



秃尾河流域河流-地下水转化与生态效应

王锦璇, 王一, 高繁, 张轩铭, 马稚桐, 杨帆

River-groundwater transformation and ecological effects in the Tuwei River watershed

WANG Jinxuan, WANG Yi, GAO Fan, ZHANG Xuanming, MA Zhitong, and YANG Fan

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202406049>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

西藏波密冰川覆盖区大型河流与断裂带地下水转化关系

Transformation characteristics of the large-flow river and groundwater in the fault zone in the glacier-covered area of Bomi in Tibet

马剑飞, 李向全, 张春潮, 付昌昌, 白占学, 王振兴 水文地质工程地质. 2021, 48(5): 23–33

黑河流域中游盆地地表水与地下水转化机制研究

Study on the conversion mechanism of surface water and groundwater in the middle reaches of the Heihe River Basin

祁晓凡, 李文鹏, 崔虎群, 康卫东, 刘振英, 邵新民 水文地质工程地质. 2022, 49(3): 29–43

永定河生态补水的地下水位动态响应

Response of groundwater regime to ecological water replenishment of the Yongding River

胡立堂, 郭建丽, 张寿全, 孙康宁, 杨郑秋 水文地质工程地质. 2020, 47(5): 5–11

伊犁河支流大西沟河水与地下水转化关系研究

A study of the conversion between the Daxigou river and groundwater

张琛, 段磊, 刘明明, 李瑛, 宋浩 水文地质工程地质. 2019, 46(3): 18–18

包气带岩性结构对地下水生态功能影响特征

Influences of lithology and structure of the vadose zone on groundwater ecological function

崔浩浩, 张光辉, 刘鹏飞, 王金哲, 田言亮, 王茜 水文地质工程地质. 2022, 49(5): 52–62

西北内陆河流域水循环和生态演变与功能保障机制研究

A comprehensive study of the maintaining mechanisms for hydrological cycle and ecological evolution and function in the northwest inland river basins of China

陈喜, 黄日超, 黄峰, 刘秀强, 张阳阳, 张润润 水文地质工程地质. 2022, 49(5): 12–21



关注微信公众号，获得更多资讯信息

DOI: [10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202406049](https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202406049)

王锦璇, 王一, 高繁, 等. 秃尾河流域河流-地下水转化与生态效应 [J]. 水文地质工程地质, 2024, 51(6): 36-46.
WANG Jinxuan, WANG Yi, GAO Fan, et al. River-groundwater transformation and ecological effects in the Tuwei River watershed[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2024, 51(6): 36-46.

秃尾河流域河流-地下水转化与生态效应

王锦璇¹, 王一², 高繁^{3,4}, 张轩铭², 马稚桐², 杨帆^{3,4}

(1. 长安大学建筑学院, 陕西 西安 710061; 2. 长安大学水利与环境学院, 陕西 西安 710054;
3. 陕西省河湖生态保护与修复“四主体一联合”工程技术研究中心, 陕西 西安 710065;
4. 中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司, 陕西 西安 710065)

摘要: 秃尾河是黄河“几”字弯东翼一个重要的支流, 流域大气降水、地下水和河湖水水力联系密切, 控制着流域生态格局的演化、稳定和安全。基于秃尾河流域地质地貌、水文地质条件和降水、地下水与河湖水(以下简称“三水”)转化关系, 通过野外调查、动态观测、遥感解译、基流解析和统计分析等手段, 分析了三水转化特征及其生态效应, 得到如下认识: (1) 在地质地貌条件和三水转化的控制下, 空间上可将流域生态系统划分为湖群-灌-草-乔湿环境生态系统、草-灌-乔-沙干环境生态系统、矮化疏林-草干环境生态系统、农田-乔湿环境生态系统和河滨带湿环境生态系统; (2) 时间上, 自 20 世纪 90 年代以来, 流域呈现植被覆盖度增加、地下水位下降、河流基流量减少、湖沼湿地减少的趋势; (3) 流域生态格局的形成和演化是自然因素和人类活动共同作用的结果, 其中地质地貌条件控制流域生态系统的基本格局, 水循环特征控制流域生态格局演化方向和时空变异趋势, 人类活动极大地改变了原生生态格局, 主导着现代生态格局演化的方向与强度; (4) 流域生态格局的安全与稳定对水分有强依赖性, 保持水系连通、增强三水转化强度、维持沙区地下水位埋深在 1.5~5 m 范围内对区内生态系统的健康至关重要。基于秃尾河流域三水转化单向水循环特征, 提出了河滨带概念, 指出河滨带是流域水流、物流、能流和信息流的源和汇, 起生态廊道的作用, 河滨带生态功能对流域生态环境质量具有指示作用, 可作为流域生态环境质量评价的重要指标之一。研究成果对于黄河“几”字弯以及其他类似地区流域的生态环境保护与治理有重要的指导作用。

关键词: 三水转化; 生态格局; 河滨带; 秃尾河; 黄河“几”字弯

中图分类号: P641; P343.1; Q178

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2024)06-0036-11

River-groundwater transformation and ecological effects in the Tuwei River watershed

WANG Jinxuan¹, WANG Yi², GAO Fan^{3,4}, ZHANG Xuanming², MA Zhitong², YANG Fan^{3,4}

(1. School of Architecture, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi 710061, China; 2. School of Water and Environment, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi 710054, China; 3. Shaanxi Union Research Center of University and Enterprise for River and Lake Ecosystems Protection and Restoration, Xi'an, Shaanxi 710065, China; 4. Power China Northwest Engineering Corporation Limited, Xi'an, Shaanxi 710065, China)

Abstract: The Tuwei River, an important tributary of the Yellow River, located in the eastern Jiziwan region exhibits a close hydraulic connection between atmospheric precipitation, groundwater, and river-lake water in the

收稿日期: 2024-06-24; 修訂日期: 2024-08-22

投稿网址: www.swdzgcdz.com

基金项目: 国家重点研发计划项目课题(2023YFC3206502); 国家自然科学基金重点项目(42130710); 陕西省重点研发计划一般项目(2023-YBSF-438); 长安大学青年学者学科交叉团队建设项目

