



DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2016.01.003

李培月. 人类活动影响下的地下水环境及其研究的方法体系[J]. 2016, 14(1): 18-24.

LI Pei yue. Groundwater environment under human intervention and the methodological system for research in this field[J]. 2016, 14(1): 18-24. (in Chinese)

人类活动影响下的地下水环境及其研究的方法体系

李培月^{1,2}

(1. 长安大学 环境科学与工程学院, 西安 710054; 2. 长安大学 旱区地下水文与生态效应教育部重点实验室, 西安 710054)

摘要: 人类活动影响下的地下水环境研究已成为当前和未来一段时间内国内外研究的热门领域。文章发展了人类活动影响下的地下水环境的定义, 扩展了其内涵。在人类活动影响下, 地下水环境是一个同时具有自然属性和社会属性的概念, 一切与地下水直接和间接相关的自然作用和社会作用均应归到地下水环境的研究范畴之内。通过梳理人类活动导致的主要地下水环境问题, 以及地下水环境研究中几种常用方法, 基于调查- 评价- 试验- 预测- 监测- 管理框架, 初步建立了人类活动下地下水环境研究的方法体系, 对于促进地下水环境领域的相关研究具有重要的科学意义。

关键词: 地下水环境; 人类活动; 地下水污染; 方法体系; 地下水水质

中图分类号: X143 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1683(2016)01-0018-07

Groundwater environment under human intervention and the methodological system for research in this field

LI Pei yue^{1,2}

(1. School of Environmental Science and Engineering, Chang'an University, Xi'an 710054, China;

2. Key Laboratory of Subsurface Hydrology and Ecological Effects in Arid Region of the Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710054, China)

Abstract: Research on groundwater environment under the influence of human activities has become and will be a hot research field at the moment and in the future. This article defined the concept of groundwater environment under human interference and expanded its connotation. It pointed out that under the impact of human activities, groundwater environment is a concept with both natural and social properties, and all natural and social factors that have direct and/ or indirect relationships with groundwater should be taken into the research areas of groundwater environment. This article also discussed some main groundwater environmental problems caused by human activities, and introduced several approaches and techniques that groundwater environmental studies usually use. Based on a framework integrating survey, assessment, testing, forecasting, monitoring and management, a methodological system for groundwater environment research in the context of human interference was preliminarily established. It is of important scientific significance for the promotion of research in the field of groundwater environment.

Key words: groundwater environment; human activity; groundwater pollution; methodological system; groundwater quality

收稿日期: 2016-01-09 修回日期: 2016-02-22 网络出版时间: 2016-02-27

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20160227.1627.008.html>

基金项目: 国家自然科学基金(41502234); 长安大学卓越青年基金(310829153509); 中国博士后科学基金一等资助(2015M580804); 陕西省博士后科学基金特别资助; 水利部公益基金(201301084); 中央高校基本科研业务费项目(310829151072)

Fund: National Natural Science Foundation of China (41502234); the Foundation of Outstanding Young Scholar of Chang'an University (310829153509); the General Financial Grant from the China Postdoctoral Science Foundation (2015M580804); the Special Financial Grant from the Shaanxi Postdoctoral Science Foundation; the Special Fund for Scientific Research on Public Interest of the Ministry of Water Resources (201301084); the Special Fund for Basic Scientific Research of Central Colleges (310829151072)

作者简介: 李培月(1984-), 男, 河北廊坊人, 副教授, 博士, 主要从事环境水文地球化学和人类活动影响下的地下水循环演化研究。E-mail: lipy2@163.com

地下水循环作为全球水循环的重要环节,是全球环境变化的受体和信息载体^[1]。在全球气候变化的大背景下,人类活动的干扰大大改变了地下水资源的分布格局、水环境质量、开发利用潜力等^[2-4]。尤其在西部干旱半干旱地区,随着西部大开发战略的逐步推进,在自然条件变化、人类活动加剧和社会经济发展的综合影响下,地下水系统正在发生着强烈的变化。例如近年来在黄土高原局部地区正在进行的削山造城重大工程,不仅改变了黄土高原的原始地形地貌,在一定程度上也对含水层结构、地下水补径排条件等产生了巨大影响^[5-6]。此外,各种能源开发活动和工矿企业大量涌入西北干旱半干旱区,给脆弱的地下水环境施加了不可估量的压力。在此背景下,自然变化和人类活动对地下水环境的影响成为当前水文地质界研究的热点问题之一,也是政府决策部门和平民大众比较关注的话题之一^[7]。本文尝试讨论人类活动影响下的地下水环境的概念及其研究的方法体系,以期对地下水环境研究起到一定的推动作用。

