

## 新疆孔雀河流域地下水演化及其生态效应

龙睿, 张俊, 余, 顾小凡, 李瑛, 董佳秋, 苏潇, 朱瑾

### Groundwater evolution and ecological effect in the Kongque River Basin, Xinjiang

LONG Rui, ZHANG Jun, YU Kun, GU Xiaofan, LI Ying, DONG Jiaqiu, SU Xiao, and ZHU Jin

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202305032>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 西北典型内陆流域地下水与湿地生态系统协同演化机制

Co-evolution mechanism of groundwater and wetland ecosystem in a typical inland watershed in northwest China

胡顺, 凌抗, 王俊友, 乔树锋, 葛孟琰, 孙自永, 马瑞 水文地质工程地质. 2022, 49(5): 22-31

#### 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

#### 三江平原地下水流场演化趋势及影响因素

An analysis of the evolution trend and influencing factors of the groundwater flow field in the Sanjiang Plain

刘伟朋, 崔虎群, 刘伟坡, 程旭学, 李志红 水文地质工程地质. 2021, 48(1): 10-17

#### 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

#### 黑河流域中游盆地地下水动态特征及其调蓄能力分析

Research on the dynamic characteristics of groundwater and regulation capability of aquifers in the intermediate section of Heihe River Basin

凤蔚, 李文鹏, 邵新民, 祁晓凡, 黎涛 水文地质工程地质. 2022, 49(3): 11-21

#### 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



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202305032

龙睿, 张俊, 余堃, 等. 新疆孔雀河流域地下水演化及其生态效应 [J]. 水文地质工程地质, 2023, 50(6): 41-50.  
LONG Rui, ZHANG Jun, YU Kun, *et al.* Groundwater evolution and ecological effect in the Kongque River Basin, Xinjiang[J].  
Hydrogeology & Engineering Geology, 2023, 50(6): 41-50.

## 新疆孔雀河流域地下水演化及其生态效应

龙睿<sup>1,2,3</sup>, 张俊<sup>1,2,3</sup>, 余堃<sup>1,2,3</sup>, 顾小凡<sup>1,2,3</sup>, 李璞<sup>1,2,3</sup>, 董佳秋<sup>1,2,3</sup>, 苏潇<sup>4</sup>, 朱瑾<sup>4</sup>

(1. 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 710054; 2. 中国地质调查局西安地质调查中心, 陕西西安 710054; 3. 陕西省水资源与环境工程技术研究中心, 陕西西安 710054; 4. 新疆维吾尔自治区地质环境监测院, 新疆乌鲁木齐 830002)

**摘要:** 近 50 a, 西北干旱内陆河流域经历了历史时期的水土资源过度开发和近期的生态保护修复的不同阶段, 对区域地下水和生态环境产生了重要影响, 但地下水长期演化规律及其生态效应认识尚不清晰。以新疆孔雀河流域为典型研究区, 基于最新地下水监测数据与历史数据对比, 分析流域地下水水流场时空演化规律以及流域地下水对河岸带胡杨林的影响作用, 探讨地下水长期演化的生态效应。结果表明: 1971—2021 年, 孔雀河流域因过量集中开采地下水引起区域地下水流动系统发生根本性变化, 地下水水位整体呈下降趋势, 流域内累计降幅大于 40 m 的面积达 204.69 km<sup>2</sup>, 累计降幅 20~40 m 的面积为 1 735.81 km<sup>2</sup>, 累计降幅 5~20 m 的面积为 1 018.56 km<sup>2</sup>, 并形成地下水降落漏斗; 生态输水前, 中下游河道长时间断流, 河岸带地下水水位埋深累计降幅超过 10 m, 导致河岸带胡杨林退化萎缩, 2016 年实施生态输水工程以后, 埋深逐渐上升 2~4 m, 上升至胡杨林生长临界水位以上, 2014—2018 年天然胡杨林植被覆盖率增大 17%。本研究有助于认识西北干旱内陆河流域地下水和生态环境演化规律, 为类似区域地下水可持续开发利用与生态保护提供科学参考。

**关键词:** 孔雀河流域; 地下水水流场; 生态输水; 河岸带胡杨林; 地下水水位

中图分类号: P641.8

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2023)06-0041-10

## Groundwater evolution and ecological effect in the Kongque River Basin, Xinjiang

LONG Rui<sup>1,2,3</sup>, ZHANG Jun<sup>1,2,3</sup>, YU Kun<sup>1,2,3</sup>, GU Xiaofan<sup>1,2,3</sup>, LI Ying<sup>1,2,3</sup>, DONG Jiaqiu<sup>1,2,3</sup>,  
SU Xiao<sup>4</sup>, ZHU Jin<sup>4</sup>

(1. Key Laboratory for Groundwater and Ecology in Arid and Semi-arid Areas, China Geological Survey, Xi'an, Shaanxi 710054, China; 2. Xi'an Center of Geological Survey, China Geological Survey, Xi'an, Shaanxi 710054, China; 3. Shaanxi Technology Research Center of Water Resources and Environment Engineering, Xi'an, Shaanxi 710054, China; 4. Xinjiang Geological Environment Monitoring Institute, Urumqi, Xinjiang 830002, China)

**Abstract:** The arid inland river basins in northwestern China have been experienced various stages of soil and

收稿日期: 2023-05-14; 修订日期: 2023-07-17

投稿网址: [www.swdzgcdz.com](http://www.swdzgcdz.com)

基金项目: 第三次新疆综合科学考察项目(2022xjkk0300); 陕西省创新能力支持计划项目(2019TD-040); 陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2022JQ-271; 2022JQ-238); 国家自然科学基金项目(41877199; 42302301); 陕西省重点研发计划项目(2021ZDLSF05-01; 2022SF-327); 中国地质调查局地质调查项目(DD20190351; DD20221751)

第一作者: 龙睿(1994-), 男, 硕士, 助理工程师, 主要从事西北地区水文地质研究。E-mail: [752194828@qq.com](mailto:752194828@qq.com)