第一作者: 王锦璇(1989—), 女, 博士, 讲师, 主要从事景观水文、景观生态规划设计等方面的研究。E-mail: jinxuan.wang@chd.edu.cn

watershed. This connection influences the evolution, stability and safety of the watershed ecological pattern. Based on the geological, geomorphological and hydrogeological conditions, and the water transformation between atmospheric precipitation, groundwater, and river-lake water (hereinafter referred to as three-water) in the Tuwei River, this study examined the characteristics of the three-water transformation and their ecological effects using field investigation, dynamic observation, sensing interpretation, base flow analysis, and statistical analysis. Under the control of geological and geomorphological conditions and the three-water transformation, the watershed can be spatially divided into lakes-shrub-grass-tree wet environment ecosystem, grass-shrub-tree-sand dry environment ecosystem, dwarf sparse forest-grass dry environment ecosystem, farmland-tree wet environment ecosystem, and riparian wet environment ecosystem. Since the 1990s, the vegetation coverage of the watershed has increased, while the groundwater levels have dropped, the river base flow has decreased, and the lake wetland has shown a decreasing trend. The formation and evolution of the watershed ecological pattern is the result of a combination of natural factors and human activities. The geological and geomorphological conditions control the watershed ecological pattern, and the hydrological cycle characteristics control the evolution direction and spatiotemporal variation trend of the watershed ecological pattern. Human activities have greatly changed the original ecological pattern and dominated the direction and intensity of the contemporary ecological pattern evolution. The safety and stability of the watershed ecological pattern are highly dependent on water resources. Maintaining hydrological connectivity, enhancing the intensity of three-water transformation, and ensuring the groundwater level in the desert area within the range of 1.5 ~ 5 m are crucial to the health of the ecosystem in the area. Based on the one-way three-water transformation characteristics in the Tuwei River, the definition of the riparian zone was proposed. The riparian zone is the source and sink of water flow, material flow, energy flow, and information flow in the watershed, and plays the role of an ecological corridor. The ecological function of the riparian zone has an indicative effect on the status of the watershed ecological environment and can be used as one of the important indicators for the assessment of the watershed ecological system. These findings support the protection and governance of ecological environments for the Jiziwan region of the Yellow River and similar watersheds.

Keywords: three-water transformation; ecological pattern; riparian zone; Tuwei River; Jiziwan region of the Yellow River

“山水林田湖草沙生命共同体”系统治理理念的提出体现了区域生态环境整体性、系统性和功能性的特点,从本质上定义了以多要素构成的流域生态环境整体保护和修复的战略方向,即从过去的以单一要素、局部保护修复为目标转变为以多要素—多过程、全面保护修复流域生态系统为目标^[1]。在干旱半干旱地区(以下简称“旱区”),受地质地貌、水文地质条件、气候水文、人类活动等共同控制,流域生态系统水分的转化机制极为复杂^[2~4]。当前,流域生态系统相关的研究多集中于流域景观格局指数时空分布及成因研究^[5],流域生态系统服务、生态风险及生境质量评估^[6~8]、流域生态安全格局的构建与优化^[9]等方面。旱区流域大气降水(蒸散发)、地下水和河湖水(以下简称三水)水力联系极为密切,关系转化频繁,控制着流域生态格局的演化、安全和稳定,是联系流域“山水

林田湖草沙生命共同体”的纽带^[2]。以往对三水转化的机理以及对水资源形成等方面关注的较多,随着旱区生态问题的凸显,亟需加强三水转化视角下流域生态格局演化、生态效应与作用机制的研究^[4]。如何在三水转化的视角下,认识流域生态格局演化规律,寻求形成旱区流域生态协同修复与保护的规划设计策略与解决途径,是水文地质学、景观生态学、空间规划等相关领域交叉融合的前沿问题和急需解决的实际问题^[10~13]。

秃尾河流域内三水转化关系密切,近年来,受环境变化的影响,区内三水转化关系与强度发生了显著的变化,对流域生态格局的演化产生了深刻影响^[14]。本文以秃尾河流域为研究区,以三水转化对流域生态格局演化的影响为目标,基于流域地质地貌、水文地质条件与气象水文资料分析,通过野外调查、

地下水位长期观测、遥感解译、原位试验等方法,解析流域三水转化特征,分析环境变化对三水转化及其生态效应,识别诊断生态格局变异规律与驱动力。

1 研究区概况

秃尾河流域地处黄河“几”字弯东翼,西北部与红碱淖流域的湖群高平原区相邻。秃尾河源于毛乌素沙漠区,流经盖沙丘陵区和黄土丘陵沟壑区(图1),在佳县武家峁村汇入黄河,干流全长139.6 km,面积3 294 km²,属于黄河的一级支流。高家川水文站多年平均径流量为 $3.51\times10^8\text{ m}^3$,主要以地下水和降水补给为主,其中地下水对秃尾河补给量占高家川断面径流量的68%,枯水期河流径流量全部由地下水补给^[15]。

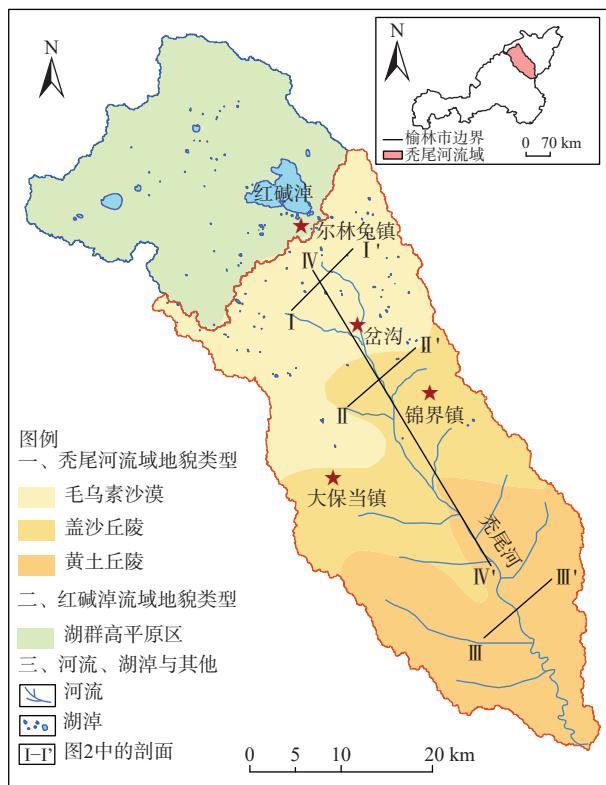


图1 研究区位置
Fig. 1 Location of the study area

历史上秃尾河的上游,在瑶镇—圪丑沟—尔林兔镇之间的沙漠区分布着大量碟状湖淖,这里地势平坦、降水量相对丰富,地下水位埋深浅,为湖淖与湿地的形成奠定了基础。据遥感解译,1980年前后约有75个湖淖和湿地。2000年以后,受人类活动和气候变化的影响,区内地下水位下降,许多湖淖湿地萎缩甚至消失,2020年仅有约40个湖淖,且大部分已演变成小型间歇性湖淖。

流域属温带半干旱季风气候区,多年平均气温为8.5 °C,多年平均降水量为439 mm,多年平均潜在蒸散发为1 040 mm,具有冬季寒冷干燥、降水少,夏季炎热、多阵雨的气候特征。

流域地下水类型为松散岩类孔隙水(介质为风积沙和萨拉乌苏组砂)、碎屑岩类孔隙-裂隙水和黄土孔隙-裂隙水。地下水依靠大气降水补给,向河湖径流、蒸散发和人工开采为排泄途径。中上游的沙区和盖沙丘陵区含水层厚度大,包气带岩性为均质沙,补给入渗条件好,含水层富水性和调节能力强。

沙漠区由旱生和中生-湿生植被构成,分布有沙柳、沙蒿、局部残存臭柏等,洼地、湖淖周边生长有诸如芦苇、蒲草等挺水植物;盖沙丘陵区多生长沙蒿、沙柳、柠条等,局部分布有芒草、百里香、天然臭柏等,在泉集河或大泉附近生长有芦苇等挺水植物以及旱柳、杨柳等乔木;黄土丘陵沟壑区以丛生禾草为主;河滨带生长有芦苇等挺水植物,乔木稀少,残存有侧柏、油松、杜松等,人工乔木有杨、柳、刺槐等,河谷阶地区分布有旱田作物。