1 地下水环境的概念

环境科学大辞典^[8]中将水环境定义为地球上分布的各种水体以及与其密切相关的诸环境要素的总称,包括如河床、海岸、植被、土壤等。地下水环境作为水环境的重要组成部分,目前尚没有统一的定义。国际上“地下水环境”这个概念的应用十分广泛,但是并没有给出地下水环境的确切定义,并且很多研究都将地下水环境狭义地等同于地下水所赋存的环境,主要强调地下水环境的自然属性^[9-12]。与此不同的是, Pandey 等^[13]在针对尼泊尔地下水环境评价的研究中统一考虑了影响地下水环境的自然因素和社会因素,其考虑的社会因素主要包括人口增长、城市发展与旅游业发展等。在国内,“地下水环境”的定义只在地质矿产行业规范《建设项目地下水环境影响评价规范》(DZ 0225-2004)中有所出现,其中认为地下水环境是地质环境的组成部分,是地下水的物理性质、化学成分和贮存空间及其由于自然地质作用和人类工程—经济活动作用下所形成的状态总和^[14]。在实际工作当中,常常将地下水环境等同于地下水水质,有时也将地下水位以及地下水不合理开发利用导致的地质环境灾害包括在地下水环境当中^[15],这属于狭义的地下水环境。广义上讲,地下水环境不仅包括地下水体本身的自然属性,如地下水水质、水量(位)、水温、地下水动态等,也应包括与地下水直接或间接相关的其它自然因素和社会因

素,如含水层结构和性质、包气带、微生物、地表植被、大气降雨等自然要素和人类开发利用、社会经济发展、水资源管理政策、公众对地下水保护的态度等社会要素。基于此,笔者将地下水环境定义为地下水的物理性质、化学性质与贮存空间以及由与地下水直接和间接相关的自然地质作用、生物作用、人类工程经济活动以及在人类对地下水的管理政策等社会作用下所形成的状态及变化的总和。一切与地下水相关的自然因素和社会因素均应纳入到地下水环境研究的范畴之内。

2 人类活动对地下水环境的影响

人类活动对地下水环境的影响主要表现在三个方面:过量开采或排泄地下水、过量补充地下水和污染地下水^[12]。

过量开采或排泄地下水是目前地下水环境变化中一个普遍的现象。我国北方地区以开发利用地下水为主,很多地区地下水长期处于超采状态,诱发了一系列的生态环境地质问题^[16]。此外,矿山开发过程中的矿坑排水,只有很小的一部分得到了利用。

过量补充地下水现象主要发生在各大灌区。如银川平原、河套平原等毗邻黄河的灌区平原,每年有几十亿甚至上百亿的地表水用于农业灌溉。巨大的地表水引用量,除一部分蒸发散失外,很大一部分都渗入到含水层,补给地下水。据计算,银川平原和卫宁平原 80% 左右的地下水补给量来自于农业灌溉水入渗和渠系渗漏入渗补给^[3]。大量地表水入渗抬高了平原区地下水位,诱发了土壤次生盐渍化等生态环境问题和农业灾害。Wu 等^[17]指出宁夏卫宁平原南山台子低平原地区中等盐渍化和重盐渍化土面积分别达到了 53.62% 和 27.98%。土地盐渍化不仅破坏了当地的生态环境,而且减少了良田的面积,使粮食减产,威胁到人类生存。过量补充地下水现象还常见于平原水库区,由于水库水位常年高于地下水位,大量水库水入渗补充地下水,造成水库周边地区地下水位升高,诱发了土壤盐渍化^[18]。

地下水污染现象在全国各地均普遍存在,如矿山开发导致的地下水水质污染、工业废水排放和工业废渣堆放造成的地下水污染、污水灌溉造成的地下水污染等。地下水高度的开发也促使地下水污染形势越来越严重,如地下水开采导致不同含水层之间交叉污染。人类生活污水和垃圾、农用肥料和农药也是地下水污染的重要污染源之一。人类的这些活动,改变了原来地下水的成分、地下水的循环条件和应力状态,进而造成一系列地下水环境问题。

