



引文格式: 张俊, 余堃, 董佳秋, 等. 西北干旱内陆河下游间歇性生态输水的河岸带生态水文响应研究进展与展望[J]. 西北地质, 2025, 58(2): 31–40. DOI: 10.12401/j.nwg.2024067

Citation: ZHANG Jun, YU Kun, DONG Jiaqiu, et al. Ecohydrological Response in Riparian Zone Under Intermittent Ecologic Water Conveyance in the Lower Reaches of Arid Inland Rivers in NW China: Progress and Prospect[J]. Northwestern Geology, 2025, 58(2): 31–40. DOI: 10.12401/j.nwg.2024067

西北干旱内陆河下游间歇性生态输水的河岸带生态水文响应研究进展与展望

张俊^{1,2}, 余堃^{1,2}, 董佳秋^{1,2}, 龙睿^{1,2}, 尹立河^{1,2}

(1. 中国地质调查局西安地质调查中心, 陕西 西安 710119; 2. 中国地质调查局
干旱-半干旱区地下水与生态重点实验室, 陕西 西安 710119)

摘要: 间歇性生态输水是恢复干旱内陆河下游生态系统的重要工程措施。输水与断流交替下河岸带一定范围发育水盐动态平衡的淡化带, 成为维系河岸带生态系统健康稳定的基础, 其背后的生态水文过程与耦合机制尚待明晰。笔者通过梳理西北干旱内陆河下游生态输水的水文生态响应研究进展, 以期干旱内陆河流域水资源高效利用和生态保护修复提供科学依据。重点对河岸带地下水动态响应规律、水分运移过程及模拟研究以及河岸带植被用水策略与生态响应等方面的研究进行系统总结, 并从生态输水条件下河岸带地下水动态与植被响应规律、河流与地下水关系演化及河岸带水分储存调蓄机制、输水断流交替条件下河岸林用水策略与耗水量变化以及生态输水方案优化等 4 个方面提出了进一步研究的展望和建议。未来研究亟需从“河流-地下水-植被系统”地下水动力学机制出发, 解析干旱内陆河下游间歇生态输水条件下河流与地下水关系动态演化过程, 识别淡化带影响范围及形成演变规律, 阐明河岸带水分储存与调蓄功能, 揭示河岸带水盐动态平衡机制; 从植被用水策略和景观格局变化入手, 揭示河岸带植被生态响应规律; 通过多源信息精细刻画“河流-地下水-植被系统”结构及其过程, 模拟预测不同生态输水情景下地下水盐运移和生态响应过程, 提出生态效益最大化的生态输水调度方案优化建议。

关键词: 干旱内陆河下游; 间歇性生态输水; 河岸带; 河流与地下水关系; 植被用水策略

中图分类号: P641.2

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2025)02-0031-10

Ecohydrological Response in Riparian Zone Under Intermittent Ecologic Water Conveyance in the Lower Reaches of Arid Inland Rivers in NW China: Progress and Prospect

ZHANG Jun^{1,2}, YU Kun^{1,2}, DONG Jiaqiu^{1,2}, LONG Rui^{1,2}, YIN Lihe^{1,2}

(1. Xi'an Center of China Geological Survey, Xi'an 710119, Shaanxi, China; 2. Key Laboratory for Groundwater and Ecology in Arid and Semi-arid Areas, China Geological Survey, Xi'an 710119, Shaanxi, China)

收稿日期: 2023-10-12; 修回日期: 2023-11-16; 责任编辑: 吕鹏瑞

基金项目: 第三次新疆综合科学考察项目(2022xjkk0300), 国家自然科学基金(42302301), 陕西省重点研发计划(2022SF-327)、
陕西省自然科学基金基础研究计划(2022JQ-238)及中国地质调查局项目(DD20190351、DD20221751)联合资助。

作者简介: 张俊(1982-), 男, 博士, 正高级工程师, 从事旱区生态水文地质调查研究工作。E-mail: zjun@mail.cgs.gov.cn。

Abstract: Intermittent ecological water transport is an important engineering measure to restore the ecosystem in the lower reaches of arid inland rivers. Water desalination zones with dynamic balance of water and salt are developed in riparian zones under alternating water transport and cut-off, which become the basis for maintaining the health and stability of riparian ecosystems. The ecohydrological coupling mechanism behind these zones remains to be clarified. By reviewing the research progress of hydrological and ecological response of ecological water conveyance in the lower reaches of arid inland rivers in northwest China, this paper provides scientific basis for efficient utilization of water resources and ecological protection and restoration of arid inland river basins. The research on dynamic response of groundwater in riparian zone, water transport process and simulation, water use strategy and ecological response of vegetation in riparian zone are summarized. Further research prospects and suggestions were put forward from four aspects: groundwater dynamics and vegetation response law in riparian zone under ecological water conveyance, evolution of the relationship between rivers and groundwater, water storage, regulation and storage mechanism in riparian zone, water use strategy and water consumption changes in riparian forest under alternate water transport and cut off flow conditions, and optimization of ecological water transport schemes. Future research must focus on the "river-groundwater-vegetation system" groundwater dynamics mechanism, analyze the dynamic evolution of the relationship between rivers and groundwater under the intermittent ecological conveyance condition of the lower reaches of arid inland rivers, identify the influence range and formation and evolution law of the desalination zone, and clarify the role of water storage and regulation in the riparian zone. From the perspective of vegetation water strategy and changing ecological landscape patterns to reveal the rule of river bank vegetation ecological response. Multi-source information should be used to describe the structure and process of the "river-groundwater - vegetation system", simulate and predict the groundwater salt migration and ecological response process under different ecological water transport scenarios, and put forward optimization suggestions of ecological water transport scheduling schemes for maximum ecological benefits.

Keywords: lower reaches of arid inland rivers; intermittent ecologic water conveyance; riparian zone; relationship between rivers and groundwater; water use strategy of vegetation

1 研究区概况

西北干旱内陆河流域涉及新疆、青海、甘肃和内蒙古等省区, 约占国土面积 29%, 是中国西部大开发、丝绸之路经济带、区域协调发展等国家重大战略布局的核心区域。然而, 有限的水资源和脆弱的生态环境是该区经济社会可持续发展最重要的瓶颈。内陆河是该区水资源的主要来源, 而下游沿河分布的河岸带是生态系统的重要组成部分(韩路等, 2013)。干旱内陆河下游河岸带生态系统在保障绿洲农牧业生产、抑制沙漠化、保护生物多样性和维护生态平衡等方面的重要作用, 其独特的生态水文过程已成为当今干旱区研究的焦点(陈曦, 2017)。受持续干旱、水库修建和无序取水等自然环境与人类活动影响, 全球超过 30% 的内陆河频繁断流(Datry et al., 2014; Pekel et al., 2016), 由常年性河流转变成间歇性河流(Datry et al., 2014)。

