

喀什噶尔河下游生态输水的生态效应及优化方案研究

王军政¹,刘传秀^{*2},阿地里江·奴尔买买提¹,姚新旺¹,喻少平¹,张天举²

(1.新疆维吾尔自治区塔里木河流域叶尔羌水利管理中心,莎车 844700;

2.中国科学院新疆生态与地理研究所,乌鲁木齐 830011)

【摘要】生态输水是促进干旱区内陆河流域生态系统恢复的重要途径。喀什噶尔河作为中国最大的内陆河——塔里木河的重要源流之一,其下游河段曾经断流严重、生态退化显著,近年来实施的生态输水工程在一定程度上改善了其下游河岸生态系统。本文全面梳理喀什噶尔河下游河道断流原因,结合遥感影像数据和实地调研数据,全面评估了该区域近年来实施的生态输水工程的生态水文效应,并进一步提出了生态输水的优化方案。研究结果表明,生态输水有助于提高土壤含水量,抬升地下水位,研究区域输水期土壤含水量可维持在 25.77%~37.34%之间,地下水位抬升至 0.09~0.29 米之间。同时,生态输水会促进植被的生长,使归一化植被指数(NDVI)和植被覆盖度(FVC)小于 0.1 的区域面积分别增加 8.62%和 1.34%;不仅如此,生态效应会随着输水次数的增加形成累积效应。因此,建议根据当地实际情况持续开展生态输水和水系连通工程,确保喀什噶尔河下游生态系统持续改善,最终与周围水系建立稳定的水力联系。研究结果有助于区域水资源合理分配,为干旱流域生态系统的保护与恢复提供重要的科学参考。

【关键词】内陆河;河道断流;生态输水;生态效应

中图分类号:K903 文献标识码:A 文章编号:1673-288X(2025)05-0077-10 DOI:10.19758/j.cnki.issn1673-288x.202505077

在全球气候变化和人类活动加剧的背景下,干旱区内陆河流域的水资源时空分配不均问题日益突出,导致下游尾间区域的生态系统功能退化严重^[1]。生态输水,作为一种主动的生态恢复措施,通过向因生态需水无法满足而受损的生态系统进行人工调水,以补充其水分亏缺,遏制生态结构破坏与功能丧失,成为维系干旱区生态安全的重要手段^[2,3],其科学意义在于恢复河流的生态水文联系,维系河岸带植被的健康,最终促进区域生态系统的稳定与可持续发展^[4,5]。

喀什噶尔河是塔里木盆地重要的内陆河,其下游的胡杨林是维系区域生态平衡的重要屏障。然而,近几十年来,由于上游水资源开发利用强度增大,喀什噶尔河下游河道长期处于断

流状态,导致沿岸依赖河水侧向补给和潜水溢出带的胡杨林因地下水位持续下降而大面积衰退甚至死亡^[6]。区域水资源供需矛盾的加剧,使得生态用水长期被挤占,沿河生态环境的恶化趋势不断加速^[7,8]。

为扭转该区域生态退化的严峻局面,当地政府于 2022 年启动了对喀什噶尔河下游的生态输水工程,截至目前已实施 3 次,累计输水超过 2.16 亿立方米。初步观测结果显示,输水对沿岸植被恢复起到了积极作用,如胡杨生长状况改善、灌木萌发及土壤环境改良等。然而,这些多为定性描述,缺乏对生态输水后“地表水-地下水-土壤-植被”这一完整响应链的系统性、量化评估,特别是对生态水文过程的综合效益分析不足,致使未来的输水方案(如水量、

基金项目:国家自然科学基金项目“中亚干旱区生态系统演变与可持续性研究”(W2412135)。

作者简介:王军政(1965—),男,教授级高级工程师,研究方向为水文水资源,E-mail:1109987842@qq.com。

通讯作者:刘传秀(1994—),女,博士,研究方向为水文水资源,E-mail:liuchuanxiu21@mails.ucas.ac.cn。

时机、频率) 仍要依赖经验决策。

因此,本研究依托喀什噶尔河下游已布设的地下水监测断面和生态监测样地,通过多源数据融合与多学科交叉的方法,实现以下目标:(1)综合运用遥感影像解译、野外生态调查与定位监测数据,系统揭示生态输水后,下游河岸带生态系统对生态输水的响应特征;(2)综合评估生态输水工程的综合效益,提出下一步生态输水的优化方案。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

