

# 中国北方岩溶地下水补给研究进展

申豪勇<sup>1,2</sup>, 梁永平<sup>1</sup>, 徐永新<sup>2,3</sup>, 张发旺<sup>1</sup>

(1. 中国地质科学院岩溶地质研究所/自然资源部、广西壮族自治区岩溶动力学重点实验室,  
广西 桂林 541004; 2. 西开普大学, 南非 7535; 3. 河北工程大学, 河北 邯郸 056021)

**摘要:**地下水补给研究是进行地下水资源评价、制定水资源可持续利用方案、开展水资源管理的基础,也是建立地下水模型、进行环评的关键。从地下水补给量的评价方法、地下水补给的时空分布规律以及地下水补给的过程和机理等方面入手,综述了国内外有关地下水补给研究方面进展及发展趋势。同时,针对中国北方岩溶地区的岩溶发育特征和岩溶地下水赋存规律,对岩溶地下水的补给研究现状及存在的问题进行了阐述,分析了当前研究不足,并提出了如下建议:开展北方典型岩溶区入渗补给过程和机理研究,揭示不同地质条件和气候条件下的入渗补给机制;研究降水入渗补给系数的时空变化规律,探讨降水入渗补给系数的变值问题;开展碳酸盐岩裸露区巨厚层包气带的水文功能研究,加强入渗补给滞后性和有效入渗补给量确定方面的研究;探讨岩溶地区植树造林的水文效应。为中国北方岩溶区地下水补给定量化研究提供新的思路,为揭示岩溶区地下水补给机制和岩溶地下水可持续利用提供科学依据。

**关键词:**地下水补给;北方岩溶;降水入渗;娘子关泉

**中图分类号:** P333.1

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-0852(2019)03-0015-07

地下水补给量的估算及补给过程的研究是进行地下水资源评价、分析地下水污染运移规律和合理制定地下水可持续开采方案的基础,但是地下水补给在时间和空间尺度上的变化、局部补给和区域补给的差异以及影响因素(包括气候变化、地质条件、植被和土地利用类型等)的复杂多变给地下水补给量的准确估算带来很大的困难<sup>[1-2]</sup>。另外,受气候条件、地层的产状和规模、岩石的矿物成份、地质构造、水的溶蚀性和流动性等因素的影响<sup>[3]</sup>,岩溶含水介质具有强烈的不均一性和各项异性;同时,由于岩溶作用的发生,岩溶含水介质不是一成不变的,它随着时间及环境的变化而不断演化,岩溶地下水系统也是一个不断自我演化的动力系统<sup>[4]</sup>。特殊的含水介质、不同的岩溶发育程度以及水流状态的复杂性,给岩溶地下水的补给过程研究

及补给量的估算带来了巨大挑战<sup>[5]</sup>。

中国北方岩溶区是指贺兰山—六盘山以东、阴山—沈阳以南、淮河以北、黄海—郯庐断裂以西的华北地台区,该区属大陆季风型暖温带、亚湿润—半干旱—干旱气候,发育的岩溶形态主要为常态山、干谷、溶丘、岩溶洼地、溶洞及小规模的地下河等<sup>[6-7]</sup>。在该区内分布有  $68.5 \times 10^4 \text{ km}^2$  的碳酸盐岩面积,蕴藏有  $108.8 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$  的岩溶地下水资源,岩溶地下水主要以相对独立、规模不等的水资源系统进行循环,岩溶泉水是地下水系统最主要的天然排泄形式,据统计<sup>[8]</sup>,全区流量大于  $1 \text{ m}^3/\text{s}$  的岩溶泉有 41 处、流量大于  $0.1 \text{ m}^3/\text{s}$  的岩溶泉有 170 余处。赋存于区内的岩溶地下水以集中程度高、动态稳定和水质良好的自然属性,成为北方 30 多个地级市以上城市及 100 多个县级城市饮用

收稿日期:2018-02-01

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFC0406104);国家自然科学基金项目(41672253);中国地质调查项目(DD20189807、DD20160242)

作者简介:申豪勇(1988-),男,山西黎城人,博士研究生,主要从事岩溶水文地质研究。E-mail: shenhaoyong@karst.ac.cn

通讯作者:徐永新(1960-),男,南非国籍,教授,主要从事地下水资源方面研究。E-mail: xuyongxin@hebeu.edu.cn

水、70%以上大型煤矿生活生产用水、数十座大型火电厂发电冷却用水和近千万亩农田灌溉用水的水源。可见,岩溶地下水对于解决区内城市供水问题、保障工农业生产发挥着支撑性的作用,因此,研究该地区岩溶地下水的补给问题、评价岩溶地下水的可持续利用具有重要的意义。

