

黑河中游典型灌区水资源供需平衡及其安全评估

吉喜斌¹, 康尔泗¹, 赵文智^{1,2}, 陈仁升¹, 肖生春¹, 金博文^{1,2}

(¹中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 兰州 730000; ²国家生态网络临泽内陆河流域综合研究站, 临泽 734200)

摘要: 结合黑河干流高崖水文站至平川大桥水文站区域的气象、水文、土壤、植被、种植结构、经济发展等资料建立黑河中游典型灌区水资源供需平衡模式, 并对其进行安全评估。结果表明, 黑河分水对中游典型灌区的影响主要表现在地表水利用量减少、地下水开采量增加、地下水水位逐年下降。现状年地下水开潜力很小, 甚至有些灌区开采潜力严重不足, 超采严重。现状年各灌区水资源供需平衡都已经接近安全警戒线, 平川灌区已经超过安全警戒线, 若今后在水资源管理、地表水和地下水统一调度、农业节水等方面没有重大突破, 黑河流域水资源和生态环境安全问题将更加复杂化。

关键词: 黑河中游; 典型灌区; 水资源供需平衡; 安全评估

Analysis on Supply and Demand of Water Resources and Evaluation of the Security of Water Resources in Irrigation Region of the Middle Reaches of Heihe River, Northwest China

JI Xi-bin¹, KANG Er-si¹, ZHAO Wen-zhi^{1,2}, CHEN Ren-sheng¹,

XIAO Sheng-chun¹, JIN Bo-wen^{1,2}

(¹Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000;

²Linze Inland River Basin Comprehensive Research Station, Chinese Ecosystem Network Research, Linze 734200)

Abstract: The model of supply and demand of water resources was established, combined with meteorological, hydrological, soil condition, planting industry structure, vegetation and economic development of irrigation region in the middle reaches of Heihe river, northwest China to develop a calculation and evaluation model of regional supply and demand of water resources. After unified management of water resources in Heihe river basin between Gansu Province and Inner Mongolia in China, the amount of surface water from Heihe river decreased and that of groundwater increased, the volume of groundwater mining is increasing and the groundwater table is rising in studied regions now. The groundwater exploitation potential of irrigation region is less than the permissible utilization volume of groundwater, groundwater overdraft is remarkable in irrigation region. This paper has also proposed the measures to meet water security in the middle stream and related suggestion has been raised to guarantee this balance. It is found that water supply and water demand was safe in 1997, but water supply was not safe in 2003. If the water resources management, surface water and groundwater planning, the patterns and techniques of optimum utilization of water and land in this region would be tackled, the problem of the security of supply and demand of water resource and eco-environment is confronted with the baptism of Heihe river basin.

Key words: The middle reaches of Heihe river; Irrigation region; Water resources supply and demand balance; Evaluation on the security of water resources

为遏制黑河下游生态环境的恶化和解决突出的水事矛盾, 国家决定对黑河流域水资源实施统一管理和

调度, 并成功实施了 1999~2004 年 5 次水量调度^[1]。自实施甘蒙黑河集中调水方案以来, 下游额济纳旗核

收稿日期: 2004-12-27

基金项目: 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所知识创新工程项目(CACX2003102)、中国科学院知识创新工程方向性项目(KZCX3-SW-329)、国家自然科学基金(40401012)、中科院寒区旱区环境与工程研究所知识创新项目(2004112)资助

作者简介: 吉喜斌 (1978-), 男, 甘肃静宁人, 博士, 主要从事水文、水资源及生态水文学研究。Tel: 0931-4967156; E-mail: xuanzhij@ns.lzb.ac.cn

心绿洲生态环境恶化的状况初步得到缓解,为应对更加严峻的新一轮水资源危机,黑河中游采取遍地开花式的打井灌溉,地下水开采增加,引用地表水量减少,使黑河流域水资源和生态环境安全问题更加复杂化^[2]。

以历史来水过程为基础的水资源合理调配方案不能直接应用于水资源调度实践。因此,合理完善的水资源调配中最重要的还是要以预测预报信息为参考,以当年区域水资源供需平衡为基础,以合理配置方案及其提供的规则为决策依据,在决策过程辅以滚动修正的水资源实时调度^[3]。从空间分布考虑,如果对选取一个大而广泛的区域进行水资源供需平衡计算,所得出的结论其实际意义十分有限^[3]。从系统论观点出发,遵循流域水资源可再生演变机制、水分—生态演替驱动机制和水分—经济的互动机制^[4-6],合理高效配置水资源,是黑河水资源调配总框架下中游灌区可持续发展的根本出路^[7]。

1 研究区概况

研究区位于中国内陆河黑河中游干流灌区高崖水文站至平川大桥水文断面之间,属于河西走廊中段山前绿洲河谷平原,由平川灌区、板桥灌区、鸭暖灌区和蓼泉灌区组成,如图 1 所示。区间黑河长 42.6 km,总面积 399.1 km²,地理坐标:东经 99°57′~100°22′;北纬 39°08′~39°23′。平均海拔 1 300~1 800 m,地势北高南低,东高西低。其气候属于大陆性温带干旱气候,多年平均降水 119.5 mm,约 60%的降雨集中在 7、8、9 月份,只有 3%集中在冬季,降雨强度很弱。年潜在蒸发量 2 365.6 mm,约为降雨量的 20 余倍,干燥指数为 15.9。年平均气温为 7.6℃,最高达 39.1℃,最低为-27℃,≥10℃的年积温为 3 088℃。各灌区社会经济基本概况如表 1 所示。