人类活动对地下水环境的影响可分为两种类型:直接影响和间接影响^[21]。直接影响是指对地下水环境直接产生作用的因素,如灌溉导致水位上升、废水排放导致地下水污染等。间接影响是指对地下水环境不直接产生作用,但是会通过其它途径或机制对地下水环境产生影响的因素,如地下水管理政策的制定、工矿企业发展规划等。上述三个方面主要体现了人类活动对地下水环境的直接影响。然而,随着人类活动强度的不断增加,间接影响对地下水环境的不断改变越来越起着至关重要的作用。直接影响与间接影响相互交织在一起,进一步加大了人类活动影响下地下水环境研究的复杂性。

3 地下水环境研究主要技术方法简介

3.1 水文地球化学方法

水文地球化学是近几十年快速发展起来的学科。近些年来,在开展的大型盆地水文地质调查工作中,水文地球化学方法得到了广泛的应用,印证了水文地球化学方法的可靠性^[19]。此外,水文地球化学在成矿规律研究、地方病防治、地下水污染防治、地下水污染物迁移转化研究等方面也发挥着巨大的作用^[1]。

一系列的物理和化学过程控制着各组分在地下水中的分布^[20]。水文地球化学模拟的理论与方法已被广泛应用于研究这些物理和化学过程中。一项成功的水文地球化学模拟一般需要建立在对地下水系统、溶质的弥散和混合过程以及污染物主要的反应有所认识的基础上^[20]。在人类活动的影响下,地下水化学成分和化学反应速率不断发生着变化。水文地球化学方法将在分析这些演化过程中产生巨大的作用。但同时,由于人类活动的不确定性和复杂性,水文地球化学方法在研究人类活动对地下水环境的影响中也面临着极大的挑战,需要在理论和应用方面有更深入的研究和发展。如在人类活动的直接影响下,地下水中的主要离子一部分是直接来源于人类污染,并不是通过水岩作用进入地下水的。这时如果简单地利用 PHREEQC 等模拟软件进行水文地球化学模拟,则会得出错误的矿物溶解沉淀结果。并且,即使在同一地区,人类活动对地下水环境的影响强度也不相同,这进一步加剧了水文地球化学模拟的不确定性。

3.2 环境同位素技术

水资源与生态环境问题是制约区域可持续发展的重要因素之一,人类活动和气候变化使人们更加关

注水资源的可持续利用^[21]。地下水资源可持续利用与管理要求对地下水资源的分布、可利用性、脆弱性、含水层的水动力特征以及含水层之间的水力联系等信息有全面的了解。同位素技术在解决上述问题上具有独特的优势:可以用于分析地下水来源于不同时期和不同区域的组成成分,评价人工补给对地下水的影响和有效性;能够刻画地下水补给、径流和排泄的过程;对特定的环境同位素浓度梯度的研究,能够进一步分析出地下水不同的水循环模式^[22]。

在人类活动影响下,地下水环境发生了巨大的变化,如地下水径流条件变化、不同水体之间交换的发生率和发生强度发生了变化、地下水污染来源逐渐增多等。同位素技术是研究不同时间尺度上人类活动对地下水环境影响程度的有效工具。更为重要的是,同位素技术的污染源鉴别功能可以在地下水污染源及污染强度识别中发挥重要的作用。随着测试技术的发展和应用领域的扩大,同位素技术将会得到不断的发展和完善,以解决更多的实际问题和促进地下水科学基础理论的发展^[23]。

3.3 数值模拟

地下水数值模拟是近几十年来地下水研究当中常用的一种研究手段。它的产生与发展与计算机技术的迅速发展密切相关。迄今为止,数值模拟的应用已遍及与地下水有关的各个领域和各个产业部门,已运用地下水数值模拟方法成功地解决了许多地区的地下水水资源评价、管理与合理开发等问题^[24]。随着数值模拟理论的丰富和发展,用于地下水数值模拟的软件层出不穷。经过多年的发展,国际上已形成一批很有影响力的地下水数值模拟软件,如 Visual MODFLOW、MODFLOW、GMS、FEFLOW、RT3D、MT3DMS、MT3D 等。

随着人类活动对地下水环境的影响越来越大,地下水数值模拟技术将会更加广泛地被应用到地下水研究的各个方面。数值模拟可以定量评估和预测人类活动对地下水环境的影响,并可以通过设定不同方案进行模拟对比,为地下水资源管理提供科学依据。由于自然界本身结构、功能等十分复杂,加之人类活动多种多样,人类活动对地下水的影响也千变万化,传统的定性分析已不能满足当前研究的需要。可以预见,数值模拟技术在今后的地下水环境研究当中将会发挥越来越大的作用。

