

依赖地下水生态系统的生态水文研究评述^{*}

刘 强^{1)†} 梁丽乔^{2,3)}

(1)北京师范大学环境学院,水环境国家重点实验室,100875,北京;

2)中国科学院青藏高原研究所环境变化与地表过程重点实验室,100101,北京;

3)中国科学院青藏高原地球科学卓越创新中心,100101,北京)

摘要 变化环境下的地下水水文情势变化直接影响到地表生态的格局与过程,是引起生态系统结构与功能演变的关键因素.针对依赖地下水生态系统,评述了其生态水文研究的主要进展:依赖地下水生态系统的生态水文识别,变化环境条件下依赖地下水生态系统的生态水文响应,依赖地下水生态系统的生态需水规律,以及依赖地下水生态系统的生态水文模拟4个方面.总体而言,随着依赖地下水生态系统研究的深入,目前研究已经从单一关注地下水与生态系统交互作用,过渡到多要素耦合驱动、多时空过程相互影响的研究阶段,将地表水与地下水以及二者与地表生态的交互作用纳入到统一的研究框架中.未来重点研究领域与方向包括:依赖地下水生态系统的识别与演变机制研究;依赖地下水生态系统的分类及其空间绘图;依赖地下水生态系统的生态需水规律;依赖地下水生态系统的生态水文要素与过程综合模拟.上述研究的开展将为生态系统的保护与恢复提供切实的理论与实践支撑.

关键词 依赖地下水生态系统;生态水文;生态需水;生态过程

中图分类号 X171.1

DOI: 10.12202/j.0476-0301.2019364

地下水可以直接或间接地作用于地表生态,影响到地表生态系统的形成与演变^[1].变化环境下,极端洪、旱事件增加,以及高强度地下水开采往往改变了地下水与地表生态系统之间水文连通过程.地下水与地表生态之间的作用方式与强度差异是引起地表生态水文格局与过程演变的重要驱动因素,甚至引起部分生态系统退化或消失^[2-3].考虑到地下水变化对生态系统的影响,20世纪90年代澳大利亚学者将受到地下水补给以及影响的生态系统归为一个生态系统类型,称之为依赖地下水生态系统^[4].依赖地下水生态系统类型包括湿地与河道基流系统、陆地植被、陆地动物、地下含水层以及洞穴生态系统,可根据生态系统对地下水的依赖程度将其分为完全依赖、高度依赖、部分依赖、限制性依赖以及不依赖等5种不同类型^[5].Eamus等^[4]建议将依赖地下水生态系统归为3个类别:地下含水层和洞穴生态系统;依赖地下水溢出流维持的生态系统(如河道基流生态系统);利用浅层地下水维持的生态系统(如陆地植被).本文探讨的依赖地下水生态系统主要针对后2种情况,将其概括为依赖地下水的陆地生态系统.目前,针对依赖地下水生态系统划分逐步得到许多国家与地区的政府组织与学者的认可,并开展了一些相关的研究.欧盟水框架指令(the EU water framework and groundwater directives)更是将地下水、依赖地下水的陆地生态系统和地表水的相互作用作为水资源管理中的一个核心环节考虑,并督促各成员国应用地下水临界指标评价地下水化学状况,用以保护依赖地下水生态系统以及人类身体健康^[6].联合国教科文组织国际水文计划(UNESCO/IHP)早在第V(1996—2001年)、VI阶段(2002—2007年),在生态水文研究专项及其相关研究中就地将地下水对生态系统的影响机制作为一项重要的研究内容^[7-8],并在IHP第VII阶段(2008—2013年)研究计划的主题3“面向可持续性的生态水文学”中,进一步将“开展依赖地下水生态系统的鉴定、详查和评估”作为了重点研究领域.依赖地下水生态系统保护与恢复工作已经成为生态水文学研究的重要挑战之一,得到欧盟、澳洲等国家和科研机构的重视与关注^[9-11].