2 灌区水资源供需平衡分析

2.1 区域水资源可利用量

水资源可利用量应用水资源系统模拟模型计算。发源于祁连山的黑河及其支流梨园河是流经该区域的主要河流,采用 1948~1999 年总计 52 年的高崖水文

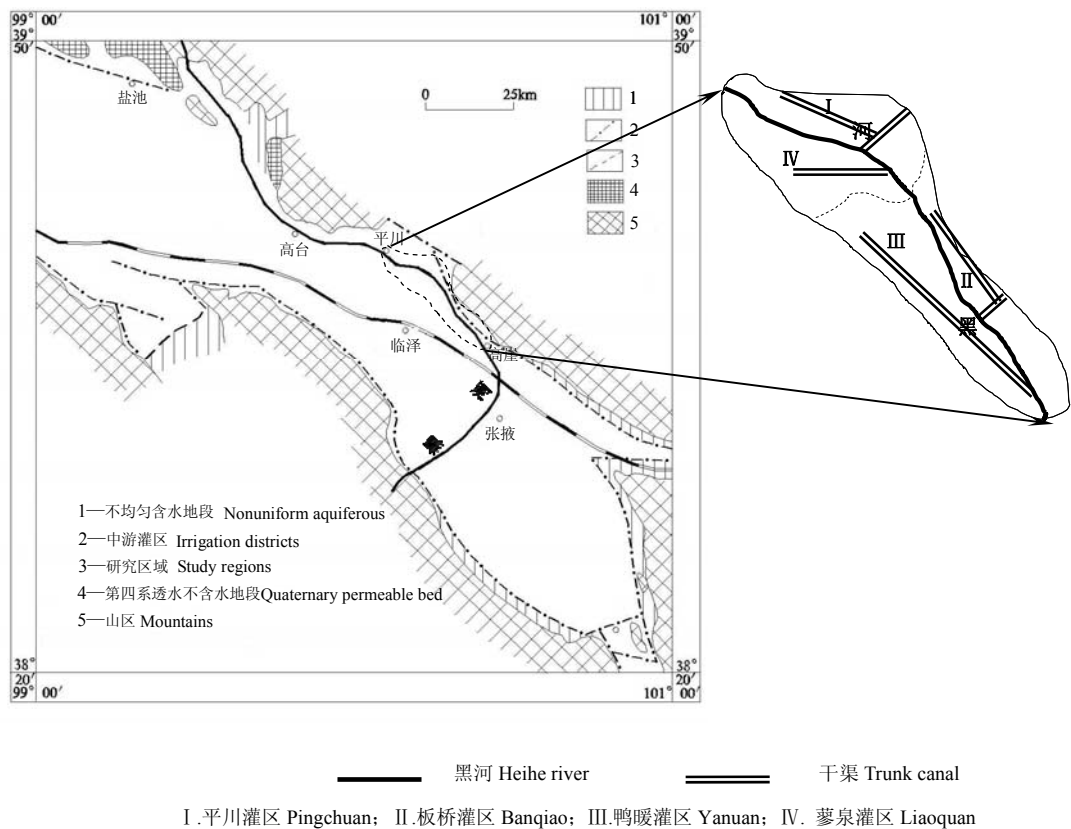


图 1 研究区示意图

Fig. 1 The map of schematic view in studied regions

表 1 研究区社会经济概况

Table 1 General situation of society and economy in studied regions

灌区名称	年份	人口	耕地面积	灌溉面积	牲畜	工业产值	林草面积
Name of the irrigation region	Year	Population	Agricultural acreage (ha)	Irrigated area (ha)	Live-stock	Output value of industry (Yuan)	Protected ecological area (ha)
平川灌区 Pingchuan	1997	21 558	3 000.0	2 800.0	10 360	329.7	3 200.0
	1999	21 634	3 000.0	2 733.3	10 360	537.3	3 200.0
	2003	21 753	3 000.0	2 600.0	10 260	1392.1	3 533.3
板桥灌区 Banqiao	1997	17 410	2 666.7	2 666.7	10 005	532.3	2 200.0
	1999	17 423	2 666.7	2 666.7	10 005	771.9	2 200.0
	2003	17 466	2 666.7	2 666.7	9 977	1614.0	2 266.7
鸭暖灌区 Yanuan	1997	11 482	1 866.7	1 466.7	5 426	321.0	866.7
	1999	11 497	1 866.7	1 466.7	5 426	494.8	866.7
	2003	11 532	1 866.7	1 466.7	5 426	827.2	1 133.3
蓼泉灌区 Liaoquan	1997	17 921	2 266.7	1 933.3	8 990	271.6	1 200.0
	1999	17 935	2 266.7	1 933.3	8 990	369.4	1 200.0
	2003	18 046	2 266.7	1 866.7	8 990	960.0	1 400.0

站径流量资料进行频率分析计算，确定保证率 $P=25\%$ 、 $P=50\%$ 、 $P=75\%$ 、 $P=95\%$ 的高崖水文站径流量分别为 $1.183\times10^9\text{ m}^3\cdot\text{a}^{-1}$ 、 $9.86\times10^8\text{ m}^3\cdot\text{a}^{-1}$ 、 $8.17\times10^8\text{ m}^3\cdot\text{a}^{-1}$ 、 $6.32\times10^8\text{ m}^3\cdot\text{a}^{-1}$ ，根据内陆河流水文特征的分析^[6]，表明平川水文站与高崖水文站具有相同的频率。确定现状水文年为 2003 年 8 月 1 日~2004 年 7 月 31 日（下称现状年），现状年高崖水文站总径流量为 $1.258\times10^9\text{ m}^3$ ，平川大桥断面流量为 $1.012\times10^9\text{ m}^3$ ，梨园河入境水量为 $0.44\times10^8\text{ m}^3$ 。

