

韩鹏飞,王旭升,蒋小伟,等. 跨流域地下水循环研究进展[J]. 地质科技通报, 2023, 42(4): 107-117.

Han Pengfei, Wang Xusheng, Jiang Xiaowei, et al. Advances in interbasin groundwater circulation[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2023, 42(4): 107-117.

跨流域地下水循环研究进展

韩鹏飞^{a,b}, 王旭升^{a,b}, 蒋小伟^{b,c}, 万力^c

(中国地质大学(北京) a. 水利部地下水保护重点实验室(筹); b. 水资源与环境学院;
c. 地下水循环与环境演化教育部重点实验室, 北京 100083)

摘要: 在区域尺度上, 地下水流的路径存在跨越地表分水岭的可能性, 从而形成跨流域地下水循环, 影响流域之间的水文关系和溶质输送过程。跨流域地下水循环的研究在国际上尚处于起步阶段, 方兴未艾, 目前已经取得的进展是一个值得关注的问题。对近 20 年来国内外跨流域地下水循环的研究文献进行了系统的跟踪分析, 从形成机理、识别方法和影响评估 3 个角度总结现有的研究进展。在水动力学形成机理方面, 已经从理论上确定了地表分水岭、潜水面最高点和地下水流系统分水点之间的偏离特征, 为划分河流之间的多种跨流域地下水循环路径提供了依据。在跨流域地下水循环的识别方面, 一系列实际流域的案例提供了可以借鉴的方法, 包括水均衡法、流域水文模型和水文地球化学端元混合模型等, 证实了跨流域地下水循环的存在性, 甚至评估出其循环通量, 深化了流域水量平衡关系的认识。研究表明流域地理位置、形态尺寸、气候背景和地质构造等条件都会影响跨流域地下水循环的发生及通量。在影响评价方面, 初步发现跨流域地下水循环对水文要素的气候敏感性、Budyko 模式状态参数及碳源碳汇形成有重要影响, 忽略其作用可能产生错误的认识。目前, 科学界对跨流域地下水循环的动力学过程及其物质输送效应的研究还相对薄弱, 缺乏准确的定量评估方法, 未来的研究重点是揭示三维含水层空间的跨流域地下水循环路径, 准确评估跨流域地下水循环的各种影响。

关键词: 闭合流域; 分水岭; 地下水流系统; 气候水文模型; Budyko 模式; 碳循环

2023-01-08 收稿; 2023-03-24 修回; 2023-04-19 接受

中图分类号: P641

文章编号: 2096-8523(2023)04-0107-11

doi: 10.19509/j.cnki.dzkg.tb20230013

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Advances in interbasin groundwater circulation

Han Pengfei^{a,b}, Wang Xusheng^{a,b}, Jiang Xiaowei^{b,c}, Wan Li^c

(a. Key Laboratory of Groundwater Conservation of Ministry of Water Resources (in preparation);

b. School of Water Resources and Environment; c. Ministry of Education Key Laboratory of Groundwater Circulation and Environmental Evolution, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: [Significance] Groundwater flow paths may cross the surface divide at the regional scale, resulting in interbasin groundwater circulation that affects hydrological relationships and solute transport process between basins. However, research on interbasin groundwater circulation is still in its infancy internationally, and the progress achieved is a matter of concern. [Progress] This study systematically tracks and analyses the literature on interbasin groundwater circulation at home and abroad in the past 20 years and summarizes the existing research progress from three perspectives: formation mechanism, identifica-

基金项目: 国家自然科学基金项目(41772249)

作者简介: 韩鹏飞(1988—), 男, 讲师, 主要从事地下水循环的研究工作。E-mail: pfhan@cugb.edu.cn

通信作者: 王旭升(1974—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事水文模型研究工作。E-mail: wxsh@cugb.edu.cn

© Editorial Office of Bulletin of Geological Science and Technology. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.

tion methods, and impact assessment. In terms of the hydrodynamic formation mechanism, the study theoretically determines the deviation characteristics between the surface divide, the highest point of the water table and the divide point of groundwater flow systems. Based on the deviation characteristics, multiple interbasin groundwater circulation paths can be separated between rivers. In terms of identifying the interbasin groundwater circulation, a series of real basin cases provide available methods, including the water balance method, basin-scale hydrological model and hydrogeochemical end element mixed model. The methods identify the existence of interbasin groundwater circulation and even evaluate the circulation fluxes, which can improve the recognition of the water balance in the basin. It is also found that the location, size, climate and geological conditions of the basin affect the occurrence and flux of interbasin groundwater circulation. In terms of impact assessment, it is preliminarily found that the interbasin groundwater circulation has an important impact on the assessments of climate sensitivity, state parameters of the Budyko framework and carbon source/sink in the basin. Ignoring its role may lead to obviously incorrect conclusions. [Conclusions and Prospects] At present, research on the dynamic process and material transport effect of interbasin groundwater circulation is relatively weak. Accurate and quantitative evaluation methods are also lacking. The focuses of future research are to reveal the circulation paths of interbasin groundwater in three-dimensional aquifer space and accurately assess the various impacts of interbasin groundwater circulation.

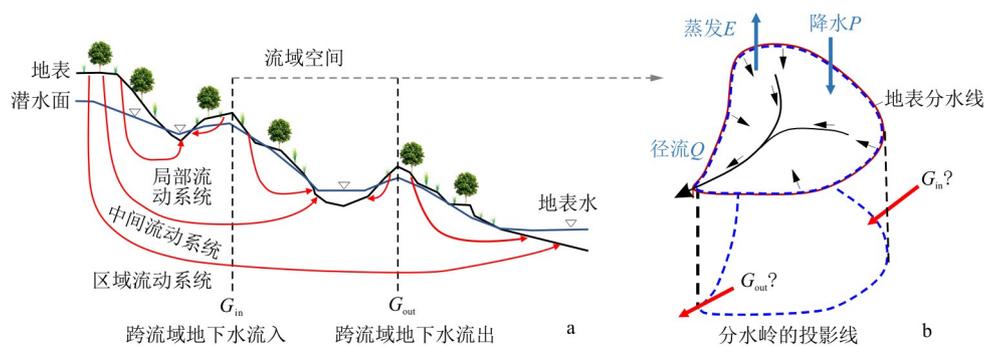
Key words: closed basin; groundwater divide; groundwater flow system; climate-hydrological model; Budyko framework; carbon cycle

Received: 2023-01-08; Revised: 2023-03-24; Accepted: 2023-04-19

地下水循环,即地下水的补给、径流和排泄过程,是陆地水文过程的重要组成部分^[1]。在盆地尺度,地下水循环具有局部、中间和区域多个级次的嵌套型流动系统结构^[2-4]。这种区域地下水流系统的水动力学行为,必然会作用到流域地表水,并对河流的水文过程和物质输送施加影响(图 1-a)。在国际水文学领域,流域定义为地表分水岭圈闭的河流集水区(图 1-b),并且一般假设地下水循环也被圈闭在流域范围内(即闭合流域)。这只是假设的理想条件,实际的流域边界往往并不能把地下水循环完全限定在内部,因为地下水循环以流动系统为动力学边界,与地表分水岭往往不一致(图 1-a)。这意味着一个流域可能存在地下水的流出,也可能存在外来地下水的流入,国际科学界将其称为跨流域地下水

循环,英文名称为 interbasin groundwater flow/circulation^[5-8]。如果流域分水岭是不同国家之间的交界线,那么发生跨流域地下水循环的含水层也将成为跨界含水层(transboundary aquifer)^[9-10]一种可能方式,需要在评估国家边境线上的地下水出入境通量时加以注意。与跨流域调水(interbasin water transfer)所产生的人工强迫水量输送不同,跨流域地下水循环属于自然发生的流域间水量交换。