近年来,气候变化和地下水过度开采等无序人类活动影响引起的水位下降,已造成地下水对地表生态支撑作用的减弱^[3].有鉴于此,依赖地下水生态系统的研究有待于在概念体系、理论框架和技术方法等方面进

^{*} 水体污染控制与治理科技重大专项资助项目(2018ZX07110001);国家重点研发计划资助项目(2016YFC0500402);国家自然科学基金资助项目(51579008)

[†] 通信作者:刘强,(1978—),男,副教授,博士.研究方向:生态水文学. e-mail: qiang.liu@bnu.edu.cn

收稿日期:2019-05-06

进一步完善充实,切实实现变化环境中依赖地下水生态系统的保护与恢复.本文尝试从依赖地下水生态系统的生态水文识别、变化环境条件下依赖地下水生态系统的生态水文响应、依赖地下水生态系统的生态需水规律,以及依赖地下水生态系统的生态水文综合模拟等几个方面展开评述.

1 依赖地下水生态系统的生态水文识别

判断并识别生态系统是否依赖于地下水,是研究依赖地下水生态系统的首要问题. Sinclair^[12] 将识别潜在依赖地下水生态系统的方法归纳为直观判断法、桌面评价法、叶面积指数估算法、植被水分相关法、地下水水位过程线判断法等几种方法,在此基础上进一步判断生态系统对地下水的依赖关系.分析地下水、土壤水、地表水以及植被茎流中的稳定同位素组成,是识别并界定生态系统是否依赖于地下水的最为直接的方法^[13].学者们基于植物茎液、土壤水和地下水中的氘氧同位素组成判断植被对水分利用的比例含量,从而诊断对地下水的依赖程度^[14-15].而对于河道基流生态系统(base flow system)而言,河流和地下水的化学组成也是识别与量化地下水补给以及影响河道流量与过程的重要依据^[16-17]. Pettit 等^[15] 研究结果指出,植被在地下水浅埋区较地下水深埋区生长率更高,且对于干旱的响应并不十分明显.

随着遥感以及地理信息技术的发展,在较大空间尺度上判断生态系统对地下水的依赖关系成为当前研究的一个重要内容^[18],这也为解释全球尺度上地下水与植被之间的相互作用的程度及其控制因子提供了良好的技术支撑^[19]. Colvin 等^[20] 依据地下水水位、土壤水分可利用量与植被空间分布格局,对依赖地下水陆地生态系统进行了空间绘图分析.选择合适的生态水文参数成为判断依赖地下水生态系统的关键所在^[21]. Koirala 等^[19] 研究指出,生态系统初级生产力和地下水水位可以作为界定全球尺度地下水与植被之间相互作用的关键参数.地下水水位是判断植物根系深度,并从大空间尺度上影响植被梯度变化的重要指标^[22].总体而言,依赖于地下水生态系统的识别相对较为成熟,已经由传统的单一指标量化判识过渡到依赖遥感以及地理信息系统多指标的综合判识和空间识别,且地下水水位梯度对生态梯度演化的驱动机制已得到学者的关注.