流域上游用水量增加使下游来水量减少, 导致下游河道对地下水补给减少, 地下水位下降, 水质恶化, 引起荒漠河岸植被衰退, 严重威胁下游生态安全(Feng et al., 2005; Ma et al., 2005; Richardson et al., 2007; 党学亚等, 2022)。为了保护和恢复生态环境, 中国西北干旱内陆区塔里木河流域、黑河、石羊河等多个流域自 2000 年以来相继开展了生态输水工程, 并取得了良好的生态效益(邓铭江, 2007; Xu et al., 2007; 张一驰等, 2011; 赵军等, 2018)。然而, 西北地区可供水总量有限, 大部分生态输水工程需要优先满足农业用水, 在非农灌期或农灌间歇期才能向下游输送生态用水(陈亚宁等, 2007; 董志玲等, 2015)。人工输水调控下下游河道间歇性过水已成为干旱内陆区河流水文过程的典型特征。这种间歇式生态输水的生态效益如何? 目前的输水方案(输水量、输水期、输水持续时间和输水方式)是否合理? 能否优化? 或者说, 如何通过生态输水方案优化可持续地修复河岸带生态系统, 已

成为旱区生态水文研究的热点(Zalewski, 2002; Poff et al., 2016; Ling et al., 2020)。塔里木河流域(Xu et al., 2007; 邓铭江, 2007; Ye et al., 2009; Chen et al., 2010; Hao et al., 2014)、黑河流域(He et al., 2006; Guo et al., 2009; 张一驰等, 2011; Wang et al., 2011a, 2011b; 鱼腾飞等, 2012; Zhang et al., 2017; 冯嘉兴等, 2023)和石羊河流域(Chunyu et al., 2019; 王化齐等, 2019; 张光辉等, 2022; 胡顺, 2022)都开展了生态输水对地下水和生态环境影响的大量研究工作(图 1, 表 1)。但目前河岸带地下水的运动规律还不够清楚, 水分动态与植被分布的耦合与适应机理研究较少(李小雁, 2011)。

笔者收集整理了西北干旱内陆河下游生态输水的水文生态响应研究成果, 重点对河岸带地下水动态响应规律、水分运移过程及模拟研究以及河岸带植被

用水策略与生态响应等方面的研究进行系统总结, 并从生态输水条件下河岸带地下水动态与植被响应规律、河流与地下水关系演化及河岸带水分储存调蓄机制、输水断流交替条件下河岸林用水策略与耗水量变化以及生态输水方案优化等 4 个方面提出了进一步研究的展望和建议, 以期为干旱内陆河流域水资源高效利用和生态保护修复提供理论依据和技术支持。

2 河岸带水分运移过程及模拟

2.1 河岸带地下水动态变化规律

河岸带地下水位因生态输水而发生明显波动, 对植物群落组成、根系分布和水分利用策略等产生重要的影响(孙自永等, 2020)。从全球干旱内陆河流域来

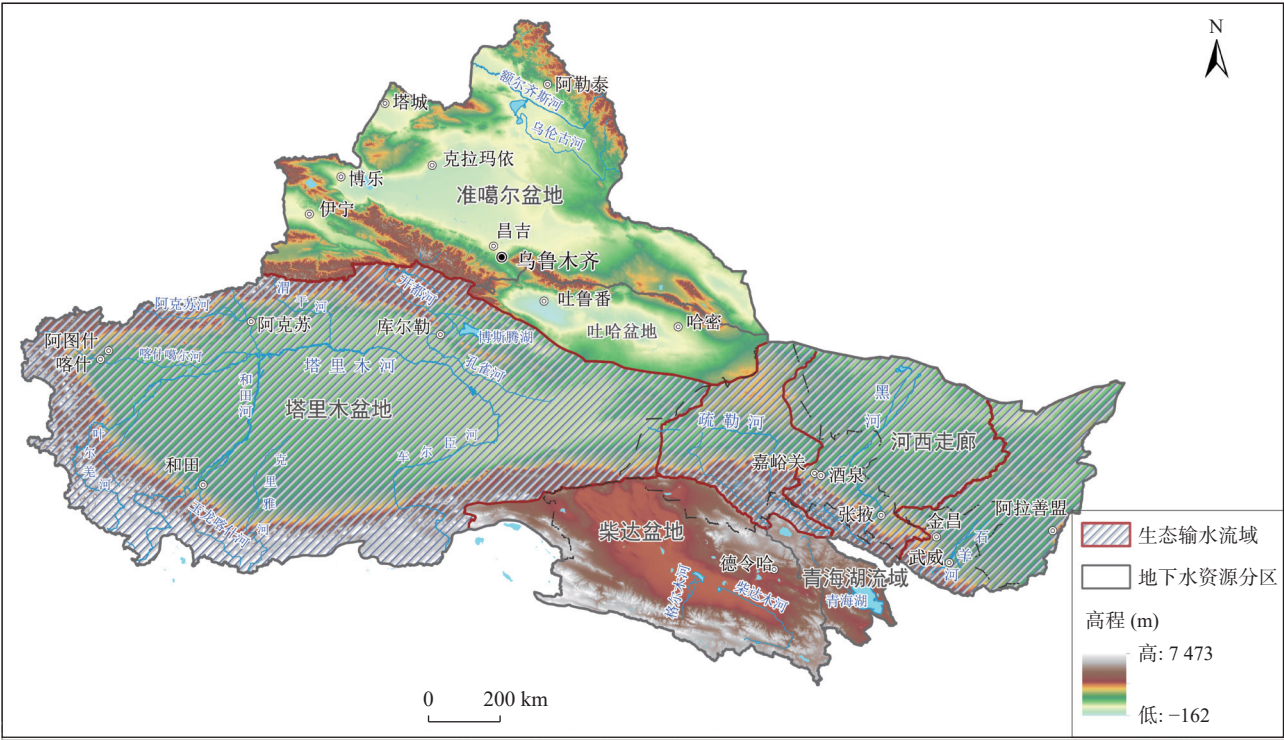


图1 西北内陆河流域及生态输水流域分布图

Fig. 1 Distribution map of inland river basin and ecological water transport basin in Northwest China

表 1 西北干旱区主要生态输水流域基本信息表

Tab. 1 Basic information of the main ecological water transport basins in the arid area of Northwest China

流域名称	实施年份	累计生态输水量(亿 m ³)	年平均生态输水量(亿 m ³ /a)
塔里木河流域	2000年	95.13	3.96
疏勒河流域	2016年	6.24	0.78
黑河流域	2000年	24.72	1.03
石羊河流域	2010年	41.17	2.94