## 1 北方岩溶地下水补给研究现状

### 1.1 地下水补给量的评价方法

有关地下水补给量评价的方法,大致可归纳为物理的(水均衡法<sup>[9]</sup>、零通面法<sup>[10]</sup>、地中渗透仪法<sup>[11]</sup>、达西法、地下水位动态法<sup>[12]</sup>和基流分割法<sup>[13]</sup>等)、化学的(示踪法)和数值模拟三大类<sup>[14,15]</sup>。但是在岩溶区,由于岩溶含水介质的特殊性,使得零通面法、地中渗透仪法和达西法等一些传统的方法在该地区无法使用,目前采用的研究方法主要为水均衡法<sup>[16,17]</sup>、同位素示踪法<sup>[18]</sup>和地下水数值模拟法<sup>[19]</sup>。水均衡法是一种基于水资源量平衡的一种方法,包括地表水均衡法和地下水均衡法,该方法为传统的地下水补给研究方法,应用比较广泛,从表1可以看出,在北方岩溶区大部分的降水入渗补给研究方法为该方法,但是该方法在应用过程中部分均衡项的确定比较困难,在地表水均衡中地下水的蒸散发的准确估算是水文地质研究中的难点,在地下水均衡中地下水的存储变化量的估算和地下水开采量的确定也存在较大的难度,这些均衡项的准确估算是水均衡法应用的前提。基流分割法是地表水文学中估算地下水补给量的一种方法,它利用枯水季节河流降水产流补给终止或忽略,河流的流量主要由地下水补给形成的原理来估算地下水补给量,该方法应用简单,在较早的研究中使用较多,但是由于近年人类活动加剧,水

库、人工湖泊的大量修建,基流量已不再是唯一的由地下水补给形成。同时,由基流分割法所确定的地下水补给量的滞后性研究也是一个难点。同位素和氯量平衡法等化学的方法在北方岩溶区降水入渗补给的研究中目前采用的有氡同位素法和氯量平衡法,氡同位素法在过去的50年中应用的比较广泛,其原因主要是由于在上世纪60年代大量的核试验导致降水中的氡值达到一个峰值,但由于其半衰期较短( $T_{1/2}=12.3$ 年),近年来应用该方法进行研究的成果已逐渐减少;氯量平衡法是利用降水在转化为地下中氯离子浓度守恒来估算降水入渗补给量的一种方法,该方法应用可操作性强,应用简单,已被大量的应用于松散介质中的饱和带和非饱和带的降水入渗补给研究中,但是由于其假设条件之一为地下水中的氯离子全部来源于降水,在人类剧烈活动的今天,氯离子的输入具有多源性,因此限制了该方法的广泛使用。地下水数值模拟法需要准确概化研究区的水文地质条件和具有长系列的监测资料,目前应用该方法的区域主要集中在研究程度较高、资料比较齐全的地区,如晋祠泉域和济南趵突泉泉域。在其它地方由于资料的欠缺,尚无法使用该方法。同时,由于不同评价方法应用的时空尺度、对象、假设条件以及可靠性的不同,针对不同的研究区、不同的时间尺度和空间尺度,选取合适的评价方法仍需要进一步的研究。

### 1.2 地下水补给时空分布规律

地下水的补给随时间和空间的变化而变化<sup>[1]</sup>,空间上土地利用类型、植被覆盖程度、地质条件等都直接影响到地下水的补给,时间上的变化主要是由降水季节性的变化、不同时期地表河流水位和地下水位变化引起的,这种时空异质性成为了深入研究地下水补

表1 北方岩溶区不同地区的降水入渗系数估算结果及方法  
Table1 The estimation results and methods of rainfall infiltration coefficients in Northern China karst area

研究区位置	气候类型	年均降雨量/mm	降水入渗补给系数	研究方法	参考文献
太原地区岩溶系统	半干旱	540~610	0.2~0.35	水均衡法	赵永贵等 <sup>[20]</sup>
山西高原岩溶区	半干旱	400~600	0.20~0.28	水均衡法	韩行瑞等 <sup>[16]</sup>
焦作岩溶水系统	半干旱-半湿润	606	0.2~0.35	基流分割法	
山东羊庄盆地	半湿润	805	0.15~0.27	水均衡法	李传谟等 <sup>[21]</sup>
内蒙古桌子山	干旱	158	0.09~0.13	水均衡法,同位素法	侯光才等 <sup>[17]</sup> ;梁永平等 <sup>[22]</sup>
鄂尔多斯盆地周边岩溶区	干旱-半干旱	244~554	0.13~0.25	水均衡法	侯光才等 <sup>[17]</sup>
山东济南泉域	半湿润	690	0.33~0.45	地下水数值模拟	王庆兵等 <sup>[19]</sup>
北京西山岩溶水系统	半干旱	533~598	0.17~0.27	水均衡法	
娘子关泉域岩溶水系统	半干旱	537	0.24	氯量平衡法	