2 地下水变化条件下生态系统的生态水文响应

变化环境下,极端旱、涝以及高强度地下水的采补等直接改变了地下水的情势与分布格局,引起地下水与地表生态之间连通关系的变化,导致地表生态系统内部的生态水文响应与反馈.持续干旱或是地下水的过量开采,地下水水位下降,往往导致依赖地下水生态系统生理生态的响应^[23-26],导致各类型生态系统的退化.如地下水水位降低使植被难以利用地下水满足生态用水需求,河滨带白杨树等植被甚至可以通过关闭气孔减少蒸腾量和光合作用来适应干旱胁迫状态^[27].考虑到地下水对植被需耗水的影响, Gribovszki 等^[23] 建立了利用地下水估算植被蒸散发的方法,准确估算了河滨带植被的蒸散发量.研究表明,地下水水位降低是导致河滨植被群落减少、斑块化以及单一化的重要驱动因素^[28-29].不同依赖关系或不同生态系统类型生态系统内部各要素与过程对地下水变化的响应形式不尽相同^[12].持续降水或是生态补水可以恢复地下水水文过程,实现地下水与地表生态之间水文与生态的关联.但是由于生态系统对地下水变化响应与适应的时空差异性,生态系统往往表现出迟滞性^[30].与此同时,地下水水位升高又是引起干旱地区土壤盐渍化的重要原因.调控地下水水位阈值在满足植被需水的同时,又能减少土壤盐渍化的风险,是实现上述地区生态系统恢复的关键^[31].如澳大利亚学者利用深根系植被来调控地下水水位,减少地表土壤盐渍化^[32-33].但是,植被对水分的利用受到地下水水盐状况的影响^[34-35],利用植被恢复地下水水位来控制盐渍化,应当配合其他措施并需要一个长期过程才能实现.考虑到不同植被类型对地下水变化响应的差异性与复杂性,植被结构动态的模拟多以植被生物量、植被空间分布格局作为状态变量构建模型开展研究,以植被空间分布模型最为典型.如在中国西部塔里木河与黑河研究中,多采用植被适宜的地下水水位埋深来模拟植被分布的潜在区域,判识植被恢复区域^[36-37].从自然背景水位、环境质量标准 and 饮用水标准等相对参考标准出发,估算地下水水位临界值,借以实现对地下水以及依赖地下水生态系统双重保护目标,已经得到欧盟等地区及国家的重视^[38-39].

3 依赖地下水生态系统的生态需水规律

生态系统需水量研究始于 20 世纪 40 年代美国鱼类和野生动物保护协会对河道内流量的研究^[40].目前,

生态需水的计算方法可归纳为6类,即水文学法、生境模拟法、水文—生物分析法、水力学法、综合法以及其他方法^[41],这些方法广泛应用于生态系统生态需水的计算评估中.由于生态系统各类型之间水生态过程的连通性,生态需水具有兼容性,所以从整体角度探讨生态系统生态需水规律,进而开展生态补水与配置研究已经引起研究者的重视^[42].尤其是近年来随着依赖地下水生态系统研究的深入,从地下水与生态系统相互作用的角度揭示依赖地下水生态系统生态需水规律,成为当前研究中迫切需要解决的问题.依赖地下水生态系统生态的需水量与地下水水量、水质、水位的动态变化存在复杂的函数关系,这使得依赖地下水的生态需水核算也成为目前研究中的一个难点问题^[14].不同植被空间分布格局与地下水埋深之间的相互关系^[43],以及干、湿季植被对水分利用量的对比^[16, 44],常常用来作为估算依赖地下水生态系统的生态环境需水量的切入点. Sinclair^[12]则认为,需要在确定生态系统与地下水之间不同依赖关系的基础上,核算依赖地下水生态系统的生态需水量,并且给出了相应核算步骤,包括识别依赖地下水的生态系统、分析生态系统对地下水的依赖程度、探讨不同依赖关系下水文情势的变化特征、核算生态环境需水量(图1).沈珍瑶和杨志峰^[45-46]对依赖地下水生态系统的生态需水理论与技术方法进行了初步探讨,指出依赖地下水生态系统的生态需水量是确定生态环境用水配置的关键.系统的观测与模型模拟结果已证实,地下水形成的环境梯度影响了区域乃至全球关键带演化^[22].鉴于地下水对地表生态系统结构与功能的响应与反馈^[31, 47],地下水开发与利用中应充分考虑其对地表生态系统环境需水的支撑作用,并据此作为限制地下水开发的关键因子^[3].

