满足水资源承载力涵义的要求，水环境承载力不得不单独进行分析和研究。本论文将生态环境作为水资源的承载对象，与人口、社会经济同等对待，是承载对象不是承载条件，故此，水环境承载力纳入到水资源承载力的基本内涵中，不单独分列研究。

### 2.2 可持续发展理论是水资源承载力研究的指导思想

#### 2.2.1 可持续发展理论的提出

可持续发展是在全球面临着经济、社会、环境三大问题的情况下，人类对自身的生产、生活行为的反思以及对现实与未来的忧患的觉醒而提出的全新的人类发展观<sup>[94]</sup>，它的产生有其深刻的历史背景和迫切的现实需要。20 世纪中叶以来，随着科学技术突飞猛进的发展，人类已经生活在一个大变革、大动荡的世界里，由于人口的急剧增长，导致了人口与经济、人口与资源矛盾的日益突出，人类为了满足自身的需求，在缺乏有效的保护措施情况下，大量地开采和使用自然资源，使资源耗竭严重、生态环境恶化，威胁了人类的生存和发展。面对着人口、资源和环境等人类发展历史上前所未有的世界性问题，谋求人与自然和谐相处、协调发展的新的发展模式成为当务之急，可持续发展思想形成有其必然性。

可持续发展理论的形成经历了相当长的历史过程。本世纪 50 到 60 年代,人们在经济增长、城市化、人口、资源等所形成的环境压力下,对经济增长等于发展的模式产生质疑。1962 年,美国女生物学家卡逊发表了著作《寂静的春天》,作者首次把农药污染的危害展示在世人面前,惊呼人们将会失去“春光明媚的春天”,在世界范围内引发了人类关于发展观念上的反思<sup>[116]</sup>。10 年后,两位著名美国学者沃德和杜博斯的享誉世界的《只有一个地球》问世,把人类生存与环境的认识推向一个新境界。同年,一个非正式国际著名学术团体-罗马俱乐部发表了有名的研究报告《增长的极限》,明确提出“持续增长”和“合理的持久的均衡发展”的概念。1987 年秋季的联合国第 42 届大会上,世界与环境发展委员会发表了一份报告《我们共同的未来》,正式提出可持续发展概念,并以此为主题对人类共同关心的环境与发展问题进行了全面论述,受到世界各国政府组织和舆论的极大重视,从而使《我们共同的未来》成为奠定可持续发展思想的基础报告。1992 年 6 月在巴西里约热内卢举行的联合国环境与发展大会上通过了《里约宣言》、《21 世纪议程》等五项文件和条约,从而标志着可持续发展思想被世界上大多数国家和组织承认并接受,标志着可持续发展从理论开始付诸实施,从此,拉开了一个新的人类发展时代的序幕。执行《21 世纪议程》,不但将促使各个国家走上可持续发展的道路,还将是各国加强国际合作,促进经济发展和保护全球环境的新开端。

巴西联合国环境与发展大会以后,世界各国都开始根据各自的国情制定相应的战略,中国政府于 1994 年 3 月制定并通过了《中国 21 世纪议程--中国 21 世纪人口、环境与发展白皮书》,从此作为中国今后发展的总体战略文件,来指导全社会可持续发展的进程。我国 21 世纪议程的战略目标<sup>[117]</sup>确定为“建立可持续发展的经济体系、社会体系和保持与之相适应的可持续利用资源 and 环境基础”。2000 年前,主要的具体目标有:在保持经济快速增长的同时,依靠科技进步和提高劳动者素质,不断改善发展的质量;促进社会的全面发展与进步,建立可持续发展的社会基础;控制环境污染,改善生态环境,保护可持续利用的资源基础;逐步建立国家可持续发展的政策体系、法律体系,建立可促进可持续发展的综合决策机制和协调管理机制。我国 21 世纪议程的要点:控制人口增长:目前我国平均每公顷耕地养活 10 个人,如果人口继续增加,而耕地不断减少,则要求每公顷耕地承担养活的人数将要更多,如果中国总和生育率保持在 1.8%以下,到 2030 年可实现人口零增长;发展生态农业:在发展农业生产的同时,必须养护农业资源、防治水土流失,有利于生态平衡,实现良性循环,大力发展畜牧业,水产养殖业和多种经营;工业实现清洁生产,减少污染,保护森林、水源和生物多样性;建立促进可持续发展的综合决策和协调管理的支持系统。

总之,可持续发展理论是在资源环境问题日益严重的背景下产生的。

### 2.2.2 可持续发展理论的概念和内涵

可持续发展的概念众说不一,最具权威性的是 1987 年联合国世界环境与发展委员会

的报告《我们共同的未来》中提出的,把可持续发展定义为“既满足当代人的需要,又不对后代人满足其需要的能力构成危害的发展”。这一定义得到广泛的接受,并在1992年联合国环境与发展大会上取得共识。一般地讲,可持续发展有5个共同的因素:环境与资源的关系,代内公平,代际公平,生活质量与生态环境的关系,公众参与。简言之,可持续发展被概括成为一个“三维复合系统”,生态持续是基础,经济持续是条件,社会持续是目的<sup>[94]</sup>。

根据不同的目标,对可持续性可以有经济的、生态的和社会文化的这三种主要的不同解释。经济学解释为,以最小量的资本投入,获取最大的收益。生态学观点认为可持续性是指保持一个健康生态系统的稳定,应限制对生态系统的开发,从全球看,保持生物多样性是关键。可持续性的社会文化概念是试图保持社会和文化体系的稳定,包括减少它们之间的毁灭性碰撞,保持全球文化教育多样性,促进代内和代际公平。大多数国家一般按以下四个基本系统条件来指导自己国家的可持续发展计划<sup>[144]</sup>:

- (1) 应使有限的自然资源的取用减至最小。
- (2) 须停止将生物不可降解的物质排放到环境中。
- (3) 应该保持物质循环流动的物理条件。
- (4) 可再生资源的取用不应该超过它们的再生速度。

可持续发展实际上是可持续社会、可持续经济、可持续生态3个方面相互协调的综合体,人类在发展中不仅追求经济效率,还追求生态和谐和社会公平,不要以牺牲后代人的经济福利为代价来满足当代人的经济福利。其实质是要正确处理发展与环境、资源的关系,人类的经济活动与经济发展不能超过资源与环境的承载能力,以保障当代人与后代人持续健康的生存与发展。概括起来讲,可持续发展可以归纳为以下几个特征<sup>[10]</sup>:(1) 可持续发展鼓励经济增长,因为是国家实力和社会财富的体现;(2) 可持续发展要以保护自然为基础,与资源和环境的承载能力相协调;(3) 可持续发展要以改善和提高生活质量为目的,与社会进步相适应。

### 2.2.3 可持续发展的量化评价方法

如何衡量可持续发展的状况,也就是说如何量化可持续发展是评价和保证可持续发展的重要课题。目前有很多文献都对可持续发展的量化评价作了大量的研究,但并没有一个统一的结果,最有代表性的研究方法是在分析地区可持续发展主要影响因素的基础上,建立可持续发展指标体系,然后采取不同的方法进行有目的、有方向性的综合评价。社会经济的可持续发展是综合概括了人类社会方方面面的因素和领域,可持续发展的评价必然是大系统、多目标、多层次的问题,单一或片面的指标的作用是非常有限和欠缺的,不能全面反映地区可持续发展情况,可能发生误导作用,因此建立可持续发展指标体系进行综合评价才是科学、合理、实用的方法。

尽管可持续发展指标体系内容十分丰富,但由于制度、思想、道德、文化和社会安

定等较为抽象的方面难以用指标表示，所以目前可持续发展评价指标体系一般限定在经济、社会、资源和生态环境方面。典型的指标体系为：第一类经济指标、第二类社会指标、第三类资源指标、第四类环境指标，每一类指标下分小类指标，如第三类资源指标下分3小类为：资源状况指标、资源潜力指标、资源利用效率指标等。

由此可见，资源方面是可持续发展研究和评价的重要组成部分，而构成资源的土地资源、矿产资源、海洋资源、森林资源、水资源等等由于其特点和性质不同，资源的可持续发展评价和研究显然各具特色、并对社会可持续发展有很大的影响。自然资源是经济发展之母，环境是人类生存与经济发展之躯，科学技术是经济发展之父。经济发展是在一定环境条件下，由科学技术对自然资源的处理而实现的。因此，可持续发展的根本问题是自然资源的利用与环境的改善<sup>[12]</sup>。

#### 2.2.4 水资源的可持续利用与水利可持续发展

在社会可持续发展的历史背景下，必然延伸出人类社会构成因素的可持续发展问题，诸如土地资源可持续发展、矿产资源可持续发展、海洋资源可持续发展、森林资源可持续发展、水资源可持续发展等研究问题，社会可持续发展脱离不开这些资源的可持续发展问题，也就是说没有这些资源的可持续发展社会可持续发展是不可能的。水资源的可持续利用是水资源在可持续发展理论的要求下，水资源既要满足当代人使用水资源的需求，又不对后代人满足水资源需要的能力构成危害的水资源利用。它是社会可持续发展理论在水资源领域的具体应用、是社会可持续发展的细化、也是社会可持续发展的重要组成部分，没有水资源的可持续发展就没有社会可持续发展。水资源的可持续利用与社会可持续发展是局部与整体的关系。

水资源的可持续利用不但是水行业为了支持社会的可持续发展而提出的，也是水资源日益短缺、水环境污染越来越严重的严峻形势下的必然趋势。

水利可持续发展是使水事活动既满足当代人的需求，又不损害后代人满足其需要的能力的水利发展<sup>[21]</sup>。水利可持续发展的一个重要的目标是水灾的有效防治，水灾是难以根本消除的，无论防治水灾标准如何提高，稀遇的水灾仍然会出现，仍然可能超过防御标准，会造成灾害损失。所谓“有效控制”主要是指在一定的经济发展阶段，科学技术水平和财力允许的情况下，尽量减少灾害损失，将超标准洪水灾害控制在不损害一个地区社会经济总体持续发展的程度之内。水利可持续发展另一个目标是水污染的防治：应用各种措施维护和改善水生态环境。

水利和水资源的概念有很大的区别，随着社会的进步和经济的发展，它们的释意越来越完善，水利一般指水对人类兴利与除害的含义，水利是使水有利于人类事业，是采取各种人工措施对自然界的水进行控制、调节、制导、开发、管理和保护，以减轻和免除洪水、干旱、污染灾害，并利用水资源满足人类生产和生活需要的活动<sup>[118]</sup>。水资源则指在当前经济技术条件下可为人类利用的那一部分水，如浅层地下水、湖泊水、土壤水、

大气水、及河川水等淡水。同样水利可持续发展和水资源的可持续利用也就有很大的不同，水资源可持续利用与水、旱、污灾害的持续有效的防治，是水利可持续发展的目标与要求；水利可持续发展则是实现水资源可持续利用及水旱灾害与水污染持续防治与控制的途径与手段。国民经济和社会可持续发展要求通过水利可持续发展保证水资源的可持续利用。

### 2.2.5 水资源承载力与可持续发展的辩证关系

由以上分析可以看出，社会可持续发展在水利行业的具体体现就是水利可持续发展，单纯从水资源领域考虑可持续发展问题就是水资源的可持续利用。社会可持续发展的研究是一个多目标、多层次的大系统问题，而作为人类社会构成因素之一的资源的水资源方面，虽然涵盖在人类社会这个大系统之中，但它自成体系，水利可持续发展和水资源的可持续利用仍然是一个多目标、多层次的大系统问题。

水资源承载力是水利可持续发展和水资源的可持续利用研究的重要量化方法之一，它能较系统、准确、简洁地表达为实现社会可持续发展，水资源对社会经济系统的支撑能力和状况。它以水利可持续发展和水资源的可持续利用为目标，以社会可持续发展为最终目的，使水资源既满足当代人的需要，又不对后代人满足对水资源的需要构成损害。

可持续发展理论是水资源承载力研究的指导思想，水资源的使用就是要在代内和代际公平，并维持水资源、水环境的良性循环、实现水资源合理配置，从而达到水资源的可持续利用。如何将可持续发展理论反映到水资源承载力的概念和评价方法当中，是水资源承载力评价体系完整与否的关键。实现水资源的可持续利用是社会可持续发展的必要条件，没有水资源的可持续利用也就没有社会的可持续发展。要想使水资源开发达到可持续，必须进行合理配置和承载力研究<sup>[25]</sup>。

## 2.3 生态经济系统理论是水资源承载力的研究基础

传统经济理论是将整个经济社会看作一个系统，没有特别考虑自然资源和环境的影响，因此，许多资源没有被市场所涵盖，这些资源没有所有权，也没有价格。人们不是通过更有效地利用资源，而是通过过度使用不属于自己的资源创造人类之所需，从而造成资源和环境的浪费和恶化。资源短缺和环境恶化的压力迫使人类重新面对自然界，将资源和环境纳入经济系统，从经济学和认识论的角度开阔眼界，使人类和自然环境走向了和谐、协调发展的道路。

### 2.3.1 资源、环境相关的概念及定义

为论述的方便，将本论文中采用的资源、环境、经济等概念的定义进行明确，防止概念的混淆。

资源：本文指自然资源，不包括人力、资金和技术等社会资源。它是指自然界中与人类社会发展有关的，能被利用来产生使用价值并影响劳动生产率的自然要素。按联合

国环境规划署的定义，自然资源是指在一定时间、地点的条件下能够产生经济价值，以提高人类当前和未来福利的自然环境因素和条件。它包括有形的土地、水体、动植物、矿产和无形的光、热等资源<sup>[19]</sup>。资源是社会物质财富的源泉，是社会生产过程中不可缺少的物质要素，是人类生存的自然基础。资源类型，有多种划分方法：（1）按其在地表上存在的层位，可划分为地表资源和地下资源。前者指分布于地球表面及空间的土地、地表、水生物和气候等资源，后者指埋藏在地下的矿产、地热和地下水等资源。（2）按其人类生产和生活中的用途，可分为劳动资料性资源和生活资料性资源。前者指作为劳动对象或用于生产的矿藏、树木、土地、水力、风力等资源；后者指作为人们直接生活资料的鱼类、野生动物、天然植物性食物等资源。（3）按其利用限度，可分为再生资源和非再生资源。前者指可以在一定程度上循环利用且可以更新的水体、气候、生物等资源，亦称为“非耗竭性资源”；后者指储量有限且不可更新的矿产等资源，亦称为“耗竭性资源”。（4）按其数量及质量的稳定程度，可分为恒定资源和亚恒定资源。前者指数量和质量在较长时期内基本稳定的气候等资源；后者指数量和质量经常或不断变化的土地、矿产等资源。

环境：是围绕人这个主题以外的客观条件，有自然和社会环境之分。本文环境的定义限定在自然环境方面，它是指生物圈、大气圈、岩石圈和所有的动植物群，是人类生存的基础，也是生态经济系统产生、演化和发展的基础。资源和环境并无严格区分，当人们关心的是物质、能量、动植物产品与某些社会经济生产、消耗过程中所需信息资料时，一般把自然系统的这部分叫做资源；当人们关心的是经济活动中能量、物质消耗后的废弃物回归场所时，一般称自然系统的这部分为环境<sup>[19]</sup>。

经济：是指全体经济人、由它们组成的机构以及经济人和机构发生关联的地方。

生态系统：是指一定空间范围内，生物群落与其所处的环境所形成的相互作用的统一体<sup>[120]</sup>。它有生命系统和非生命系统即环境系统两大部分构成。它通过生产者—能进行光和作用供自身和其它生物类群提供生长发育之所需的绿色植物、消费者—动物、和分解者—能分解有机物能力的微生物，与周围环境之间进行着无休止的物质循环、能量转化和信息传递，为人类社会提供了各种物质产品和生态环境效益。

### 2.3.2 生态经济系统理论内涵

生态经济系统或称自然-环境-经济系统，是生态系统与经济系统相互联系、相互作用、相互交织构成的具有一定结构和功能的复合系统。它是一切经济活动的载体，任何经济活动（包括自然资源利用活动）都是在一定的生态经济系统中进行的<sup>[19]</sup>。生态经济系统由生态子系统和经济子系统组成，生态子系统是由生命系统和非生命系统即环境系统两大部分构成，经济子系统是由社会生产中生产力与生产关系的结合，并通过经济运行联系，构成整个的经济系统。

研究生态系统与经济系统的复合系统——生态经济系统的矛盾发展规律及其应用的

经济学分支就是生态经济学。生态经济学是一门从经济学角度来研究由社会经济系统和自然生态系统复合而成的生态经济社会系统运动规律的科学，它研究自然生态和人类社会经济活动的相互作用，从中探索生态经济社会复合系统的协调和可持续发展的规律性。如何实现生态系统与经济系统协调发展是生态经济学的中心课题。生态经济系统基本矛盾是：具有增长型机制的经济系统对自然资源需求的无限性与具有稳定型机制的生态系统对自然资源供给的有限性的矛盾。它以马克思政治经济学理论和生态学理论为基础，运用现代系统理论的分析方法，从结构、功能、平衡、效益、调控角度提示出生态系统这一客观实体的运动发展规律。美国学者莱斯特·R·布朗在《生态经济系统学——有利于地球的经济构想》<sup>[15]</sup>中指出的，一个能维系环境永续不衰的经济——生态经济，要求经济政策的形成，要以生态原理建立的框架为基础。经济学家和生态学家携起手来就可以构建出一种经济，一种可持续发展的经济。

### 2.3.3 水资源承载力研究以生态经济系统理论为基础

水资源承载力的目的是衡量水资源这单一资源对人口、生态环境和经济需求的最大容量或最大支撑能力，并且是人口、生态环境和经济三者相互协调的基础上的最大容量或最大支撑能力；而生态经济系统理论是研究自然生态和人类社会经济活动的相互作用，从中探索生态经济社会复合系统的协调和可持续发展的规律性。生态经济系统是可持续发展的经济系统，从可持续发展的角度，生态经济系统是与之相适应的研究生产力和生产关系的经济理论，目的是社会经济和生态环境协调发展。从这种意义上讲，水资源承载力和生态经济系统研究的最终目的是一致的，生态经济系统理论是宏观经济问题，水资源承载力是微观和量化度量问题，水资源承载力应将生态经济系统理论作为研究基础，利用生态经济系统理论的研究原理，如生态经济系统下的价值规律、分配规律、资源配置方法等来指导、衡量水资源承载力研究过程中的影响因素分析、模型建立、评价指标选取、计算依据的选择等。

综上所述，水资源承载力以可持续发展理论为指导思想，以生态经济系统理论为理论基础，以实现水资源的可持续利用为目标，从而达到水资源承载力能够度量和量化水资源这单一资源对社会可持续发展的最大支撑能力。

## 2.4 资源承载力

研究水资源承载力必然涉及到资源承载力问题，因为水资源是资源中的重要而又特殊的一种。自然资源按其再生产过程中消耗方式的不同，可划分为耗竭性资源和非耗竭性资源，按补偿方式的不同，可划分为可再生资源 and 不可再生资源，由于各种资源的存在方式、使用和储量的特点及性质不同，不同资源的承载力研究方法有很大区别，笼统的资源承载力的研究不能代表和反映不同资源的承载力问题的特点。

### 2.4.1 资源承载力定义、内涵和特点

研究资源承载力是社会可持续发展的内涵所规定的，是可持续发展战略三个基本原则之一“持续性原则”的要求，持续性原则要求人类的经济和社会活动及发展不能超过资源与环境的承载能力。区域可持续发展是指区域人类生态系统的和谐稳定发展，而该系统的和谐稳定是靠一定的资源基础和环境容量来支持的<sup>[121]</sup>，所以研究资源承载力的目的是实现有限资源的合理配置、实现资源的可持续发展，保障当代人与后代人持续健康的生存与发展。因此，资源承载力是承载力概念和理论在资源科学领域的具体应用，资源承载力的研究将是揭示资源的合理配置、实现资源可持续利用的主要定量分析方法之一。

目前对资源承载力没有一个公认的确切定义，资源承载力的概念在 80 年代初被联合国教科文组织（UNESCO）定义为：一个国家或地区的资源承载力是指在可以预见到的期间内，利用本地能源及其自然资源和智力、技术等条件，在保证符合其社会文化准则的物质生活水平条件下，该国或地区能持续供养的人口数量<sup>[19]</sup>。

如何实现有限资源的合理配置、有限资源到底能承载多大规模的人类生存是目前全球关注的重点问题，如何研究这一庞大的巨系统，目前尚无成熟的方法，但单维资源的承载力研究已取得了很大的进展，尤其是土地资源承载力的研究起步早，比较深入，为其他资源的研究所借鉴。经济社会的发展是历史、资源、生态、环境、社会、宗教、文化等等诸多因素综合促进、支撑、协调和作用的结果。主导人类承载力的社会选择包括政治制度、文化背景、技术进步、分配制度、消费方式、价值观念、发展目标等方面，不但多种多样，而且随着时间不断变化，因此，赋予了人类承载力以规范性、多层次性、动态性、非客观性甚至一定的政治性等特质<sup>[3]</sup>。同时也说明了单一资源承载力研究并不能全面反映有限资源的合理配置，但单一资源承载力的研究是资源承载力的组成部分，从一个侧面、或一定程度上反映这一资源承载力对人类社会发展的支撑作用和贡献。

资源系统包括自然资源、经济资源和社会资源，目前资源承载力的研究主要集中在自然资源领域，研究较多的有土地资源承载力、矿产资源承载力、旅游资源承载力、水资源承载力等。自然资源按其人类社会再生产过程中消耗方式的不同，可划分为耗竭性资源和非耗竭性资源，按补偿方式的不同，可划分为可再生资源 and 不可再生资源，如示意图。因此，土地资源承载力、矿产资源承载力、旅游资源承载力、水资源承载力的研究方法是不同的。土地资源属于非耗竭性资源，并不因使用而消失，也可以通过补偿恢复因超量使用而劣化了的土地，这使得土地承载力的研究主要是探讨与土地的自然再生能力相适应的人地关系问题<sup>[122]</sup>，类似的也包括草地资源承载力、旅游资源承载力等；矿产资源属于耗竭性资源，是通过百万年计的地质年代的综合地质作用而逐渐形成的，因而用一点就会少一点，所以，矿产资源的承载力研究，更多地是要探讨持续发展下的承载力问题；水资源属于是有限的可再生资源，如果利用合理，则会象土地资源一样，可以持续利用；如果使用不当，则就会象矿产资源一样，用一点少一点，直至枯竭，这就使得水资源承载能力的研究更具复杂性<sup>[122]</sup>。



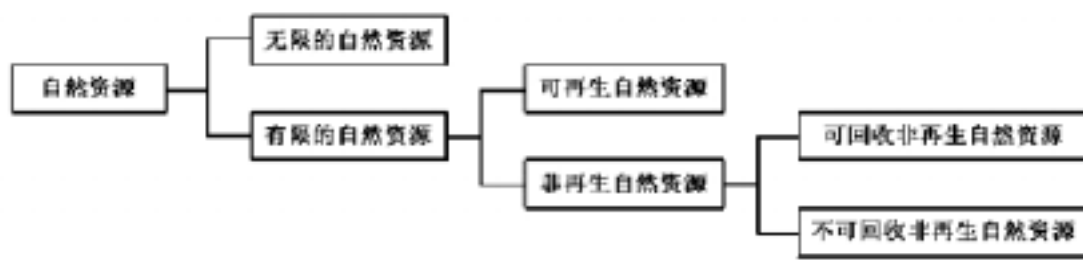


图 2.1 自然资源构成<sup>[18]</sup>

资源承载力是一个国家或地区资源的数量和质量对该空间内人口的基本生存和发展的支撑能力，它可以因人类对环境的改造而变化。如果用不同的社会经济活动来衡量一个区域的资源承载力，会得出不同的结论。

## 2.4.2 土地资源承载力

### 2.4.2.1 土地资源承载力研究目的

土地资源是满足人类基本需求的食物的主要来源，和水资源一样是人类生存最基本的自然资源，是人类赖以生存和发展的基础。今天，资源、环境、人口三者之间的矛盾随着人口的骤增变得更为突出，由此引起的资源短缺、环境恶化等问题益发受到注目。全球的土地资源生产能力能否满足未来人口的食物需求？各个国家的土地资源是否足以使该国未来人口的需求达到自给？这个问题理所当然地为有关国际组织和各国政府所瞩目，土地资源承载力研究便应运而生，并且得到迅速发展<sup>[123]</sup>。我国国土面积 960 万平方公里，折合 143.97 亿亩，人均占有量则不足世界的 1/3；全国耕地为 20.63 亿亩，人均 1.79 亩/人，不足世界 4.03 亩/人的 1/2；山地、丘陵、高原占 69%，平原、盆地 31%。概况地说，我国土地总量大；人均占有量少；山多平地少，耕地比例小；分布不均衡。我国仅以世界 7%的耕地养育了占世界 22%的人口，人口与土地的关系比大多数国家还要尖锐，土地承载力的确很大<sup>[124]</sup>。

土地资源承载力是目前资源承载力研究中开展比较早、比较成熟的课题，1986 年我国就开始了土地资源承载力研究。目的是力图在实地考察、经验估价、理论框架和已有田间实验相结合的基础上，运用系统工程的方法，建立一个区域土地资源承载力研究模式，以定量阐明区域不同时期的土地资源生产力与人口承载量，为制定区域相应的人口、粮食、土地和农业发展等方面的方针、政策和决策提供翔实的科学依据<sup>[125]</sup>。

### 2.4.2.2 土地资源承载力概念和研究方法

中国科学院自然资源综合考察委员会为土地资源人口承载力下的定义是：“在一定生产条件下土地资源的生产能力和一定生活水平下所承载的人口限度”<sup>[123]</sup>。根据土地承载力的定义，可以看出，影响土地资源承载力的三个主要要素：生产条件、土地生产力和人的生活水平，被承载体的度量是人口的数量，由于生产条件和土地生产力涵盖了经济、技术、文化等因素，因此，土地资源承载力是涉及到人口、经济、资源、环境在内的复杂的大系统综合研究和评价问题。

目前土地资源承载力的计算和评价主要有两类，即在土地资源承载力研究初期的土地能养活多少人计算和土地资源承载力综合评价。

传统意义上的土地资源承载力研究实质上是围绕耕地粮食人口而展开的，它以耕地为基础，以粮食为中介，以人口容量的最终测算为目标<sup>[126]</sup>。土地资源承载力最终要归结到“养活多少人”这样一个概念上来，于是将“土地人口承载力”的研究划分为两个阶段，即“土地生产潜力估算阶段和土地承载能力研究阶段”，并将土地局限于耕地，将生产潜力局限于粮食生产潜力。随着可持续发展理论的完善和土地资源承载力问题研究深入，土地资源承载力从传统意义上的粮食人口问题，扩展到了土地资源综合承载力问题的研究研究。土地资源承载力的研究离不开区域分析，以往研究中往往将区域土地承载力系统作为一个孤立、封闭的系统，强调其空间限制性而忽视其开放性<sup>[126]</sup>。因此，建立土地资源承载力综合评价指标体系，客观、全面地反映土地资源在社会、人口、经济、资源、环境大系统中的支撑和承载作用，才能实现土地资源可持续利用，从而为社会可持续发展提供必要条件。

具体计算土地资源承载力过程中，主要在研究<sup>[127]</sup>各类资源之间的平衡关系、资源结构与农业生产结构之间的平衡关系、不同土地资源类型内部光、温、水、养分等诸因素的平衡关系、人口需求与土地资源生产能力之间的平衡关系、以及为寻求提高承载能力的途径和措施反馈机制研究的基础上，在研究方法上突出了资源可能性，同时充分考尽可能满足人民生活的需求，并注意生产惯性的影响，最后通过作物的单位面积产量预测、资源平衡及资源结构与农业结构（土地利用结构）的匹配、总产量预测、耕地面积选择、养分平衡估算、投入水平预计等过程，计算现状和未来的土地资源承载能力。

#### 2.4.2.3 土地资源承载力研究的主要特征

土地资源承载力是最基本的资源承载力问题，该类研究为其它资源承载力问题提供了典型的范例。

（1）土地资源承载力的主体是土地资源，土地的有限性、地理位置的不可移动性、可更新性和不可替代性构成了土地资源的特殊属性，其中不可移动性、是其区别于其它自然资源的本质属性，这就决定了土地资源的存量和质量时空的有限性与局限性，也规定了土地资源承载力研究的固有特性。

（2）土地资源承载力的载体主要限定在“养活多少人”这样一个概念上，在一定意义上难以真正揭示区域人地关系的相互制约、相互促进的复杂关系。因此应将土地承载物不仅仅限定在人口上，而拓展土地资源承载力是社会、经济、环境协调作用的中介和协调程度的表征。

（3）土地资源承载力的计算过程中突出表现在研究土地的生产能力方面，单位面积产量预测、资源平衡及资源结构与农业结构（土地利用结构）的匹配等研究是区别其它资源承载力的特点之一。

（4）土地资源承载力是社会可持续发展的“支撑系统”研究还是决定性因素的研究

有待加深,这样有助于对“支撑系统”进一步透视系统的结构与功能,并可根据各因素剖析它们在各支撑系统中的不同地位,体现人们对环境积极、能动作用的一面<sup>[128]</sup>。

### 2.4.3 矿产资源承载力

矿产资源承载力是指:在一个可预见的时期内,在当时的科学技术、自然环境和经济社会经济条件下,矿产资源可支持的经济总量<sup>[129]</sup>。矿产资源是典型的不可再生自然资源,用一点少一点,具耗竭性特点,与土地资源和水资源等这些数量相对固定、非耗竭性、可再生自然资源相比具有鲜明的特征,在承载力研究方法上存在明显的区别。根据定义,矿产资源承载力具有明显的时间性特点,地球上或一定区域内矿产资源总量是一定的,并且矿产资源虽有一定的回收能力,但基本上是不可再生的,存量与时间成反比,不同时间承载力大小是不同的;矿产资源在一定的时间内、不同的区域,受科学技术和经济条件的影响,它的利用量、利用率、经济转化率是动态变化的,因此矿产资源承载力研究的主要内容和目的主要表现在这方面;矿产资源承载力的载体是经济总量,目标相对其他承载力来讲要简单。总之,矿产资源承载力的研究主要解决矿产资源沿时间延伸方向,通过调整利用量、利用率、经济转化率等参数,矿产资源开发流量的可持续变化过程。

矿产资源是重要的国民经济和社会发展的物质基础,一般认为矿业和农业是国民经济中最基础的两门产业。目前 94%以上的能源、80%以上的工业原料、70%以上的农业生产资料均来自矿产资源<sup>[129]</sup>。矿产资源消费量决定着国民经济总量,决定着国民经济的发展速度。矿产资源的开发是其他产业发展的基础。工业化进程的发展是建立在矿产资源大量消耗的基础上,信息化社会的发展也离不开矿产资源的保障作用,矿产资源的开发利用促进了城市化水平提高。

矿产资源的可持续利用对可持续发展战略具有举足轻重的作用,矿产资源承载力就求人类的经济和社会活动不能超过资源与环境的承载能力。矿产资源承载力问题,实际上是人与环境组成的世界系统在基本层次上的三种生产,即物质生产、人的生产和环境生产之间矛盾的问题。因此当社会经济发展对矿产资源的需求量与开发量超过矿产资源在地质环境中存量的一定极限时,必然要影响到经济发展与人类的生存,这也是由矿产资源在国民经济中的地位和作用所决定的<sup>[129]</sup>。矿产资源可持续开发利用的实质是建立一种满足社会经济持续发展的动态资源结构。

矿产资源承载力研究方法主要是通过分析影响矿产资源承载力的因素的基础上,对各种矿产资源进行可利用的矿产资源储量、经济可利用系数、矿产品产量和单位国民生产等指标,预测矿产资源经济承载力。在选择和量化矿产资源承载力分析指标时,除分析各种矿产资源的自然特性外,还应特别关注代际公平和代内公平,重视代际公平,并不就是要储备资源留给子孙后代,而是要走资源节约型经济发展道路,提高单位资源的使用效率,同时积极研究和找寻可替代资源,实施资源替代战略核心思想在于用易获得、

成本低的资源替代难获得、成本高的资源，用非传统的新型矿物原料替代传统矿产资源；应通过合理的价格机制，调节矿产资源使用的速率和方向；依据经济规律进行投入产出价值管理，引导矿产资源资产的合理流动<sup>[130]</sup>。

#### 2.4.4 旅游资源承载力

旅游资源承载力是指<sup>[131][132]</sup>：在某一旅游地环境的现存状态和结构组合不发生对当代人及未来人有害变化的前提下，在一定时期内旅游地所能承受的旅游者人数。也可以简单理解为在游客的基本游览要求和旅游地的环境质量保护要求得到满足的前提下，旅游地所能容纳的游客人数<sup>[133]</sup>。它的载体是环境生态承纳量、资源空间承载量、心理承载量、经济承载量 4 项内容组成，它的受体是游客人数。旅游资源承载力具有客观性和可变性、变易性与可控性、存在最适值和最大值等特征，是持续发展旅游的重要判据之一<sup>[131]</sup>。由于旅游环境承载力不是常量，而是一个动态的发展着的变量，因此旅游经济活动与旅游环境承载力之间的关系具有辩证性和动态性<sup>[134]</sup>。

旅游资源一切能为旅游者提供游览、观赏、知识乐趣、度假疗养、体育锻炼、探险猎奇、友好往来的客体与劳务的总称。旅游资源是旅游业赖以产生和发展的基础，是经济资源的重要组成部分，具有投资少、收效快、利润大、换汇多、折旧率高的特点，有“无烟工业”之称。就旅游资源客体的属性而言，旅游资源可分为自然风光旅游资源和人文景观旅游资源两大类。前者是大自然的杰作，包括名山奇峰、大川秀湖、流泉飞瀑、阳光海滨、珍禽奇兽、奇花异草、古木和珍贵树种等。后者是人类智慧的结晶，包括历史文物、文化遗迹、古典建筑、文化艺术、风土民俗、工艺特产、风味佳肴等内容。旅游环境承载力它至少包括以下几个方面：饭店接待能力；交通运输能力；各种旅游物资的供应能力；旅游业所需能源的供应能力；旅游点的容纳能力；公用设施的配套能力等。旅游环境承载力是衡量旅游环境与旅游发展是否协调的重要尺度<sup>[135]</sup>。