通讯作者: 张俊(1982-), 男, 博士, 正高级工程师, 主要从事西北地区水文地质研究。E-mail: [36170038@qq.com](mailto:36170038@qq.com)

water resources over-exploitation over the past 50 years, as well as ecological protection and restoration in recent years, which has significantly influenced the regional groundwater and ecological environment. However, the long-term evolution of groundwater and its ecological effects remain unclear. In this study, the Kongque River Basin is chosen as a study area, and the spatio-temporal evolution of groundwater flow field is analyzed based on the comparison of recent groundwater monitoring data and historical data. The ecological effects of long-term groundwater evolution are discussed by analyzing the influence of regional groundwater to *Populus euphratica* in the riparian zone. The results show that from 1971 to 2021, the groundwater flow in the Kongque River Basin has undergone drastic variation due to excessive groundwater exploitation, and the groundwater levels have shown a general downward trend. The total area where the groundwater levels have decreased by more than 40 m is 204.69 km<sup>2</sup>, as well as 1 735.81 and 1 018.56 km<sup>2</sup> for 20–40 and 5–20 m, and eventually led to the formation of a regional drawdown funnel, which have seriously affected the water consumption of *Populus euphratica* in the middle and lower reaches. From 1971 to 2016, the regional groundwater level depth in the riparian zone of the Kongque River Basin decreased by more than 10 m, with a degradation and shrinkage of *Populus euphratica*. After the implementation of the ecological water transport project since 2016, the groundwater level depth has gradually increased by 2–4 m, and reached the critical groundwater level of *Populus euphratica*. From 2014 to 2018, the regional NDVI increased by 17%, which indicates that the coverage rate of natural vegetation has improved. This study can improve the understanding of evolution patterns in groundwater and ecological environment in arid inland river basins of the northwestern China, and provide scientific references for sustainable development and utilization of groundwater and ecological protection in similar regions.

**Keywords:** Kongque River Basin; groundwater flow; ecological water conveyance; *Populus euphratica* of riparian zone; groundwater table

西北内陆河流域干旱少雨,地表水相对匮乏,水资源短缺,生产、生活与生态用水矛盾突出<sup>[1]</sup>。地下水是该区重要甚至唯一的供水水源,在维系工农业生产和生态环境方面发挥着关键作用。近 50 a 来,受气候变化和人类活动影响,该区经历了历史时期的水土资源过度开发和近期的生态保护修复的不同阶段,区域生态环境经历了先恶化再恢复的过程,水文过程发生显著变化<sup>[2-5]</sup>,尤其地下水时空分布发生明显变异,严重影响流域生态稳定<sup>[6-7]</sup>。2000 年以来,西北干旱区塔里木河流域、石羊河流域、黑河流域等多地相继开展了生态输水工程等生态保护修复措施,取得了良好生态效益,同时对地下水演化产生了重要影响<sup>[8-11]</sup>。

揭示人类活动影响下地下水演化及其生态效应,能够为未来该区地下水生态环境效应定量评价提供基础,并为地下水资源合理开发利用和生态保护提供科学依据。在西北地区,生态输水对地下水和生态环境的影响已有大量研究,如塔里木河流域生态输水效果分析表明,生态输水工程对下游生态系统和地下水回升有积极影响,并表现出长期累积效应<sup>[12-13]</sup>;在黑河流域分析了不同地区输水量与归一化植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI)的关系,

研究发现春秋两季的输水量对 NDVI 有显著影响<sup>[14-15]</sup>;在石羊河流域分析了生态输水后青土湖湿地与地下水的交互作用,揭示流域地下水与湿地生态系统的协同演化机制<sup>[16-17]</sup>。然而,由于缺乏历史时期地下水监测数据等因素,从长时间尺度上,研究西北干旱内陆河流域地下水从天然条件到人类活动影响条件下的长期演化规律及其对生态环境的影响研究相对较少。

新疆塔里木盆地孔雀河流域是典型的干旱内陆河流域。20 世纪 70 年代,该区地下水开发利用程度较低,地下水演化基本处于天然状态。1980 年以来,随着社会经济的快速发展,耕地面积持续增大<sup>[18-21]</sup>,农业灌溉用水量大幅增加,水土资源过度开发,流域上游引水增加,造成下游河道断流<sup>[22]</sup>,地下水补给减少,同时下游大量开采地下水,引起了地下水水位大幅下降,形成地下水降落漏斗<sup>[21-24]</sup>。河道断流和地下水水位下降导致荒漠河岸带胡杨林生态系统遭到严重的破坏<sup>[25-27]</sup>。2016 年开始,孔雀河生态应急补水工程实施,中下游生态环境恢复效果明显<sup>[28]</sup>。近 50 a 来,孔雀河流域地下水与生态环境经历了由天然条件到人类活动影响条件下先恶化再恢复的过程,可作为地下水演化及生态效应研究的理想区域。

本文以孔雀河流域为典型研究区,基于最新地下水统测和地下水监测数据,与20世纪70年代历史数据进行对比,分析流域地下水流场和埋深时空变化特征、成因及流域地下水对河岸带胡杨林的影响作用,探讨地下水长期演化的生态效应,以期为西北干旱内陆河流域地下水的可持续开发利用与生态保护提供科学依据,并为类似地区地下水演化机制及其生态效应研究提供参考。

## 1 研究区概况

新疆孔雀河流域地处天山南麓、塔里木盆地东北缘,为典型的干旱内陆河流域(图1)<sup>[29]</sup>。研究区海拔

高度为890~960 m,地势总体北高南低,东高西低,地形平坦开阔,广布第四系松散堆积物,透水、导水性良好;尤其在北部霍拉山山前倾斜平原,东部库鲁克塔格山山前倾斜平原,中部孔雀河三角洲冲积平原区内大部分为卵砾石裸露,孔隙发育,极利于地下水下渗;南部冲积细土平原及风积平原地层颗粒相对变细,渗透性减小,但果园、农田广布,地表水体、灌溉机井众多,入渗量并未减少。

研究区地处欧亚大陆腹地,四季分明,夏季干旱炎热,冬季寒冷,多年平均气温12.8℃;多年平均降水量56.18 mm;蒸发强烈,多年平均蒸发量1478.38 mm,属典型的暖温带大陆性干旱气候。

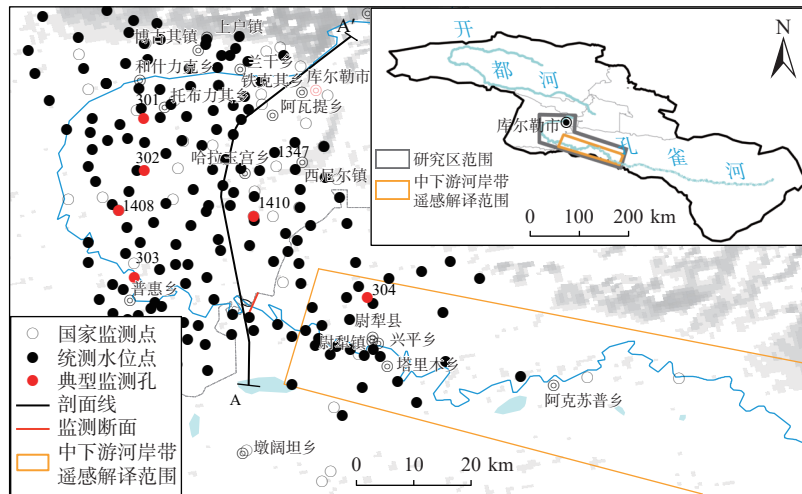


图1 研究区示意图及监测点、断面分布图

Fig. 1 Schematic diagram of the study area, monitoring sites and section distribution