3.4 3S 技术

3S 是遥感(RS)、地理信息系统(GIS)和地球定位系统(GPS)的总称。RS 为人们提供了从空中观

察地球表面的能力,在水资源与生态植被变化、地表蒸发量估算、自然资源调查等方面发挥了重要的作用^[23]。GIS 具有强大的空间分析功能、空间数据库管理能力及空间决策支持功能,可以为地下水空间分布、地下水模型建立和地下水水质评价等提供重要的技术手段^[25]。而 GPS 则为准确确定取样点位置、研究区边界、污染源位置等提供了可靠的技术支撑。随着地下水环境的不断变化,监测数据的不断增多,3S 技术将为复杂的、多元的地下水环境研究提供可靠的技术手段和技术支撑。

3.5 现场与室内实验

目前,进行大型野外试验和室内模拟实验依然是获取含水层和污染物运移参数的主要手段。建立地下水预测模型时,准确的模型参数是保证模型预测准确的基础。抽水试验、弥散试验、吸附解析实验、渗水试验、降解实验等都是目前地下水环境研究当中常用的试验(实验)方法。随着人类活动的加剧,地下水环境变化将持续加剧,不同尺度的预测模型需要的参数不同,这就要求现有的试验(实验)方法能够满足研究的需要。对于大型野外现场试验而言,由于受场地、资金等的限制,很难广泛应用,尤其野外弥散试验目前进行的还比较少。因此,目前较为常用的还是室内实验。不同的地质环境条件也限制了大型野外试验的进行,如在基岩山区就很难进行渗水试验和大型抽水试验。因此需要设计更理想的试验方法,以满足复杂条件下地下水环境研究的需要。

3.6 地下水监测

无论是地下水环境评价与水环境演化研究,还

是地下水循环模拟研究,都依赖于大量的监测数据。目前,我国已在许多城市初步建立了地下水监测网,监测数据的管理和共享对于研究人类活动对地下水环境的影响、地下水环境演化和预测研究具有巨大的推动作用。但目前现有的地下水环境监测体系还不完善,如监测井大多集中于水源地、重点城市,而在乡村地区地下水监测井往往较少;部分监测井年久失修,已失去地下水监测的作用;不同地区地下水监测缺乏统一的理论指导,监测指标数量明显不足,监测频率也不统一。这些问题使得已有的监测数据代表性不高,精确度差,难以满足研究工作的需要。随着人类活动对地下水环境的影响越演越烈,地下水研究对地下水监测工作提出了更高的要求,因此,国家应着手制定全国性统一的地下水环境监测标准,建立起更加完善的地下水环境监测体系和共享平台。

4 人类活动影响下地下水环境研究的方法体系

人类活动是地下水环境发生变化的主要驱动力之一。在人类活动的影响下,地下水环境研究比传统的水文地质研究内容更加广泛,不仅涉及到地下水的自然属性,也与其社会属性密切相关。笔者认为,人类活动影响下的地下水环境研究应基于调查-评价-试验-预测-监测-管理框架,建立一套完整的充分考虑人类活动对地下水环境影响的并且综合运用多学科理论与方法的研究体系。该体系主要包括地下水环境调查与评价、地下水环境试验、地下水环境预测、地下水环境监测、地下水环境保护与管理五个子系统(图 1)。

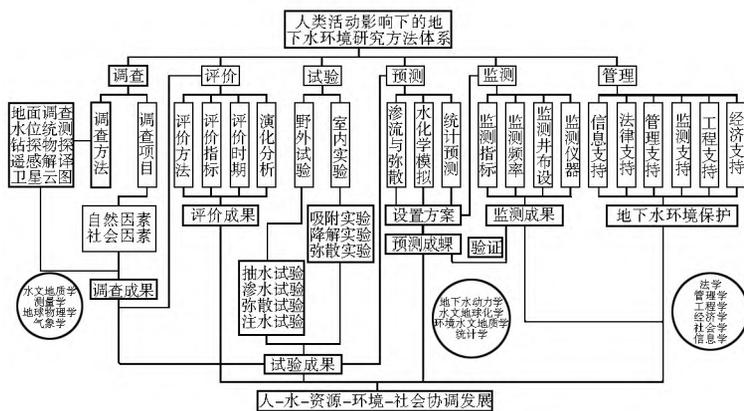


图 1 人类活动影响下地下水环境研究的方法体系

Fig. 1 Methodological system for groundwater environment research under human intervention