只要区域地下水流系统的边界与地表水文系统不一致的,就必定存在跨流域地下水循环的现象^[11-12]。地下水向河流的排泄构成基流,跨流域地下水循环将导致基流并非全部来自于传统方法圈定的流域范围,从而打破水文研究和水资源评价中封闭流域的假设。已有很多研究者从理论^[2,13-15]和实



a. 流动系统层级; b. 流域水均衡要素

图 1 跨流域地下水循环过程示意图

Fig. 1 Schematic diagrams of interbasin groundwater circulation process

际流域^[16-20]出发采用数值模拟、水均衡、水化学和同位素等方法证明了跨流域地下水循环的存在性,初步进行量化评估,取得了一些基本认识。笔者将对国内外跨流域地下水循环的相关研究进行全面系统的总结,主要从形成机理、循环路径与动力学结构、识别量化方法以及对流域气候水文和碳循环估算的影响等方面综述研究进展,最后对跨流域地下水循环的进一步研究方向提出展望。

1 形成机理

流域被定义为“地表水及地下水的分水线所包围的集水区”^[21],地表水的分水线通常为地形等高线的脊线,而地下水的分水线一般处理为等水位线(潜水面)的脊线。地表分水线和地下分水线完全重合的流域被称为闭合流域,否则称为非闭合流域^[22-23]。

传统意义上的流域空间,是地表分水线向下延伸到隔水底板所形成的三维闭合柱体(图1-b)。凡是柱体侧面流入(G_{in})或流出(G_{out})的地下水,都属于跨流域地下水循环。如果假设流域水循环是完全闭合的、忽略跨流域地下水循环的影响,可能会导致水资源评价、水源地保护区规划或水污染预测等方面的失误^[20,24-25]。

河流水文断面所观测的径流中,基流量及其水化学成分通常被认为是流域范围地下水排泄或运移所产生的,不少地下水模型将基流分割数据或基流中溶质含量作为反演依据之一。然而,在考虑跨流域地下水循环的情况下,一条河流的基流量及其水化学、同位素成分(溶质)可能存在其他流域地下水的贡献。对于基流占比很大的河流,河水的径流组成与水化学同位素特征可能受到跨流域地下水循环的强烈影响。

2 循环路径与动力学结构

2.1 地下水循环的补径排过程

传统水文地质学对地下水补给、径流和排泄等过程环节的研究,主要是从含水层的角度开展的。潜水含水层的补给类型包括降水入渗、地表水渗漏和承压水向上越流等,排泄类型包括下降泉、流入河道形成基流、潜水蒸发、向下越流及人工开采等,其径流过程主要使用 Dupuit 假设下的水动力学模型或 Boussinesq 方程描述。承压含水层则通过潜水向下越流、侧向径流等方式获得补给,通过上升泉、向上越流、人工开采等方式排泄,其径流过程主要使用平面二维渗流方程描述。在区域尺度上,孔隙水、

裂隙水和岩溶水三大类含水系统的地下水循环特征已经积累了大量的经验认识^[26],对地下水补给来源的调查评价也已经发展出了地下水流数值模拟^[27]、水化学示踪法^[28]和同位素示踪法^[29]等多种技术方法。尽管如此,现有的地下水循环研究普遍局限于含水层视角,与水文学中流域的关系并不紧密。传统的区域地下水流数值模拟侧重于水资源评价,较少关注地下水的循环路径,绘制的平面地下水流网只提供了补给区与排泄区之间的粗线条模式,难以准确把握地下水循环路径与地表分水岭的关系。

地下水循环路径的动力学研究普遍以 Darcy 定律和多孔介质连续性渗流理论为基础,因此主要适用于孔隙介质含水层,对裂隙和岩溶介质含水层只具有某种程度上的等效意义。循环路径的基本要素是 Darcy 流速的方向和大小,并呈现随时间变化的空间分布,在稳定流状态下可用流线或流网来呈现。经典的井流模型提供了对抽水井或注水井附近的流场描述方法,通过使用平面二维流的解析法或数值模拟法得到流速分布、绘制流线来确定抽水井的截获区,即水源补给范围^[30-31]。依靠盆地尺度地下水循环的剖面二维模型,发展形成了区域地下水流系统理论^[2]。识别流场中的驻点、追踪流线轨迹是动力学上识别地下水流系统多级次嵌套结构的最常用技术。“驻点”具有分界功能,使用驻点附近的分界流线可以准确划分嵌套型的地下水流系统^[3,32-33]。该方法适用于潜水面形态高度简化的盆地二维剖面模型。补给—排泄流线追踪法抓住地下水循环的补给、径流和排泄3个环节,依据流线簇的空间分布关系,将补给区和排泄区进行配对,进而识别嵌套型的地下水流系统^[4,14,34]。通常将相邻的补给区和排泄区之间的流线簇定义为局部水流系统,而补给区和排泄区分离的、具有最长流动路径的流线簇则划分为区域水流系统,介于两者之间的流线簇划分为中间水流系统。

大多数地下水流系统的研究限定在平面或剖面二维空间,而二维空间识别地下水循环路径的方法在三维空间不一定适用(如驻点法)。三维空间的流场解析更加困难、流线追踪更加复杂,导致三维空间地下水循环路径的动力学研究进展较为缓慢,目前仅有少量探索。Engelen 等^[35]提出直接追踪三维流线、再人工识别流动系统补给区和排泄区的方法。然而,三维空间的流线路径复杂,肉眼观察很难做出准确的判断。依据地下水驻留时间具有一定概率分布的特点,Goderniaux 等^[36]采用三维地下水流模拟统计大量追踪点的驻留时间,在选取某个临界值的情况下划分浅层和深层地下水系统,但临界值划分具有一定的主观性。Wang 等^[14]采用三维地下水流

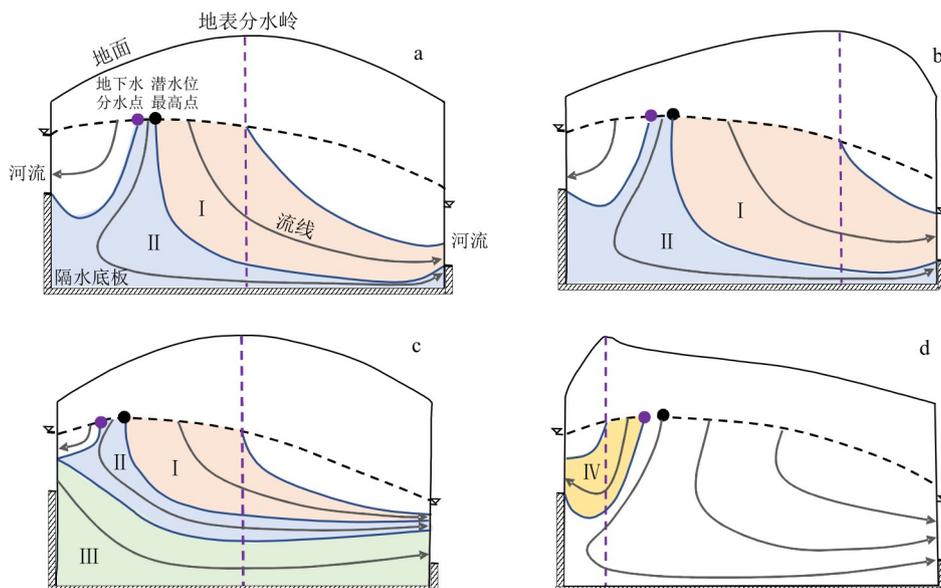
数值模拟和流线追踪技术,通过定义地下水循环单元,将补给区和排泄区的流线以拓扑的方式逐一进行配对,能够自动将地下水循环单元划分为闭单元(close cells,即局部水流系统)和开单元(open cells,即中间和区域水流系统)。在复杂的三维地下水流域中确定每个水流系统的补给区和对应的排泄区,是一项难度很大的任务,补给-排泄流线追踪法尚未被引入到跨流域地下水循环的研究中。