孔雀河为研究区内唯一的常年性河流。该河发源于博斯腾湖,穿过铁门关峡谷进入库尔勒地区,河道先折向正西再向南最后向东流,使左岸形成北、西、南三面环河的“河套”区。该河流经途中被各级水利枢纽引入到各级渠系,沿途渗漏及农业灌溉等方式补给地下水。历史上该河尾闾为罗布泊,现在尉犁下游发生断流,近些年,由于孔雀河生态输水工程的实施,断流情况有极大的改善。

区域内地下水类型以松散层孔隙水为主,多为冲洪积层,赋存丰富的潜水及承压水,具有层状结构,岩性以砂砾石、中粗砂、细砂为主。含水层自北向南由粗粒相向细粒相、由单一结构向双层多层结构过渡到中粗砂、中细砂互层结构,含水层厚度约230 m(图2)。第四系单一结构松散岩类孔隙水主要分布于孔雀河河谷(铁门关峡谷段)地带及霍拉山山前南部坳陷,该区富水性差,单井涌水量小于500 m<sup>3</sup>/d。多

层结构松散岩类孔隙潜水-承压水大面积分布于孔雀河冲洪积平原,上部孔隙潜水富水性强-中等,单井涌水量由1000~3000 m<sup>3</sup>/d逐渐减少为100~1000 m<sup>3</sup>/d;下部承压水单井涌水量自东北向西南,由1000~3000 m<sup>3</sup>/d逐渐减少为100~1000 m<sup>3</sup>/d。第四系孔隙水主要接受河流入渗补给和山前沟谷潜流侧向补给。

## 2 数据来源和研究方法

本研究中历史地下水水位数据,收集自1971年《库尔勒地区区域水文地质测量报告(1:20万)》<sup>[30]</sup>,研究区内118组实测地下水水位数据。现状水位数据采用2021年研究区内地下水统测井数据173组和国家监测工程数据41组。

为研究分析孔雀河流域50 a来地下水流场演化特征,采用ArcGIS克里金插值法,分别生成1971年和2021年地下水水位分布栅格图,分别绘制历史及现



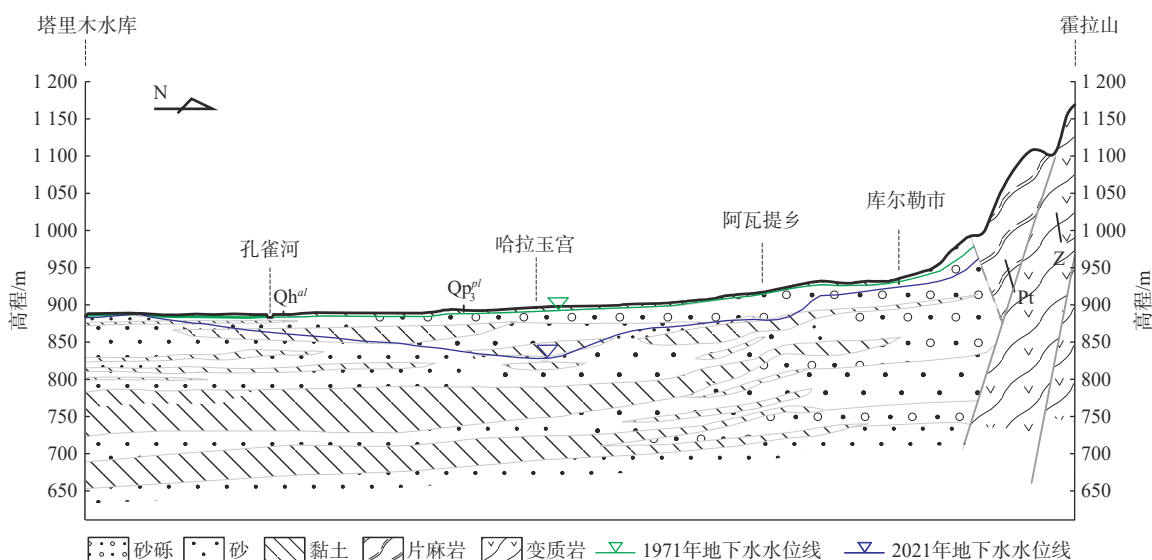


图 2 孔雀河流域 A - A' 南北向水文地质剖面图

Fig. 2 A - A' south - north hydrogeological profile of the Kongque River Basin

状地下水流场埋深分区特征图, 然后对 2 期地下水埋深栅格数据相减, 获得 50 年来地下水埋深变幅图。

遥感数据采用中国自然资源航空物探遥感中心提供的高分 1 号 16 m×16 m 分辨率卫星影像数据; 同时在孔雀河中下游胡杨林敏感脆弱区布设河流地下水监测断面, 河水水位利用 DX -LLX-1C 型河水水位自动监测设备, 地下水水位利用具有气压校正的自计水位计 (Model DCX-22AA, Keller AG für Druckmesstechnik, Winterthur, Switzerland) 进行连续监测, 频率为 2 次/h, 获得河岸带地下水埋深数据。为分析河岸带胡杨林与地下水埋深间的响应关系, 在生态输水前后选取高分一号 2014、2016、2018 年卫星影像, 使用 ENVI 软件计算归一化植被指数分析河岸带胡杨林植被覆盖度; 并通过历史数据及断面监测数据绘制 1971、2015、2021 年河流-地下水关系剖面图。

$$I_{NDVI} = (I_{NIR} - R) / (I_{NIR} + R) \quad (1)$$

式中:  $I_{NDVI}$ ——归一化植被指数;

$I_{NIR}$ ——遥感影像中近红外波段的反射值;