秃尾河流域生态环境演变经历了水土资源过度开发和生态修复的不同阶段。20世纪70—90年代,水土流失治理措施在全流域的推进取得了较好的成效,生态环境总体质量向好趋势发展^[16],但受诸如农业耕地扩大、地下水开采量增加、植被恢复、水库修建等人类活动影响,流域天然水循环发生了变化,对区域生态格局产生了一定的影响,水循环变异及对生态格局的影响等问题亟待回答。

为了讨论方便,文中地下水指广义的地下水概念,即将包气带水和饱水带水统称为地下水。

2 数据与方法

(1)野外调查

采用面上控制、剖面精研和点上监测的方法,按照1:5万精度开展野外调查。在不同地质地貌单元选择典型断面,调查地下水埋深、包气带含水量与含盐量、地表生态类型、植被类型与根系发育程度和生长指标。根据调查结果绘制地下水等水位线与埋深分区图、包气带含水量与含盐量随地下水埋深变化趋势图、植被生长指标与地下水位埋深关系图等。

(2)动态观测与遥感解译

在野外调查的基础上,收集区内已有的动态观测孔资料,分析地下水动态变化规律。采用中国科学院地理科学与资源研究所提供的遥感影像资料(<http://>

www.resdc.cn/), 对秃尾河流域地质地貌特征和生态环境类型进行分区、分类、分时段解译, 分析归一化植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI), 分析生态格局变化趋势。遥感解译从 1990—2020 年, 每 5 年解译一次。

(3) 基流解析

依据高家川水文站 1956—2016 年逐日平均流量过程线, 采用英国水文所开发的基流变化计算程序 BFI(base flow index)^[17], 进行基流解析, 分析秃尾河流域地下水对河流径流量的贡献。

(4) 统计分析

根据调查、观测和相关数据, 运用统计分析的方法分析变量之间的相关关系。应用拟合优度(R^2)检验相关程度, 运用变异系数分析比较不同数据集的变异性。

本研究涉及的其他数据如地质地貌、气象水文、水文地质条件、植被类型等来自相关调查研究报告。

3 结果

3.1 流域不同地貌单元三水转化特征

根据地貌类型和野外调查结果, 将秃尾河流域分成上游沙漠区、中游盖沙丘陵区和下游黄土丘陵沟壑区。上游风沙区含水层厚度大(20~100 m, 局部大于 100 m), 年降水量 410 mm 左右, 地势平坦, 地下水水位埋深 0~3 m, 地下水补给和储存条件优越, 补给模数可达 $15.24 \times 10^4 \text{ m}^3/(\text{a} \cdot \text{km}^2)$, 单井涌水量为 500~2 000 m^3/d , 为富水区。中游盖沙丘陵区, 地形起伏较大, 沟谷切割较深, 含水层为风积沙、萨拉乌苏组粉细、中砂层和侏罗系烧变岩裂隙带, 降水量 400~410 mm, 丘间滩地区地下水位埋深一般 3~5 m, 局部大于 5 m, 沙丘处地下水位埋深一般大于 10 m。地下水的补给条件较好, 补给模数为 $8.24 \times 10^4 \text{ m}^3/(\text{a} \cdot \text{km}^2)$, 单井涌水量 300~1 000 m^3/d , 地下水较丰富。地下水在沟、河谷适宜的地方出露为泉, 形成流量较稳定的大泉和泉集河, 如清草界泉集河、袁家沟泉集河、黑龙沟泉、采兔沟泉、清水沟泉和香水沟泉等(目前部分已经消失或者淹没于水库中), 单泉流量可达 20~259 L/s。下游黄土丘陵沟壑区, 地形切割破碎, 三水转化条件差, 地下水位埋深 10~60 m, 雨季坡面径流迅速汇集成洪水, 极少入渗, 仅河床下有微弱的潜流, 属于贫水区^[18]; 河谷区含水层主要为冲洪积中细砂, 沿河谷呈条带状分布, 一般宽几十米到几百米, 一级阶地多为农田, 地下水位埋深 0.5~3 m, 靠近河流岸边地下水位埋深一般小

于 2 m, 局部地段土壤盐碱化。总体规律为: 由上游—中游—下游地下水位埋深由浅变深, 地下水的储存、富水性能和调节功能由强变弱。

流域三水转化的基本特征是: 降水补给地下水, 然后地下水又补给河湖水, 三者之间关系密切, 转化方向为单向性; 后者对前者有很强的依赖性, 地下水和河湖水是同一补给源的两种表现形式, 地下与地表、上游与下游、左岸与右岸相互连通, 构成统一体。不同地貌单元三水转化模式与特征如图 2 所示。

3.2 流域生态空间的分布特征

依据秃尾河流域不同地貌单元三水转化特征与地下水水位埋深、包气带含水率、生态类型等调查、监测的数据, 将流域生态空间由上游到下游划分为湖群-灌-草-乔湿环境生态系统、草-灌-乔-沙干环境生态系统、矮化疏林-草干环境生态系统、农田-乔湿环境生态系统和河滨带湿环境生态系统(图 3)。在此基础上, 分析了不同生态系统景观生态特征与地下水的关系。由图 3 看出, 随着地下水位埋深增大, 土壤包气带含水率由大变小, 生态系统由湖群-灌丛-草-乔湿环境生态系统向草-灌-乔-沙干环境生态系统和矮化疏林-草干环境生态系统演化。在地下水位埋深 0~5 m 的区域, 地下水位和包气带含水率的变化对表生生态系统影响显著; 当地下水位埋深大于 5 m, 地下水位埋深对表生生态系统影响不显著, 但由于植被根系在包气带吸水作用, 造成降水对地下水入渗补给量减少, 在久旱不雨的情况下在根际区形成“干层”, 一定程度上引起沙化和地下水入渗补给量的减少。

3.3 植被盖度与降水量和地下水位的演变趋势

图 4 显示自 20 世纪 90 年代以来秃尾河流域植被盖度、降水量和地下水位埋深变化趋势, 可以看出植被盖度、降水量和地下水位埋深整体呈波动增加趋势。经历了三个阶段的演化, 第一阶段 1990—2000 年, NDVI 缓慢增加, NDVI 平均值和变异系数分别为 0.152 6 和 15.17%; 年平均降水量为 349.59 mm, 地下水位埋深较浅且呈波状缓慢下降趋势, 典型观测孔平均地下水位埋深 2.66 m。第二阶段 2000—2012 年, NDVI 呈波动状增加趋势, 平均值为 0.197 5, 变异系数为 20.34%; 年平均降水量 418.54 mm, 比第一阶段增加了 19.7%; 地下水位前期呈波动缓慢下降, 后期出现急剧下降, 典型观测孔平均地下水位埋深 4.46 m。相比第一阶段, NDVI 明显增加, 但波动也更加剧烈, 主要原因是降水量波动较大造成的。第三阶段 2012—至今, NDVI 呈波动状快速增加趋势, 平均值达到 0.34,