典型旅游承载力的度量方法是<sup>[131]</sup>：从旅游地居民心理容量出发构建的旅游承载力指数体系。根据前述旅游承载力的定义，从旅游地居民的心理容量及其“游客规模—心理感应”的响应关系，把旅游地承载力指数界定为“在不对旅游地社会、经济、自然环境、公共设施产生不利影响的前提下，某一旅游区所能承纳的旅游活动强度的无量纲表示值”，这种强度分项包括游客密度、旅游用地强度和旅游收益强度。

#### 2.4.5 水资源承载力与其它资源承载力研究的异同

分析资源承载力以及土地资源承载力、矿产资源承载力、旅游资源承载力等分项资源承载力问题是为了搞清楚各种资源承载力的共性和区别，为水资源承载力的研究提供依据和借鉴。

构成承载力问题的因素主要是 4 个方面：首先是承载体的特性，即资源是什么，该资源具有什么特点，如储量、分布、物理和经济属性、随时间变化状况等。不同点是，资源的特性不同，内涵上有很大区别。当前，从资源制约的角度进行承载力研究是各分

项资源承载力研究的共同出发点，不论是土地、矿产、旅游还是水资源它们都是有限和短缺的，研究主要解决可持续利用问题。第二，受体的特性，即资源承载什么，达到什么目的。土地资源目前主要探讨的是支撑人口数量，达到土地资源的可持续利用，矿产资源探讨的是支撑国民经济总量的问题，主要解决矿产资源的代际公平。第三，承载条件，即在什么条件下进行承载力计算，如，在一定的技术水平、一定的生活条件下的承载力，从这方面可以看出，承载力是随地区、时间的不同而变化。第四，承载力的计算过程，即量化和评价方法方面，这是承载力研究的核心部分，承载力的评价基本是从单一指标向多目标综合评价方向转化。上述资源承载力的研究目标大致相同，都是研究该资源的合理配置和可持续发展，采用的方法也相近，都是在分析了资源的构成和影响因素后确定评价指标体系，然后进行评价。

## 2.5 水资源的特点

### 2.5.1 水循环

水是由氢氧两种元素组成的化合物，以气态、固态和液态三种基本形态存在于自然界之中，广泛分布在岩石圈、水圈、大气圈和生物圈中。分布在地球上的各种水以气态、固态和液态三种形态密切联系，不断地相互转化其地点、位置和形态，这就是自然界的水循环。地球上的水循环过程主要通过蒸发、降水、径流来实现的。水循环可以分为大循环和小循环两种基本形式。大循环是指水在陆地、海洋和大气中的相互转化。地球上大部分储存在海洋中的水，经过太阳辐射蒸发成水气转化为大气水，被风吹向大陆，在一定条件下凝结，以降水的形式落在陆地表面。一部分经过河流形成地面径流，另一部分渗入地下形成地下径流，最后通过地面径流和地下径流不同的形式回到海洋之中，完成一个循环过程。小循环是陆地、海洋和大气三种介质中任意两种之间的水相互移动转化的过程，即海洋到海洋，陆地到陆地的局部水循环。如陆地中的水，蒸发进入大气，又降回到陆地的过程，从海洋蒸发的水一部分在海洋上凝结降水到海洋中。

地球上的降水量和蒸发量是随地形、地质和地理位置等变化而变化的，如随纬度的增加而减少。因此，不同地区和形式的淡水和海洋更新循环的时间是不相等的，有的更新时间长，有的更新时间短。由于水体的分布、储量和更新时间不同，造成了水的时间、空间分布的不均匀性。从而给生态系统和人类社会活动造成了深刻的影响，给人类造就了一个永远需要研究和解决科技难题。

另外，水是生命的源泉，是人类以及生态系统不可缺少的基本资源，人类活动对水资源的开发利用以及对各种水循环的影响形成了社会经济系统水循环。开展社会经济系统水循环研究有两个方面的背景：一是社会经济的发展必须有足够数量和质量的淡水供给，二是人类开发利用水资源及其它活动对水循环的影响越来越显著<sup>[23]</sup>。

因此，水循环包括自然水循环和社会经济水循环两个方面，自然水循环是自然因子驱动的水循环，社会经济系统水循环是人文因子驱动的水循环，关于水循环的研究既要

研究其自然过程，也要研究其人类活动过程<sup>[94]</sup>。

### 2.5.2 水资源的定义和特性

据估计地球上水的总储量大约有 13.86 亿  $\text{km}^3$ ，但是水体并不能称做水资源，水和水资源是有区别的。长期以来人们进行着水资源的研究，形成了水资源各种定义。在《英国大百科全书》中，水资源被定义为“全部自然界任何形态的水，包括气态水、液态水和固态水”。由于英国大百科全书权威性该定义被广泛引用。1977 年联合国教科文组织（UNESCO）建议“水资源应指可资利用或有可能被利用的水源，这个水源应具有足够的数量和可用的质量，并能在某一地点为满足某种用途而可被利用。”

《中国大百科全书》是国内最具有权威性的工具书，但在不同卷册中对水资源给予了不同解释。如在大气科学、海洋科学、水文科学卷中，水资源被定义为“地球表层可供人类利用的水，包括水量（水质）、水域和水能资源，一般指每年可更新的水量资源”；在水利卷中，水资源则被定义为“自然界各种形态（气态、固态或液态）的天然水，并将可供人类利用的水资源作为供评价的水资源”。姜文来将水资源定义为：水资源包含水量与水质两个方面，是人类生产生活及生命生存不可替代的自然资源和环境资源，是在一定的经济技术条件下能够为社会直接利用或待利用，参与自然界水分循环，影响国民经济的淡水<sup>[136]</sup>。

目前，水资源的定义较多，也大不一样，但国内通用的标准定义一般理解为水资源有地表水资源和地下水资源两部分构成。地表水资源用多年平均河川径流量来表征，地下水资源量用可恢复的浅层地下水量表示。

广义水资源是指地球上一切对人类有直接或间接的使用价值，能作为生产资料和生活资料的天然水体，是地表水、地下水和土壤水的总和，用大气降水量来表示其数量。狭义水资源是指凡是人类直接使用的水，天然降水形成径流的地表水和地下水，一般用河川径流量来表示其数量。

水资源指可资利用或有可能被利用的水源，是大气降水循环的动态资源，一般由河川径流量和浅层地下淡水量统计估算。世界水资源总量为 48 万亿  $\text{m}^3$ ，仅为陆地上水量的千分之一，其中河川径流量为 46.8 万亿  $\text{m}^3$ 。

水资源具有以下主要特征：

（1）循环性。水资源是地球上水体的一部分，即是水循环的一部分，目前水资源统计主要通过降水量来计算，因此水资源具有循环性的特点，水资源年复一年地被消耗和产生。从这个角度来理解水是取之不尽用之不绝的，水资源是可再生资源。

（2）有限性。尽管水体总量是一定的，符合物质守恒定律，水资源年复一年地被消耗和产生，但水资源是多年平均地面和地下径流量的总称，数量是相对稳定的，因此是有限的。当然水资源是有变化的，尤其在人口、社会经济和生态环境用水大幅度增加的情况下，水资源出现了短缺，更显出了它的有限性，从这个角度来理解水又决不是取之

不尽用之不绝的。

(3) 时空分布不均匀性。时间分布的不均匀性表现为年内和年际分布的不均匀性。由于降水和蒸发以及地理位置的不同产生了空间分布的不均匀性。

(4) 多功能性。水资源具有多种来源和多种用途,构成了水资源的多功能特征。维持生物和生态系统外,同样用于发电、灌溉、养殖、航运和旅游等,因此产生了各部门的竞争性需求,为水利事业创造了研究的领域。

(5) 不可替代性。水是一切生命的基础,和其他诸如石油、矿产等资源不同是水资源对人类、生物和生态系统是必不可少的资源。

(6) 经济性。由于短缺而产生经济性。以往由于充足、取之不尽用之不绝,水资源没有定价、没有价值,目前则大不相同了。由于水资源局部短缺,水资源出现了争夺,因而被赋予了经济性的特征。

(7) 系统性。系统性包括三层含义:水的各种存在和运动形式相互联系形成有机整体;水资源是分等级结构的复杂系统;水资源的利用不仅仅是工程问题,而是包括水资源、社会经济与生态环境因素在内的系统工程。

### 2.5.3 水资源概况

水循环造成了水资源在世界范围内的分布不均匀性,乃至影响到世界各国社会、经济发展的巨大不同,同时也给世界人民带来了“与天斗、与地斗”改造自然的机遇。

地球上全部水体的总储量约为 1 386 000 万亿  $m^3$ ,其中 96.54%的 1 338 000 万亿  $m^3$  的水体为海洋储存,但海水含有大量矿物盐类的咸水,不适于人类和淡水生物饮用。3.5%为陆地上的水体,为 48 000 万亿  $m^3$ ,除去部分咸水后,淡水只占全球总水体储量的 2.5%,为 35 000 万亿  $m^3$ ,而湖泊、河流、土壤中所容纳的淡水仅占淡水储量的 0.313%,只有 109.62 万亿  $m^3$ 。表 3-1 是地球上水体的详细分布和储量情况。

表 2-1 地球水储量

水 体	水储量		咸水		淡水	
	万亿 $m^3$	%	万亿 $m^3$	%	万亿 $m^3$	%
海 洋	1338000.0	96.54	1338000	99.04		
冰川与永久积雪	24064.1	1.74			24064.1	68.70
地下水	23400.0	1.69	12780	0.95	10530.0	30.06
永冻层中冰	300.0	0.02				0.86
湖泊水	176.4	0.013	85.4	0.006		0.26
土壤水	16.5	0.001				0.017
大气水	12.9	0.0009				0.037
沼泽水	11.5	0.0008				0.033
河流水	2.12	0.0002				0.006
生物水	1.12	0.0001				0.003
总 计	1385984.6	100	1350955.4	100	35029.2	100

资料来源:[4]、[16]

地球上的水量基本上是恒定的，只有极少数水体经过化合、分解的化学变化改变其数量。水在海洋与陆地之间进行不断地循环，径流与蒸发的代数和等于降水量。尽管水总量是巨大的，但也是有限的。人类可资利用的水资源数量更是有限的，当人类的需求量远远低于水资源总量时，水并不显得重要。当需求量接近水资源总量时，由于时空分布的不均匀，加上对它使用和处理不当时，短缺也就不可避免了。

表 2-2 地球年水量平衡表

分 区	面 积 106km <sup>2</sup>	水 量 (万亿 m <sup>3</sup> )			水 深 (mm)		
		降水	径流	蒸发	降水	径流	蒸发
海 洋	361	458	-47	505	1270	-130	1400
陆 地	149	119	47	72	800	315	485
其中：外流区	119	110	47	63	920	395	529
内流区	30	9	--	9	300	--	300
全 球	510	577	--	577	1130	--	1130

资料来源：[4]、[16]

#### 2.5.4 中国水资源概况

我国多年平均水资源总量为 2.81 万亿 m<sup>3</sup>，其中河川径流量为 2.71 万亿 m<sup>3</sup>，水资源总量居世界第 6 位，占世界总量的 5.8%，人均占有量仅为 2360m<sup>3</sup>，为世界平均数的 26%，80 年代列世界第 88 位，1999 年列第 121 位，是世界上 13 个贫水国家之一。

我国水资源按其自然和地理特点可分为四类地区：第一类地区包括东北黑龙江、鸭绿江、西南雅鲁藏布江、怒江、红河以及西北伊犁河等国际界河或出境河流域，简称外流区。该区水资源量约为全国水资源总量的 28%，人均水资源量为全国平均的 3.8 倍，水资源利用率最低，为 5.5%。第二类区包括长江、珠江及东南沿海诸河等流域，简称南方区。该区水资源量占全国水资源总量的一半以上，人均水资源量为全国平均的 1.1 倍。第三类区包括黄河、淮河及辽河等流域，简称北方区。该区水资源量占全国水资源总量的 31%，人均水资源量为全国平均的 1/4。第四类地区主要为内陆河地区，简称内陆区。该区水资源量占全国水资源总量的 9%，人均水资源量为全国平均的 1.9 倍。

表 2-3 中国分区年降水、年河川径流、年地下水、年水资源总量统计

分 区	计算面积 (km <sup>2</sup> )	年 降 水 量		年 河 川 径 流		年地下水 (亿 m <sup>3</sup> )	年水资源 总量 (亿 m <sup>3</sup> )
		总量 (亿 m <sup>3</sup> )	深 (mm)	总量 (亿 m <sup>3</sup> )	深 (mm)		
黑龙江流域(中国境内)	903418	4476	496	1166	129	431	1352
辽河流域	345027	1901	551	487	141	194	577
海河流域	318161	1781	560	288	91	265	421
黄河流域	794712	3691	164	661	83	406	744
淮河流域	329211	2803	860	741	225	393	961
长江流域	1808500	19360	1071	9513	526	2464	9613
珠江流域	58041	8967	1554	4685	807	1115	4708
浙闽台诸河	2398038	4216	1758	2557	1066	613	2592



西南诸河	851406	9346	1098	5853	688	1544	5853
内陆诸河	3321713	5113	154	1064	32	820	1200
额尔齐斯河	52730	208	395	100	190	43	103
全 国	9545322	61889	648	27115	284	8288	28124

资料来源：[4]、[16]

表 2-4 世界各主要国家年径流量、人均和单位面积耕地占有量

国 家	年径流量 (亿 m <sup>3</sup> )	单位国土面积产 水量 (万 m <sup>3</sup> /km <sup>2</sup> )	人口 ( 亿 )	人均占有水 量 (m <sup>3</sup> /人)	耕地 (10 <sup>8</sup> m <sup>2</sup> )	单位耕地面积 水量 (m <sup>3</sup> /100m <sup>2</sup> )
巴西	69500	81.5	1.49	46808	32.3	215170
前苏联	54660	24.5	2.80	19521	226.7	24111
加拿大	29010	29.3	0.28	103607	43.6	66536
中国	27115	28.4	11.54	2350	97.3	27867
印尼	25300	132.8	1.83	13825	14.2	178169
美国	24780	26.4	2.50	9912	189.3	13090
印度	20850	60.2	8.50	2464	164.7	12662
日本	5470	147.0	1.24	4411	4.33	126328
全世界	468000	31.4	52.94	8840	1326.0	35294

资料来源：[4]、[16]

在世界主要国家中比较，我国水资源总量是可观的，但是由于人口众多，导致人均水资源量远远低于上述主要国家，也大大低于全世界的平均水平。如果从单位耕地面积水量来看，也远远小于世界的平均水平，我们用全世界 7.2%的耕地，养育了全球 1/5 的人口，从中可以窥测我国的水土资源是多么稀缺。应该特别强调，由于我国国土辽阔，各地区之间自然条件存在很大差异，导致水资源丰富程度出现显著的差别。

表 2-5 我国主要流域年径流及人均、亩均占有量

流 域	河川年径流 (亿 m <sup>3</sup> )	人口 ( 万 )	耕地 (万亩)	人均水量 (m <sup>3</sup> /人)	亩均水量 (m <sup>3</sup> /亩)
松花江	742	5112	15662	1451	474
辽河	148	3400	6643	435	223
海河	288	10987	16953	262	170
黄河	661	9233	18244	716	362
淮河	622	14169	18453	439	337
长江	9513	37972	35171	2505	2705
珠江	3360	8202	7032	4097	4778
黄、淮、海、辽	1729	37789	60293	455	285
长江、珠江	12873	46174	42203	2788	3050
/ ( % )	13.4	82	143	16.3	9.3

资料来源：[4]、[16]

## 2.5.5 中国水资源特点和评价

我国水资源面临的三大问题，水多、水少、水脏，水资源短缺和水环境污染严重危害国民经济协调发展，水安全问题是我国亟待深入研究的前沿问题。

### (1) 淡水短缺

中国人均水资源拥有量仅及世界人均的  $1/4$  ,是世界公认的贫水国。虽然中国水资源总量约  $2.81$  万亿  $\text{m}^3$  ,其中河川径流量占  $96\%$  ,但天然水资源条件很差 ,开发利用难度大。农田缺水每年已达  $3.33$  万  $\text{hm}^2$  左右。在全国农村和牧区还有  $8000$  万人和  $6000$  万头牲畜饮水困难。目前缺水形势已从北方蔓延至全国 ,并且缺水程度还在进一步加剧。每年因缺水造成的直接经济损失达  $2000$  亿元 ,全国每年因缺水少产粮食  $700 \sim 800$  亿  $\text{kg}$ <sup>[6]</sup>。一些城市出现了 1949 年以来最为严重的缺水局面。

### (2) 供水能力不足

1949 年以来 ,大规模的水利设施建设 ,使中国总供水能力从 1949 年的  $1031$  亿  $\text{m}^3$  增加到 1993 年的  $50224$  亿  $\text{m}^3$ 。但人口的极度增加和社会经济的快速发展 ,供水能力明显跟不上需水增长的速度 ,按现状年用水统计 ,全国在中等干旱年缺水就达  $358$  亿  $\text{m}^3$ 。根据水利发展“九五”规划和 2010 年规划 ,新增加供水能力  $10200$  亿  $\text{m}^3$  ,2010 年全国总供水能力可达  $6200 \sim 6500$  亿  $\text{m}^3$  ,而 2010 年全国总需水量预计将达到  $7300$  亿  $\text{m}^3$  ,供需缺口约  $1000$  亿  $\text{m}^3$ 。估计到 2030 年缺水形势更加严峻 ,显然水将严重制约中国社会经济的持续发展。

### (3) 用水效率低

中国的用水总量和美国相当 ,但国内生产总值仅为美国的  $1/8$ 。全国农业灌溉水的利用系数平均约为  $0.45$  ,而先进国家为  $0.7$  甚至  $0.8$  ,每立方水粮食生产效率仅为  $0.8\text{kg}/\text{m}^3$  左右 ,不及发达国家的一半。工业万元产值用水量是发达国家的  $5 \sim 10$  倍。工业用水的重复利用率据统计为  $30\% \sim 40\%$  ,而发达国家为  $75\% \sim 85\%$  ,如中国生产  $1\text{t}$  钢材所消耗的水是美、欧发达国家的  $4 \sim 9$  倍 ,生产  $1\text{t}$  纸的耗水是发达国家的  $2$  倍多 ;生活用水也因水的公共设施条件的差别造成不同程度的浪费 ,用水效率低使原本紧张的水资源形势变得日趋危机<sup>[6]</sup>。

### (4) 水的不合理开发产生生态问题

水资源开发引起的生态环境问题更加严重 ,水资源过度开发 ,导致了生态环境的进一步恶化。通常认为 ,当径流量利用率超过  $20\%$  时就会对水环境产生很大影响 ,超过  $50\%$  时则会产生严重影响。目前 ,我国水资源开发利用率已达  $19\%$  ,接近世界平均水平的  $3$  倍 ,个别地区更高。据预测 ,到 2050 年全国地表水资源利用率为  $27\%$  ,除西南诸河利用率较低外 ( $12\%$ ) ,其他各流域均超过  $20\%$  ,特别是海滦河、淮河、黄河地表水资源利用率均超过  $50\%$ 。

地下水的开发利用也将达到相当程度。2050 年 ,除内陆河较低外 ( $27\%$ ) ,其他流域 (不含西南诸河)地下水利用率均大于  $56\%$  ,特别是淮河、黄河地下水利用率将更高。过度开采地下水会引起地面沉降、海水入侵、海水倒灌等一系列环境问题<sup>[6]</sup>。

## 2.5.6 中国水资源短缺原因分析

一些预测表明,到 2025 年全世界将有 30 亿以上的人口面临水的短缺。但这并不是因为世界上缺水,全球水危机是水管理性危机,不是资源性缺水。在全球性范围内,水资源完全能提供人类的全部用水安全,但要求人类必须改变以往水的管理和开发方式。当我们在小范围内研究地区或流域的解决缺水问题时就需要有清晰的政策选择。缺水是一个相对的概念,应该跨流域综合考虑一系列用水相关的影响因素,包括社会经济、技术和法规政策等方面,这就是水资源综合管理的概念。克服世界水危机,同时取得水、食品和环境的安全和协调发展,是可持续发展的严峻的挑战。越来越多的个人、组织和政府了解这一挑战。世界可持续发展论坛应该重新确认这一论点的优先地位,采用目标和采取措施综合承受和完成这一挑战。

### (1) 资源性缺水,或称绝对性缺水

由于年降雨量较低,一般小于 400 毫米,没有较多的外流域水源补充,过境河流、调水工程等,人均、亩均水资源总量低,表现为水资源的绝对数量有限,不能满足人类生活、生产活动的足够水量,这种缺少是资源性缺水。如我国西北地区,年降水量不足 400 毫米,虽然人均不低,但人口较少,凡是工业发展较快和人口较密集的地区,人均水量都很低,主要原因是资源性缺水造成的。

### (2) 经济性缺水,或称相对性缺水

水资源绝对数量并不少,年降雨量、人均、亩均水资源总量都不低,但水资源开发利用方式、用水结构不合理,水工程资金投入不足,造成可利用水资源不足、水资源达不到合理配置,这种缺少是经济性缺水。这种缺少通过合理开发、配置是完全能满足目前和长远的需求的。

### (3) 污染性缺水

污染性缺水实际上是经济性缺水的一种。是指人类活动即人类生活和工业生产的排放的污染物造成水资源污染,减少了水资源的可利用量,这种缺少是污染性缺水。

## 2.6 小结

本章定义了水资源承载力的概念和内涵,分析了水资源承载力的结构、功能和特性。通过对可持续发展、生态经济系统和资源承载力等水资源承载力相关基础理论和支撑理论的研究,延伸出水资源承载对象和水资源可持续利用思想,揭示了水资源承载力和可持续发展理论的内在联系,明确了生态经济系统是可持续发展的经济系统,以及分析了水资源承载力和其它资源承载力研究的异同。

水资源承载力的研究必须建立在可持续发展的理论框架下,按生态经济系统研究规律,根据水资源、水环境形成和发展过程,延伸资源承载力的概念,因此,水资源承载力的基础支撑理论对于提升水资源承载力研究层次、形成水资源承载力研究的系统性理论、为水资源承载力的研究和实用打下良好的理论基础有重要的作用。

## 第三章 水资源承载力分析模型和综合分析方法

### 3.1 水资源承载力影响因素分析

作为生命之源的水与人、自然、社会、经济有着千丝万缕的联系，水在自然演化、社会进步、经济发展的过程中，表现出一系列自然特性、社会属性和经济属性<sup>[20]</sup>。因此，水资源承载力分析应能反映出这种属性和联系，准确度量水资源与人口、资源、社会经济和生态环境的配置关系。

#### (1) 流域水资源基础条件及开发利用程度

显而易见，水资源自身特性是水资源承载力评价的首要条件，是水资源承载力最直接的影响因素。从广义上讲，水资源承载力应包括流域外调水和虚拟水的调入，从狭义上讲，承载力只计算流域本身的天然水资源数量。不同流域由于降雨、蒸发、地面渗透、地形和社会经济发展等差异，水资源数量和质量相差悬殊，开发利用程度差距也很大。开发利用程度、开发方式和水工程的特点以及水资源管理水平影响着蒸发、损失、配置和效率，也决定了水资源某一时段的可利用水资源的数量。

#### (2) 流域社会经济发展状况和生产力水平

水资源已成为制约人类社会发展的瓶颈，研究水资源承载力就是解决社会经济系统和水资源系统之间的相互依存和相互制约的关系。社会经济的发展速度影响需水量的增长速度；经济结构的变化影响不同部门之间的用水比例；经济发展过程中所排放的各类污染物，有可能污染水体并造成有效水资源量的减少；经济积累中用于扩大供水能力和加大污水处理回用比例的投资额的大小，既影响其它经济部门的投资比例，也直接关系到水资源开发利用和保护管理的格局。总之，一定的水资源可以承载较低经济水平下的较多人口，也可以承载较高经济水平下的较少人口<sup>[94]</sup>。

#### (3) 科学技术水平

科学技术是第一生产力，这是被人类历史发展所证明了的。科学技术能够提高人类认识和利用自然的能力，影响着人类利用资源的效率和效益。在不同的科学技术水平下，单位水资源数量能够产生不同的经济效益，生产不同数量和不同质量的工农业产品，减少经济生产造成的污染物的排放，减低生产活动对生态环境造成的压力，进而提高流域水资源的承载能力。科学技术水平也能够大幅度提高水资源利用的科学管理水平，充分发挥水利事业的管理功能，避免管理不当造成的环节性、协调性资源浪费，从而挖掘水利产业的巨大潜力，实现水资源的合理配置。

#### (4) 人口和其生活条件

人口和其生活条件与水资源承载力之间存在必然的影响关系，人口数量是水资源最直接的承载对象，人口的生活水平和消费方式是水资源承载多少人口的先决条件。由于各种人口的特点和生活习惯不同，如农村人口和城镇人口之间、南方多水地区和北方缺

水地区之间,用水数量上有很大的差异。具统计,发达国家的人均能源消耗量是欠发达国家人均消费量的 6 倍,因此,改变人类的生活方式,认识到自然资源的价值,对于提高资源乃至水资源的承载力有十分重要的价值。

#### (5) 其它资源

水资源是社会经济发展最重要的制约因素之一,但人类社会不仅需要水资源,而且还需要其它诸如土地、森林、草地、矿藏等其他资源。水资源要承载其它相关资源、同时要与其他资源相互影响、相互匹配,共同作用于流域经济发展和生态建设。土地、森林和草地等资源能够影响和调节水资源的形成、贮存的蒸发过程,影响水循环的范围和周期等。同时其它资源都是水资源承载对象,即生态环境的构因素,每一自然资源都对生态环境无时无刻、随时随地产生着直接和间接的影响。

#### (6) 生态环境水平

生态环境作为水资源承载力的承载对象之一,是承载力研究中最复杂的影响因素。人类对生态环境的理解和认识程度将直接影响对承载力量化和分析,其一是因为对生态环境研究的深度不够,造成承载力研究上理论不足;其二是思想上对生态环境的价值认识不够,可持续发展的思想贯彻不足,重经济效益、轻生态环境意识,在重复地进行先污染后治理的老路。

#### (7) 流域外部和其它水源因素

通过流域间调水、虚拟水的调入调出和海水淡化,能够间接实现水资源在不同地区间的调出调入和数量上的增减。流域间调水除经济发展原因外,更是国家宏观经济发展和规划的作用下来完成;虚拟水的转移主要是通过影响区域产业结构和市场格局,进而影响水资源承载力;海水淡化主要取决于淡化技术和成本、以及缺水程度。

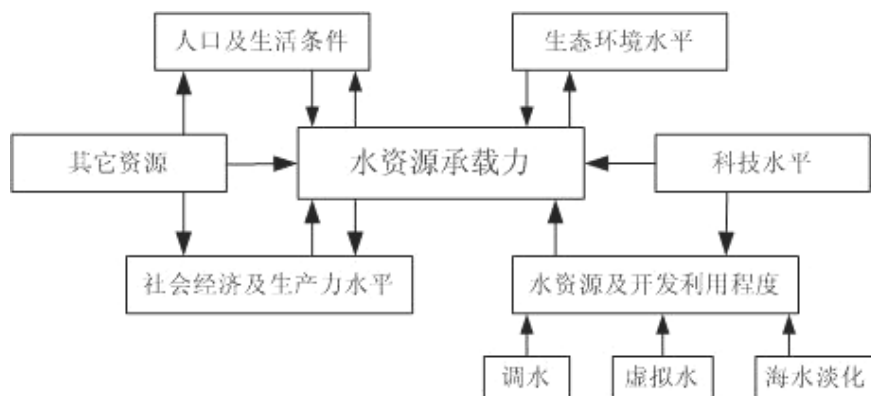


图 3.1 水资源承载力影响关系图

上述各因素之间的关系如图所示。从图中可以看出,这些因素互相影响,存在复杂的关系,共同对水资源承载力发生作用,充分反映了人口、水资源、社会经济和生态环境这一生态经济大系统的复杂性。

## 3.2 水资源承载力的研究内容

### 3.2.1 水资源承载力的研究内容

水资源承载力是水资源评价、社会经济发展预测、水资源协调和管理等方面定性和定量的评价方法，将涉及到水资源的自然和开发状况、水资源和其它资源的关系、人口增长变化情况、国民经济和社会发展状况及趋势、生态环境保护范围和程度、以及人口、水资源、社会经济和生态环境之间的定性和定量关系等内容。另外还涉及到流域外部水量的调入和调出、高耗水产品的调入和调出即虚拟水资源的变化、海水淡化等引起水资源数量变化的因素等内容。

水资源的自然和开发状况：水资源的特性是研究的主体之一，是构成水资源承载力的基础内容，包括水资源的数量、质量、分布、构成，水资源可利用量、现状开发利用量和开发利用潜力等。

水资源和其它资源的关系：支撑社会发展的不仅是水资源，还有其它诸如土地资源、森林资源、草地资源、矿产资源等，研究水资源承载力同时会涉及到水资源和其他资源的关系，尤其是和土地资源的关系。

人口增长变化情况：人口是承载力研究的最主要支撑因素，很多研究都归结为承载多少人口问题，无论承载人口还是承载社会经济和生态环境，都必须分析人口增长变化趋势、城镇人口和农村人口比例、城镇化进程。

国民经济和社会发展状况及趋势：这是承载力涉及的协调、合理配置水资源的主要内容，包括第一产业、第二产业和第三产业的发展状况和发展比例、以及产业内部水资源利用效率和效益、各部门水资源配置情况。

生态环境保护范围和程度：包括河道最小生态流量、河湖水自净能力的污水排放量，草地和森林覆盖率，湿地数量等。

人口、水资源、社会经济和生态环境的关系：不但人口、社会经济和生态环境与水资源有供需、配置关系，人口、社会经济和生态环境之间也有配置、平衡关系，人口增长、生活消费水平变化对工农业生产、和服务行业的需求，以及对生态环境的需求都有匹配关系。

流域外部水量的调入和调出：这是当地水资源数量增加和减少的外部条件，显然对水资源承载力的影响是明显的。

高耗水产品的调入和调出（或称虚拟水）：在现代社会中，经济全球化使得国家与国家之间、地区与地区之间、流域与流域之间的经贸关系方便快捷地遍布各个行业和领域，同时也带动了高耗水产品的贸易交流。这种由高耗水产品的流动间接地造成当地水资源数量的变化，这部分变动的水称作虚拟水。象调水工程一样，虚拟水的产生为水资源的调整、增加当地的水资源提供了可能。虚拟水能改变水资源的数量，那么承载力的研究内容当中就要考虑高耗水产品如粮食等农产品的调出和调入数量。

海水淡化：海水淡化技术是一种淡水的增量技术，可广泛应用于沿海地区缺水城市。大力发展海水淡化和海水直接利用，可为内陆地区节省更多可资利用的淡水资源，实际上等于增加了水资源总量，这对于长远解决水资源短缺问题具有战略意义。我国作为世界上最主要的缺水国家，海水淡化已经成为我国的朝阳行业。就目前的技术水平，海水淡化的吨水成本约为 4~7 元，高于一般城市的自来水售价。其技术关键在于降低海水淡化水的生产成本，以扩大有承受能力的海水淡化潜在用户的范围。

从上述分析中可以看出，一个流域的水资源量不单是当地水文气象条件下计算的自然水资源数量，还包括调水、虚拟水和海水淡化造成水资源量的变化。调水、虚拟水和海水淡化的数量取决于国民经济发展状况、水工程建设等人为因素，而且变化较大、难以掌控。因此水资源承载力研究中，有必要将当地自然水资源量和人工水资源量区别对待，研究当地自然水资源的承载力和包括人工水资源量的承载力问题。这里将前者称为狭义水资源承载力，后者称为广义水资源承载力。

### 3.2.2 水资源承载力的量化表达形式

水资源承载力是人口、水资源、社会经济和生态环境的函数，它的表达方式、单位是什么？表达水资源承载力结果的方法可有以下几种方式。

(1) 承载多大规模的人口：在一定的经济生产、生活、水资源配置格局等状态下，当地可利用水资源最大能承载多少人口，计算中包括分析现状情况和预测将来动态配置格局情况。按用水定额、用水效率和用水效益线路入手，计算某一时段的承载人口数量，再和该时段的统计人口数量或按人口发展预测的人口数量相比较得出水资源承载力，它的单位是人口数量。承载人口、资源、社会经济和生态环境的能力表现在人口与资源、社会经济和生态环境的关系通过人均用水定额、人均生态环境占有量、人均社会经济数量、单位生态环境用水量、单位社会经济用水量等关联起来，从而计算出水资源数量和承载人口的定量关系。即：

$$CCWR = F(P, EE, E, WA) | T, l, a, t \quad (3-1)$$

$$P = F_1(WA, EE, E) \quad (3-2)$$

$$EE = F_2(WA, P) \quad (3-3)$$

$$E = F_3(WA, P) \quad (3-4)$$

因此，由生态环境 EE，社会经济 E 与人口 P 和可利用水资源量 WA 的关系式，得出水资源承载力 CCWR 与人口 P 和可利用水资源量 WA 的关系式：

$$CCWR = F_0(P, WA) | T, l, a, t \quad (3-5)$$

由上式可以计算出水资源能承载的人口数量。

这种表现形式能比较直观地表达水资源承载力的最直接的承载目的，便于进行量化计算。但是通过人均用水定额、人均生态环境占有量、人均社会经济数量、单位生态环境用水量、单位社会经济用水量等关联起人口、水资源、社会经济和生态环境的关系的

定额和标准，随着它们的精度不同、内部分量的划分层次不同，结果差别很大；这些定额反映的仅是与水资源的关系，没有反映社会经济和生态环境的关系、其他资源与社会经济和生态环境的关系等；以及没有反映它们之间的协调、反馈和相互制约的关系，因此没有表现出代内和代际公平的特征；承载目标过于简化、其它对水资源的影响关系没有表现出来、而且不容易扩展评价范围因为类似关联定额不容易统计。另外，这种水资源承载力的研究方式和水资源用水量的预测没有大的区别。水量能判断水对人的满足程度，但不能判断经济发展、人口发展和生态环境发展与水资源的协调程度。