给的最大障碍,如何确定适宜的尺度对于地下水补给的量化构成重要挑战。

中国北方岩溶地区已有的研究成果表明,降水入渗补给具有强烈的时间变异性 and 空间变异性。从表1中可以看出,北方岩溶区内降水入渗系数的空间变化幅度达4.9倍,充分体现了降水入渗补给的空间变异性。在同一地区,降水入渗补给系数又表现为强烈的时间变异性,李传谟等<sup>[21]</sup>利用山东羊庄盆地均衡试验场,建立了不同岩性地区的年降水入渗系数和次降水入渗系数的系列值,以奥陶系地层为例,1985~1991年的降水入渗系数变化范围为0.15~0.27,变化的幅度达1.8倍。从已有的成果可以看出,岩溶发育程度的不同和岩溶介质的分均质性所带来的时空变异性非常复杂,降水量和入渗补给量并非一个线性关系(见图1),如何准确估算岩溶区的降水入渗系数并探讨其时空变异性仍然需要进一步研究。

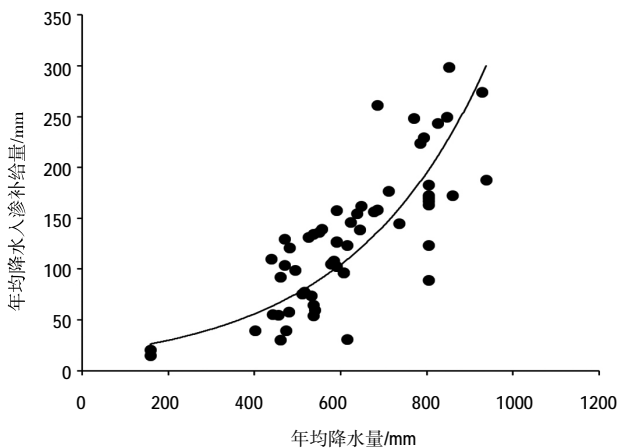


图1 北方岩溶区降水补给研究成果  
Fig.1 The results of the precipitation recharge  
in Northern China karst area

### 1.3 地下水补给机理和过程

北方岩溶地下水主要受大气降水的面状入渗补给、河流在碳酸盐岩段线状渗漏补给及水库等点状的渗漏补给,在一些干旱的岩溶区,凝结水也可成为岩溶地下水的补给源<sup>[22]</sup>。由于地下水补给的影响因素复杂,在不同的补给要素中,有些可以通过观测、测试和试验获得定量资料,而有些则难以获得定量的数据,给地下水补给机理和过程的研究带来巨大挑战。因此,关于降水入渗补给的过程和机理、河道渗漏的特征与规律等问题一直是传统水文地质研究的热点<sup>[23-24]</sup>。

#### 1.3.1 降水入渗补给机制研究

在降水入渗补给机制研究方面,由于岩溶地区降

水入渗补给的复杂性,岩溶裂隙、落水洞、陷落柱等都可成为地下水的直接补给途径,导致活塞式补给和捷径式补给并存,而且在基岩地区无法通过安装仪器来直接观测入渗补给过程,这给碳酸盐岩地区入渗补给的过程和机理研究带来了巨大的挑战。李文兴等<sup>[25]</sup>以焦作岩溶水补给区为例,建立了降水入渗补给的随机模型,并探讨了有效降水量、无效降水量和降水强度对入渗补给的作用;黄丹红等<sup>[26]</sup>为了调节不同降雨量所对应的降雨入渗补给量引入了降雨量系数的概念,并在山西延河泉域进行了验证,结果表明运用该方法进行数值模拟得到的结果与实际的观测值曲线拟合的更好;李传谟等<sup>[21]</sup>利用羊庄盆地的降水入渗试验场,建立了入渗补给量和降雨量、地下水位埋深之间的关系,研究结果认为随着降雨量的增加,一定埋深条件下的次降雨入渗补给量可以分为零补给区、增补给区和等补给区,在零补给区所对应的降水量为无效降水量,而在等补给区,随着降雨量的增加地表径流量增加,对岩溶地下水的补给量不再增加。从已有的结果可以看出,在北方岩溶区,降水入渗补给量的估算单纯的用降水入渗补给系数法来估算是不合理的,但是在实际的应用过程中仍然采用该方法来估算降水入渗补给量,主要是由于对降水入渗补给过程的研究还很薄弱,不同地区无效降水量的确定和降水强度对入渗补给量的影响程度仍然不清楚。

