

我国北方区域地下水演化研究综述

张光辉,王 茜,田言亮,严明疆,王金哲

(中国地质科学院水文地质环境地质研究所,河北 石家庄 050061)

摘要:基于“六五”至“十二五”期间有关区域地下水演化的国家和省部级重点科技项目主要成果,对近 30 年来我国地下水演化研究的主要进展进行了综述。我国区域地下水演化研究主要集中在北方地区,项目选题的起源和立项的时代背景具有鲜明的时代性和社会重大需求驱动,包括华北和西北地区流域尺度地下水演化的国家重点项目研究,都是围绕国家目标或区域经济发展重大需求,及时揭示了气候变化和人类活动影响下区域地下水演化的关键科技问题,突显了重大科学研究的时代性和必要性。

关键词:区域地下水;水循环演化;气候变化;人类活动影响;中国北方

中图分类号:P641 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2015)05-0124-06

Review of research on regional groundwater evolution in Northern China//ZHANG Guanghui, WANG Qian, TIAN Yanliang, YAN Mingjiang, WANG Jinzhe (*Institute of Hydrogeology and Environmental Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Shijiazhuang 050061, China*)

Abstract: Based on major achievements from the national as well as the provincial-and ministerial-level key scientific and technological projects on regional groundwater evolution during the period from China's Sixth Five-Year Plan to its Twelfth Five-Year Plan (1981 to 2014), a review is conducted of the main advances in such research over the last 30 years in China. The research on this issue is concentrated in Northern China, and the topic selection and project approval are characterized by time features, and driven by significant social requirements. For example, a national key project on research of regional groundwater evolution at the basin-scale in Northern and Northwestern China has been performed to realize the national development objectives and meet the requirements of regional economic development. Related research in China has revealed the key issues in regional groundwater evolution under the influences of human activities and climate change and demonstrated the time features and necessity of such research.

Key words: regional groundwater; water cycle evolution; climate change; influence of human activity; Northern China

区域地下水演化研究具有时代性,与经济社会对地下水依赖程度和影响状况密切相关。20 世纪 70 年代以来,我国北方地区生活、工业和农业用水对地下水供给的依赖程度不断提高,同时,人类活动对地下水及其环境影响不断增强,传统地下水研究理论方法不断遭遇新问题的挑战,许多问题难以应用传统地下水理论方法解答,制约了区域经济社会可持续发展,包括地下水的数量、质量和动力场演化与更新周期性等问题^[1-6]。这些问题的及时解决,有力地促进了我国北方经济社会可持续发展,丰富和发展了我国区域地下水演化理论体系。

主要是满足城市供水需求和部分地区农田灌溉用水。当时地下水研究侧重解决因地下水位埋深而造成广泛土地盐渍化问题和局部地区农田供水水文地质条件调查,在我国北方地区尚未出现区域性地下水超采等环境地质问题,地下水评价理论是移植前苏联的“四大储量”理论。例如在我国首次开展的区域地下水资源评价——“六五”期间国家重点科技攻关项目“华北地区水资源评价和开发利用研究”中,重点研究了华北区域地下水资源的“动储量”、“调节储量”、“静储量”和“开采储量”,产生了 3 个计算重复量,即山区与平原之间地下水资源的重复量、地下水与地表水之间重复量和井灌回归的重复量,这是评价理论方法的局限性问题。

1 区域地下水演化研究起源与时代特征

在 20 世纪 80 年代以前,我国地下水开发利用

首次完成我国区域地下水资源评价之后,发现

基金项目:国家自然科学基金(41172214);中国地质调查局国土资源调查项目(12120115049701)
作者简介:张光辉(1959—),男,辽宁沈阳人,研究员,博士,主要从事区域水循环演化和地下水可持续利用研究。E-mail:huanjing59@163.com
通信作者:王茜(1987—),女,河北石家庄人,博士研究生,主要从事水文地质研究。E-mail:wangqian870731@gmail.com