河源来水具有年际间呈丰、枯变化和年内分配不均匀的水文特征，如图 2 所示。年度内 7~9 月黑河及梨园河入境水量占全年径流量的 43.86%、64.85%，作物生长期的 4~6 月仅占 17.35%、25.96%，局部形

成卡脖子旱，枯水年尤为严重。随着黑河草滩庄引水枢纽的建成，即黑河东、西总干渠的完全建成通水，在极大改善了中游灌溉条件的同时，高崖水文站过境水量将有所减少。尤其是枯水年总干渠引水比例较大，下泄至高崖站水量明显减少。研究区现有中、小型水库 3 座，引水干渠 10 条，主要引用黑河干流河（泉）水及梨园河经水库调节后纳入研究区外渠系并用于灌溉后的泄洪量。

地下水可利用量以各单元对地下水资源的利用能力来确定，以各单元地下水允许开采量为上限。据此，确定了平川、板桥、鸭暖、蓼泉的现状允许开采量和规划允许开采量依次为 $6.577\times10^6\text{ m}^3\cdot\text{a}^{-1}$ 和 $3.805\times10^6\text{ m}^3\cdot\text{a}^{-1}$ 、 $3.254\times10^6\text{ m}^3\cdot\text{a}^{-1}$ 和 $2.076\times10^6\text{ m}^3\cdot\text{a}^{-1}$ 、

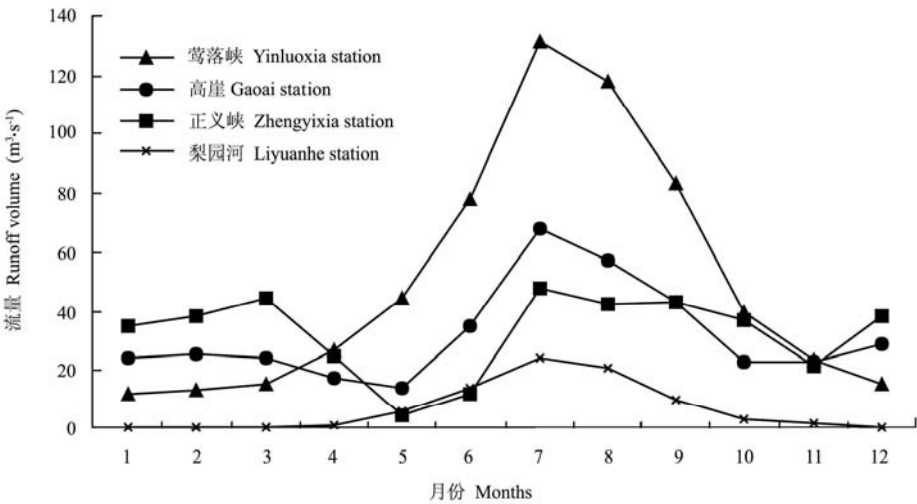


图 2 区域河流历年月平均径流量

Fig. 2 The average monthly runoff changes at different stations in studied regions

$7.294 \times 10^6 \text{ m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$ 和 $4.633 \times 10^6 \text{ m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$ 、 $1.0508 \times 10^7 \text{ m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$ 和 $6.703 \times 10^6 \text{ m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$ ，即 2003 年以前地下水允许开采量为现状开采量，2010 年采用规划开采量。

2.2 水资源供需平衡分析

各灌区水资源需水包括生态环境需水、人类生活用水、工业需水和农业需水。农业需水是指农田耗水，农田耗水量主要表现为植物蒸腾和土壤蒸发。本文采用 Penman-Montieth 的潜在蒸散公式求得农田的潜在蒸散量^[8,9]。对具体某种作物的农田潜在蒸散量，由农田潜在蒸散量乘以作物系数得到，对于某一具体的作物，其整个生育期的需水量等于该作物在各个生育阶段的作物系数与同期参考作物潜在蒸散量乘积的和。工业需水统计用万元产值用水定额估算，1997 年工业万元产值用水量 237 m^3 。按照黑河流域 2015 年远景规划以及临泽县 2010 年远景规划，2010 年万元产值用水量增加到 398 m^3 ，因此，现状年采用 362 m^3 。居民生活需水分城镇居民与农村居民生活用水，城镇居民生活用水包括生活用水、消防、绿化、机关、学校、医院等公共设施用水；农村生活用水包括农村家庭生活需水和农村家养牲畜需水两部分。计算居民生活用水通常用当地人（畜）均用水标准来计算，1997 年、现状年和 2010 年城镇居民人均生活用水分别为 198 、 204 和 $215 \text{ L} \cdot \text{d}^{-1}$ ，农村人均用水分别为 50 、 55 和 $83 \text{ L} \cdot \text{d}^{-1}$ ；大牲畜每头 $40 \text{ L} \cdot \text{d}^{-1}$ ，小牲畜每只 $6.7 \text{ L} \cdot \text{d}^{-1}$ 。农田净灌水定额为 $7\,020 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$ ，水分利用效率上限为 62%。生态需水采用生态分区与水资源分区叠加分析原理进行计算。首先确定流域各级生态分区的面积及其耗水规律，然后通过叠加分析确定各灌区每一块土地面积及其隶属的生态分区，从而确定人工绿洲和天然绿洲生态用水^[10,11]。人工绿洲的用水包括护田林网、乔灌木防沙林带、灌木、草地防蚀带及为保护天然植被所必须的薪炭林和用材林等的用水；天然生态用水包括河谷林的生态用水等。高盖度草地生物量干重定额取 $243.6 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ ，沼泽、滩地 $243.6 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ ，中度草地 $128.9 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ ，低盖度草地 $71.3 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ ，有林地和灌木林 $306.5 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ ；荒漠、戈壁等盖度小 5% 的难利用土地生产力定额 $14.3 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ 。水分生产效率为 $1.05 \sim 10.05 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{mm}^{-1}$ ^[10,12]。本次计算根据各研究区的总蒸发量，反推各种植被水分生产效率均值，对没有总蒸发量的地区，用相近条件地区的水分生产效率代替。由降水和径流共同支撑的非地带性植被，其可控植被耗水量通过计算不同植被类型对应的潜水蒸发量来确定，不可控植被耗水计算采用所在地区的降水