喀什噶尔河流域是塔里木河流域“九源一

干”的重要组成部分,地处塔里木盆地西部边缘,流域地表水的多年平均径流量 $45.92 \times 10^8 \text{ m}^3$,仅次于阿克苏河与叶尔羌河,与和田河水量相当^[9]。流域源流水系主要由克孜河、盖孜河、库山河、恰克玛克河、博古孜河及依格孜牙河等六条河构成^[10],六条主要源流的多年平均径流量依次为 $21.44 \times 10^8 \text{ m}^3$ 、 $13.78 \times 10^8 \text{ m}^3$ 、 $6.41 \times 10^8 \text{ m}^3$ 、 $1.74 \times 10^8 \text{ m}^3$ 、 $1.58 \times 10^8 \text{ m}^3$ 、 $0.97 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。喀什噶尔河下游是分布着大片胡杨林的哈拉坤胡杨林保育区,这是喀什噶尔河下游荒漠河岸林生态廊道重要的组成部分,在保护绿洲生态安全、维系喀什噶尔河下游荒漠生态系统生物多样性等方面发挥着重要的生态服务功能。

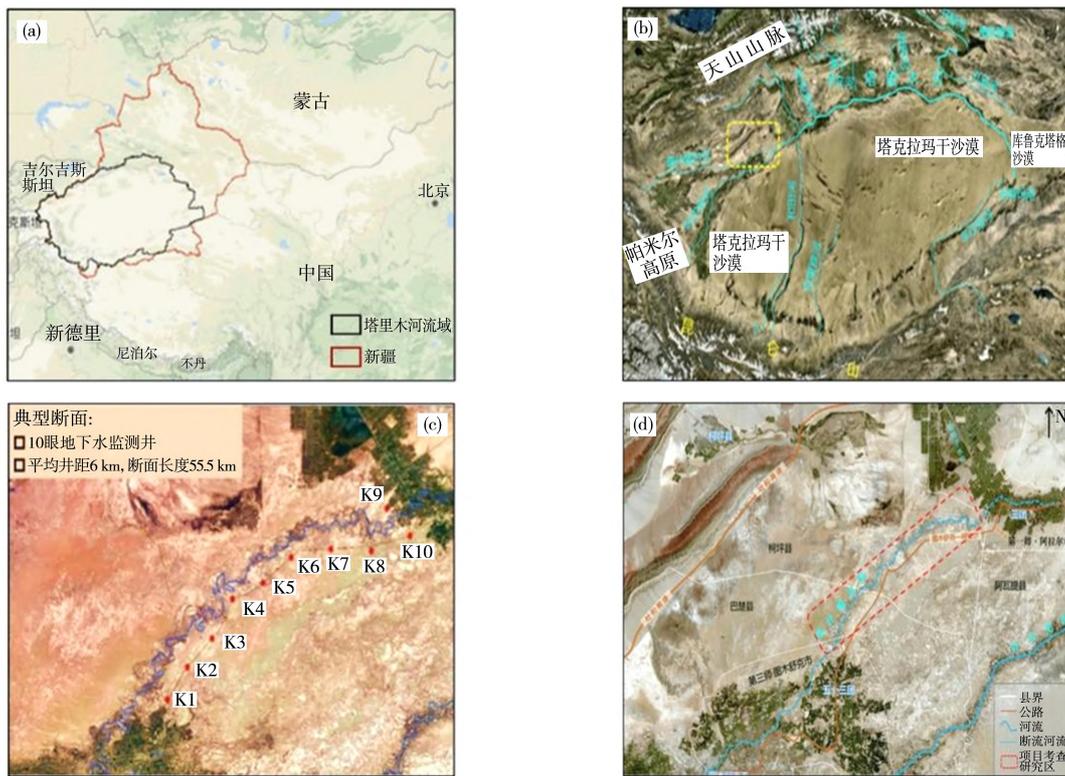


图1 (a)图:新疆及塔里木河流域的位置,(b)图:塔里木河流域河流及山脉的分布,(c)图:本研究设置的地下水井位置分布,(d)图:研究区位置

1.2 数据来源

径流和水资源相关数据来自新疆喀什噶尔河流域管理局发布的数据;用水数据来自新疆统计年鉴;土地利用数据来自第三次土地调查数据;土壤含水量数据来自野外测量数据。地下水数据来自野外自测数据,我们在研究区沿