2.2 跨流域的地下水循环路径及动力学结构

从机理上认识跨流域地下水循环,必须把地下水循环的动力学特征与流域水文过程联系起来。Tóth^[2]提出的区域地下水系统具有多层级嵌套结构,最早从理论上指出了跨流域地下水循环的存在性。如图1-a所示,如果局部水流系统的补给区和排泄区位于小尺度范围的三级流域(如老哈河流域),那么中间水流系统和区域水流系统发生的地下水循环是跨越多个三级流域的。其中,区域水流系统的循环发生在最高的和最低的三级流域之间。尽管二级流域(如西辽河流域)可能范围足以包围中间水流系统,或者一级流域(如辽河流域)可能足以包围区域水流系统,这种跨流域的地下水循环至少对三级、四级流域而言是普遍存在的。

从水动力学条件上认识跨流域地下水循环,可以从最基本的研究单元开始,这就是2条河之间的潜水含水层,一般称为河间地块问题。经典地下水动力学对河间地块的解释采用了Dupuit假设,把潜水面最高点定义为地下分水岭^[37]。这个分水岭的两侧各自发育一个从降水入渗补给到河流排泄的

局部水流系统。据此,在传统水文地质研究中,把潜水面的脊线(由水位局部最高点组成)作为地下分水线,并发现它们经常与地表分水线不一致^[38],从而导致跨流域地下水循环的发生。不同于地表分水线,地下水分水线以其隐蔽和动态的特性而不容易被探测到。地下水分水线的位置受降水入渗补给、土壤的渗透性、含水系统的地质岩性和透水性、构造特征、河湖等地表水补给情况和人类活动等因素影响^[13,39-40]。这种“地下水分水线”真的能控制局部水流系统吗?近年来的研究表明,答案是否定的^[13,15]。Han等^[13]通过构建河间地块饱和-非饱和和渗流的数值模型,以2个局部水流系统的上边界与潜水面的交点作为准确的地下水分水点(图2),模拟结果表明它并不是潜水面的最高点,而且在一定条件下会出现由高水位河流直接流到低水位河流的穿越型水流系统(图2)。Li等^[15]采用饱和带渗流的解析模型进一步证明了这种现象。据此,针对2条河所在的不同流域,初步可以划分出4种不同的跨流域地下水循环路径:①在潜水位最高点与地表分水岭之间获得补给,流向低水位河流,如图2-a~c中的I区所示;②在地下分水点与潜水面最高点之间获得补给,流向低水位河流,如图2-a~c中的II区所示;③在具有潜水面最高点的情况下,从高水位河流直接流向低水位河流,如图2-c中的III区所示;④在地下分水点与地表分水岭之间获得补给,流向高水位河流,如图2-d中的IV区所示。这些仅仅是根据有限的剖面二维地下水模型得到的结果,不排除在实际情况中还会形成更多类型的跨流域地



a. 地表分水岭位于中部、地下水无穿越流; b. 地表分水岭靠近低水位河流、无穿越流; c. 地表分水岭位于中部、有穿越流; d. 地表分水岭很靠近高水位河流、无穿越流

图2 不同地貌形态下两条河之间跨流域地下水循环的潜在路径结构(改自文献^[13,15])

Fig. 2 Potential path of interbasin groundwater circulation between two rivers under different topography

下水循环路径。

目前,三维地下水循环的动力学结构研究仍极少,尚不掌握跨流域地下水循环的三维特征。Wang等^[14]基于拓扑学特征提出三维地下水循环单元概念,通过使用流线追踪技术建立补给区和排泄区连接关系,可以划分出精细的三维地下水循环闭合型单元和展开型单元动力学结构,确定不同水流系统的交界面形态。基于上述理论方法,通过构建三维理论模型和鄂尔多斯高原内陆盆地实例模型,Wang等^[14]对比了三维空间潜水面脊线与地下水流动系统交界线之间的差异,发现它们之间既不平行也不重合,存在相互交叉的情况。这说明在三维空间同样存在不同类型的跨流域地下水循环路径,但形态特征可能远比二维剖面所展示的情况复杂。Wang等^[14]没有进行跨流域地下水循环研究,但所提出的三维地下水循环动力学结构识别方法有助于进一步开展跨流域地下水循环的识别和定量研究。跨流域地下水循环识别和定量研究的另一个难点在于传统地下水模型与地表水模型的结合。在模拟深度上,地表水模型通常只延伸到土壤或浅层地下水中,不考虑深层地下水的影响^[41],因为对于流域水文学家而言地表以下百米已经很深了,但对于水文地质学家而言这仍小于很多中间和区域水流系统的深度^[11],研究指出现代地下水通常可以延伸至地下250 m的深度^[42],而传统地下水模型通常研究几百米至几千米深度的地下水循环过程。在模拟单元上,地表水模型以地表分水岭圈闭的流域范围为基本模拟单元^[20],边界易于识别,而地下水模型以地下水水流系统或含水层系统为基本模拟单元^[40],边界不易识别。也有一些学者将地表水流域的概念也被引用到地下水中,将地下水的汇水范围称为“地下水流域”^[43]。“地下水流域”的边界通常以地表分水岭或以含水层与隔水层的界限来划分,但这种边界固定的划分方法不够精确,且存在很大的不确定性^[43];也可以通过潜水面最高点连线圈闭的方法划分“地下水流域”边界^[30],但地下水循环具有多级次结构,该方法划分的结果未必代表完整的地下水水流系统;而以地下水水流系统为依据来识别的“地下水流域”边界则是严格遵从动力学原则^[40],可以结合地下水数值模拟方法获得准确的“地下水流域”边界,后2种方法识别的边界是可变的。鉴于“地下水流域”概念容易与本文传统意义上的流域混淆,本文后面不使用“地下水流域”概念。传统地表水模型和地下水模型模拟的基本单元通常不一致,导致传统地表水模型和地下水模型难以结合。解决传统地下水模型和地表水模型的结合问题有助于跨流域地下水循环的研究。

3 识别与量化方法

3.1 水量平衡分析

假定流域在多年平均稳定状态下的水储量保持恒定,则水均衡方程可表示为:

$$\bar{P} - \bar{E} = \bar{Q} + \bar{G} \quad (1)$$

式中:各因素都表示平摊到流域面积上的通量; \bar{P} 为多年平均降水量; \bar{E} 为多年平均实际蒸散量; \bar{Q} 为流域出口的多年平均河川径流量; \bar{G} 为跨流域地下水循环导致的多年平均净输出水量。 $\bar{Q}/(\bar{P} - \bar{E})$ 的比值可以作为跨流域地下水循环是否发生以及量化的指标,判断标准为:当 $\bar{Q}/(\bar{P} - \bar{E}) < 1$ 时,说明总体表现为跨流域地下水循环的净输出;当 $\bar{Q}/(\bar{P} - \bar{E}) > 1$ 时,说明存在跨流域地下水循环的净输入;当 $\bar{Q}/(\bar{P} - \bar{E}) = 1$ 时,跨流域地下水循环的输入和流出正好平衡,或者没有跨流域地下水循环,此时需要结合其他方法来进一步判断流域是否存在跨流域地下水循环。传统水文地质模型也可以用到水量平衡分析中,如构建流域尺度的地下水数值模型,模拟获取的地下水净补给量可以用于计算 $(\bar{P} - \bar{E})$ 值。也可以构建包含多个流域的大尺度地下水数值模型,来模拟不同流域之间的地下水交换量。但目前还未有使用传统地下水数值模拟方法分析跨流域地下水循环的案例。

该方法需要具备降水量、径流量和蒸散量的观测数据,前两者是依靠常规手段相对容易观测的,蒸散量则比较困难。因此使用该方法的关键在于能够获得蒸散量的可靠值。蒸散量的常用野外观测设备有涡度相关仪和闪烁仪等,但精准测定流域大面积范围的蒸散量还有很多困难,国内外学者往往通过综合 moderate resolution imaging spectroradiometer (MODIS) 和 global land evaporation Amsterdam model (GLEAM) 等全球遥感数据产品来分析流域蒸散量^[44-45]。Schaller等^[7]使用采用水文模型VIC对美国1950—2000年实际蒸散量开展了模拟研究,在此基础上分析了美国1555个流域的水均衡状态,大量发现 $\bar{Q}/(\bar{P} - \bar{E})$ 显著大于或小于1的情况,所有流域累加的跨流域地下水循环量约占总河川径流量的50%。Fan^[20]对上述1555个流域计算结果做了进一步统计,对个别典型流域存在的跨流域地下水循环现象做了成因分析,认为气候条件、流域尺寸、流域高程、基质属性和地质构造都有影响。

