

当代水文地质学发展趋势与对策

张人权, 梁 杏, 靳孟贵, 周爱国, 孙蓉琳

(中国地质大学环境学院, 武汉 430074)

摘要: 当代水文地质学进入了生态环境水文地质学阶段。当代水文地质学的研究目标是从可持续发展理念出发, 构建人与自然协调的、良性循环的地下水系统、水文系统、地质环境系统与生态系统。以系统思想为指导, 运用多学科方法, 发展向生产领域延伸的地下水工程, 是当代水文地质学发展的关键。

关键词: 水文地质学; 发展趋势; 对策; 生态环境; 系统思维

中图分类号: P641; P641.69

文献标识码: A

文章编号: 1000-3665(2005)01-0051-06

以 1856 年达西定律的建立作为标志, 水文地质学奠基至今还不到 150 年。第二次世界大战以来, 随着生产力与科学技术的迅猛发展, 以及人口爆炸式增长, 人类活动以空前的规模改造自然, 资源大量消耗, 生态环境急剧恶化。与此同时, 水文地质学所要解决的问题愈来愈复杂, 原有的概念、理论与方法, 愈来愈难以满足需求, 水文地质学面临着巨大的挑战与良好的发展机遇。

1 当代水文地质学发展趋势概述

当代水文地质学的发展趋势, 可大体归纳如下:

(1) 核心课题转移 找水水文地质学—资源水文地质学—生态环境水文地质学。

(2) 研究视野扩展 含水层的局部—整个含水层—地下水系统—水文系统—生态环境系统—技术—社会系统。

(3) 研究目标改变 由局部性的问题转向全局性的课题, 由当前的问题转向长期的可持续发展课题; 由解决具体生产问题, 转向构建人与自然协调的、良性循环的地下水系统、水文系统、地质环境系统与生态系统。

(4) 研究内容扩展 从地下水的水量研究为主, 转向水量与水质的研究并重; 从狭义地下水(饱水带水)的研究, 扩大到广义地下水(含饱水带与包气带水), 乃至地下水圈的研究。

(5) 研究思路的改变 对现象的规律性为主的研究, 已经不能满足需要, 要求从成生角度, 加强过程与机理研究的比重。

(6) 多学科交叉渗透成为主流 传统意义上纯粹的水文地质学正在消亡, 地下水科学与其它自然科学以及社会科学交叉渗透, 以多学科方式研究与处理问题, 正在成为主流。

(7) 服务方式转变 水文地质学的服务对象大为扩展, 服务方式发生了很大改变, 如何使水文地质工作成果转化为生产力, 已经成为一个急需解决的重大课题。

2 核心课题转移与研究视野的扩展

初期的水文地质学实际上是找水水文地质学, 人们只关心水井周围含水层的局部——“影响半径”; 泰斯公式的应用, 意味着视野已经扩展到整个含水层。上世纪初叶, 随着取用地下水的规模增大, 发觉某一范围内可供利用的地下水的数量是有限的, 从而, 探明地下水资源成为核心课题, 进入了资源水文地质学阶段。与此相应, 越流概念的提出, 使得包括含水层与弱透水层在内的地下水含水系统, 成为研究的基本单元。

二次世界大战以后, 人类活动对包括地下水在内的自然环境的改造异常强烈, 产生了一系列生态环境问题, 当代水文地质学进入了生态环境水文地质学的新阶段^[1]。托特(Toth, J.)的地下水流动系统理论指出, 一定条件下地下水可以穿越“隔水层”而形成统一的地下水流动系统^[2]。英格伦(Engelen, G. B.)进一步提出了将区域地表水和地下水整合在一起的水文系统的概念^[3]。这些应运而生的理论, 为生态环境水文地质学提供了必要的分析框架。

生态环境是超级复杂巨系统, 而地下水则是这一

收稿日期: 2004-05-18; 修订日期: 2004-06-25

基金项目: 中国地质调查局综合研究项目资助(200320150002)

作者简介: 张人权(1932-), 男, 教授, 从事水文地质、环境地质教学与科研工作。

E-mail: rqzhang1932@sina.com

超级复杂巨系统中最为活跃和敏感的一个子系统。在人为活动影响下,地下水的变化会导致一系列复杂的物理、化学与生态效应,对地下水系统、水文系统、地质环境系统和生态系统造成损害。