河道方向,布设了10个监测断面,并在每一断面布设一眼地下水观测井(监测井深度均为20m),在各个监测井内距地面15m的深处安装水位计,用于监测水位。数据采集频率为每4小时记录一次,即于北京时间0:00、4:00、8:00、12:00、16:00、20:00自动采集数据。

1.3 研究方法

本研究采用遥感技术与野外调查相结合的综合监测评估方法,2020年至2025年,逐年对喀什噶尔河下游进行广泛的生态调查,并通过航空摄影和卫星图像评估相关年份喀什噶尔河下游生态环境变化。同时,通过收集河岸走廊生态系统相关生态水文数据,基于卫星监测方法,跟踪生态输水工程的响应随时间的变化。具体来讲,首先,开展实地取样工作,对土壤含水量和地下水埋深进行动态监测,基于遥感影像识别盐碱地和植被动态变化数据;其次,绘制生态输水前后季节性和年度生态水文特征的变化图。

1.3.1 植被指数计算

为了探究植被生长对生态输水的响应,我们选择利用哨兵 10m 遥感影像识别归一化植被指数(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)和植被覆盖度(Fractional Vegetation Cover, FVC)作为反映植被生长状况及植被覆盖的植被指数,通过比较其生态输水前后的变化,定量评价生态输水的生态效益。NDVI的计算公式为:

$$NDVI = \frac{\rho_{nir1} - \rho_{red}}{\rho_{nir1} + \rho_{red}} \quad (1)$$

式中, ρ_{nir1} 和 ρ_{red} 分别代表近红外波段1和红波段的反射率。

FVC是衡量区域地表植被覆盖度的重要指标,它与NDVI具有强正相关关系。基于像元二分模型和NDVI数据,采用以下公式计算植被覆盖度:

$$FVC = \frac{NDVI - NDVI_{min}}{NDVI_{max} - NDVI_{min}} \quad (2)$$

$NDVI_{min}$ 为裸土或无植被覆盖区域的NDVI,取累计百分比为5%时的NDVI值; $NDVI_{max}$ 为植被完全覆盖区域的NDVI,取累计百分比为95%时的NDVI值。

1.3.2 最小二乘法线性回归分析

这是一种用于研究自变量与因变量之间线性关系的统计方法,通过最小化预测值与实际

值之间差异的平方和,找到最能代表自变量和因变量之间关系的直线。即对于给定的数据点,找到使残差平方和最小的直线方程。对于一组数据 $(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n)$, n 是数据点的个数,方程表示为:

$$y = mx + b \quad (3)$$

$$m = \frac{n(\sum xy) - (\sum x)(\sum y)}{n(\sum x^2) - (\sum x)^2} \quad (4)$$

$$b = \bar{y} - m\bar{x} \quad (5)$$

2 结果与分析

2.1 喀什噶尔河河道断流分析

多年来,喀什噶尔河流域上中游绿洲内大规模的水土开发和粗放的绿洲农业发展,造成流域地表水过度开发利用,导致喀什噶尔河自布哈拉枢纽以下的伽师总场二五分水闸处开始,基本常年断流,断流河道长度达416km(详见图2)。实地调查发现,喀什噶尔河自布哈拉枢纽以下老河道多处已被农田侵占,现河道为布哈拉枢纽泄洪通道,河道被农田束窄至不足10m宽,局部只有3~5m宽;自伽师总场二五分水闸后,喀什噶尔河河道内基本无水,且在代玉代克乡多处河段被农田完全侵占;拜库勒水库下游喀什噶尔河断流河道形态基本完整,河道下切显著,宽度可达20~50m,至小海子水库段,部分河道被用作小海子水库至永安坝水库的调水通道和农田排渠;永安坝水库下游喀什



图2 喀什噶尔河河道断流节点及断流河道位置

噶尔河断流河道形态基本完整,曾作为洪水期泄洪通道,其河道宽度普遍在 50m 左右,下切显著,深度可达 2~5m 不等;自新疆生产建设兵团第一师三团到阿瓦提县南部的喀什噶尔河断流河道有多段被农田和公路切断,部分河道被用作农田排渠,河道形态不完整。