量，其它年份采用临泽县当年统计年鉴以及 2010 年远景规划指标计算得到。

据此，对各灌区不同水平年、不同保证率的水资源供需平衡进行了计算，结果如表 2 所示。从表 2 可以看出，1997 年，若高崖水文站保证率 $P=50\%$ ，不同水平年的各灌区水资源供给都有盈余； $P=75\%$ 时，除板桥灌区水资源供给稍有盈余外，其它灌区水资源供给都出现亏缺； $P=95\%$ 时，各灌区供给都亏缺。说明黑河中游典型灌区水资源供需平衡主要受到上游来水的影响。2000 年和 2003 年，甘、蒙之间实施政策性分水，黑河中游地表水资源可利用量减少，当 $P=50\%$ ，实际引用河水减少 10% 左右，开采地下水水资源增加 50% 的情况下，水资源供需基本达到平衡；当 $P=75\%$ ，各典型灌区可利用水资源都有不同程度的短缺，水资源供给出现亏缺；当 $P=90\%$ ，各典型灌区水资源供给亏缺严重。1997 年与 2003 年比较，可引用河水灌溉量减少 13% 以上，地下水灌溉增加 157.6% 左右。随着国家节水型社会在张掖节试点的不断推进，中游灌区农业种植业结构变化，水资源利用率提高，各种节水技术的应用，在各灌区退耕还林还草面积为现在耕地面积的 10%、渠系水资源利用效率增大到 62%、农业种植全面节水 20%，工业万元产值耗水增加到 189 m^3 的前提下，预测了 2010 年的中游水资源供需平衡，结果见表 3。从表 3 可以看出，到 2010 年黑河干流典型灌区水资源供需基本平衡或供给量略有盈余。

3 区域水资源供需平衡的安全评估

考虑黑河中游典型灌区水资源安全状况必须扣除下游额济纳旗生态用水量，综合考虑过去 50 年黑河水资源开发利用方式、现状和出山水资源径流量的周期性变化。当中游地区多年平均耗水量不超过政策性规定的数量，且地下水开采不影响绿洲生态系统植被生长、同时当年能够自然恢复时，中游地区水资源供需平衡是安全的；当中游的用水量不足，通过抽取地下水弥补，地下水位没有持续下降，或暂时的下降并不长期影响绿洲生态系统植被的生长状况，地下水位在丰水年可以完全自然恢复时，中游地区水资源和生态环境处于安全警戒线。因此，本文以黑河中游典型灌区水资源供需平衡、地下水资源可开采量以及地下水位变化作为评价黑河中游绿洲灌区水资源和生态环境安全状况的具体指标。

表 2 不同水平年各灌区水资源供需平衡分析

Table 2 The analysis on supply and demand of water resource in irrigation area in different years

水平年 Year	灌区 Irrigated area	可供水资源量 Available water supply ($\times 10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$)			水资源需求量 Water resources demand ($\times 10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$)					水资源供需平衡 Water resources balance of demand and supply ($\times 10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$)
		保证率 Warrantd efficient (%)	河(泉)水 Surface water	井水 Well	农业 Agriculture	工业 Industry	人畜生活用水 Drink water	生态用水 Ecological water demand	合计 Sum	
1997	平川灌区 Pingchuan	50	7 384.1	58.7	6 850.4	34.9	24.8	460.6	7 370.7	72.1
		75	7 091.6	160.9						-218.2
		95	6 945.4	160.9						-264.4
	板桥灌区 Banqiao	50	6 615.7	57.3	6 137.5	33.1	24.2	412.7	6 607.5	65.5
		75	6 563.8	57.3						13.6
		95	6 222.6	57.3						-327.6
	鸭暖灌区 Yanuan	50	4 604.9	33.2	4 272.0	19.2	14.0	287.2	4592.4	45.7
		75	4 422.6	58.3						-111.5
		95	4 331.4	58.3						-202.7
	蓼泉灌区 Liaoquan	50	5 725.1	54.8	5 311.3	31.7	23.1	357.2	5 723.3	56.6
		75	5 498.4	112.8						-112.1
		95	5 385.0	112.8						-225.5
2000	平川灌区 Pingchuan	50	6 938.2	130.0	6 389.4	39.5	28.8	491.5	6 949.2	119.0
		75	6 501.5	219.9						-227.8
		95	6 193.3	322.5						-433.4
	板桥灌区 Banqiao	50	6 413.2	126.8	5 890.7	38.6	28.1	430.1	6 087.5	152.5
		75	6 244.7	156.2						13.4
		95	5 744.8	235.1						-407.5
	鸭暖灌区 Yannuan	50	4 250.0	73.4	3 916.2	22.2	16.1	340.5	4 295.0	28.4
		75	3 977.3	79.5						-238.2
		95	3 787.1	111.6						-396.3
	蓼泉灌区 Liaoquan	50	5 653.9	121.3	5 248.4	36.6	26.8	389.7	5 701.5	73.7
		75	5 317.7	154.5						-229.3
		95	4 876.9	226.6						-398.0
2003	平川灌区 Pingchuan	50	6 586.0	141.1	6 383.1	50.4	36.8	509.6	6 979.6	-252.5
		75	6 167.9	238.5						-573.2
		95	5 872.2	341.1						-766.3
	板桥灌区 Banqiao	50	6 397.6	137.6	5 989.9	49.2	35.9	450.3	6 025.3	9.9
		75	6 235.9	211.2						-78.2
		95	5 757.1	276.7						-491.5
	鸭暖灌区 Yanuan	50	4 430.4	79.6	3 963.9	28.2	20.6	340.5	4 353.2	156.8
		75	4 169.3	86.3						-197.6
		95	3 986.8	123.3						-343.1
	蓼泉灌区 Liaoquan	50	5 380.9	131.5	4 787.4	47.1	34.2	396.6	5 265.3	247.1
		75	4 859.0	167.6						-138.7
		95	4 828.0	239.7						-197.6