(1) 地下水环境调查与评价方法体系。

传统意义上的地下水环境调查大多局限于对地下水水质现状和水量进行调查。随着人类活动强度越

来越大,对地下水的影响程度也越来越大,传统意义上的地下水环境调查评价不能全面反映地下水环境的内容,地下水环境调查评价还应包括地下水环境

的演化机制、自然变化和人类活动对地下水环境作用机制等方面的内容。人类活动影响下的地下水环境调查与评价方法体系包括调查方法、调查项目、评价指标、评价方法、评价时期、演化分析、反馈机制分析等。调查方法除传统的地面调查、水位统测、钻探、物探等方法技术外,还应积极采用遥感解译、卫星云图等先进方法。调查项目除与地下水环境相关的自然要素,如地形地貌、水文地质条件、地表水体状态等以外,还应充分对与地下水环境相关的社会要素进行调查,如经济发展规划、污染源分布、社会人口分布、水资源管理政策等。对于地下水环境评价,除要进行现状评价外,还应进行地下水环境预测评价、地下水环境演化及其影响因素分析。评价指标既应包括自然要素主导的指标,也应包括人为活动主导的指标。评价方法的选择应在遵循国家标准的基础上,充分借鉴其它已有的评价方法,尤其是国际上应用范围较广、应用效果较好的评价方法。在进行调查评价时,应首先采用水文地球化学、同位素和多元统计等方法,确定人类活动是否对地下水环境有影响,然后采用选定方法对该影响进行评价。

(2) 地下水环境试验方法体系。

地下水环境试验是确定人类活动对地下水环境影响程度,对地下水环境进行预测和管理的基础。在进行实验时,应注重室内实验与野外现场试验相结合,并对试验的尺度效应给予重视。对于目前常用的抽水试验、弥散试验、吸附解析实验、渗水试验、降解实验,应根据具体研究目的进行有效的选用。在进行试验时,应避免人为对地下水环境造成污染。此外,试验场地或实验样品的采集也应充分考虑区域背景值和人类活动的影响。

(3) 地下水环境预测方法体系。

人类活动影响下的地下水环境预测是进行地下水环境保护和科学管理的主要技术支撑之一。准确的预测有赖于预测理论和计算机技术的发展。就地下水水质预测而言,预测方法一般可以分为以下三类^[16]。第一类是基于渗流理论和弥散理论的数值模型预测方法。该方法大多只考虑污染物在含水层中的物理过程,或只考虑简单的化学反应过程,通过对水文地质条件的概化,建立相应的模型,给定初始条件和边界条件,采用模拟软件进行模型计算与预测^[27-28]。第二类是基于水文地球化学的预测方法。这类方法通过研究地下水与含水层介质之间的水岩作用,对地下水水质的演化进行预测^[29]。第三类是基于数理统计的水质预测方法。该方法主要通过已有资料进行统计分析,从而建立预测模型,对未来

短期内的变化和宏观演变趋势进行预测分析^[30]。对于人类活动影响下的地下水环境预测,应充分考虑人类活动的多样性及其对地下水环境影响的多变性。考虑到基于数理统计的预测方法对监测数据要求较高,在现有地下水监测数据缺乏的状况下,极有可能难以利用;而基于水文地球化学的预测方法,要求一般难以定量区分人类活动对地下水环境的影响和自然条件对地下水环境的影响,因此应用范围受到了极大的限制。基于渗流和弥散理论的预测方法,是预测人类活动影响下地下水环境变化的有效方法。

(4) 地下水环境监测方法体系。

地下水环境监测不仅是进行地下水环境预测的基础,也是地下水环境保护和科学管理的基础。为预测在人类活动影响下地下水环境的变化趋势,以便能够及时做出相应的决策,应建立完善的地下水环境监测体系,并且应重视人类活动强烈区的地下水环境监测,使其既满足区域地下水环境监测的需要,也符合重点人类活动区地下水环境监测的要求,并逐渐实现地下水监测资料共享。地下水环境监测体系的建设应包括监测项目的确定、监测频率的确定、监测井的布设、监测设施的安装与完善、监测水平的升级等方面。