为应对水资源短缺与生态环境损害,人们开展了地下水管理。在相当长的一个时期里,地下水管理被理解为纯粹的自然科学技术问题,人们企图采用解决硬问题的办法,用数学模拟求取唯一的最优解。但是,任何资源—生态环境水文地质问题,必然涉及人们的价值判断,因此,所要处理的不仅是纯粹的自然科学技术的硬问题,还涉及社会经济软问题;对于这样的技术—社会—经济问题,不可能求得唯一的最优解,而只能在权衡各种利弊和协调各方利益后,选取满意解或者非劣解。于是,水文地质学家开始认识到,他们所面对的实际上是一个复杂的技术—社会系统。

回顾水文地质学家研究视野的变化,有两点值得注意:一方面,从局部的、分割式的思路分析对象,转变为以整体观、系统观来考察事物;另一方面,从单纯研究对象的自然属性,转变为同时研究其自然属性与社会属性。这种转变,与国际资源与环境科学的发展趋势是一致的^[4]。

3 研究目标与思路的转变

水文地质学的任务,最初是解决各种局部性的生产实际问题,随后,逐步转向全局性的课题。当人们认识到,资源耗竭和生态环境的不断恶化,势将危及人类的生存与发展时,可持续发展的理念应运而生。与此相应,水文地质学的任务,由解决当前的问题转向长期的可持续发展课题。

当代水文地质学的研究目标,是从可持续发展理念出发,构建人和自然协调的、良性循环的地下水(流动)系统、水文系统、地质环境系统和生态系统。当良性循环的天然系统尚未受到人为活动损害时,研究的目的是掌握其演变规律,警惕与预防人为活动的不良干扰。当良性循环的天然系统已经遭受人为损害时,研究目的是修复其损害。当天然系统存在不利于人类的缺陷时,则需要遵循自然规律,对系统进行优化。

水文地质学研究目标的改变,要求采用新的研究思路与方法。如果说,为了解决具体的生产问题,传统水文地质学更多着眼于研究现象的规律,那么,进入当代的生态环境水文地质学阶段,就必须从成生角度研究目标系统的作用过程与内在机理。目标系统的研究,需要采用将分析与综合有机整合的系统分析方法;

良性循环系统的构建,要求应用系统工程的方法;要求采取成龙配套的治本对策,而不是零敲碎打的治标措施;不仅要求处理好人和自然的关系,更要求正确处理好人与人之间的利益关系^[5]。

4 研究内容的扩展

随着水质问题(天然水质不良、地下水污染、海水与咸水入侵等)的凸现,以及对水化学信息重要性的认识加深,地下水的研究已经从以往的水量研究为主,转向水量与水质的研究并重。在地下水污染修复研究过程中,发觉抽取后加以处理需要付出的代价很大,又难以获得理想效果,于是,开展了着眼于预防的地下水脆弱性(敏感性)评价。与此同时,从化学角度出发的水-岩相互作用研究以及地球化学模拟成为新的研究热点^[6,7]。

地下水水量与水质的形成,与包气带密不可分,因而,水文地质学研究从以狭义地下水——饱水带水为对象,扩大到包括包气带与饱水带在内的广义地下水。

有人进一步提出,水文地质学是研究地下水圈的科学;地下水圈包含从地壳浅部到地幔以各种形式存在的水-岩石空隙中的水、矿物和岩浆中的水,以及分解为氢离子和氧离子的“水”^[8,9]。愈来愈多的证据说明,地壳浅部参与水文循环的地下水,与地球深部层圈中参与地质循环的水,存在着密切联系。据估计,下地幔中储存的水分相当于全部大洋水量的 50 倍;随着岩浆运动的水,以及大洋中脊热液系统和板块俯冲过程中的水循环,对矿藏以及深部特殊生命系统的形成,起着十分重要的作用;包含地下水在内的地质流体的研究,已经成为地球科学的重大前沿课题^[10~13]。