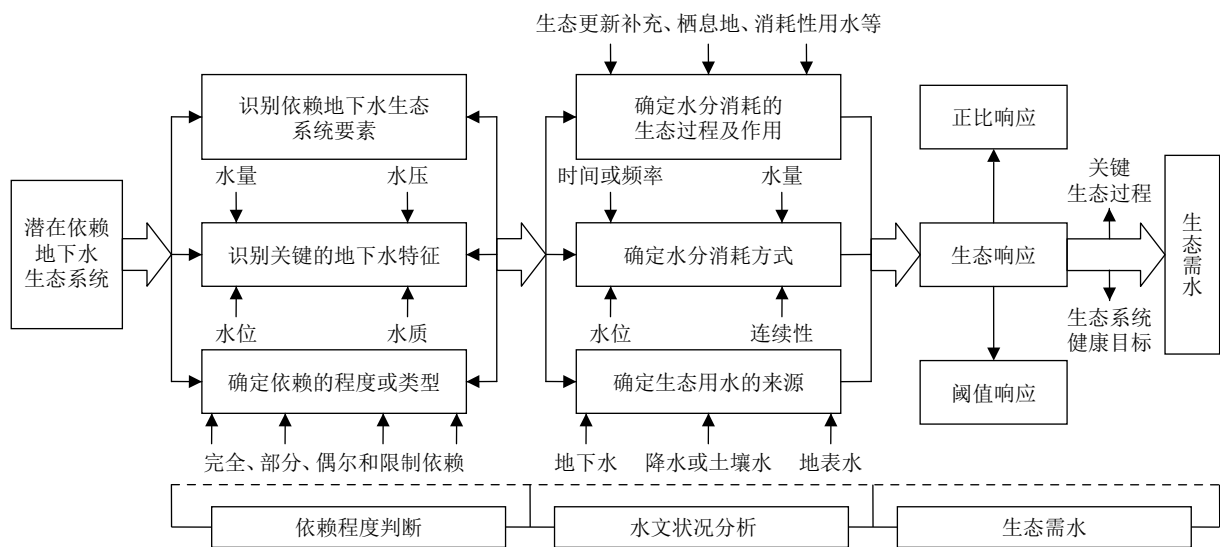


图1 依赖地下水的生态需水核算流程(参考 Sinclair^[12])

4 依赖地下水生态系统的生态水文模拟

地下水水文状况的变化影响着土壤水分(盐分)状况,改变植被盖度、叶面积指数以及蒸散发等生态水文要素与过程.从不同研究角度出发,学者们开发了不同的生态水文模型,对不同时空尺度上地下水影响下的生态水文要素与过程的变化进行了模拟研究,如 TOPOG-Dynamic^[48]、FEMWATER^[49]、HYDRUS 等^[50]. Batelaan 等^[51]借助于地下水模型模拟了地下水过程的变化,并将其与植被格局图耦合,探讨了地下水补给与排泄对植被空间分布的影响,进而预测了地下水系统水流变化情况及其生态响应. Boswell 等^[52]模拟研究了受地下水控制的湿地系统对非稳定边界条件的水文响应问题,研究结果对于湿地植被的恢复与保护具有较好的指导意义.考虑到地下水与生态系统的相互作用对于生态系统内部各要素与过程的调控作用,将地下水与生态系统耦合到一个复合系统进行综合的模拟与分析,成为认识地下水作用下生态系统响应的关键.尤其是近年来随着遥感以及地理信息系统技术的发展,为认识不同时空尺度上地下水与生态系统的相互作用提供了良好的技术手段.有学者尝试将大尺度分布式水文模型与地下水模型相结合,揭示地下水与生态系统之间的交互作用^[53-55].如 Liu 等^[55]在依赖地下水流域将 SWAT-MODFLOW 与径流-生物经验模型相结合研究中,评估了河道水文情势和生物群的影响.可见,如何将地表水与地下水相耦合评估水文情势变化对生态系统的影响,成

为未来关注的重点问题,尤其是生态系统过程变化与水文情势变化是否具有同步性,或是这些变化如何指导恢复实践活动,成为依赖地下水生态系统的关键核心问题^[56]。

5 未来研究的重点领域与方向

1) 依赖地下水生态系统的识别与演变机制研究. 气候变化以及高强度人类活动作用下, 流域生态水文格局与过程发生了根本的变化, 导致一些依赖地下水生态系统的结构与功能也随之发生变化, 并由此产生了一些生态环境问题. 在这种情形之下, 判别依赖地下水生态系统, 进而揭示对地下水变化敏感的生态水文要素、过程及其阈值, 是认识变化环境下依赖地下水生态系统演变机制的前提与基础。