看,中国塔里木河是开展生态输水对地下水影响研究较早、研究成果较多的流域之一。陈亚宁等(2007)在塔里木河下游河道建立了9个地下水监测断面,系统分析地下水对生态输水的响应。不同学者根据这些监测断面相继分析了不同时期和不同时间尺度的地下水位变化规律(湾疆辉等,2008;李丽君等,2018)。

对于单次输水过程,临近河道地下水位波动较大,远离河道波动较小(Hao et al., 2014)。受输水的间歇性影响,地下水为非稳定流,河岸带水位抬升和回落存在明显的时空差异,在空间上表现为纵向(上下游)和横向(距河远近)水位变幅的差异,在时间上表现为远离河道地下水位响应的滞后性,距离河道越远,滞后期越长(刘迁迁,2018)。笔者在塔里木盆地孔雀河的实际监测数据显示,距河岸100 m处地下水位对生态输水的响应滞后时间超过1天。塔里木河300~1050 m范围内的地下水埋深变化响应滞后时间达到94~387天。由于植物生长具有季节性,当年地下水变化在一定程度上影响次年植物生长(胡顺,2022)。

在更大时空尺度上,地下水位变化对生态输水的响应表现出逐步显现的累积效应(Xu, 2007)。研究表明,累计生态输水量和区域平均地下水位抬升呈正相关的累积效应,20 a的生态输水使塔里木河下游地下水平均抬升约3 m。随着输水次数的增加,地下水位响应宽度不断增大(Chen, 2010)。从第1次到第8次生态输水,河岸带地下水响应宽度从570 m增加至3334 m(Ye, 2009),最大响应宽度可超过3 km(杨鹏年,2008)。生态输水对地下水水质也有持续影响。研究发现,间歇性生态输水条件下河岸带两侧发育地下水明显响应的沿河淡化带,塔里木河下游和孔雀河的淡化带最大影响范围分别约为1 km和300 m(Ye, 2009; 马建新, 2017; Liao, 2020; 邓铭江, 2020; 朱成刚, 2021),

塔里木河在500 m范围地下水水质显著淡化(Xu, 2007; Chen, 2010);黑河流域下游额济纳绿洲地下水盐度呈现逐年降低趋势(Wang, 2011a, 2011b),从补给区到排泄区地下水盐度和水化学类型呈明显带状分布(张学静, 2019)。

上述研究表明,地下水响应的滞后性和累积效应,使得河岸带表现出水盐动态平衡特征,形成地下水的跨季节调蓄功能,这是维持河岸带生态系统健康稳定的重要基础。单次输水过程的短期响应(小时或天)和长期累积效应(季节间或年际间)两方面分别有大量的研究,但不同时空尺度的响应特征存在较大差别,二者之间并非简单的线性叠加关系,需要从地下水动力学机制出发揭示河岸带水盐动态平衡过程。河岸带地下水时空响应的差异又导致了植被在时间和空间响应上的明显不同。由此可见,研究河岸带水盐动态平衡过程与调蓄功能是揭示地下水生态功能形成机制的关键。

2.2 河流与地下水关系演化及水分运移过程

间歇性生态输水条件下,河流的渗漏补给在时间(Pool, 2005)和空间(Goodrich et al., 2018)上往往具有高度变异性。同时,收到地下水开采引起的地下水位下降影响,间歇性输水河流与含水层系统之间可经历“饱和连接-过渡脱节-完全脱节”的复杂演化过程(图2)。间歇性河流与含水层系统之间可经历“饱和连接-过渡脱节-完全脱节”的复杂演化过程,两者之间地下水也随之发生由饱和流到部分饱和流、部分非饱和流最后到完全非饱和流的转化(Brunner et al., 2011, 2009),并对河岸带水分运移产生重要影响(马瑞等, 2013; 靳孟贵, 2017)。尤其在地下水埋深较大的地方,河床下方更易产生非饱和带(Beetle-Moorcroft, 2021)。

含水层介质的非均质性对河岸带水分运移过程

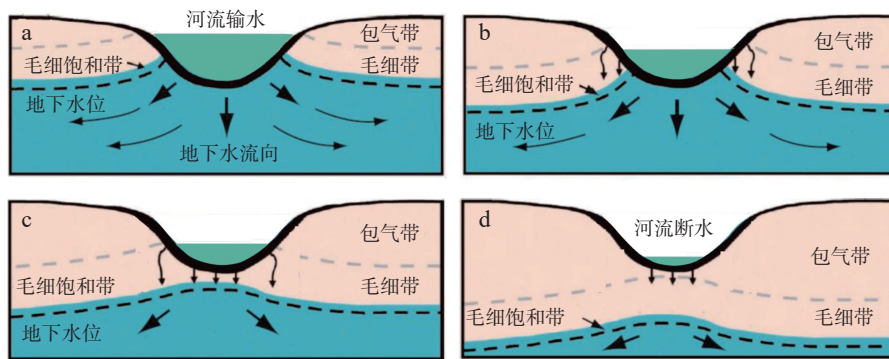


图2 河流与地下水关系演化及水分运移示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the relationship evolution and water transport between rivers and groundwater

具有明显控制作用。内陆河下游冲湖积物的层状沉积特征使得其渗透性在水平方向远大于垂向, 这种情况大大加强了河流与地下水之间的水平入渗。Peter-son 等(1988)、Xie 等(2014)指出各向异性的存在进一步增加了河流与地下水发生脱节的可能性。前人在澳大利亚南部进行河段入渗试验时发现, 河床下方存在包气带, 而含水层中明显的优先流通道使得离岸边 5 m 处的地下水丘与河流仍处于饱和连接状态(靳孟贵, 2017)。Villeneuve 等(2015)在研究澳大利亚中部 Woodforde 河渗漏时, 发现河水入渗后在黏土层上部的砂层内储存, 形成上层滞水, 河水退去后, 上层滞水大部分消耗于蒸腾蒸发而并未有效补给潜水。中国西北石羊河流域青土湖湿地的研究表明, 夏季末和秋季生态输水会将水分储存在地下水和土壤中, 并影响次年植被生长(胡顺, 2022)。

上述研究表明, 内陆河下游砂泥互层的非均质结构, 增强了河岸带包气带水分的跨季节调蓄功能, 这是维持河岸带生态系统健康稳定的另一重要基础。间歇性的输水以及非均质的包气带, 增强了河流与地下水关系动态演化以及水分运移过程的复杂性, 造成河岸带水分调蓄机制的认识尚不清晰。