5 多学科交叉渗透研究与处理问题成为主流

一个地区的水资源是难以分割的,撇开水资源系统的整体分析,孤立地研究其中的一个组成——地下水系统,是无法进行正确评价与科学管理的。在分析与处理与地下水密切相关的地质环境损害、地质灾害与生态退化时,需要涉及地球化学、物理学、生物学、微生物学、生态学、岩土力学、土壤学,以及相关的修复技术与处理技术等。在分析与水土有关的各种地方性疾病时,水文地质学家不仅需要了解元素在水土中的迁移积聚规律,还需要了解元素的生物学功能以及有关的医学知识。从事城市地质工作的水文地质学家,需要对城市规划与管理有所了解。有效利用土壤水的研究是解决水资源短缺的重要途径,此时,需要将地下水

科学与农学、土壤学,乃至基因改良技术相结合。

发现地圈与生物圈(主要是微生物)的协同演化,是近年“全球变化”和“大洋钻探”的最大进展之一^[10]。由此启示我们,地下水科学与微生物学相结合是重要的科学前沿。

微生物能够降解石油、农药,有助于重金属的吸附、沉淀与转化;利用有降解能力的微生物,或采用DNA重组技术改变基因结构,培育降解效果更好的微生物,对地下水污染进行原位修复,是地下水污染治理极有潜力的方向^[14,15]。

据报道,在岩溶景观(地貌和钙华)的发育中,有微生物参与的生物地球化学过程起了重要作用^[16,17]。可以预见,微生物在地下水化学成分形成以及其它水文地质过程中作用的研究,是当代水文地质学发展的重要方向。

包括地下水在内的水循环及其支撑所的生态系统对全球变化的响应,是当代水文地质学需要关注的课题。作为水循环组成以及生态系统支撑的地下水,与地球各层圈(大气圈、水圈、生物圈、岩石圈、地幔、地核)以及人类活动构成的地球系统有着千丝万缕的联系,以地球科学系统理论为指导,推动水文地质学的发展,是一个必然趋势^[18]。

当代水文地质学面对着错综复杂的种种问题,因此,从事水文地质工作的人员,应当具备自然科学与社会科学的 multidisciplinary 知识背景,要求以学科交叉的思路去研究问题,要求以跨学科的视野去处理问题。

6 水文地质工作成果转化面临新问题

在找水水文地质学阶段,水文地质工作成果的用户(受益部门)明确,有些部门提供的信息与用户的利益比较一致,成果转化为生产力,并无困难。

进入资源水文地质学阶段,尽管用户明确,但是,如果提供的水文地质信息,与用户的局部利益与当前利益冲突时,成果转化为生产力,就不那么容易了。20世纪70年代,河北黑龙港地区出现深层地下水开采漏斗后,水文地质人员得出深层水补给有限、不宜大量开采的正确结论,但是,由于这一成果并不符合当时以开采深层水支撑发展的理念而未被采纳,时至今日,黑龙港地区的水资源与生态环境,仍然处于不断恶化中。

进入生态环境水文地质学阶段,水文地质信息的传递与成果转化,遭遇到前所未有的阻力。首先,水文地质成果的潜在用户包含各级政府与不同部门。地质部门与用户之间,有的并不存在合约关系,有的没有明

晰的合约关系。因此,经常出现用户缺位、用户缺乏意识、用户对相关地质信息不知晓的现象。其次,地下水开发引起的水资源与生态环境方面的问题,如地下水超量开采、地下水污染、地面沉降、生态恶化等,由于它的隐蔽性、缓慢性 and 积累性,媒体报道得很少,公众缺乏了解,难以引起决策者的关注。第三,有些部门提供的信息,往往会与用户的局部利益与当前利益冲突。如果说,找水水文地质学阶段的地质信息,往往是与用户当前利益与局部利益一致的“喜报”,那么,现在提供的地质信息往往是“忧报”——虽然,从长远和整体利益的角度,用户是收益者,但是,从当前与局部利益角度,用户却是“受害者”——这种情况下,水文地质工作成果被用户搁置一边,甚至受到抗拒反对,是不难理解的。