2) 依赖地下水生态系统的分类及其空间绘图. 不同依赖关系下地下水与生态系统之间相互作用关系不同, 乃至地下水与生态系统之间相互响应的敏感要素与过程也必然存在差别. 从流域尺度出发, 对不同依赖关系的生态系统进行分类并进行空间边界的划分, 是对依赖地下水生态系统合理规划、有效保护与管理的重要依据。

3) 依赖地下水生态系统的生态需水量规律. 依赖地下水生态系统具有区别于其他类型生态系统的水文情势与变化节律. 干旱缺水季节, 地下水往往成为植被需水的重要补给源. 不同依赖关系下, 生态系统对地下水变化响应敏感生态要素与指标的差异, 决定了生态需水核算中应衡量水文情势与生态系统过程之间的动态匹配关系, 并依据生态系统对地下水变化响应敏感的生态要素或过程, 核算依赖地下水生态系统的生态需水量。

4) 依赖地下水生态系统的生态水文要素与过程综合模拟. 依赖地下水生态系统中生态水文要素与过程的模拟, 是对依赖地下水生态系统内在演变机制认识的深化, 也是实现对依赖地下水生态系统规划、保护与管理的重要手段. 但是, 由于地下水与生态系统相互作用的复杂性、参数的空间变异性等原因, 导致在不同时空尺度上对依赖地下水生态系统综合模拟难度较大. 如何模拟变化条件下不同时空尺度上水文过程、生态过程及其相互作用, 成为依赖地下水生态系统模拟研究的重要方向与领域。

6 结论

1) 生态系统对地下水的生态响应与反馈是判断依赖地下水生态系统的重要依据, 也是生态系统保护与恢复的理论基础。

2) 依赖地下水生态系统生态需水判识与估算是保护与恢复生态系统的技术保障, 是进行生态系统调控与管理的关键。

3) 未来研究中应关注: 依赖地下水生态系统的识别与演变机制、依赖地下水生态系统的分类及其空间绘图、依赖地下水生态系统的生态需水量规律以及依赖地下水生态系统的生态水文要素与过程综合模拟等相关方面研究, 以服务于变化环境中生态系统的保护与恢复。

7 参考文献

- [1] 邓伟, 何岩. 论地下水对地表生态的作用[J]. 地理科学, 1993, 13(2): 161
- [2] FAN Y, LI H, MIGUEZ-MACHO G. Global patterns of groundwater table depths[J]. *Science*, 2013, 339(6122): 940
- [3] DE GRAAF I E M, GLEESON T, RENS VAN BEEK L P H, et al. Environmental flow limits to global groundwater pumping[J]. *Nature*, 2019, 574(7776): 90
- [4] EAMUS D, HATTON T, COOK P, et al. Ecohydrology: vegetation function, water and resource management[M]. Victoria, Australia: CSIRO Publishing, 2006
- [5] HATTON T, EVANS R. Dependence of ecosystems on groundwater and its significance to Australia[R]. Canberra: Land and Water Resources Research and Development Corporation, 1998
- [6] NONE M, GERSTGRASER C, WHARTON G. Consideration of hydromorphology and sediment in the implementation of the EU water framework and floods directives: a comparative analysis of selected EU member states[J]. *Water and Environment Journal*, 2017, 31(3): 324
- [7] ZALEWSKI M, JANAUER G A, JOLANKAJ G. Ecohydrology: a new paradigm for the sustainable use aquatic resources[C]// Conceptual Background, Working Hypothesis. Rational and Scientific Guidelines for the Implementation of IHP-V Project 2.3-2.4,