许多地下水资源问题仍然无法解释清楚。于是,“七五”期间开展了国家重点科技攻关项目“华北地区及山西能源基地水资源研究”,突破了地下水与地表水分割、分别由不同部门进行研究的做法,首次将地下水与大气降水、地表水和包气带水作为统一的体系进行研究,简称“四水”转化研究,并在我国东北地区的沈阳,华北的石家庄、南宫和商丘,西北的昌吉等地区,建立了“四水”转化研究的大型均衡试验基地;同时,从国外引入零通量面(ZFP)等无参数方法和水势理论^[7],开始应用水势理论研究地下水与降水、地表水或包气带水之间的转化规律。但是,这一时期仍然是侧重局域问题研究,区域尺度地下水演化基础研究仍然十分薄弱。

“八五”期间,国家科技攻关项目开始关注流域尺度水资源研究。在黄河流域水资源评价项目中,提出了“自然-社会”双重因素对区域水资源形成与演变影响问题,以及基于宏观经济的区域水资源优化配置理论方法,引入了水循环理念。但是,仍然没有脱离地下水储量理论局限性的束缚,欠缺人类活动影响下水循环演化过程与机理研究。

上述三期(15年)国家级科技攻关研究之后,华北地区地下水资源紧缺和超采问题仍然突出,为此大家都在反思问题根源所在。1994年中国科学院和中国工程院院士张宗祜先生在国内首先提出开展“大陆水圈水循环演化研究”建议,并得到原地质矿产部和中国科学院地学部的大力支持。同年,中国科学院地学部将“大陆水圈循环演化研究”列入《21世纪发展纲要》中,从战略角度确立了“大陆水循环演化”在我国地学研究中的地位。原地质矿产部启动了以张宗祜院士为首席科学家、张光辉为项目负责人的部级重点基础研究项目“区域地下水演化过程及其与相邻层圈相互作用研究”(1996—2000年)。2001年,张宗祜、张光辉等系统阐述了“大陆水循环系统演化及环境意义”^[8-9]。

“十五”期间,国土资源部继续支持张宗祜院士的“大陆水循环演化”研究,开展了以张光辉为首席科学家负责的部级重点基础研究项目“西北典型内流盆地水循环规律与地下水形成演化模式”的研究(2001—2005年)。2006—2010年期间,国家重点基础研究发展计划(973计划)的项目“海河流域二元水循环模式与水资源演变机理”,在气候变化和人类活动影响下流域尺度水循环、区域地下水功能属性、不同层圈之间水分通量模式演变及其动力学特征与机制研究方面,取得重大突破,深入阐明了华北地区潮白河流域、永定河流域、大清河流域、子牙河流域和漳卫河流域地下水演化过程与机制,首次

揭示了气候变化和人类活动影响下地下水循环的自然特征演变为“自然-人工”二元模式特征。2014年,《区域地下水演化与评价理论方法》^[10]由科学出版社正式出版,它详尽阐述了非饱和水运移与水势理论、区域地下水演化与水循环理论和地下水异变机制与可持续性评价理论。在这一期间,国家科技攻关项目开始重视生态脆弱区的“资源水-边缘水-生态水-灾害水”及其与国民经济和生态环境之间相互关系的研究,出现了水资源承载能力的观点。

2 北方区域地下水演化研究主要进展

2.1 张宗祜院士主导的研究进展

1992年,张宗祜院士等提出开展“人类活动影响下华北平原地下水环境的演化与发展”课题研究,1995年详尽阐述了“开展中国大陆水圈演化研究,保护人类生存环境”的科学思想^[11],并在国家自然科学基金委员会主办的“21世纪水问题论坛”上深入阐明了“大陆水循环演化研究”的科学内涵、对我国相关学科发展的重大意义和促进社会经济发展的重大作用。

在张宗祜院士主持完成的国家自然科学基金重点项目“人类活动影响下华北平原地下水环境的演化与发展”中,取得一系列开拓性研究成果,对后续我国地下水演化研究发挥了重大指引作用。该项目提出:①青藏高原的隆升和晚更新世以来,海平面变化对华北平原地下水动力场和水文地球化学场演化产生了重要作用,包括对区域地下水补给、更新、径流和排泄过程及模式的影响^[8,12];②不同时间尺度的气候周期性变化是华北平原地下水承载力变化的主要驱动力,它与人类活动影响彼此嵌套,导致地下水补给、更新和承载能力变化表现出多变性、不确定性和阶段性特征^[13-14];③对于华北平原地下水可持续性的认识 and 把握,需要从全球变化的视野出发,立足大陆尺度水循环演化规律,认识到气候、构造和人类活动是区域地下水演化的关键驱动力,它们彼此叠加,并且在不同时空其影响强度处于不断变化之中^[15-17];④为了从整体上认识华北平原地下水系统演化的地质历史背景,构建了大陆尺度的气候-地质环境-陆地水系统演化断面,东西长3500 km,南北宽600 km,高差近5000 m,时间跨度2万a,包括大陆水圈演化的气候、地质环境和陆地水系统在动量、能量和物质运动中的内在联系^[8]。