研究发现,喀什噶尔河源流区水系连通性不足,缺乏水资源均衡配置的基础是造成该河道断流的主要原因之一。喀什噶尔河源流区域包括克孜河、盖孜河、库山河、恰克玛克河、博古孜河及依格孜牙河等六条河流各成水系,与喀什噶尔河干流基本无水力联系,除了最大的源流克孜河具有基本贯通的河道外,其余河流均在出山口后被各自下游绿洲消耗殆尽,无法汇集到整个流域中下游。此外,流域内水资源的过度开发和低效利用,加剧了喀什噶尔河水资源空间配置失衡,也是导致断流的一个重要原因。喀什噶尔河流域内以农牧业为主,农业用水占比 95%左右,地区自有水资源整体无法满足其水资源需求,总体地区开发利用率远超出全疆平均水平和南疆平均水平,严重超出地区自身承载力。同时,流域内粗放的水资源利用模式降低了水资源的有效利用,这也是喀什噶尔河河道断流的主要原因。实地调研发现,喀什噶尔河流域内水利设施比较齐全,干渠、支干渠、支渠、斗渠和农渠水利设施基本配套。蓄水工程共有 36 座,引水工程有 64 处,调水工程有 3 处,农用及工业用、人居饮用等机井有 7000 余眼,灌区渠系工程总长度超过 38000km,其中,干渠的防渗率为 52.29%;支渠和斗渠的综合防渗率不足 30%,渠系最后一公里的农渠防渗率更低。地表水开发利用程度高,利用效率偏低,中游、下游用水需求难以由自身流域满足。

2.2 生态输水的生态水文效应

2.2.1 土壤含水量变化

为了探究土壤含水量对生态输水的响应,我们根据生态输水时间(每年 8 月份开始)分析了各年份 8 月以后的土壤含水量变化(详见

图 3)。研究发现,生态输水有助于表层土壤含水量增加。随着生态输水的结束,土壤含水量总体呈波动下降趋势。具体地,2022 年,随着间歇性生态输水的进行,土壤含水量在 8 月下旬以前总体含量较高,约在 25.77%~37.34%之间;随着输水的间歇性中断,土壤含水量逐步下降,至 9 月中旬,土壤含水量出现最小值,约为 16.69%;输水结束后,土壤水将以耗水为主,包括植被蒸腾作用和土壤蒸散发等,进而导致土壤含水量降低。2023 年,土壤含水量随着生态输水的结束,总体呈下降趋势,由输水初的 31.84%降到输水后的 18.63%。不同年份间含水量变化存在差异。2023 年 8 月下旬以后的土壤含水量总体高于 2022 年同期,介于 0.2%~9.99%之间,这可能是因为 2023 年生态输水是基于 2022 年进行的,随着输水的再次进行,土壤水又一次得到补充,使得土壤含水量较高。由此可见,生态输水有助于提高土壤含水量,输水次数越多越有助于土壤含水量积累。

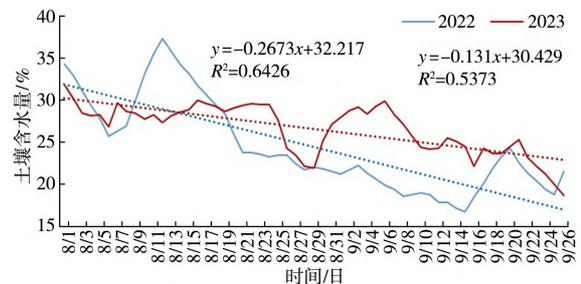


图 3 输水后土壤含水量的逐日变化过程

2.2.2 地下水埋深变化

分析 2022 年 8 月份以后的地下水埋深变化,发现随着生态输水的进行,地下水位总体呈抬升趋势,不同年份间有差异(详见图 4)。具体地,2022 年,随着间歇性生态输水的进行,地下水埋深先快速下降,由生态输水初期的 5.8 米下降到 5.53 米;随着输水的间歇性中断,地下水埋深稍有抬升,抬升至 5.72 米,之后逐步下降,至年底约下降到 5.61 米;输水结束后,随着时间的推移,地下水位逐步抬升。2023 年地下水埋深总体呈逐步下降的趋势,由生态输水