- Technical Document in Hydrology. No. 7. Paris: UNESCO, 1997
- [8] ZEKTSER I S, EVERET L G. Groundwater Resources of the World and Their Use[M]// IHP-VI Series on Groundwater No. 6. Paris: UNESCO, 2004
- [9] NEWMAN B D, WILCOX B P, ARCHER S R, et al. Ecohydrology of water-limited environments: a scientific vision[J]. *Water Resources Research*, 2006, 42(6): W06302
- [10] DLWC. The NSW state groundwater policy framework document[S]//NSW water reforms. Sydney: NSW Department of Land and Water Conservation, 1997
- [11] DLWC. The NSW groundwater dependant eco-system policy[S]//NSW water reforms. Sydney: NSW Department of Land and Water Conservation, 2002
- [12] SINCLAIR K M. Environmental water requirements of groundwater dependent ecosystems[R]. Environmental Flows Initiative Technical Report Number 2. Canberra: Commonwealth of Australia, 2001
- [13] ZENCICH S J, FROEND R H, TURNER J V, et al. Influence of groundwater depth on the seasonal sources of water accessed by Banksia tree species on a shallow, sandy coastal aquifer[J]. *Oecologia*, 2002, 131(1): 8
- [14] LAMONTAGNE S, COOK P G, O'GRADY A, et al. Groundwater use by vegetation in a tropical savanna riparian zone (Daly River, Australia)[J]. *Journal of Hydrology*, 2005, 310: 280
- [15] PETTIT N E, FROEND R H. How important is groundwater availability and stream perenniality to riparian and floodplain tree growth?[J]. *Hydrological Processes*, 2018, 32(10): 1502
- [16] COOK P G, FAVREAU G, DIGHTON J C, et al. Determining natural groundwater influx to a tropical river using radon, chlorofluorocarbons and ionic environmental tracers[J]. *Journal of Hydrology*, 2003, 277: 74
- [17] ZHANG J L, ZHANG Y Q, SONG J X, et al. Evaluating relative merits of four baseflow separation methods in Eastern Australia[J]. *Journal of Hydrology*, 2017, 549: 252
- [18] EAMUS D, ZOLFAGHAR S, VILLALOBOS-VEGS R, et al. Groundwater-dependent ecosystems: recent insights from satellite and field-based studies[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2015, 19(10): 4229
- [19] KOIRALA S, JUNG M, REICHSTEIN M, et al. Global distribution of groundwater-vegetation spatial covariation[J]. *Geophysical Research Letters*, 2017, 44(9): 4134
- [20] COLVIN C, LE MAITRE D, HUGHES S. Assessing terrestrial groundwater dependent ecosystems in South Africa[R]. WRC Report No. 1090-2/2/03, Water Research Commission, Pretoria, South Africa, 2002
- [21] THOMPSON M, MARNEWECK G, BELL S, et al. A methodology proposed for a South African national wetland inventory[R]//Report prepared for John Dini, wetlands conservation programme. Pretoria, South Africa: Department Environmental Affairs and Tourism, 2002
- [22] FAN Y. Groundwater in the Earth's critical zone: relevance to large-scale patterns and processes[J]. *Water Resources Research*, 2015, 51(5): 3052
- [23] GRIBOVSKZI Z, KALICZ P, SZILAGYI J, et al. Riparian zone evapotranspiration estimation from diurnal groundwater level fluctuations[J]. *Journal of Hydrology*, 2008, 349: 6
- [24] FAN J, OSTERGAARD K T, GUYOT A, et al. Estimating groundwater evapotranspiration by a subtropical pine plantation using diurnal water table fluctuations: Implications from night-time water use[J]. *Journal of Hydrology*, 2016, 542: 679
- [25] FOSTER S G, MAHONEY J M, ROOD S B. Functional flows: an environmental flow regime benefits riparian cottonwoods along the Waterton River, Alberta[J]. *Restoration Ecology*, 2018, 26(5): 921
- [26] CAVEN A J, BUCKLEY E M B, WIESE J D, et al. Appeal for a comprehensive assessment of the potential ecological impacts of the proposed platte-republican diversion project[J]. *Great Plains Research*, 2019, 29(2): 123
- [27] ROOD S B, BRAATNE J H, HUGHES F M R. Ecophysiology of riparian cottonwoods: stream flow dependency, water elations and restoration[J]. *Tree Physiology*, 2003, 23: 1113
- [28] CHEN X H. Hydrological connections of a stream-aquifer-vegetation zone in south-central Platte River valley, Nebraska[J]. *Journal of Hydrology*, 2007, 333: 554
- [29] CHEN Y N, PANG Z H, CHEN Y P, et al. Response of riparian vegetation to water-table changes in the lower reaches of Tarim River, Xinjiang Uygur, China[J]. *Hydrogeology Journal*, 2008, 16(7): 1371
- [30] 古丽米热·哈那提, 王光焰, 张音, 等. 干旱区间歇性生态输水对地下水位与植被的影响机理研究[J]. *干旱区地理*, 2018, 41(4): 726
- [31] LIU Q, MOU X, CUI B S, et al. Regulation of drainage canals on the groundwater level in a typical coastal wetlands[J]. *Journal of*