3.1 现状年水资源实际供水与耗水分析

现状年区域地表水资源损失量 $2.46 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，其中包括黑河入境量 $2.01 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，梨园河入境量 $0.44 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。如果扣除河道渗漏 $0.54 \times 10^8 \text{ m}^3$ 和水面蒸发 $0.19 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，区域地表水资源总耗水量为 $1.71 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，其中农业灌溉和生态用水引用河（泉）水分别为 $1.65 \times 10^8 \text{ m}^3$ 和 $4.924 \times 10^6 \text{ m}^3$ ，用于农田灌溉和

生态用水的净水量分别为 $0.96 \times 10^8 \text{ m}^3$ 和 $2.739 \times 10^6 \text{ m}^3$ 。平川灌区的平川水库、三坝水库以及板桥灌区的西湾水库消耗于渗流量分别为 $6 \times 10^4 \text{ m}^3$ 、 $1.2 \times 10^4 \text{ m}^3$ 和 $1.4 \times 10^4 \text{ m}^3$ ；消耗水面蒸发量分别为 $1.8 \times 10^5 \text{ m}^3$ 、 $9 \times 10^4 \text{ m}^3$ 和 $2.0 \times 10^5 \text{ m}^3$ 。

现状年各灌区实际供水与耗水量见表 4。从表 4 看出，工业和人畜生活用水基本都能满足。农业、生

态用水严重不足，除平川灌区外，板桥、鸭暖以及蓼泉灌区农业用水分别缺水 $9.667 \times 10^6 \text{ m}^3$ 、 $1.4015 \times 10^7 \text{ m}^3$ 和 $8.392 \times 10^6 \text{ m}^3$ ；各灌区均生态缺水，其缺水量分别为 $2.094 \times 10^6 \text{ m}^3$ 、 $3.994 \times 10^6 \text{ m}^3$ 、 $3.13 \times 10^6 \text{ m}^3$ 、 $2.831 \times 10^6 \text{ m}^3$ 。各灌区仅平川灌区实际供水与需水相当，主要是靠大量开采地下水来弥补，该灌区规划允许开采量为 $3.805 \times 10^6 \text{ m}^3$ ，而实际开采达到 $1.19 \times 10^7 \text{ m}^3$ 。根据丰水年的预测，在保证黑河调水顺利进行的情况下，2003 年平川、板桥、鸭暖和蓼泉灌区分别能引用黑河水量为 $6.586 \times 10^7 \text{ m}^3$ 、 $6.3976 \times 10^7 \text{ m}^3$ 、

$4.4304 \times 10^7 \text{ m}^3$ 和 $5.3809 \times 10^7 \text{ m}^3$ ，而实际引用 $5.9113 \times 10^7 \text{ m}^3$ 、 $5.0041 \times 10^7 \text{ m}^3$ 、 $2.5489 \times 10^7 \text{ m}^3$ 和 $3.5521 \times 10^7 \text{ m}^3$ 。说明中游地区各灌区的引水量在黑河调水允许阈值之内，且大大低于阈值，中游引用地表水水资源量是安全的，但是各灌区农业、生态缺水量相当大。从地表水地下水联合调度引用总量已经给黑河中游各灌区正常的工农业生产带来困难，尤其是农业、生态用水量缺水严重，本区域水资源供需皆超过其警戒线。

表 3 2010 年水资源供需平衡预测分析
Table 3 Forecast analysis on supply and demand of water resources in 2010

灌区	可供水资源量			水资源需求量					水资源供需平衡
Irrigated area	Available water supply (×10 ⁴ m ³ ·a ⁻¹)			Water resources demand (×10 ⁴ m ³ ·a ⁻¹)					Water resources
	保证率	河(泉)水	井水	农业	工业	人畜生活用水	生态用水	合计	balance of demand
	Warrantd efficient(%)	Surface water	Well	Agriculture	Industry	Drink water	Ecological water demand	Sum	and supply (×10 ⁴ m ³ ·a ⁻¹)
平川灌区	50	6 267.8	155.1	5 691.0	63.9	46.7	592.5	6 394.1	28.8
Pingchuan	75	5 866.3	262.2						-265.6
	95	5 582.2	364.9						-447.0
板桥灌区	50	6 012.4	111.3	5 242.1	62.5	45.6	518.5	5 867.7	256.0
Banqiao	75	5 856.7	183.8						172.8
	95	5 397.2	204.9						-265.6
鸭暖灌区	50	4 031.9	187.5	3 733.1	36.3	26.4	369.3	4 165.1	54.3
Yanuan	75	3 781.3	214.8						11.0
	95	3 605.9	376.3						-182.9
蓼泉灌区	50	5 134.2	244.6	4 643.0	59.8	43.6	459.2	5 205.6	273.2
Liaoquan	75	4 825.1	284.2						3.7
	95	4 603.2	356.3						-146.1