上述研究成果立足于区域、流域、分区和亚区等不同单元之间水系统有机联系与互动,将大陆尺度水循环演化作为指导思想,贯穿了“人-地”和谐的发展观,既突出了区域地下水系统的完整性和体系性,

又充分体现流域系统内的多层次结构、分形特征和不同时空尺度水循环子系统间耦合与嵌套机制,首次实现了时空尺度的认识跨越^[1,18]。

2.2 北方区域地下水演化与可持续性研究进展

张光辉等^[19-20]提出,地下水可持续利用理念是随着社会经济和环境因素变化而不断发展与完善的,既要强调目前需求,又要考虑长期需要,同时,还需要考虑社会和科技不断进步对水资源需求的影响,包括不同时期水资源的稀缺程度、综合价值、利用成本和市场价格的变化,需确保地下水资源在国家 and 区域社会经济发展的关键时期发挥应有的作用,通过有序和合理利用地下水资源,促进经济社会可持续发展,长期超采或全面禁采地下水都是不正确的。

2006 年,张光辉等提出区域地下水功能及可持续性评价理论与方法,并于 2009 年出版《区域地下水功能可持续性评价理论与方法》^[4]。该理论与方法及其关键技术被广泛应用于我国华北、东北和西北地区地下水资源及其环境问题地质调查项目中,并取得一系列学术成果。

2.3 内陆干旱区流域尺度地下水演化研究进展

长期以来,西北地区水资源开发利用中未能充分考虑干旱地区水资源特点及水循环规律,对于流域水循环演化及其与大气降水、冰雪融水、地表水和地下水之间转化过程及机制等研究较薄弱^[21-22]。然而,西北内陆(盆地)平原区降雨稀少,下游区蒸发强烈,生态环境极度脆弱,人、水、土地与生态环境之间矛盾突出^[23-26]。2000—2005 年期间,通过国土资源部重点基础研究项目“西北典型内陆盆地水循环规律与地下水形成演化模式”的研究,认识到:①地质构造控制、多单元组成复杂的地下水循环系统内存在复杂的转化过程与机制^[27-29];②平原区地下水补给量与山区降水和气温变化密切相关,主要来自降水和地表水直接入渗补给、洪水期出山口泛洪入渗补给和地质历史时期形成的补给;③自祁连山区至额济纳盆地,河水与地下水之间至少经历了 3 次相互转化过程^[30-33];④自 20 世纪 50 年代至 90 年代人类活动影响强度呈不断增大趋势,中游区人类活动主导流域尺度水循环演化特征,上、中、下游区的人类活动影响强度分别为 1%、87% 和 12%^[25,34-35]。

3 北方浅部地下水同位素分层特征研究进展

由于我国北方地区的孔隙地下水含水层埋深差异较大,导致地下水补给与更新能力差异较大,地下水年龄从几十年的“新水”至几万年的“老水”差异悬殊,这些差异在地下水同位素中呈现分层标识特征^[36]。在我国北方地区,自西向东,主要分布有塔

里木盆地、准噶尔盆地、柴达木盆地、银川平原、鄂尔多斯盆地、山西太原盆地,以及华北平原、辽河平原和松嫩平原等,这些大型盆地或平原区主要含水层地下水中¹⁸O、²H(或 D)、³H 和¹⁴C 含量的分布具有明显分层现象^[37-39],浅层地下水中 δD 和 $\delta^{18}O$ 值分别比深层地下水相应值大 4‰~16‰和 1‰~2‰,浅层地下水中氡值明显大于深层地下水。浅层地下水的 δD 平均值-78.98‰(准噶尔盆地)~-64.17‰(河北平原), $\delta^{18}O$ 平均值-10.75‰(准噶尔盆地)~-8.77‰(河北平原),¹⁴C 年龄小于 1 万 a。深层地下水氡含量很低或基本不含氡, δD 平均值-95.43‰(准噶尔盆地)~-76.13‰(河北平原), $\delta^{18}O$ 平均值-126‰(准噶尔盆地)~-10.71‰(河北平原),¹⁴C 年龄大于 1 万 a,常见 1.5 万~3 万 a 的监测结果。