3.2 改进流域水文模型

传统流域水文模型以闭合流域为假设前提进行

构建,如图 3-a 所示。当跨流域地下水循环存在时,再使用传统流域水文模型则会导致失真。那么,如何改进传统流域水文模型,使其能够处理跨流域地下水循环过程?在没有弄清楚地下水的循环路径和结构之前,解决这个问题当然是很困难的。有研究者提出了一些简化的处理办法。Mouelhi 等^[46]认为跨流域地下水循环通常发生在深部,只对基流有直接贡献,如图 3-b 所示。为此,他们对传统水文模型的基流(Q_b)计算进行修正,引入一个大于零的参数 f ,定义为跨流域地下水交换系数,与 Q_b 相乘得到

更真实的基流量(Q_b^*),以此评估跨流域地下水循环对基流的贡献量(G),计算公式为:

$$Q_b^* = fQ_b \quad (2)$$

$$G = (1 - f)Q_b \quad (3)$$

式(2)构成了对传统水文模型的个别修正,加入到径流观测值的拟合过程即可得到参数 f 。根据模型反演的 f 值,可判断跨流域地下水循环的状况: $f > 1$ 时,有 $G < 0$,表明跨流域地下水循环产生了对该流域的净输入; $f < 1$ 时,有 $G > 0$,表明该流域的地下水向其他流域排泄,产生了净输出。

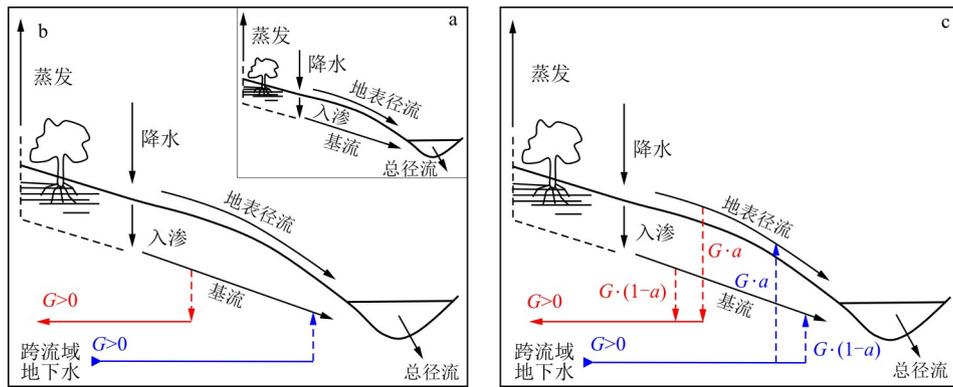


图 3 闭合流域(a)与非闭合流域(b, c)水文循环过程概念模型(改自文献[8])

Fig. 3 Conceptual models of hydrological cycle processes in the closed basin (a) and unclosed basin (b, c)

也有研究^[8]指出跨流域地下水循环不仅对基流有直接贡献,还影响地表产流(Q_s),如图 3-c 所示。在传统流域水文模型中,地表径流和基流通常被认为遵循一定的比例关系^[47-48]。因此,可以假定跨流域地下水循环对基流和地表径流的贡献也遵循一定比例,设为 α ,其取值在 $0 \sim 1$ 之间。这样处理可以形成新的改进模型,其中修正的基流量(Q_b^*)同样采用式(2)计算,而修正的地表径流(Q_s^*)和跨流域地下水循环量则分别计算为^[8]:

$$Q_s^* = \frac{\alpha(1-f)}{1-\alpha} Q_b Q_s \quad (4)$$

$$G = \frac{1-f}{1-\alpha} Q_b \quad (5)$$

这种修正模型增加了 f 和 α 这 2 个需要识别的参数。同样,当 $f > 1$ 时表明发生跨流域地下水循环的净输入,当 $f < 1$ 时表明存在跨流域地下水循环的净输出。

3.3 水化学或同位素示踪

如果跨流域地下水循环与流域内水循环存在差异化的水文地球化学特征,那么选择合适的示踪剂有可能识别出对跨流域地下水循环量。例如,沿着河流分别获取地表水及附近浅层、深层地下水的 Na^+ 、 K^+ 、 Cl^- 、 Mg^{2+} 和 SO_4^{2-} 等离子浓度,假设深层地下水来自于跨流域水循环、浅层地下水属于流

域内部水循环,两者共同提供地表水的离子来源。由此,可以建立两端元模型,评估跨流域地下水循环通量占河川径流量的比例(R_g),计算公式为^[17,49]:

$$R_g = \frac{C_s - C_{LW}}{C_{BGM} - C_{LW}} \quad (6)$$

式中: C 为溶质浓度;下标 S, LW 和 BGM 分别代表河水样、浅层地下水样和深层地下水样。同理可以计算出深层地下水对河水溶质的贡献比例(R_i),得到:

$$R_i = \frac{R_g C_{BGM}}{C_s} \quad (7)$$

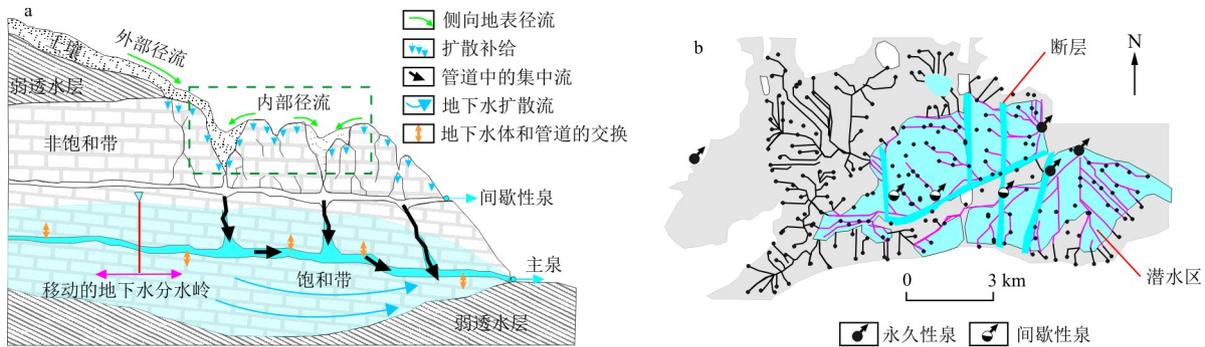
式中:下标 i 表示特定的溶质成分。这种评估方法需要避免混合过程中化学反应所产生的干扰误差,应选用保守型离子,如 Cl^- 。

已有不少研究使用水化学端元模型评估了跨流域地下水循环。例如,Genereux 等^[6]搜集不同水文站点的水化学数据,量化局部径流和地热水的混合比例,证实哥斯达黎加 Sura 流域和 Salto 流域存在跨流域地下水循环。Genereux 等^[25]在这 2 个相邻流域进一步开展了水量平衡和主要离子浓度分析,发现跨流域地下水循环对径流与河水盐分的贡献分别达到 $2/3$ 与 97% ,强调了跨流域地下水循环对低处流域水文和水质的控制作用。

水体的稳定同位素和放射性同位素也有潜力被

用来识别和量化跨流域地下水循环。韩鹏飞等^[50]通过构建单向倾斜盆地和双峰波状盆地的稳态地下水循环理论模型,模拟二维地下水流场和稳定同位素 D 和 ¹⁸O 分子的对流-弥散过程,探讨了补给区氢氧同位素高程效应在地下水流系统转化为深度效应的机理,并指出非单调曲线形态的地下水 δD 和 $\delta^{18}O$ 深度效应具有指示跨流域地下水循环的潜力。放射性同位素 ²²²Rn 可以用来区别饱和带水和包气带水,包气带水中的 ²²²Rn 会扩散到大气中而导致含量较低,而包气带水进入饱和带后将以一定速率累积 ²²²Rn,从而使饱和带中水中 ²²²Rn 含量较高。利用这个特性,Genereux 等^[51]采集大量河水、泉水、非饱和带水、浅层和深层地下水样本,使用 ²²²Rn 和 Ca^{2+} 作为示踪剂建立三端元混合模型识别了西 Fork 流域的径流组成,端元分别为包气带水、浅层地下水和代表跨流域地下水循环的深层基岩地下水。他们首先根据较高的 Ca^{2+} 质量浓度识别出跨流域基岩地下水,然后依据包气带中低含量 ²²²Rn 和