$R$ ——遥感影像中的红光波段反射值。

### 3 结果

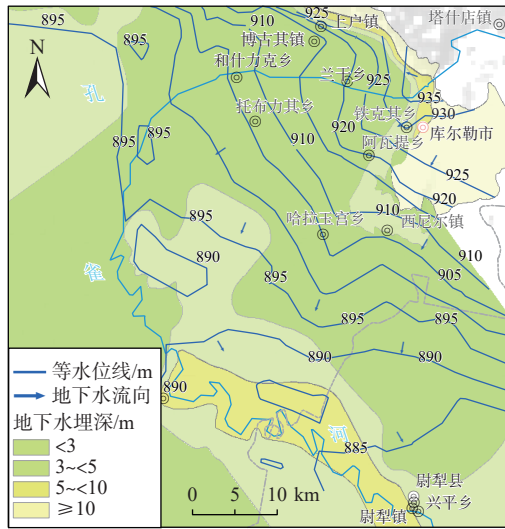
#### 3.1 1971 年地下水流场特征

1971 年地下水水位等值线埋深分区, 见图 3(a)。由图可知, 地下水水位高程在 878 ~ 939 m 之间; 北部霍拉山—库尔勒市一带地下水水位高程较高, 中部哈拉玉宫乡—尉犁县一带地下水水位高程较低。地下水整体流向为东北向西南流动, 水力梯度基本平缓,

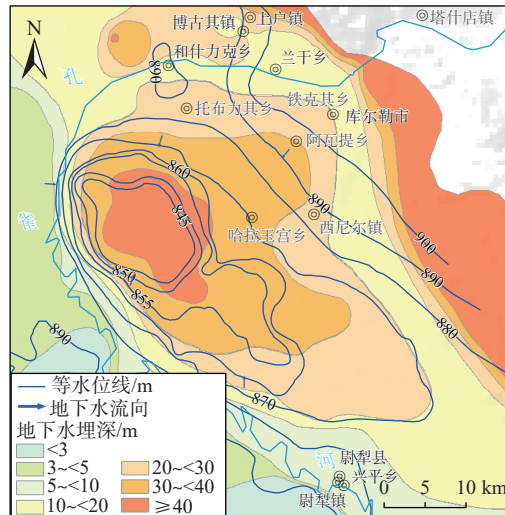
约为 0.61‰ ~ 1.17‰。上游河流下渗补给地下水, 中下游地下水溢出带, 地下水以泉排泄为主, 形成泉集河, 最终排泄于孔雀河, 地下水补给河流。1971 年流域基本处于天然状态, 区内地下水水位埋深普遍在 1 ~ 5 m 之间, “河套”灌区 (北、西、南三面环孔雀河的冲洪积平原区) 内地下水水位埋深总体在 1 ~ 3 m, 在孔雀河中下游地下水补给河水区, 地下水水位埋深大于 3 m, 其中下游普惠乡—尉犁县一带, 地下水水位埋深为 5 ~ 10 m, 面积约为 279.01 km<sup>2</sup>。

#### 3.2 2021 年地下水流场特征

2021 年地下水水位等值线埋深分区, 见图 3(b)。从图中可以看出, 研究区地下水水位埋深普遍在 5 ~ 50 m 之间, 库尔勒市往东近山前戈壁水位埋深局部大于 50 m, 孔雀河中上游西北部和什力克乡一带与“河套”灌区内地下水水位埋深达到 20 ~ 50 m, 面积约为 2 663.59 km<sup>2</sup>。区内地下水水位高程在 827 ~ 908 m 之间, 其中兰干乡及阿瓦提乡以北和普惠乡以南地下水水位偏高, 大致在 890 m, 且“河套”灌区内出现明显的降落漏斗, 水位高程为 840 ~ 870 m, 并以 870 m 等水位线为漏斗边界, 圈定面积约为 817.23 km<sup>2</sup>, 漏斗中心位于哈拉玉宫乡往西 15 km 处, 漏斗区中心部位地下水水位埋深最高达到 55.55 m。在孔雀河中下游, 水力梯度向漏斗中心位置明显增大, 达到 8.43‰。地下水由四周向漏斗区流动, 强烈改变了天然流场形态及河流-地下水补排关系, 地下水排泄由泉水和蒸发排泄变为以人工排泄为主, 普惠乡下游地下水以补给孔雀河水变为接受孔雀河渗漏补给。



(a) 1971 年



(b) 2021 年

图 3 1971 和 2021 年地下水水位等值线与埋深分区

Fig. 3 Map of groundwater level contour and burial depth partition in 1971 and 2021

### 3.3 1971—2021 年地下水时空异变特征

#### 3.3.1 地下水流场演化特征

根据两期流场对比分析,潜水面形态发生了明显变化。中上游地区地下水水位埋深由 1971 年小于 3 m 到 2021 年大于 10 m,中下游水力坡度变陡,潜水面呈滑梯式流向“河套”灌区,形成地下水漏斗。这说明近 50 a,该区域受人工开采影响巨大,地下水水位下降明显,同时引起地下水动力场发生根本性变化,对区内河流与地下水补排关系产生重要影响。1971 年以前的天然状态下,中上游地下水水位埋深普遍小于 3 m,河流渗漏补给地下水,下游地下水水位埋深处于 5~10 m 之间,最终向孔雀河排泄。2021 年地下水由四周向漏斗区中心流动,地下水排泄由原先的蒸发、泉排泄转

变为人工排泄为主,使整个“河套”灌区地下水接受孔雀河补给,其中“河套”西南边界水力坡度骤增以加大对漏斗区的侧向补给。

#### 3.3.2 地下水水位埋深降幅特征

根据 1971 年和 2021 年的地下水水位埋深,得到 1971 年与 2021 年地下水水位变幅(图 4),研究区总面积为 3 650.49 km<sup>2</sup>,地下水水位普遍下降 10~40 m,“河套”灌区内地下水水位埋深差异最为明显,最大降幅达到 50.55 m。在河套灌区的中部、哈拉玉宫乡的西南部一带地下水水位累计降幅大于 40 m 的面积为 204.69 km<sup>2</sup>,占总面积的 5.61%。由中心到四周,地下水水位累计降幅逐渐减小,其中降幅 20~40 m 的面积为 1 735.81 km<sup>2</sup>,占比 47.55%。孔雀河中下游普惠乡一尉犁县一带,地下水水位累计降幅在 5~20 m 之间,面积为 1 018.56 km<sup>2</sup>,占比 27.90%。向南部塔里木水库方向,地下水水位累计降幅 1~5 m 的面积为 418.94 km<sup>2</sup>,占比 11.48%。