- Hydrology*, 2017, 555: 463
- [32] DOBLE R, SIMMONS C, JOLLY I, et al. Spatial relationships between vegetation cover and irrigation-induced groundwater discharge on a semi-arid floodplain, Australia[J]. *Journal of Hydrology*, 2006, 329: 75
- [33] MARCHEINI V A, GIMENEZ R, NOSETTO M D, et al. Ecohydrological transformation in the Dry Chaco and the risk of dryland salinity: following Australia's footsteps?[J]. *Ecohydrology*, 2017, 10(4): e1822
- [34] GILL B C, TERRY A D. 'Keeping salt on the farm'-evaluation of an on-farm salinity management system in the Shepparton irrigation region of South-East Australia[J]. *Agricultural Water Management*, 2016, 164: 291
- [35] ZHANG L, DAWES W R, SLAVICH P G, et al. Growth and ground water uptake responses of lucerne to changes in groundwater levels and salinity: lysimeter, isotope and modelling studies[J]. *Agricultural Water Management*, 1999, 39(2/3): 265
- [36] 陈亚宁, 王强, 李卫红, 等. 植被生理生态数据表征的合理地下水位研究: 以塔里木河下游生态恢复过程为例[J]. *科学通报*, 2006(增刊1): 7
- [37] 赵传燕, 李守波, 贾艳红, 等. 黑河下游波动带地下水与植被动态耦合模拟[J]. *应用生态学报*, 2018, 19(12): 2687
- [38] DAHL M, NILSSON B, LANGHOFF J H, et al. Review of classification systems and new multi-scale typology of groundwater-surface water interaction[J]. *Journal of Hydrology*, 2007, 344: 1
- [39] HINSBY K, CONDESSO de MELO M T, DAHL M. European case studies supporting the derivation of natural background levels and groundwater threshold values for the protection of dependent ecosystems and human health[J]. *Science of the Total Environment*, 2008, 401(1/2/3): 1
- [40] ARMENTROUT G W, WILSON J F. An assessment of low flows in stream in northeastern Wyoming[R]/USGS Water Resources Investigations Report. Cheyenne, Wyoming: Geological Survey, 1987
- [41] THARME R E. A global perspective on environmental flow assessment: emerging trends in the development and application of environmental flow methodologies for rivers[J]. *River Research and Applications*, 2003, 19(5/6): 397
- [42] ALI G A, ROY A G. Revisiting hydrologic sampling strategies for an accurate assessment of hydrologic connectivity in humid temperate systems[J]. *Geography Compass*, 2009, 3(1): 350
- [43] STROMBERG J C, TILLER R, RICHTER B. Effects of groundwater decline on riparian vegetation of semiarid regions: the San Pedro, Arizona[J]. *Ecological Applications*, 1996, 6(1): 113
- [44] HORTON J L, KOLB T E, HART S C. Responses of riparian trees to interannual variation in ground water depth in a semiarid river basin[J]. *Plant*, 2001, 24: 293
- [45] 沈珍瑶, 杨志峰. 地下水对生态系统生态环境需水的制约机制[EB/OL]. (2005-10-09)[2019-03-12]. http://www.paper.edu.cn/paper.php?serial_number=200510-56
- [46] 沈珍瑶, 杨志峰. 依赖地下水生态系统的生态环境需水问题[EB/OL]. (2005-10-08)[2019-03-12]. http://www.paper.edu.cn/paper.php?serial_number=200510-49
- [47] LIU Q, LIANG L Q, YUAN X M, et al. Effects of groundwater level changes associated with coastline changes in coastal wetlands[J/OL]. *Wetlands*, 2019[2019-05-01]. <https://doi.org/10.1007/s13157-019-01253-9>
- [48] VERTESSY R A, ELSENBEEER H. Distributed modeling of stormflow generation in an Amazonian rainforest catchment: effects of model parameterization[J]. *Water Resources Research*, 1999, 35: 2173
- [49] LIN H C J, RICHARDS D R, TALBOT C A, et al. FEMWATER: a three-dimensional finite element computer model for simulating density-dependent flow and transport in variably saturated media: Version 3.0[R]. Vicksburg, MS: US Army Engineer Research and Development Center, 1997
- [50] ŠIMUNEK J, VAN GENUCHTEN M T, ŠEJNA M. Recent developments and applications of the HYDRUS computer software packages[J]. *Vadose Zone Journal*, 2016, 15(7): 25
- [51] BATELAAN O, DESMEDT F, TRIEST L. Regional groundwater discharge: phreatophyte mapping, groundwater modelling and impact analysis of land-use change[J]. *Journal of Hydrology*, 2003, 275: 86
- [52] BOSWELL J S, OLYPHANT G A. Modeling the hydrologic response of groundwater dominated wetlands to transient boundary conditions: implications for wetland restoration[J]. *Journal of Hydrology*, 2007, 332: 467
- [53] JIA Y, WANG H, ZHOU Z, et al. Development of the WEP-L distributed hydrological model and dynamic assessment of water resources in the Yellow River basin[J]. *Journal of Hydrology*, 2006, 331: 606
- [54] KIM N W, CHUNG I M, WON Y S, et al. Development and application of the integrated SWAT-MODFLOW model[J]. *Journal of Hydrology*, 2008, 356: 1
- [55] LIU W, BAILEY R T, ANDERSEN H E, et al. Assessing the impacts of groundwater abstractions on flow regime and stream biota;