水文地质工作成果之所以难以转化为生产力并得到社会承认,除了上述原因以外,还受多种因素的制约:决策机制不完善;条块分割,多头管理,缺乏配套的法规、或者法规不完善,无法保证成果的转化;部门提供的成果,过分专业化,没有真正面向用户、做到通俗易懂,使地质信息的传递受阻等。

7 当代水文地质学发展的若干对策

水文地质学的核心课题、研究视野与研究目标发生了重大变化,要求解决的问题愈来愈错综复杂,水文地质成果的转化出现新的困难,当代水文地质学面临前所未有的巨大挑战。水文地质学发展的唯一出路是开拓创新,只有开拓创新,才能化挑战为机遇,才能迎来水文地质学发展的新天地。在此仅就当代水文地质学发展战略的若干方面,提出一些初步的看法。

7.1 构建当代水文地质学的理论方法体系

水文地质学原有的概念、理论与方法,已经难以满足要求,因此,对传统水文地质学进行去芜存精的扬弃,建立当代水文地质学的概念、理论与方法体系,是当务之急。其中最重要的,是将系统分析、系统动力学和系统工程方法全面引入水文地质学,围绕当代水文地质学的研究目标——构建人和自然协调的、可持续的水资源系统和生态环境系统——建立新的概念、理论与方法体系。

地下水流动系统理论,以地下水流网为载体,将渗流场、化学场与温度场统一于一个有序的时空结构之中;它赋予水文地质学以有机整体的理论框架,揭示了原本似乎互不相干的不同部分与不同方面的内在联系,从而有助于人们把握地下水各部分及其与环境之

间联系的完整图景。正如 Toth 所指出的,由于地下水流动存在系统的有级次的空间分布,以及地下水与周围环境相互作用,在流动过程中,地下水与环境发生化学的(溶解、沉淀、水化、氧化-还原、脱硫酸等)、物理的(孔隙水压力改变、岩土磨擦力降低等)及动力的(水分、盐分与热量的输送)相互作用;地下水的温度、矿化度、化学类型等呈现有规律的空间分布,地表则有规律地出现一系列与地下水有关的现象(泉、湿地、水土流失、滑坡等)^[19]。因此,在地下水流动系统的理论与方法基础上,进一步发展功能齐全、界面友好、能够刻画大区域的耦合的地下水系统、水文系统、地质环境系统与生态系统的分析工具,十分必要。在这方面,已经有了一些有益的尝试,提出了一些新的设想^[20~24]。

实现水文地质成果的数字化、信息化、可视化;发展数学模拟,对地下水有关的系统进行虚拟研究,得出不同给定条件下系统的不同响应;以地理信息系统为载体,发展相应的决策支持系统。所有这些都是在完善当代水文地质学所需要进行的工作。

陈梦熊、陈雨孙、王大纯等早已提出,需要将地下水系统理论与系统工程引入水文地质学^[25~27],现在是将这些主张付诸实施的时候了。

7.2 加强水文地质过程与机理研究

无论为了事先预防规划、事后修复,或者优化改造,我们所研究与处理的基本上都是人工-自然复合系统。因此,探究纯粹自然状态下系统的演变规律与机制,了解叠加(已经叠加和可能叠加)人为作用后系统的可能响应,是构建人与自然协调的、良性循环水资源系统和生态环境系统的基础。

除个别领域外,水文地质过程与机理的研究,还相当薄弱。例如,降水入渗补给机理研究的不足,使得一系列相关的问题无法得到满意的解决。与此相反,正是非饱和水流在非均质介质中的选择性渗流机制的研究,为包气带核废料处置等提供了理论基础。

过程与机理的物理实验与模拟需要精心设计,需要花费很多的时间和精力,实验模拟过程中往往会出现许多意想不到的困难;因此,人们愈来愈倾向于采用方便易行的数学模拟,来代替物理模拟。但是,为了理解真实的物理过程,为了检验数学模拟的结果是否符合实际,物理实验与模拟是无可替代的。

为了查明作用过程与机理,需要借助于控制性实验。作为水文地质学定量基础的达西定律,正是控制性实验的结果。控制性实验的特点在于:排除其他次要因素的干扰,将所要观察的对象控制于纯粹状态,从