上述特征,表征了不同埋深和不同水文地质条件下的地下水具有不同循环与更新能力,与地下水埋藏状况、当地降水和河水等补给条件、地下水补给路径和开采程度等因素密切相关,与末次冰期以来古气候变化相关^[19,40]。随远离海岸线和高程增加,大陆效应和高程效应的影响逐步减弱^[41]。长期大规模开采,能促进深层水更新能力提高^[1,19,42]。

4 区域地下水演化信息熵特征与灾变机制研究进展

我国松散孔隙地下水参与的区域水循环系统是一个开放系统,不断与外界进行物质交换实现水循环,水从高水势向低水势处自发地流动,包括化学组分的聚积,由此,区域水循环过程演化是不可逆过程,无论是地表水或是地下水中的水质点和化学组分只能沿水势最大梯度指向不断迁移,不会从下游沿水循环路径逆向返回上游始发地^[43]。区域水循环带来水资源演化,包括地下水及其与相邻圈层之间相互作用,总是处于非平衡状态(演化过程)中,经历着较漫长的渐变过程,其间存在突变或灾变事件(例如特枯或特丰水事件,为有序结构),在时空尺度上具有多样性,并彼此关联或嵌套耦合。

在区域水循环演化过程中,突变或灾变之前,处于高熵态,突变或灾变过程处于低熵态,水循环演化过程就是一个熵减少的过程^[44]。基于 1470—2009 年期间华北平原降水量数据的研究^[45]表明,区域水循环演化结构熵的过程线与年降水量动态分布过程线之间具有变化互动特征。无论降水量偏大或偏小,其熵值都远离均线系统。熵值愈大,表明该水文要素愈靠近多年均值,愈趋于稳定(平衡)态;熵值愈小,表明该水文要素愈远离稳定态,或遭遇了异常气候事件(特大干旱或洪涝)明显影响,水文要素的

强弱变化结构(过程)愈简单,确定性愈强。

5 区域地下水形成与水循环演化关系研究进展

在区域地下水储存资源形成与演变的地史进程中,万年、千年、百年尺度或更小时间尺度的多雨期与干旱期,或高温期与低温期交替出现或叠加共现,致使地下水位、水量和水质不断变化^[46],这如同现今的四季变化,夏季多雨,秋冬少雨。在过去的1.2万a中,华北平原地下水净补给量与降水量之间水分通量变化率为0.240 mm/a,与陆面蒸发量之间水分通量变化率为0.260 mm/a,与侧向径流量之间水分通量变化率为0.982 mm/a,与地表径流量之间水分通量变化率为0.320 mm/a。全新世以来,华北平原地下水多年平均的年净补给系数(净补给量与年降水量之比),介于0.21~0.27之间变化;区域地下水储变量与陆面蒸发量之间的水分通量则随年蒸发量的增大而增大(为负值),其变化率随年蒸发量的减小而增大,这主要受降水和地表径流变化制约^[1,12,47]。站在现今的角度,距今5000~4000a和距今8000~5600a期间是该平原区域地下水系统获得净补给量与陆面蒸发消耗最为稳定的时期,两个时段多年平均净补给量分别为29.3 mm/a和35.2 mm/a,多年平均蒸发系数分别为0.78和0.76^[12]。

6 未来研究方向

在未来我国北方区域地下水演化研究中,需要进一步重视末次冰期以来流域尺度水循环演化过程、周期性及地下水主要补给期识别;重视流域尺度的上游源区水循环补给源、组成、模式和变化规律,以及现代流域水循环过程中河流-地下水系统之间水通量变化机制和水土资源优化配置与生态环境保护模式研究;重视气候变化和人类活动二元耦合对区域地下水补给-更新能力及其地质环境灾变影响的时空特征、程度研究,尤其华北农业区超采情势下地下水演变与可持续保障能力问题的基础研究^[10,47]。