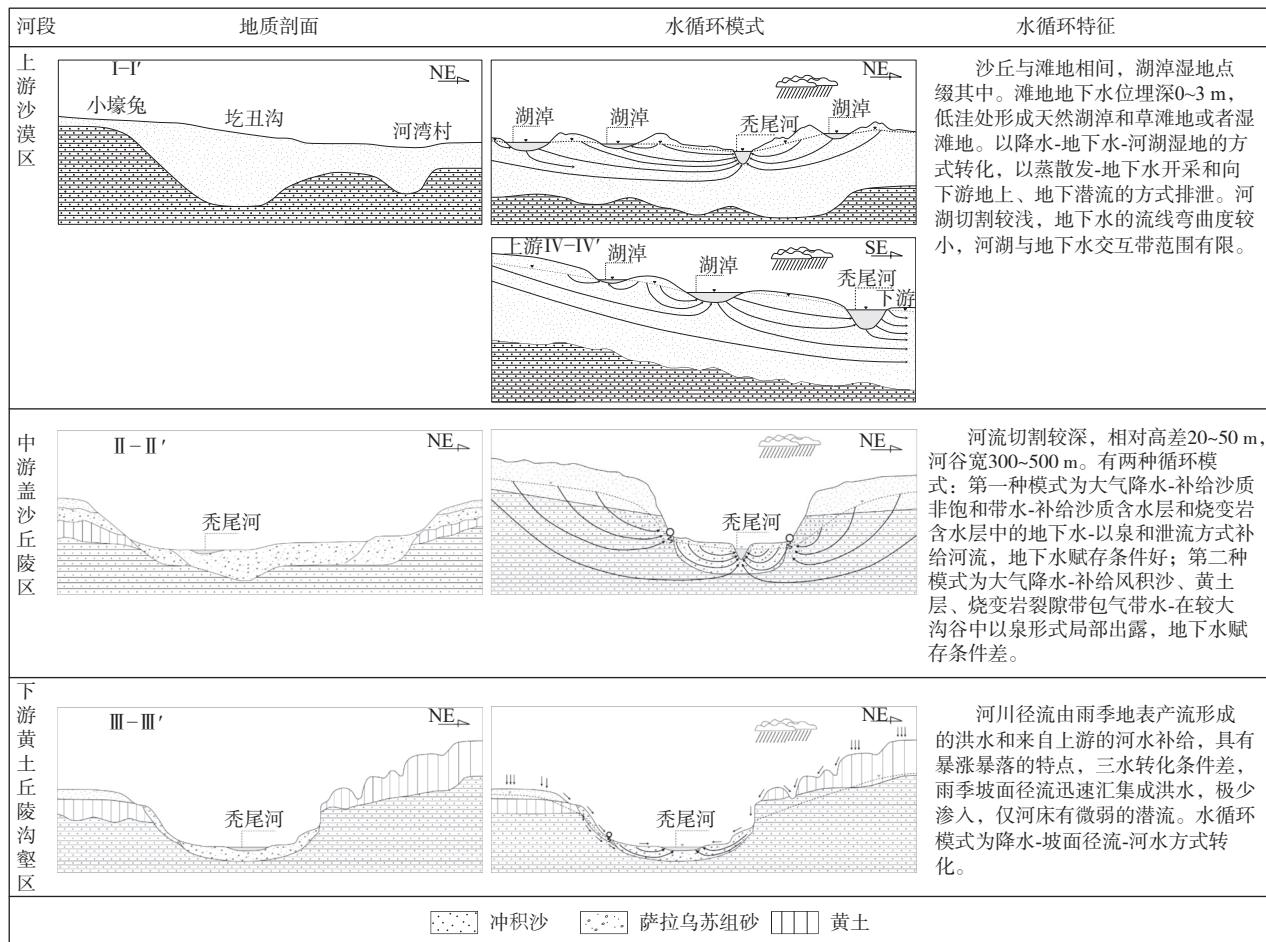


图 2 秃尾河流域不同地貌单元典型剖面三水转化模式与特征

Fig. 2 Three-water transformation patterns and characteristics of typical sections in different geomorphic units in the Tuwei River watershed

变异系数 24.01%；年平均降水量达到 517.49 mm，与第一、第二阶段相比分别增加了 48.03% 和 23.64%；而地下水位波动更加剧烈，尤其是 2015 年以后出现断崖式下降趋势，典型观测孔平均地下水位埋深为 6.32 m，与第一、第二阶段相比下降 3.66 m 和 1.86 m。由此可见，NDVI 与降水量和地下水位变化密切相关。

3.4 河流基流变化趋势

图 5 是自 20 世纪 50 年代以来秃尾河基流的变化趋势。由图 5 可见，基流量一直处于波动下降趋势，特别是自 1998 年以来下降趋势明显。自 2000 年以来，尽管降水量呈增加趋势，但河流基流量仍呈现减少趋势。主要原因可归结于近 20 a 来区域地下水位下降和中上游瑶镇和采兔沟两个水库的修建与蓄水，河道下泄水量减少；同时，下游河岸两侧硬质化，隔断了河流与两岸地下水的直接水力联系。上述因素共同作用，引起锦界工业园区以下河道两侧地下水补给量减少。

4 分析与讨论

4.1 地质地貌条件控制流域生态基本格局

地质地貌条件是地下水形成、演化的基础，与气象水文条件共同控制着不同地貌单元上地下水的补径排途径、水循环模式与强度、富水性、调蓄能力和动态变化，这些水分要素为地表生态系统提供生存的环境（例如干、湿环境等）和水源保证。由于流域尺度地质地貌条件的差异性，必将导致水分运移的差异性，进而引起生态空间的异质性。图 2 和图 3 显示，从上游到下游，三种地貌单元的生态系统随地貌类型和水循环要素的趋势变化，即由湖群-灌-草-乔湿环境生态系统向草-灌-乔-沙干环境生态系统和矮化疏林-草干环境生态系统演化，生态空间分异与地质地貌条件和相关联的水循环要素有较好的适配性。