而抽取纯粹的自然规律。迄今为止,国内外水文地质界都十分重视野外实验,但是很少有人去作达西实验这样的控制性室内实验。人们也许认为,野外实验比室内控制性实验更为接近真实。但是,实际并非如此,只有在人为严格控制的室内实验条件下,才能重现自然的原本面目,才能获取真正的固有自然规律;水文地质学要想有突破性的发展,必须重视控制性实验^[28]。

7.3 水文地质工作需要向生产领域延伸

半个世纪以来,我国水文地质的发展远没有工程地质那样有活力。工程地质工作的长足发展,得益于善于吸收当今科学思想丰富自身的理论,并且较好地实现了理论、测试技术与工程技术的结合。岩土工程、地质工程等分支的兴起,说明工程地质工作已经由工程的地质论证延伸到了工程实践领域,从而推动了工程地质学科的长足发展。

汪民等提出了水文地质学发展的工程方向——地下水环境工程^[29]。地下水环境工程包含地下水资源合理开发利用工程、生态地质环境退化控制与改良工程、地下水污染控制工程、废物地质处置工程等。李瑞敏等提出了“区域农业地质环境开发与农业生态地工程”的概念,蕴涵了农业地质向工程方向发展的思路^[30]。

目前,地下水污染及其控制的工作,已经打破单纯的水文地质论证模式;从实地监测研究,到室内实验、野外实验、数值模拟,直到生产性修复试验,与多个学科交叉的水文地质工作贯穿了整个过程;地下水污染研究,成为发展最为迅速的水文地质学分支,并非偶然。西南岩溶地区,利用帷幕灌浆建造地下水坝以抬高补给迳流区地下水位,取得了良好的成效,是地下水工程的良好范例。我们认为,土壤水有效利用、咸水改造、地下水库调蓄水资源等,都是水文地质学向生产领域延伸的重要方向。

在实现地质与工程融合过程中,工程地质的实用工程技术发展十分迅速,例如,岩体处理的锚喷技术、帷幕灌浆,软土处理的预压加载、排水砂井、排水塑料板,等等。水文地质工作向工程领域的延伸,必须采用和发展相应的实用工程技术手段。例如,以水平井为主的浅井井型改革及其凿井技术的开发,便是支撑水文地质向生产领域延伸的一项关键措施。

7.4 加强包括软科学在内的多学科跨部门研究

跨学科的研究已经成为当代水文地质学的主流,因此,除了小型的单个研究者主持的研究项目外,还需要组织多学科的研究项目,以及由多个部门和机构协

调进行的项目^[31]。

为了更好地发展当代水文地质学,需要特别重视以下各类的学科交叉渗透:第一,根据研究目标的需要,开展相关学科与水文地质学相结合的研究;第二,将横断科学(系统论、信息论、控制论、超循环理论、耗散结构理论、混沌学、分形理论等)全面引入水文地质学,充实与发展水文地质学的理论与方法;第三,将水文地质学与社会人文科学结合,加强软科学研究。

目前,第一类学科交叉的研究,已经开始受到重视,但是,离开学科的真正融合,还有较大距离;第二类学科交叉的研究,已有不少探索性成果,但是,如何将横断科学全面系统引入水文地质学,要走的路还很长;第三类的学科交叉,则至今尚未引起足够重视。

加强水文地质学与社会人文科学的结合,其重要性如何强调也不为过。任何自然科学技术问题的解决,都无法回避人们的价值判断与利益协调;因此,自然科学技术成果,需要借助于社会人文学科的支撑,逾越种种利益门槛,才有可能被社会所接受,否则,只能停留在纸面上,无法转化为实实在在的生产力。

7.5 加强水文地质信息的社会传播

公众与决策者的注意力,很大程度上受媒体的影响。黄河断流、淮河污染等大量看得见、摸得着的地表水问题的报道,吸引着受众的眼球。地震、滑坡、泥石流等突发性地质灾害,也给公众留下深刻的印象。地下水短缺与地下水污染的隐蔽性,地下水引起的某些地质灾害的缓变性,使得媒体对此类没有轰动效应的新闻缺乏兴趣。因此,公众与决策者便对水文地质工作缺乏认识。