(2) 承载设定目标人口、社会经济和生态环境的实现概率：水资源承载力为无量纲的、表示满足程度的量，表述为在设定的目标和标准的前提下，某一发展时段当时的水资源配置情形下的人口、水资源、社会经济和生态环境，与设定目标和标准情形的人口、水资源、社会经济和生态环境相比，在某种满意准则或价值准则条件下，现状对目标的满足程度或现状情况要实现目标的概率，用百分比或 0 到 1 之间的数值表示。

这种表现形式能比较全面地反映水资源所承载对象与水资源的供求关系、效率关系、效益关系和协调关系，所表述的范围可以比较广泛，能表现出水资源配置的代内和代际公平的特征，也表现了大系统、多目标优化问题的层次性、复杂性特点。但是表达水资源承载的对象和不够明确，缺乏直观性；目标的设定仍存在很大的人为因素，由于没有直观地表达水资源承载力的最直接的承载目的，量化计算不够明确。

(3) 水资源承载力的综合表达方式：既考虑承载的直接性又考虑承载对象的全面性的综合评价方法。将上述两种方法综合起来，采用诸如承载人口等直接量化指标和采用对目标承载对象的实现概率来同时表达水资源承载力。

这种表达方式分两部分对水资源承载力进行评价，第一部分用典型的几个单指标来直观地表达水资源对以人口为主的承载对象的承载情况；第二部分用对设定目标承载对象的实现概率来评价。

本论文采用第三种表达方式，用两种模式来表达水资源承载力。

### 3.2.3 水资源狭义承载力和广义承载力

一个流域内靠本流域的自然水资源量来支撑人口、生态环境和经济的能力称为狭义水资源承载力。相对地，由从其它流域调水、调入虚拟水以及经海水淡化而使当地的合计水资源量对人口、生态环境和经济的支撑能力称为广义水资源承载力。从定义看出，狭义水资源承载力和广义水资源承载力主要区别在于前者假设进行水资源承载力计算的流域是一个水文气象相对独立的区域，水资源量未经人工干扰，反映流域本身的自然水循环的特征，这样分析的目的是考虑到调水和调入调出虚拟水对水资源承载力的影响很大并区分人工和自然因素的影响。

实际上一个流域或地区的可利用水资源量是由各种水源造成的，研究广义水资源承载力才具有实际意义。狭义水资源承载力是广义水资源承载力分析的基础，因为狭义水



资源承载力能够反映当地的水文、水资源特征和属性,相对稳定,不受人工和经济外部因素干扰,同时还衡量和决定调入多少水量和虚拟水、生产多少海洋淡化水,以及配置情况。在用途上,广义水资源承载力具有实用性,进行水资源承载力分析时,将以狭义水资源承载力分析为前提,用广义水资源承载力来衡量实际承载情况。

本论文将以狭义水资源承载力分析为前提,用广义水资源承载力来衡量实际承载情况。

### 3.2.4 水资源相对承载力和绝对承载力

水资源既是资源的一种,又是水环境的组成部分,具有资源和环境的双重身分,因此,水资源是一种稀缺资源,对它有很多相互冲突的需求<sup>[138]</sup>,如一定量的水体用于居民用水,它就不能再用于农业用水,由于相互冲突的需求产生的水资源稀缺性称为水资源的相对稀缺。相对而言,这种相互冲突的需求产生的量度水资源对需求的满足程度称为水资源相对承载力。由于人口和经济的增长,各方面、各部门用水的需求都在增加,这时的水资源的稀缺性称为水资源绝对稀缺。相对而言,各方面用水的需求都在增加而量度水资源对需求的满足程度称为水资源绝对承载力。研究相对和绝对承载力是基于这样的思考:水资源需求分为两个层次的问题,其一是供水和水分配的环节过程中,各用水部门之间存在着分配不公平的问题,水的分配没有按照某种价值观念和代内和代际公平原则进行,在用水冲突和矛盾的情况下,没有达到合理配置的水平,因此造成结构性水资源的不足。其二,即使水资源的分配达到上述标准,分配环节上达到了某种标准下的最佳标准,但由于发展造成总量上的增长,由此造成的资源性水资源的不足。分析和突出这两类不同性质的水资源承载力问题,能更有效、更有针对性地解决水利可持续利用问题。

另外,用以分析和研究缺水和丰水地区的水资源承载力,可以采用相对和绝对承载力的研究观点,即缺水地区水资源承载力:水量短缺如何分析承载力问题,丰水地区水资源承载力:水量足够如何分析承载力问题。

相对的水资源承载力和水资源相对承载力是两个概念。前者表示一种状况下的水资源承载力和另一种状况下的水资源承载力的比较后的概念,后者表示水资源承载力内部属性的一种特征。

### 3.2.5 水资源合理配置和水资源承载力的关系

资源与环境问题的本质是自然资源与环境在不同用途之间和同一用途不同使用者之间竞争使用所造成的配置不当的问题。资源耗竭和环境恶化的经济原因是资源配置不当<sup>[139]</sup>。水资源是资源和环境的重要分支和组成部分,因此,水资源短缺和水环境恶化的经济原因是水资源配置不当,即水资源在不同用途之间和同一用途不同使用者之间竞争使用所造成的配置不当。可见,水资源在经济和社会发展过程中主要解决的是水资源合理配置问题,达到水利可持续发展,促进人类社会可持续发展。

什么是水资源合理配置？如何解决水资源合理配置问题？怎样衡量水资源合理配置问题？目前有研究水资源合理配置的方法和理论，如水安全、水资源经济学、环境经济学等等，水资源承载力是解决和衡量水资源合理配置的有效方法之一，在水资源得到合理配置的前提下，分析水资源能够承载多大规模的人口、水资源、社会经济和生态环境发展，同样，在分析水资源承载力的过程中，发现水资源没有得到合理配置的部门、用途等等，从而调整配置，逐渐使水资源趋于合理使用和配置。由此可见，水资源配置问题是水资源使用的基本属性，水资源承载力是为合理配置而采用的一种方法，并且互为条件和约束。水资源承载力强调量化和明确的特点，而不是笼统、宏观、不确定地反映水利可持续发展研究等问题。

### 3.3 水资源承载力分析模型

模型是对研究系统特征要素、各要素间的相互关系，系统与环境之间的相互作用等有关信息和变化规律的一种抽象表述<sup>[10]</sup>。模型分析方法为解决大系统、多目标的复杂问题的实施现状和发展趋势的优化、评价以及预测提供了重要手段。通常的建模方法包括数学模型、关系模型、知识模型和以上方法的综合模型等类型，在上述几大分类中又可根据研究领域不同分为很多小类，用于解决相应的特殊问题。

水资源承载力分析模型是以研究水利可持续发展以及水资源可持续利用问题的量化、评价和预测于一体的系统模型，它以社会可持续发展为指导思想、以生态经济为基础、以资源合理配置为目标和标准，是社会经济、人口发展和生态环境等领域的技术经济分析的交叉学科，它的模型的建立属于社会经济类模型的以数学模型、关系模型、知识模型为基础的综合模型。

目前社会经济类模型应用较多的主要有系统动力模型、投入产出模型和计量经济学模型。每种模型都具有一定的特点、有一定的适应条件、解决一定的社会经济问题<sup>[21]</sup>。相应地，一种社会经济问题可以采用不同的模型来研究，当然解决问题的途经和重点有所不同。因此水资源承载力模型的建立要根据水资源和其承载对象的实际情况、特点和目的选择适当的分析模型。

由于社会可持续发展、水利可持续发展以及水资源可持续利用的模型研究目前已经很普遍、也很成熟，一般较多地采用系统动力学模型和投入产出模型，或者是两种模型的结合形式，取得了很多经验。考虑到水资源承载力系统模型研究的特点，本文将采用系统动力学建立模型，结合各态历经学说原理进行水资源承载力量化分析和评价，其它方法不在论述。

#### 3.3.1 系统动力学模型概述

系统动力学方法是一种以反馈控制理论为基础，以概念模型、结构模型和数学模型为集成，以计算机仿真技术为手段，研究复杂系统、揭示事物发展宏观趋势的数量仿真方法<sup>[2]</sup>。自 50 年代中美国麻省理工学院地的福雷斯特教授创立以来，它已成功地用于企

业、城市、地区、国家甚至世界规模的许多战略与决策等分析中，被誉为“战略与决策实验室”<sup>[10]</sup>。模型评价强调分析系统结构与系统动态行为，适合于进行具有高阶次、非线性、多重反馈、机理复杂和时变特征的系统问题。通过引进信息反馈与系统力学的概念与原理，把系统问题流体化，将整个系统分为若干子系统，明确作用于子系统间或子系统内部的因果关系，从而建立系统的动态反馈模拟模型，是研究大系统运动规律的理想方法。

系统动力学方法与其它模型方法相比，具有下列特点：

(1) 适用于处理长期性和周期性的问题。它强调系统行为主要是由系统内部机制决定的，因此它的仿真时间比较长，已有不少系统动力学模型对其机制作出了较为科学的解释。

(2) 适用于对数据不足的问题进行研究。建模中常常遇到数据不足或某些数据难于量化的问题，系统动力学以反馈环为基础，多重反馈环的存在使得系统行为模式对大多数参数不很敏感，根据各要素间的因果关系及有限的信息及一定的结构仍可进行推算分析。

(3) 适用于处理精度要求不高的复杂的社会经济问题。上述总是常因描述方程是高阶非线性动态的，应用一般数学方法很难求解。系统动力学则借助于计算机及仿真技术仍能获得主要信息。

(4) 强调有条件预测。本方法强调产生结果的条件，对预测未来提供了新的手段。

系统动力学模型的建立和评价的基本过程：

(1) 首先明确研究对象和需要解决的问题。这是建立模型的基础，在明确研究对象以及性质、研究的目标和要求的前提下，搜集相关的信息和资料，划定系统的边界，确定有关变量和性质。

(2) 建立系统的层次和反馈结构。分析构成因素的相互关系，划分系统的层次、类别和结构。按照变量之间的关系，判断因素之间信息反馈和藕合关系，建立系统的主导回路和结构。

(3) 建立系统流图。按照系统之间的因果反馈回路和结构，绘制系统动力学流程图，确定有关的流位变量、流率变量及其他变量，并描述变量间的数量关系及时间延迟关系。

(4) 建立仿真模型并进行计算和评价。根据已建立的系统流图，建立数学的规范方程和描述定性的变量关系，进行计算机仿真语言的程序设计。以往常用的计算机仿真语言是 DYNAMO 语言，目前已有更先进的仿真工具。在对仿真模拟运算的基础上，对仿真结果进行深入的分析，寻求解决问题的方案，发现问题，修改方案和模型，反复进行模拟，直到获得满意的仿真结果。

### 3.3.2 各态历经假说

与可持续发展和资源承载力评价方法类似，水资源承载力的评价也是大系统多目标问题，不论是水资源承载力静态还是动态分析，都要涉及到确定目标参数的问题，对未

来的预测可以采用系统动力学、常规趋势法等方法，各态历经假说也是确定目标参数的有效方法。

各态历经假说 (Ergodic Hypothesis) 亦称各态遍历假说，它描述的是：在一个充分大的空间内，同一区域断面上的发展状态 (时序谱)，有可能从同一时间不同区域断面上的发展状态 (空域谱) 中获得知识，反之亦然。各态历经假说揭示了时空谱系的耦合表征和映射交集，是对时空统一的认识深化<sup>[26]</sup>。应用这一原理，将发达国家前一发展阶段的经验的过程应用到现在和将来发展中国家的现代化模式中，作为比较和借鉴的标准。因此，水资源承载力研究中可以参照我国现代化发展目标的指标和发达国家的类似标准，来确定水资源承载目标和标准，用现状水资源承载力和目标水资源承载力为起始和终点，预测水资源承载力的静态量度和动态变化过程。

以往的研究评价方法，如系统动力学的方法、层次分析法、因素分析法等，在预测将来水资源承载力方面虽然都取得了实效，但因水资源、生态环境和经济巨系统的复杂性、人为因素和计划经济向市场经济过度期的随机性，加上单维的水资源对社会经济发展不是唯一的影响因素等原因，预测的结果不容易掌握。社会经济发展的决定因素是历史、社会、经济、人文、资源、科技、人才等等，一个国家和地区的短期和长期国民经济发展计划应是该国家和地区的总的发展纲要，因此，根据我国短期和长期国民经济发展的要求，采用各态历经假说这一原理预测水资源供需状况，研究不同时期水资源承载力问题，更有实际意义。

### 3.3.3 水资源承载力分析模型

由于水资源承载力研究不同于水利可持续发展研究，水资源承载力的影响因素是以水资源为中心涉及到的直接或间接的人口、社会经济和生态环境子系统的一些变量，没有系统研究子系统的内部发展变化规律，也就是说水资源承载力研究的是水资源对子系统的支撑关系，不是决定因素，所以水资源承载力分析模型采用系统动力学模型为主结构建立，利用系统动力学模型的反映系统因果反馈关系、反映动态行为特征的功能建立水资源承载力分析模型，采用各态历经学说、目标趋势分析方法替代系统动力学模型的预测、平衡功能，简化预测水资源承载力构成因素的预测和变化趋势方法，建立水资源承载力的一个线性与非线性、静态与动态、即时与延时、趋势预测与因果反馈关系融入系统模型中的综合模型<sup>[21]</sup>。

#### 3.3.3.1 水资源承载力分析模型的建模原则

考虑到水资源承载力系统和水利可持续发展研究系统的异同，水资源承载力分析模型的建立要遵循以下原则。

(1) 系统性原则。水资源承载力是以水资源为中心的、以水资源的质、量、时空分布为纽带的与人口、社会经济和生态环境子系统建立的供需、配置关系的大系统，因此具有系统的一切特点。水资源承载力模型的建立应该将构成因素看成一个整体系统性地

加以研究，既考虑水资源同各子系统的关系，也要考虑各子系统之间的相互关系，按系统原理实现系统的功能和目标。

(2) 突出水资源核心的原则。既然水资源承载力是研究水资源对人口、社会经济和生态环境的支撑关系的理论，水资源应该当作研究的核心，研究水资源本身以及和人口、社会经济和生态环境子系统相关的内部和外在联系，而不注重研究各子系统本身的与水资源关联不大的问题。

(3) 综合性原则。水资源承载力是研究人口、水资源、社会经济和生态环境之间支撑和配置关系的、涉及到社会、经济、生态环境等领域的边缘学科，所以应该突出综合性原则，它要涉及到凌驾于各学科之上的可持续发展理论、生态经济理论为指导，突出水资源承载力简明量化的特点。

### 3.3.3.2 水资源承载力分析模型的总体结构

前文已经论述，水资源承载力分析模型按系统动力学方法建立总体结构、建立因果反馈关系、合理划分子系统。由于水资源承载力不重点研究各子系统的内部发展动因，水资源承载力系统的子系统模型相对简化。但水资源承载力预测不按系统动力学模型方法进行，而是按各态历经学说原理，参照现代化设定目标进行现状和目标及动态水资源承载力的预测和评价。

按系统动力学原理建立水资源承载力计算模型与模拟的方法：首先明确研究对象，要解决什么问题；然后确定系统的目标，明确要求；围绕目标，确定不同层次的主要变量，进行定性定量分析。

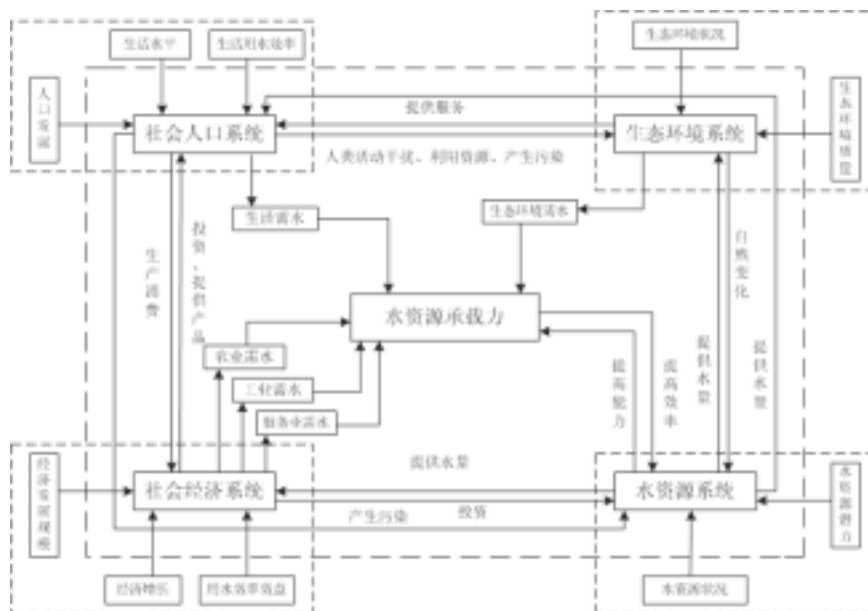


图 3.2 水资源承载力分析模型

## 3.4 水资源承载力研究的方法与途径

一个国家、地区或流域的人口、资源、环境和社会经济发展状况是长期的社会历史

变迁的结果，其经济发展和增长主要是受投入经济活动的包括劳动力、资金和各类物资资源在内的各种资源、科技进步、以及政策法规等因素的影响和制约。尽管水资源已成为制约国民经济发展的“瓶颈”，对社会的发展起到了越来越大的作用，但水资源对人口、资源、社会经济和生态环境仍然是支撑作用，不是决定性因素。因此，研究水资源承载力应首先分析所研究国家、地区或流域的社会经济发展格局和状况，分析发展过程中具有一定确定性规律的因素和某些不确定性因素。在此基础上进行水资源需求分析和水资源合理配置，从而进行水资源承载力量化分析。

### 3.4.1 研究方法选择原则

#### （1）定性定量相结合原则

水资源承载力分析系统是生态经济系统的一种分支，是一个开放的、多目标的、复杂大系统，研究这类系统的方法应是定性定量相结合的综合分析方法，定性定量相结合的分析方法是我们在现阶段认识客观事物所能达到的最佳结论，是从定性上升到定量的认识<sup>[10]</sup>。大系统多目标问题的研究无法全部量化地表示出目标、各因素构成之间的相互依赖、相互影响的关系，往往只是部分反映定量关系，其它部分用定性的关系来反映。这种方法通常是科学理论、经济知识和专家判断力相结合，提出经验性假设，而这些经验性假设不能用严格的科学方式加以证明，往往是定性的认识，但可用经验性数据和资料以及模型对其进行检验<sup>[10]</sup>。

#### （2）系统工程分析原则

系统工程方法在综合应用运筹学、控制论、信息论、管理学等有关学科的基础上，解决复杂问题的一种方法，广泛应用于工程技术、管理、社会、经济等发展问题。尤其在解决工程技术和优化问题上是一种很成功和有效的方法。但在社会经济发展领域却不像工程管理领域那样用若干评价指标和标准设计出符合目的的优化技术或战略发展方案，因此这类系统研究的核心不是“最优化”，而是“比较”或“学习”，从对建立的模型和现状的比较中学习改善现状的途径<sup>[10]</sup>。水资源承载力是复杂的大系统、并且属于社会经济系统的一部分，采用系统工程方法建立模型和求解时，应采用目标不是“最优化”，而是“比较”或“学习”的研究方法。

#### （3）突出可持续发展和生态经济系统思想的原则

水资源承载力系统虽然都定义在可持续发展和生态经济系统理论的框架下进行研究，但具体操作中如何体现这种思路，研究中怎样紧紧把握这一纲要，需要在理论和计算过程中都要密切重视。

#### （4）技术经济分析原则

水资源承载力是跨专业、跨学科的交叉领域的研究课题，涉及到水资源、生态环境、社会、经济、科技发展等子系统的研究，以及技术理论的可行性和经济价值的效益分析，因此应用技术经济评价原则将有助于解决问题。

### (5) 实用性、可扩展性原则

水资源承载力和可持续发展理论研究相似,目前研究虽然越来越深入,但缺乏统一和权威性的研究成果,因此应用上也就缺乏实用性。研究上应既考虑不同地域、不同类型水资源条件如缺水和丰水地区的用水特性等一般情形,又要考虑具体研究流域的特殊性,力求成果具有通用性和扩展性。

#### 3.4.2 研究方法的比较分析

在讨论了水资源承载力的定义和内涵、研究内容和量化形式的基础上,水资源承载力的具体研究方法和总体思路就可以明确为:应以系统工程理论为基础、以定性定量相结合为手段来建立水资源承载力的量化计算和评价分析系统。

从水资源承载力研究的发展过程来看,初期阶段水资源承载力的体现是简单和单一的,一般用水资源能够承载多大规模的人口来表示,或者用在一定规模的人口和经济规模的前提下需要多少水资源量来表示,没有系统体现水资源承载力各构成因素之间的相互关系,可以说没有反映出水资源对人口、社会、经济和生态环境的综合承载能力。随着研究的深入,承载人口和需要多少水量的表现形式不足以体现水资源承载力的研究方法与其它诸如水利可持续发展、水资源发展预测、水资源合理配置等研究理论的区别,因此最近的研究倾向于体现承载力各构成因素的关系、承载的范围扩大的综合评价方法。

应该强调,水资源承载力系统是预测、评价和协调一体的研究体系。预测是采用一定的方法,对人口、水资源、社会经济和生态环境以及相应的内部因素进行现状和将来的某一发展阶段的发展状态的有一定依据的推断、估计和测算。评价是指在预测的基础上,用定性和定量的方法,分析人口、水资源、社会经济和生态环境在可持续发展角度、生态经济理论和某种价值观念基础上的效用、效益、协调性的匹配关系。协调是指在评价的基础上,发现的不符合效用、效益和偏好的关系和环节,并进行反馈、调整,制定出合乎设定目标的发展规划。整个过程当中都应牢牢地把握水资源对人口、资源、社会经济和生态环境的贡献和配置的主线,突出“支撑性”的特点。

进行人口、水资源、社会经济和生态环境构成因素的预测模型有很多方法,主要有:系统动力学方法、系统分析方法、情景分析方法以及上述方法结合的综合方法。因为水资源对社会发展是支撑作用,是关键因素之一,不是决定因素,所以,预测应以社会、经济、生态环境和人口为发展主线,按国民经济发展规划要求预测其发展变化情形。社会经济发展的决定因素是历史、社会、经济、人文、资源、科技、人才等等,一个国家和地区的短期和长期国民经济发展计划应是该国家和地区的总的发展纲要,因此,根据我国短期和长期国民经济发展的要求,采用各态历经假说这一原理预测水资源供需状况,研究不同时期水资源承载力问题,更有意义。

水资源承载能力的大小是随水资源开发阶段、目标和条件不同而变化,它是一个动态的、变化的概念。它不仅是水文循环、水资源研究的重要方面,而且与经济社会发展、

环境系统的耦合研究密切相联。

度和评价水资源承载力是一个涉及到构成和影响要素各个方面的连续过程，尽管水资源承载力要求用明确、简化和量化的方法表示其结果，但采用一个或几个指标不足以分析和评价一个流域或区域的水资源对人口、资源、社会经济和生态环境承载能力问题，所以不仅需要建立具有特点的综合量化指标，还需要建立一个水资源承载力指标体系去对其进行分析和评价。

### 3.4.3 水资源承载力分析框架和途径

上文已经定义了现状水资源承载力、目标水资源承载力和极限承载力，水资源相对承载力和绝对承载力，水资源狭义承载力和广义承载力等水资源承载力的概念，这些不同范围、不同着手点但目的一致的水资源承载力研究都有一定的适应性。

从研究的范围来看，在某一时间断面，水资源承载力首先要研究现状水资源承载力的情况，其次，研究动态水资源承载力的情况，动态水资源承载力是未来某一时间断面的现状承载力。当需要了解目前水资源的配置情况下的承载力、和此时改变水资源配置达到设定配置时的承载力，可采用现状和极限承载力概念；当需要了解目前当地水资源量的配置情况下的承载力、并了解外部水源的承载作用时，可采用狭义承载力和广义承载力的概念；当需要了解缺水地区和丰水地区的承载力情况时，可采用相对承载力和绝对承载力的概念。

从研究的着手点来看，可以考虑以下两种情形：

第一情况，一定的水量，最佳能维持当地的人口、生态环境、社会经济的配置格局。配置中要考虑的因素包括历史造成的现状、地理、地质条件等相对不可改变的因素，以及人口数量、增长率等这些难以调整的方面，又要考虑容易改变的因素，如农业种植品种（水稻改小麦）、工业布局（用水量大的产业向用水量少的产业或高科技产业）等，以达到调整产业结构、改变经济增长布局的目的。

第二情况，当地的现状和动态的人口、生态环境、社会经济的配置格局的情形，现状和某一时间需要多少水量。并计算出达到何等程度时，为极限水资源承载力。

基于以上分析，水资源承载力的分析框架和途径可以归纳如下：

（1）根据选定流域或区域的水资源自然状况，分析、选择并建立水资源承载力综合评价模型；

（2）根据流域的社会发展特点和评价目的，归纳并筛选反映水资源承载力影响因素的指标；

（3）按水资源承载力内涵和目标的要求，建立水资源承载力的综合度量指标和评价指标体系两部分量化评价体系；

（4）选择并确定人口、社会经济和生态环境现状和目标发展规划，以此来衡量水资源承载对象的设定目标状态，进而进行水资源合理配置；



- (5) 预测人口、水资源、社会经济和生态环境沿时间坐标的动态发展，同时设定用水定额、用水效率和用水效益，预测水资源开发利用量和供需数量；
- (6) 按步骤 3 选定的两部分量化评价体系内容分别进行评价；
- (7) 综合评价和反馈水资源承载力评价结果，调整水资源构成定额和参数，调整水资源合理配置，调整社会经济发展结构和目标，达到社会和水利可持续发展的目的。
- (8) 提出提高水资源承载力的方法和措施。

### 3.5 水资源承载力综合分析方法

#### 3.5.1 水资源承载力量化计算和指标评价的综合分析体系

按前面所论述的，水资源承载力的量化计算和评价方法将采用两组指标来度量，一类为基础指标，二类为分类指标。

基础指标用来表示水资源承载力最明显特征的一组数据，简单明了地将流域水资源对人口、社会经济和生态环境的支撑能力概括出来，如人均水资源量、亩均水资源量、水资源开发利用率、人均水资源可利用量、最大承载人口数量、最大需水和供水之比例等指标，具有和其他流域或区域水资源承载的简单直接可比性。

分类指标是表示水资源对不同部门用水分配的效率、效益的分类评价指标，由一系列指标构成分类评价指标体系，简称指标体系。对指标体系根据设定目标和方案的实现程度的评价，分析水资源承载力构成因素的发展规模和质量、以及之间的协调程度，并找出不协调的因素，以便采取对策和措施。

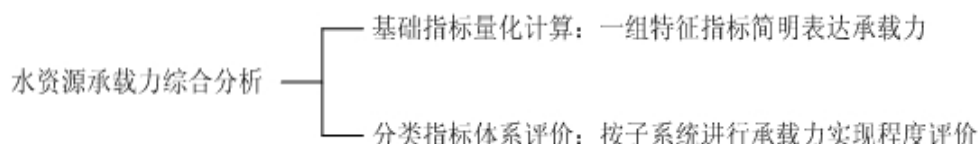


图 3.3 水资源承载力综合分析构成

#### 3.5.2 水资源承载力静态和动态评价

水资源承载力静态分析方法：在确定了某一时间断面总需水量、总人口数量和各种指标后，横向与其它流域、地区或国家的对应指标进行比较和判断，即利用一组指标来评价承载力状况，采用横向可比性来分析水资源承载能力的方法。

水资源承载力动态分析方法：将不同时间断面的若干组预测指标进行两两比较，按时间坐标纵向进行比较和判断，分析水资源可承载性。同时将流域的这些指标纵向变化趋势和其它流域、地区或国家的变化趋势相比较，分析水资源承载力的变化，这种方法称为动态分析方法。在上述现状和目标这两个静态指标集之间时段的水资源承载力即为动态研究内容。

### 3.6 小结

本章讨论了水资源承载力的影响因素、研究内容和量化途径，循序渐进地确定了研究方法和分析模型，重点分析了水资源承载力与内涵相一致的表达方式，在综合考虑以往研究成果的特长和不足的基础上，创新性地提出了水资源承载力的综合分析方法，即基础量化指标计算和分类评价指标评价相结合的方法，定性定量分析相接合、简化和综合相结合，有效地解决水资源承载力的度量和评价问题，同时反映出水资源承载力是社会可持续发展和水利可持续发展的量化方法之一。本论文以两组测算指标即基础指标和分类指标来度量水资源承载力，基础指标包括人口和水资源供需数量的简单、明确指标；分类指标为反映水资源和承载因素之间的协调程度的一组指标体系体系，用静态和动态比较和分析来表示水资源承载现状和目标的人口、社会经济和生态环境发展的实现程度。

## 第四章 水资源承载力量化计算分析

### 4.1 水资源承载力量化计算方法

#### 4.1.1 水资源承载力基础指标选择

水资源承载力基础指标量化计算作为水资源承载力分析的两部分内容之一，所选取的基础指标应能清晰、简明反映水资源的对人口、社会经济和生态环境的主要承载能力，根据这种要求，基础指标的选取包括以下常用指标：水资源承载力基础指标 CCWR、按水量承载指数  $I_W$ 、人口承载指数  $I_P$ 、社会经济承载指数  $I_{GDP}$ 、生态环境承载指数  $I_E$  等表示实现程度的指数指标，以及相应的最大供水规模  $W_S$ 、承载人口数量  $P^*$ 、承载经济规模  $GDP^*$  和承载生态环境用水量  $W_{DE}^*$  的具体指标来表示。

水量承载指数  $I_W$ ：可供水量  $W_S$  或可利用水资源量与需水量  $W_D$  的比值，表示现有可供水资源量对需水量的满足程度。

$$I_W = W_S / W_D \quad (4-1)$$

人口承载指数  $I_P$ ：按水资源供给能力预测人口数量  $P^*$  与按社会发展趋势预测人口数量  $P_S$  的比值，表示水资源对人口发展的承载程度。

$$I_P = P^* / P_S \quad (4-2)$$

社会经济承载指数  $I_{GDP}$ ：按水资源供给能力预测 GDP 数量  $GDP^*$  与按社会发展趋势预测 GDP 数量  $GDP_S$  的比值，表示水资源对社会经济发展的承载程度。

$$I_{GDP} = GDP^* / GDP_S \quad (4-3)$$

生态环境承载指数  $I_E$ ：按水资源供给能力预测生态环境需水量  $W_{DE}^*$  与按社会发展趋势预测生态环境需水量  $W_{DES}$  的比值，表示水资源对生态环境的承载程度。

$$I_E = W_{DE}^* / W_{DES} \quad (4-4)$$

水资源承载力 CCWR：按水量承载指数  $I_W$ 、人口承载指数  $I_P$ 、社会经济承载指数  $I_{GDP}$ 、生态环境承载指数  $I_E$  四项承载指标加权平均值，加权数可以根据四个子系统的相对重要性来设定，为简便计，加权数相等。CCWR 表示水资源能够最大支撑人口、社会经济和生态环境发展的综合程度。

$$CCWR = (I_W + I_P + I_{GDP} + I_E) / 4 \quad (4-5)$$

如  $CCWR=80\%$ ，则表示现状水资源最大能支撑当时当地的人口、社会经济和生态环境 80% 的规模。如  $CCWR=120\%$ ，则表示现状水资源最大支撑当时当地人口、社会经济和生态环境超过 20% 的规模，即能支撑 1.2 倍的规模。具体的规模可按预测的人口、水资源、社会经济和生态环境数量与 CCWR 计算得到。

上述指标一定程度上反映了水资源的承载规模，但没有全部反映出水资源承载力的公平性、协调性特性，不能全部表达水资源承载力的内涵，因此需要进行全面评价，即

分类指标体系的评价。另外，上述量化计算是某一时间断面的各种指标的计算，为评价的全面性，不同时间断面的计算都要进行，同时要考虑纵向之间的动态评价问题。

$$\text{总需水量 } W_D = \text{生活需水量 } W_{DP} + \text{农业需水量 } W_{DA} + \text{工业需水量 } W_{DI} + \text{生态环境需水量 } W_{DE}$$

按上式在给定水资源供水量的前提下，按某种优先原则如按相对不可变化因素（人口、生态需水）固定用水量，和可变化因素（产业结构等）按效益最大化原则，或按用水比例将供水量全部分配给人口、社会经济（农业、工业和服务业）和生态环境使用，以社会发展预测的人口、社会经济和生态环境规模为现状条件，水资源供水量为主线预测分配部门用水量，即可得出水量承载指数  $I_W$ 、人口承载指数  $I_P$ 、社会经济承载指数  $I_{GDP}$ 、生态环境承载指数  $I_E$  所涉及的用水参数。

从经济学角度来看，水资源承载力的构成要素之间，由于对水的需求的价值不同、造成单个因素用水边际效益不同，从而不同的用水分配方案产生总的经济效益不同。而且还要考虑到各要素之间除水造成的相关性外，还应有其他的相关性。

从生态和社会，或现代化程度来讲：经济效益并不能代表水资源承载力的有效性，还应从经济效益以外的其它方面加以考虑。

关于水资源量和供水能力的确定，水资源量是指当地自然水资源量，用多年平均值表示，供水能力是指当地自然水资源量加上调水等其它供水数量。这样在进行水资源承载力基础指标计算时，不但用自然水资源量来衡量，还要用总供水能力来衡量。

#### 4.1.2 水资源承载力基础指标量化计算方法

量化计算涉及到两个系列的水资源承载力系统构成因素的计算：按需求计算水资源承载力的参数和按供给计算水资源承载力的参数。计算中用到以下公式：

（1）水量平衡公式：

$$W_S = W_D \quad (4-6)$$

$$W_S = W_{SN} + W_{SS} + W_{SW} + W_{SD} \quad (4-7)$$

$$W_D = W_{DP} + W_{DA} + W_{DI} + W_{DE} \quad (4-8)$$

其中： $W_S$  为总供水量，由自然水资源可供水量  $W_{DP}$ 、海水淡化水量  $W_{DA}$ 、和污水回用水量  $W_{DE}$  构成。在没有确定的外部调水数量  $W_{SD}$  时，一般计算当地水资源供水能力。