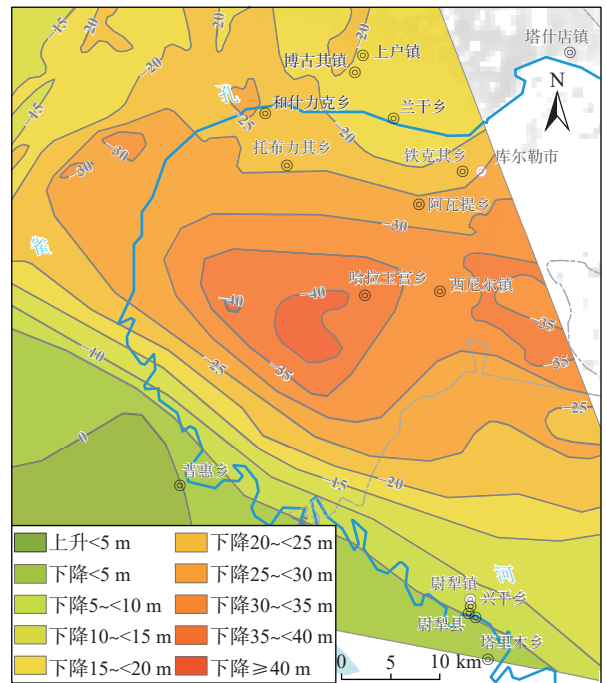


图 4 1971—2021 年地下水水位变幅

Fig. 4 Variation of groundwater level from 1971 to 2021

#### 3.3.3 典型监测孔地下水水位埋深动态曲线特征

301、302、303 和 304 典型监测孔(位置见图 1)年际地下水水位埋深见图 5。孔雀河流域地下水水位下降速率分为 2 个阶段:2006—2016 年为第一阶段,该阶段内,位于“河套”灌区 301、302 孔地下水水位呈持续下降趋势,地下水水位埋深最大下降达到 18~24 m,位于中下游河道附近 303、304 孔地下水水位同

样呈下降趋势,水位埋深最大下降 2~10 m;2016 年开始生态输水工程后为第二阶段,该阶段内 301、302 孔下降速率明显减缓或略微上升,303、304 孔呈明显上升趋势。

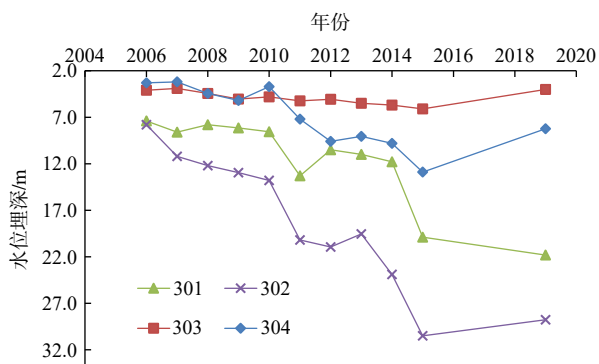


图 5 301、302、303 和 304 监测孔地下水水位埋深年际变化  
Fig. 5 Inter-annual variation of groundwater level burial depth in monitoring holes 301, 302, 303 and 304

同时通过位于漏斗范围内的 1347、1408 和 1410 典型监测孔(图 1),分析其 2019 年年内地下水水位监测数据(图 6),可明显看出孔雀河流域灌区内,年内的 3 月春灌期和 6 月的农作物灌溉期,人为开采导致地下水水位大幅度下降,年内变幅达到 10 m 以上,是研究区当前地下水的主要排泄途径,说明该区域地下水动态类型为开采型。

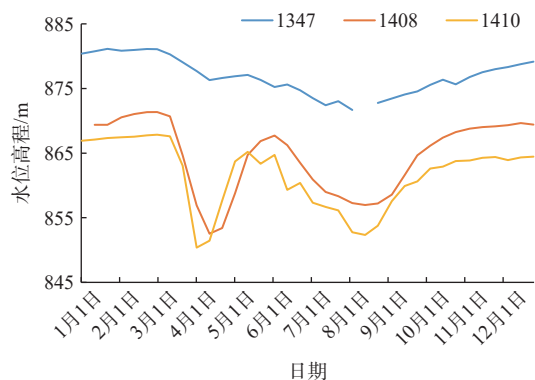


图 6 漏斗范围内典型监测孔 2019 年地下水埋深变化  
Fig. 6 Annual variation of groundwater level depth variation in typical monitoring holes within the funnel range in 2019

## 4 讨论

### 4.1 地下水演化对胡杨林生态系统的影响

孔雀河中下游河岸带典型天然植被主要以胡杨为主。胡杨是一种极其依赖地下水的植物。在天然流场下,普惠乡一尉犁县孔雀河中下游河岸带,由于河流切割潜水面,地下水补给河水,导致地下水水位

较低,维持在 3~10 m 之间。众多研究表明,河道附近胡杨的适生水位约为 4 m,8~10 m 为胡杨生存的临界地下水水位<sup>[31-34]</sup>。因此,该区域水位一旦下降 3~5 m,将会对胡杨生长造成严重影响。

利用分辨率为 16 m×16 m 的高分 1 号卫星影像数据对孔雀河中下游河岸带胡杨林进行遥感解译,位置见图 1。

统计 2014、2016、2018 年生长季同期的 NDVI,分析孔雀河中下游重点段中不同土地利用类型  $I_{NDVI}$  的平均空间变化特征(表 1)。

首先,通过人工解译和野外核查圈定河流区域。然后,将该河段胡杨林  $I_{NDVI}$  值分为 5 部分:  $I_{NDVI} \leq 0$  对应的是荒漠裸地,  $0 < I_{NDVI} \leq 0.05$  对应草地、灌木或低密度胡杨林,  $0.05 < I_{NDVI} \leq 0.1$  表示中等密度胡杨林,  $0.1 < I_{NDVI} \leq 0.2$  表示高密度胡杨林,而  $I_{NDVI} > 0.2$  指示零星分布的耕地。如图 7 所示该处植被覆盖率偏低,除河岸带胡杨林外基本为无植被覆盖( $I_{NDVI} \leq 0$ )的裸土沙地,面积占比 60% 以上。2014—2016 年,该重点地段的裸地和天然胡杨林面积几乎保持不变,2016 年生态输水后通过监测孔 303、304 数据(图 5)可知地下水水位逐渐上升 2~4 m,恢复到 4~8 m,处于胡杨生长的适生水位到临界水位之间,  $I_{NDVI}$  也发生显著变化,2014—2018 年,裸地减少了近 17%,天然胡杨林植被覆盖区增大了约 17%<sup>[35]</sup>,小斑块状的耕地覆盖区多数消失了,植被覆盖的连续性明显增强。结果反映了生态输水对孔雀河中下游胡杨林生态区产生了积极影响。

表 1 孔雀河流域下游胡杨林分布区 NDVI 的变化特征(修改自 Zhang 等<sup>[36]</sup>)

Table 1 Variation characteristics of NDVI of the *Populus euphratica* forest in the lower reaches of the Kongque River Basin (modified from Zhang et al.<sup>[36]</sup>)