同时,在北方岩溶区除了局部的岩溶地下水排泄区外,岩溶地下水的埋深都比较大,具有厚层的包气带,形成了厚层的垂直入渗带,可把季节性的降水补给转化为连续的入渗水流,使得北方岩溶大泉都具有泉水流量稳定、多年调节的特征。韩行瑞等<sup>[16]</sup>对山西19个岩溶大泉的泉水流量动态特征进行了分析,泉水流量不稳定系数大都为1~2,属于稳定性泉水;根据入渗补给量、入渗区面积及有效孔隙率,钱学溥等<sup>[27]</sup>估算了娘子关泉域灰岩裸露区的平均垂直入渗速度,为37.61m/a。厚层及巨厚层的包气带给岩溶含水层带来连续入渗补给量的同时,也给降水入渗补给的滞后性研究带来了挑战,目前采用的方法主要有回归分析法和灰色关联法,郝永红等<sup>[28]</sup>运用带有时滞的灰色关联法分析了娘子关泉域不同区域的不同降水补给时滞,位于中间主径流带的滞后期为2年,位于边缘迳流区的滞后期为4年,而韩行瑞等<sup>[16]</sup>运用回归分析的方法认为娘子关泉水对降水量的滞后期为7年;Hao等<sup>[29]</sup>和樊国强等<sup>[30]</sup>分别用灰色系统理论的方法研究了柳林

泉域的降水入渗补给滞后性问题;臧红飞等<sup>[31]</sup>利用相关分析法和回归分析法研究了洪山泉水流量对降水量的响应滞后性问题,认为降水量对洪山泉流量影响的滞后年限为7年;徐永新等<sup>[32]</sup>对山西19个岩溶大泉的降水入渗补给量估算及降水入渗补给时滞研究方面的进展进行了综合分析,并提出了进一步开展研究的建议和方向。在入渗补给滞后性方面,已有的研究成果大都采用数理统计的方法,对研究结果的可靠性缺乏分析,以至于在同一研究区不同的人采用不同的方法得到的结论相差较大,因此,在运用数理统计方法的同时,结合同位素测年的方法或水化学演化的方法来开展互相验证是非常必要的。

在岩溶区植被覆盖率的变化对降水入渗补给影响研究方面,目前已有的研究成果还较少,申豪勇等<sup>[33]</sup>仅从陆面蒸散量的角度考虑,通过龙子祠泉域不同下垫面陆面蒸散量的对比研究,分析了岩性和植被覆盖率对降水入渗补给的影响,并提出在仅考虑陆面蒸散发的条件下,碳酸盐岩裸露区的植被覆盖程度越高,陆面蒸散发越大,越不利于降水入渗补给。然而植被的水文效应是一个复杂的过程,不仅在岩溶区,在非岩溶区,植树造林能否增加地下水的补给仍然是一个具有争议的话题。

### 1.3.2 河流渗漏补给研究

碳酸盐岩裸露区地表河段的渗漏补给是北方岩溶区除降水入渗补给外另一主要的补给源,目前该补给量主要通过渗漏段上下游流量的实测来估算,比如Wang等<sup>[34]</sup>通过柳林泉域内地表河流的水文测站径流量资料,估算了泉域内主要地表河流对岩溶地下水的渗漏补给量;王桃良等<sup>[35]</sup>通过娘子关典型渗漏河段上下游枯水期河水径流量的实测,计算了地表河流的漏失系数,并进行推广,估算了娘子关泉域内地表河流在碳酸盐岩裸露段的渗漏补给量;梁永平等<sup>[36]</sup>通过对娘

子关泉域桃河岩溶渗漏段上下游流量的实测,建立了河流来水量与渗漏量间的非线性关系,并探讨了河流的来水量大小、水量动态分布特征及计算采用的时间尺度与河流渗漏量的关系。诚然,利用渗漏段上下游断面径流量的差别来计算渗漏补给量是最准确的方法,但是该方法耗时、耗力,且在丰水期,当渗漏段较长时,洪水对上下游径流量的影响需要排除。同时,在人类活动条件下,河床性质的变化、上游来水量对渗漏量的影响、典型地区获得的漏失系数推广的可行性等都需要未来开展进一步的研究。

## 2 北方典型岩溶泉域降水入渗补给案例分析

娘子关泉是北方著名的岩溶大泉,其多年平均流量为 $9.67\text{m}^3/\text{s}$ (1956~2014年),也是我国第一个从地下水系统的角度开展研究的岩溶大泉,泉域内降水入渗补给是岩溶地下水的主要补给源,降水入渗补给量占总补给资源量的80%以上。而且从20世纪70年代到现在,一直有科研机构 and 专家学者对岩溶地下水系统的面积和降水入渗补给进行研究,是进行北方岩溶区降水入渗补给时空变化特点研究的典型区。从已有的成果可以看出,不同时期和不同学者所圈闭的娘子关泉域岩溶地下水系统面积不同,估算的降水入渗系数也不同(见表2)。