(5) 地下水环境保护与管理方法体系。

人类活动影响下的地下水环境保护与管理涉及到自然、社会、政治、经济、技术等多方面的因素,是一项集技术性、社会性、政策性于一体,内涵丰富、复杂的系统工程。它实际包括了信息支持系统、法律政策支持系统、管理体系支持系统、动态监控体系支持系统、地下水环境保护工程支持系统和经济支持系统。信息支持系统将获得的地下水环境信息在不同群体、不同部门和不同机构之间进行传递,承担着沟通和协调的职能,保证了分散的地下水环境信息得到有机组合,实现地下水环境的保护和科学管理。法律政策支持系统从国际和政府法律层面保障地下水环境保护和管理的有序进行。科学的地下水管理体系是保障地下水可持续管理的先决条件和技术保障^[31]。地下水环境保护工程是减少人类活动对地下水造成破坏的重要手段,可大大减少人类活动对地下水环境的不利影响。地下水保护工程应科学规划,根据不同人类活动类型、活动强度、地下水环境响应机制进行建设。经济是支撑地下水环境保护的重要物质基础,采取各类措施进行地下水环境保护,治理地下水环境问题,必须建立在完善的资金投入保障体制,保证所需资金的正常投入。

5 结语

在人类活动的强烈影响下,地下水环境发生了翻天覆地的变化。如何应对人类活动对地下水环境造成的不利影响关系到人类的生存和社会的发展。地下水环境是一个同时具有自然属性和社会属性的概念,一切与地下水直接和间接相关的自然作用和社会作用均应归到地下水环境的研究范畴之内。人类活动对地下水环境的影响越演越烈,对地下水环境的影响方式也是千变万化,因此,人类活动影响下的地下水环境研究内容十分复杂,所用到的研究方法也是多种多样。只有综合运用多种研究方法才能对地下水环境问题的某一方面有一个较充分、较深刻的认识,从而提出强有效的应对措施和管理办法。这一方面要求国家建立更完善的地下水环境监测体系,完善更开放的监测数据共享机制,另一方面需要广大水文地质工作者不断提高理论与知识水平,综合运用多种技术手段和理论方法,为保护地下水环境、改善地下水环境不断努力。

致谢:该文是在本人博士学位论文的基础上加以整理和完善后形成的。在此感谢五位博士学位论文匿名评审人给出的建议和高度评价,感谢论文答辩委员会:长安大学李佩成院士、中煤科工集团西安研究院李竞生研究员,西安理工大学黄强教授、西北工业大学吴耀国教授、长安大学李云峰教授、周维博教授和王玮教授。十分感谢审稿人对本文提出的宝贵意见。

参考文献(References):