水文地质学信息传递受阻还有另外原因。随着水文地质成果的服务领域拓宽,而我们仍然习惯于用专业性的文字和图件来传递信息。随着水文地质工作的公益性不断加强,以通俗易懂的语言向公众与决策者传递有关信息,愈来愈有必要。

7.6 创新开拓是发展当代水文地质学的关键

创新开拓,就是要以跨学科的广阔视野,分析问题与解决问题。很多情况下,解决与地下水有关的水资源和生态环境问题,不可能在水文地质学本身中寻找答案。例如,缓解水资源短缺的关键之一是有效利用土壤水,而有效利用土壤水的关键,则是建设既利于入渗而又能抑制蒸发的土壤库容。因此,如何改善土壤结构,便成为解决水资源短缺问题的突破口。又如,为了防治干旱半干旱地区渠灌产生的次生盐渍化,可以采用井渠结合、灌排结合的方式,然而,推动井渠结合

的关键并不在于技术措施,而是调整地表水与地下水的比价。

创新开拓,就是要掌握正确的方法论。一个学科的发展,在某种意义上说,取决于它所采用的方法论。Toth的区域地下水流动系统理论,得出了一系列与常规思维不相容的结论:潜水存在自下而上的水流,均质各向同性介质中存在不同级次的流动系统。学科发展的历史告诉我们,愈是深层次的科学规律,与人们的常识离得愈远,仅仅运用归纳法和演绎法,是无法发现这种“离奇”的科学规律的。划时代的科学发现(相对论、板块构造学说、区域地下水流动系统理论等),都是运用假设-演绎法得到的。水文地质学要想有突破性的发展,有必要掌握并运用假设-演绎法^[28,31]。

创新开拓,就要摆脱成见的束缚,从“成熟”的理论中找出问题,从司空见惯的现象中发现问题。与其它学科一样,水文地质学是在概念与理论的不断更新中发展的。破除了绝对“隔水层”的概念,才有越流、含水系统、流动系统等一系列新概念的诞生。多重介质理论的建立,才有裂隙水分布参数系统的模拟与工程应用。非饱和带滞后释水现象的发现,才促进了包气带水-饱水带水的耦合研究。

当代水文地质学的内涵与发展趋势,有待不断探索,我们在这里只是提出了一些不成熟的看法,希望得到同行的教正,并引起进一步的讨论。

致谢:张蔚院士和施德鸿研究员对本文提出了修改意见,在此谨表诚挚的谢意。

参考文献:

- [1] 张人权. 水文地质学发展的若干趋向[J]. 水文地质工程地质, 1987, (2): 1-2.
- [2] Toth J. A theoretical analysis of groundwater in small drainage basin[J]. Journal of Geophys. Research, 1963, 67(11): 4375-4387.
- [3] Engelen G B, Jones G P (ed.). Developments in the analysis of groundwater flow system [M]. Amsterdam: IAHS Press, 1986.
- [4] 孙枢, 李晓波. 我国资源与环境科学近期发展战略刍议[J]. 地球科学进展, 2001, 16(5): 726-733.
- [5] 张人权, 梁杏, 靳孟贵. 可持续发展理念下的水文地质与环境地质工作[J]. 水文地质工程地质, 2004, 31(1): 82-86.
- [6] 沈照理. 应该继续重视与开展水-岩相互作用的研究——为《水文地质工程地质》创刊40年而作[J]. 水文地质工程地质, 1997, 24(4): 16-20.