地下水中高含量 ²²²Rn 识别包气带水和浅层地下水。相比于孔隙介质,在裂隙和岩溶含水系统研究跨流域地下水循环具有更大的不确定性,因为导水通道具有更强烈的非均匀性。其中,岩溶地区的溶蚀孔隙、裂隙和暗河管网组成很复杂的地下水循环路径,而且随着溶蚀作用的进行而逐步演化,确定跨流域地下水循环需要大量的水文地质调查资料。岩溶区地下水的排泄往往是泉的形式,如图 4-a 所示的常年存在的主泉和间断性的溢流泉。为了划定泉水的流域边界,必须掌握岩溶管道网络的空间形态,往往需要用水化学或同位素示踪方法确定水流路径的连通性。Jeannin 等^[54]和 Malard 等^[53]提出综合利用三维地质环境模型、泉流量分析和示踪剂探测的识别方法,应用到瑞士西北部 Jura 山脉的岩溶系统,通过对补给点进行大量示踪,识别了每个泉的流域范围和运移通道(图 4-b)。他们发现,通过这种综合过程识别的泉流域面积比先前的估计大了 20%。



黑点和黑线代表非饱和带中的补给点和管道;红线代表饱和带中的管道;每个泉的流域范围可以追踪到补给点

图 4 岩溶系统概念模型(a)(改自文献[52])和 Jura 山脉岩溶系统概念模型(b)(改自文献[53])
Fig. 4 Conceptual model of a karst system (a) and conceptual model of the Jura Mountains karst system (b)

4 对流域气候水文响应和碳通量影响

4.1 流域水文气候敏感性

流域水文对气候变化的响应通常用气候敏感性系数或气候弹性系数来量化。传统的流域水文气候敏感性计算是以闭合流域为假设前提的,没有考虑跨流域地下水循环,敏感性系数估算结果存在误差。假定流域为闭合流域时,径流的年际气候敏感性公式^[24]可以表示为:

$$\frac{dQ}{Q} = \beta_{QP} \frac{dP}{P} + \beta_{QE_p} \frac{dE_p}{E_p} \quad (8)$$

式中: P , E_p 和 Q 分别为年降水量、潜在蒸散量和径流深;无量纲敏感性系数 β_{QP} 和 β_{EP} 分别为降水量和潜在蒸散量变化对径流变化的影响。

当跨流域地下水循环存在时,径流的气候敏感

性公式可以修正为:

$$\frac{d(Q-G)}{Q-G} = \beta_{QP} \frac{dP}{P} + \beta_{QE_p} \frac{dE_p}{E_p} \quad (9)$$

如果跨流域地下水循环通量相对稳定,可以使用多年平均稳态地下水循环量(\bar{G})对式(9)进行近似求解,如下:

$$\begin{aligned} \frac{dQ}{Q} &\approx \frac{Q + \bar{G}}{Q} \frac{d(Q + \bar{G})}{Q + \bar{G}} \\ &\approx \frac{\bar{P} - \bar{E}}{\bar{Q}} \left(\beta_{QP} \frac{dP}{P} + \beta_{QE_p} \frac{dE_p}{E_p} \right) \end{aligned} \quad (10)$$

存在跨流域地下水循环的净输出时,即有 $\bar{Q}/(\bar{P} - \bar{E}) < 1, \bar{G} > 0$,径流对气候变化的敏感性将会高于没有跨流域地下水循环的情形。如果存在跨流域地下水循环的净输入,即有 $\bar{Q}/(\bar{P} - \bar{E}) > 1, \bar{G} < 0$,则径流对气候变化的敏感性将会低于没有跨流域

地下水循环的情形。根据这个原理, Han 等^[24]评估了美国伊利诺伊州主要流域的气候敏感性, 发现考虑跨流域地下水循环后, 南部流域的径流敏感性系数是传统方法评估结果的 1.2~1.7 倍, 而北部流域的径流敏感性系数比传统估计值偏小 20%。

4.2 改进 Budyko 气候水文模式

Budyko 气候水文模式指出在多年稳态条件下蒸散比(\bar{E}/\bar{P})与干旱指数(潜在蒸散量与降水量的比值, \bar{E}_p/\bar{P})具有非线性关系, 是当前国际上研究气候变化对水资源影响的一个重要理论框架, 已有广泛应用^[55-58]。Budyko 气候水文模式有大量不同的公式表达, 常用的 Turc-Mezentsev 公式^[59]为:

$$\frac{\bar{E}}{\bar{P}} = \left(1 + \left(\frac{\bar{E}_p}{\bar{P}} \right)^{-n} \right)^{-1/n} \quad (11)$$

式中: n 为流域特征参数。根据闭合流域的多年平均水均衡关系, 式(11)可以被进一步改写为:

$$\frac{\bar{Q}}{\bar{P}} = 1 - \left(1 + \left(\frac{\bar{E}_p}{\bar{P}} \right)^{-n} \right)^{-1/n} \quad (12)$$

考虑跨流域地下水循环, 则式(12)需要修正为:

$$\frac{\bar{Q} + \bar{G}}{\bar{P}} = 1 - \left(1 + \left(\frac{\bar{E}_p}{\bar{P}} \right)^{-n} \right)^{-1/n} \quad (13)$$

Budyko 模式的理论前提为闭合流域, 将其应用到非闭合流域可能会导致系统误差。因此, 有必要对 Budyko 模式做出改进, 考虑跨流域地下水循环的影响。Bouaziz 等^[60]使用 Budyko 模式研究了荷兰 Semois 河所有子流域在 2007—2016 年的气候水文变化, 发现跨流域地下水循环具有重要作用。如图 5-a 所示, 忽略跨流域地下水循环时, 直接使用式(12)计算比值, Sainte-Marie 流域的数据点接近 Budyko 模式的能量极限曲线($\bar{Q} = \bar{P} - \bar{E}_p$), 即 $n \rightarrow$

∞ 。这与 n 取有限值的一般规律是相悖的, 因此不合理。考虑跨流域地下水循环时, 使用式(13)进行分析, Sainte-Marie 流域的数据点接近使用正常 Turc-Mezentsev 公式($1 < n < 2$)所代表的 Budyko 曲线(图 5-b), 更具有合理性。在 Budyko 气候水文模式中考虑跨流域地下水循环过程获得的结果具有更高的可信度。这个现象在 Semois 河的其他子流域也存在, 但是以 Sainte-Marie 流域最为明显。该研究还指出, 多年平均 Q/P 值越接近 Budyko 模式能量极限的流域, 发生跨流域地下水循环的可能性也越大。在这种流域使用传统的 Budyko 模式, 不仅违背真实的物理过程, 还会把跨流域地下水循环的影响错误地转移到实际蒸散量、流域特征参数或人类活动影响的评估中, 产生错误的结论。

4.3 流域碳循环

流域通常被划定为水分和溶质通量收支平衡的计算单元, 随着对陆地水碳通量关系的认识加深, 流域也被用作生态系统的评估单元来进行碳收支的测量和分析^[61-62]。在生态系统碳通量的各种要素中, 一个潜在重要的、但未被充分估计的因素是跨流域地下水的碳排放, 其溶解碳含量往往很高。Genereux 等^[25]基于地表水和地下水水化学数据对 Taconazo 流域和 Arboleda 流域的地下水循环过程进行研究, 识别出浅循环局部系统和深循环区域系统, 同时使用水均衡方法和水文地球化学两端元混合模型对 2 个流域的跨流域地下水循环过程进行量化研究, 发现 Arboleda 流域 2/3 的河流水量和 97% 的河流溶质来自于其他流域的输入, 而相邻的 Taconazo 流域则没有跨流域地下水循环发生。Genereux 等^[63]使用 ¹⁸O 数据进一步支持了 Taconazo 流域和 Arboleda 流域的地下水来源问题。Genereux 等^[64]