$W_D$  为总需水量，由生活用水量  $W_{DP}$ 、农业用水量  $W_{DA}$ 、工业用水量  $W_{DI}$ 、和生态环境用水量  $W_{DE}$  构成。

（2）经济平衡公式：

$$GDP = GDP_A + GDP_I + GDP_S \quad (4-9)$$

其中： $GDP$  为总经济规模，由农业  $GDP_A$ 、 $GDP_I$ 、和  $GDP_S$  构成，它们之间的比例关系构成产业结构比例，农业  $GDP$  比例  $B_A$ 、工业  $GDP$  比例  $B_I$ 、服务业  $GDP$  比例  $B_S$ ， $B_A + B_I + B_S = 1$ 。

（3）水量经济关系公式：

$$W_{DP} = P * q_P \quad (4-10)$$

式中： $P$  为人口， $q_p$  为生活用水综合定额。当城镇化率为  $k$ 、城镇居民生活用水定额  $q_{pu}$ 、农村居民生活用水定额  $q_{pr}$  时， $q_p = q_{pu} * k + q_{pr} * (1 - k)$ 。

$$W_{DA} = GDP_A * q_A = GDP_A * r_A \quad (4-11)$$

式中： $GDP_A$  为农业 GDP， $q_A$  为万元农业 GDP 用水定额， $r_A$  为单位水量农业 GDP，它是万元农业 GDP 用水定额  $q_A$  的倒数， $q_A = 1/r_A$ 。农业用水量  $W_{DA}$  也可以用农业灌溉面积与农业灌溉定额计算。

$$W_{DI} = GDP_I * q_I = GDP_I * r_I \quad (4-12)$$

式中： $GDP_I$  为工业 GDP， $q_I$  为万元工业 GDP 用水定额， $r_I$  为单位水量工业 GDP，它是万元工业 GDP 用水定额  $q_I$  的倒数， $q_I = 1/r_I$ 。工业用水量  $W_{DI}$  也可以用工业产值与万元工业产值用水定额计算。

注意：供水量  $W_s$  中可不包括调水量  $W_{SD}$ ，主要分析当地水资源的承载情况，当有确定的调水量时，再研究考虑由调水的水资源承载力。

当给定供水量  $W_s$  后，主要问题是有限的供水量  $W_s$  在用水部门间的分配问题。分配方法一般有：按用水效率、用水效益、产业结构和人均生活水平不变的等比例分配方法、按总 GDP、人均生活水平不变的用水量分配方法、和按效益最大化原则分配水量的方法。

第一种方法：按用水效率、用水效益、产业结构和人均生活水平不变的等比例分配方法相当于按照  $I_w$  的比例关系等比例放大或缩小人口、社会经济和生态环境预测的规模。可以验证，按上述水量、经济和相互关系公式计算的  $I_p$ 、 $I_{GDP}$ 、 $I_E$  和 CCWR 指标均相等，计算结果就是  $I_w$ ，即水资源承载力等于缺水比例。这样，研究水资源承载力问题等同于水资源供需预测，研究也就失去了意义。目前有很多学者研究水资源承载力将承载人口作为最终落脚点，按用水效率、用水效益、产业结构和人均生活水平不变的等比例分配水量，计算出最大人口数量。实际上，采用供水量与需水量的比例乘以预测人口数量即可得到承载的最大人口数量。

第二种方法：按总 GDP、人均生活水平不变的用水量分配方法。在保证生活水平不变的前提下，调整产业结构，使总 GDP、人均 GDP 不变。如调整工业和农业用水比例，利用工业用水效率高、农业用水效率低这一特点，保持两者合计用水量与 GDP 的预测数量不变，增加工业用水量多创造 GDP，减少农业用水量少量减少 GDP，从而达到工业和农业用水量与 GDP 的平衡。但是这种分配水量办法，使工业 GDP 比预测数量要高，也就是说，因水量分配增加，工业可以创造较大的产值，违反了水资源对国民经济是支撑的原则。实际上即便水资源充足，由于社会经济发展的特点，社会经济也不能超过预测的发展规模，即按水资源供给计算的人口、水资源、社会经济和生态环境规模不能突破预测的上限，水资源供给是人口、社会经济和生态环境发展的必要条件，但不是充分条件。

第三种方法：按效益最大化原则分配水量。社会经济部门供水效率中以服务业用水效益最高，工业用水效益次之，一般达到 70-100m<sup>3</sup>/万元，农业用水效益最低，一般达到 1200-1800m<sup>3</sup>/万元。生态环境用水由于没有直接的经济效益，主要是社会效益，在实现可

持续发展原则的基础上，应保证生态环境用水的需求。人口是水资源承载力研究的最主要目标，在进行有限水资源分配的时候，生活用水应是首先得到保证。这样，有限水资源分配的先后次序为：首先保证生活用水，尽量保证生态环境用水，协调经济用水。在经济用水分配中按效益最大化原则进行，当水资源不足时，应优先工业用水，其次农业用水。同时保证人均 GDP、人均用水量  $q_p$ 、人均生态环境用水量  $q_e$  不变，即代表生活水平不降低，工业用水定额  $q_i$ 、农业用水定额  $q_a$  不变，即代表技术水平不降低。总 GDP、产业结构比例可以改变，这也反映了水资源承载力研究目的之一的调整产业结构、优化社会发展的目的。降低了农业用水量的分配，也就降低了粮食产量，对当地的生活会有一定的影响，但是，流域的社会经济发展是一个开放系统，当地的粮食供应可以从其它流域调入来维持，由于农业是用水大户，产生的经济效益较低，粮食供应也可以满足，所以在水资源短缺的情况下，可以采用减少农业供水量来测算当地的水资源承载力。按上述分析和相关公式可以推导出水资源承载人口、社会经济和生态环境的最大规模的计算公式：

由经济和水量平衡公式：

$$P^* (GDP/P) = GDP_i + GDP_A^* + GDP_s \quad (4-13)$$

$$GDP_A^* = (W_s - W_{DE}^* - W_{DI} - W_P^*) / q_A \quad (4-14)$$

$$W_{DE}^* = P^* q_e \quad (4-15)$$

$$W_P^* = P^* q_p \quad (4-16)$$

得出承载人口数量的关系式：

$$P^* = (GDP_i + GDP_s + (W_s - W_{DI}) / q_A) / (GDP/P + (q_p + q_e) / q_A) \quad (4-17)$$

其中：带\*号者为按供水量计算的相应人口和 GDP 数量，其余为按发展趋势预测规模。

计算可以得到水资源承载的人口、社会经济和生态环境的规模为：人口  $P^*$ 、社会经济  $P^* (GDP/P)$  或  $GDP_i + GDP_A^* + GDP_s$ 、生态环境  $W_{DE}$ 。由此可以计算出承载力指标  $I_W$ 、 $I_P$ 、 $I_{GDP}$ 、 $I_E$  和 CCWR。

经比较采用第三种方法：按效益最大化原则分配水量能基本反映水资源承载力基础指标量化计算要求。将可供水量分配到各用水部门，也就是水资源的合理配置问题，涉及到的理论、原则和方法很多也很复杂，这不但是水资源承载力研究的重要问题，也是水利可持续发展研究的核心问题。本方法能部分地应用效益最大化原则，并没有完整地反映效益最大化原则的内涵，如调整人口、水资源、社会经济和生态环境中的效率、效益定额和指标，对水资源的配置都有很大的不同。

#### 4.1.3 水资源承载力基础指标量化计算步骤

##### (1) 流域水资源状况分析

选定水资源承载力分析的流域或区域，并对流域的水资源自然条件、水利工程建设、生态环境建设等条件进行研究分析，宏观上了解分析流域水资源相关的基本情况。

## (2) 流域社会经济发展现状和预测

分析流域社会经济发展状况,尤其是国民经济与水资源使用相关部门的发展现状情况。对社会经济的发展预测有各种方法,这里采用国民经济发展计划作为预测目标,中间时段按发展趋势和各态历经学说方法借鉴指标进行预测,最终预测确定符合社会经济发展目标的人口、城镇化进程、国内生产总值 GDP、工业、农业、服务业行业 GDP、工业总产值、农业灌溉面积、生态环境标准等。

## (3) 流域水资源供需发展现状和预测

类似于社会经济发展预测方法,在确定生活用水定额、工业万元产值用水定额、农业灌溉用水定额、生态环境用水效率、服务业标准这些用水效率和效益定额后,结合预测的人口、城镇化进程、国内生产总值 GDP、工业、农业、服务业行业 GDP、工业总产值、农业灌溉面积、生态环境标准等计算出人口、社会经济和生态环境的需水量。同理,根据水资源开发利用发展趋势和调水、海水淡化、虚拟水的水量情况,预测流域水资源供给能力。

## (4) 流域水资源作为约束条件预测人口、社会经济和生态环境支撑规模

在确定了某一时间阶段的可供水量、各部门用水效率和效益的基础上,分项计算在水资源满足人口、社会经济和生态环境其中两个子系统的发展和需水规模时,另一个子系统的发展规模和用水规模。

## (5) 流域水资源承载力量化计算

计算每一要求时间断面的指数:水量承载指数  $I_w$ 、人口承载指数  $I_p$ 、社会经济承载指数  $I_{GDP}$ 、生态环境承载指数  $I_e$  等指标,最后计算水资源承载力基础指标 CCWR。

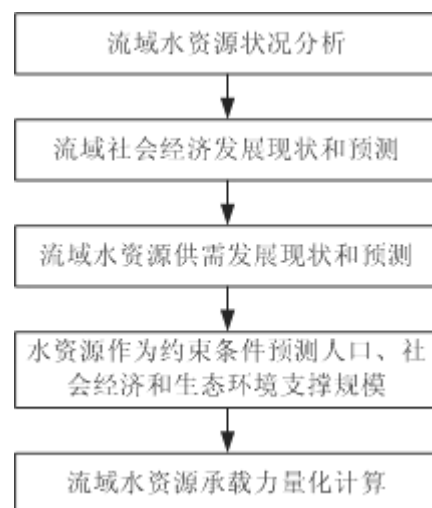


图 4.1 水资源承载力量化分析步骤

### 4.1.4 水资源承载力量化计算方法的改进

水资源承载力研究体系的主要目的是实现有限水资源的合理配置,准确体现流域水资源管理中各利益主体的竞争性用水和分配协调关系,因此水资源承载力承载对象之间存在着竞争和博弈问题。在水资源承载力的量化分析过程中,对有限水资源量分配到人口、水资源、社会经济和生态环境等各部门的时候,如何使有限水资源得到有效配置,在各用水部门没有外界约束的条件下,每个部门为自身获得最大利益,都想方设法更多地占有水的使用权,致使水资源没有得到合理配置;如果在水资源统一管理和调度的情况下,每个部门既要满足整个流域用水的总体利益又要满足为自身利益,致使水资源得到合理配置。由此可以看出,通过水资源承载力承载对象的用水博弈分析,水资源统一管理和协同的必不可少的途径。

博弈，顾名思义，就是“赌博”和“对弈”。在博弈中，每一方都要想方设法取得有利的位置，攻击对方、保护自己，最终取得胜利；同时，对方也是一个与你一样的理性人，他也会这么做。理性的人是指他在具体策略选择时的目的是使自己的利益最大化，因此博弈就是一种斗智的决策竞争，哪一方要想取得有利的位置或者取得自己利益的最大化，他就需要具有更高明的智慧和手段。博弈论研究的是理性的人之间如何进行策略选择的、一门研究不同主体之间相互影响和相互作用行为的学问。也就是说，博弈论是研究决策主体的行为发生直接相互作用时的决策以及这种决策的均衡问题的学问。博弈论根据参与人是否能够达成有约束力的协议而分为合作博弈和非合作博弈。非合作博弈建立在给定约束条件下最大化其自身效用函数的基础上，强调的是个人理性；而合作博弈是公理性的，常常诉诸于帕累托改进、效率和公平等，强调的是团体理性。

作为二十世纪最重要的社会科学成果之一，博弈论深刻地影响着人们对人类社会运行模式和制度建构的思考。由于博弈论的抽象性、统一性和普适性，它被认为是一种“社会物理学”。1968年，格雷特·哈丁成功的将“囚徒的困境”与资源耗竭结合起来，揭示了生态环境问题产生的根本原因，而随着理论体系的牢固建立和成果的不断涌现，它在经济学、社会学甚至生物学等学科中得到了越来越广泛的应用，而水资源作为一种有限而脆弱的资源，其管理的显著特征之一就是各管理主体之间行为的相互作用，博弈理论不可避免地进入到水资源开发与管理的研究领域。

## 4.2 水资源承载力分析的边界条件

进行水资源承载力分析首先应进行承载主体和承载体的现状和发展趋势分析预测，也就是人口、社会经济、生态环境和水资源开发利用现状和发展趋势分析预测、确定水资源承载力边界条件，为水资源承载力基础指标量化和分类指标体系评价打下基础。

预测方法的选择。目前各地常用的指数法、定额预测方法具有一定的局限性，因为这些常用的方法只能反映一种平稳几何的增长过程，随着时间的延伸可以无限地增大。但实际用水过程是与社会经济发展速度、方向、政策、技术进步等难以确定的因素密切相关的，甚至受自然条件（丰枯水）波动的影响。预测模式中参数机制与取值不当，使得需水过程难以被准确描述<sup>[16]</sup>。本文采用的方法是情景预测法并按各态历经假说（亦称各态遍历假说）原理，选取国内和国际上类似发展过程问题的定额和标准，在一定的假设条件下，按照国家发展计划所设定的目标为最终结果进行。

预测水资源承载力计算和评价边界条件的原则：参数和标准的选取要反映可持续发展的思想，资源的使用和分配体现现代内公平和代际公平，

在对参数预测不准确的情况下，反映评价对象的发展水平不一定用绝对的表达方式而可以用一种相对描述方法，如评价对象的发展一般是曲线型发展，在不影响被评价对象之间的关系和相对地位的前提下，允许用近似的、简化的直线性关系来代替曲线关系<sup>[140]</sup>。也就是说在参数缺点没有把握的情况下，莫不如用线性方法来代替。现代管理的一



个重要思想是，应该追求相对意义的满意解，而不是绝对意义上的最优解<sup>[140]</sup>。因此，在水资源承载力所涉及到的入口、水资源、社会经济和生态环境规模的统计和预测时，虽然它们的变化规律是曲线性的，但在难以确定的条件下，可以采用直线性发展来代替，或者采用折线性。

#### 4.2.1 社会经济发展目标

《国民经济和社会发展第十个五年计划纲要》指出，世纪之交，我国胜利实现了现代化建设的前两步战略目标，经济和社会全面发展，人民生活总体上达到了小康水平。从新世纪开始，我国将进入全面建设小康社会，加快推进社会主义现代化的新的发展阶段。根据党的十五大提出的远景目标，第十个五年计划期间（2001 至 2005 年）经济和社会发展的主要目标是到 2010 年国内生产总值比 2000 年翻一番；到 21 世纪中叶，中国基本实现现代化，我国经济将达到中等发达国家水平。

水资源承载力量化分析必须紧紧依靠国家和流域地区发展战略，通过国民经济和社会发展目标来预测水资源需求状况。在新世纪的中叶我国将实现达到中等发达国家的战略目标，基本实现现代化，那么什么是现代化？按照中国科学院《2001 中国可持续发展战略报告》的研究成果，中国现代化目标的标准是<sup>[26]</sup>：

预计到 2050 年，中国在现代化进程中将遵循可持续发展的基本原理，依序通过三大“零增长”的台阶，整体地进入到可持续发展的良性循环之中，全面达到世界中等发达国家的水平：

第一台阶：到 2030 年争取实现人口数量和规模（自然增长率）的“零增长”，同时在对应方向上实现人口质量的极大提高。

第二台阶：到 2040 年实现物质和能量消耗速率的“零增长”，同时在对应方向上实现社会财富的极大提高。

第三台阶：到 2050 年实现生态和环境恶化速率的“零增长”，同时在对应方向上实现生态质量和生态安全的极大提高。

本文水资源承载力所遵循的社会经济发展目标将按照上述中国科学院研究定义的中国现代化目标的标准，预测水资源承载力分析所需要的边界条件。将水资源承载力承载的现状的人口、生态环境和经济发展水平为静态标准的下限，以上述现代化标准的人口、生态环境和经济发展水平为静态标准的上限，中间水平为动态研究的过程。

#### 4.2.2 人口发展和城镇化进程预测

人口发展预测是一个复杂的社会发展预测问题，因为人口增长不但受人口出生率、人口死亡率、人口迁移的自然增长速度的直接影响，还要受到社会变革、传统文化素养、经济水平等因素的间接影响。这样人口的预测可以采用按出生率、人口死亡率、人口迁移的构成要素的分量预测再汇总的要素推算法方法、或者按综合自然增长率或人口净增长率计算的直接推算法进行。前者计算方法相对精确，需要的参数要多；后者比较综合

简洁，但精度相对低一些。

城镇化进程以城镇化率来表征，是指城镇人口占总人口的比率，是现代化发展水平的一个重要指标，直接影响着人口用水的单位数量。城镇化率可以通过历史发展工程中的统计数据外延推算，也可以通过设计目标的城镇化率进行推算。

本文人口预测主要采用人口直接推算法，按现状人口状况为预测下限，按上述现代化标准的人口目标为上限，即 2030 年实现人口数量和规模（自然增长率）的“零增长”，人口数量达到最大，按照目前各方面的估计全国人口达到 16 亿。由此，可以直接计算出目前到 2030 年的历年过程中人口净增长率，和选定年份的人口数量。农村人口和城镇人口的预测同样采用现状和目标的城镇化率，计算出选定年份的城镇化率，按测定的相应总人口数量计算确定。

#### 4.2.3 社会经济发展预测

社会经济按三次产业结构划分，第一产业为广义的农业，第二产业为广义的工业，第三产业为服务行业。社会经济所涉及到的用水、耗水、污水排放、回水利用的预测内容包括：国内生产总值 GDP，第一产业 GDP，第二产业 GDP，第三产业 GDP，产业结构比例，灌溉面积增长。同时还要计算单位 GDP 或单位灌溉面积的用水、耗水、污水排放数量，这些数值也是随着社会的发展和科技进步在不断的变化的，每项指标可以根据社会经济设定目标，如中等发展国家的现代化水平相应国家的统计定额来预测确定。

上述社会经济指标的预测一般采用在现状和设定目标经济水平的预测基础上，按线性内差预测不同时间段的相应指标。采用的方法是情景预测方法和各态历经假说原则预测和选择所需指标。

#### 4.2.4 生态环境需求预测

本文将生态环境直接作为水资源承载力的承载对象，与人口和社会经济并列分析，所以研究步骤应同于人口和社会经济的方法，但鉴于生态环境的有关研究相对滞后，在分析过程中尽量采用简化方法。

生态环境需求预测指随着社会的发展人类对生态环境的要求和生态环境保护准则、及生态环境保护目标的发展变化趋势和状况。我国在向现代化迈进，在人们的生活得到极大满足的条件下，对生态环境和精神方面的需求大大增加，但是将生态环境保持到何等程度将涉及到经济水平和人文水平造就的生态环境价值观。

广义的生态环境用水的界定是相对于降水资源总量而言的，即维持全球生物地球化学平衡诸如水热平衡、水沙平衡、水盐平衡等所消耗的水分。狭义的生态环境用水（也可称为生态用水）应当是指为使生态环境不再恶化并逐渐改善而需要消耗的水资源总量，即狭义生态环境用水是针对我国 2.81 万亿  $\text{m}^3$  水资源总量而言的<sup>[137]</sup>。

生态环境发展预测内容主要包括与用水和耗水有关的生态环境方面因素：水土保持生态环境用水、林业生态工程建设用水、维护河流水沙平衡用水、保护和维持河流生态

系统的生态基流、回补超采地下水所需生态水量以及城市生态用水等几方面<sup>[141]</sup>。

上述生态环境指标的预测同样采用在现状和设定目标经济水平的预测基础上，按线性内差预测不同时间段的相应指标。

#### 4.2.5 水资源开发利用和供需发展预测

进行水资源承载力分析的基础条件之一就是计算和预测流域的供水和需水现状以及发展趋势，进行这种计算和预测需要人口、社会经济和生态环境的发展和预测为前提，预测的深度和精度不但与所选取的方法有关，而且与构成因素的项目划分有关。本文将选择适当的项目划分，指标或参数相对独立、容易获得并且统计可靠。

按各态历经假说的原理，水资源的需求和其它社会经济问题的发展变化是有一定的规律可寻的，其它发达的工业化国家发展水资源的需求的轨迹可以被发展中国家所借鉴，并且发展中国家可以利用后起国的发展优势，避免发展过程中的弯路。利用这种思路，在选取和预测各种发展目标和定额标准时，评价流域可参照国家和世界的水资源开发所经历的轨迹进行选取。

##### 4.2.5.1 水资源需求预测

水资源需求预测可分为人口、社会经济和生态环境三部分需水，需水量的变化不但与人口、社会经济和生态环境的发展状况和目标有关，而且与的以用水、耗水、污水排放定额和标准为特征参数的流域地理、气候、资源条件和生活习惯等因素有关。构成水资源需求的各种因素的发展变化不但受水资源紧缺的制约，更主要的是受各自发展规律的影响，这些人口增长、经济发展、产业结构变化、生态环境保护准则和力度、用水效率和效益等因素的发展、增长、降低、抑制等错综复杂变化，造成了类似大多数国家在工业化进程中那样，水资源的需求会经历了快速增长、缓慢增长和“零增长”的变化过程。

根据上述人口、社会经济和生态环境发展状况和情景预测，在确定了相应时期的用水、耗水、污水排放定额和标准的前提下，分部进行人口、社会经济和生态环境各部门的水资源需求预测。

按照我国社会发展所规划的发展目标，到 2040 年我国水资源需求量实现“零增长”。按照社会发展情景和用水效率效益定额预测的结果和“零增长”的目标可能不一致，因此预测中将这两种方法进行融合、互相检验。

在需水预测中，表示用水效率和用水效益、构成社会经济和生态环境与水资源关系之间的参数称为用水定额或经济定额，如生活用水定额： $\text{m}^3/\text{人日}$ 、工业用水定额： $\text{m}^3/\text{万元 GDP}$ 、农业用水定额： $\text{m}^3/\text{万元 GDP}$ 、粮食灌溉定额： $\text{m}^3/\text{亩}$ 或  $\text{kg}/\text{亩}$ 、林草灌溉定额： $\text{m}^3/\text{亩}$ 或  $\text{kg}/\text{亩}$ 、第三产业用水定额： $\text{m}^3/\text{万元 GDP}$  等，它们是客观存在而又反映某种关系的、水资源承载力分析不可缺少的指标，为使用的方便，将定额的有关内涵和使用进行简单分析。

定额，是指在一定条件下，完成某项产品、某种过程所需要素的标准额度、是消耗量的平均水平。定额广泛用于人类社会的生产、生活、工作等各领域，对衡量、核算和预测生产、生活、工作规模起着基础作用。如用水定额、工程定额、工资总额等等，在水利行业用途广泛的是工程概预算，用以计算、预测工程造价，为决策工程建设与否、工程规模、控制投资、经济评价提供清晰的依据。用水定额是水资源承载力的基础要素，城镇居民用水定额、工用水定额、农业用水定额等客观反映当地当时的平均用水数量。定额的精度对水资源承载力的影响很大，与定额项目划分精度、定额本身构成精度、居民用水、工用水、农业用水构成划分有很大关系。任何度量方法都会用到定额，而度量的精度不但与定额本身的精度有关，而且与层次划分的详细程度有关，因此，适当选取定额精度、划分用水项目层次，是能够满足水资源承载力计算要求的。

### （1）生活需水量预测

生活需水包括城镇生活用水和农村生活用水两部分。城镇生活用水分为城镇居民生活用水和公共设施用水，用城镇人口数量和城镇人口用水定额来计算，其中城镇人口用水定额包括公共设施用水部分。农村生活用水分为农村居民生活用水和农村牲畜用水，用农村人口数量和农村人口用水定额来计算，其中农村人口用水定额包括农村牲畜用水部分。

生活用水定额包括城镇人口用水定额和农村人口用水定额，是决定生活用水量的主要参数，它的选取主要采用现状用水定额和目标用水定额，以及参考其它流域、全国和世界工业化国家的用水定额和标准来确定。

### （2）第一产业（农业）需水量预测

第一产业（或简称农业）需水包括耕地灌溉用水和林牧渔业用水，耕地灌溉用水又可细分为水浇地和水田两类。如果统计方便或预测要求精度高的情况下，农业用水可用水浇地和水田面积与相应用水定额来计算，也可综合地用耕地面积和灌溉综合用水定额计算，其中灌溉综合用水定额包括了水浇地和水田以及林牧渔业用水部分。

灌溉定额不但随着现状和目标定额的影响，而且受到每年水文气象条件的影响，为简便计，灌溉定额采用中等干旱年份的定额，不同年份的定额随灌溉用水效率、种植结构和节水潜力的变化而变化。

同时农业需水量还与耕地面积的增减而不同。耕地面积和耕地的结构，也就是水浇地和水田以及林牧鱼业的比例，直接影响着需水量的多少。

另外一种预测农业需水量的方法不从耕地面积入手，而从农业 GDP、种植结构、粮食产量、单位粮食产量用水量方面，预测万元农业 GDP 用水量，进而推算出农业用水量。以上两种方法实际是一类计算方法，可以互相借鉴的。

### （3）第二产业（工业）需水量预测

第二产业（或简称工业）需水包括重工业、轻工业、高耗水、低耗水等等广义的工业生产所消耗的水量。由于工业部门繁多、用水定额也相应复杂，因此，工业需水量的

测算很难按不同部门的需水去统计，目前一般采用工业用水综合定额法来计算。

本文采用工业现状和目标 GDP 与万元工业用水定额来计算和预测工业需水量。

#### (4) 第三产业（服务行业）需水量预测

第三产业（或简称服务行业）需水包括交通、旅游、银行、娱乐等部门的耗水量，它的预测一般采用和工业需水类似的方法，用服务业现状和目标 GDP 与万元服务业用水定额来计算和预测服务业需水量。服务业现状和目标 GDP 预测采用社会经济发展规划所要求的产业结构比例等方法进行，万元服务业用水定额参考全国或其它工业化国家的定额。

#### (5) 生态环境需水预测

根据上面生态环境需求预测内容，本文生态环境需水预测的目的是为了分析水资源的开发利用程度和水资源分配情况，生态环境需水是水资源配置的主要内容之一。理论上讲，生态环境需水预测应包括水土保持生态环境用水、林业生态工程建设用水、维护河流水沙平衡用水、保护和维持河流生态系统的生态基流、回补超采地下水所需生态水量以及城市生态用水等方面的需水预测，但由于生态环境用水的研究起步较晚，研究方法不够完善，并且涉及到的内容较多，本文将采用简化综合的估算的方法，以满足水资源承载力分析的需要。

生态环境需水预测按现状和目标的需水进行，现状需水按计算时段的生态环境用水量统计；目标生态环境需水按国民经济发展规划的第三个台阶：“到 2050 年实现生态环境恶化速率的“零增长”，同时在对方向上实现生态质量和生态安全的极大提高”为目标，中间时段按现状和目标需水内差求得。

#### (6) 总需水预测

将生活用水、第一产业广义的农业、第二产业广义的工业、第三产业为服务行业以及生态环境需水按相同时段叠加即为水资源承载对象的总需水量。但应注意社会目标、人口、水资源、社会经济和生态环境等预测和用水效率及效率等指标、参数的假定、选取有很大的误差，总需水量的准确度也很不同，所以实践中，应根据需要不断适当调整指标、参数，计算出满足需要的总需水量。

#### 4.2.5.2 水资源开发利用和供水能力预测

水资源开发利用和供水能力预测是从供给方面来测算水资源的可使用量，水资源开发利用和供水能力的限度不但与水资源的自然条件有关、而且与开发方式、资金投入等条件有关。一个流域自然水资源的有限性，也决定了可开发利用的水资源的有限性，就是说，在水资源合理配置情况下，各用水部门用水效率合理、生态环境保护满足人们的理性需要，水资源开发利用存在最大值。

供水能力是相对于水资源开发利用程度的水资源可提供量、以及包括流域调水、海水淡化和调动虚拟水在内的其它供水量。污水资源化也是提高供水能力的一种途径，污水资源化是将城镇生活和工业废污水进行处理，回用于农业灌溉和生态环境用水。

根据统计资料<sup>[5]</sup>，1997 年我国水资源开发利用约为 5600 亿  $\text{m}^3$ ，开发利用率为 21% 左右，有 3000 多亿  $\text{m}^3$  水资源量尚未开发，可开发利用的水资源主要分布在南方地区，北方地区水资源可开发利用的数量不足 500 亿  $\text{m}^3$ 。估计到本世纪中叶全国可开发利用水资源总量约为 9000 亿  $\text{m}^3$ ，开发利用率为 32% 左右，达到可开发利用限度值。

#### 4.2.5.3 水资源供需分析

上述采用的情景分析法预测的水资源承载和被承载对象的人口、水资源、社会经济和生态环境现状和目标数量，很大程度上受人为因素影响，由于水资源承载力系统的复杂性，也很难全部客观地将预测结果反映实际情况。因此水资源的供需结果应采用一定的技术经济方法进行分析 and 判断，以弥补预测方法的不足和进行必要的修正。可采用的方法有：根据情况调整效率和效益定额上下 5-10% 幅度，进行选定方案的技术经济分析。

### 4.3 小结

本章在综合分析方法确定的前提下，详细地讨论了基础指标量化计算部分的分析方法和过程，对量化指标的选择、计算方法和步骤都给出了明确的结论。用几个明确指标和响应的承载实现程度或概率来表达水资源承载力的量化指标部分，既反映了水资源能承载多大规模的人口、社会经济和生态环境状况，也反映了对目标的实现程度，说明水资源承载力是一个相对的指标。最后对量化计算方法的边界条件进行了分析，提供了人口、社会经济、生态环境和水资源供需发展趋势的预测方法，以及以水资源为约束条件计算水资源承载规模的方法。

## 第五章 水资源承载力指标体系设计和评价

### 5.1 水资源承载力指标体系的构建

本文水资源承载力分析采用两步骤进行,即反映量化度量的基础指标计算分析和反映承载实现程度的分类指标体系评价分析。水资源承载力分类指标体系或称水资源承载力评价指标体系是水资源承载力分析的两部分内容之一,主要在基础指标分析的基础上,进行承载力协调程度和目标实现程度的评价,指标体系包涵的评价范围广、内容全面,比较系统地将水资源承载对象的内部用水配置关系表达出来,以便找出合理有效使用水资源的着手点和调整方法。

#### 5.1.1 水资源承载力指标体系的概念和作用

##### 5.1.1.1 水资源承载力指标体系的概念

指标是统计指标的简称,它是一个统计学术语,指反映自然和社会现象总体数量特征的概念和具体数值<sup>[21]</sup>。指标由指标名称和指标数值两部分组成,指标名称是对事物某些特征的概括与界定,表明所研究现象的科学概念,指标数值是根据指标名称所反映事物和现象的内容,通过调查收集有关数据、或通过统计并运用选定的运算方法计算而取得的数值。一个复杂系统的各个组成要素之间按客观规律彼此联系,相互作用,用一个具体的指标是很难反映整个系统的全部特征和规律,需要若干或一系列指标一起来表达,这一系列指标就构成指标体系。指标体系是由一系列相互联系、相互制约的指标组成的科学的、完整的总体。

指标体系所表达的事物特征是可以测量并能反映事物的内在性质和发展规律,但这种客观规律是无法直接测量的<sup>[13]</sup>。然而可以根据对客观规律的理解构造某种理论模型或假说,把系统中某些能够直接测量的特征与无法直接测量的特征相联系,进而把握事物的发展变化。

水资源承载力的度量和评价是一个涉及到构成和影响要素各个方面的连续的动态过程,尽管水资源承载力要求用明确、简化和量化的方法表示其结果,但采用一个或几个指标不足以分析和评价一个流域或区域的水资源对人口、资源、社会经济和生态环境承载能力问题,所以不仅需要建立具有鲜明特点的综合基础量化指标,还需要建立一个水资源承载力分类指标体系或简称水资源承载力指标体系去对其进行分析和评价。

水资源承载力指标体系是根据对水资源以及水资源与人口、社会经济和生态环境发展相互影响的客观规律的认识,在一定的统计资料的基础上,建立关于水资源承载力测度的指标体系并不断监测各个指标的动态变化,从中取得用其他方式不可能得到的定量信息,用以描述水资源承载力现状及其发展趋势,从而为协调人口、社会经济和生态环境之间关系、进行水资源合理配置、实现水利可持续发展和其他相关政策的制定提供必

要的支撑。

由此可以看出，水资源承载力指标体系研究是一个特定的研究领域，属于跨学科、跨领域的交叉和边缘学科研究，其基本研究对象是人口、水资源、社会经济和生态环境，其理论基础是在可持续发展思想和生态经济理论的指导下对水资源配置规律的认识，其基本工具是统计学理论和方法，其根本目的和主要功能是为研究和制定水利可持续发展政策提供支撑。

#### 5.1.1.2 水资源承载力指标体系的作用

水资源承载力指标体系是以简明、全面和综合的方式，体现被评价流域的水资源对人口、社会经济和生态环境的承载内容和过程，其主要作用有以下方面。

(1) 水资源承载力指标体系是在全面分析和辨识水资源系统、人口发展状况、社会经济、生态环境、科技发展和流域地区发展规划的基础上制定的，指标体系通过其总体效应来刻画被承载对象的总体状况，准确地把握水资源及其对社会、经济的作用和影响，提供社会可持续发展所必需的基础数据和分析结论，所以能够了解和发现以水资源为主线的承载对象中存在和需要解决的关键问题。

(2) 水资源承载力指标体系可以监测指标发展进程和变动情况，反映发展情况和相关政策的实施效果。这些信息的反馈使政策制定者和决策者及时地评估政策的正确性和有效性，发现和提出需要进一步研究的问题，进而对政策加以改进或调整，从而为分析和制定国家政策提供其他方式难以获得的重要依据。