2.3 生态输水条件下河岸带地下水流模拟

杨鹏年等(2008)采用一维地下水非稳定流模型, 解析模拟了输水条件下河道断面上地下水位变化。刘迁迁等(2018)和古力米热·哈那提等(2020)对非稳定流模型进行了不同程度的改进以提高模拟效果。狄振华等(2010)发展了准二维的土壤水和地下水相互作用的数值模型。目前, 对生态输水过程的响应模拟研究一般采用解析模型, 采用数值模拟的研究也大都将河岸带含水层概化为均质介质, 而内陆河下游河岸带冲湖积相含水层非均质特征明显, 对地下水流有不可忽略的影响。因此, 地下水流模型需要在准确概化含水层非均质特征的基础上构建(张建锋等, 2012), 但目前相关的模拟研究成果较少。另一方面, 大部分模拟研究没有进行长时间的地下水模拟, 难以刻画长时间尺度的累积效应。同时, 干旱区内陆流域河岸带生态系统演化与地下水具有紧密的联系, 实质上是河流、地下水和植被三者交互作用的结果, 地下水位变化与植被蒸腾耗水存在不可忽略的互馈作用。间歇输水引起的地下水位变化, 可影响植被蒸腾耗水产生明显变化。反过来, 强烈的植被蒸腾作为地下水的重要排泄项, 对河岸带地下水位和水量有明显影响。

充分考虑二者的互馈作用, 才能深入理解河岸带水循环过程与生态响应耦合机制, 才能为定量研究生态输水与地下水位关系提供更加可靠的科学依据。

3 河岸带植被用水策略与生态响应

植被用水策略对蒸腾耗水量有重要影响。地下水位下降, 植被出现水分胁迫, 蒸腾量将大幅衰减, 特别是在埋深较小地区, 水位从 1 m 下降到 2 m, 蒸腾量将衰减 40% 以上(Ma et al., 2013), 而蒸腾耗水量的大幅变化反过来又会对地下水位变化产生重要影响。因此, 探讨河岸带植被用水策略, 是揭示地下水位变化与植被蒸腾耗水互馈作用, 深入理解河岸带水循环以及植被生态响应的关键。

干旱区河岸带植被用水策略研究多以胡杨和柽柳等河岸林为典型研究对象。河岸带胡杨主要有土壤水、河水和地下水 3 种可利用水源(Dawson et al., 1996; Niels et al., 2008)。塔里木河靠近岸的胡杨偏好利用水分条件充足的浅层土壤水, 而远离河岸的胡杨主要利用深层土壤水和地下水(Chen, 2016; 陈亚鹏等, 2021)。河流径流条件对河岸林用水影响明显, 如澳大利亚东南部墨累河岸边的赤桉, 主要利用土壤水和地下水, 但当季节性河流有水时, 开始利用河水(Thorburn et al., 1994)。地下水埋深的变化会导致胡杨水分来源和用水方式发生明显变化, 以最大程度减少水分胁迫, 如美国西南部河岸湿地的柽柳在地下水位下降后, 其主要水源由地下水向土壤水转变(Nippert et al., 2010)。不同林龄胡杨因根系深度和分布的差异, 其用水策略也不同, 成年胡杨主要利用地下水和深层土壤水, 而幼苗由于类型和立地水土环境的不同, 水分来源也不同(陈亚鹏, 2021)。在塔里木河下游, 成熟胡杨主要利用 220 cm 以下深层土壤水和地下水, 胡杨幼苗主要利用 80 cm 以下土壤水和地下水(张江, 2018)。不同类型的幼苗具有不同的水分来源, 实生苗主要利用浅层土壤水, 而根蘖苗则主要利用深层土壤水和地下水(王玉阳等, 2017; Zhu et al., 2018)。另外, 内陆河下游地下水埋深一般较浅, 而地下水盐分含量远高于地表水, 不能满足胡杨幼苗的萌发生长, 河道断流时更易出现盐分胁迫而非水分胁迫。因此, 在河流下游地区盐分胁迫成为胡杨林更新复壮的主要制约因素(陈永金等, 2005; 管文轲等, 2018)。滨海盐碱地植物水分吸收受土壤含盐量的影响明显, 土壤

含盐量越高,其水分贡献率越低,植物用水倾向于选择盐分胁迫小的土层(Chen et al., 2019)。以上研究表明,河岸带植被用水策略通常随河水径流条件、地下水位、土壤水盐条件以及生长周期的改变而作出调整。

间歇输水条件下河岸带复杂的水盐条件变化,会强化植被用水策略与生态响应的不确定性。输水期河岸带地下水位抬升而盐分降低,沿河淡化带范围扩大,为植被提供水盐条件适中的适宜生境,此时地下水埋深小于植被适生水位,植被主要利用地下水或河水;断流期地下水位下降而盐分升高,当水位下降超过根系吸水最大深度,植被主要利用包气带内储存的土壤水或上层滞水,并开始出现水分胁迫,同时盐分升高可能出现水分和盐分胁迫的协同作用,对植被生存产生不利影响。因此,揭示生态输水条件下的河岸带用水策略,关键是要识别输水与断流交替条件下河岸带植被用水方式转变的主控因素及关键水文阈值,目前该方面的研究较为薄弱。

4 展望

4.1 未来研究方向

近年来,西北干旱内陆区间歇性生态输水的修复效果受到广泛关注,尤其是近5年来北方多地生态输水工程加快实施,使得相关研究成为热点。输水与断流交替下河岸带一定范围发育水盐动态平衡的淡化带,成为维系河岸带生态系统健康稳定的基础,但其背后的生态水文耦合机制尚未认清。综合国内外研究进展,未来亟需从地下水动力学机制出发,解析干旱内陆河下游间歇生态输水条件下河流与地下水关系动态演化过程,识别生态输水对河岸带地下水动态和植被生态的有效影响范围,阐明输水与断流交替条件下河岸带水盐动态平衡机制与调蓄功能,揭示河岸带植被生态响应规律,模拟预测不同生态输水情景下地下水盐运移和生态响应过程,提出生态效益最大化的生态输水调度方案的优化建议,为干旱内陆河流域水资源高效利用和生态保护修复提供理论依据和技术支持。

(1)生态输水条件下河岸带地下水动态与植被响应规律。分析河道输水和断流条件下河岸带地下水位和水质的时空变化规律,揭示河岸带地下水位和水质对生态输水的时空响应,圈定沿河淡化带空间范围,识别生态输水对河岸带地下水动态的有效影响范围;

分析生态输水前后河岸带植被景观格局及其年际动态变化规律,揭示植被景观格局变化对生态输水的响应规律,识别生态输水对河岸带植被的有效影响范围。

(2)河流与地下水关系演化及河岸带水分储存调蓄机制。解析输水与断流交替条件下河流-地下水关系动态演化过程,识别输水(断流)条件下河岸带地下水补给(消耗)过程,探讨间歇输水和含水层非均质对河岸带水分运移转化的影响,揭示河岸带水分储存和调蓄机制;分析河岸带盐分的空间分布和动态变化特征,阐明水分运移转化过程对盐分运移的驱动作用,揭示沿河淡化带形成演变机制。