土地类型	$I_{NDVI}$ 变化范围	分布区域面积变化率/%		
		2014年	2016年	2018年
荒漠裸地	$I_{NDVI} \leq 0$	77.87	75.94	61.41
草地、灌木、低密度胡杨林	$0 < I_{NDVI} \leq 0.05$	19.47	19.73	35.57
中等密度胡杨林	$0.05 < I_{NDVI} \leq 0.1$	2.10	3.21	2.65
高密度胡杨林	$0.1 < I_{NDVI} \leq 0.2$	0.54	1.03	0.35
耕地	$I_{NDVI} > 0.2$	0.02	0.09	0.02

结合历史资料和断面监测数据,分析地下水水位变化情况。在 1971 年天然状态下,地下水补给河流,至现状条件下,区域地下水水位大幅下降,流场变异,变成河流补给地下水,甚至完全脱节,具体情况如各年剖面(图 8)所示。1971 年河道附近地下水水位埋深在 3~5 m 之间,孔雀河接受地下水补给,水位位于胡



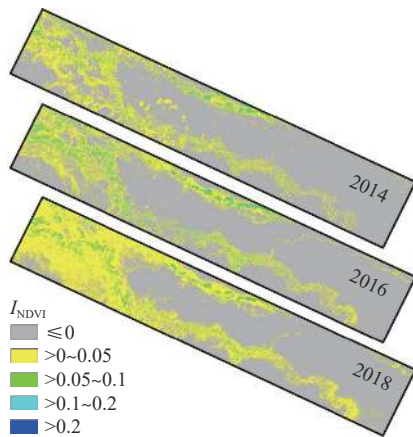


图7 孔雀河流域下游胡杨林分布区 NDVI 的变化特征 (修改自 Zhang 等<sup>[36]</sup>)

Fig. 7 Variation characteristics of NDVI of the *Populus euphratica* forest in the lower reaches of the Kongque River Basin (modified from Zhang et al.<sup>[36]</sup>)

杨的适生水位,胡杨生长趋势良好。随着水位不断下降,当地下水水位低于河床底部 2 m 以上,二者之间出现非饱和带,河流与地下水发生脱节。到 2015 年,河道附近地下水水位埋深降至超过 12 m,河流对地下水的补给演变为脱节型模式,水位超过胡杨用水的临界水位,胡杨林大面积萎缩。2016 年,孔雀河开始生态输水工程后,河道附近地下水水位逐渐恢复到 7 m 左右,地下水逐渐开始接受河流渗漏补给,水位高于胡杨的临界水位线,河岸林生态恢复初见成效。

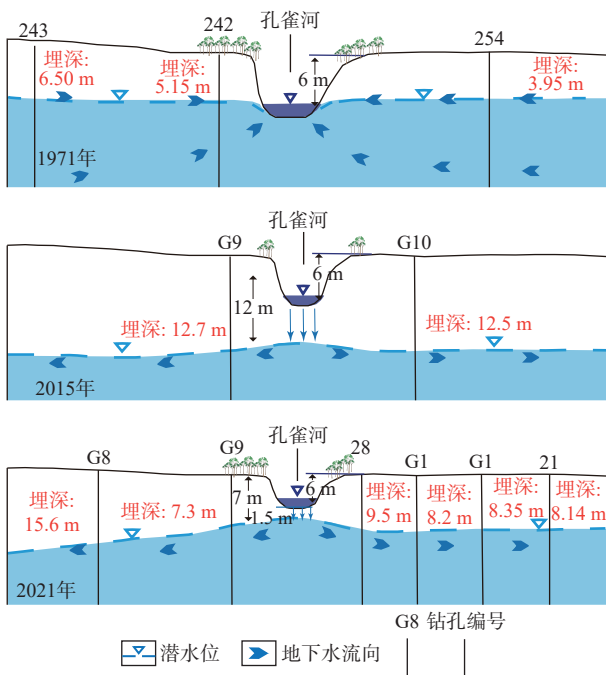


图8 河流-地下水关系剖面

Fig. 8 Profile of the river-groundwater relationship

## 4.2 人类活动对地下水与生态的影响

水循环演化与人为用水结构变化息息相关。近年来孔雀河上游焉耆盆地人为过量引用地表水,导致孔雀河从 2000 以来年径流总量一直呈下降趋势,流域水资源总量减少。同时,自 2000 年以来,孔雀河流域存在明显的土地利用变化,相较于 1971 年,2021 年渠系工程修建密集,修筑面积广,在渠系大量引用地表水的同时进一步减小了下游河流径流量,使得下游来水不足,地下水补给量相应减少。另一方面,研究区耕地面积从 1 400 km<sup>2</sup> 增大到近 2 300 km<sup>2</sup>,增大了 64%,导致地下水开采量增大了 6 倍,地下水排泄量大幅增加。以上原因综合导致区域地下水排泄从历史的蒸发、泉排泄为主变成了人工排泄为主,地下水水位大幅下降,难以恢复,导致流场严重变异,影响中下游河岸带胡杨林用水。

根据统测调查数据显示研究区“河套”灌区内开采水井数量多且分布密度大,多数为承压水井。但相关研究表明<sup>[36]</sup>,研究区内潜水<sup>3</sup>H 浓度为 9.6~25.5 TU,<sup>14</sup>C 含量为 73.4~108.6 pmC;承压水<sup>3</sup>H 浓度明显偏低为 0.4~8.6 TU,<sup>14</sup>C 含量为 11.2~85.0 pmC。潜水表现为高氡高放射性碳特征,承压水表现为低氡低放射性碳特征,二者之间分界明显,关系不大,承压水难以接受潜水越流补给,说明灌区内地下水开采势必会导致承压水头持续下降,在保障农业生产情况下超采治理难度较大。

2016 年开展生态输水工程及近年来孔雀河地区采取了节水灌溉、压地减水、水电双控、封填机井、阶梯水价等一系列管控措施后,2017—2021 年地下水储量呈增加趋势,土壤含水量明显增加<sup>[37]</sup>,研究区内地下水埋深和生态输水量呈负相关,水位整体逐步回升,距离河道越近抬升越明显<sup>[38]</sup>,中下游  $I_{NDVI}$  和植被覆盖率也显著上升,胡杨生态林处于逐步恢复阶段。但现状条件下,面临极端干旱条件下断流或突然停止生态输水,地下水能否满足胡杨林用水需求尚不明确。所以建议相关部门在维持生态输水的基础上,合理控制流域耕地面积,同时加大潜水的开采利用,继续减少承压水开采量,将潜水位保持在一个良好的水平,减少潜水蒸发,同时有效提高河渠入渗补给能力,合理利用形成良性循环,逐步改善区域流场,找到水土资源配置的平衡点才是解决问题的关键。