参考文献:

[1] 张光辉,费宇红,刘克岩,等. 海河平原地下水演变与对策[M]. 北京:科学出版社,2004.
[2] 张兆吉,费宇红,赵宗壮,等. 华北平原地下水可持续利用调查评价[M]. 北京:地质出版社,2009.
[3] 张光辉,严明疆,杨丽芝,等. 地下水可持续开采量与地下水功能评价的关系[J]. 地质通报,2008,27(6):875-881. (ZHANG Guanghui, YAN Mingjiang, YANG Lizhi, et al. Relationship between the groundwater sustainable yield and groundwater function assessments [J]. Geological

Bulletin of China,2008,27(6):875-881. (in Chinese))
[4] 张光辉,聂振龙,申建梅,等. 区域地下水功能可持续性评价理论与方法研究[M]. 北京:地质出版社,2009.
[5] 费宇红,陈树娥,刘克岩. 滹沱河断流区水环境劣变特征与地下调蓄潜力[J]. 水利学报,2001,32(11):41-44. (FEI Yuhong, CHEN Shue, LIU Keyan. Characteristics of inferior variation of water environment in Hutuohe River dried-up area [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2001,32(11):41-44. (in Chinese))
[6] 费宇红,张兆吉,张凤娥,等. 华北平原地下水位动态变化影响因素分析[J]. 河海大学学报:自然科学版,2005,33(5):538-541. (FEI Yuhong, ZHANG Zhaoji, ZHANG Fenge, et al. Factors affecting dynamic variation of groundwater level in North China Plain[J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2005, 33(5): 538-541. (in Chinese))
[7] 费宇红,张光辉. 水势理论在四水转化研究中应用时代特征与趋势:纪念ZFP方法引进我国30周年[J]. 地质科技情报,2012,31(5):152-156. (FEI Yuhong, ZHANG Guanghui. Application characteristics and trend of soil moisture potential method[J]. Geological Science and Technology Information, 2012, 31(5): 152-156. (in Chinese))
[8] 张宗祜,沈照理,薛禹群. 华北平原地下水环境演化[M]. 北京:地质出版社,2000.
[9] 张光辉,陈宗宇,费宇红. 华北平原地下水形成与区域水文循环演化的关系[J]. 水科学进展,2000,11(4):415-420. (ZHANG Guanghui, CHEN Zongyu, FEI Yuhong. Relationship between the formation of groundwater and the evolution of regional hydrologic cycle in North China Plain[J]. Advances in Water Science, 2000,11(4):415-420. (in Chinese))
[10] 张光辉,费宇红,聂振龙,等. 区域地下水演化与评价理论方法[M]. 北京:科学出版社,2014.
[11] 张宗祜,施德鸿,任福弘,等. 论华北平原第四系地下水系统之演化[J]. 中国科学:D辑,1997,27(2):168-173. (ZHANG Zonghu, SHI Dehong, REN Fuhong, et al. Evolution of quaternary groundwater system in North China Plain[J]. Science of China: Series D, 1997,27(2):168-173. (in Chinese))
[12] 张光辉,聂振龙,陈宗宇,等. 全新世以来华北平原层间水循环演化过程与区域地下水演变周期性[J]. 地球学报,2001,22(4):293-297. (ZHANG Guanghui, NIE Zhenlong, CHEN Zongyu, et al. Evolutionary process of hydrologic cycle and periodicity of groundwater change in North China Plain since Holocene[J]. Acta Geoscientia Sinica,2001,22(4):293-297. (in Chinese))
[13] 张光辉,费宇红,李慧娣,等. 海河流域平原浅层地下水位持续下降动因与效应[J]. 干旱区资源与环境,2002,16(2):32-36. (ZHANG Guanghui, FEI Yuhong, LI Huidi, et al. Mechanism and consequence of continual