(3) 水资源承载力指标体系的建立为比较和选择水资源合理配置方案提供了可靠的依据和方法，进而为各种方案的评价提供了可能。

(4) 水资源承载力指标体系是决策者和管理者的调控工具或预警手段之一。通过指标体系序列，决策者和管理者可以预测和掌握流域水利可持续发展的发展态势和未来走向，有针对性地进行政策调控或系统结构的调整。

#### 5.1.2 水资源承载力指标体系设计原则

建立水资源承载力指标体系的指导思想是：从流域的水资源配置的基本特点和现状出发，依据社会可持续发展战略目标，借鉴流域外水资源开发利用的经验，建立具有实际可操作性、反映人口、水资源、社会经济和生态环境实际情况的水资源承载力指标体系及评价方法。

水资源承载力指标体系选择应该遵循以下基本原则：

(1) 水资源承载力指标体系应当充分反映和体现水资源承载力的内涵，从科学的角度去系统而准确地理解和把握水资源承载力的实质。各个指标之间，要形成有机、有序的联系，从多方面反映水资源对对象的承载情况。这是水资源承载力的定义、内涵、特性和功能所要求的。

(2) 指标体系中的指标数量不宜过大，既要考虑指标体系的全面性，又要考虑指标



体系的简明性，在相对比较完备的情况下，指标的数目应尽可能地压缩，以易于操作为限，适当掌握好代表性和可操作性的程度，指标数目过大将会使人们难以把握和采用。

(3) 指标体系要具有易获得性，如果选择的统计指标虽然很全面，但却难以取得数据资料，指标没有了易得和可靠性，指标体系的应用就不具备反映水资源承载力实质的功能。因此，选取的指标，最好能从流域水利统计年报、水资源公报或其他常规性统计资料中取得，除少量的指标需要另做专门调查外，一般指标体所涉及的统计数据和其他常规性研究相符合。

(4) 构建水资源承载力指标体系的目的不但用于理论的研究和知识的拓展，还要切实应用到实际操作中，要有实用性。指标体系就是要把复杂的人口、水资源、社会经济和生态环境之间庞杂、纷乱的关系转化为可以度量、计算、比较的数字、数据，以便为制定水利可持续发展规划及方针政策提供定量化的依据。

(5) 目前指标体系的评价方法之一就是采用不同方案间的比较分析，因此水资源承载力指标体系不仅要有可比性还要具有层次性。方案间的比较总是必要的，也是有利的。为便于进行比较研究，应尽量使指标和资料的口径、范围规范化，而且分清主要和次要因素，按相关关系分出不同层次。层次结构是否清晰合理，直接关系到评估质量的好坏。比如，从比较的角度讲，一个流域的水资源总量是没有意义的，人均水资源量和亩均水资源量才有意义。

(6) 任何对科学技术的认识和对科技与经济、社会相互关系的认识是逐步深化的，因此水资源承载力指标体系的构成也是发展变化的，具有动态性原则。随着人类社会的发展和科技的进步，水资源承载力的研究内容也会变化发展，指标体系也将随着发展和变化。

### 5.1.3 水资源承载力指标体系构建需要注意的问题

水资源承载力指标体系作为一种新兴的交叉学科的评价，在其研究和建立中，目前还存在着很多问题，如何解决这些问题也是今后水资源承载力研究工作的重点和难点。

(1) 水资源承载力指标体系的建立要与水利可持续发展指标体系有一定的区别，虽然它们属于同类问题，有很多相似之处，但应当具有各自研究的重点和特色。

(2) 目前的科学技术水平还不能使我们完整、准确和清晰地理解水资源承载力相关的各个领域，甚至有些问题我们目前还没有发现，所以某些指标就很难得以提出和设定，或某些指标的提出和设计并非具有坚实的科学基础。

(3) 由于人口、社会经济和生态环境这些承载对象之间的关系目前研究的还没有达到足够的深度和广度，所以在反映它们关系的指标体系中也就很难刻划出承载关系的全貌，因此要注意同步进行承载对象之间的关系研究和指标体系的理论的研究。

(4) 由于理论和技术也是在不断发展的，而且对于水资源承载力各构成因素的认识也需要一个过程，这样不可能一次性地得到一个科学的、完善的、可行的水资源承载力

指标体系，现时阶段只能在完善性和需求性之间做一定的折中或妥协，即我们只能为了实践的需求，尽快建立一个比较可行的指标体系，之后在实践中从理论和实践两个方面不断使指标体系逐步得到完善<sup>[14]</sup>。

#### 5.1.4 指标体系设计方法

水资源承载力指标体系的选取是大系统多目标评价问题中重点和难点问题，不能简单地靠经验性地随意选取，而应当结合理论分析按照一定的逻辑框架和方法进行选择<sup>[10]</sup>。目前指标体系研究的方法很多，已经积累了大量的分析框架和方法，在可持续发展、水资源可持续利用以及环境与可持续发展等领域的评价方面的理论和流程，对于水资源承载力指标体系的建立具有一定的借鉴意义。

可持续发展评价指标体系和水利可持续发展评价指标体系通常采用的逻辑方法是“压力—状态—响应”框架（Pressure—State—Response framework, PSR）、驱动力—状态—响应框架（Driving force—State—Response framework, DSR）。PSR 或 DSR 框架来源于生态系统中的压力—响应模型<sup>[21]</sup>，最初由加拿大政府提出，后经经济合作与发展组织（OECD）和联合国环境署（UNEP）开发而来，在使用过程中，还逐渐产生了其它变化形式。水资源承载力指标体系完全可以建立在 PSR 或 DSR 概念基础上进行选取，人类活动对水资源和生态环境产生压力，导致水资源和生态环境利用、数量和质量发生变化，表现为一定的状态，而社会通过改变开发、利用和配置，加大经济投入和管理力度、通过科技进步等行为方式对由于压力（驱动力）造成的一定的状态进行响应，从而影响和改变人类活动方式，即对压力（驱动力）产生响应。

从以往社会可持续发展和水利可持续发展评价指标体系研究和建立的过程和结果来看，按 PSR 或 DSR 概念建立的评价模式中代表“状态”的水资源状态、社会人口状态、社会经济状态、生态环境状态都容易确定，但模式中代表“压力”和“响应”的人类活动方式、水资源开发、利用和配置，经济投入和管理、科技进步等指标很难加以区分。另外，按 PSR 或 DSR 这种分类方法为划分和筛选指标提供了方便，但它们并不与现实管理和操作中的人口、水资源、社会经济和生态环境等系统构成相一致，而是对构成系统的因素或子系统按 PSR 或 DSR 要求属性的分类，所以不能反映系统在实体上的构成关系。并且，由于这种分类将系统原来的各种结构关系重新排列，反而增加了分析和把握原系统中各种逻辑性和依赖性相互关系的难度。考虑到水资源承载力系统的特殊性，以及各种要素的构成关系明确性，本论文中水资源承载力指标体系不采用 PSR 或 DSR 的框架模式，而是在吸收 PSR 或 DSR 框架的分析方法的基础上，采用“目标—系统—状态—指标”的框架模式。该模式同样将 PSR 中的内容全部反映出来，同时保持了评价系统的“系统性”特征。

#### 5.1.5 指标体系构成

水资源承载力指标体系是一个统一的整体，既有上下的层次关系，又有指标间的平

行关系<sup>[116]</sup>，不同的指标由于所反映水资源承载力的不同侧面，又分属于不同的类别。根据水资源承载力的内涵和特性，以及指标体系的构建原则，参照可持续发展指标体系以及其它体系的构建方法，将水资源承载力指标体系确定为四个层次，分为：目标层、系统层、状态层和指标层。其中，目标层由系统层反映，系统层由状态层反映，状态层由指标层反映，指标层有若干具体指标和数值构成。目标层设立“水资源承载力”，系统层设立“水资源、社会人口、社会经济和生态环境”，状态层和指标层分别设立相应的指标。

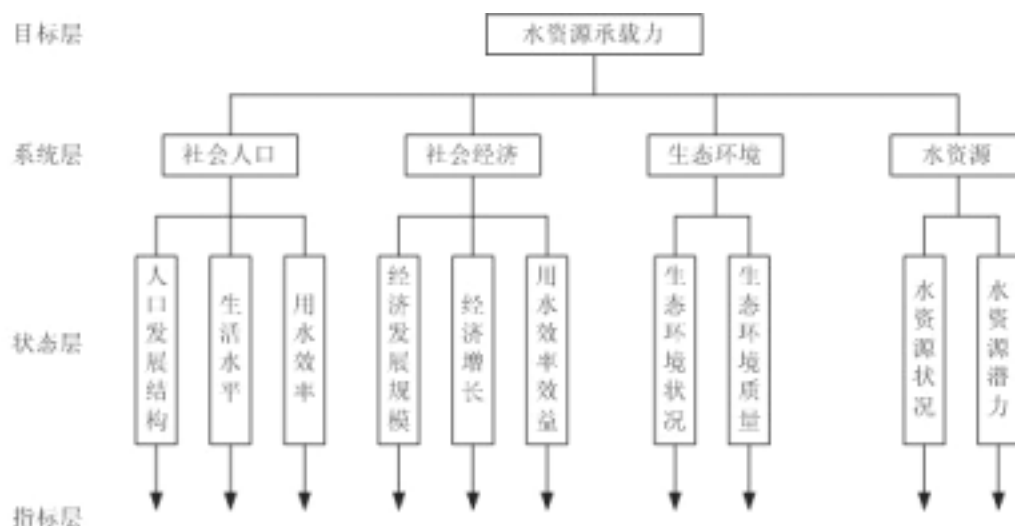


图 5.1 水资源承载力指标体系结构

### （1）目标层

水资源承载力是水资源承载力评价指标体系的最终目标，表示水资源对人口、社会经济和生态环境的最大支撑能力的实现程度或实现概率，也用来衡量水资源承载力系统各构成因素的发展水平和之间的发展协调程度。对它的评价，需要选择描述和衡量该系统质性发展和量性发展的指标，使其在数量上反映系统总体发展规模及现代化水平，在时间和空间尺度上反映其变化趋势及结构特征<sup>[10]</sup>。

### （2）系统层

系统层反映水资源对社会系统、经济系统、生态环境系统等子系统的承载程度，以及水资源系统本身的发展程度。这些子系统本身具有独立发展和运行机制，子系统之间相互依存、相互影响，在以水资源合理配置为主线上，反映整个社会可持续发展的状态。

### （3）状态层

状态层表示系统层的各子系统中与水资源相关的分类指标，反映各子系统内部的发展状态、配置环境以及依赖关系，是相近特性指标的集合或分类。

### （4）指标层

指标层是水资源承载力指标体系最基本的构成因素集合，是一系列反映水资源支撑对象的使用效率、效益和定额的质量和数量的表征。

## 5.2 水资源承载力指标体系设计

确立水资源承载力指标体系，是评价水资源支撑人口、社会经济和生态环境能力的一个核心和关键的环节。指标体系涵盖的是否全面、层次结构是否清晰合理，直接关系到评估质量的好坏<sup>[19]</sup>。由于每一子系统都是由复杂的多变量组成，因此必然构成一个复杂而庞大的指标体系，问题是如何在这些复杂而庞大的参量中，选择少量的指标组成指标体系，并要求这一指标体系能描述系统的规模、发展速度和趋向<sup>[10]</sup>。根据水资源承载力的定义和内涵，以及水资源承载力指标体系的设计原则和设计方法，在充分分析、比较和借鉴的基础上，最后确定等 4 个子系统 10 类 36 个具体指标构成的水资源承载力指标体系。由于水循环一般以年为周期，所以指标体系中涉及到的时间一般都是以年为单位的，如水资源数量、人均水资源量等都是以一年为周期的。

### 5.2.1 社会人口子系统指标

人口作为社会发展中的主体，也是水资源承载的主体，所以人口子系统是水资源承载力分析的重要方面。这里采用 3 个类型 8 个指标。

(1) 人口发展结构指标：人口增长率、城镇化率。

(2) 生活水平指标：人均寿命、城镇居民恩格尔系数、农民恩格尔系数。

(3) 用水效率指标：人均生活用水定额、城镇人均生活用水定额、农村人均生活用水定额。

### 5.2.2 社会经济子系统指标

社会经济子系统采用 3 个类型 13 个指标。

(1) 经济发展规模指标：人均 GDP、第一产业占 GDP 比例、第三产业占 GDP 比例、人均耕地面积、人均灌溉面积。

(2) 经济增长指标：GDP 年增长率、人均 GDP 年增长率、耕地灌溉率。

(3) 经济用水效率和效益指标：万元 GDP 水耗、万元第一产业 GDP 水耗、万元第二产业 GDP 水耗、工业用水重复率、灌溉定额。

### 5.2.3 生态环境子系统指标

生态环境子系统采用 2 个类型 9 个指标。

(1) 生态环境状况指标：生态环境用水率、人均生态环境用水量、单位 GDP 废水排放量、河湖水质达标率。

(2) 生态环境质量指标：植被覆盖率、水土流失治理率、废污水处理率、废污水占水资源比率、废污水资源化率。

### 5.2.4 水资源子系统指标

水资源子系统是水资源承载力的载体，按相对承载力和绝对承载力的概念，它由流域自然水资源系统和包括调水、虚拟水、海水淡化在内的其它水资源系统构成。水资源

子系统采用 2 个类型 6 个指标。

(1) 水资源状况指标：人均水资源量、亩均耕地水资源量、水资源供需比例。

(2) 水资源潜力指标：水资源开发利用程度、需水量年增长率、海水淡化占水资源比率。

表 5-1 水资源承载力评价指标体系

社会人口 B1	人口发展结构 C1	人口增长率 D1、城镇化率 D2
	生活水平 C2	人均寿命 D3、城镇居民恩格尔系数 D4、农民恩格尔系数 D5
	用水效率 C3	人均生活用水定额 D6、城镇人均生活用水定额 D7、农村人均生活用水定额 D8
社会经济 B2	经济发展规模 C4	人均 GDP D9、第一产业占 GDP 比例 D10、第三产业占 GDP 比例 D11、人均耕地面积 D12、人均灌溉面积 D13
	经济增长 C5	GDP 年增长率 D14、人均 GDP 年增长率 D15、耕地灌溉率 D16
	用水效率和效益 C6	万元 GDP 水耗 D17、万元第一产业 GDP 水耗 D18、万元第二产业 GDP 水耗 D19、工业用水重复率 D20、灌溉定额 D21
生态环境 B3	生态环境状况 C7	生态环境用水率 D22、人均生态环境用水量 D23、单位 GDP 废水排放量 D24、河湖水质达标率 D25
	生态环境质量 C8	植被覆盖率 D26、水土流失治理率 D27、废污水处理率 D28、废污水占水资源比率 D29、废污水资源化率 D30
水资源 B4	水资源状况 C9	人均水资源量 D31、亩均耕地水资源量 D32、水资源供需比例 D33
	水资源潜力 C10	水资源开发利用程度 D34、需水量年增长率 D35、海水淡化占水资源比率 D36

## 5.3 水资源承载力指标体系评价和测度

### 5.3.1 水资源承载力指标体系评价方法选择

根据水资源承载力评价的特点，同时考虑到指标体系中数据的可获得性以及实用性，本论文选用层次分析法进行水资源承载力评价。

层次分析法目前是探讨用于评价可持续发展程度及协调程度的主要方法，广泛用于具有递阶多层次结构特征的复杂大系统问题。目前类似的研究方法还有主成分分析法、因素分析法、模糊分析法等方法，由于这些方法已经比较成熟，本文不再论述，而将重点放在完善层次分析法评价方法的基础上，探讨确定水资源承载力的度量和评价相结合的综合研究方法上。

### 5.3.2 水资源承载力层次分析法评价

#### 5.3.2.1 层次分析法（AHP）原理

层次分析法 (The Analytic Hierarchy Process, 简称 AHP) 是运筹学家、匹兹堡大学教授萨迪(T. L. Saaty)于 20 世纪 70 年代中期提出的一种系统分析方法。它是一种能将定性分析和定量分析相结合,将人的主观判断用数量形式表达和处理的系统分析方法。它从决策分析发展而来,是分析多目标、多准则的复杂大系统的有力工具<sup>[14]</sup>。层次分析法的整个过程体现了人的决策思维的基本特征,即分解、判断与综合,易学易用,便于决策者之间彼此沟通,是一种十分有效的系统分析方法,广泛地应用在经济管理规划、能源开发利用与资源分析、城市产业规划、人才预测、交通运输、水资源分析利用等方面。

层次分析法 (AHP) 是将决策总是有关的元素分解成目标、准则、方案等层次,依据序标度,将系统因素按支配关系分组以形成有序的递阶层次结构,通过两两比较判断的方式确定每一层次中因素的相对重要性,然后在递阶层次结构内进行合成以得到决策因素相对于目标的重要性的总顺序。这种方法的特点是在对复杂的决策问题的本质、影响因素及其内在关系等进行深入分析的基础上,利用较少的定量信息使决策的思维过程数学化,从而为多目标、多准则或无结构特性的复杂决策问题提供简便的决策方法,尤其适合于对决策结果难于直接准确计量的场合。

层次分析法的步骤如下:

(1) 通过对系统的深刻认识,确定该系统的总目标,弄清规划决策所涉及的范围、所要采取的措施方案和政策、实现目标的准则、策略和各种约束条件等,广泛地收集信息。

(2) 建立一个多层次的递阶层次结构模型,按目标的不同、实现功能的差异,将包含的因素分组,每组作为一个层次,分为几个等级层次。从上至下依次分为目标层(最高层),准则层(中间层)和指标层(底层),上一层次对相邻的下一层次的逐层支配关系。

(3) 通过构造两两比较判断矩阵及矩阵运算的数学方法,确定以上递阶结构中相邻层次元素间相关程度。判断矩阵由层次结构模型中每层中的各因素的相对重要性的判断数值列表而成,判断矩阵表示同一层与上一层某因素有关各因素之间相对重要的比较。

$$P = (b_{ij})_{n \times n} \quad (5-1)$$

式中: P——判断矩阵;

n——两两比较的因素数目;

$b_{ij}$ ——是判断矩阵 P 的元素,表示 i 因素与 j 因素相对某一准则 C 相对重要性的标度,一般采用 T.L.Saaty 提出的 1-9 标度法表示。

表 5-2 1-9 标度法

标度 $b_{ij}$	定义
1	i 因素与 j 因素同等重要
3	i 因素比 j 因素略重要
5	i 因素比 j 因素重要
7	i 因素比 j 因素重要得多
9	i 因素比 j 因素绝对重要
2, 4, 6, 8, 倒数	介于以上两种判断之间的状态的标度 若 i 因素与 j 因素比较, 结果为 $b_{ij} = 1 / b_{ji}$

(4) 根据判断矩阵  $P$ , 求出这  $n$  个元素对某一准则  $C$  的相对权重  $W_1, W_2, \dots, W_n$ 。相对权重向量形式为:

$$W = (W_1, W_2, \dots, W_n)^T \quad (5-2)$$

计算判断矩阵的最大特征值及对应的特征向量。经正规化后的特征向量即为相对权重向量, 并进行一致性检验。

(5) 计算合成权重的过程称为层次总排序, 最低层中的各方案相对于总准则的合成权重的计算要由上至下进行, 将单准则权重进行合成, 最终进行到最低层得到合成权重。同时对各因素对系统目标实现的作用进行总排序。

### 5.3.2.2 水资源承载力指标体系层次分析法评价

水资源承载力指标体系是针对流域的水资源和人口、水资源、社会经济和生态环境等状况承载能力的一般特征的描述, 但对于具体选定流域来说, 指标体系可以根据流域的自身特点进行必要的修改和变更, 适当增减指标的数量和内容。

对水资源承载力指标体系的层次分析法评价是判断水资源对人口、社会经济和生态环境子系统以及各子系统内部构成因素对承载目标的实现程度或实现概率, 是和水资源承载力基础量化指标配合使用进行水资源承载力综合评价的。

评价标准的确定。评价标准即达到目标水资源承载力时所对应的人口、水资源、生态环境和社会经济的目标。这是一个流域或地区的社会发展过程中, 社会发展水平逐渐逼近到某一阶段目标时, 按当时的参数和条件进行的承载力评价。例如, 2030 年海河流域将实现现代化建设目标, 按预测的当时的水资源开发量、经济部门用水、生活用水、环境用水、污染物排放量等指标参数可作为进行水资源承载力指标体系的评价标准。

在所有评价指标中, 可将其分为三类来区别对待, 即正向指标, 指标值越大越好, 如人均 GDP 等; 逆向指标, 指标值越小越好, 如废水排放率等; 和适度指标, 指标值既不应过大, 也不应过小, 而是应该达到适度。单项指数是建立评价指标体系的基础, 即用各有关指标的实际值  $X_i$  与其相应的评价标准值  $X_0$  进行比较, 求得该单项指数。计算公式如下:

$$I_i = X_i / X_0 \quad (\text{正指标}), \quad I_i = X_0 / X_i \quad (\text{逆指标})$$

式中,  $I_i$ ——某一单项指标的评价指数值;

$X_i$ ——某一单项指标的现状实际值；

$X_0$ ——某一单项指标的评价标准或规划目标值。

而对于适度指标，则可看成是正逆指标的组合：当现状值大于标准值时， $I_i=X_0/X_i$ ；当现状值小于标准值时， $I_i=X_i/X_0$ 。

### 5.3.2.3 水资源承载力指标体系赋权系数的确定

权重系数的确定是指标体系评价的重要参数，是各指标相对目标重要性的一种度量，不同的权重系数往往会导致不同的评价与规划预测结果。它的确定方法可分为主观权方法和客观权方法，通过专家调查确定的方法称为主观权方法，无须专家参与的称为客观权方法。水资源承载力指标体系赋权系数的确定可采用专家咨询与系统分析中的层次分析法相结合的方法，指标值的无量纲化处理采用相对化处理，而综合值的求法则采用加权线性和法。

### 5.3.3 水资源承载力指标体系评价步骤

作为水资源承载力综合分析的第二部分内容的分类指标体系评价，目的是在量化计算的基础上，对量化的不足进行补充，反映水资源承载的公平和协调性，它的评价步骤开始部分与量化计算相同，后面部分按层次分析法内容进行。

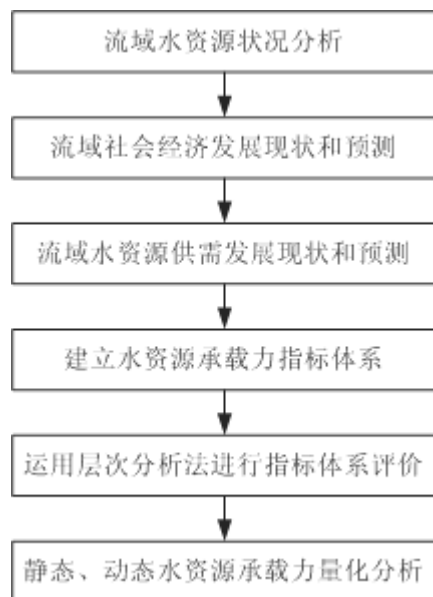


图 5.2 水资源承载力指标体系评价步骤

## 5.4 小结

本章阐述了水资源承载力指标体系的概念和作用，通过对构建方法和原则进行分析，在对可持续发展评价中广泛采用的指标体系建立方法“压力（驱动力）—状态—响应”框架的比较后，对水资源承载力构成指标进行了筛选，按水资源承载力构成因素子系统的分类方法建立了水资源承载力指标体系。指标体系的建立过程中，强调简化和可比性的原则，避免建成庞大复杂的指标体系。在建立指标体系的基础上，比较选取了评价度量方法，水资源承载力指标体系以层次分析为主，在协调承载对象用水分配方面，尝试了博弈分析方法。



## 第六章 提高水资源承载力的途径与方法

跨越式发展战略是后发国家最有效的发展模式，但跨越式发展模式必须警惕不能超出发展阶段去凭空地跳跃。前者说明了发展的非等距性，后者说明了发展的继承性和发展过程的规律性。我们可以去避免发达国家走过的弯路，吸取他们的教训，尽量采用现行的高新技术去提高我们的发展水平和促进产业升级，从而加快我们的发展速度（所谓的跨越式发展和后发优势），但是逾越发展阶段的想法和作法，将一定会给发展带来灾难性的后果<sup>[26]</sup>。目前中国是一个发展中国家，正在以较高的经济发展速度向发达国家迈进，因此，中国的发展可以借鉴发达国家的发展模式，学其经验的同时，也学其经历的教训，采取防治措施，少走弯路，同时在经济系统不能达到目的的情况下，用政策弥补经济实力的不足，依靠技术的创新，实现跨越式发展。总之，只有多管齐下，才有可能在较低的经济水平下，超越传统的发展理念。水资源是国民经济发展的基础资源，目前已成为制约国民经济发展的瓶颈，为保证水资源可持续利用，促进社会可持续发展，水资源的开发利用和合理配置也应该遵循后发国家的跨越式水利发展模式，在水利行业借鉴发达国家的发展过程，学其经验和教训，少走弯路，以达到水利的发展与整个国民经济发展相适应、相协调的可持续发展目的。

开源与节流是解决任何资源短缺的主要途径，因此提高水资源承载力就应该从开源与节流着手，分析水资源短缺的原因、研究水资源的合理配置、加强水资源开发与利用的管理。开源，即从水资源的产生、构成和供给方面，在绝对数量上增加水资源的使用量，提高水资源的绝对承载力，包括采取水利工程和水土保持手段增加降水的有效利用、提高水资源开发利用程度、进行流域和地区间的调水措施、海水淡化等方法。节流，即从水资源的需求和使用方面，在相对数量上提高水资源的使用量和使用效率，提高水资源的相对承载力，包括调整经济部门用水结构、提高用水效率和效益、建立水市场和水价体系全方位实施节水措施等方法。

开源与节流的实现是通过技术、经济、管理、政策和市场等多方面的措施来完成的。这些提高水资源承载力的手段按水资源承载力内涵和构成可以归类为资源性、结构性和经济性手段，即提高水资源承载力是通过水资源的特性和水资源承载力研究的特点来体现的。

### 6.1 资源性提高水资源承载力

资源性提高水资源承载力是指水资源开源的范畴，即针对资源性缺水和工程性缺水，通过水利工程建设和管理、水土保持工程来调控水资源的时空分布不均匀性、加大雨水利用，增加水资源的有效利用率。

#### 6.1.1 水利工程措施

足够的水利工程设施是调整水资源时空分布不均的一种有效方法。建国以来，水利以兴利除害发挥着其防洪、灌溉、发电、供水、航运和养殖等重要的作用，但是由于我国人口众多、国民经济近 30 年一直处于高速增长时期，供水类水利工程建设还远达不到满足人民生活和社会经济以及生态环境用水的要求，尤其是大部分北方地区缺水十分严重，并且水利工程建设具有一次性投资大、建设周期长、技术复杂以及与生态环境的变化密切等特点。因此，水利工程建设应该在合理安排人口、水资源、社会经济和生态环境协调发展的前提下，统筹安排，适当加大供水工程的资金投入，加快供水能力建设，提高水资源的开发利用率，从而提高流域和地区的水资源承载力。

### 6.1.2 跨流域调水工程

调整水资源时空不均的另一重要途径是跨流域调水工程。跨流域调水工程实际上是水利工程措施的一种，但从水资源开发利用和水资源承载力研究模式来看，这里认为水利工程措施一般指提高流域内自然水资源数量的措施，而跨流域调水工程是指增加流域供水数量的非本流域自然水资源因素，这种增加水资源供给能力的方法是和海水淡化相同的提高水资源承载力措施之一。

实施跨流域调水工程的前提条件是当地的水资源开发利用率已经很高，本地水资源开发潜力和节水潜力已经很低，并且缺水已经严重影响当地的人口、社会经济和生态环境的可持续发展，而且有逐渐加重的趋势。在资金和技术条件具备的条件下，保护好现有的水资源，用好自己的水资源，才能采取跨流域调水工程。

南水北调工程是从根本上解决华北地区尤其京津地区严重缺水、以水利可持续利用实现社会可持续发展的重大举措。南水北调中线和东线工程已经动工，2010 年前后广大华北地区将陆续供给长江水，华北地区的水资源状况将发生根本的转变。

### 6.1.3 海水淡化

临近海洋的缺水地区，海水淡化技术是一种淡水的增量技术，为区域发展提供了供水的又一途径。目前海水淡化已经用于电厂冷却、纯净水的制作，该工业已成为阳光产业。大力发展海水淡化和海水直接利用，可为内陆地区节省更多可资利用的淡水资源，实际上等于增加了我国水资源总量，这对于长远解决我国水资源短缺问题具有战略意义。但是制约海水淡化的因素是制作成本，就目前的技术水平，海水淡化的吨水成本约为 4 至 7 元，大大高于一般城市的自来水售价，技术关键在于降低海水淡化水的生产成本，以扩大有承受能力的海水淡化潜在用户的范围。

### 6.1.4 虚拟水资源

调入调出富水和低水含量的产品，间接降低和调整水的分布、间接造成当地水资源数量的变化，这部分变动的水称作虚拟水资源。象调水工程一样，虚拟水的产生为水资源的调整、增加当地的水资源提供了可能。为间接提高水资源承载力，在本流域可以生

产低耗水的粮食或工业产品，在其它水资源丰富的流域和地区，可以生产高耗水产品，然后进行高耗水产品和低耗水产品的交换。调出和调入虚拟水资源能间接改变水资源的供给数量，达到了直接提高水资源承载力的目的。

### 6.1.5 污水资源化

生活和工业等使用过的废水和污水未经处理直接排放，对生态环境造成污染，并且也浪费了资源。将废水和污水经过处理后，作为一些对水质要求不高的部门中水回用，如冲洗业、城镇花草浇灌用水、污水灌溉等，实现污水资源化，不但大量节省供水量，节约水资源，而且可以解决水污染问题，一举多得。由于相对地提高了水资源数量、节约了生态环境用水，从而提高了水资源承载力。目前我国污水处理率还很低，1997 年我国城市污水集中处理率仅为 13.65%<sup>[6]</sup>，远远达不到发达国家的 80~90%的城市污水处理率和污水资源化水平，污水资源化的发展空间还很大，污水资源化处理在相当大的程度上将缓解我国农业与生态供水不足的压力。

## 6.2 结构性提高水资源承载力

结构性提高水资源承载力是指从调整产业结构、控制人口增长、合理保护生态环境等需水方面节省水资源供给量，发挥有限水资源的使用效率和效益，从而达到提高水资源承载力的目的。

### 6.2.1 控制人口增长

人口是水资源最主要的承载对象，人口数量与水资源承载力成反比关系。而且按照社会经济发展目标，人均水平是反映发展水平的重要指标，人数的增加同时带动了经济总量和其它资源使用总量的增加，因而造成水资源供给总量的增加，降低了有限水资源的承载力。所以控制人口不但能提高有限水资源的承载力，也是实现资源可持续利用的重要决策。

### 6.2.2 调整产业结构

由于产业结构的配置直接影响到用水的数量，所以在保证国民经济发展目标实现的前提下，调整产业结构，根据流域的水资源状况，限制高耗水产业的发展，大力发展低耗水产业，从而提高水资源的利用率和水资源承载力。目前我国产业结构发展还很不合理，90 年代中期我国产业结构比例为 19%:47%:34%，与发达国家的 2%:34.1%:63.9%相比，存在相当大的差距。显然，第一产业的用水定额最高，第二、三产业的用水定额较低，加上产业结构比例的关系，第一产业占整个国内生产总值的比例最低，因此调整产业结构、优先低耗水行业的发展，对提高水资源承载力影响很大。当然产业结构的变动是社会经济综合协调发展的结果，不仅仅是水资源影响的结果。

### 6.2.3 重视生态环境保护

随着我国现代化进程一步步实现，人们的生活水平大大提高，对生态环境的要求也越来越高，这样生态环境的需水量也越来越大，这对水资源的需求造成很大的压力。但是如果忽视生态环境，没有足够的资金和技术投入到生态环境建设和保护中，生态环境一旦遭到破坏，必将危及人类自身生存的安全，会需要较长的时间、花费更大的代价和水资源量才能得到恢复。因此要重视生态环境建设，保护好生态环境、涵养水源、从总体上降低成本，从长远意义上提高水资源承载力。

## 6.3 经济和技术性提高水资源承载力

### 6.3.1 节水

节水是提高水资源承载力的重要环节，是我国水资源管理的首要任务，应当将节水当作一项长期的战略任务来抓。目前，我国水资源的利用效率和效益以及节水技术水平都很低，明显低于发达国家的用水效率和效益水平，水资源承载主要对象的人口生活用水、农业灌溉用水、工业生产用水都存在着很大的节水空间。

城镇生活用水 1997 年国内为人均每天 189 升，低于发达国家的 250 升，农村生活用水定额管理更低为人均每天 88 升，表面上看用水量较低，实际上是生活水平和生活质量低造成的低水平用水。城镇的供水、用水设施和节水技术都很低，现使用的卫生、生活用水器具耗水量大、供水管道漏水严重，因此，在提高生活用水质量的同时，节水提高用水效率是长期的任务，在我国城镇化发展要求逐步加大的情况下，城镇生活用水的增长将成为未来城镇供需的主要矛盾<sup>[5]</sup>。

农业是国民经济的基础，但农业是用水大户，用水的绝对数量和占水资源可供水的相对数量都很大，目前全国农业用水占供水量的 70% 左右，华北地区甚至占 80% 以上。农业的灌溉方式技术水平很低，很多耕地采用大水漫灌的方式，喷灌、滴灌等先进的灌溉方式采用的较少，渠道的跑、漏现象严重。目前全国平均农业的灌溉水利用系数为 0.35，远低于先进国家的 0.7~0.8 的水平，全国平均单方水粮食生产产出为 1.0kg<sup>[5]</sup>，不足发达国家的一半左右。可见，农业是节水的大户，在资金允许和技术可行的条件下，采用先进的喷灌、滴灌、地下暗管输水、软管输水、覆盖技术、渠道有效防渗等技术，节水估计在一半以上，农业节水潜力很大。