## 5 结论

(1) 1971—2021 年孔雀河流域土地利用变化明



显,耕地面积快速扩张,人为过量引用河水、开采承压水,进而造成流域地下水动力场的改变,区域水位下降难以恢复、形成漏斗、流场变异,其中地下水开采是研究区地下水水位连续下降的主导因素。

(2)孔雀河流域地下水水位埋深整体呈大幅下降趋势,地下水降幅幅度最大区域处于“河套”灌区内,中心已形成一个明显漏斗,最大降幅为 50.55 m,流域内水位降幅大于 40 m 的面积为 204.69 km<sup>2</sup>,水位降幅为 5~40 m 的面积 2 754.37 km<sup>2</sup>。

(3)在生态输水前流域下游河流-地下水已由地下水补给河流转变为过渡脱节型或脱节型河流补给地下水,严重影响河岸胡杨林用水;生态输水后,水位上升 2~4 m,NDVI 快速恢复,2014—2018 年天然胡杨林植被覆盖度增加了 17%,水位上升对胡杨林生长起到积极作用。

基于本次研究,建议孔雀河流域进一步优化调整水资源开发利用格局。维持生态输水工程、保持合理输水量的同时,流域中游“河套”灌区内需采取节水灌溉、退地压采和封填机井等措施减少承压水开采量。优化水土资源配置方案,逐步改善区域流场,有效改善胡杨林生态环境质量。

#### 参考文献 (References) :

- [ 1 ] 陈亚宁,李忠勤,徐建华,等.中国西北干旱区水资源与生态环境变化及保护建议[J].中国科学院院刊,2023,38(3):385-393. [ CHEN Yaning, LI Zhongqin, XU Jianhua, et al. Changes and protection suggestions in water resources and ecological environment in arid region of northwest China[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2023, 38(3): 385 - 393. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 2 ] 刘丹露,王易初.内蒙古高原东部内流河水系结构与流域特征的关系[J].北京大学学报(自然科学版),2021,57(4):699-706. [ LIU Danlu, WANG Yichu. Relations between structural properties of endorheic rivers and basin characteristics in eastern inner Mongolia Plateau[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2021, 57(4): 699 - 706. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 3 ] DATRY T, BOULTON A J, BONADA N, et al. Flow intermittence and ecosystem services in rivers of the Anthropocene[J]. *Journal of Applied Ecology*, 2018, 55(1): 353 - 364.
- [ 4 ] 王平.西北干旱区间歇性河流与含水层水量交换研

究进展与展望[J].*地理科学进展*, 2018, 37(2): 183 - 197. [ WANG Ping. Progress and prospect of research on water exchange between intermittent rivers and aquifers in arid regions of northwestern China[J]. *Progress in Geography*, 2018, 37(2): 183 - 197. (in Chinese with English abstract) ]

- [ 5 ] SONG Shuhong, NIE Zhenlong, GENG Xinxin, et al. Response of runoff to climate change in the area of runoff yield in upstream Shiyang River Basin, Northwest China: a case study of the Xiyang River[J]. *Journal of Groundwater Science and Engineering*, 2023, 11(1): 89 - 96.
- [ 6 ] 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. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 7 ] 朱海勇,陈永金,刘加珍.塔里木河中游水盐梯度下的物种多样性研究[J].*生态环境学报*, 2011, 20(增刊 2): 1226 - 1234. [ ZHU Haiyong, CHEN Yongjin, LIU Jiazhen. Variations in species diversity with the gradients of depths and quality in groundwater at the middle reaches of Tarim River[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2011, 20(Sup2): 1226 - 1234. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 8 ] 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. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 9 ] 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. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 10 ] 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.

- (in Chinese with English abstract) ]
- [11] XU Hailiang, YE Mao, SONG Yudong, 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(1): 37 – 48.
- [12] YE Zhaoxia, CHEN Yaning, LI Weihong, 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(1): 9 – 17.
- [13] HAO Xingming, LI Weihong. 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(11): 7605 – 7616.
- [14] HE Zhibin, ZHAO Wenzhi. 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.
- [15] ZHANG Shuhua, YE Zhaoxia, CHEN Yaning, et al. Vegetation responses to an ecological water conveyance project in the lower reaches of the Heihe River Basin[J]. *Ecohydrology*, 2017, 10(6): e1866.
- [16] 张波, 王开录, 李发明. 石羊河流域水资源调度与青土湖生态恢复研究 [J]. *甘肃水利水电技术*, 2017, 53(10): 9 – 12. [ ZHANG Bo, WANG Kailu, LI Faming. Study on water resource scheduling and ecological restoration of Qingtu Lake in Shiyang River Basin[J]. *Gansu Water Resources and Hydropower Technology*, 2017, 53(10): 9 – 12. (in Chinese) ]
- [17] 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 & Engineering Geology*, 2022, 49(5): 22 – 31. (in Chinese with English abstract) ]
- [18] 张军峰, 孟凡浩, 包安明, 等. 新疆孔雀河流域人工绿洲近 40 年土地利用/覆被变化 [J]. *中国沙漠*, 2018, 38(3): 664 – 672. [ ZHANG Junfeng, MENG Fanhao, BAO Anming, et al. LUCC analysis of the upstream of the kongqi river, Xinjiang, China[J]. *Journal of Desert Research*, 2018, 38(3): 664 – 672. (in Chinese with English abstract) ]
- [19] WANG Luchen, YU Kun, CHANG Liang, et al. Response of glacier area variation to climate change in the Kaidu-Kongque River Basin during the last 20 years[J]. *China Geology*, 2021, 4(3): 1 – 14.
- [20] 常存, 包安明, 李均力. 塔里木河四源区耕地时空演变的驱动分析 [J]. *干旱区研究*, 2016, 33(2): 239 – 245. [ CHANG Cun, BAO Anming, LI Junli. Spatiotemporal evolution of cultivated land in the headwaters of the Tarim River[J]. *Arid Zone Research*, 2016, 33(2): 239 – 245. (in Chinese with English abstract) ]
- [21] 王璐晨, 韩海辉, 张俊, 等. 塔里木河流域土地利用及人类活动强度的时空演化特征研究 [J/OL]. *中国地质*, (2023-05-16) [2023-08-14] <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1167.P.20230515.1716.006.html>. [ WANG Luchen, HAN Haihui, ZHANG Jun, et al. Research on the response of land use change to human activities in the Tarim River Basin[J/OL]. *China Geology*, (2023-05-16) [2023-08-14]. (in Chinese with English abstract) ]
- [22] 何志刚. 孔雀河下游生态输水现状及修复对策探析 [J]. *陕西水利*, 2019(9): 39 – 40. [ HE Zhigang. Analysis on the current situation and restoration measures of ecological water transport in the lower reaches of the Peacock River[J]. *Shaanxi Water Resources*, 2019(9): 39 – 40. (in Chinese) ]
- [23] 吾买尔江·吾布力, 李卫红, 朱成刚, 等. 新疆孔雀河流域生态退化问题与保护恢复研究 [J]. *新疆环境保护*, 2017, 39(1): 8 – 12. [ Wumaierjiang Wubuli, LI Weihong, ZHU Chenggang, et al. Research on ecological degradation, protection and restoration of Peacock River Basin, Xinjiang[J]. *Environmental Protection of Xinjiang*, 2017, 39(1): 8 – 12. (in Chinese with English abstract) ]
- [24] 王晓勇, 朱立峰, 董佳秋, 等. 干旱-半干旱区下垫面变化对地下水水位的影响 [J]. *西北地质*, 2019, 52(2): 227 – 235. [ WANG Xiaoyong, ZHU Lifeng, DONG Jiaqiu, et al. Influence of underlying surface change on hydrogeological conditions in arid and semi-arid regions[J]. *Northwestern Geology*, 2019, 52(2): 227 – 235. (in Chinese with English abstract) ]
- [25] 陈亚宁, 李卫红, 徐海量, 等. 塔里木河下游地下水水位对植被的影响 [J]. *地理学报*, 2003, 58(4): 542 – 549. [ CHEN Yaning, LI Weihong, XU Hailiang, et al. The influence of groundwater on vegetation in the lower reaches of Tarim River, China[J]. *Acta Geographica*