4.2 生态系统对水循环要素变化的敏感性

4.2.1 河湖水生态对水循环要素的响应

区内大气降水、地下水和河湖水关系密切，三者

典型景观生态照片										
地貌类型										
景观生态类型	矮化疏林-草干环境景观带	草-灌-乔-沙干环境景观带	湖群-灌-草-乔湿环境景观带	农田-乔湿环境景观带	河滨湿环境景观带					
景观生态特征与水文要素	<ul style="list-style-type: none"> 地下水位埋深10~60m, 降雨入渗量少, 土壤包气带含水率15%~10%之间, 地下水贫乏, 植被生态发育依靠雨养, 草本覆盖率为10%~30%, 乔灌覆盖率为11%~14%。 	<ul style="list-style-type: none"> 降雨入渗条件好, 地下水丰富, 支沟和主流岸边有大量的泉分布, 支沟常形成泉集河。生态系统对地下水位埋深和包气带含水率依赖性强。 地下水位埋深小于0.5m, 土壤包气带含水率34%左右, 为低湿地、湖沼、嬉水植被景观; 地下水位埋深0.5~1m, 土壤包气带含水率34%~30%, 地表常年湿润, 植被种群为苔草、寸草等, 伴生有菊科杂草、碱草和水生的草本等, 植被长势良好, 平均覆盖度70%~80%; 地下水位埋深1~2m, 土壤包气带含水率30%~27%, 植被种群为芨芨草种群以及苔草种群, 沙柳、乌柳和乔木可以生长, 植被长势良好, 覆盖度60%~70%, 局部可见盐渍化现象; 地下水位埋深3~5m, 土壤包气带含水率25%~13%, 植被为沙柳、沙蒿、乔木和沙生根茎植被种群, 植被根系发育较深, 长势一般, 平均覆盖度40%~60%, 分布固定, 半固定沙丘景观; 地下水位埋深为大于5m, 土壤包气带含水率10%左右, 植被为沙蒿、柠条、羊柴、沙生根茎种群等, 植被长势较差, 乔木发育不良形成“小老树”, 有林不成材, 平均覆盖度20%~40%, 分布有流沙、明沙和半固定、固定的沙丘。虽然地下水位埋深对地表植被影响不大, 但多年生灌木和乔木根系发达吸取包气带水分, 拦截了降雨入渗, 减少地下水的补给量。 	<ul style="list-style-type: none"> 地下水位埋深0~3m, 土壤包气带含水率34%~25%, 新月形和沙垅状半固定固定沙丘、滩地、湖沼镶嵌分布, 低洼处和湖沼周边盐碱土沼泽相随, 有利于草灌乔和农作物的生长, 覆盖率60%以上, 以旱生、中生-湿生植被为主, 油蒿半灌木、锦鸡儿灌丛次之, 人工乔灌有樟子松、杨树、旱柳、榆树、沙柳、羊柴等。 	<ul style="list-style-type: none"> 地下水位埋深小于2m, 土壤包气带含水率大于25%, 以农田与乔木景观为主, 农作物为玉米、土豆、葵花等, 乔木主要为杨树和旱柳, 分布在阶地后缘与耕地和道路两侧, 构成护田林网。地下水位埋深浅, 有盐渍化土分布, 分布大量的人工排水渠沟系统, 排出的水汇入秃尾河, 水中盐分和硝态氮等含量较高。 	<ul style="list-style-type: none"> 分布在河道两侧, 由河道水体和河漫滩构成, 其宽度随河漫滩的宽度而变化, 是陆地和水体系统之间的交错带。河漫带地下与河水之间补排关系随着河水位的变化而变化, 枯、平水期地下水补给河漫带, 丰水期河道水位大涨, 河道水补给河漫带。植被生态系统主要为芦苇、杂草、人工乔木林, 从上游到下游形成连续的廊道, 沿三维方向有较陡的生态环境梯度和高异质性的生态格局, 具有独特的生态功能, 是物质、能量和信息交换的重要生态区。 					

图3 秃尾河流域生态空间分布与地貌类型和关键水文要素关系简图

Fig. 3 Relationship between ecological space, geomorphic types, and key hydrological elements in the Tuwei River watershed

之间水力联系呈单向性转化, 后者对前者有很强的依赖性, 任何一部分的变化都会影响整个系统。在此情

况下, 地下水和河湖水是同一补给源(降水)的两种表现形式, 本文称这种河湖为地下水依赖型。保持地下

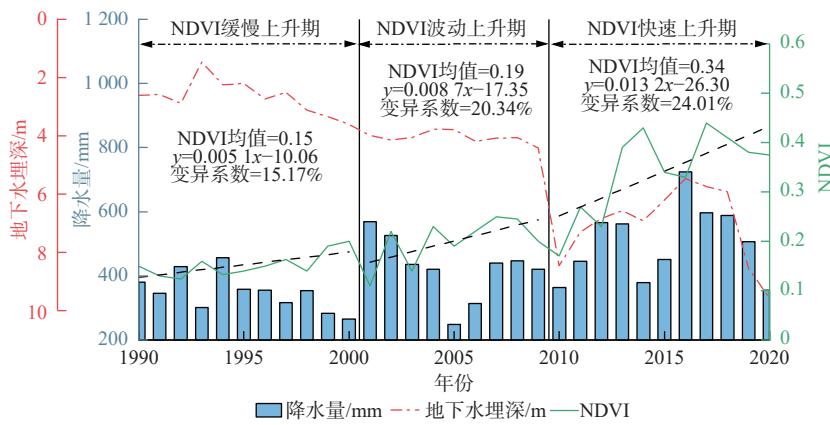


图 4 禿尾河流域 NDVI、降水量以及地下水位埋深随时间变化

Fig. 4 Temporal changes in NDVI, precipitation, and groundwater depth in the Tuwei River watershed

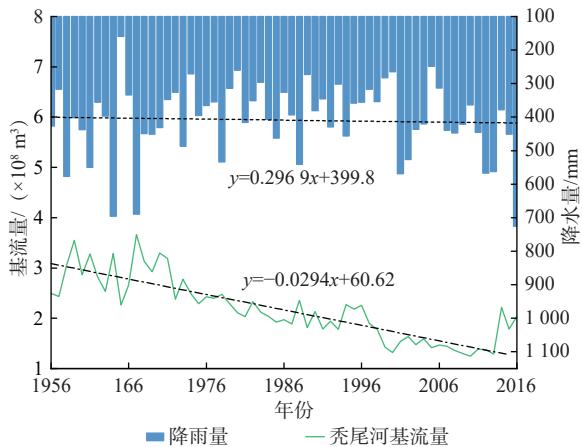


图 5 禿尾河流域河流基流量、降水量随时间的变化

Fig. 5 Changes of river base flow and precipitation over time in the Tuwei River watershed

水依赖型河湖的水动力条件是地下水与河湖具有统一的浸润面，且地下水补给河湖水，这是该类型河湖健康的必要条件；相反，如果地下水位与河湖水位脱节或者二者虽然具有统一的浸润面但河湖水补给地下水，河湖水域必然发生萎缩或者消失，出现这种情况的一个主要原因是区域地下水位出现持续下降，核心是水循环条件发生变异。

历史上，秃尾河流域沙漠区和盖沙丘陵区在地下水位埋深小于 1 m 地段分布许多沼泽和湖淖，呈现“挖坑即见水”的现象，构成独特的生态类型。近些年来，由于区内中上游耕地的大量开垦和植被恢复，导致地下水位持续下降。据不完全统计，仅沙漠区与盖沙丘陵区分布着分散式的耕地达 35 片左右，部分耕地分布于供水水源附近，大量抽取地下水作为灌溉水源，亩均用水 300~477 m^3 ，部分地段形成地下水位降落漏斗（图 6）。区域地下水位持续下降对湖淖湿地萎缩与

消失起到了关键性的促进作用，昔日的沙丘、沟谷、滩地相间、湖淖、湿地点缀其中的生态格局已不复存在。出现这些迥异往昔的现象，是地下水与湖淖天然水力联系发生变异的具体表现。