随着资料的积累和水文地质调查精度的提高,对娘子关泉域岩溶地下水系统的划分更接近于客观现实是不争的事实。造成娘子关泉域岩溶地下水系统面积不一致的原因主要有两方面,一是对娘子关泉域水文地质条件的进一步认识,对以往不确定的泉域边界进行了重新核实。二是人类活动改变了原有的水文地质条件,如娘子关泉域与辛安泉域的地下分水岭边界,随着两个泉域岩溶地下水的开采发生了移动。

从表2所列的不同时期降水入渗补给系数的值

表2 不同时期娘子关泉域岩溶地下水系统的面积及降水入渗系数

Table2 The proportion and rainfall infiltration coefficients of Niangziguan spring karst underground system at different periods

形成单位或个人	形成时间	泉域面积/ $\text{km}^2$	碳酸盐岩地区降水入渗系数(估算方法)		
			中等岩溶发育区	一般岩溶发育区	覆盖区
钱学溥 <sup>[27]</sup>	1983年	3601	0.35(地下水均衡法)		
张之淦 <sup>[18]</sup>	1990年			0.10(氡同位素法)	
韩行瑞等 <sup>[16]</sup>	1993年	4667	0.28(地表水均衡法)		
山西省水利厅 <sup>[37]</sup>	2007年	7217	0.28(地表水均衡法)	0.12(地下水均衡法)	
申豪勇等 <sup>[38]</sup>	2018年	7436	0.21(水量平衡法)	0.12(地下水均衡法)	0.10(水量平衡法)

可以看出,利用水均衡法估算得到的降水入渗补给系数随着时间的推移在逐渐减小,究其原因,整体上娘子关泉域的面积在不断扩大尤其是碳酸盐岩裸露区的扩大,这势必造成采用地下水均衡法估算得到的碳酸盐岩地区的降水入渗系数在逐渐减小,这是由于地下水均衡法估算降水入渗补给系数是利用地下水均衡原理反求地下水入渗补给量,然后根据入渗补给面积反推得到降水入渗补给系数。因此,在泉域岩溶水文地质条件没有调查清楚的情况下,采用地下水均衡法来估算降水入渗补给系数会存在明显的偏差,而且已有的成果大都没有开展不同估算方法之间的互相验证,对得到的降水入渗系数的准确性也没有开展详细的分析。因此,分析不同降水入渗补给系数估算方法的适用条件,并开展其可靠性分析,采用不同方法进行互相验证是下一步研究的重点内容。

### 3 建议

综上,前人在北方岩溶地区降水入渗补给量的评价、降水入渗系数的估算、降水入渗的补给机制及河流渗漏量的估算等取得了大量的成果,也为地下水补给的进一步研究奠定了很好的基础。针对北方岩溶区地下水补给研究的现状和特点,为了岩溶区地下水资源可持续利用、地下水数值模拟以及岩溶地下水与全球气候变化等方面的研究提供基础,建议应从以下几个方面开展地下水补给研究。

(1)针对降水入渗补给的过程和机理研究,选取典型区域建立野外观测站,通过系列的水文动态观测、样品采集,采用水均衡法、水文过程曲线法、水化学、环境同位素示踪等方法开展岩溶区的降水入渗补给过程研究,进一步揭示不同地质条件和不同气候条件下的降水入渗补给机制,定量分析气候变化和人类活动对岩溶地下水补给的影响。

(2)目前已有的成果显示,降水入渗补给系数是一个变值,即使在同一地区受降水量大小、降水强度的影响,降水入渗系数也会随着降水量的改变而发生变化,开展降水入渗补给系数的时空变化规律研究,为岩溶地下水资源的准确评价和水资源科学管理与规划提供科学依据。

(3)开展岩溶区包气带的水文功能研究。加强碳酸盐岩裸露区巨厚层包气带的水文过程监测,探讨包气带厚度变化条件下对降水入渗补给的影响机制,研究有效入渗补给量的确定方法和影响因素,讨论北方大

型岩溶泉域的人渗补给滞后性问题和多年调节规律。

(4)探讨岩溶地区植树造林的水文效应。大规模的植树造林是否具有涵养水源的功能,对此不同的专家仍然存在不同的认识,在岩溶地区尤其是碳酸盐岩裸露区,分析植被类型、覆盖率与入渗补给量的关系,开展森林的水文效应研究,有助于我们提高对不同下垫面地区降水入渗补给过程的认识。