(3)输水断流交替条件下河岸林用水策略与耗水量变化。对比河岸林在河道输水和断流条件下用水量来源和层位的差异,分析由输水转为断流时河岸林发生干旱胁迫,以及由断流转为输水时解除干旱胁迫的用水方式转变规律,识别用水方式转变的主控因素及关键水文阈值;分析河岸林用水策略沿河岸带水盐梯度的变化,识别水分与盐分胁迫的协同作用,揭示水盐条件变化对河岸林水分利用策略的影响,评价不同用水策略下植被蒸腾耗水量变化。

(4)基于河岸带水盐运移过程模拟的生态输水方案优化。建立河水位、地下水位、水质、土壤水盐和植被蒸腾耗水量等各参数变量动态变化的耦合关系,构建河岸带“河流-地下水-植被系统”水盐运移与植被蒸腾耦合模型,模拟单次输水过程和长期输水条件下不同时空尺度的地下水盐运移过程,定量揭示水盐动态平衡机制;模拟预测不同生态输水情景下沿河淡化带影响范围和变化趋势,提出生态效益最大化的生态输水方案优化与区划建议。

4.2 关键科学问题

(1)地层非均质对间歇性河流河岸带水分运移转化的影响。目前间歇性河流与地下水关系研究多以干旱内陆河上游的季节性河流为主。这些河流仅在雨季形成径流,并通过相对均质的砂质或砾石质河床快速渗漏补给地下水。然而,内陆河下游地层以冲湖积相为主,非均质性强,大大加强了河流与地下水之间的水平入渗。同时,生态输水时水分会储存在包气带粘土层之间的砂层中,在非输水期水分一部分消耗于当年蒸腾蒸发,一部分跨季节储存至次年供植被利用。阐明非均质对间歇性河流水分运移转化的影响,是揭示河岸带水分储存和调蓄机制,深入理解河岸带水文过程与植被响应之间的关键。

(2)河岸带植被用水方式转变的主控因素及关键水文阈值。间歇输水引起的地下水变化如何驱动河岸带胡杨用水方式进行自我调节,以减少水分和盐分胁迫的影响,从而适应间歇性断流及地下水环境的不断变化?这一问题揭示河岸带植被对间歇输水生态响应的关键。同时,植被用水方式转变对蒸腾耗水量变化有重要影响,确定胡杨用水方式转变的主控因素及关键水文阈值,才能建立胡杨蒸腾耗水与地下水位水质等参数动态变化的耦合关系,这是构建河岸带水文过程与植被蒸腾耦合模型的关键。

4.3 相关研究建议

未来的研究应以“河流-地下水-植被系统”水动力过程为核心,从短期响应和长期效应多尺度出发,探讨河岸带水盐动态平衡与生态响应机制。在此基础上,基于“河流-地下水-植被系统”水盐运移过程的精细刻画和耦合模拟,以充分发挥河岸带水分储存和调蓄功能为目标,提出生态效益最大化的输水方案优化与区划的实用建议。

(1)基于短期响应和长期效应的多尺度水动力过程定量揭示河岸带水盐动态平衡与生态响应。充分考虑地下水和生态不同时空尺度响应的差异性,针对内陆河下游典型的地下水非稳定流和地层非均质特征,从饱和带地下水短期滞后响应和长期累积效应,以及包气带土壤水跨季节储存调蓄功能出发,基于水动力过程定量研究河岸带水盐动态平衡机制,阐明水分储存和调蓄功能;从输水和断流交替下植被用水方式转变的短期响应,以及植被景观格局年际动态变化的长期响应两方面出发,探讨河岸带植被生态响应机制。在此基础上,探求河岸带水文过程与植被响应的耦合作用,深化地下水生态功能认识。

(2)以多源信息约束下的“河流-地下水-植被系统”耦合模拟精细刻画水盐运移过程。针对间歇输水条件下“河流-地下水-植被系统”结构与过程的高度时空异质性,开展典型断面综合观测和模拟。针对河岸带含水层和包气带非均质结构的随机性特征,基于钻孔和地质雷达探测数据融合的随机模拟方法,识别与刻画非均质对水分运移转化的影响;针对耦合模型参数众多且不确定性强的问题,采用水位、水质、温度、包气带含水率和土水势、同位素和水化学以及电阻率剖面等多源信息约束,通过水动力学模拟、同位素水化学示踪和地球物理探测结果的相互校正,提高河岸带地下水运移过程模拟的仿真和预测性能。通过建立

植被蒸腾量与地下水和土壤含水率动态变化的耦合关系,构建饱和-非饱和流与植被蒸腾耦合模型,实现河流-地下水-植被之间水盐运移过程的精细刻画。

5 结论

(1)人工输水调控下下游河道间歇性过水已成为干旱内陆区河流水文过程的典型特征。地下水响应的滞后性和累积效应,使得河岸带表现出水盐动态平衡特征,成为维系河岸带生态系统健康稳定的基础。基于短期响应和长期效应的多尺度水动力学过程定量研究,是揭示河岸带生态水文响应的关键。

(2)内陆河下游砂泥互层的非均质结构,在增强河岸带水分运移过程复杂性的同时,强化了包气带水分的跨季节调蓄功能,这是维持河岸带生态系统健康稳定的重要基础。阐明非均质对间歇性河流水分运移转化的影响,是揭示河岸带水分储存和调蓄机制,深入理解河岸带水文过程与植被响应之间的关键。

(3)河岸带生态系统演化与地下水具有紧密的联系,地下水变化与植被蒸腾耗水存在不可忽略的互馈作用。充分考虑二者的互馈作用,确定胡杨用水方式转变的主控因素及关键水文阈值,建立胡杨蒸腾耗水与地下水位水质等参数动态变化的耦合关系,是构建河岸带水文过程与植被蒸腾耦合模型,阐明河岸带水循环过程与生态响应机制的关键。

(4)未来的研究应以“河流-地下水-植被系统”水动力过程为核心,从短期响应和长期效应多尺度出发,探讨河岸带水盐动态平衡与生态响应机制。在此基础上,基于“河流-地下水-植被系统”水盐运移过程的精细刻画和耦合模拟,以充分发挥河岸带水分储存和调蓄功能为目标,提出生态效益最大化的输水方案优化与区划的实用建议。

参考文献(References):

- 陈亚鹏,周洪华,朱成刚.塔里木河下游胡杨水分传输过程研究综述[J].干旱区地理,2021,44(3):612-619.
- CHEN Yapeng, ZHOU Honghua, ZHU Chenggang. A review of water transport processes of *Populus euphratica* in the lower reaches of Tarim River[J]. Arid Land Geography, 2021, 44(3): 612-619.
- 陈曦,包安明,王新平,等.塔里木河近期综合治理工程生态成效评估[J].中国科学院院刊,2017,32(1):20-28.
- CHEN Xi, BAO Anming, WANG Xinping, et al. Ecological Effect