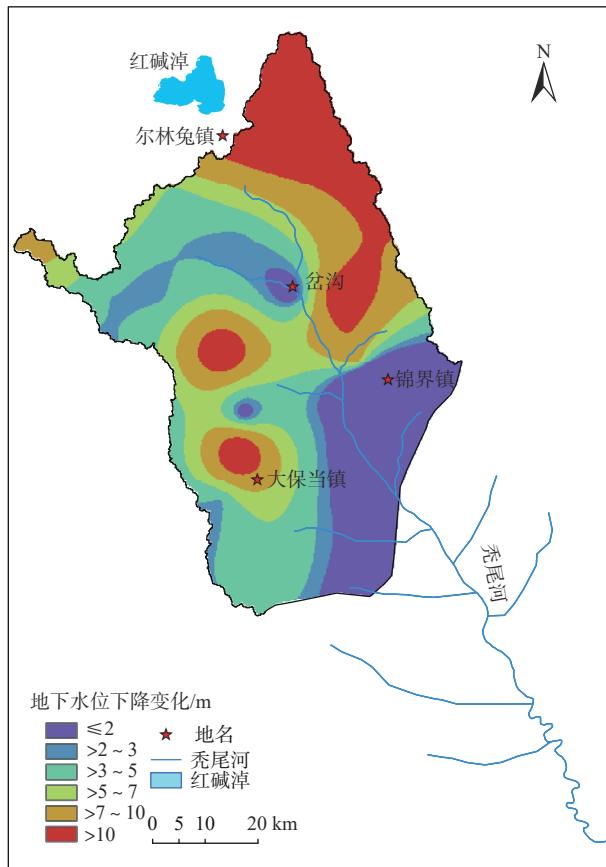


图 6 2023 年与 2003 年相比地下水位下降幅度图

Fig. 6 The decline of groundwater level in 2023 compared with 2003

从流域尺度上讲，虽然地下水仍然保持补给秃尾河的状况，但由于区域地下水位下降，秃尾河的基流

量处于衰减趋势。长序列水文资料的基流分析表明秃尾河高家川断面径流量的68%来自流域上游地下水的补给^[15],枯水期河流中的径流量全由地下水补给,二者呈线性关系^[19](图7),即

$$\Delta Q = 1.0464 \Delta H + 0.2595 \quad (r = 0.85) \quad (1)$$

式中: ΔQ —河流基流量的变化量/($m^3 \cdot s^{-1}$);
 ΔH —典型观测孔中地下水位变化量的平均值/m;
 r —相关系数。

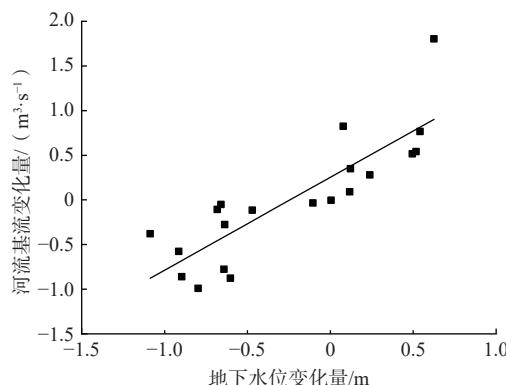


图7 秃尾河河流基流量变化与地下水位变化关系(以1995年为参考年)^[19]

Fig. 7 Relationship between base flow change of the Tuwei River and groundwater level change (with 1995 as reference year)^[19]

综上,区内河湖生态对流域地下水的变化较敏感,一旦地下水位出现大幅度下降则会引起河流基流量的减少、湖淖湿地萎缩和大泉流量衰减甚至消失等水生态问题。因此,加强地表与地下、上游与下游、左岸与右岸相互连通,维持中上游地下水位埋深小于5 m是流域健康河湖水生态基流的重要保障;建立集约化、立体化高效农业体系,提高灌溉水源的利用效率,是避免地下水位持续下降的重要途径。

4.2.2 植被生态对水循环要素的响应

由图4可知,2000年以来,区内整体降水量与植被NDVI均呈增加趋势。尤其近10 a增加显著,降水增加,助力增绿,凸显出植被生态与降水关系密切,但波动比较大,表明稳定性较差、存在不确定性。实际上,目前植被恢复仅是由黄土地变为“绿土地”,还不是“深绿色”。恢复到稳定的“深绿色”植被生态系统受到了水分条件的限制,特别在气候变化不确定性和降水不平衡的背景下,植被系统持续恢复的不确定性依旧存在,植被恢复的稳定性和可持续性是未来一个重要的挑战。

地下水埋深和包气带水分生态系统提供水源

保障,但植被根系的吸水和包气带拦截降水入渗补给,在一定程度上引起地下水位下降和地下水补给量的减少。根据课题组野外原位观测(图8),一棵两年生的沙柳,根系拦截了近58%的年降水量,同时在生长过程中,根系不断向深部延伸,汲取包气带水分和地下水,二者共同作用导致地下水位下降1.2 m左右。而作为对照的无植被观测点,同期地下水位上升0.3 m左右^[20-21]。试验结果证实了植被生态对地下水和土壤包气带水分的高度依赖性。但维持植被生态系统健康和稳定的地下水位埋深和土壤包气带含水率的适宜范围狭窄,偏离适宜区间会引起生态格局的突变,体现了流域生态环境的脆弱性;与此同时,过度植被恢复又造成地下水补给量和包气带含水率的减少,进而加速地下水位的下降。如何协调植被恢复与地下水补给量减少的矛盾是一个亟待解决的科学问题。

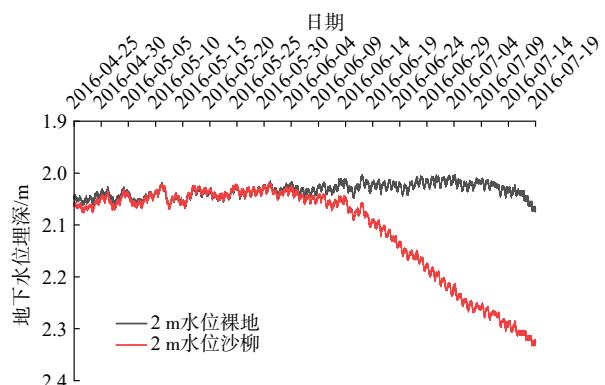


图8 沙柳生长与地下水位变化原位观测试验与结果

Fig. 8 In-situ observation experiment and results of *Salix psammophila* growth and groundwater level changes

4.2.3 河滨带生态功能对流域生态环境质量的指示作用

河滨带是一种特殊的生态类型,是河流水生生态系统和陆地生态系统的交错过渡带,具有重要的生态意义^[22]。但目前国内外对其概念和边界还没有形成统

一认识^[23], 主要原因是流域尺度上河流与地下水转化频繁, 涉及影响范围和程度^[24]。本文认为对于三水呈单向水循环的流域, 河滨带是以河流为中心, 横向上与陆地生态系统相比, 河流两侧生境梯度发生突变的边界处, 且丰、枯水期河流水涨水落能够影响的区域。按照该定义, 河滨带由河道水体和河漫滩构成, 其宽度随河漫滩的宽度变化而变化。河滨带生态特征为: (1)水是河滨带生态系统的基础, 水分来自上游地表径流、河床下潜流、河滨带两侧的地下水补给; (2)河滨带是流域水流、物流、能流和信息流的源与汇, 具有独特的生态功能, 河滨带有足够且干净的水分是流域生态系统健康的标志, 因此加强水系连通和保持流域合理的地下水位与优质的水质是保障; (3)从上游到下游河滨带形成连续的廊道, 沿三维方向有较陡的环境梯度和高异质性的生态格局; (4)河滨带存在特定的植物和动物; (5)对于三水呈单向转化的水循环类型, 河滨带水生态对区域地下水位和水质的变化敏感。因此, 河滨带生态功能对流域生态系统的健康具有指示作用, 可将河滨带生态功能作为区域生态环境质量评价中一个重要的评价指标。