3.2 地下水水资源开采潜力分析

地下水的开采程度用其开采潜力指数来表示。

$$I=Q_{允}/Q_{采}$$

式中： I 为地下水开采潜力指数； $Q_{允}$ 为地下水允许开采量 ($\times 10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$)； $Q_{采}$ 为地下水现状开采量 ($\times 10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$)。

当 $I > 3.3$ 时为开采潜力较大； $1.7 < I \leq 3.3$ 为开采潜力中等； $1.2 < I \leq 1.7$ 为开采潜力较小； $0.8 \leq I \leq 1.2$ 为控制开采区，表明采补基本平衡； $0.6 \leq I \leq 0.8$ 为开采潜力轻度不足； $0.4 \leq I \leq 0.6$ 为开采潜力中等不足； $I < 0.4$ 为开采潜力严重不足。

研究区各灌区中，鸭暖灌区和蓼泉灌区位于黑河南岸，是研究区河谷泉水主要的形成带，其灌溉水源皆引自黑河干流，仅饮用水以手压井或浅井供给，现状年的地下水资源开采指数分别为 1.12 和 1.27，都已基本达到最大开采量。采补平衡或开采潜力较小，随

着泉水衰减以及农田面积的扩大，灌溉用水缺口逐年加大。平川灌区位于黑河北岸，其第四系厚度南厚北薄，含水层富水性自南而北减弱，现状年的地下水开采指数为 0.32，超采严重，地下水开采量极不合理。板桥灌区也位于黑河北岸，靠近黑河沿岸的含水层富水性较好，远离河岸的北部山前属于不均匀含水地带，现状年的地下水开采指数为 1.79，开采潜力中等，开采基本合理，但其开采带由以前的靠近河岸发展到远离河岸地带。各灌区地下水潜力分析表明（表 5），平川灌区地下水资源超过其安全警戒线，其它各灌区都已经接近其安全警戒线，如不合理规划管理，将来其水资源供需安全性不容乐观。

3.3 地下水位变化分析

1984~1999 年，各灌区平均地下水水位动态变化介于 $-0.1 \sim 0.1 \text{ m} \cdot \text{a}^{-1}$ 之间，基本呈稳定状态。2000~2003 年，平川、板桥、鸭暖和蓼泉灌区的地下水位年

表 4 现状年灌区实际供水与耗水统计

Table 4 Supply and consumption of water in irrigation area in the period from 2003-8-1 to 2004-7-31

		平川灌区 Pingchuan		板桥灌区 Banqiao		鸭暖灌区 Yanuan		蓼泉灌区 Liaoquan	
		河水 S.W.	地下水 G.W.	河水 S.W.	地下水 G.W.	河水 S.W.	地下水 G.W.	河水 S.W.	地下水 G.W.
实际供水	农业 Agriculture	5611.1	1101.0	4953.2	70.0	2521.4	41.0	3438.3	510.0
Practical water	生态 Ecology	300.2	0.0	50.9	0.0	27.5	0.0	113.8	0.0
supply	工业 Industry	0.0	50.4	0.0	49.2	0.0	28.2	0.0	47.1
($\times 10^4 \text{ m}^3$)	人畜生活 Drink	0.0	38.6	0.0	46.0	0.0	25.3	0.0	51.6
需水	农业 Agricultures	6383.1		5989.9		3963.9		4787.4	
Water demand	生态 Ecology	509.6		450.3		340.5		396.6	
($\times 10^4 \text{ m}^3$)	工业 Industry	50.4		49.2		28.2		47.1	
	人畜生活 Drink	36.8		35.9		20.6		34.2	
供需平衡		27.4		-1356.0		-709.8		-1104.5	
Water balance									
($\times 10^4 \text{ m}^3$)									

S.W: 河水; G.W.: 地下水 S.W. and G.W. in the table indicate surface water and groundwater supplied

表 5 黑河流域中游典型灌区地下水资源开采潜力

Table 5 The potential groundwater resources in the midstream of Heihe river mainstream

灌区名称	现状开采量	规划允许开采量	潜力指数 (I)	调节开采量
Irrigated area name	Present mining	Planning allowable mining	Latent capacity indes	Adjustable mining
	($\times 10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$)	mining ($\times 10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$)		($\times 10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$)
平川 Pingchuan	1190.0	380.5	0.32	-809.5
板桥 Banqiao	116.0	207.6	1.79	91.6
鸭暖 Yanuan	416.4	465.3	1.12	48.9
蓼泉 Liaoquan	528.1	670.3	1.27	142.2

平均下降分别为 0.23、0.38、0.25 和 0.41 m (图 3)。地下水水位埋深持续下降表明, 水资源供需平衡已经超过其安全警戒线。其原因主要有: (1) 黑河中游灌区水利化程度的不断提高导致了的对地下水补给量的减少, 是引起地下水水位下降的决定因素。(2) 中游地下水开发利用程度提高是引起地下水水位下降的主要因素。大规模无节制开采地下水, 致使局部地段开采量已远超过地下水天然承载能力, 从而引起区域地下水水位以不同速度下降。(3) 随着黑河分水计划的不断实施, 灌区配水定额化以及用水商品化(水票制)在现状农业生产中的弊端也显现出来。黑河调水实施“全线闭口, 集中下泻”方针, 但闭口时段的选择与上游来水相关, 上游来水与不同区段的用水需求并不是同步的, 造成配水时间与农业适时灌溉时间错位。因此, 加强水资源的管理, 实现水资源的优化配置, 促进流域社会、经济、生态的可持续发展成为黑河中游灌区, 乃至整个流域当前最紧迫的任务之一。