- [7] 文冬光, 沈照理, 钟佐荣. 地球化学模拟及其在水文地质中的应用[J]. 地质科技情报, 1995, 14 (1): 99 - 104.
- [8] 加弗里连科 E C, (孙彬译). 构造圈水文地质学[M]. 北京:地质出版社, 1981.
- [9] Pinneker E V. A Recent Concept of Hydrogeology and Its Ecological Problems[J]. 地学前缘, 1996, 3 (1 - 2): 49 - 56.
- [10] 汪品先. 我国的地球系统科学研究向何处去[J]. 地球科学进展, 2003, 18 (6): 837 - 851.
- [11] 于在平. 俯冲带的流体地质作用[J]. 地学前缘, 1995, 2 (1 - 2): 175 - 182.
- [12] 沈照理, 钟佐荣, 文冬光, 汪民. 地质流体研究进展—1993 年国际地质流体会议剖析[J]. 地球科学进展, 1994, 9 (3): 43 - 47.
- [13] 王焰新, 文冬光, 沈照理, 钟佐荣. 深部地下水的起源及其成矿作用[J]. 地学前缘, 1996, 3 (3 - 4): 274 - 281.
- [14] 金朝晖, 曹骥荣, 戴树桂. 地下水原位生物修复技术[J]. 城市环境与城市生态, 2002, 15 (1): 10 - 12.
- [15] 裴婕. 地下水及土壤污染的生物修复技术研究简介[J]. 厦门教育学院学报, 2003, 5 (2): 51 - 52.
- [16] Yu Zundian (俞遵典). The Origin and Evolution of the Karst Landscape[J]. 云南地质, 2003, 22 (1): 1 - 15.
- [17] 田友萍, 何复胜. 石灰华的生物成因研究——以四川九寨沟和贵州黄果树等地石灰华为例[J]. 中国岩溶, 1998, 17 (1): 49 - 55.
- [18] 袁道先. 以地球系统科学理论推动水文地质学发展—21 世纪水文地质学发展战略与优先资助领域研讨会[J]. 水文地质工程地质, 2002, 29 (1): 1, 44.
- [19] Tóth J. Groundwater as a geological agent: an overview of the causes, process and manifestations[J]. Hydrogeology Journal, 1999, 7: 1 - 14.
- [20] 武选民, 陈崇希, 史生胜, 黎志恒. 西北黑河额济纳盆地水资源管理研究——三维地下水流数值模拟[J]. 地球科学, 2003, 28 (5): 527 - 532.
- [21] 吴昌瑜, 张家发. 大区域地下水系统综合性模型的开发[J]. 人民长江, 2003, 34 (12): 46 - 47.
- [22] 李, 李同斌, 宋, 等. 水资源系统中地下水系统数学模型研究[J]. 世界地质, 1998, 17 (2): 41 - 46.
- [23] 章光新, 邓伟, 何岩. 基于生态用水的地下水系统模拟与优化管理模型[J]. 地理学报, 2002, 57 (5): 611 - 618.
- [24] 蒋业放, 张兴有. 河流与含水层水力耦合模型及其应用[J]. 地理学报, 1999, 54 (6): 526 - 533.
- [25] 陈梦熊. 环境水文地质学的最新发展与今后趋向[J]. 地质科技管理, 1995, (3): 28 - 32.
- [26] 陈雨孙, 边际. 系统工程与地下水系统[J]. 工程勘察, 1994, (1): 26 - 31.
- [27] 王大纯, 张人权, 史毅虹, 等. 水文地质学基础[M]. 北京:地质出版社, 1995.
- [28] 张人权. 关于水文地质学的一些思考[J]. 地质科技情报, 2002, 21 (1): 1 - 6.
- [29] 汪民, 吴永锋. 地下水环境工程—水文地质学发展的一个新动向[J]. 地球科学, 1995, 20 (4): 465 - 468.
- [30] 李瑞敏, 侯春堂, 王轶. 农业地质研究进展及主要研究问题[J]. 水文地质工程地质, 2004, 31 (2): 110 - 113.
- [31] Chin - Fu Tsang, 王焰新. 水文地质研究的关键科学问题及其创新资助策略[J]. 中国基础科学, 2003, 17 (6): 330 - 334.

The trends in contemporary hydrogeology

ZHANG Ren-quan, LIANG Xing, JIN Meng-gui, ZHOU Ai-guo, SUN Rong-lin

(School of Environmental Studies, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China)

Abstract: Contemporary hydrogeology is in its new stage of eco-environmental hydrogeology. In order to realize sustainable development, hydrogeological studies are now aiming at constructing an optimum groundwater (hydrology, geo-environmental or ecological) system with coordination among humanity and nature. Therefore, the key for contemporary hydrogeology is to take the systematical and multi-discipline approaches to develop different kinds of groundwater related engineering.

Key words: hydrogeology; trends; strategies; eco-environment; systematic thinking