秃尾河流域两岸地下水补给河流, 丰水期河道水位大涨, 水域范围波及高漫滩处; 平、枯水期河道水仅限于低漫滩或者河道中心。河滨带植被主要为芦苇、杂草、人工乔木林; 从上游到下游, 河滨带都呈现湿环境生态系统特征; 横向上与农田-乔湿环境景观带相邻。河滨带生境梯度在纵、横和垂向三维空间的差异性明显, 主导着河滨带生态格局的异质性和生物的多样性, 河滨带在生态廊道、水环境污染防治、水土保持和社会经济等方面发挥着重要的作用^[25-27]。

5 结论及建议

近 20 年来, 受环境变化和流域河水-地下水转化关系的影响, 秃尾河流域生态格局经历了显著变化, 这一过程中既产生了正效应, 也伴随着一些负效应。

(1) 气候、水文条件和地质地貌控制秃尾河流域生态的基本格局, 空间上从上游到下游形成了湖群-灌-草-乔湿环境生态系统、草-灌-乔-沙干环境生态系统、矮化疏林-草干环境生态系统、农田-乔湿环境生态系统和河滨带湿环境生态系统; 流域大气降水、地下水和河湖水水力联系密切, 呈单向循环, 水循环强度控制流域生态格局演化的方向和时空变异趋势; 人类活动极大地改变了原生生态格局, 在现代生态格局演化上起着主导性作用。

(2) 流域无论是河湖生态还是植被生态等对水分都有很强的依赖性, 三水转化与生态系统构成统一的生态链, 其间通过水分、能量和物质的交换, 维持整个流域生态系统的平衡。包气带含水率、地下水位埋深以及地下水与河湖的交换通量在维持河湖生态基流与水域面积、调节土壤包气带含水量和含盐量、维持植被生存与演化等方面具有重要的作用。保持地下水与河湖水系连通、调控沙区地下水位埋深在 1.5~5 m 范围内是优化区域生态格局、建设适合于人类生存与发展的可持续景观生态模式、维护生态系统稳定与安全的核心。

(3) 对于三水单向水循环流域, 河滨带是流域水、物质和能量集聚的源与汇和流域生态安全的屏障。只要河滨带生态功能保持在良性状态, 流域生态格局就能维持其安全性和稳定性; 反之, 说明流域某些关键性的控制因素发生了变异, 例如区域地下水位持续下降、水质恶化等。由此可见, 在单向水循环系统的流域中, 河滨带生态功能的优劣对流域生态环境质量有指示作用。

近 10 a 来, 区内植被恢复与降水量增加和人工干预与保护形成的叠加效应, 是生态格局变化的主要驱动力。但仍然存在耕地扩大与碎片化、大量开采地下水等对生态系统的影响, 特别在气候变化情况下, 生态格局变化的不确定性呈增强趋势, 生态系统的稳定性弱, 目前的治理成效仍是初步的。提升沙区的生态系统服务功能, 必须在“人与自然和谐”及“山水林田湖草沙生命共同体”的理念指导下, 加强地表生态恢复重建-地下水-河湖协同治理, 许多问题需要科技的支撑, 例如: 1)植被如何恢复、种什么以及怎么种; 2)景观生态异质性与生态空间镶嵌的稳定性; 3)生态系统演化的动力学机制与生态过程; 4)河滨带水系连通性与生态效应; 5)流域生态稳定性的阈值体系构建, 生态系统监测、模拟、预警关键技术; 6)流域景观生态规划及多尺度协同优化设计等^[24, 28-29]。

需要指出的是, 受篇幅限制, 本文仅讨论了地下水水位和包气带含水率等对流域生态格局的影响, 对水质、煤矿开采等对生态格局影响以及生态格局的变化引起蒸散发的变化涉及较少。

参考文献 (References) :

- [1] 萨娜, 赵金羽, 寇旭阳, 等. “山水林田湖草沙生命共同体”耦合框架、模型与展望 [J]. 生态学报, 2023, 43(11): 4333~4343. [SA Na, ZHAO Jinyu, KOU

- Xuyang, et al. Coupling mountains-waters-forests-farmlands-lakes-grasslands-sandlands life community: Framework, models and prospect[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(11): 4333 – 4343. (in Chinese with English abstract)]
- [2] 王文科,宫程程,张在勇,等.旱区地下水文与生态效应研究现状与展望 [J]. *地球科学进展*, 2018, 33(7): 702 – 718. [WANG Wenke, GONG Chengcheng, ZHANG Zaiyong, et al. Research status and prospect of the subsurface hydrology and ecological effect in arid regions[J]. *Advances in Earth Science*, 2018, 33(7): 702 – 718. (in Chinese with English abstract)]
- [3] 邱晓凡,李文鹏,崔虎群,等.黑河流域中游盆地地表水与地下水转化机制研究 [J]. *水文地质工程地质*, 2022, 49(3): 29 – 43. [QI Xiaofan, LI Wenpeng, CUI Huqun, et al. Study on the conversion mechanism of surface water and groundwater in the middle reaches of the Heihe River Basin[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2022, 49(3): 29 – 43. (in Chinese with English abstract)]
- [4] 陈喜,黄日超,黄峰,等.西北内陆河流域水循环和生态演变与功能保障机制研究 [J]. *水文地质工程地质*, 2022, 49(5): 12 – 21. [CHEN Xi, HUANG Richao, HUANG Feng, et al. A comprehensive study of the maintaining mechanisms for hydrological cycle and ecological evolution and function in the northwest inland river basins of China[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2022, 49(5): 12 – 21. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 梁加乐,陈万旭,李江风,等.黄河流域景观破碎化时空特征及其成因探测 [J]. *生态学报*, 2022, 42(5): 1993 – 2009. [LIANG Jiale, CHEN Wanxu, LI Jiangfeng, et al. Spatiotemporal patterns of landscape fragmentation and causes in the Yellow River Basin[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(5): 1993 – 2009. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 王尧,陈睿山,夏子龙,等.黄河流域生态系统服务价值变化评估及生态地质调查建议 [J]. *地质通报*, 2020, 39(10): 1650 – 1662. [WANG Yao, CHEN Ruishan, XIA Zilong, et al. The evaluation of ecosystem service value and its spatial change in the Yellow River Basin and suggestions from the ecological geology perspectives[J]. *Geological Bulletin of China*, 2020, 39(10): 1650 – 1662. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 康紫薇,张正勇,位宏,等.基于土地利用变化的玛纳斯河流域景观生态风险评价 [J]. *生态学报*, 2020, 40(18): 6472 – 6485. [KANG Ziwei, ZHANG Zhengyong, WEI Hong, et al. Landscape ecological risk assessment in Manas River Basin based on land use change[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(18): 6472 – 6485. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 陈乐,卫伟.西北旱区典型流域土地利用与生境质量的时空演变特征 [J]. *生态环境学报*, 2022, 31(9): 1909 – 1918. [CHEN Le, WEI Wei. Spatiotemporal changes in land use and habitat quality in a typical dryland watershed of northwest China[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2022, 31(9): 1909 – 1918. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 杨亮洁,王晶,魏伟,等.干旱内陆河流域生态安全格局的构建及优化——以石羊河流域为例 [J]. *生态学报*, 2020, 40(17): 5915 – 5927. [YANG Liangjie, WANG Jing, WEI Wei, et al. Ecological security pattern construction and optimization in arid inland river basin: A case study of Shiyang River Basin[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(17): 5915 – 5927. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 王浩,胡鹏.水循环视角下的黄河流域生态保护关键问题 [J]. *水利学报*, 2020, 51(9): 1009 – 1014. [WANG Hao, HU Peng. Key issues of ecological conservation in the Yellow River Basin from a water cycle perspective[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2020, 51(9): 1009 – 1014. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 王军,孙雨芹,杨智威,等.自然资源-社会经济-生态系统耦合视角下的生态保护修复转型思考 [J]. *地质通报*, 2024, 43(8): 1297 – 1304. [WANG Jun, SUN Yuqin, YANG Zhiwei, et al. Thinking for the transformation of ecological protection and restoration in the coupled view[J]. *Geological Bulletin of China*, 2024, 43(8): 1297 – 1304. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 邵景力,白国营,刘翠珠,等.我国地下水管理面临的问题与对策——兼谈地下水“双控”管理 [J]. *水文地质工程地质*, 2023, 50(5): 1 – 9. [SHAO Jingli, BAI Guoying, LIU Cuizhu, et al. Problems and countermeasures of groundwater management in China: Concurrently talking about groundwater dual-control management[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2023, 50(5): 1 – 9. (in Chinese with English abstract)]
- [13] WANG Zhan, WANG Wenke, ZHANG Zaiyong, et al. River-groundwater interaction affected species composition and diversity perpendicular to a regulated river in an arid riparian zone[J]. *Global Ecology and*