- Sinica, 2003, 58(4): 542 – 549. (in Chinese with English abstract) ]
- [26] 李卫红, 吾买尔江·吾布力, 马玉其, 等. 基于河—湖—库水系连通的孔雀河生态输水分析 [J]. 沙漠与绿洲气象, 2019, 13(1): 130 – 135. [ LI Weihong, Wumaierjiang Wubuli, MA Yuqi, et al. Ecological water conveyance project based on river-lake-reservoir connected system in the Kongque River[J]. Desert and Oasis Meteorology, 2019, 13(1): 130 – 135. (in Chinese with English abstract) ]
- [27] 李肖杨, 陈亚宁, 刘璐, 等. 博斯腾湖流域水资源管理决策支持系统设计与实现 [J]. 水资源保护, 2020, 36(6): 53 – 59. [ LI Xiaoyang, CHEN Yaning, LIU Lu, et al. Design and implementation of water resources management decision support system in the Bosten Lake Basin[J]. Water Resources Protection, 2020, 36(6): 53 – 59. (in Chinese with English abstract) ]
- [28] 刘璐, 陈亚鹏, 李肖杨. 生态输水对孔雀河地下水埋深及植被的影响 [J]. 干旱区研究, 2021, 38(4): 901 – 909. [ LIU Lu, CHEN Yapeng, LI Xiaoyang. Effect of ecological water conveyance on groundwater depth and vegetation in the Kongque River[J]. Arid Zone Research, 2021, 38(4): 901 – 909. (in Chinese with English abstract) ]
- [29] WANG Luchen, YU Kun, CHANG Liang, et al. Response of glacier area variation to climate change in the Kaidu-Kongque River Basin during the last 20 years[J]. China Geology, 2021, 4(3): 1 – 14.
- [30] 库尔勒地区区域水文地质测量报告(1: 20 万) [R]. 乌鲁木齐: 新疆地质局水文地质工程地质大队, 1971. [ Regional hydrogeological survey report of korla region (1: 200, 000) [R]. Urumqi: Xinjiang Geological Bureau Hydrogeology and Engineering Geology Brigade, 1971. (in Chinese) ]
- [31] 陈亚宁, 陈亚鹏, 李卫红, 等. 塔里木河下游胡杨脯氨酸累积对地下水水位变化的响应 [J]. 科学通报, 2003, 48(9): 958 – 961. [ CHEN Yaning, CHEN Yapeng, LI Weihong, et al. Response of proline accumulation of populus euphratica in the lower reaches of Tarim River to the change of groundwater level[J]. Chinese Science Bulletin, 2003, 48(9): 958 – 961. (in Chinese) ]
- [32] 刘加珍, 陈亚宁, 李卫红, 等. 荒漠河岸植被的受损过程与受损机理分析 [J]. 地理学报, 2006, 61(9): 946 – 956. [ LIU Jiazhen, CHEN Yaning, LI Weihong, et al. The process and mechanism of degradation of desert riparian vegetation[J]. Acta Geographica Sinica, 2006, 61(9): 946 – 956. (in Chinese with English abstract) ]
- [33] 韩路, 王海珍, 牛建龙, 等. 荒漠河岸林胡杨群落特征对地下水水位梯度的响应 [J]. 生态学报, 2017, 37(20): 6836 – 6846. [ HAN Lu, WANG Haizhen, NIU Jianlong, et al. Response of *Populus euphratica* communities in a desert riparian forest to the groundwater level gradient in the Tarim Basin[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37 (20): 6836 – 6846. (in Chinese with English abstract) ]
- [34] 叶茂, 徐海量, 龚君君, 等. 不同胸径胡杨径向生长的合理生态水位研究 [J]. 地理科学, 2011, 31(2): 172 – 177. [ YE Mao, XU Hailiang, GONG Junjun, et al. Rational ecological groundwater level of populus euphraticawith different diameter in lower reaches of Tarim River[J]. Scientia Geographica Sinica, 2011, 31(2): 172 – 177. (in Chinese with English abstract) ]
- [35] ZHANG Haoyue, WANG Xusheng, ZHANG Jun, et al. Spatial-temporal variations in vegetation with changing water stress in the Kongqi River Basin, China[J]. Ecohydrology, <https://doi.org/10.1002/eco.2546>.
- [36] 张俊, 尹立河, 顾小凡, 等. 同位素水化学指示的新疆孔雀河流域地下水与地表水关系 [J]. 西北地质, 2021, 54(1): 185 – 195. [ ZHANG Jun, YIN Lihe, GU Xiaofan, et al. Study on the relationship between groundwater and surface water in Xinjiang Kongque River Basin using isotopes and hydrochemistry method[J]. Northwestern Geology, 2021, 54(1): 185 – 195. (in Chinese with English abstract) ]
- [37] 何玉春, 魏光辉. 孔雀河流域胡杨林区生态输水效益评估 [J]. 地下水, 2022, 44(5): 119 – 122. [ HE Yuchun, WEI Guanghui. Evaluation of ecological water conveying benefit in the Populus euphratica forest area in the Peacock River Basin[J]. Ground Water, 2022, 44(5): 119 – 122. (in Chinese with English abstract) ]
- [38] 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. (in Chinese with English abstract) ]

编辑: 张若琳