- [1] 王焰新,马腾,郭清海,等.地下水与环境变化研究[J].地学前沿,2005,12(特刊):14-21.(WANG Yarr xin,MA Teng, GUO Qing-hai, et al. Groundwater and environmental change[J]. Earth Science Frontiers, 2005, 12(Suppl): 14-21. (in Chinese))
- [2] 中国地下水科学战略研究小组.中国地下水科学的机遇与挑战[M].北京:科学出版社,2009.(Committee on Chinese Groundwater Science. Opportunities and Challenges in Chinese Groundwater Science[M]. Beijing: Science Press, 2009. (in Chinese))
- [3] 李培月.人类活动影响下地下水环境研究—以宁夏卫宁平原为例[D].西安:长安大学,2014.(LI Peiyue. Research on Groundwater Environment under Human Interferences: A Case Study from Weinig Plain, Northwest China[D]. Xi'an: Chang'an University, 2014. (in Chinese))
- [4] 陈梦熊,马凤山.中国地下水资源与环境[M].北京:地震出版社,2002.(CHEN Meng-xiong, MA Feng-shan. Groundwater Resources and Environment of China[M]. Beijing: Seismological Press, 2002. (in Chinese))
- [5] Li P, Qian H, Wu J. Accelerate research on land creation[J]. Nature, 2014, 510(7503): 29-31. doi: 10.1038/510029a
- [6] Wu J, Li P, Qian H. Opportunities and challenges associated with the world's largest geotechnical engineering project for land creation on the Loess Plateau[C]. In: Proceeding of International Conference on Computer Science and Environmental Engineering (CSEE2015), DEStech Publications, Inc., 2015, 141-147.
- [7] Li P, Qian H, Howard K W F, et al. Building a new and sustainable "Silk Road economic belt"[J]. Environmental Earth Sciences, 2015, 74(10): 7267-7270. doi: 10.1007/s12665-015-4739-2
- [8] 《环境科学大辞典》编委会.环境科学大辞典[M].北京:中国环境科学出版社,2008.(Editorials of the Thesaurus of Environmental Science. Thesaurus of Environmental Science[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2008. (in Chinese))
- [9] Agrawal D, Kumar P, Avtar R, et al. Multivariate Statistical Approach to Deduce Hydrogeochemical Processes in the Groundwater Environment of Begusarai District, Bihar[J]. Water Qual Expo Health, 2011, 3: 119-126. doi: 10.1007/s12403-011-0049-4
- [10] Chowdhury M T A, Meharg A A, Deacon C, et al. Hydrogeochemistry and Arsenic Contamination of Groundwater in the Haor Basins of Bangladesh[J]. Water Qual Expo Health, 2012, 4: 67-78. doi: 10.1007/s12403-012-0066-y
- [11] Alamgir A, Khan M A, Schilling J, et al. Assessment of groundwater quality in the coastal area of Sindh province, Pakistan[J]. Environ Monit Assess, 2016, 188: 78. doi: 10.1007/s10661-015-5061-x
- [12] Nematollahi M J, Ebrahimi P, Razmara M, et al. Hydrogeochemical investigations and groundwater quality assessment of Torbat Zaveh plain, Khorasan Razavi, Iran[J]. Environ Monit Assess, 2016, 188: 2. doi: 10.1007/s10661-015-4968-6
- [13] Pandey V P, Chapagain S K, Kazama F. Evaluation of groundwater environment of Kathmandu Valley[J]. Environ Earth Sci, 2010, 60: 1329-1342. doi: 10.1007/s12665-009-0263-6
- [14] DZ 0225-2004, 建设项目地下水环境影响评价规范[S].((DZ 0225-2004) Specification of Environmental impact Statement from groundwater for construction projects[S]. (in Chinese))
- [15] HJ 610-2016, 环境影响评价技术导则—地下水环境[S].((HJ 610-2016) Technical guidelines for environmental impact assessment: groundwater environment[S]. (in Chinese))
- [16] 李培月,吴健华.地下水环境问题及其防治对策[J].环境科学与管理,2010,35(4):60-62,71.(LI Peiyue, WU Jianhua. Groundwater environmental problems and their countermeasures[J]. Environmental Science and Management, 2010, 35(4): 60-62, 71. (in Chinese))
- [17] Wu J, Li P, Qian H, et al. Using correlation and multivariate statistical analysis to identify hydrogeochemical processes affecting the major ion chemistry of waters: Case study in Laoheba phosphorite mine in Sichuan, China[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2014, 7(10): 3973-3982. doi: 10.1007/s12517-013-1057-4
- [18] 李培月.中国西北新农村建设面临的水安全问题及对策[J].中国农村水利水电,2010,(2):35-37.(LI Peiyue. Safety problems of water resources and countermeasures for new so-