工业化国家是我国目前积极实现的近期目标，工业化的迅速发展，造成工业用水的日益剧增。当前我国工业用水效率和效益还很低，万元工业产值用水量全国平均在 80~100m<sup>3</sup>，远低于发达国家的 10m<sup>3</sup> 左右，工业用水重复利用率 63%，还远达不到发达国家的 90% 以上的标准，因此工业节水的空间也很大。

另外，节水的另一目的是减少了污水的排放。节水不但能减少水量的使用消耗，同时节水也能从总量上减少污水排放量，从而减少了对环境污染。生活污水，尤其是工业污水排放的处理和控制都会大大节省水资源的浪费。

目前在我国建成节水型社会的困难还很多，主要是水市场尚未完全形成、人们的节

水意识还不高，很大程度上人们认为水是取之不尽用之不竭的，珍惜意识不强；其次是技术水平不够，节水设施象与先进国家的技术差距一样，还有很大的发展空间；再有资金的不足也是制约节水技术发展和实施较慢的原因。

### 6.3.2 水资源市场

社会主义市场经济的建立为水资源市场的建立提供了背景。我国经济体制正从计划经济向市场经济转变，水资源如何在市场经济模式中得到最优配置并产生巨大的综合效益是一个至关重要的问题。现代产权经济学认为，产权制度对资源配置具有根本的影响，它是影响资源配置的决定性因素，水资源产权制度完善与改革对水资源开发利用和保护管理具有不可替代的作用，市场经济需要完善水资源产权，水资源产权交易又离不开水资源市场<sup>[136]</sup>。

建立水资源市场是可持续发展的需要。不合理的资源定价方法导致了资源市场价格严重扭曲，表现为自然资源无价、资源产品低价以及资源需求的过度膨胀，在自然资源使用分配中引入市场机制，实行“使用者付费”经济原则，以促进采取有益于环境方式开发自然资源，利用经济手段和市场刺激，研究、鼓励和采用自然资源定价和资源开发技术。

受计划经济和传统观念的影响，目前我国水资源在一些农村地区没有定价，即使城镇有价格的价格也太低，水资源市场难以达到调节作用。低廉的水价，难以有效地约束用水单位和个人形成高效的节约机制，造成水资源浪费惊人，水资源供需的矛盾加剧必然要求建立水资源市场。

因此，水资源市场的建立，将促使水资源价值观念的形成和水价理论的形成，人类象珍惜其它商品一样珍惜水资源，更有效地利用水资源、节约水资源，水资源承载能力得到提高。

### 6.3.3 水资源统一管理

在建立有效水资源市场的前提下，实行水资源的统一调度和管理是提高水资源的开发、利用、治理、配置、节约和保护的有效途径。改变以往的条块分割、多龙治水的水资源管理体制，协调涉水部门的供水、用水管理，才能有效发挥有限水资源的合理配置、提高水资源的供需效率，实现提高水资源承载力的目标。

目前，我国水资源面临的形势非常严峻，如果在水资源开发利用上没有大的突破，在管理上不能适应这种严峻的现实，水资源很难支持国民经济迅速发展的需求，水资源危机将成为所有资源问题中最为严重的问题，它将威胁着近期实现我国小康社会和在本世纪中期达到中等发达国家水平的战略目标的实现，也将影响着我国实现社会的可持续发展与人与自然的和谐发展。

### 6.3.4 加强水资源开发利用管理的法规和宣传工作

建立水资源市场、控制人口增长、调整产业结构、水资源统一管理等等提高水资源承载力的途径和方法都必须通过建立健全法规和政策、并通过大力的宣传教育工作才能实现。我国已经颁布了一系列水资源开发利用和保护管理的规章制度、技术标准、行政法规，但是随着社会的发展、技术的进步、市场经济的建立以及水资源的日益短缺，规章制度都要相应地进行改进、拓宽和更新，要与社会的发展相适应。

人们对规章制度的执行情况如何直接关系到水资源的开发利用和管理的效果，也就是说，不但要建立健全法规和制度，而且还要有保证这些法规和制度有效执行的策略，因此做好宣传教育工作，让人们充分认识到水资源的重要性和有限性，增强生态意识、环境意识、可持续发展意识，自觉爱护环境、保护水资源，以利提高水资源承载力，以水利可持续利用促进社会可持续发展。

## 6.4 小结

本章根据水资源承载力内涵和构成等研究成果，有针对性地从资源性、结构性、经济性、技术性、管理性等方面入手，分析了提高资源承载力的方法和策略。提高水资源承载能力的途径包括提高水资源可持续利用的途径和水资源承载力本身构成的途径两方面的内容，主要涉及到水资源开源与节流，即从提高水资源的供给数量和提高水资源用水效率和效益两方面采取措施。

## 第七章 海河流域水资源承载力评价实例研究

### 7.1 海河流域基本情况和特点

#### 7.1.1 海河流域自然地理、水文气象概况

海河流域位于东经  $112^{\circ} \sim 120^{\circ}$ 、北纬  $35^{\circ} \sim 43^{\circ}$  之间，西以山西高原与黄河流域交界，北以蒙古高原与内陆河流域交界，南界黄河，东临渤海。流域地跨八省市，行政区划包括北京、天津两市，河北省绝大部分，山西省东部，山东、河南省北部，辽宁省及内蒙古自治区的一部分。流域总面积  $31.78 \text{ 万 km}^2$ ，占全国总面积的  $3.3\%$ <sup>[142]</sup>。

全流域总的地势是西北高东南低，大致分高原、山地及平原三种地貌类型。西部为山西高原和太行山区，北部为蒙古高原和燕山山区，面积  $18.94 \text{ 万 km}^2$ ，占  $60\%$ ；东部和东南部为广阔平原，面积  $12.84 \text{ 万 km}^2$ ，占  $40\%$ 。

流域内，北有燕山，西北有军都山，西有五台山、太行山，海拔高度一般在  $1000 \text{ 米}$  上下，最高的五台山达  $3058 \text{ 米}$ 。由于黄河历次改道和海河各支流冲积的影响，平原内微地形相当复杂。一般曾经是黄河和本流域泥沙含量较大的河道流过的地带，地势较高；在这些河道之间的清水河道流过的地带，地势较低，形成了相间的条形洼地，而这些条形洼地又被其它支流冲积所截割，形成若干大小不等的碟形洼地。这种高地与洼地相连的复杂地形，再加上南运河贯穿南北，使南系各河集中于天津入海，给防洪除涝等方面造成了不利条件。

海河流域包括海河、滦河和徒骇马颊河 3 大水系、7 大河系、10 条骨干河流。其中，海河水系是主要水系，由北部的蓟运河、潮白河、北运河、永定河和南部的大清河、子牙河、漳卫河组成。滦河水系包括滦河及冀东沿海诸河。徒骇马颊河水系位于流域最南部，为单独入海的平原河道。

各河系分为两种类型：一种是发源于太行山、燕山背风坡，源远流长，山区汇水面积大，水流集中，泥沙相对较多的河流。另一种是发源于太行山、燕山迎风坡，支流分散，源短流急，洪峰高、历时短、突发性强的河流。历史上洪水多是经过洼淀滞蓄后下泄。两种类型河流呈相间分布，清浊分明。

海河流域属温带半湿润、半干旱大陆性季风气候区，是我国东部沿海降水最少的地区。冬季受西伯利亚大陆性气团控制，盛行北风和西北风，寒冷少雪。春季受蒙古大陆性气团影响，气温回升快，风速大，气候干燥，蒸发量大，往往形成干旱天气。夏季受海洋性气团影响，比较湿润，气温高，降雨量多，且多暴雨，但因历年夏季太平洋副热带高压的进退时间、强度、影响范围等很不一致，致使降雨量的变差很大，旱涝时有发生。秋季为夏冬的过渡季节，一般年份秋高气爽，降雨量较少。一年四季分明，寒暖适中，日照充足，适宜许多植物生长。

表 7-1 海河流域主要河流河长、流域面积表

河 系	河 名	河长 ( km )	流域面积 ( km <sup>2</sup> )	备 注
滦河水系	滦 河	888	44750	石河、洋河、沙河、陡河等
	冀东沿海诸河	——	9650	
	小 计	——	54400	
北三河水系	潮白河	467	19354	至宁车沽防潮闸
	北运河	238	6166	
	蓟运河	316	10288	
	小 计	——	35808	
永定水系	洋 河	278	16933	河长统计自官厅坝下至海口
	桑干河	437	26547	
	永定河	306	47016	
大清河系	北 支	303	10151	至新盖房闸
	南 支	336	24054	至枣林庄闸
	大清河	141	43060	赵王新河、分洪道、独流减河
子牙水系	滹沱河	605	25168	至献县闸
	滹阳河	413	14877	至献县闸
	子牙新河	144	46868	至海口
黑龙港运东水系	黑龙港地区	——	15058	
	运东地区	——	7153	
	小 计	——	22211	
漳卫水系	漳 河	466	18133	四女寺至十一堡
	卫 河	388	15142	
	南运河	309		
	漳卫新河、卫运河	279	37584	
海河干流		73	2066	
徒骇、马颊水系	马颊河	428	8312	
	德惠河	173	3249	
	徒骇河	417	13821	
	全水系	——	28740	
海河流域	总 计		317753	

### 7.1.2 海河流域社会经济状况

海河流域人口密集，大中城市众多，在我国政治经济中的地位重要。流域内有首都北京、直辖市天津，以及石家庄、唐山等 25 座大中城市，共有 31 个地级市，2 个盟，256 个县区，其中含 35 个县级市。1997 年流域总人口 1.227 亿，占全国的 10%，其中城镇人口近 3730 万，城镇化率 30.4%。流域平均人口密度 386 人/km<sup>2</sup>，其中平原地区 608 人/km<sup>2</sup>。

表 7-2 海河流域社会经济情况表

年份	面积 ( 万 km <sup>2</sup> )	人口 ( 万人 )	耕地 ( 万 hm <sup>2</sup> )	GDP ( 亿元 )	人口密度 ( 人 / km <sup>2</sup> )	人均 GDP ( 元 / 人 )
1997 年	31.78	12300	1120	8907	386	7258.00
2000 年	31.78	12850	1116	11417	404	8885.00

资料来源于：[5]、[142]

海河流域是我国重要的工业基地和高新技术产业基地，在国家经济发展中占有重要地位。工业门类众多，技术水平高。1998 年高新技术产业产值约占流域工业产值的 10%，



1998 年流域国内生产总值 (GDP) 9674 亿元, 占全国的 12%, 人均 GDP7922 元, 高出全国平均水平 (6270 元) 的四分之一。工业总产值 1.37 万亿元。海河流域具有发展经济的技术、人才、资源、地理优势。

80 年代以来, 海河流域社会经济持续发展。1980 ~ 1998 年, 流域总人口增长 24%, 城镇化率增加 9 个百分点。GDP 从 1980 年 984 亿元增加到 1998 年的 7501 亿元 (按 1990 年不变价计), 翻了近三番, 其中北京市增长 14 倍, 天津市增长 13 倍, 河北省增长 19 倍。工业总产值从 1980 年的 1107 亿元增加到 1998 年 1.29 万亿元, 翻了三番半, 其中北京市增长 6 倍, 天津市增长 9 倍, 河北省增长 20 倍。在有效灌溉面积基本稳定的基础上, 粮食总产量翻了近一番, 从 1980 年的 2769 万吨增加到 1998 年的 5390 万吨, 其中河北省粮食产量增长近一倍。流域人均粮食占有量从 283kg 增加到 442kg, 增长 56%。

### 7.1.3 海河流域水资源特点

1956 ~ 1998 年海河流域多年平均总水资源量为 372 亿  $\text{m}^3$ 。其中地表水水资源量 220 亿  $\text{m}^3$ , 地下水水资源量 249 亿  $\text{m}^3$ , 地表水和地下水的重复量 97 亿  $\text{m}^3$ 。

表 7-3 海河流域多年降水量和水资源量 (1956-1998)

分区	面积 ( $\text{km}^2$ )	降水		径流总量 (亿 $\text{m}^3$ )	折合径流深 (mm)	地下水资源量 (亿 $\text{m}^3$ )	水资源量 (亿 $\text{m}^3$ )
		降水深 (mm)	降水量 (亿 $\text{m}^3$ )				
全国	9545000	648	61889	27115	284	8288	28124
海河流域	317800	539	1710	220	69	249	372
占全国比例	3.3%	83.2%	27.6%	0.8%	24.3%	3.0%	1.4%

资料来源于: [5]、[142]

海河流域水资源的主要特点是水资源总量少、降水时空分布不均、经常出现连续枯水年和水资源量逐渐衰减。

#### (1) 降水时空分布不均

海河流域多年平均降水量 539mm, 其中山区 527mm, 平原 556mm。汛期 (6 ~ 9 月) 降雨占年降雨总量的 70 ~ 85%, 主要集中在 7 ~ 8 月份的 1 ~ 2 个降雨过程, 容易形成洪涝灾害。春季 (3 ~ 5 月) 降雨量只占年降雨量的约 10%, 因此流域内春旱频繁发生。

流域年降水量变差较大。流域南部与北部, 山区与平原之间, 年降水时空分布有一定差异。各河山区与平原同时发生枯水的概率在 50 ~ 80% 之间。从水资源利用角度讲, 各河系之间水量相互调配的空间比较窄小。

#### (2) 经常出现连续枯水年

1949 年以来的 50 年中, 出现了 1951 ~ 1952 年、1980 ~ 1981 年和 1992 ~ 1993 年, 以及 1997 ~ 2000 年四个连续枯水年段。天津 60 年代后已出现 5 次连续枯水年, 河北省东部地区也发生过连续 9 年的枯水期。潘家口水库 2000 年入库水量创有水文记录以来最低点, 天津市出现了自 1983 年引滦入津工程通水以来最严重的水资源危机。

### (3) 水资源总量少

总体上属于资源型缺水地区。1956~1998 年水文系列总水资源量 372 亿  $\text{m}^3$ 。人均总水资源占有量 305  $\text{m}^3$ ，仅为全国平均的 1/7，世界平均的 1/27，远低于人均 1000 $\text{m}^3$  的国际水资源紧缺标准；亩均水资源量 225 $\text{m}^3$ ，为全国的 1/8。在全国各大流域中，海河流域的人均、亩均水资源量最低。

### (4) 水资源量逐渐衰减

80 年代以后，由于人为影响加剧，引起海河流域水文下垫面的重大变化，通过工程措施可以开发利用的水资源量明显减少。因降雨产流关系改变，与 50 年代相同的降雨，所产生的地表径流量明显减少。与原系列相比，新系列多年平均降水量减少 1.6%，地表水资源量减少 17%，地下水资源量减少 9.5%，总水资源量减少 11%。

## 7.2 海河流域水资源开发利用现状

### 7.2.1 海河流域水利设施状况

目前海河流域内共建成大、中、小型水库 1900 余座，总库容 294 亿  $\text{m}^3$ 。流域内堤防总长达到 20000km，相当于全国堤防总长的 1/10。开挖、疏浚骨干行洪河道 50 余条，设计入海能力 24680 $\text{m}^3/\text{s}$ ，为新中国成立初的 10 倍。在流域中下游地区规划保留了蓄滞洪区 26 处，设计蓄滞洪能力 170 亿  $\text{m}^3$ 。

为水资源有效开发和利用，流域内先后建成了京密引水、引滦入京、引滦入唐、引青济秦、引黄入卫济冀等一批跨流域的调水工程，大大缓解了城市用水的紧张局面。1997 年流域灌溉面积发展到了近 720 万公顷，占现有总耕地面积的 63%。海河流域水资源开发利用程度居全国前列，大批供水工程特别是城市供水工程的建设，不仅为工业注入了活力，而且为保障人民生活质量的提高起到了重要作用。

### 7.2.2 海河流域水资源开发利用现状

海河流域供用水特点是：供水工程众多，水源复杂，以地下水为主，占 61%。用水效率较高，工业万元产值综合取水量 51 $\text{m}^3$ ，农业灌溉综合定额 311 $\text{m}^3/\text{亩}$ 。

海河流域水资源供求状况的变化明显，缺水和水污染突出，现状多年平均缺水量 75 亿  $\text{m}^3$ ，其中城市缺水 23 亿  $\text{m}^3$ 。如果可供水量扣除污水量，缺水量则接近 100 亿  $\text{m}^3$ 。

流域现状实际用水量达到 432 亿  $\text{m}^3$ ，而流域当地水资源总量只有 372 亿  $\text{m}^3$ ，水资源总开发利用率 81%。经济社会发展对水资源的需求超过了流域水资源的承载能力，加上水资源管理工作与形势不相适应，产生了一系列问题。具体表现在地下水严重超采、水污染严重、生态环境恶化、行业与地区之间争水矛盾突出、水资源管理薄弱和物价不合理等六个方面，还在一定范围内存在水资源浪费现象。

表 7-4 海河流域 2003 年各分区水资源总量

分 区	计算面积 ( $\text{km}^2$ )	年降水量 ( $\text{亿 m}^3$ )	地表水资源量 ( $\text{亿 m}^3$ )	地下水资源量 ( $\text{亿 m}^3$ )	重复计算量 ( $\text{亿 m}^3$ )	水资源总量 ( $\text{亿 m}^3$ )
海河流域	320041	1862.90	130.80	252.91	63.53	320.18
北京市	16800	76.10	6.06			18.40
天津市	11920	69.85	6.15			10.60

表 7-4、7-5、7-6 资料来源：2003 年水利部水资源公报、2003 年海河流域水资源公报

表 7-5 海河流域 2003 年供水和用水量统计表

分区		单位	全国	海河流域	北京市	天津市
供水量	总供水量	亿 $\text{m}^3$	5320.0	377.0	35.00	20.53
	地表水	亿 $\text{m}^3$	4287.9	113.5	8.33	13.37
		比例	80.6%	30.1%	23.8%	65.1%
	地下水	亿 $\text{m}^3$	1016.1	261.6	25.41	7.14
		比例	19.1%	69.4%	72.6%	34.8%
	其他	亿 $\text{m}^3$	16.0	1.9	1.26	0.02
		比例	0.3%	0.5%	3.6%	0.1%
用水量	总用水量	亿 $\text{m}^3$	5320.0	377.0	35.00	20.53
	生活用水	亿 $\text{m}^3$	631	53.5	13.49	4.20
		比例	11.9%	14.2%	38.5%	20.5%
	工业用水	亿 $\text{m}^3$	1177	59.7	7.65	4.86
		比例	22.1%	15.8%	21.9%	23.7%
	农业用水	亿 $\text{m}^3$	3433	261.9	12.92	11.17
		比例	64.5%	69.5%	36.9%	54.4%
	生态用水	亿 $\text{m}^3$	79	1.9	0.95	0.30
		比例	1.5%	0.5%	2.7%	1.4%

表 7-6 海河流域 2003 年用水指标

分区	人均用水量( $\text{m}^3$ )	万元 GDP 用水 ( $\text{m}^3/\text{万元}$ )	工业增加值用水 ( $\text{m}^3/\text{万元}$ )	农田灌溉亩均用 水( $\text{m}^3/\text{亩}$ )	人均生活用水(L/d)	
					城镇	农村
海河流域	287	218	46	251	118	54
北京市	236	96	74	393	171	150
天津市	200	86	44	251	81	72
全国	412	448				

表 7-7 海河流域 2002 年各分区水资源总量

分 区	计算面积 ( $\text{km}^2$ )	年降水量 ( $\text{亿 m}^3$ )	地表水资源量 ( $\text{亿 m}^3$ )	地下水资源量 ( $\text{亿 m}^3$ )	重复计算量 ( $\text{亿 m}^3$ )	水资源总量 ( $\text{亿 m}^3$ )
全国	9600000	62610	27243	8697	7685	28255
海河流域	318161	1274	64	146	51	159
北京市	16800	69.38	5.25	14.69	3.83	16.11
天津市	11305	40.94	1.85	2.09	0.27	3.67

表 7-7 ~ 7-10 资料来源：2000、2002 年水利部水资源公报、2000、2002 年海河流域水资源公报

表 7-8 海河流域 2002 年供水和用水量统计表

分区	单位	全国	海河流域	北京市	天津市
----	----	----	------	-----	-----

供水量	总供水量	亿 m <sup>3</sup>	5497	400.0	34.62	19.96
	地表水	亿 m <sup>3</sup>	4403.1	127.96	9.65	11.74
		比例	80.1%	32.0%	27.9%	58.8%
	地下水	亿 m <sup>3</sup>	1071.9	270.17	24.24	8.22
		比例	19.5%	67.6%	70.0%	41.2%
	其他	亿 m <sup>3</sup>	22.0	1.71	0.73	-
		比例	0.4%	0.4%	2.1%	-
用水量	总用水量	亿 m <sup>3</sup>	5497	400.0	34.62	19.96
	生活用水	亿 m <sup>3</sup>	615.6	51.54	11.63	4.75
		比例	11.2%	12.9%	33.6%	23.8%
	工业用水	亿 m <sup>3</sup>	1143.4	61.79	7.54	4.50
		比例	20.8%	15.5%	21.8%	22.5%
	农业用水	亿 m <sup>3</sup>	3738.0	286.46	15.45	10.71
		比例	68%	71.6%	44.6%	53.7%
	生态用水	亿 m <sup>3</sup>	-	-	-	-
		比例	-	-	-	-

表 7-9 海河流域 2000 年各分区水资源总量

分 区	计算面积 (km <sup>2</sup> )	年降水量 (亿 m <sup>3</sup> )	地表水资源量 (亿 m <sup>3</sup> )	地下水资源量 (亿 m <sup>3</sup> )	重复计算量 (亿 m <sup>3</sup> )	水资源总量 (亿 m <sup>3</sup> )
全国	9600000	60092	26562			27701
海河流域	318161	1559.3	125.2	221.9	78.4	268.7
北京市	16800	73.6	6.3	15.2	4.7	16.9
天津市	11305	48.0	0.6	2.7	0.2	3.1

表 7-10 海河流域 2000 年供水和用水量统计表

分区		单位	全国	海河流域	北京市	天津市
供水量	总供水量	亿 m <sup>3</sup>	5531	400.6	40.4	22.6
	地表水	亿 m <sup>3</sup>	4440	136.7	13.3	14.4
		比例	80.3%	34%	33%	64%
	地下水	亿 m <sup>3</sup>	1069	262.6	27.2	8.2
		比例	19.3%	66%	67%	36%
	其他	亿 m <sup>3</sup>	21	1.3	-	-
		比例	0.4%	0.3%	-	-
用水量	总用水量	亿 m <sup>3</sup>	5498	398.3	40.4	22.6
	生活用水	亿 m <sup>3</sup>	575	51.8	13.4	5.2
		比例	10.5%	13%	33%	23%
	工业用水	亿 m <sup>3</sup>	1139	65.8	10.5	5.3
		比例	20.7%	17%	26%	23%
	农业用水	亿 m <sup>3</sup>	3784	280.7	16.5	12.1
		比例	68.8%	70%	41%	54%
	生态用水	亿 m <sup>3</sup>	-	-	-	-
		比例	-	-	-	-

### 7.2.3 海河流域水资源开发利用存在的主要问题

经过近几十年来的水利建设，海河流域在水资源开发利用方面取得了巨大的成就，

供水能力已达到了 2003 年的 377 亿  $\text{m}^3$ ，但由于受地理、水文气象等自然条件的限制，以及社会历史发展的变迁，目前海河流域的水资源开发利用仍存在着一些问题。

### （1）资源性缺水严重

海河流域属于资源性严重缺水<sup>[142]</sup>。1956~1998 年水文系列总水资源量 372 亿  $\text{m}^3$ 。人均总水资源占有量 305  $\text{m}^3$ ，仅为全国平均的 1/7，世界平均的 1/27，远低于人均 1000 $\text{m}^3$  的国际水资源紧缺标准；亩均水资源量 225 $\text{m}^3$ ，为全国的 1/8。本流域以其仅占全国 1.5% 的有限水资源，承担着 11% 的耕地面积和 10% 的人口以及京津等几十座城市的供水任务，人口、水资源、土地资源不相匹配，流域将长期处于缺水状态。

目前流域总用水量已达 2003 年的 377 亿  $\text{m}^3$ ，而且随着经济和社会的不断发展，海河流域的需水量在以后的 20~30 年内仍呈递增趋势，到 21 世纪中才可能达到需水量的零增长。流域内现状 50% 保证率（平水年）可供水量为 330 亿  $\text{m}^3$ ，75% 保证率（枯水年）可供水量为 300 亿  $\text{m}^3$ ，缺少 60~90 亿  $\text{m}^3$ ，为了满足用水需要，目前靠超采地下水和靠其它流域调水来解决缺少问题，水资源对流域内，尤其是京、津地区的社会经济发展起到了严重的瓶颈性的制约作用。

### （2）技术性缺水有较大缓解的空间

受传统意识的影响，认为资源是取之不尽用之不竭的，并且是无价的，因此，人们节水意识淡薄，用水现象严重，一边是缺水，另一边又是浪费。表现在工农业和生活用水方面科技含量偏低，用水设施落后，用水效率虽然在全国较高，但和世界先进国家相比，仍有较大的提升空间。

### （3）相对性缺水通过水资源合理配置解决

在海河流域资源性缺水的前提下，合理进行水资源在各用水部门的分配，解决有限水资源在各用水部门的用水冲突问题，即解决相对性缺水问题，是流域水资源管理中需要解决的长期、而又艰巨的课题。解决相对性缺水问题，需要亟待提高水资源管理水平，水资源需要统一规划、统一管理。

### （4）污染性缺水加剧了资源性缺水

水污染加重了水资源短缺和水质下降，这无疑是对资源性缺水严重的海河流域雪上加霜。污染问题是经济发展过程中必然出现的难题，但作为经济发展领先的流域之一，随着工业化和城镇化发展，废污水大量排放，海河流域内河道、水库、湖泊水质日益恶化，可资利用的水资源从质和量上都受到了很大的影响。加大水污染防治力度是解决海河流域水环境改善的根本途径。

## 7.3 海河流域水资源承载力分析的边界条件

影响水资源使用流向的各种因素既与水资源本身特点有关，也与国家发展政策和经济布局有关。按照前面研究的水资源承载力综合分析方法，海河流域水资源承载力分析的边界条件的确定，采用的方法是采用情景预测法并按照各态历经假说原理的综合预测

方法,按照国际和国内以及其它流域人口、水资源、社会经济和生态环境子系统类似领域或系统的发展过程和轨迹,选取相关的定额、指标和结论等参数,进行预测和分析平衡。

海河流域水资源承载力分析将以 1998 年(现状年份)、2010 年、2020 年、2030 年、2040 年和 2050 年为评价计算年份,分别预测构成水资源承载力影响因素的子系统:人口发展和城镇化进程、社会经济发展、生态环境、水资源开发利用和供需发展的状况,进而进行现状、目标和动态的包括基础指标量化计算和分类指标评价的水资源承载力分析。

### 7.3.1 海河流域社会经济发展目标

根据前面研究的结论,海河流域水资源承载力分析遵循的社会经济发展目标,将按照中国科学院根据我国第十个五年计划期间(2001 至 2005 年)经济和社会发展的主要目标所研究定义的中国现代化目标为标准,作为预测海河流域水资源承载力分析所需要的目标边界条件的上限,即:

海河流域在本世纪的中叶将达到中等发达国家的战略目标,基本实现现代化,依序通过三大“零增长”的台阶,整体地进入到可持续发展的良性循环之中,全面达到世界中等发达国家的水平:

第一台阶:到 2030 年争取实现人口数量和规模的“零增长”;

第二台阶:到 2040 年实现物质和能量消耗速率的“零增长”;

第三台阶:到 2050 年实现生态和环境恶化速率的“零增长”<sup>[26]</sup>。

### 7.3.2 海河流域人口发展和城镇化进程预测

海河流域人口预测和其它流域相比,更具有不确定性,原因是北京、天津地处海河流域、尤其是首都北京市,人口密度大、流动人口多、迁移人口数量多。根据第五次全国人口普查结果,2000 年全国、北京、天津人口分别为 129533 人、1382 人、1001 人,其中北京市人口数量增幅较大,大大超出了一些 2001 年前文献中预测的结果。

本文海河流域人口预测主要采用人口直接推算法,按 1997 年、2000 年现状人口状况为预测下限,按 2030 年全国和海河流域实现人口数量和规模的“零增长”,人口数量达到最大。即 2030 年全国人口达到 16 亿,海河流域人口按全国相应比例同增长。城镇化率按世界发达国家的标准和我国现代化要求,全国和海河流域均达到 60%,但海河流域内部,由于发展的不均衡性,北京和天津两市的城镇化率将远远高于平均水平。

预测的关键步骤是选定现状、目标数量和增长率,但人口数量的增长类似与其它经济类增长,一般呈倒 U 型增长曲线<sup>[26]</sup>,也就是说,从现状到目标的增长率不是一个固定数值,增长率是变化的。而增长率的变化率可以假定为:从现状变化率的某一数值到目标变化率为零,这一变化率是呈直线变化的,最终达到目标增长率和变化率的“零增长”。

表 7-11 海河流域现状人口与城镇化进程

分区	海河流域	北京	天津	全国
总人口 (万人)	1997 年	12273	1240	953
	2000 年	12850	1382	1001
人口年均增率 (%)	1998-2000 年	1.54	3.68	1.65
城镇人口 (万人)	1997 年	3508	829	628
	2000 年	4370	1072	721
城镇化率 (%)	1997 年	30.4	71.0	70.0
	2000 年	34.0	77.5	72.0

资料来源于：[5]、[142]、2000 年第五次人口普查公报

表 7-12 海河流域人口预测

分区	海河流域	北京	天津	全国
预测人口 (万人)	2010 年	14394	1518	1128
	2020 年	15425	1607	1204
	2030 年	15809	1640	1232
人口年均增率 (%)	2001-2010 年	1.14	0.94	1.08
	2011-2020 年	0.69	0.57	0.66
	2021-2030 年	0.25	0.20	0.23

表 7-13 海河流域城镇人口和城镇化率预测

分区	海河流域	北京	天津	全国
预测城镇人口 (万人)	2010 年	6333	1290	948
	2020 年	8175	1446	1072
	2030 年	9485	1229	967
城镇化率 (%)	1997 年	30.4	71.0	70.0
	2000 年	34.0	77.5	72.0
	2010 年	44.0	85.0	84.0
	2020 年	53.0	90.0	89.0
	2030 年	60.0	93.0	92.0

### 7.3.3 海河流域社会经济发展预测

按照国民经济发展规划,2050 年我国达到中等国家发展水平。在中等发展情景下,2050 年人均国内生产总值达到 7500 美元,折合人民币为 61650 元,1 美元等于 8.22 元人民币。产业结构将有大幅度的改变,第一产业占 GDP 的比重将持续下降,第二产业为广义的工业呈倒 U 型曲线<sup>[26]</sup>发展,即先达到发达的中等国家工业化水平,然后有所下降。第三产业将有较大幅度的增长,这也是实现现代化目标的重要标志。2050 年我国产业结构的比例将达到 6:45:49,海河流域产业比例比全国的第三产业更高一些为 5.2:45.3:49.5,人均国内生产总值达到人民币 72170 元,这符合京津地区经济发展的特点。

表 7-14 海河流域 GDP 预测

分区	海河流域	北京	天津	全国
----	------	----	----	----

现状 GDP (亿元)	1997 年	8907	1810	1240	74772
	2000 年	11417	2331	1593	95242
预测 GDP (亿元)	2010 年	22280	4610	3010	185000
	2020 年	38785	8492	5290	325109
	2030 年	62600	13700	8200	520000
	2040 年	89160	19513	11456	740629
	2050 年	114094	24656	14677	987200
年均增长率 (%)	1998-2000 年	8.6	8.8	8.7	8.4
	2001-2010 年	6.9	7.1	6.6	6.9
	2011-2020 年	5.7	6.3	5.8	5.8
	2021-2030 年	4.9	4.9	4.5	4.8
	2031-2040 年	3.6	3.6	3.4	3.6
	2041-2050 年	2.5	2.4	2.5	2.9
	1998-2050 年	4.9	4.8	4.6	5.0

现状资料来源于：[142]、[5]

表 7-15 海河流域人均 GDP 预测

分区		海河流域	北京	天津	全国
现状人均 GDP (元)	1997 年	7257	14598	13016	6079
	2000 年	8885	16868	15910	7353
预测人均 GDP (元)	2010 年	15479	30369	26684	12722
	2020 年	25144	52847	43934	20760
	2030 年	39598	83537	66558	32500
	2040 年	56398	118980	92984	46289
	2050 年	72170	150340	119130	61700

现状资料来源于：[142]、[5]

表 7-16 海河流域产业结构预测

分区		海河流域
1997 年现状产业结构 (%)	第一产业	15.0
	第二产业	48.7
	第三产业	36.3
2010 年预测产业结构 (%)	第一产业	9.3
	第二产业	50.2
	第三产业	40.5
2020 年预测产业结构 (%)	第一产业	7.7
	第二产业	49.1
	第三产业	43.2
2030 年预测产业结构 (%)	第一产业	6.0
	第二产业	48.0
	第三产业	46.0
2040 年预测产业结构 (%)	第一产业	5.6
	第二产业	46.7
	第三产业	47.7
2050 年预测产业结构 (%)	第一产业	5.2
	第二产业	45.3



	第三产业	49.5
--	------	------

现状资料来源于：[142]、[5]

目前我国仍处于工业化初期，工业化进程的加快发展将是 21 世纪我国社会经济发展的主要特征。海河流域因水资源的制约今后将转向非工业化产业发展<sup>[5]</sup>。工业总产值预测 2050 年达到 200000 亿元，灌溉面积 2050 年达到 11400 万亩。

**表 7-17 海河流域工业发展预测**

分区	海河流域
现状工业产值 (亿元)	1997 年 2000 年
	13537 17434
预测工业产值 (亿元)	2010 年 2020 年 2030 年 2040 年 2050 年
	38700 65481 114000 159261 200000
年均增长率 (%)	1998-2000 年 2001-2010 年 2011-2020 年 2021-2030 年 2031-2040 年 2041-2050 年 1998-2050 年
	8.8 8.3 5.4 5.7 3.4 2.3 5.2

现状资料来源于：[142]、[5]