- Evaluation of Comprehensive Control Project in Tarim River Basin[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2017, 32(1): 20–28.
- 陈亚宁, 李卫红, 陈亚鹏, 等. 新疆塔里木河下游断流河道输水与生态恢复[J]. 生态学报, 2007, 27(2): 538–545.
- CHEN Yaning, LI Weihong, CHEN Yapeng, et al. Water conveyance in dried-up riverway and ecological restoration in the lower reaches of Tarim River, China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2007, 27(2): 538–545.
- 陈永金, 陈亚宁, 李卫红. 输水作用下的地下水水质变化与胡杨林更新——以塔里木河下游英苏断面为例[J]. 干旱区研究, 2005, 22(1): 101–105.
- CHEN Yongjin, CHEN Yaning, LI Weihong. Change of Groundwater Quality and Restoration of the Forests of *Populus euphratica* under Transfusing Stream Water to the Lower Reaches of the Tarim River: A Case Study along Yengisu Section[J]. Arid Zone Research, 2005, 22(1): 101–105.
- 党学亚, 张俊, 常亮, 等. 西北地区水文地质调查与水资源安全[J]. 西北地质, 2022, 55(3): 81–95.
- DANG Xueya, ZHANG Jun, CHANG Liang, et al. Hydrogeological Survey and Water Resources Security in Northwest China[J]. Northwestern Geology, 2022, 55(3): 81–95.
- 邓铭江, 黄强, 畅建霞, 等. 大尺度生态调度研究与实践[J]. 水利学报, 2020, 51(7): 757–773.
- DENG Mingjiang, HUANG Qiang, CHANG Jianxia, et al. Large-scale ecological operation research and practice[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2020, 51(7): 757–773.
- 董志玲, 徐先英, 金红喜, 等. 生态输水对石羊河尾间湖区植被的影响[J]. 干旱区资源与环境, 2015, 29(7): 101–106.
- DONG Zhiling, XU Xianying, JIN Hongxi, et al. The impact of eco-water transportation to the vegetation in tail lake of Shiyang River[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2015, 29(7): 101–106.
- 狄振华, 谢正辉, 袁星, 等. 输水条件下考虑土壤水和地下水相互作用的河流剖面地下水埋深估计方法[J]. 中国科学: 地球科学, 2010, 40(10): 1420–1430.
- DI Zhenhua, XIE Zhenghui, YUAN Xing, et al. Estimation method of Groundwater depth for river profile considering the interaction of soil water and groundwater under water transport condition[J]. Science China Earth Sciences, 2010, 40(10): 1420–1430.
- 邓铭江. 塔里木河下游生态输水及植被恢复遥感监测评价[J]. 冰川冻土, 2007, 29(3): 380–386.
- DENG Mingjiang. An Appraisal of Remote-Sensing Monitoring on Vegetation Restoration and Ecological Water-Conveying in the Lower Reaches of Tarim River[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2007, 29(3): 380–386.
- 冯嘉兴, 蒙琪, 王茜. 黑河干流中游地区近 40 年来地下水环境变化特征及其成因[J]. 西北地质, 2023, 56(4): 243–253.
- FENG Jiaxing, MENG Qi, WANG Xi. Characteristics and Causes of Groundwater Environment Changes in the Middle Reaches of the Mainstream of the Heihe River in Recent 40 Years[J]. Northwestern Geology, 2023, 56(4): 243–253.
- 古力米热·哈那提, 张音, 关东海, 等. 生态输水条件下塔里木河下游断面尺度地下水流数值模拟[J]. 水科学进展, 2020, 31(1): 61–70.
- GULIMIRE Hanati, ZHANG Yin, GUAN Donghai, et al. Numerical simulation of groundwater flow at cross-section scale in the lower reaches of Tarim River under the condition of ecological water conveyance[J]. Advances in Water Science, 2020, 31(1): 61–70.
- 管文轲, 钟家骅, 霍艾迪, 等. 荒漠化地区水化学特性及其对胡杨林生长的影响[J]. 水土保持通报, 2018, 38(1): 36–40.
- GUAN Wenke, ZHONG Jiahua, HUO Aidi, et al. Hydrochemical Characteristics and Their Effects on Growth of *Populus Euphratica* in Desertification Areas[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2018, 38(1): 36–40.
- 胡顺, 凌抗, 王俊友, 等. 西北典型内陆流域地下水与湿地生态系统协同演化机制[J]. 水文地质工程地质, 2022, 49(5): 22–31.
- HU Shun, LING Kang, WANG Junyou, et al. Co-evolution mechanism of groundwater and wetland ecosystem in a typical inland watershed in northwest China[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2022, 49(5): 22–31.
- 韩路, 王海珍, 于军. 河岸带生态学研究进展与展望[J]. 生态环境学报, 2013, 22(5): 879–886.
- HAN Lu, WANG Haizhen, YU Jun. Research progress and prospects on riparian zone ecology[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2013, 22(5): 879–886.
- 李丽君, 张小清, 陈长清, 等. 近 20a 塔里木河下游输水对生态环境的影响[J]. 干旱区地理, 2018, 41(2): 238–247.
- LI Lijun, ZHANG Xiaoqing, CHEN Changqing, et al. Ecological effects of water conveyance on the lower reaches of Tarim River in recent twenty years[J]. Arid Land Geography, 2018, 41(2): 238–247.
- 刘迁迁, 古力米热·哈那提, 王光焰, 等. 间歇性生态输水塔里木河下游断面地下水位变化模拟[J]. 生态学报, 2018, 38(15): 5519–5528.
- LIU Qianqian, GULIMIRE Hanati, WANG Guangyan, et al. Simulation of sectional groundwater level variation in the lower reaches of Tarim River under intermittent ecological water conveyance[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(15): 5519–5528.
- 靳孟贵, 鲜阳, 刘延锋. 脱节型河流与地下水相互作用研究进展[J]. 水科学进展, 2017, 28(1): 149–160.
- JIN Menggui, XIAN Yang, LIU Yanfeng. Research progress on Disconnected stream and groundwater interaction[J]. Advances in Water Science, 2017, 28(1): 149–160.
- 李小雁. 干旱地区土壤-植被-水文耦合、响应与适应机制[J]. 中国科学: 地球科学, 2011, 41(12): 1721–1730.
- LI Xiaoyan. Mechanism of coupling, response and adaptation between soil, vegetation and hydrology in arid and semiarid regions[J]. Scientia Sinica (Terrae), 2011, 41(12): 1721–1730.
- 马建新, 吾买尔江·吾布力, 黄湘, 等. 孔雀河应急输水后的地下水响应研究[J]. 新疆环境保护, 2017, 39(1): 13–17.
- MA Jianxin, WUMAIERJIANG Wubuli, HUANG Xiang, et al. Research on Groundwater Responses after Emergency Water Conveyance of Peacock River[J]. Environmental Protection of Xinjiang, 2017, 39(1): 13–17.
- 马瑞, 启明, 孙自永, 等. 地表水与地下水相互作用的温度示踪