4 黑河中游绿洲灌区水资源供需现状及其解决对策

4.1 黑河中游绿洲灌区水资源供需现状

(1) 黑河干流中游灌区水资源供需平衡明显受区域过境水量控制。随着黑河流域统一调水, 中游典型灌区用水结构发生了明显的变化, 地表水应用减少了 13%以上, 地下水增加了 157.6%, 农业、生态用水缺口最大。主要问题是农业产业结构调整及节水技术应用滞后于流域统一调水规划。

(2) “以水定地, 以水定绿洲”的格局在目前经济技术条件下将会长期存在。现状年黑河典型灌区实际供水量中, 引用河水量在总量控制内, 农业需水量的缺口由开采地下水弥补, 除平川灌区超采地下水 $8.095 \times 10^6 \text{ m}^3$, 略能达到供需平衡外, 其他灌区缺水严重。今后, 若在水资源管理、田间节水技术和农业产业结构上没有重大突破, 黑河中游典型灌区将面临生态、环境、社会和经济等严重问题。

(3) 随着国家节水型社会在张掖节试点的不断推进, 中游灌区农业种植业结构变化, 水资源利用率提高, 各种节水技术的应用, 笔者预测了 2010 年的中游水资源供需平衡。结果表明, 水资源供给基本都有盈余, 水资源供需平衡的安全性将有所改善。

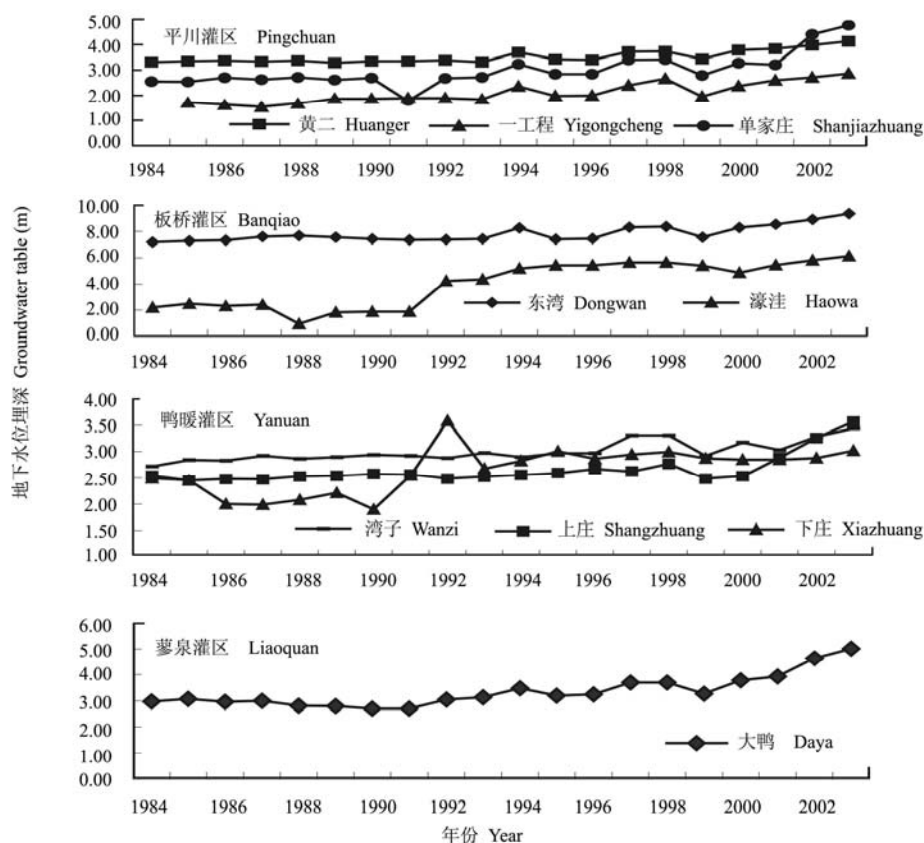


图3 黑河中游典型灌区多年地下水水位埋深动态变化

Fig. 3 The variation curve of groundwater table at irrigation area in the period from 1984 to 2003

4.2 保障灌区水资源供需安全的措施与对策

(1) 黑河中游灌区水资源合理利用的关键是农业节水, 应该建立具有区域特色的农业节水技术集成模式, 以节水促进农业的增产和增效, 提高农民生活质量, 为区域生态环境改善奠定基础, 确保黑河中游灌区水资源供需平衡和粮食安全。

(2) 基于黑河流域中游灌区生活、工业、农业、生态用水比例现状的调整, 根据农业种植结构调整方案, 即压缩耕地面积、扩大林草面积, 压缩粮食面积、扩大经济作物面积, 压缩高耗水作物面积、扩大低耗水作物面积, 对现行的农业结构比例进行必要的优化, 使农、林、牧之间的互补性进一步得到加强。建立高效农业生态系统的同时, 减少和缩小对自然生态系统的影响。

(3) 应严格遵循内陆河流域地表水、地下水之间的转化规律, 进行区域地表水与地下水联合运用优化配置。黑河流域地表水与地下水具有多次相互转化及重复利用的特点, 转化过程中反映出地表水和地下