#### 参考文献:

- [1] Healy R W. Estimating Groundwater Recharge [M]. Cambridge University Press, 2010.
- [2] Vries J J, Simmers I. Groundwater recharge: an overview of processes and challenges[J]. *Hydrogeology Journal*, 2002, 10: 5-17.
- [3] 王树芳. 岩溶含水系统降水入渗补给研究进展[J]. *水文*, 2014, 34(6): 1-6. (WANG Shufang. Progress in study on precipitation infiltration recharge of karstic groundwater system[J]. *Journal of China Hydrology*, 2014, 34(6): 1-6. (in Chinese))
- [4] 韩行瑞. 岩溶水文地质学[M]. 北京: 科学出版社, 2015: 48-49. (HAN Xingrui. *Karst Hydrogeology* [M]. Beijing: Science Press, 2015: 48-49. (in Chinese))
- [5] Bakalowicz M. Karst groundwater: a challenge for new resources[J]. *Hydrogeology Journal*, 2002, 13: 148-160.
- [6] 梁永平, 韩行瑞. 中国北方岩溶地下水环境问题与保护[M]. 北京: 地质出版社, 2013. (LIANG Yongping, HAN Xingrui. *Characterization, Evolution and Environmental Issues of Karst Water System in Northern China*[M]. Beijing: Geology Press, 2013. (in Chinese))
- [7] 梁永平, 王维泰. 中国北方岩溶水系统划分与系统特征[J]. *地球学报*, 2010, 31(6): 860-868. (LIANG Yongping, WANG Weitai. The division and characteristics of karst water systems in Northern China[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2010, 31(6): 860-868. (in Chinese))
- [8] 梁永平, 王维泰, 赵春红, 等. 中国北方岩溶水变化特征及其环境问题[J]. *中国岩溶*, 2013, 32(1): 34-42. (LIANG Yongping, WANG Weitai, ZHAO Chunhong, et al. Variations of karst water and environmental problems in North China [J]. *Carsologica Sinica*, 2013, 32(1): 34-42. (in Chinese))
- [9] Schicht R J, Walton W C. Hydrologic Budgets for Three Small Watersheds in Illinois[M]. State of Illinois, 1961.
- [10] Richards L A, Gardner W R, Ogata G. Physical processes determining water loss from soil [J]. *Soil Science Society America Journal*, 1956, 20(3): 310-314.
- [11] Lee D R, Cherry J A. A field exercise on groundwater flow using seepage meters and mini-piezometers [J]. *J Geol Educ*, 1979, (27): 6-10.
- [12] Healy R W, Cook P G. Using groundwater levels to estimate recharge[J]. *Hydrogeology Journal*, 2002, 10(1): 91-109.
- [13] Meyboom P. Estimating groundwater recharge from stream hydrographs[J]. *J Geophys Res*, 1961, (66): 1203-1214.
- [14] Scanlon B R, Healy R W, Cook P G. Choosing appropriate