- Conservation, 2021, 27: e01595.
- [14] 井江楠. 变化环境下秃尾河流域水量平衡关键要素演变与水文生态效应 [D]. 西安: 长安大学, 2023. [JING Jiangnan. Evolution of key elements of water balance and hydrological and ecological effects in Tuwei River Basin under changing environment[D]. Xi'an: Chang'an University, 2023. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 王文科, 孔金玲, 段磊, 等. 黄河流域河水与地下水转化关系研究 [J]. 中国科学 E 辑: 技术科学, 2004(增刊 1): 23–33. [WANG Wenke, KONG Jinling, DUAN Lei, et al. Study on the transformation relationship between river water and groundwater in the Yellow River Basin[J]. Scientia Sinica E: Technical Sciences, 2004(Sup1): 23–33. (in Chinese)]
- [16] 孙兆峰, 王双银, 刘晶, 等. 秃尾河流域径流衰减驱动因子分析 [J]. 自然资源学报, 2017, 32(2): 310–320. [SUN Zhaofeng, WANG Shuangyin, LIU Jing, et al. Driving force analysis of runoff attenuation in Tuwei River Basin[J]. Journal of Natural Resources, 2017, 32(2): 310–320. (in Chinese with English abstract)]
- [17] WAHL K L, WAHL T L. Determining the flow of comal springs at New Braunfels, Texas[J]. Proceedings of Texas Water, 1995, 95(6): 16–27.
- [18] 朱钧. 神府—东胜地区环境地质与水资源综合评价 [R]. 北京: 地质矿产部, 1991. [ZHUN Jun. Comprehensive evaluation of environmental geology and water resources in Shenfu-Dongsheng area[R]. Beijing: Ministry of Geology and Mineral Resources, 1991. (in Chinese)]
- [19] 杨泽元, 王文科, 马雄德, 等. 秃尾河流域表生生态环境现状评价 [J]. 地球科学与环境学报, 2006, 28(3): 87–91. [YANG Zeyuan, WANG Wenke, MA Xiongde, et al. Assessment of present state on supergene eco-environment in Tuwei River watershed[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2006, 28(3): 87–91. (in Chinese with English abstract)]
- [20] 王文科. 毛乌素沙地降雨(蒸发)-包气带水-地下水转化机理与生态效应 [R]. 西安: 长安大学, 2011. [WANG Wenke. Transformation mechanism and ecological effects of rainfall (evaporation)-vadose zone water-groundwater in Maowusu Sandy Land[R]. Xi'an: Chang'an University, 2011. (in Chinese)]
- [21] ZHAO Ming, WANG Wenke, WANG Zhoufeng, et al. Water use of Salix in the variably unsaturated zone of a semiarid desert region based on in-situ observation[J]. Journal of Hydrology, 2020, 591: 125579.
- [22] LIND L, HASSELQUIST E M, LAUDON H, et al. Towards ecologically functional riparian zones: A meta-analysis to develop guidelines for protecting ecosystem functions and biodiversity in agricultural landscapes[J]. Journal of Environmental Management, 2019, 249: 109391.
- [23] 魏晓华, 孙阁. 流域生态系统过程与管理 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2009. [WEI Xiaohua, SUN Ge. River basin ecosystem process and management[M]. Beijing: Higher Education Press, 2009. (in Chinese)]
- [24] WANG Jinxuan, MA Zhitong, WANG Zhoufeng, et al. Evolution of the landscape ecological pattern in arid riparian zones based on the perspective of watershed river-groundwater transformation[J]. Journal of Hydrology, 2023, 625: 130119.
- [25] MA Zhitong, WANG Wenke, ZHANG Zaiyong, et al. River-groundwater interactions in the arid and semiarid areas of northwestern China[J]. Hydrogeology Journal, 2024, 32(1): 37–57.
- [26] YE Mengmeng, HU Haizhu, WU Panlong, et al. Ecological responses to hydrological connectivity in grassland riparian zones: Insights from vegetation and ground-dwelling arthropods[J]. Science of The Total Environment, 2024, 922: 171196.
- [27] COLE L J, STOCKAN J, HELLIWELL R. Managing riparian buffer strips to optimise ecosystem services: A review[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2020, 296: 106891.
- [28] 王立新, 刘华民, 刘玉虹, 等. 河流景观生态学概念, 理论基础与研究重点 [J]. 湿地科学, 2014, 12(2): 228–234. [WANG Lixin, LIU Huamin, LIU Yuhong, et al. Introduction to the concept, foundation and focuses of riverscape ecology[J]. Wetland Science, 2014, 12(2): 228–234. (in Chinese with English abstract)]
- [29] KWON H I, KOH D C, JUNG Y Y, et al. Evaluating the impacts of intense seasonal groundwater pumping on stream-aquifer interactions in agricultural riparian zones using a multi-parameter approach[J]. Journal of Hydrology, 2020, 584: 124683.

编辑: 汪美华