水在成因上的内在联系。应结合该流域的特点, 研究两种水源联合运用下的优化配置与调控技术和运行管理方法, 提出地下水合理开发利用模式和井渠结合下高效经济用水的模式以及相应的灌排工程配套系统, 并对平原水库调整、渠道衬砌、发展压力管道灌溉、推广应用田间节水灌溉技术等措施对区域地下水资源变化的影响和可能带来的水环境生态问题开展研究。

(4) 合理地确定一个区域人工绿洲(或工农业)对水资源消耗的最大限度(水资源最大可消耗量), 亦即水资源的承载能力, 水资源所能孕育的最大绿洲面积。研究水资源的区域分配, 既要保证流域上游和下游水量供需平衡, 也要重视人工绿洲与天然绿洲之间各自水量占有的比例, 保持合理的生态水位和合理比例的生态用水量, 要使农业灌溉用水量在国民经济各部门的配置比例逐步降低, 充分考虑生态用水量, 以达到整个流域经济效益、社会效益、生态效益的和谐统一, 实现工农业生产的可持续发展。

References

- [1] 王 浩, 常炳炎, 秦大庸. 黑河流域水资源调配研究. 中国水利, 2004, (9):18-21.
Wang H, Chang B Y, Qin D Y. Research of rearrangement of water resources in Heihe river basin. *China Water Resources and Conservation*, 2004,(9):18-21. (in Chinese)
- [2] 高前兆, 仵彦卿, 刘发民, 胡兴林. 黑河流域水资源的统一管理与承载能力的提高. 中国沙漠, 2004, 24 (2): 156-161.
Gao Q Z, Wu Y Q, Liu F M, Hu X L. Unified management of water resources and enhance of carrying capacity in Heihe river basin. *Journal of Desert Research*, 2004, 24(2):156-161. (in Chinese)
- [3] Bormann H, Iekkruger B D, Renschler C, Richter O. Regionalization scheme for the simulation of regional water balances using a physically based model system. *Physics and Chemistry of the Earth (B)*, 1999, 24(1-2): 43-48.
- [4] 钟良平, 邵明安, 李玉山. 农田生态系统生产力演变及驱动力. 中国农业科学, 2004, 37(4): 510-515.
Zhong L P, Shao M A, LI Y S. Changes of ecosystem productivity responding to driving forces in semiarid region. *Scientia Agricultura Sinica*, 2004, 37(4): 510-515. (in Chinese)
- [5] Andreu J, Capilla J, Sanchis E. AQUATOOL, a generalized decision-support system for water-resources planning and operational management. *Journal of Hydrology*, 1996, 177: 269-291.
- [6] 黄道友, 胡克林, 陈桂秋, 黄 敏, 彭廷柏. 红壤丘陵集水区经营的水资源动态与土地持续生产力研究. 中国农业科学, 2004, 37 (1): 92-98.
Huang D Y, Hu K L, Chen G Q, Huang M, Peng T B. Soil and water resources and land sustainable productivity in the catchment area with intensive management in hilly red soil regions, China. *Agricultural Science in China*, 2004, 3(5): 356-363.
- [7] 山 仑. 旱地农业技术发展趋向. 中国农业科学, 2002, 35(7): 848-855.
Shan L. Development trend of dryland farming technologies. *Scientia Agricultura Sinica*, 2002, 35(7): 848-855. (in Chinese)
- [8] 吉喜斌, 康尔泗, 赵文智, 陈仁升, 金博文, 张智慧. 黑河流域山前绿洲灌溉农田蒸散模拟研究. 冰川冻土, 2004, 26(6): 713-719.
Ji X B, Kang E S, Zhao W Z, Chen R S, Jin B W, Zhang Z H. Simulation of the evapotranspiration from irrigational farmlands in the oases of the Heihe river basin. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2004, 26(6): 713-719. (in Chinese)
- [9] 谢 云, James R. Kiniry, Jimmy R. Williams, 陈友民, 林而达. 作物模型模型输入变量的敏感性分析. 中国农业科学, 2002, 35(10): 1 208-1 214.
Xie Y, Kiniry J R, Williams J R, Chen Y M, Lin E D. Sensitivity analysis of the ALMANAC model's input variables. *Scientia Agricultura Sinica*, 2002, 35(10): 1 208-1 214. (in Chinese)
- [10] 王 芳, 王 浩, 陈敏建, 王 研, 唐克旺. 中国西北地区生态需水研究 (2) —基于遥感和地理信息系统技术的区域生态需水计算及分析. 自然资源学报, 2002, 17(2): 129-137.
Wang F, Wang H, Chen M J, Wang Y, Tang K W. A study of ecological water requirements in Northwest China. Part II: Application of remote sensing and GIS. *Journal of Natural Resources*, 2002, 17(2):129-137. (in Chinese)
- [11] 王 芳, 梁瑞驹, 杨小柳, 陈敏建. 中国西北地区生态需水研究 (1) 干旱半干旱地区生态需水理论分析. 自然资源学报, 2002, 17(1): 1-8.
Wang F, Liang R J, Yang X L, Chen M J. A study of ecological water requirements in Northwest China. I : Theoretical analysis. *Journal of Natural Resources*, 2002, 17(1): 1-8. (in Chinese)
- [12] 侯向阳, 万里强, 高洪文. 我国西部草业科技发展重点的排序研究. 中国农业科学, 2004, 37(4): 558-565.
Hou X Y, Wan L Q, Gao H W. Research on keystones of grassland science in western China. *Scientia Agricultura Sinica*, 2004, 37(4): 558-565. (in Chinese)

(责任编辑 李云霞)