**表 7-18 海河流域灌溉面积预测**

分区	海河流域
现状耕地面积 (万亩)	16952
现状灌溉面积 (万亩)	1997 年 2000 年
	10832 10917
预测灌溉面积 (万亩)	2010 年 2020 年 2030 年 2040 年 2050 年
	11000 11154 11300 11349 11400
灌溉率 (%)	1997 年 2000 年 2010 年 2020 年 2030 年 2040 年 2050 年
	63.9 64.4 64.9 65.8 66.7 67.0 67.2

资料来源于：[142]、[5]

#### 7.3.4 海河流域生态环境需求预测

生态环境直接作为水资源承载力的承载对象，与人口和社会经济并列分析，所以研究步骤应同于人口和社会经济的方法，但鉴于海河流域包括北京和天津这样的大城市，生态环境的保护状况有其特殊性，再加上生态环境的有关研究相对滞后，生态环境有关资料缺乏或不完整，所以本文不采用按定义的内容：水土保持生态环境用水、林业生态工程建设用水、维护河流水沙平衡用水、保护和维持河流生态系统的生态基流、回补超采地下水所需生态水量以及城市生态用水等进行预测，仅采用城市环境用水和生态用水等现有资料。

### 7.3.5 海河流域水资源需求预测

按社会经济发展设定的原则，到 2040 年海河流域水资源的需求达到“零增长”，因此海河流域水资源需求预测按预测的人口、经济和生态环境的现状和目标，在适当选取和预测用水定额和经济定额的基础上，以 2040 年“零增长”为限制条件进行，同时按各态历经假说的原理，参照国家和世界的水资源开发所经历的轨迹选取定额和标准。

#### 7.3.5.1 生活需水量预测

生活需水按城镇生活用水和农村生活用水两部分分别计算，计算方法采用人均定额法。城镇人口用水定额和农村人口用水定额，是决定生活用水量的主要参数，它的选取主要采用现状用水定额和目标用水定额，以及参考其它流域、全国和世界工业化国家的生活用水定额和标准来确定。

$$\begin{aligned}\text{生活需水量 } W_{DP} &= \text{城镇生活用水量} + \text{农村生活用水量} \\ &= \text{城镇人口} \times \text{城镇人均用水定额} + \text{农村人口} \times \text{农村人均用水定额}\end{aligned}$$

表 7-19 海河流域生活需水量预测

分区		海河流域	
		城镇	农村
现状生活需水量 (亿 m <sup>3</sup> )	1998 年	26.8	22.0
	1999 年	51.5	
	2000 年	51.8	
	2001 年	51.8	
	2002 年	51.5	
	2003 年	53.5	
预测生活需水量 (亿 m <sup>3</sup> )	2010 年	50	24
	2020 年	66	24
	2030 年	78	24
	2040 年	80	25
	2050 年	80	25
	1998 年	209	67
	2000 年	202	71
	2001 年	202	73
	2003 年	118	54
预测人均用水定额 (L/d)	2010 年	215	83
	2020 年	220	90

	2030 年	225	105
	2040 年	232	110
	2050 年	232	110

部分资料来源于：[142]、[5]、1997-2003 年水利部水资源公报和海河流域水资源公报

### 7.3.5.2 农业需水量预测

海河流域农业需水量按耕地灌溉需水和林牧渔业需水计算，灌溉需水由灌溉面积和灌溉定额计算，林牧渔业需水按灌溉需水的趋势比例计算。由于农业 GDP、种植结构以及万元农业 GDP 用水定额等数据无法获得，所以不采用农业 GDP 和响应定额计算农业需水量的方法。

表 7-20 海河流域农业需水量预测

分区		海河流域
现状农业需水量 (亿 m <sup>3</sup> )	1998 年	307
	2000 年	278
预测农业需水量 (亿 m <sup>3</sup> )	2010 年	321
	2020 年	314
	2030 年	307
	2040 年	306
	2050 年	305
	2010 年	16
其中：林牧渔业需水 (亿 m <sup>3</sup> )	2020 年	19.5
	2030 年	23
	2040 年	24
	2050 年	25
	2010 年	16
灌溉定额 (m <sup>3</sup> /亩)	1998 年	300
	2001 年	258
	2010 年	277
	2020 年	264
	2030 年	251
	2040 年	249
	2050 年	246

部分资料来源于：[142]、[5]、1997-2003 年水利部水资源公报和海河流域水资源公报

### 7.3.5.3 工业需水量预测

由于资料采集的困难，工业需水量的测算很难按不同部门的需水去统计，目前一般采用工业用水综合定额法来计算。鉴于数据统计的缺乏，海河流域不采用工业现状和目标 GDP 与万元工业用水定额来计算和预测工业需水量，而采用工业产值和万元工业产值计算。

表 7-21 海河流域工业需水量预测

分区		海河流域
现状工业需水 (亿 m <sup>3</sup> )	1997 年	67.2
	2000 年	70

预测工业需水 (亿 m <sup>3</sup> )	2010 年	93
	2020 年	112
	2030 年	116
	2040 年	127
	2050 年	120
万元工业产值 用水定额 (m <sup>3</sup> /万元)	1997 年	50.0
	2000 年	36.0
	2010 年	24.0
	2020 年	17.1
	2030 年	10.2
	2040 年	8.0
	2050 年	6.0

部分资料来源于：[142]、[5]、1997-2003 年水利部水资源公报和海河流域水资源公报

#### 7.3.5.4 第三产业（服务行业）需水量预测

海河流域第三产业（或简称服务行业）需水包括交通、旅游、银行、娱乐等部门的耗水量，它的预测一般采用和工业需水类似的方法，用服务业现状和目标 GDP 与万元服务业用水定额来计算和预测服务业需水量。服务业的水量消耗主要是工作人员的消耗水量，生产性的水量消耗可计入工业消耗。人员的水量消耗按人口定额计算，故海河流域第三产业（或称服务行业）需水不单独计算，这部分需水量已经统计到人口生活和工业用水当中。

#### 7.3.5.5 生态环境需水量预测

目标生态环境需水按国民经济发展规划的第三个台阶：“到 2050 年实现生态和环境恶化速率的“零增长”。

根据有关资料，海河流域水土保持生态环境用水定额为 30mm 左右<sup>[1][143]</sup>，流域水保治理保存面积为 3 万 km<sup>2</sup>，我国目前水保生态用水总量为 20 亿 m<sup>3</sup> 左右。黄土高原生态用水定额 6mm，用水量 8~10 亿 m<sup>3</sup>。林业生态环境用水定额为 30mm 左右<sup>[1][143]</sup>，流域林业生态工程面积为 1 万 km<sup>2</sup>，现状生态用水亿 m<sup>3</sup> 为 3 亿 m<sup>3</sup>，我国目前林业生态用水总量为 158 亿 m<sup>3</sup> 左右。黄土高原生态用水定额 15mm，除水保林外，天然林面积用水量 5 亿 m<sup>3</sup>。

海河流域生态环境需水按城市环境用水和生态用水两部分统计<sup>[142]</sup>。城市环境用水主要包括北京、天津、石家庄等在内的城市环境用水，2010 年估计为 3.3 亿 m<sup>3</sup>，2020 年估计为 10 亿 m<sup>3</sup>，以后估计为 17 亿 m<sup>3</sup>。生态需水量主要包括山区水土保持用水、主要湖泊生态平衡用水和维持河道内生态用水三部分需水量，2010 年估计为 9 亿 m<sup>3</sup>，2020 年估计为 14 亿 m<sup>3</sup>，以后估计为 55 亿 m<sup>3</sup>。

表 7-22 海河流域生态环境需水量预测

分区	海河流域
现状生态环境需水 (亿 m <sup>3</sup> )	1997 年
	1998 年
	0.5
	0.5

预测  生态环境需水  (亿 m <sup>3</sup> )	2010 年	12.3
	2020 年	24
	2030 年	72
	2040 年	72
	2050 年	72

资料来源于：[142]、[5]

### 7.3.5.6 总需水量预测

将生活用水、农业、工业、以及生态环境需水按相同时段叠加即为水资源承载对象的总需水量。但应注意社会目标、人口、水资源、社会经济和生态环境等预测和用水效率及效率等指标、参数的假定、选取有很大的误差，总需水量的准确度也很不同，所以实践中，应根据需要不断适当调整指标、参数，计算出满足需要的总需水量。

$$\text{总需水量 } W_D = \text{生活需水量 } W_{DP} + \text{农业需水量 } W_{DA} + \text{工业需水量 } W_{DI} + \text{生态环境需水量 } W_{DE}$$

表 7-23 海河流域总需水量预测

分区		海河流域
现状总需水量 (亿 m <sup>3</sup> )	1998 年	424
	2000 年	401
预测总需水量  (亿 m <sup>3</sup> )	2010 年	500
	2020 年	539
	2030 年	597
	2040 年	611
	2050 年	603

### 7.3.6 海河流域水资源供给预测

水资源开发利用和供水能力预测是从供给方面来测算本地水资源的可用水量，包括地表水和地下水可供水量、污水回用可供水量和海水淡化可供水量，而跨流域调水可供水量和虚拟水资源可供水量作为外部因素的可供水量，随着流域需水量和当年水资源状况可以变动。

#### (1) 地表水和地下水可供水量

海河流域 1998 年水资源开发利用率已达 96%，继续开发的潜力已不大<sup>[142]</sup>，流域天然水资源的供水能力已达到的极限值，即流域地表水和地下水可供水量已达到了最大值，从现在到 2050 年的整个期间，海河流域的地表水和地下水可供水量都将稳定在目前的 300 亿 m<sup>3</sup>，其中地表水可供水量 101 亿 m<sup>3</sup>，地下水可供水量 199 亿 m<sup>3</sup>。

#### (2) 污水回用可供水量

污水回用不但当作一种重要的可供水资源，而且减少环境污染。污水资源化也是提高供水能力的一种途径，污水资源化是将城镇生活和工业废污水进行处理，回用于农业灌溉、生态环境用水和部分服务行业的用水。

表 7-24 海河流域污水回用可供水量

分区		海河流域
现状总供水量 (亿 m <sup>3</sup> )	1998 年	9.0
预测总供水量 (亿 m <sup>3</sup> )	2010 年	22.0
	2020 年	41.0
	2030 年	51.0
	2040 年	52.0
	2050 年	47.0

资料来源于：[142]、[5]

### (3) 海水淡化可供水量

海河流域海水淡化可供水量指地下微咸水和海水利用量，由于这部分供水量的多少不与降水量有直接关系，主要根据经济状况和缺水程度的大小、以及国家政策和规划等有关。资料显示海河流域地下微咸水利用量最大为 10 亿 m<sup>3</sup>，1998 年为 3.1 亿 m<sup>3</sup>。海水利用量折合成淡水 1998 年为 0.4 亿 m<sup>3</sup>，2010 年将达 61 亿 m<sup>3</sup>，可替代淡水 4 亿 m<sup>3</sup>。

表 7-25 海河流域海水淡化可供水量

分区		海河流域
现状总供水量 (亿 m <sup>3</sup> )	1998 年	3.5
预测总供水量 (亿 m <sup>3</sup> )	2010 年	9.0
	2020 年	17.0
	2030 年	19.0
	2040 年	21.0
	2050 年	24.0

资料来源于：[142]、[5]

### (4) 总供水量预测

总供水量由当地生产的供水能力，不包括调水和虚拟水资源量。

总供水量  $W_s$  = 地表和地下水可供水量  $W_{SN}$  + 污水回用可供水量  $W_{SW}$  + 海水淡化可供水量  $W_{SS}$

表 7-26 海河流域供水量预测

分区		调水前供水量
现状总供水量 (亿 m <sup>3</sup> )	1998 年	305
预测总供水量 (亿 m <sup>3</sup> )	2010 年	331
	2020 年	358
	2030 年	370
	2040 年	373
	2050 年	371

根据统计资料<sup>[5]</sup>，1997 年我国水资源开发利用约为 5600 亿 m<sup>3</sup>，开发利用率为 21%左右，有 3000 多亿 m<sup>3</sup> 水资源量尚未开发，可开发利用的水资源主要分布在南方地区，北方地区水资源可开发利用的数量不足 500 亿 m<sup>3</sup>。估计到本世纪中叶全国可开发利用水资源总量约为 9000 亿 m<sup>3</sup>，开发利用率为 32%左右，达到可开发利用限度值。海河流域 1998 年水资源开发利用率已达 96%，继续开发的潜力已不大<sup>[142]</sup>，流域天然水资源的供水能力已达到的极限值，即流域地表水和地下水可供水量已达到了最大值。

### 7.3.7 海河流域水资源供需分析和水资源合理配置

为突出水资源承载力的计算方法,海河流域的供需发展趋势分析以平均或中等发展情景下的状态计算,即需水采用中等发展情景下的国民经济需水量预测成果、供水能力采用 50%保证率下的供水量。并分别不考虑调水和考虑调水量分别进行供需平衡分析,以便进行狭义和广义水资源承载力分析。

目前海河流域每年从黄河引水为 50 亿  $\text{m}^3$ ,按南水北调工程规划,2010 年海河流域经南水北调工程调水 100 亿  $\text{m}^3$ ,2010 年至 2050 年逐步到达最大调水量 180 亿  $\text{m}^3$ 。

表 7-27 海河流域水资源供需平衡

分区		调水前供需分析		调水后供需分析	
现状供需平衡 (亿 $\text{m}^3$ )	1998 年	调水前供水量	305	调水后供水量	355
		需水量	424	需水量	424
		缺水量	-119	缺水量	-69
预测供需平衡 (亿 $\text{m}^3$ )	2010 年	调水前供水量	331	调水后供水量	481
		需水量	500	需水量	500
		缺水量	-169	缺水量	-19
	2020 年	调水前供水量	358	调水后供水量	508
		需水量	539	需水量	539
		缺水量	-181	缺水量	-31
	2030 年	调水前供水量	370	调水后供水量	520
		需水量	597	需水量	597
		缺水量	-227	缺水量	-77
	2040 年	调水前供水量	373	调水后供水量	603
		需水量	611	需水量	611
		缺水量	-238	缺水量	-8
	2050 年	调水前供水量	371	调水后供水量	601
		需水量	603	需水量	603
		缺水量	-232	缺水量	-2

在不考虑流域外调水的情况下,海河流域 2010 年、2020 年、2030 年、2040 年、2050 年缺水量分别为 169 亿  $\text{m}^3$ 、181 亿  $\text{m}^3$ 、227 亿  $\text{m}^3$ 、238 亿  $\text{m}^3$ 、232 亿  $\text{m}^3$ 。

需水量在 2040 年达到最大值 611 亿  $\text{m}^3$ ,符合设定的社会发展目标,即到 2040 年实现物质和能量消耗速率的“零增长”,同样最大缺水量也出现在 2040 年,缺水为 238 亿  $\text{m}^3$ 。

在考虑每年从黄河引水 50 亿  $\text{m}^3$ 、2010 年海河流域经南水北调工程调水 100 亿  $\text{m}^3$ 、2010 年至 2050 年逐步到达最大调水量 180 亿  $\text{m}^3$  的情况后,海河流域 2010 年、2020 年、2030 年、2040 年、2050 年缺水量分别为 19 亿  $\text{m}^3$ 、31 亿  $\text{m}^3$ 、77 亿  $\text{m}^3$ 、8 亿  $\text{m}^3$  和 2 亿  $\text{m}^3$ 。因此,实现南水北调工程调水后,海河流域逐步实现水资源的供需平衡。可见,在海河流域缺水较大的情况下,靠本流域的水资源开发和节约的潜力是很难满足经济社会的供需要求,实施外部调水是势在必行的措施,这样才能使海河流域多种水源得到高效、科学的开发使用,超采的地下水得到恢复,生态环境得到有效的保护。

## 7.4 海河流域水资源承载力综合评价

在海河流域人口、社会经济和生态环境发展和水资源供需预测的基础上,根据预测的结果和中间过程数据进行海河流域水资源承载力计算和评价。按水资源承载力评价方法和步骤,将分别进行基础指标量化计算和分类指标体系评价(分别简称为量化计算和指标评价),在计算过程和结果的基础上,再进行分析、判断和调整的综合评价。为满足计算和评价的要求,还要补充、计算和收集过程数据。

### 7.4.1 海河流域水资源承载力基础指标量化计算

根据海河流域目前人口、社会经济和生态环境现状和目标发展情况,按效益最大化原则,进行最大可供水量在人口、社会经济和生态环境各用水部门的合理分配,计算承载的人口、社会经济和生态环境的规模。为了考察当地水资源的承载情况,也就是狭义水资源承载力,一般采用当地水资源可供水量来计算。当考虑确定性调水的情况时,采用总供水量来计算,也就是广义水资源承载力。计算按(4-14)、(4-15)、(4-16)、(4-17)式进行,即:

$$P^* = (GDP_I + GDP_S + (W_S - W_{DI}) / q_A) / (GDP/P + (q_P + q_E) / q_A)$$

$$GDP_A^* = (W_S - W_{DE}^* - W_{DI} - W_P^*) / q_A$$

$$W_{DE}^* = P^* q_E$$

$$W_P^* = P^* q_P$$

以2010年为代表,分别计算水资源承载力量化指标,即水资源承载力基础指标CCWR、按水量承载指数 $I_W$ 、人口承载指数 $I_P$ 、社会经济承载指数 $I_{GDP}$ 、生态环境承载指数 $I_E$ 等指标。

2010年水量承载指数 $I_W$ :预测最大可供水量 $W_S$ 为331亿 $m^3$ ,预测需水量 $W_D$ 为500亿 $m^3$ , $I_W = W_S / W_D = 66.33\%$ ,2010年可供水资源量对需水量的满足程度为66.33%,结果表明,当地水资源不能满足人口、社会经济和生态环境的用水量需要。

2010年人口承载指数 $I_P$ :按水资源供给能力计算的人口数量 $P^*$ 为13706万人,按社会发展趋势预测人口数量 $P_S$ 为14394万人, $I_P = P^* / P_S = 95.22\%$ ,表示水资源能够承载13706万人,只能满足可能的人口数量14394万人的95.22%承载程度。

社会经济承载指数 $I_{GDP}$ :按水资源供给能力计算的工农业GDP数量 $GDP_{IA}^*$ 为13257亿元,按社会发展趋势预测工农业GDP数量 $GDP_{IAS}$ 为12192亿元, $I_{GDP} = GDP^* / GDP_S = 91.97\%$ ,表示水资源能够承载社会经济总GDP为21216亿元,承载程度为91.97%。

生态环境承载指数 $I_E$ :按水资源供给能力计算的生态环境需水量 $W_{DE}^*$ 为11.43亿 $m^3$ ,与按社会发展趋势预测生态环境需水量 $W_{DES}$ 为12亿 $m^3$ , $I_E = W_{DE}^* / W_{DES} = 95.22\%$ ,表示水资源对生态环境的承载程度95.22%。

水资源承载力CCWR:按水量承载指数 $I_W$ 、人口承载指数 $I_P$ 、社会经济承载指数 $I_{GDP}$ 、生态环境承载指数 $I_E$ 四项承载指标加权平均值, $CCWR = (I_W + I_P + I_{GDP} + I_E) / 4 = 88.19\%$ ,表示



水资源能够最大承载人口 13706 万人、社会经济规模 21216 亿元、以及生态环境用水量 11.43 亿  $\text{m}^3$ ，对人口、社会经济和生态环境的最大承载程度为 88.19%。水资源承载力的这种表示方法既反映了对人口、社会经济和生态环境的承载规模，也反映了对人口、社会经济和生态环境预测的可能发展规模的承载程度，比较全面地刻划了水资源对承载对象的支撑能力。

表 7-28 海河流域狭义水资源承载力状况（调水前）

年 度		1998 年	2010 年	2020 年	2030 年	2040 年	2050 年
水量承载指数 $I_W$	供水量（亿 $\text{m}^3$ ）	305	331	358	370	373	371
	需水量（亿 $\text{m}^3$ ）	424	500	540	597	611	603
	$I_W$	71.93%	66.20%	66.30%	61.98%	61.05%	61.53%
人口承载指数 $I_P$	预测人口（万人）	12400	14394	15425	15809	15809	15809
	承载人口（万人）	11742	13706	14755	15131	15142	15202
	$I_P$	94.69%	95.22%	95.66%	95.71%	95.78%	96.16%
经济承载指数 $I_{GDP}$	预测工农业 GDP（亿元）	5997	13257	22030	33804	46631	57617
	承载工农业 GDP（亿元）	5484	12192	20346	31118	42870	53238
	预测 GDP（亿元）	9673	22280	38785	62600	89160	114094
	承载 GDP（亿元）	9160	21216	37101	59914	85399	109714
	$I_{GDP}$	91.44%	91.97%	92.36%	92.05%	91.93%	92.40%
生态环境承载指数 $I_E$	预测生态需水量（亿 $\text{m}^3$ ）	0.5	12	24	72	72	72
	承载生态需水量（亿 $\text{m}^3$ ）	0.47	11.43	22.96	68.91	68.96	69.24
	$I_E$	94.69%	95.22%	95.66%	95.71%	95.78%	96.16%
水资源承载力 CCWR		92.7%	88.19%	87.15%	87.49%	86.36%	86.14%

表 7-29 海河流域广义水资源承载力状况（调水后）

年 度		1998 年	2010 年	2020 年	2030 年	2040 年	2050 年
水量承载指数 $I_W$	供水量（亿 $\text{m}^3$ ）	355	481	508	520	603	601
	需水量（亿 $\text{m}^3$ ）	424	500	540	597	611	603
	$I_W$	83.73%	96.20%	94.07%	87.10%	98.69%	99.67%
人口承载指数 $I_P$	预测人口（万人）	12400	14394	15425	15809	15809	15809
	承载人口（万人）	12018	14317	15307	15579	15787	15804
	$I_P$	96.92%	99.46%	99.24%	98.54%	99.86%	99.97%
经济承载指数 $I_{GDP}$	预测工农业 GDP（亿元）	5997	13257	22030	33804	46631	57617
	承载工农业 GDP（亿元）	5700	13137	21734	32893	46504	57580
	预测 GDP（亿元）	9673	22280	38785	62600	89160	114094
	承载 GDP（亿元）	9375	22160	38489	61689	89034	114056
	$I_{GDP}$	95.04%	99.10%	98.66%	97.30%	99.73%	99.93%
生态环境承载指数 $I_E$	预测生态需水量（亿 $\text{m}^3$ ）	0.5	12	24	72	72	72
	承载生态需水量（亿 $\text{m}^3$ ）	0.48	11.94	23.82	70.95	71.90	71.98
	$I_E$	96.92%	99.46%	99.24%	98.54%	99.86%	99.97%
水资源承载力 CCWR		93.15%	98.56%	97.80%	95.37%	99.53%	99.88%

#### 7.4.2 海河流域水资源承载力指标体系评价

前面对海河流域的水资源承载力进行了量化计算，尽管这种量化计算既体现了海河

流域水资源对人口、社会经济和生态环境的承载规模，也描述了承载程度，但是，还不能全面反映水资源对人口、社会经济和生态环境承载的全部信息，如一定的水资源量可以承载人口、社会经济和生态环境较高标准的较小规模，也可以承载力较低标准的较大规模，水资源承载力具有相对极限性的特性。另外，人口、水资源、社会经济和生态环境是复杂的大系统问题，量化计算指标也没有全部反映人口、水资源、社会经济和生态环境之间的协调关系的差异，所以还要进行水资源承载力指标体系的设计和评价，目的是检验水资源对人口、社会经济和生态环境承载的协调程度，与量化计算的承载程度互为补充。

根据海河流域具体情况，参照前面水资源承载力指标体系筛选海河流域水资源承载力评价指标体系，并按目标承载力人口、水资源、生态环境和社会经济指标确定为评价标准，按层次分析法分析法进行承载力指标实现程度评价。

海河流域水资源承载力指标体系筛选了36个能基本反映流域水资源承载情况的相关指标，这些指标代表性强、样本易于选取、数据易于采集和比较。

评价标准的选取要结合海河流域的具体情况以及本文水资源承载力相关预测方法和限定条件进行，并根据以下几项原则制定评价标准值：

- (1) 尽量采用这样的一类规定标准值，如已有国家标准的或国际标准的指标，或者国际上通用的衡量指标值；
- (2) 参考或类比国内外其它流域有代表性的现状值作为标准值；
- (3) 依据现有的环境与社会、经济协调发展的理论，力求定量化作为标准值；
- (4) 尽量选用本文预测的相关数据和“零增长”目标设定值；
- (5) 对那些目前统计数据不十分完整，但在指标体系中又十分重要的指标，在缺乏有关指标统计数据前，采用专家咨询来确定。

表 7-30 指标基础数据和标准值

指标层	单位	标准	1998 年	2010 年	2020 年	2030 年	2040 年	2050 年
D1 人口增长率	%	0.1	1.54	1.14	0.69	0.25	0	0
D2 城镇化率	%	60	34	44	53	60	65	68
D3 人均寿命	岁	75	68	71	72	73	75	75
D4 城镇居民恩格尔系数	%	30	50	45	40	37	33	30
D5 农民恩格尔系数	%	40	60	55	50	45	43	40
D6 人均生活用水定额	升/日	180	110	141	160	177	182	182
D7 城镇人均生活用水定额	升/日	230	202	215	220	225	232	232
D8 农村人均生活用水定额	升/日	110	73	83	90	105	110	110
D9 人均 GDP	元/人	61700	8885	15479	25144	39598	56398	72170
D10 第一产业占 GDP 比例	%	5.5	15	9.3	7.7	6	5.6	5.2
D11 第三产业占 GDP 比例	%	50	38	40.5	43.2	46	47.7	49.5
D12 人均耕地面积	亩/人	1.5	1.32	1.18	1.10	1.07	1.07	1.07
D13 人均灌溉面积	亩/人	1	0.85	0.76	0.72	0.71	0.72	0.72
D14 GDP 年增长率	%	5	8.6	6.9	5.7	4.9	3.6	2.5
D15 人均 GDP 年增长率	%	4	7.0	5.7	5.0	4.6	3.6	2.5
D16 耕地灌溉率	%	70	64.4	64.9	65.8	66.7	67.0	67.2
D17 万元 GDP 水耗	m <sup>3</sup> /万元	50	351	224	139	95	68	53
D18 万元第一产业 GDP 水耗	m <sup>3</sup> /万元	500	1739	1549	1051	817	613	514
D19 万元第二产业 GDP 水耗	m <sup>3</sup> /万元	20	127	83	58	39	31	23
D20 工业用水重复率	%	80	60	65	68	72	75	80
D21 灌溉定额	m <sup>3</sup> /亩	220	272	277	264	251	249	246
D22 生态环境用水率	%	12	0.2	2.4	4.4	12.1	11.8	12.0
D23 人均生态环境用水量	m <sup>3</sup> /人	50	0.8	8	16	46	46	46
D24 单位 GDP 废水排放量	m <sup>3</sup> /万元	6	54	33	20	14	9	7
D25 河湖水质达标率	%	70	10	20	30	40	50	60
D26 植被覆盖率	%	20	5	10	15	18	20	22
D27 水土流失治理率	%	100	30	57	90	100	100	100
D28 废污水处理率	%	100	15	41	60	82	95	100
D29 废污水占水资源比率	%	20	17	20	21	23	22	21
D30 废污水资源化率	%	15	1.0	6.6	11.5	13.8	13.9	12.7
D31 人均水资源量	m <sup>3</sup> /人	500	289	258	241	235	235	235
D32 亩均耕地水资源量	m <sup>3</sup> /亩	300	219	219	219	219	219	219
D33 水资源供需比例	%	100	68.3	66.2	66.3	62.0	61.1	61.6
D34 水资源开发利用程度	%	98	96	96	96	96	96	96
D35 需水量年增长率	%	0.1	-2.8	2.2	0.8	0.8	0.2	-0.1
D36 海水淡化占水资源比率	%	8	1.4	2.7	4.7	5.1	5.6	6.5

海河流域水资源承载力指标体系权重系数是各指标相对于承载目标重要性的一种度量，保证指标体系权重系数赋值的科学性和合理性一直是该类工作研究的重要领域。根据设定的方案，海河流域指标体系各层次权重系数根据指标相对重要性，按层次分析法确定原则进行选取，并计算综合权重如表 7-31 所示。

表 7-31 指标体系的权重系数

目标层	系统层		状态层		指标层	单位	权重系数
水资源承载力 A	社会人口 B1 0.36	CI=0.01 RI=0.58 CR=0.02 ( $<0.10$ )	人口发展结构 C1 0.44		D1 人口增长率	%	0.0795
					D2 城镇化率	%	0.0795
			生活水平 C2 0.17	CI=0.0 RI=0.58 CR=0.05( $<0.1$ )	D3 人均寿命	岁	0.0334
					D4 城镇居民恩格尔系数	%	0.0127
					D5 农民恩格尔系数	%	0.0146
			用水效率 C3 0.39	CI=0.0 RI=0.58 CR=0.05( $<0.1$ )	D6 人均生活用水定额	升/日	0.0463
					D7 城镇人均生活用水定额	升/日	0.0463
					D8 农村人均生活用水定额	升/日	0.0463
	社会经济 B2 0.30	CI=0 RI=0.58 CR=0 ( $<0.10$ )	经济发展规模 C4 0.43	CI=0.06 RI=1.12 CR=0.05 ( $<0.10$ )	D9 人均 GDP	元/人	0.0376
					D10 第一产业占 GDP 比例	%	0.0216
					D11 第三产业占 GDP 比例	%	0.0431
					D12 人均耕地面积	亩/人	0.0118
					D13 人均灌溉面积	亩/人	0.0151
			经济增长 C5 0.14	CI=0.0 RI=0.58 CR=0.05( $<0.1$ )	D14 GDP 年增长率	%	0.0196
					D15 人均 GDP 年增长率	%	0.0196
					D16 耕地灌溉率	%	0.0039
			用水效率和效益 C6 0.43	CI=0.04 RI=1.12 CR=0.03 ( $<0.10$ )	D17 万元 GDP 水耗	m³/万元	0.0467
					D18 万元第一产业 GDP 水耗	m³/万元	0.0194
					D19 万元第二产业 GDP 水耗	m³/万元	0.0194
					D20 工业用水重复率	%	0.0194
					D21 灌溉定额	m³/亩	0.0242
	生态环境 B3 0.11		生态环境状况 C7 0.50	CI=0.04 RI=0.9 CR=0.05 ( $<0.10$ )	D22 生态环境用水率	%	0.0083
					D23 人均生态环境用水量	m³/人	0.0094
					D24 单位 GDP 废水排放量	m³/万元	0.0063
					D25 河湖水质达标率	%	0.0315
			生态环境质量 C8 0.50	CI=0.07 RI=1.12 CR=0.06 ( $<0.10$ )	D26 植被覆盖率	%	0.0195
					D27 水土流失治理率	%	0.0216
					D28 废污水处理率	%	0.0074
					D29 废污水占水资源比率	%	0.0028
	水资源 D4 0.23		水资源状况 C9 0.5	CI=0.02 RI=0.58 CR=0.03( $<0.1$ )	D30 废污水资源化率	%	0.0043
					D31 人均水资源量	m³/人	0.0729
					D32 亩均耕地水资源量	m³/亩	0.0296
			水资源潜力 C10 0.5	CI=0.02 RI=0.58 CR=0.03( $<0.1$ )	D33 水资源供需比例	%	0.0120
					D34 水资源开发利用程度	%	0.0729
					D35 需水量年增长率	%	0.0296
D36 海水淡化占水资源比率					%	0.0120	
CI=0.06 RI= 0.9 CR= 0.07( $<0.10$ )						合计	1.0000

综合上述内容，根据指标体系构造各级判断矩阵，求得最大特征值和对应的特征向量，经归一化后，计算一致性指标 C.I. (Coherence Index)，查找相应的平均值随机性指标 R.I. (Random Index)，计算一致性比例 C.R. (Coherence Ratio)，进行一致性判断。

表 7-32 平均随机性指标 R.I. 对照表

矩阵阶数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
R.I.	0	0	0.52	0.89	1.12	1.26	1.36	1.41	1.46	1.49	1.52	1.54	1.56	1.58	1.59

在具有满意的一致性后，将归一化后的特征向量作为各指标的权重。将各指标的实

际值与标准比较,得各评价因子的相对标准值,把相对标准值与相应的权值相乘,即可得到水资源承载力协调程度值。参考其它指标体系评价方法,给出水资源承载力综合评价等级标准。参照等级标准可以对水资源承载力指标体系评价值进行分析判断。

表 7-33 海河流域水资源承载力综合评价

年份	评价结果					
	1998 年	2010 年	2020 年	2030 年	2040 年	2050 年
水资源承载力指标体系评价	0.556	0.595	0.671	0.768	0.864	0.905

表 7-34 海河流域水资源承载力综合评价等级标准

等级	协调程度不高	协调程度一般	协调程度较高	协调程度很高
A	0.40	0.40 ~ 0.60	0.60 ~ 0.80	0.80

#### 7.4.3 海河流域水资源承载力综合评价分析

根据海河流域水资源承载力量化计算和指标体系评价,可以得出以下结论:

(1) 海河流域水资源承载力很低,协调程度较高。水资源承载力指数 CCWR(指狭义 CCWR)大都低于 90%,尤其是分量承载指数中水量承载指数仅 60%多,当地的水资源严重不能承载人口、社会经济和生态环境的发展,属于资源性缺水。由于水资源承载力指数 CCWR 和  $I_{GDP}$  远高于  $I_W$ ,说明海河流域国民经济的发展是比较高的,已经基本建立了不完全依靠农业和工业支撑国民经济的发展模式。水资源承载力实现目标的协调程度较高说明海河流域产业结构和现代化进程都比较合理。

(2) 从海河流域水资源承载力动态性分析来看,从 1998 年到 2050 年水资源承载指数和水量指数有所降低,人口承载指数和 GDP 承载指数略有增长,说明随着各项水资源承载子系统规模的大大增加,即总量增加,承载力并没有明显减低,承载力的协调性大大增强。也就是说,动态上在供水能力相对稳定的情况下,承载总量增加,承载实现程度基本不变,各承载对象的协调性和结构优化性增强。

(3) 海河流域水资源承载力和分量指标水量承载力成下降的趋势,说明缺水造成产业结构调整约束性增强;但分量指标中人口承载力指数和经济承载力指数却略有增长,说明流域的水资源使用效率、效益和节水效果和作用明显。