- 与模拟研究进展[J]. 地质科技情报, 2013, 32(2): 131–137.
- MA Rui, QI Ming, SUN Ziyong, et al. Using Heat to Trace and Model the Surface Water-Groundwater Interactions: A Review[J]. Geological Science and Technology Information, 2013, 32(2): 131–137.
- 孙自永, 王俊友, 葛孟琰, 等. 基于水稳定同位素的地下水型陆地植被识别: 研究进展、面临挑战及未来研究展望[J]. 地质科技通报, 2020, 39(1): 11–20.
- SUN Ziyong, WANG Junyou, GE Mengyan, et al. Isotopic approaches to identify groundwater dependent terrestrial vegetation: Progress, challenges, and prospects for future research[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2020, 39(1): 11–20.
- 王化齐, 黎志恒, 张茂省, 等. 石羊河流域水资源开发的生态环境效应与国土空间优化[J]. 西北地质, 2019, 52(2): 207–217.
- WANG Huaqi, LI Zhiheng, ZHANG Maosheng, et al. Eco-environmental Impact Caused by Water Resources Exploration and Land Space Optimization in Shiyang River Basin[J]. North-western Geology, 2019, 52(2): 207–217.
- 王玉阳, 陈亚鹏, 李卫红, 等. 塔里木河下游典型荒漠河岸植物水分来源[J]. 中国沙漠, 2017, 37(6): 1150–1157.
- WANG Yuyang, CHEN Yapeng, LI Weihong, et al. Water Sources of Typical Desert Riparian Plants in the Lower Reaches of Tarim River[J]. Journal of Desert Research, 2017, 37(6): 1150–1157.
- 湾疆辉, 陈亚宁, 李卫红, 等. 塔里木河下游断流河道输水后潜水埋深变化规律研究[J]. 干旱区地理, 2008, 31(3): 428–435.
- WAN Jianghui, CHEN Yaning, LI Weihong, et al. Variation of groundwater level after ecological water transport in the lower reaches of the Tarim River in recent six years[J]. Arid Land Geography, 2008, 31(3): 428–435.
- 鱼腾飞, 冯起, 刘蔚, 等. 黑河下游土壤水盐对生态输水的响应及其与植被生长的关系[J]. 生态学报, 2012, 33(22): 7009–7017.
- YU Tengfei, FENG Qi, LIU Wei, et al. Soil water and salinity in response to water deliveries and the relationship with plant growth at the lower reaches of Heihe River, Northwestern China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 33(22): 7009–7017.
- 杨鹏年, 邓铭江, 李霞, 等. 塔里木河下游间歇输水地下水响应宽度—以塔里木河下游英苏断面为例[J]. 干旱区研究, 2008, 25(3): 331–335.
- YANG Pengnian, DENG Mingjiang, LI Xia, et al. Respond Width of Groundwater Level after Conveying Stream Water to the Lower Reaches of the Tarim River, Xinjiang: A case Study along the Yengisu Section in the Lower Reaches of Tarim River[J]. Arid Zone Research, 2008, 25(3): 331–335.
- 张光辉, 聂振龙, 崔浩浩, 等. 西北内陆流域下游区天然绿洲退变主因与机制[J]. 水文地质工程地质, 2022, 49(5): 1–11.
- ZHANG Guanghui, NIE Zhenlong, CUI Haohao, et al. Main causes and mechanism for the natural oasis degeneration in the lower reaches of northwest inland basins[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2022, 49(5): 1–11.
- 朱成刚, 艾克热木·阿布拉, 李卫红, 等. 塔里木河下游生态输水条件下胡杨林生态系统恢复研究[J]. 干旱区地理, 2021, 44(3): 629–636.
- ZHU Chenggang, AIKEREMU Abula, LI Weihong, et al. Ecosystem restoration of Populus euphratica forest under the ecological water conveyance in the lower reaches of Tarim River[J]. Arid Land Geography, 2021, 44(3): 629–636.
- 张学静, 王平, 王田野, 等. 输水条件下额济纳绿洲浅层地下水水化学特征与水位埋深关系[J]. 南水北调与水利科技, 2019, 17(6): 86–94.
- ZHANG Xuejing, WANG Ping, WANG Tianye, et al. Relationship between chemical characteristics of shallow groundwater and water level depth in Ejina Oasis under water conveyance conditions[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2019, 17(6): 86–94.
- 张江, 李桂芳, 贺亚玲, 等. 基于稳定同位素技术的塔里木河下游不同林龄胡杨的水分利用来源[J]. 生物多样性, 2018, 26(6): 564–571.
- ZHANG Jiang, LI Guifang, HE Yaling, et al. Water utilization sources of Populus euphratica trees of different ages in the lower reaches of Tarim River[J]. Biodiversity Science, 2018, 26(6): 564–571.
- 赵军, 杨建霞, 朱国锋. 生态输水对青土湖周边区域植被覆盖度的影响[J]. 干旱区研究, 2018, 35(6): 1251–1261.
- ZHAO Jun, YANG Jianxia, ZHU Guofeng. Effect of Ecological Water Conveyance on Vegetation Coverage in Surrounding Area of the Qingtu Lake[J]. Arid Zone Research, 2018, 35(6): 1251–1261.
- 张建锋, 李国敏, 张元, 等. 塔河下游间歇性输水河道附近地下水水位动态响应[J]. 地球物理学报, 2012, 55(2): 622–630.
- ZHANG Jianfeng, LI Guomin, ZHANG Yuan, et al. Responses of groundwater levels to intermittent water transfer in the lower Tarim River[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2012, 55(2): 622–630.
- 张一驰, 于静洁, 乔茂云, 等. 黑河流域生态输水对下游植被变化影响研究[J]. 水利学报, 2011, 42(7): 757–765.
- ZHANG Yichi, YU Jingjie, QIAO Maoyun, et al. Effects of eco-water transfer on changes of vegetation in the lower Heihe River basin[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2011, 42(7): 757–765.
- Beetle-Moorcroft F, Shanfield M, Singha K. Exploring conceptual models of infiltration and groundwater recharge on an intermittent river: The role of geologic controls[J]. Journal of Hydrology: Regional Studies, 2021, 35: 100814.
- Brunner P, Cook P G, Simmons C T. Disconnected surface water and groundwater: From theory to practice[J]. Ground Water, 2011, 49(4): 460–467.
- Brunner P, Cook P G, Simmons C T. Hydrogeologic controls on disconnection between surface water and groundwater[J]. Water Resources Research, 2009, 45(1): W01422.
- Chen H, Yang C, Ren A, et al. The Evapotranspiration of Tamarix and Its Response to Environmental Factors in Coastal Saline Land of China[J]. Water, 2019, 11(11): 2273.
- Chunyu X Z, Huang F, Xia Z Q, et al. Assessing the Ecological Effects of Water Transport to a Lake in Arid Regions: A Case Study of Qingtu Lake in Shiyang River Basin, Northwest China[J]. International Journal of Environmental Research and