- decline of shallow groundwater level in Haihe River Basin [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2002, 16(2): 32-36. (in Chinese))
- [14] 张光辉,陈树娥,刘克岩,等. 海河流域水资源紧缺属性与对策[J]. 水利学报, 2003, 34(10): 41-44 (ZHANG Guanghui, CHEN Shue, LIU Keyan, et al. Property of water resources shortage in Haihe River Basin and counter measure[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2003, 34(10): 41-44. (in Chinese))
- [15] 张宗祜,施德鸿,沈照理,等. 人类活动影响下华北平原地下水环境演化与发展[J]. 地球学报, 1997, 18(4): 291-294. (ZHANG Zonghu, SHI Dehong, SHEN Zhaoli, et al. Evolution and development of groundwater environment in North China Plain under human activities [J]. ACTA Geoscientia Sinica, 1997, 18(4): 291-294. (in Chinese))
- [16] 张光辉,费宇红,王金哲,等. 300 年以来太行山前平原地下水补给演化特征与趋势[J]. 地球学报, 2003, 24(4): 261-266. (ZHANG Guanghui, FEI Yuhong, WANG Jinzhe, et al. Evolution characteristics and trend of shallow groundwater recharge in Taihangshan Piedmont Plain over the last 300 years[J]. ACTA Geoscientia Sinica, 2003, 24(4): 261-266. (in Chinese))
- [17] 陈宗宇,聂振龙,张荷生,等. 从黑河流域地下水年龄论其资源属性[J]. 地质学报, 2004, 78(4): 560-567. (CHEN Zongyu, NIE Zhenlong, ZHANG Hesheng, et al. Groundwater renewability based on groundwater ages in the Heihe Valley Alluvial Basin, Northwestern China[J]. ACTA Geologica Sinica, 2004, 78(4): 560-567. (in Chinese))
- [18] 张光辉,刘少玉,谢悦波. 西北内陆黑河流域水循环与地下水形成演化[M]. 北京:地质出版社, 2005.
- [19] 张光辉,费宇红,陈宗宇,等. 海河流域平原深层地下水补给特征及其可利用性[J]. 地质论评, 2002, 48(6): 651-658. (ZHANG Guanghui, FEI Yuhong, CHEN Zongyu, et al. Recharge characteristics and utilization of confined groundwater in the Haihe Basin [J]. Geological Review, 2002, 48(6): 651-658. (in Chinese))
- [20] 张光辉,费宇红,刘克岩,等. 华北平原农田区地下水开采量对降水变化响应[J]. 水科学进展, 2006, 17(1): 43-48. (ZHANG Guanghui, FEI Yuhong, LIU Keyan, et al. Regional groundwater pumpage for agriculture responding to precipitation in North China Plain [J]. Advances in Water Science, 2006, 17(1): 43-48. (in Chinese))
- [21] 陈梦熊. 西北干旱区水资源与生态建设[J]. 国土资源通讯, 2001(10): 38-41. (CHEN Mengxiong. Water resources and ecology construction in the arid area of Northwest China [J]. National Land and Resources Information, 2001(10): 38-41. (in Chinese))
- [22] 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.