(4) 产业结构调整效果明显,由于工业和农业的单位用水量和两者在国民经济的产业结构成两极化的趋势,水资源承载力能够达到预期的调整产业结构的目的。绝对承载力很低,相对承载力很高,水量承载力低,人口、社会经济承载力高。

(5) 在广义水资源承载力的条件下,通过调水资源性增加流域水资源量的效果明显,水资源承载力提高,协调程度也很高,反映海河流域缺水严重,但社会经济发展水平较高,因此实行南水北调工程是十分必要的。

(6) 验证了水资源承载力是预测、量化和评价一体的综合评价方法。预测反映了海

河流域人口、社会经济和生态环境的发展和变迁；量化反映了海河流域承载的具体的人口、社会经济和生态环境的规模，以及随着各种因素的复杂变化还能反映起实现程度；评价反映了人口、水资源、社会经济和生态环境之间发展、变化和协调的状态和程度。

(7) 验证了水资源承载力是相对性的描述支撑状况的方法，虽然承载力在降低，但承载规模在增长，承载力实现程度比较稳定。也就是说，水资源能承载协调程度低的较小规模，也能承载协调程度高的较大规模。单一指标是不能说明和表达水资源承载人口、社会经济和生态环境的全部面貌。

(8) 验证了水资源承载力沿时间方向是有一定规律性的，即反映了动态和静态的特征。但是由于没有其它流域或地区的水资源承载力研究结果，没有横向进行比较，因此还缺乏静态规律的验证。

根据海河流域的现状和最终水资源承载力量化计算和评价，能够比较全面地反映海河流域静态和动态水资源与人口、社会经济和生态环境的发展、变化、承载、依赖和协调的复杂关系，对于找出海河流域提高水资源承载力途径和方法有十分重要的意义。同时采用上述水资源承载力预测、量化和评价的综合方法，对于其它流域，尤其是水资源短缺的流域和地区的水资源承载力分析也有一定较高的应用价值。

## 7.5 小结

本章在分析海河流域水资源开发利用特点的基础上，进行了海河流域人口、水资源、社会经济和生态环境现状和发展趋势预测以及水资源供需分析。海河流域水资源供需预测与分析为流域水资源承载力的分析提供了基础数据，也为流域水资源合理配置提供了依据。通过海河流域水资源承载力量化计算和指标体系综合评价，证明了海河流域人口密集，大中城市众多，在我国政治经济中的地位重要，但水资源匮乏，水资源的短缺严重制约着流域的社会经济发展，流域内只有大力发展节水型社会和经济、合理使用水资源、进行流域外调水、海水淡化、充分利用虚拟水，才能摆脱缺水困境，实现水资源的可持续利用，从而促进社会可持续发展。

## 第八章 总结与展望

### 8.1 总结

本文在大量收集资料的基础上,系统地分析了水资源承载力的国内外研究现状和进展,分析了水资源承载力研究的必要性和重要意义,并分析了水资源承载力的研究和水资源可持续利用、水安全问题和水资源合理配置等其它研究问题的共性和特殊性,从而总结出了水资源承载力研究的自身特点和研究途径。本文研究了以下问题。

(1)系统地研究了水资源承载力的基础理论和支撑理论,将水资源承载力的研究提升到了生态经济系统的宏观层次和高度。水资源承载力研究的指导思想是可持续发展理论,研究的理论基础是生态经济系统,研究的基本框架是资源承载力的研究方法。水资源承载力的研究必须建立在可持续发展的理论框架下,按生态经济系统研究规律和各态历经假说原理,根据水资源、水环境形成和发展过程,延伸资源承载力的概念,采用系统动力学方法、多目标评价方法、层次分析方法等,分析水资源和人口、社会经济和生态环境的耦合关系,客观度量地区水资源对人口、社会经济和生态环境承载能力,进行水资源的合理配置,达到地区水资源的可持续利用。因此,水资源承载力的基础支撑理论对于提升水资源承载力研究层次、形成水资源承载力研究的系统性理论、为水资源承载力的研究和实用打下良好的理论基础有重要的作用。

(2)系统性地定义了水资源承载力的概念和内涵,重点探讨了水资源承载力的定义和量化评价的一致性,用满足或实现程度来表示水资源对人口、社会经济和生态环境的承载力,在分析了水资源承载力的结构、功能和特性的基础上,将生态环境系统纳入到水资源的直接承载对象系统。在综合考虑以往研究成果的特长和不足的基础上,创新性地提出了水资源承载力的定性定量分析相接合的量化方法,即度量指标和实现指标相结合的方法,简化和综合相结合,有效地解决了水资源承载力的度量问题。同时反映出水资源承载力是社会可持续发展和水利可持续发展的量化方法之一。

水资源承载力的研究和定义很多,但表达水资源承载力的方式大多局限于承载人口和水资源供需分析的内容,没有完全反映水资源承载人口、社会经济和生态环境的最大规模的含义,也就是说,定义水资源承载力很完善,应用起来却很困难。针对这种情况,在水资源承载力的表达方式上作了一些尝试,在研究方法上有较大的改进。

(3)通过分析水资源承载力的影响因素以及系统模型分析方法,建立了水资源承载力研究综合模型,确定了水资源承载力的基础指标量化和分类指标体系评价方法。本论文以两组测算指标即基础指标和分类指标来度量水资源承载力,基础指标包括人口和水资源供需数量的简单、明确指标;分类指标为反映水资源和承载因素之间的协调程度的一组指标体系,用静态和动态比较和分析来表示水资源承载现状和目标的人口、社会经济和生态环境发展的实现程度。最后在确立了度量和评价方法后,对量化计算方法的边

界条件进行了分析,提供了人口、社会经济、生态环境和水资源供需发展趋势的预测方法。

(4)阐述了水资源承载力指标体系的概念和作用,通过对构建方法和原则进行分析,在对可持续发展评价中广泛采用的指标体系建立方法“压力(驱动力)—状态—响应”框架的比较后,对水资源承载力构成指标进行了筛选,按水资源承载力构成因素子系统的分类方法建立了水资源承载力指标体系。指标体系的建立过程中,强调简化和可比性的原则,避免建成庞大复杂的指标体系。在建立指标体系的基础上,以层次分析为主,分析了权重、标准的方法的选择过程,确定了水资源承载力指标体系评价度量方法,

(5)根据水资源承载力内涵和构成等研究成果,对应水资源承载力的框架,有针对性地从事资源性、结构性、经济性、技术性、管理性方面入手,分析了提高资源承载力的方法和策略。提高水资源承载能力的途径包括提高水资源可持续利用的途径和水资源承载力本身构成的途径两方面的内容,主要涉及到水资源开源与节流,即从提高水资源的供给数量和提高水资源用水效率和效益两方面采取措施。

(6)在分析海河流域水资源开发利用特点的基础上,应用水资源承载力的理论、分析方法、基础指标量化计算和分类指标体系评价方法,进行了海河流域人口、水资源、社会经济和生态环境现状和发展趋势预测以及水资源供需分析。海河流域水资源供需预测与分析为流域水资源承载力的分析提供了基础数据,也为流域水资源合理配置提供了依据。通过海河流域水资源承载力量化计算和指标体系综合评价,证明了海河流域人口密集,大中城市众多,在我国政治经济中的地位重要,但水资源匮乏,水资源的短缺严重制约着流域的社会经济发展,流域内只有大力发展节水型社会和经济、合理使用水资源、进行流域外调水、海水淡化、充分利用虚拟水资源,才能摆脱缺水困境,实现水资源的可持续利用,从而促进社会可持续发展。

## 8.2 研究展望

本文尝试了水资源承载力的基础理论和综合分析方法的系统研究,在水资源承载力的表现方式和量化评价上有所创新,研究方法也具有一定的实用性,但是由于相关数据采集方面的困难,以及研究时间、篇幅和研究水平的限制,本文未能将水资源承载力所涉及到的许多问题进行深入研究,以后水资源承载力的研究还应从以下方面加深和完善。

(1)更详细划分用水部门分类和相应用水定额,以提高水资源承载力分析的精度。在本文研究水资源承载力的过程中遇到的难点之一是基础数据的收集问题,为了准确地反映某一方面和层次的问题,必须需要基础数据的支持,但相关数据缺乏或不完整,以至于不得不采用简化的处理办法,没能完全表达研究的意图。以后要加强水利、水资源以及相关经济等数据的统计、调查工作,按照现代管理的方式,掌握水资源承载力评价的基础数据、有利于分析解决水资源、社会可持续发展研究中的深层次、多关联的问题。

(2)引入水资源价值观念进行各用水部门的合理分配。水资源承载力和其它水资源



研究问题一样，目的是达到各用水部门的水资源有效配置，但如何达到这一目的，有各种见解和方法论，比较有代表性的方法是水资源价值最大的优化方法，衡量水资源的价值以及在不同部门的效益价值就成为关键问题。目前水资源价值研究还不够广泛，应用在水资源配置方面还有待于加深。在水资源短缺地区，一定水资源量是应用到工业用水还是用于生态环境用水，哪一部门更能发挥作用？是满足水资源的社会价值，还是满足水资源的经济价值？为使水资源承载力的分析更有效满足水利可持续发展的需要，以后应加大水资源价值在水资源承载力方面的应用研究。

（3）加强生态环境保护准则和生态环境用水标准研究，由于以前疏于生态环境用水的研究，目前难以准确地把握和计算生态环境用水量。生态环境用水的研究工作量很大，并且生态环境保护准则和标准随社会发展逐步得当变化和完善，本文限于内容和篇幅的原因没有详细研究和分类，也没有用到较深层次的生态环境用水理论。以后作为水资源的直接承载对象，应加大研究力度，以更能准确地反映水资源的承载状况。

（4）继续加深水资源承载力的基本理论研究，应用上，在成熟理论研究和相对定型的基础上，建立水资源承载力的计算机分析管理系统的研究。水资源承载力理论是随着社会可持续发展和水资源可持续利用研究的深入而深入的，随着理论的创新不断完善，同时为提高水资源承载力研究的实用性和方便性，提高效率，应加强水资源承载力的计算机模拟和管理研究。

## 参考文献

- [1] 钱正英,张光斗.中国可持续发展水资源战略研究综合报告[M].中国水利水电出版社,2001
- [2] 郑垂勇.水资源与国民经济协调发展研究[M].河海大学出版社,1996
- [3] 陈劭锋.承载力:从静态到动态的转变[J].中国人口·资源与环境,2003,13(1):13-17
- [4] 翁焕新.城市水资源控制与管理[M].浙江大学出版社,1998
- [5] 刘昌明,陈志恺.中国水资源现状评价和供需发展趋势分析[M].中国水利水电出版社,2001
- [6] 王春元,杨永江.水资源经济学及其应用[M].中国水利水电出版社,1999
- [7] 张修真.南水北调—中国可持续发展的支撑工程[M].中国水利水电出版社,1999
- [8] 曹利军,王华东.可持续发展评价指标体系建立原理与方法研究[J].环境科学学报,1998,18(5):526-532
- [9] Barbier, Edward B., Joanne C. Burgess and Carl Folke. Paradise lost: the ecological economics of biodiversity[J]. London: Earthscan, 1994
- [10] 王慧敏.流域可持续发展系统理论与方法[M].河海大学出版社,2000
- [11] 长江技术经济学会.长江流域的水与可持续发展[M].中国水利水电出版社,1999
- [12] 王先甲,胡振鹏.水资源持续利用的支持条件与法则[J].自然资源学报,2001,26(1):85-89
- [13] 姚愉芳等.中国经济增长与可持续发展[M].社会科学文献出版社,1999
- [14] 中国科学院可持续发展研究组.2003 中国可持续发展战略报告[M].科学出版社,2003
- [15] 莱斯特.R.布朗.生态经济[M].东方出版社,2002
- [16] 刘昌明,何希吾等.中国 21 世纪水问题方略[M].科学出版社,2001
- [17] 曹凤中,金鉴明,周国梅.环境与可持续发展[M].中国科学技术出版社,1999
- [18] 杨云彦.人口,资源与环境经济学[M].科学出版社,1999
- [19] 冯尚友.水资源持续利用与管理导论[M].科学出版社,2000
- [20] 陈传友,王春元,龚以松.水资源与可持续发展[M].中国科学技术出版社,1999
- [21] 卞艺杰.中国水利可持续发展理论与方法[M].河海大学博士论文,2000
- [22] 杨培岭.水资源经济[M].中国水利水电出版社,2003
- [23] 贾绍凤,王国等.社会经济系统水循环研究进展[J].地理学报,2003,3,58(2):255-262
- [24] 朱一中.关于水资源承载力理论与方法的研究[J].地理科学进展,2002,21(2):180-188
- [25] 李令跃,甘泓.试论水资源合理配置和承载能力概念与可持续发展之间的关系[J].水科学进展 2000,9,11(3):307-313
- [26] 中国科学院可持续发展研究组.2001 中国可持续发展战略报告[M].科学出版社,2001
- [27] 姚治君,王建华,江东等.区域水资源承载力的研究进展及其理论探析[J].水科学进展, 2002,13(1):111-115
- [28] Hunter C.Perception of the sustainable city and implications for fresh water resources management[J].Environment and Pollution,1998,10(1):84-103.
- [29] Falkenmark M,Lundqvst J.Towards water security:political determination and human adaptation crucial [J]. Natural Resources Forum,1998,21(1):37-51.
- [30] 龙腾锐,姜文超,何强.水资源承载力内涵的新认识[J].水利学报,2004,(1)
- [31] 王建华,江东等.水资源承载力的概念与理论[J].甘肃科学报,1999,6,11(2):1-4
- [32] Irmi Seidl, Clem A. Tisdell. Carrying capacity reconsidered: from Malthus' population theory to cultural carrying capacity. Ecological Economics [J] 1999,31 395 – 408

- [33] William E. Rees. Revisiting Carrying Capacity: Area-Based Indicators of Sustainability [J]. Population and Environment, 1996,17(3)
- [34] 张鑫,李援农,王纪科.水资源承载力研究现状及其发展趋势[J].干旱地区农业研究, 2001,19(2):117-121
- [35] Arrow K,Bolin B,Costanza R, et al.Economic growth, carrying capacity and the environment[J]. Science, 1995,268:520-521.
- [36] The United Nations Population Division, Department for Economic and Social Information and Policy Analysis.Population and the Environment in Developing Countries: A Literature Survey and bibliography[M].The United Nations Population Division,1994.
- [37] 程国栋.承载力概念的演变及西北水资源承载力的应用框架[J].冰川冻土,2002,24(4):361-367
- [38] 丹尼斯·米都斯等.增长的极限——罗马俱乐部关于人类困境的报告[M].科学出版社,1972
- [39] Souro D.Joardar. Carrying Capacity and Standards as Bases Towards Urban Infrast. Planning in India [J]. Habitat Intl.1998,22(3):327-337
- [40] Jonathan M. Harris, Scott Kennedy. Carrying capacity in agriculture: global and regional issues [J]. Ecological Economics, 1999,29:443-461
- [41] Michiel A. Rijsberman. Different approaches to assessment of design and management of sustainable urban water systems [J]. Environmental Impact Assessment Review,2000,20:333-345
- [42] Hardin G.Cultural carrying capacity: a biological approach to human problems[J]. BioScience,1986,36(9): 599-604.
- [43] Daily G C,Ehrlich P R.Socioeconomic equity,sustainability, and Earth's carrying capacity[J]. Ecological Applications,1996,6(4):991-1001.
- [44] G. Saro and A. Mazzola. The carrying capacity for Mediterranean bivalve suspension feeders: evidence from analysis of food availability and hydrodynamics and their integration into a local model [J]. Ecological Modelling, 2004,179(11):281-296
- [45] Albert G. J. Tacon. Aquafeeds and the environment: policy implications [J]. Aquaculture, 2003,226(10):181-189
- [46] Antonio Leone and Renzo Marini. Assessment and Mitigation of the Effects of Land Use in a Lake Basin (Lake Vico in Central Italy) [J]. Journal of Environmental Management, 1993,39(9):39-50
- [47] Willem Van Vliet. Sustainable development, global restructuring and immigrant housing [J]. Habitat International, 1996,20(9):349-358
- [48] Roy O. Greep. Whither the global population problem [J]. Biochemical Pharmacology, 1998,55(2):383-386
- [49] Satoru Okubo, Kazuhiko Takeuchi. Land characteristics and plant resources in relation to agricultural land-use planning in a humid tropical strand plain, southeastern Thailand [J]. Landscape and Urban Planning, 2003,65(10):133-148
- [50] Richard C. Smardon. Water recreation in North America [J]. Landscape and Urban Planning, 1988,16(10):127-143
- [51] Antje Burke. Range management systems in arid Namibia—what can livestock numbers tell us? [J]. Journal of Arid Environments, 2004,59(10): 387-408
- [52] Michael A. Larson, Frank R. Thompson III. Linking population viability, habitat suitability, and landscape simulation models for conservation planning [J]. Ecological

Modelling, 2004,180(12):103-118

[53] R.L. Burdett and E. Kozan. Techniques for absolute capacity determination in railways [J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2005,11

[54] F.Szabo. Study on peat bog soil pastures for sustainable development of beef cattle farming [J]. Livestock Production Science, 1999,61(10):253-260

[55] National Academies. A Review of the Florida Keys Carrying Capacity Study (2002)[M]. National Academy Press, 2002

[56] J. Kammerbauer, B. Cordoba. Identification of development indicators in tropical mountainous regions and some implications for natural resource policy designs: an integrated community case study [J]. Ecological Economics, 2001,36:45-60

[57] D. Sun and D. Walsh. Review of studies on environmental impacts of recreation and tourism in Australia [J]. Journal of Environmental Management, 1998,53:323-338

[58] Wetzel, Kurt R. and John F. Wetzel. Sizing the earth: recognition of economic carrying capacity[J]. Ecological Economics 1995,12:13-21.

[59] No water no future : A water focus for Johannesburg

[60] Kyushik Oh, Yeunwoo Jeong. Determining development density using the Urban Carrying Capacity Assessment System [J]. Landscape and Urban Planning, 2005,1(8):1-15

[61] Neil Mitchell, Peter Espie. Rational landscape decision-making: the use of meso-scale climatic analysis to promote sustainable land management [J]. Landscape and Urban Planning, 2004,67(3):131-140

[62] Shaleen Singhal. Industrial estate planning and management in India—an integrated approach towards industrial ecology [J]. Journal of Environmental Management, 2002,66(9):19-29

[63] Anthony J McMichael. Population, environment, disease, and survival: past patterns, uncertain futures [J]. The Lancet, 2002,359(3):1145-1148

[64] Roberta Capello and Alessandra Faggian . An economic-ecological model of urban growth and urban externalities: empirical evidence from Italy [J]. Ecological Economics, 2002,40(2):181-198

[65] Dieter Schuller. Sustainable land use in an agriculturally misused landscape in northwest Germany through ecotechnical restoration by a ‘ Patch-Network-Concept ’ [J]. Ecological Engineering, 2000,16(10): 99-117

[66] Gerhardus Schultink. Critical environmental indicators: performance indices and assessment models for sustainable rural development planning [J]. Ecological Modelling, 2000,130(6):47-58

[67] Jeroen C. Spatial sustainability, trade and indicators: an evaluation of the ‘ ecological footprint ’ [J]. Ecological Economics, 1999,29(4):61-72

[68] Asa Sundkvist, AnnMari Jansson, Energy flow analysis as a tool for developing a sustainable society: a case study of a Swedish island [J]. Resources, Conservation and Recycling, 1999,25(3): 289-299

[69] P. Khanna, P. Ram Babu. Carrying-capacity as a basis for sustainable development a case study of National Capital Region in India[J]. Progress in Planning, 1999,52:101-166

[70] Kathryn B. Bicknell, New methodology for the ecological footprint with an application to the New Zealand economy [J]. Ecological Economics, 1998,27(11):149-160

[71] Jan A. Assies. A risk-based approach to life-cycle impact assessment [J]. Journal of

Hazardous Materials, 1998,61(8):23-29

[72] P. Khanna. Policy options for environmentally sound technology in India [J]. Water Science and Technology, 1996,33:131-144

[73] R. S. S. Wu. The environmental impact of marine fish culture: Towards a sustainable future [J]. Marine Pollution Bulletin, 1995,31(12):159-166

[74] Ernest A. Lowe and Laurence K. Evans. Industrial ecology and industrial ecosystems [J]. Journal of Cleaner Production, 1995,3: 47-53

[75] J. J. Kessler. Usefulness of the human carrying capacity concept in assessing ecological sustainability of land-use in semi-arid regions [J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 1994,48(4):273-284

[76] Daniel I. Carey. Development based on carrying capacity: A strategy for environmental protection [J]. Global Environmental Change, 1993,3(6):140-148

[77] R.E.Munn. Towards sustainable development [J]. Atmospheric Environment, 1992,26(10):2725-2731

[78] Bill Hare. Environmental impact assessment: broadening the framework [J]. The Science of The Total Environment, 1991,108(10):17-32

[79] Bryan Robert Jenkins. Changing Australian monitoring and policy practice to achieve sustainable development [J]. The Science of The Total Environment, 1991,108(10):33-50

[80] J.O. Ngana, R. B. B. Mwalyosi, Strategic development plan for integrated water resources management in Lake Manyara sub-basin, North-Eastern Tanzania [J]. Physics and Chemistry of the Earth, 2004,29:1219-1224

[81] Progressive AE. Four Township Environmental Carrying Capacity Study[M]. 2002

[82] Giuseppe Munda. Social multi-criteria evaluation for urban sustainability policies [J]. Land Use Policy, 2004,9

[83] Lawrence A. Kapustka. Rationale for Use of Wildlife Habitat Characterization to Improve Relevance of Ecological Risk Assessments [J]. Human and Ecological Risk Assessment, 2003,9(11):1425-1430

[84] Tony Prato. Modeling carrying capacity for national parks[J]. Ecological Economics, 2001,39(9):321-331

[85] Scott D. Wright and Dale A. Lund. Gray and green?: stewardship and sustainability in an aging society [J]. Journal of Aging Studies, 2000,14(9):229-249

[86] Olaf Bastian. Landscape classification in Saxony (Germany) — a tool for holistic regional planning [J]. Landscape and Urban Planning, 2000,50(8):145-155

[87] Ulrich E. Loening. The ecological challenges to population growth[J]. Transactions of the Royal Society of Tropical Medicine and Hygiene, 1993,87(4):9-12

[88] Bobbi Low, Robert Costanza. Human—ecosystem interactions: a dynamic integrated model [J]. Ecological Economics, 1999,31(11):Pages 227-242

[89] Perrin S. Meyer and Jesse H. Ausubel. Carrying Capacity: A Model with Logistically Varying Limits[J]. Technological Forecasting and Social Change, 1999,3(7):209-214

[90] 张丽,董增川.流域水资源承载能力浅析[J].中国水利,2002

[91] 龙腾锐,姜文超.水资源(环境)承载力的研究进展[J].水科学进展,2003,14(2):249-253

[92] 新疆水资源软科学课题组.新疆水资源及其承载力的开发战略对策[J].水利水电技术,1989,(6)29

[93] 许有鹏.干旱区水资源承载能力综合评价研究[J].自然资源学报,1993,8(3):229-237

- [94] 王浩等.西北地区水资源合理配置和承载能力研究[M].黄河水利出版社,2003
- [95] 阮本青,沈晋.区域水资源适度承载能力计算研究[J].土壤侵蚀与水土保持学报,1998,4(3):57-61
- [96] 惠洪河,蒋晓辉等.水资源承载力评价指标体系研究[J].水土保持通报,2000,21(1):30-34
- [97] 夏军.水资源安全的度量:水资源承载力的研究与挑战[J].海河水利,2002(2),(3)
- [98] 张鑫,王纪科.区域地下水资源承载力综合评价研究[J].水土保持通报,2001,21(3):24-27
- [99] 崔凤军.城市水环境承载力及实证研究[J].自然资源学报,1998,13(1):58-62
- [100] 贾嵘,蒋晓辉,薛惠峰等.缺水地区水资源承载力模型研究[J].兰州大学学报(自然科学版),2000,36(2):114-121
- [101] 王在高,梁虹.岩溶地区水资源承载力指标体系及其理论模型初探[J].中国岩石,2001,6,20(2):144-149
- [102] 余卫东,闵庆东.水资源承载力研究的进展与展望[J].干旱区研究,2003,20(1):60-65
- [103] 贾嵘,薛惠峰.区域水资源承载力研究[J].西安理工大学学报,1998,14(4):282-387
- [104] 韩俊丽.城市水资源承载力研究现状及其趋势[J].资源开发与市场,2004,20(5):353-355
- [105] 唐曲.民勤盆地水资源承载力指标体系及评估[J].自然资源学报,2004,5(9):672-678
- [106] 徐良芳,孙德华.区域水资源承载力计算问题探讨[J].水电能源科学,2005,2(4):23-25
- [107] 雷学东.区域水资源承载力研究现状与发展趋势[J].水资源与水工程学报,2004,3(9):10-15
- [108] 贺中华,梁虹.岩溶地区枯水资源承载力概念与理论的讨论[J].水资源研究,2004,4(12):1-4
- [109] 傅湘,纪昌明.区域水资源承载能力综合评价[J].长江流域资源与环境.1999,8(2):168-172
- [110] 毛汉英,余丹林.区域承载力定量研究方法探讨[J].地球科学进展,2001,8,16(4):549-555
- [111] 陈兴鹏,戴芹.系统动力学在甘肃省河西地区水土资源承载力中的应用[J].干旱区地理,2002,25(4):377-382
- [112] 孟凡德,王晓燕.北京市水资源承载力的现状及驱动力分析[J].首都师范大学学报(自然科学版).2004,3(9):P100-105
- [113] 邱林.区域水资源承载力分析[J].华北水利水电学院学报,2005,1(3):10-12
- [114] 陈进,黄薇.水资源承载力的弹性区间[J].长江科学院院报,2004,6[12]:65-68
- [115] 王友贞等.区域水资源承载力评价指标体系的研究[J].自然资源学报,2005,4(7):598-604
- [116] 葛新权等.知识与可持续发展[M].社会科学文献出版社,1999
- [117] 中国21世纪议程.国21世纪人口,环境与发展白皮书[M].中国环境科学出版社,1994
- [118] 吴季松,水资源及其管理的研究与应用[M],中国水利水电出版社,2000
- [119] Ni-Bin Chang. A fuzzy multi-objective programming approach for optimal management of the reservoir watershed [J]. European Journal of Operational Research, 1997,99(7):289-302
- [120] 马光.环境与可持续发展导论[M].科学出版社,2003
- [121] 匡耀求,孙大中.基于资源承载力的区域可持续发展评价模式探讨,对珠江三角洲经济区可持续发展的初步评价[J].热带地理,1998,9,18(3):249-255
- [122] 张帆.环境与自然资源经济学[M].上海人民出版社,1997
- [123] 郭秀锐,毛显强.中国土地承载力计算方法研究综述[J].地球科学进展,2000,12:705-711
- [124] 陈玉舟.我国土地的数量、质量和承载力[J].乡村经济,2002,3:14-16
- [125] 封志明.区域土地资源承载能力研究综述[J].自然资源学报.1990,5(3).271-283
- [126] 王书华等.土地综合承载力指标体系设计及评价[J].自然资源学报,2001,16(3):248-254
- [127] 陈百明.中国土地资源生产能力及人口承载量研究项目方法论概述[J].自然资源学报,1991,6(3):197-205
- [128] 王书华等.略论土地综合承载力评价指标体系的设计思路[J].人文地理,2001,16(4):57-61

- [129] 王玉平,卜善祥.中国矿产资源经济承载力研究[J].煤炭经济研究,1998,12:15-20
- [130] 都沁军,郝英军.我国矿产资源可持续开发利用战略对策[J].中国人口·资源与环境,2001,11(2):132-134
- [131] 崔凤军,刘家明等.旅游承载力指数及其应用研究[J].旅游学刊,1998,3:41-45
- [132] 崔凤军.论旅游环境承载力[J].1995,3,15(1):105-109
- [133] 舒晶.旅游承载力及测度[J].北京第二外国语学院学报,2001,3:14-19
- [134] 刘玲.旅游环境承载力研究方法初探[J].安徽师大学报,1998,9,21(3):251-254
- [135] 李天元.关于旅游承载力理论应用问题的思考[J].南开管理评论,2001,3:57-60
- [136] 姜文来.水资源价值论[M].科学出版社,1999
- [137] 沈国舫,王礼先.中国生态环境建设与水资源保护利用[M].中国水利水电出版社,2001
- [138] 姚志勇.环境经济学[M].中国发展出版社,2002
- [139] 鲁传一.资源与环境经济学[M].清华大学出版社,2004
- [140] 邱东.多指标综合评价方法的系统分析[M].中国统计出版社,1991
- [141] 杨志峰等.生态环境需水量理论、方法与实践[M].科学出版社,2003
- [142] 王志民,任宪韶,郭宏宇.面向 21 世纪的海河水利[M].天津科学技术出版社,2000
- [143] 王志民,任宪韶,曹寅白.海河流域水资源管理研究[M].天津科学技术出版社,2001
- [144] Peter H. Gleick. 世界之水[M].中国农业大学出版社,2000
- [145] 左其亭,陈羲.面向可持续发展的水资源规划与管理[M].中国水利水电出版社,2003
- [146] 乔西现.西北地区水资源配置与管理的思考[J].西北水资源与水工程,2000,11(4):51-56
- [147] 牟海省,刘昌明.我国城市设置与区域水资源承载力协调研究[J].地理学报,1994,49(1):338-344
- [148] 张首一.市场经济与经济预测[M].社会文献出版社,2000
- [149] 中国科学院可持续发展研究组.2004 中国可持续发展战略报告[M].科学出版社,2004
- [150] 陈安宁.资源可持续利用.一种资源利用伦理原则[J].自然资源学报,2001,116(1):65-70
- [151] 赵建世.水资源复杂适应配置系统的理论与模型[J].地理学报,2002,11,57(6):639-647
- [152] 王建华,江东等.基于 SD 模型的干旱区域水资源承载力预测研究[J].地理学与国土研究,1999,15(2):18-22
- [153] 曹型荣.城市水资源的调查利用和预测[M].中国环境科学出版社,1996
- [154] 仝川.环境指标研究进展与分析[J].环境科学研究,2000,4,13(4):53-55
- [155] 施雅风,曲耀光.乌鲁木齐流域水资源承载力及其合理利用[M].北京科学出版社,1992
- [156] 贾振邦,赵智杰等.本溪市水环境承载力指标体系[J].环境保护科学,1995,21(3):8-11
- [157] 徐中民.情景基础的水资源承载力多目标分析理论及应用[J].冰川冻土,1999,21(2):100-106
- [158] 蒋晓辉,黄强等.关中地区水环境承载力研究[J].环境科学学报,2001,21(5):312-317
- [159] 张鑫等.关于水资源承载力研究中几个问题的探讨[J].水文水资源,2000,21(4):35-36
- [160] 傅春等.水利现代的内涵及评价指标体系的建立[J].水科学进展,2002,7,13(4):502-506
- [161] 陈传美.郑州市水资源承载力与可持续利用对策研究[J].水利经济,1999,2:15-18
- [162] 冯耀龙,韩文秀,王宏江等.区域水资源承载力研究[J].水科学进展,2003,14(1):109-113
- [163] 陈冰,李丽娟等.柴达木盆地水资源承载方案系统分析[J].环境科学,2003,5,21(3):16-21
- [164] 魏斌,张霞.城市水资源合理利用分析与水资源承载力研究[J].城市环境与城市生态,1995,8(4):19-24
- [165] 张戈平,朱连勇.水资源承载力研究理论及方法初探[J].水土保持研究,2003,10(2):148-150
- [166] 曲耀光,樊胜岳.黑河流域水资源承载力分析计算与对策[J].中国沙漠,2000,20(1):1-8

## 攻读博士学位期间发表的论文和主要科研情况

- 1、孙富行、郑垂勇，水资源承载力研究方法和思路，人民长江，2006（2）
- 2、孙富行、郑垂勇、王志红，水资源承载力量化和评价方法，水利水电技术，2006（3）
- 3、孙富行、郑垂勇、王志红，水资源承载力综合分析方法，人民黄河，2006（1）
- 4、孙富行，水资源承载力支撑理论探讨，海河水利，2003（3）
- 5、唐涛、孙富行、张彬，水利工程设计招标投标若干问题浅析，海河水利，2002（3）
- 6、孙富行，水利工程管理资金配置方式，水利水电工程设计，2002（1）
- 7、孙富行，资源水利与水资源可持续发展，水利水电工程设计，2000（4）

### 科研项目：

- 1、水利部水土保持工程概算定额，黄河出版社，2003
- 2、水土保持工程概算编制指南，黄河出版社，2003
- 3、水利工程标底编制指南，中国水利出版社，2004
- 4、西藏自治区水利工程概预算编制规定和定额，黄河出版社，2003
- 5、新疆自治区水利工程概预算编制规定和定额，新疆科技出版社，2005



## 致 谢

本文是在导师郑垂勇教授的悉心指导下完成的。从论文的选题、构思、框架安排，及对现实问题的把握，无不凝聚着导师的智慧和心血。导师渊博的知识、深厚的学术造诣、宽广的思路、忘我的工作热情及无私助人的品格使我终生受益。在此，谨向导师致以衷心的感谢和真诚的敬意。

感谢河海大学研究生院的领导及老师们。

感谢河海大学史安娜老师、葛久研老师、陆晓平老师、王慧敏老师、印凡成老师、赵敏老师给予的指导和帮助。

感谢水利部海河水利委员会、水利部天津勘测设计研究院的领导提供继续深造的机会和给予的关心。

感谢各位师兄弟给予我极大的支持和鼓励，特别感谢赵启林博士、程书萍博士、姚纬明博士、许圣斌博士、周明耀博士、王林锁博士、何见得博士、唐涛博士、杨汉成博士、程娟博士、王华博士、陈斌博士、苏茂林博士、朱春龙博士、王栋博士、童纪新博士等，他们是我真诚的朋友和学习的榜样。

最后还要特别感谢家人多年来的鼓励与支持，使我能顺利完成学业。