- techniques for quantifying groundwater recharge [J]. *Hydrogeology Journal*, 2002,10:18-39.
- [15] 汪丙国.地下水补给方法评价研究-以华北平原为例[D]. 中国地质大学,2008.(WANG Bingguo. Research on Estimation Methods of Groundwater Recharge: A Case Study in North China Plain[D]. China University of Geosciences,2008. (in Chinese))
- [16] 韩行瑞,鲁荣安,李庆松.岩溶水系统-山西岩溶大泉研究[M].北京:地质出版社,1993. (HAN Xingrui, LU Rongan, LI Qingsong. Karst Groundwater System- the Research of Karst Spring in Shanxi[M]. Beijing: Geology Press,1993. (in Chinese))
- [17] 侯光才,张茂省.鄂尔多斯盆地地下水勘查研究[M].北京:地质出版社,2008. (HOU Guangcai, ZHANG Maosheng. Research and Investigation of Groundwater in Ordos Basin [M]. Beijing: Geology Press, 2008. (in Chinese))
- [18] 张之淦,刘芳珍,张洪平,等.应用环境氡研究包气带水文运移及入渗补给量[J].水文地质工程地质,1990,(3):5-7. (ZHANG Zhigan, LIU Fangzhen, ZHANG Hongping, et al. Study of soil water movement and recharge rate of rainfall infiltration in aeration zone of loess by measuring natural tritium [J]. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 1990,(3):5-7. (in Chinese))
- [19] 王庆兵,段秀铭,高赞东,等.济南岩溶泉域地下水流模拟[J].水文地质工程地质,2009,(5):53-60. (WANG Qingbing, DUAN Xiuming, GAO Zandong, et al. Groundwater flow modelling in the Jinan karst spring area[J]. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 2009,(5):53-60. (in Chinese))
- [20] 赵永贵,蔡祖煌.岩溶地下水系统的研究-以太原地区为例[M].北京:科学出版社,1990. (ZHAO Yonggui, CAI Zuhuang. Research on Karst Groundwater System in Taiyuan Basin [M]. Beijing: Science Press, 1990. (in Chinese))
- [21] 李传谟,康凤新.岩溶水资源及增源增采模型[M].山东:山东科学技术出版社. (LI Chuanmo, KANG Fengxin. Karst Water Resources and Its Recharge and Exploitation Augmenting Model[M]. Shandong: Shandong Science and Technology Press, 1998. (in Chinese))
- [22] 梁永平,阎福贵,侯俊林,等.内蒙桌子上地区凝结水对岩溶地下水补给的探讨[J].中国岩溶,2006,25(4):320-323. (LIANG Yongping, YAN Fugui, HOU Junlin, et al. Discussion on condensed water supply to karst groundwater in Zhuozhi Mountain region, Inner Mongolia[J]. *Carsologica Sinica*, 2006,25(4):320-323. (in Chinese))
- [23] Guo X J, Jiang G H, Gong X P, et al. Recharge processes on typical karst slopes implied by isotopic and hydrochemical indexes in Xiaoyan Cave, Guilin, China [J]. *Journal of Hydrology*, 2015,530:612-622.
- [24] 范琦,王骥,蔺文静,等.包气带增厚条件下地下水补给规律研究[J].水文地质工程地质,2006,(3):21-24.(FAN Qi, WANG Ji, LIN Wenjing, et al. The groundwater recharge rule study in the condition of aeration zone incassation [J]. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 2006,(3):21-24. (in Chinese))
- [25] 李文兴,刘建之.岩溶水系统降水入渗的随机模拟[J].水文地质工程地质,1996,(6):32-35.(LI Wenxing, LIU Jianzhi. Stochastic simulation of rainfall infiltration in karst system [J]. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 1996,(6):32-35. (in Chinese))
- [26] 黄丹红,成建梅,刘军,等.岩溶含水层降雨非线性入渗补给的处理方法[J].地下水,2006,28(2):23-25. (HUANG Danhong, CHENG Jianmei, LIU Jun, et al. New approach for calculating nonlinear infiltration replenishment by rainfall in the karst aquifer [J]. *Ground Water*, 2006,28(2):23-25. (in Chinese))
- [27] 钱学溥. 山西省娘子关泉域岩溶水资源评价及其开发利用科研报告[R]. 1983. (QIAN Xuepu. The karst groundwater resources evaluation and development of Niangziguan spring in Shanxi [R]. 1983. (in Chinese))
- [28] 郝永红,黄登宇,刘洁,等.娘子关泉域降水补给的时滞研究[J].中国岩溶,2003,22(2):92-95. (HAO Yonghong, HUANG Dengyu, LIU Jie, et al. Study on the time-lag between precipitation and discharge in Niangziguan spring basin [J]. *Carsologica Sinica*, 2003,22(2):92-95. (in Chinese))
- [29] Hao Y H, Zhao J J, Li H M, et al. Karst hydrological processes and grey system mode[J]. *Journal of the American Water Resources Association*, 2012,48(4):656-666.
- [30] 樊国强,白媛丽,郑秀清.基于灰色斜率相似关联度的柳林泉域降水时滞分析[J].水电能源科学,2012,30(5):5-8. (FAN Guoqiang, BAI Yuanli, ZHENG Xiuqing. Study on time delay of precipitation in Liulin spring basin based on incidence degree of grey gradient similarity [J]. *Water Resources and Power*, 2012,30(5):5-8. (in Chinese))
- [31] 臧红飞,贾振兴,邢述彦,等.降雨量对岩溶地区洪山泉滞后性的影响[J].水电能源科学,2013,31(9):32-35. (ZANG Hongfei, JIA Zhenxing, XING Shuyan, et al. Influence of hysteresis of precipitation on Hongshan spring in karst area [J]. *Water Resources and Power*, 2013,31(9):32-35. (in Chinese))
- [32] 徐永新,张志祥,张永波,等.山西岩溶泉研究进展与前瞻[J].太原理工大学学报,2017,48(3):413-421.(XU Yongxin, ZHANG Zhixiang, ZHANG Yongbo, et al. Research advance in karst springs of Shanxi province [J]. *Journal of Taiyuan University of Technology*, 2017,48(3):413-421. (in Chinese))
- [33] 申豪勇,梁永平,程洋,等.龙子祠泉域不同下垫面陆面蒸散量的对比研究[J].中国岩溶,2017,36(2):234-241. (SHEN Haoyong, LIANG Yongping, CHENG Yang, et al. Study on the regional evapotranspiration over different surface conditions of the Longzici spring drainage[J]. *Carsologica Sinica*, 2017,36(2):234-241. (in Chinese))
- [34] Wang Y, Ma T, Luo Z. Geostatistical and geochemical analysis of surface water leakage into groundwater on a regional scale: a case study in the Liulin karst system, northwestern China [J]. *Journal of Hydrology*, 2001,246:223-234.
- [35] 王桃良,赵春红,梁永平,等.地表水渗漏对娘子关岩溶泉水水质的影响[J].水文,2015,35(5):41-45. (WANG Taoliang, ZHAO Chunhong, LIANG Yongping, et al. Influence of surface water