- [23] 张光辉,石迎新,聂振龙. 黑河流域生态环境的脆弱性及其对地下水的依赖性[J]. 安全与环境学报, 2002, 2(3): 31-33. (ZHANG Guanghui, SHI Yingxin, NIE Zhenlong. A study of the ecological fragility of Heihe River Basin and its heavy dependence on the groundwater protection[J]. Journal of Safety and Environment, 2002, 2(3): 31-33. (in Chinese))
- [24] 刘少玉,卢耀如,程旭学,等. 黑河中、下游盆地地下水系统与水资源开发的资源环境效应[J]. 地理学与国土研究, 2002, 18(4): 18-22. (LIU Shaoyu, LU Yaoru, CHENG Xuxue, et al. Groundwater system and water resources environment effect induced by water resources development in the middle and lower reaches of the Heihe River [J]. Geography and Territorial Research, 2002, 18(4): 18-22. (in Chinese))
- [25] 张翠云,王昭. 黑河流域人类活动强度的定量评价[J]. 地球科学进展, 2004, 19(3): 396-398. (ZHANG Cuiyun, WANG Zhao. Quantitative assessment of human activity intensity in the Heihe Catchment [J]. Advance in Earth Sciences, 2004, 19(3): 396-398. (in Chinese))
- [26] 张光辉,聂振龙,刘少玉,等. 甘肃西北部黑河流域水资源对下游生态环境变化的影响阈[J]. 地质通报, 2006, 25(1/2): 244-250. (ZHANG Guanghui, NIE Zhenlong, LIU Shaoyu, et al. Threshold of water resources in the Heihe River Valley, Northwestern Gansu, China on the ecological environment variation of the lower reaches [J]. Geological Bulletin of China, 2006, 25(1/2): 244-250. (in Chinese))
- [27] 张光辉,聂振龙,谢悦波,等. 甘肃西部平原区地下水同位素特征及更新性[J]. 地质通报, 2005, 24(2): 149-155. (ZHANG Guanghui, NIE Zhenlong, XIE Yuebo, et al. Isotopic characteristics of groundwater and its renewal in the plain area of Western Gansu [J]. Geological Bulletin of China, 2005, 24(2): 149-155. (in Chinese))
- [28] 武毅,郭建强,朱庆俊,等. 基岩水与平原水转换关系的地球物理勘查技术探讨[J]. 地球学报, 2004, 25(3): 369-372. (WU Yi, GUO Jianqiang, ZHU Qingjun, et al. Geophysical prospecting techniques for the interchange between bedrock water and plain water [J]. Acta Geoscientia Sinica, 2004, 25(3): 369-372. (in Chinese))
- [29] 张光辉,聂振龙,刘少玉,等. 黑河流域走廊平原地下水补给源组成及其变化[J]. 水科学进展, 2005, 16(5): 673-678. (ZHANG Guanghui, NIE Zhenlong, LIU Shaoyu, et al. Characteristic and variation of groundwater recharge resources in the middle reaches of Heihe River Basin [J]. Advances in Water Science, 2005, 16(5): 673-678. (in Chinese))
- [30] 张光辉,聂振龙,王金哲,等. 黑河流域水循环过程中地下水同位素特征及补给效应[J]. 地球科学进展, 2005, 20(5): 511-519. (ZHANG Guanghui, NIE Zhenlong, WANG Jinzhe, et al. Isotopic characteristic and recharge