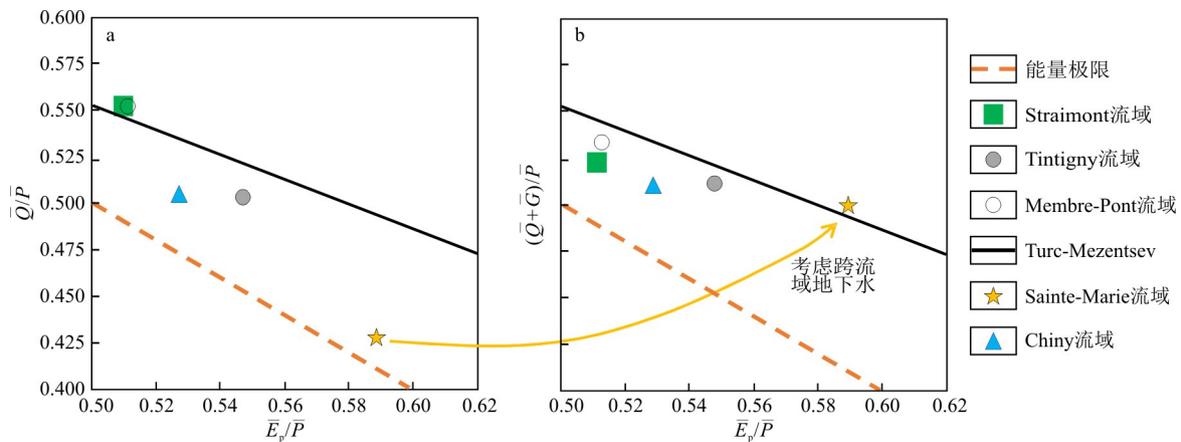


图 5 不考虑(a)和考虑(b)跨流域地下水循环时 Semois 河子流域数据点在 Budyko 空间的分布(改自文献[60])

Fig. 5 Distribution of data points in the Budyko space for subbasins of the Semois River obtained using the model without (a) or with (b) the interbasin groundwater circulation

通过采集和测量大气 CO_2 的含量、河水溶解有机碳 (DIC) 和溶解无机碳 (DOC)、以及 ^{13}C 和 ^{14}C 含量, 结合水文数据, 对无跨流域地下水循环的 Taconazo 流域和有跨流域地下水循环的 Arboleda 流域进行了对比研究, 结果表明: 跨流域地下水循环显著增加了河流中 DIC 的浓度和河流中 DIC 的输出, 降低了河流中 DOC 的浓度、但是增加了河流中 DOC 的输出。

Arboleda 流域和 Taconazo 流域的碳通量机制

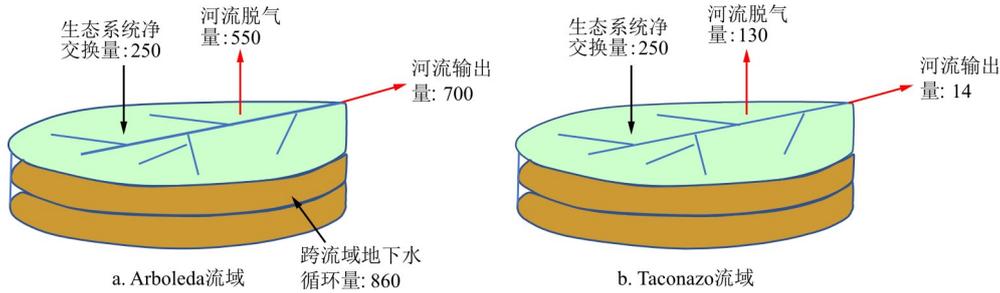


图 6 有无跨流域地下水循环影响的流域碳循环通量评估案例(单位为 $\text{gC m}^{-2} \text{yr}^{-1}$) (改自文献[63])

Fig. 6 Schematic diagram of carbon cycle fluxes in Arboleda basin (a) and Taconazo basin (b) with or without interbasin groundwater circulation

5 结论与展望

地表水的运动严格限定在地貌分水岭及其圈闭的流域范围内, 而地下水的运动则更加复杂, 表现为多级次嵌套结构, 使得“分水岭—流域”的概念不能直接推广用于限定地下水的运动。地表水和地下水运动的动力学边界不一致, 必然导致跨流域地下水循环的发生, 打破闭合流域的假设。当前自然资源部、水利部和生态环保部都开展了以流域为基本单元的地表水和地下水资源量计算、生态修复及污染防治等工作, 迫切需要正确评估跨流域地下水循环的影响。

近 20 a 来, 跨流域地下水循环越来越得到科学界的重视, 研究者从动力学成因机制和识别评估手段等方面取得了新的进展:

(1) 地表分水岭、潜水面最高点和地下水流系统的分水点往往是不一致的, 它们之间的偏离关系使跨流域地下水循环可以通过多种路径发生, 在一定条件下发育直接连通不同河流的地下水流系统。

(2) 基于实际蒸散数据的水均衡方法、兼容跨流域地下水循环的流域水文模型和水文地球化学端元混合模型, 是量化识别跨流域地下水循环及溶质输送的常用方法。流域地理位置、形态尺寸、气候和地质构造条件共同影响跨流域地下水循环的发生及通量。

(3) 跨流域地下水循环可能显著影响流域气候

如图 6 所示, Taconazo 流域是一个绝对的碳汇流域, 而对于 Arboleda 流域而言可以产生 2 个不同的判断: 不考虑跨流域地下水循环输出的碳通量时, 它属于一个碳源流域; 考虑跨流域地下水循环输出的碳通量时, 该流域仅表现出微弱的碳源性质, 碳输入和碳输出几乎处于持平状态。因此, 准确考虑跨流域地下水循环携带的碳通量, 有助于避免对流域的碳源和碳汇性质做出错误的判断。

水文敏感性和碳循环通量。

当前对跨流域地下水循环的研究有了一定的进展, 但还很不成熟, 尤其在跨流域地下水循环的动力学路径结构、准确量化等方面研究程度还较低。在量化方面, 水量平衡分析方法中准确测量实际蒸散量和水化学或同位素示踪方法中获取有效端元是难点工作。现有的理论认识均是从剖面二维动力学模型得到的, 没有延伸到三维含水层空间, 难点在于准确识别三维地下水循环的动力学结构, 也缺乏其溶质运移效应的分析。由于野外识别难度很大, 多数场地研究只是初步表明水体中的放射性或稳定同位素信息可能对跨流域地下水循环具有示踪作用, 但是尚未明确各种同位素示踪方法的有效性和不确定性, 这是当前研究的薄弱环节。揭示跨流域地下水循环的动力学过程和控制机理、提出准确量化通量和野外有效识别的方法, 以及跨流域地下水循环对水资源、生态和环境系统的影响是当前研究的前沿问题。此外, 非稳定条件下跨流域地下水循环的演化规律研究尚未起步。与经典的多级次地下水流系统理论研究不同, 跨流域地下水循环的研究必须对比流域的分水岭, 弄清楚地下水流系统与河流水文的关系, 量化不同级次水流系统对河川径流的贡献。跨流域地下水循环对流域尺度水化学、同位素、水温、地下水年龄、生物地球化学和水文等信息的时空变化可能产生强烈的影响, 解决这些问题涉及水文学、水文地质学、同位素水文学以及生物学等多个学科, 需要充分发挥学科交叉的作用。

(所有作者声明不存在利益冲突)

参考文献:

- [1] 林学钰, 廖资生, 赵勇胜, 等. 现代水文地质学[M]. 北京: 地质出版社, 2005.
Lin X Y, Liao Z S, Zhao Y S, et al. Modern hydrogeology[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2005(in Chinese).
- [2] Tóth J. A theoretical analysis of groundwater flow in small drainage basins[J]. J. Geophys. Res., 1963, 68(16): 4795-4812.
- [3] 蒋小伟, 万力, 王旭升. 区域地下水流理论进展[M]. 北京: 地质出版社, 2013.
Jiang X W, Wan L, Wang X S. Advance in the theory of regional groundwater flow [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2013(in Chinese).
- [4] 梁杏, 张人权, 靳孟贵. 地下水流系统: 理论、应用、调查[M]. 北京: 地质出版社, 2015.
Liang X, Zhang R Q, Jin M G. Groundwater flow systems: Theory, application and investigation[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2015(in Chinese).
- [5] Eakin T E. A regional interbasin groundwater system in the White River area, southeastern Nevada[J]. Water Resources Research, 1966, 2(2): 251-271.
- [6] Genereux D, Pringle C. Chemical mixing model of streamflow generation at La Selva Biological Station, Costa Rica[J]. Journal of Hydrology, 1997, 199(3/4): 319-330.
- [7] Schaller M F, Fan Y. River basins as groundwater exporters and importers: Implications for water cycle and climate modeling[J]. Journal of Geophysical Research, 2009, 114(4): 103-123.
- [8] Le Mesnil M, Charlier J B, Moussa R, et al. Interbasin groundwater flow: Characterization, role of karst areas, impact on annual water balance and flood processes[J]. Journal of Hydrology, 2020, 585: 124583.
- [9] 韩再生, 李尧, 王皓, 等. 跨界含水层研究: 世界进展和亚洲实践[J]. 科技导报, 2012, 30(5): 57-66.
Han Z S, Li Y, Wang H, et al. Research on transboundary aquifers: International development progress and their practice in Asia[J]. Science & Technology Review, 2012, 30(5): 57-66(in Chinese with English abstract).
- [10] 唐蕴, 唐克旺, 康伟, 等. 跨界含水层研究现状与展望[J]. 水文地质工程地质, 2010, 37(5): 15-19.
Tang Y, Tang K W, Kang W, et al. Development and prospect of studies of transboundary aquifer[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2010, 37(5): 15-19(in Chinese with English abstract).
- [11] Condon L E, Markovich K H, Kelleher C A, et al. Where is the bottom of a watershed? [J]. Water Resources Research, 2020, 56(3): e2019WR026010.
- [12] McDonnell J J. Beyond the water balance[J]. Nature Geoscience, 2017, 10(6): 396.
- [13] Han P F, Wang X S, Wan L, et al. The exact groundwater divide on water table between two rivers: A fundamental model investigation[J]. Water, 2019, 11(4): 685.
- [14] Wang X S, Wan L, Jiang X W, et al. Identifying three-dimensional nested groundwater flow systems in a Tóthian basin[J]. Advances in Water Resources, 2017, 108(S1): 139-156.
- [15] Li R Y, Wang X S. Analytical investigation of the exact groundwater divide between rivers beyond the Dupuit-Forchheimer approximation[J]. Hydrological Processes, 2021, 35(2): e14036.
- [16] Genereux D P, Webb M, Solomon D K. Chemical and isotopic signature of old groundwater and magmatic solutes in a Costa Rican rain forest: Evidence from carbon, helium, and chlorine [J]. Water Resources Research, 2009, 45(8): 64-76.
- [17] Hooper R P. Modelling streamwater chemistry as a mixture of soilwater end-members: An application to the Panola Mountain catchment, Georgia, U. S. A. [J]. Journal of Hydrology, 1990, 116(1): 321-343.
- [18] Pringle C M, Rowe G L, Triska F J, et al. Landscape linkages between geothermal activity and solute composition and ecological response in surface waters draining the Atlantic slope of Costa Rica[J]. Limnology and Oceanography, 1993, 38(4): 753-774.
- [19] Thyne G D, Gillespie J M, Ostlick J R. Evidence of interbasin flow through bedrock in the southeastern Sierra Nevada[J]. Geological Society of America Bulletin, 1999, 111(11): 1600-1616.
- [20] Fan Y. Are catchments leaky? [J]. WIREs Water, 2019, 6(6): e1386.
- [21] 徐乾清. 中国水利百科全书[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2006.
Xu Q Q. Encyclopedia of water resources in China[M]. Beijing: China Water Power Press, 2009(in Chinese).
- [22] 芮孝芳. 水文学原理[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2004.
Rui X F. Principles of hydrology [M]. Beijing: China Water Power Press, 2004(in Chinese).
- [23] 徐宗学. 水文模型[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
Xu Z X. Hydrological model[M]. Beijing: Science Press, 2004(in Chinese).
- [24] Han P F, Istanbuluoglu E, Wan L, et al. A new hydrologic sensitivity framework for unsteady: State responses to climate change and its application to catchments with croplands in Illinois [J]. Water Resources Research, 2021, 57(8): e2020WR027762.
- [25] Genereux D P, Jordan M T, Carbonell D. A paired-watershed budget study to quantify interbasin groundwater flow in a lowland rain forest, Costa Rica[J]. Water Resources Research, 2005, 41(4): W04011. 1-W04011. 17.
- [26] 张人权, 梁杏, 靳孟贵, 等. 水文地质学基础: 第7版[M]. 北京: 地质出版社, 2018.
Zhang R Q, Liang X, Jin M G, et al. Fundamentals of hydrogeology: 7th Edition[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2018(in Chinese).
- [27] 陈崇希, 唐仲华, 胡立堂. 地下水流数值模拟理论方法及模型设计[M]. 北京: 地质出版社, 2014.
Chen C X, Tang Z H, Hu L T. Theoretical method and model design for numerical simulation of groundwater flow[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2014(in Chinese).
- [28] 沈照理. 水文地球化学基础[M]. 北京: 地质出版社, 1993.
Shen Z L. Fundamentals of hydrogeochemistry[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1993(in Chinese).
- [29] 顾慰祖. 同位素水文学[M]. 北京: 科学出版社, 2011.
Gu W Z. Isotope hydrology[M]. Beijing: Science Press, 2011(in