combining SWAT-MODFLOW with flow-biota empirical models[J]. *Science of the Total Environment*, 2019: 135702

- [56] PALMER M, RUHI A. Linkages between flow regime, biota, and ecosystem processes: implications for river restoration[J]. *Science*, 2019, 365(6459): eaaw2087

Eco-hydrology groundwater-dependent of ecosystem

LIU Qiang^{1)†} LIANG Liqiao^{2,3)}

(1) State Key Laboratory of Water Environment Simulation, School of Environment, Beijing Normal University, 100875, Beijing, China;

2) Key Laboratory of Tibetan Environment Changes and Land Surface Processes, Institute of Tibetan Plateau Research,
Chinese Academy of Sciences, 100101, Beijing, China;

3) CAS Center for Excellence in Tibetan Plateau Earth Sciences, Chinese Academy of Sciences, 100101, Beijing, China)

Abstract In a changing environment, altered groundwater flow regime would affect ecohydrological pattern and processes, to result in degradation of ecosystem. Here we review major progress in ecohydrological research of groundwater-dependent ecosystem. In general, research for groundwater dependent ecosystem has transitioned from interaction between groundwater and ecosystem to interaction between multi-elements, multi-spatial and temporal scales, with more focus on interaction between surface water, groundwater and ecosystem. Future research should stress the following themes: identification of groundwater dependent ecosystem, exploring evolution mechanism, classification of groundwater dependent ecosystem. The following should also be stressed: ecological water requirement of groundwater dependent ecosystem, comprehensive simulation for ecohydrological elements and processes, construction of groundwater dependent policy to restore and protect groundwater dependent ecosystem.

Keywords groundwater-dependent ecosystem; ecohydrology; ecological water requirement; ecological processes