- Public Health, 2019, 16: 145.
- Chen Y P, Chen Y N, Xu C C, et al. The effects of groundwater depth on water uptake of *Populus euphratica* and *Tamarix ramosissima* in the hyperarid region of northwestern China[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2016, 23(17): 1740417412.
- Chen Y, Chen Y, Xu C, et al. Effects of ecological water conveyance on groundwater dynamics and riparian vegetation in the lower reaches of Tarim River, China[J]. Hydrological Processes, 2010, 24: 170–177.
- Datry T, Larned S T, Tockner K. Intermittent Rivers: A Challenge for Freshwater Ecology[J]. BioScience, 2014, 64(3): 229–235.
- Dawson T E. Determining water use by trees and forests from isotopic, energy balance and transpiration analyses: the roles of tree size and hydraulic lift[J]. Tree Physiology, 1996, 16(1–2): 263–272.
- Feng Q, Liu W, Si J, et al. Environmental effects of water resources development and use in the Tarim River basin of northwestern China[J]. Environmental Geology, 2005, 48: 202–210.
- Goodrich D C, Kepner W G, Levick L R, et al. Southwestern Intermittent and Ephemeral Stream Connectivity[J]. Journal of the American Water Resources Association, 2018, 54(2): 400–422.
- Guo Q L, Feng Q, Li J L. Environmental changes after ecological water conveyance in the lower reaches of Heihe River, northwest China[J]. Environmental Geology, 2009, 58(7): 1387–1396.
- Hao X M, Li W H. Impacts of ecological water conveyance on groundwater dynamics and vegetation recovery in the lower reaches of the Tarim River in northwest China[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2014, 186: 7605–7616.
- He Z B, Zhao W Z. Characterizing the Spatial Structures of Riparian Plant Communities in the Lower Reaches of the Heihe River in China Using Geostatistical Techniques[J]. Ecological Research, 2006, 21(4): 551–559.
- Liao S, Xue L, Dong Z, et al. Cumulative ecohydrological response to hydrological processes in arid basins[J]. Ecological Indicators, 2020, 111: 106005.
- Ling H, Guo B, Yan J, et al. Enhancing the positive effects of ecological water conservancy engineering on desert riparian forest growth in an arid basin[J]. Ecological Indicators, 2020, 118: 106797.
- Ma J X, Huang X, Li W H, et al. Sap flow and trunk maximum daily shrinkage (MDS) measurements for diagnosing water status of *Populus euphratica* in an inland river basin of Northwest China[J]. Ecohydrology, 2013, 6(6): 994–1000.
- Ma J, Wang X, Edmunds W M. The characteristics of groundwater resources and their changes under the impacts of human activity in the arid North-West China: a case study of the Shiyang River Basin[J]. Journal of Arid Environments, 2005, 61: 277–295.
- Nippert J B, Butler Jr J J, Kluitenberg G J, et al. Patterns of *Tamarix* water use during a record drought[J]. Oecologia, 2010, 162(2): 283–292.
- Niels T, Stefan Z, Martin S, et al. Structure, reproduction and flood-induced dynamics of riparian Tugai forests at the Tarim River In Xinjiang, NW China[J]. Forestry, 2008, 81(1): 45–57.
- Pekel J F, Cottam A, Gorelick N, et al. High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes[J]. Nature, 2016, 540(7633): 418–422.
- Poff N L, Brown C M, Grantham T E, et al. Sustainable water management under future uncertainty with eco-engineering decision scaling[J]. Nature Climate Change, 2016, 6(1): 25–34.
- Pool D R. Variations in climate and ephemeral channel recharge in southeastern Arizona, United States[J]. Water Resources Research, 2005, 41: 1–24.
- Peterson D M, Wilson J L. Variably saturated flow between streams and aquifers[R]. New Mexico: New Mexico Water Resources Research Institute, 1988: 10–37.
- Richardson D M, Holmes P M, Esler K J, et al. Riparian vegetation: degradation, alien plant invasions, and restoration prospects[J]. Diversity and Distributions, 2007, 13: 126–139.
- Thorburn P J, Walker G R. Variations in stream water uptake by *Eucalyptus camaldulensis* with differing access to stream water[J]. Oecologia, 1994, 100(3): 293–301.
- Villeneuve S, Cook P G, Shanafield M, et al. Groundwater recharge via infiltration through an ephemeral riverbed, central Australia[J]. Journal of Arid Environments, 2015, 117: 47–58.
- Wang P, Yu J J, Zhang Y C, et al. Impacts of environmental flow controls on the water table and groundwater chemistry in the Ejina Delta, northwestern China[J]. Environmental Earth Sciences, 2011a, 64(1): 15–24.
- Wang P, Zhang Y C, Yu J J, et al. Vegetation Dynamics Induced by Groundwater Fluctuations in the Lower Heihe River Basin, Northwestern China[J]. Journal of Plant Ecology, 2011b, 4(1–2): 77–90.
- Xie Y, Cook P G, Brunner P, et al. When can inverted water tables occur beneath streams?[J]. Groundwater, 2014, 52(5): 769–774.
- Xu H L, Ye M, Song Y D, et al. The Natural Vegetation Responses to the Groundwater Change Resulting from Ecological Water Conveyances to the Lower Tarim River[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2007, 131: 37–48.
- Ye Z X, Chen Y N, Li W H, et al. Effect of the ecological water conveyance project on environment in the Lower Tarim River, Xinjiang, China[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2009, 149: 9–17.
- Zhu C G, Li W H, Chen Y N, et al. Characteristics of water physiological integration and its ecological significance for *Populus euphratica* young ramets in an extremely drought environment[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2018, 123: 56575666.
- Zhang S H, Ye Z X, Chen Y N, et al. Vegetation responses to an ecological water conveyance project in the lower reaches of the Heihe River Basin[J]. Ecohydrology, 2017, 10: e1866.
- Zalewski, M. Ecohydrology-the use of ecological and hydrological processes for sustainable management of water resources[J]. Hydrological Sciences Journal, 2002, 47(5): 23–832.