- Chinese).
- [30] Bear J. *Hydraulics of groundwater*[M]. New York: McGraw-Hill, 1979.
- [31] Zhan H. Analytical and numerical modeling of a double well capture zone[J]. *Mathematical Geology*, 1999, 31(2): 175-193.
- [32] Wang X S, Jiang X W, Wan L, et al. A new analytical solution of topography-driven flow in a drainage basin with depth-dependent anisotropy of permeability[J]. *Water Resources Research*, 2011, 47(9): W09603.
- [33] Jiang X W, Wang X S, Wan L, et al. An analytical study on stagnation points in nested flow systems in basins with depth-decaying hydraulic conductivity [J]. *Water Resources Research*, 2011, 47(1): W01512.
- [34] Batelaan O, Smedt F D, Triest L. Regional groundwater discharge; Phreatophyte mapping, groundwater modelling and impact analysis of land-use change[J]. *Journal of Hydrology*, 2003, 275(1/2): 86-108.
- [35] Engelen G B, Kloosterman F H. *Hydrological systems analysis: Methods and applications*[M]. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1996.
- [36] Goderniaux P, Davy P, Bresciani E, et al. Partitioning a regional groundwater flow system into shallow local and deep regional flow compartments[J]. *Water Resources Research*, 2013, 49(4): 2274-2286.
- [37] 薛禹群, 吴吉春. *地下水动力学: 第3版*[M]. 北京: 地质出版社, 2010.
Xue Y Q, Wu J C. *Groundwater hydraulics: 3th Edition*[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2010 (in Chinese).
- [38] Freeze R A, Cherry J A. *Groundwater*[M]. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, Inc., 1979.
- [39] Borchardt S A. Variation of groundwater divides during wet and dry years in the Wolf River basin, northeastern Wisconsin [J]. *International Journal of Geospatial and Environmental Research*, 2018, 5(1): 1-16.
- [40] 焦友军, 潘晓东, 曾洁, 等. 会仙喀斯特湿地地下水分水岭移动特征研究[J]. *湿地科学*, 2021, 19(2): 137-146.
Jiao Y J, Pan X D, Zeng J, et al. The moving characteristics of the groundwater divide in Huixian karst wetland[J]. *Wetland Science*, 2021, 19(2): 137-146 (in Chinese with English abstract).
- [41] Clark M P, Fan Y, Lawrence D M, et al. Improving the representation of hydrologic processes in Earth System Models[J]. *Water Resources Research*, 2015, 51(8): 5929-5956.
- [42] Gleeson T, Befus K M, Jasechko S, et al. The global volume and distribution of modern groundwater[J]. *Nature Geoscience*, 2016, 9(2): 161-167.
- [43] 王波, 张华, 王宇, 等. 泸西喀斯特断陷盆地地表水与地下水流域边界与水动力性质[J]. *中国岩溶*, 2020, 39(3): 319-326.
Wang B, Zhang H, Wang Y, et al. Watershed boundaries and hydrodynamic properties of surface water and groundwater in the Luxi karst fault-depression basin[J]. *Carsologica Sinica*, 2020, 39(3): 319-326 (in Chinese with English abstract).
- [44] Guerschman J P, Dijk A, Mattersdorf G, et al. Scaling of potential evapotranspiration with MODIS data reproduces flux observations and catchment water balance observations across Australia[J]. *Journal of Hydrology*, 2009, 369(1/2): 107-119.
- [45] Odusanya A E, Mehdi B, Schürz C, et al. Multi-site calibration and validation of SWAT with satellite-based evapotranspiration in a data-sparse catchment in southwestern Nigeria[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2019, 23(2): 1113-1144.
- [46] Mouelhi S, Michel C, Perrin C, et al. Stepwise development of a two-parameter monthly water balance model[J]. *Journal of Hydrology*, 2006, 318(1/4): 200-214.
- [47] Han P F, Wang X S, Istanbuloglu E. A null-parameter formula of storage-evapotranspiration relationship at catchment scale and its application for a new hydrological model[J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2018, 123(4): 2082-2097.
- [48] Han P F, Wang X S, Wan L, et al. Croplands decreased stability of streamflow with changing climate: An investigation of catchments in Illinois[J]. *Journal of Hydrology*, 2022, 606: 127461.
- [49] Genereux D P, Wood S J, Pringle C M. Chemical tracing of interbasin groundwater transfer in the lowland rainforest of Costa Rica[J]. *Journal of Hydrology*, 2002, 258(1/4): 163-178.
- [50] 韩鹏飞, 王旭升, 蒋小伟, 等. 氢氧同位素在地下水流系统的重分布: 从高程效应到深度效应[J]. *水文地质工程地质*, 2023, 50(2): 1-12.
Han P F, Wang X S, Jiang X W, et al. Redistribution of hydrogen and oxygen isotopes in groundwater flow system: From elevation effect to depth effect[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2023, 50(2): 1-12 (in Chinese with English abstract).
- [51] Genereux D P, Hemond H F, Mulholland P J. Use of radon-222 and calcium as tracers in a three-end-member mixing model for streamflow generation on the West Fork of Walker Branch Watershed[J]. *Journal of Hydrology*, 1993, 142(1/4): 167-211.
- [52] Hartmann A, Goldscheider N, Wagener T, et al. Karst water resources in a changing world: Review of hydrological modeling approaches[J]. *Reviews of Geophysics*, 2014, 52(3): 218-242.
- [53] Malard A, Jeannin P Y, Vouillamoz J, et al. An integrated approach for catchment delineation and conduit-network modeling in karst aquifers: Application to a site in the Swiss Tabular Jura[J]. *Hydrogeology Journal*, 2015, 23(7): 1341-1357.
- [54] Jeannin P Y, Eichenberger U, Sinreich M, et al. KARSYS: A pragmatic approach to karst hydrogeological system conceptualisation: Application to the assessment of reserve and resource estimation of groundwater in Switzerland[J]. *Journal of Earth and Environmental Sciences*, 2013, 69(3): 999-1013.
- [55] Budyko M I. *Climate and life*[M]. New York: Academic, 1974.
- [56] 傅抱璞. 论陆面蒸发的计算[J]. *大气科学*, 1981, 5(1): 25-33.
Fu B P. On the calculation of the evaporation from land surface [J]. *Scientia Atmospherica Sinica*, 1981, 5(1): 25-33 (in Chinese).
- [57] 孙福宝, 杨大文, 刘志雨, 等. 基于 Budyko 假设的黄河流域水热耦合平衡规律研究[J]. *水利学报*, 2007, 38(4): 409-416.
Sun F B, Yang D W, Liu Z Y, et al. Study on coupled water-energy balance in Yellow River basin based on Budyko Hypothesis[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2007, 38(4): 409-416 (in Chinese with English abstract).
- [58] Wang X S, Zhou Y X. Shift of annual water balance in the Budyko space for catchments with groundwater-dependent evapotranspiration[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2016, 20(9): 3673-3690.

- [46] Mualem Y. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media[J]. *Water Resources Research*, 1976, 12(3): 513-522.
- [47] Van Genuchten M T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils 1[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1980, 44(5): 892-898.
- [48] 王大纯. 水文地质学基础[M]. 北京:地质出版社, 1986.
Wang D C. Fundamentals of hydrogeology[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1986(in Chinese).
- [49] Philip J R. Theory of infiltration; Advances in hydrosience [M]. [S. l.]; Elsevier, 1969.
- [50] 陈刚, 陈爱娣, 杨杏玲. 再谈量纲分析法[J]. *物理通报*, 2000 (12): 6-8.
Chen G, Chen A D, Yang X L. Talking about dimensional analysis[J]. *Physics Bulletin*, 2000(12): 6-8(in Chinese with English abstract).
- [51] Maliska C R. On the physical significance of some dimensionless numbers used in heat transfer and fluid flow[J]. *Federal University of Santa Catarina, Florianópolis, SC*, 1990, 137: 1-12.
- [52] Moench A F. Transient flow to a large-diameter well in an aquifer with storative semiconfining layers[J]. *Water Resources Research*, 1985, 21(8): 1121-1131.
- [53] Martin R. Clogging issues associated with managed aquifer recharge methods[M]. [S. l.]; IAH Commission on Managing Aquifer Recharge, Australia, 2013.
- [54] Xian Y, Jin M, Zhan H, et al. Reactive transport of nutrients and bioclogging during dynamic disconnection process of stream and groundwater[J]. *Water Resources Research*, 2019, 55(5): 3882-3903.
- [55] Zhang X Z, Huo A D, Wang J C. The comparative analysis of two injection modes and recharge capacity estimation for a radial well in the loess area of China[J]. *Earth and Environmental Science*, 2020, 467: 012059.
- [56] Jeong H Y, Jun S C, Cheon J Y, et al. A review on clogging mechanisms and managements in aquifer storage and recovery (ASR) applications[J]. *Geosciences Journal*, 2018, 22(4): 667-679.

.....

(上接第 117 页)

- [59] Mezentsev V. Back to the computation of total evaporation[J]. *Meteorologia i Hidrologia*, 1955, 5: 24-26.
- [60] Bouaziz L, Weerts A, Schellekens J, et al. Redressing the balance: Quantifying net intercatchment groundwater flows[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2018, 22(12): 6415-6434.
- [61] Likens G E, Bormann F H. Biogeochemistry of a forested ecosystem; 2nd Edition[M]. New York: Springer, 1995.
- [62] Cole J J, Prairie Y T, Caraco N F, et al. Plumbing the global carbon cycle: Integrating inland waters into the terrestrial carbon budget[J]. *Ecosystems*, 2007, 10(1): 171-184.
- [63] Genereux D P, Jordan M. Interbasin groundwater flow and groundwater interaction with surface water in a lowland rainforest, Costa Rica: A review[J]. *Journal of Hydrology*, 2006, 320(3/4): 385-399.
- [64] Genereux D P, Nagy L A, Osburn C L, et al. A connection to deep groundwater alters ecosystem carbon fluxes and budgets: Example from a Costa Rican rainforest[J]. *Geophysical Research Letters*, 2013, 40(10): 2066-2070.