- effect of groundwater in the water circulation of Heihe River Basin [J]. *Advances in Earth Science*, 2005, 20 (5):511-519. (in Chinese))
- [31] 武强,李树文.地下水渗流系统灰色数值仿真模拟研究[J]. *中国科学:D辑*,2002,32(1):43-53. (WU Qiang, LI Shuwen. Research on grey simulation of groundwater seepage system[J]. *Science in China:Series D*,2002,32(1):45-53. (in Chinese))
- [32] 聂振龙,陈宗宇,程旭学,等.黑河干流浅层地下水与地表水相互转化的水化学特征[J]. *吉林大学学报:地球科学版*,2005,35(1):48-53. (NIE Zhenlong, CHEN Zongyu, CHENG Xuxue, et al. The chemical information of the interaction of unconfined groundwater and surface water along the Heihe River, Northwestern China [J]. *Journal of Jilin University:Earth Science Edition*,2005,35(1):48-53. (in Chinese))
- [33] 张光辉,申建梅,张翠云,等.甘肃西北部黑河流域中游地表径流和地下水补给变异特征[J]. *地质通报*,2006,25(1/2):251-255. (ZHANG Guanghui, SHEN Jianmei, ZHANG Cuiyun, et al. Characteristic of variations of surface runoff and groundwater recharge in the middle Heihe River Valley, Northwestern Gansu, China [J]. *Geological Bulletin of China*,2006,25(1/2):251-255. (in Chinese))
- [34] 张光辉,聂振龙,张翠云,等.黑河流域走廊平原地下水补给变异特征与机制[J]. *水利学报*,2005,35(6):715-720. (ZHANG Guanghui, NIE Zhenlong, ZHANG Cuiyun, et al. Mechanism and characteristics of groundwater replenishment variation in middle reaches of Heihe River Basin [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2005, 36(6):715-720. (in Chinese))
- [35] 张翠云,钟佐燊,沈照理.地下水硝酸盐中氧同位素研究进展[J]. *地学前缘*,2003,10(2):287-291. (ZHANG Cuiyun, ZHONG Zuoshen, SHEN Zhaoli. The progress in the study of oxygen isotopes in groundwater nitrate [J]. *Earth Science Frontiers*, 2003, 10(2):287-291. (in Chinese))
- [36] 王恒纯.同位素水文地质概论[M].北京:地质出版社,1991.
- [37] 陈宗宇,张光辉,聂振龙,等.中国北方第四系地下水同位素分层及其指示意义[J]. *地球科学:中国地质大学学报*,2002,27(1):97-104. (CHEN Zongyu, ZHANG Guanghui, NIE Zhenlong, et al. Groundwater isotopic stratification and its implications in Northern China [J]. *Earth Science:Journal of China University of Geosciences*, 2002,27(1):97-104. (in Chinese))
- [38] 陈宗宇,张光辉,徐家明.华北地下水古环境意义及古气候变化对地下水形成的影响[J]. *地球学报*,1998,23(4):338-345. (CHEN Zongyu, ZHANG Guanghui, XU Jiaming. Paleoclimate record deduced from groundwater and climate change implications of groundwater resources in North China [J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 1998, 23(4):338-345. (in Chinese))
- [39] 黄冠星,孙继朝,汪珊,等.中国北方典型盆地降水与地下水氢氧同位素组成特征[J]. *工程勘察*,2007,24(4):27-29. (HUANG Guanxing, SUN Jichao, WANG Shan, et al. Hydrogen and oxygen isotope in the precipitation and groundwater of typical basin for the north part of China [J]. *Geotechnical Investigation and Surveying*,2007,24(4):27-29. (in Chinese))
- [40] 杨丽芝,张光辉,胡乃松,等.利用环境同位素信息识别鲁北平原地下水的补给特征[J]. *地质通报*,2009,28(4):515-522. (YANG Lizhi, ZHANG Guanghui, HU Naisong, et al. Reconition of groundwater supplying features for Northern Shandong Plain, China using environmental isotope information [J]. *Geological Bulletin of China*,2009,28(4):515-522. (in Chinese))
- [41] 杨丽芝,张光辉,刘中业,等.鲁北平原地下水同位素年龄及可更新能力评价[J]. *地球学报*,2009,30(2):235-242. (YANG Lizhi, ZHANG Guanghui, LIU Zhongye, et al. Isotope age of groundwater in Lubei Plain and an evaluation of its renewable capacity [J]. *Acta Geoscientia Sinica*,2009,30(2):235-242. (in Chinese))
- [42] 陈宗宇,陈京生,费宇红,等.利用氚估算太行山前地下水更新速率[J]. *核技术*,2006,29(6):426-431. (CHEN Zongyu, CHEN Jingsheng, FEI Yuhong, et al. Estimation of groundwater renewal rate by tritium in the piedmont plain of the Taihang Mountains [J]. *Nuclear Techniques*,2006,29(6):426-431. (in Chinese))
- [43] 苗建军,赵文桐,罗耘,等.熵与交叉科学[M].北京:气象出版社,1988.
- [44] 张光辉,赖勤波,费宇红,等.水文循环演化的信息熵及其应用[J]. *勘察科学技术*,2000(1):26-29. (ZHANG Guanghui, LAI Qinbo, FEI Yuhong, et al. Application of the comentropy theory in the evolution of hydrological cycle [J]. *Science and Technology in Exploration*, 2000(1):26-29. (in Chinese))
- [45] 陈红,张如一.华北地区旱涝分型及其动态变化[J]. *地理科学*,1993,13(2):129-132. (CHEN Hong, ZHANG Ruyi. The drought/flood anomaly and dynamic variation in the region of North China [J]. *Scientia Geographica Sinica*,1993,13(2):129-132. (in Chinese))
- [46] 张宗祜,张光辉.大陆水循环系统演化及其环境意义[J]. *地球学报*,2001,22(4):289-292. (ZHANG Zonghu, ZHANG Guanghui. The evolution of continental water cyclic system and its environmental significance [J]. *Acta Geoscientia Sinica*,2001,22(4):289-292. (in Chinese))
- [47] 张宗祜,张光辉,任福弘,等.区域地下水演化过程及其与相邻层圈间相互作用[M].北京:地质出版社,2006.

(收稿日期:2015-06-14 编辑:熊水斌)