- cialist rural areas in Northwest China[J]. China Rural Water and Hydropower, 2010, (2): 35-37. (in Chinese)
- [19] 钱会, 马致远, 李培月. 水文地球化学[M]. 第二版. 北京: 地质出版社, 2012. (QIAN Hui, MA Zhi yuan, LI Pei yue. Hydrogeochemistry[M]. the second edition. Beijing: Geological Publishing House, 2012. (in Chinese))
- [20] Bundschuh J, Sracek O. Hydrogeochemistry principles for geochemical modeling. In: Geochemical Modeling of Groundwater, Vadose and Geothermal Systems, edited by J. Bundschuh and M. Zilberbrand. CRC Press, 2012.
- [21] 陈宗宇, 齐继祥, 张兆吉, 等. 北方典型盆地同位素水文地质学方法应用[M]. 北京: 科学出版社, 2010. (CHEN Zongyu, QI Ji xiang, ZHANG Zhaoji, et al. Application of Isotope Hydrogeology in Typical Northern Basins of China[M]. Beijing: Science Press, 2010. (in Chinese))
- [22] 夏雨波, 谢海澜, 王冰, 等. 地下水循环演化模式及研究方法综述[J]. 地质调查研究, 2012, 35(4): 299-303. (XIA Yubo, XIE hailan, WANG Bing, et al. Review on regional groundwater cycle and evolution [J]. Geological Survey and Research, 2012, 35(4): 299-303. (in Chinese))
- [23] 周训, 金晓媚, 梁四海, 等. 地下水科学专论[M]. 北京: 地质出版社, 2010. (ZHOU Xun, JIN Xiaomei, LIANG Sihai, et al. [M]. Groundwater Science Monograph[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2010. (in Chinese))
- [24] 李培月. 非稳定流抽水试验确定越流承压含水层水文地质参数方法对比研究[D]. 西安: 长安大学, 2011. (LI Pei yue. Comparative study on the methods for determining hydrogeological parameters in leaky confined aquifers by transient flow pumping test [D]. Xi'an: Chang'an University, 2011. (in Chinese))
- [25] 贾艳红, 赵传燕, 牛博. RS 与 GIS 技术在地下水研究中的应用[J]. 地下水, 2011, 33(1): 1-3. (JIA Yan hong, ZHAO Chuanyan, NIU Bo. Application of RS and GIS technology in the study of groundwater[J]. Ground water, 2011, 33(1): 1-3. (in Chinese))
- [26] 吴健华, 李培月, 钱会. 基于 Holt 指数平滑模型的地下水水质预测[J]. 工程勘察, 2013(10): 38-41, 38. (WU Jianhua, LI Pei yue, QIAN Hui. Groundwater quality prediction based on Holt exponential smoothing model[J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2013(10): 38-41, 38. (in Chinese))
- [27] Furlong B V, Riley M S, Herbert A W, et al. Using regional groundwater flow models for prediction of regional wellwater quality distributions[J]. Journal of Hydrology, 2011, 398: 1-16.
- [28] 张春志. MODFLOW 在地下水水源地水质预测中的应用[J]. 地下水, 2007, 29(1): 61-64. (ZHANG Chunzhi. Application of MODFLOW in groundwater quality prediction of water source site[J]. Ground water, 2007, 29(1): 61-64. (in Chinese))
- [29] Mugunthan P, McDonough M K, Dzombak D A. Geochemical approach to estimate the quality of water entering abandoned underground coalmines[J]. Environmental Geology, 2004, 45: 769-780.
- [30] 袁志梅, 徐慧珍, 叶晓宾. 中长期地下水水质预报的准确性探讨—以西安市为例[J]. 水文地质工程地质, 1996(5): 8-10. (YUAN Zhimei, XU Hui zhen, YE Xiaobin. Discussion on the accuracy of mid-long term groundwater quality prediction: case study of Xi'an [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 1996(5): 8-10. (in Chinese))
- [31] 姜纪沂. 地下水环境健康理论与评价体系的研究及应用[D]. 吉林: 吉林大学, 2007. (JIANG Ji yi. Study and application of theory and evaluation architecture of groundwater environment health [D]. Jilin: Jilin University, 2007. (in Chinese))

(下接第 101 页)

- [23] 陈理想, 梁忠民, 朱金峰. SWAT 模型在黄鸭河流域径流模拟中的应用研究[J]. 水电能源科学, 2011(10): 8-11. (CHEN Li xiang, LIANG Zhong ming, ZHU Jing-feng. Application of SWAT model to runoff simulation in Huangyahe Basin[J]. Water Resource and Power, 2011(10): 8-11. (in Chinese))
- [24] 林凯荣, 魏新平, 黄淑娟, 等. SWAT 模型在东江流域的应用研究[J]. 水文, 2013(4): 32-36. (LIN Kai rong, WEI Xin ping, HUANG Shu xian. Application of SWAT model in Dongjiang River Basin[J]. Journal of China Hydrology, 2013(4): 32-36. (in Chinese))
- [25] 夏智宏, 周月华, 许红梅. 基于 SWAT 模型的汉江流域径流模拟[J]. 气象, 2009(9): 59-67, 132. (XIA Zhi hong, ZHOU Yuehua, XU Hong mei. Runoff simulation in hanjiang river basin based on SWAT model [J]. Meteorological Monthly, 2009(9): 59-67, 132. (in Chinese))
- [26] 李磊, 董晓华, 喻丹, 等. 基于 SWAT 模型的清江流域径流模拟研究[J]. 人民长江, 2013(22): 25-29, 42. (LI Lei, DONG Xiaohua, YU Dan, et al. Study on runoff simulations on Qingjiang River Basin by SWAT model [J]. Yangtze River, 2013(22): 25-29, 42. (in Chinese))