- seepage on water quality in Niangziguan spring area[J]. Journal of China hydrology, 2015,35(5):41-45. (in Chinese))
- [36] 梁永平,石东海,李纯纪,等.岩溶渗漏河段来水量与渗漏量间关系测试研究[J].水文地质工程地质,2011,38(2):19-26. (LIANG Yongping, SHI Donghai, LI Chunji, et al. Test and research on the relationship between runoff and leakage on a karst percolation zone[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2011,38(2):19-26. (in Chinese))
- [37] 山西省水利厅.山西岩溶泉域水资源保护研究[M].北京:中国水利水电出版社,2008. (Shanxi Water Resources Department. Water Resources Protection of Karst Spring Area in Shanxi Province[M]. Beijing: China Water Power Press, 2008. (in Chinese))
- [38] 申豪勇,梁永平,康春雷,等.应用氯量平衡法估算娘子关泉城典型岩溶区的降水入渗系数[J].水文地质工程地质,2018,45(6):31-35. (SHEN Haoyong, LIANG Yongping, TANG Chunlei, et al. Estimation of the infiltration coefficient based on chloride mass balance in a typical karst region of the Niangziguan spring area [J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2018,45(16):31-35.(in Chinese))

## Research Progress of Karst Groundwater Recharge in Northern China

SHEN Haoyong<sup>1,2</sup>, LIANG Yongping<sup>1</sup>, XU Yongxin<sup>2,3</sup>, ZHANG Fawang<sup>1</sup>

(1.Institute of Karst Geology, CAGS/Key Laboratory of Karst Dynamics, MNR&GZAR, Guilin 541004, China;

2.University of the Western Cape, Cape Town 7535, South Africa; 3.Hebei University of Engineering, Handan 056021, China)

**Abstract:** Groundwater recharge research is the basis of evaluating groundwater resources, managing water resources and making sustainable utilization project of water resources. It is also critical to establish the groundwater model and assess the environmental impacts. This paper reviewed the current situation and trend of groundwater recharge research at home and abroad based on research methods, spatial-temporal dynamic changes, progress and mechanisms. At the same time, the present situation and its existing problems of karst groundwater recharge research were discussed, and the shortages were analyzed on studying the recharge research in the Northern China. Based on the characteristics of karst development and groundwater occurrence, this paper recommended analyzing the infiltration progress and mechanism in a typical karst area, revealing the recharge mechanism under the different geological and climatic conditions, studying the spatial-temporal change of rainfall infiltration coefficients and discussing its variabilities, carrying out the hydrologic function research of aeration zone in carbonate outcrop areas, and also discussing the hydrologic effects of afforestation in the karst area. These would provide new thoughts for quantitative researches on karst groundwater recharge and important scientific basis for revealing the recharge mechanism and sustainable utilization of karst groundwater.

**Key words:** groundwater recharge; karst in Northern China; precipitation infiltration; Niangziguan spring

.....

(上接第 35 页)

## Analysis of Relationship between Water Area and Water Level Based on Long-term Observation in Poyang Lake

ZHANG Wen, CUI Changlu, LI Linyi, JIA Yilin, MENG Lingkui

(School of Remote Sensing and Information Engineering, Wuhan University, Wuhan 430079, China)

**Abstract:** The rapid development of domestic high-resolution satellites can effectively compensate for the low special resolution in lake monitoring with remote images, and realize dynamical monitoring on Lake without delay and better accuracy. This paper took 155 Landsat images during 1996-2012 and 34 GF images during 2013-2016 as the data sources, modified normalized difference water index (MNDWI) and normalized difference water index (NDWI) were chosen to extract the water area in remote sensing images combined with the water level data at Hukou station. At the same time, the method of statistical analysis was established to build different water area-water level models in four seasons. The results show that the water area of Poyang Lake has a gradually declining trend in space, and it shows obvious decrease in autumn while slight change in other seasons. The relationship between water area and water level of Poyang Lake is suitable for quadratic function model after data validation.

**Key words:** remote sensing; long-term; water level; water area; Poyang Lake