初期的 5.73 米下降到年末的 5.53 米。相对于 2022 年 8—9 月,2023 年同期地下水位总体较低,介于 0.06~0.18 米之间。这可能是因为 2022 年生态输水持续时间相对较长,地下水能长时间得到有效补充,而 2023 年输水时间相对较短,输水量相对较少。2023 年自 10 月中旬起,地下水位总体高于 2022 年同期,介于 0.01~0.15 米之间。由于 2023 年生态输水是在 2022 年的基础上进行的,随着输水的再次进行,地下水又一次得到补充,使得地下水位逐渐抬升。可见,生态输水有助于抬升地下水位。

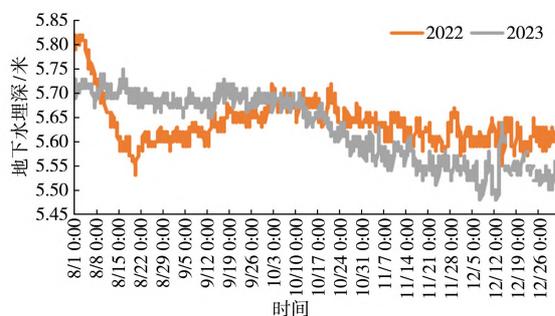


图 4 输水后地下水埋深的逐日变化过程

2.2.3 盐碱地变化

盐碱地的变化对植被生长和生态稳定至关重要。我们对比了生态输水前后的盐碱化土地面积,发现生态输水可以降低土壤盐分,缩减盐碱地面积。具体讲,生态输水前(2020年)盐渍化土地面积约为 113.57km²,生态输水后(2023年)盐渍化土地面积约为 100.65km²,输水前后盐渍化土地面积约减少了 12.92km²(详见图 5)。可见,生态输水有助于降低土壤盐渍化,从而改善土壤质量。

这种改善效果主要源于以下几个相互关联的驱动因素:首先,输水形成的径流和下渗过程对表层及剖面土壤盐分起到了直接的淋溶与稀释作用,将盐分淋洗至植物根系层以下,这是降盐最直接的物理过程^[11]。其次,下渗的淡水补充了浅层地下水,形成了淡水“垫层”,不仅稀释了高矿化度的地下水,更重要的是抑制了强烈的蒸发返盐过程,从源头上切断了盐分向地表累积的关键路径^[12]。最后,水分条件的改善

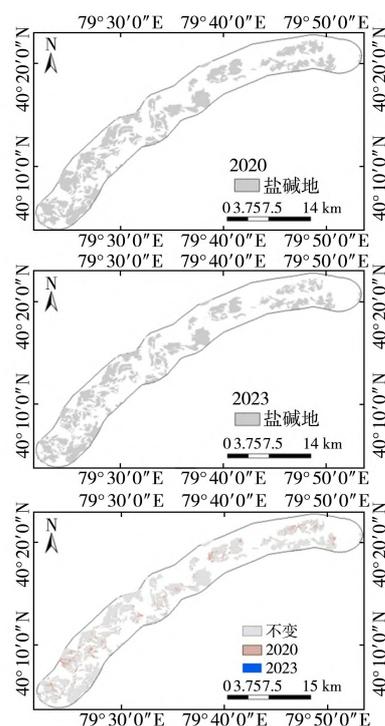


图 5 输水后盐碱地变化过程

促进了胡杨、红柳等植被的恢复,而植被的生长通过遮蔽地表、降低蒸发、改良土壤结构,进一步强化了水分的下渗和盐分的淋洗效率,形成了“输水—植被恢复—盐渍化减轻”的良性正反馈。因此,适时适量的生态输水是该区域生态修复的关键举措。它不仅能直接补充土壤水分、淋洗表层盐分,更能通过重塑局地水盐平衡和促进植被恢复,实现对盐碱化土地的持续性改良,为区域生态系统的健康稳定提供基础。

2.2.4 植被变化

生态输水对植被的影响最为显著。我们对比了输水前后河岸带植被的变化以便更好地分析生态输水带来的生态效应。计算分析 2020 年至 2024 年的 NDVI 发现,研究区主要以 NDVI 值小于 0.1(低)的植被覆盖区域为主;NDVI 值介于 0.1 和 0.3 之间(中)的区域主要分布在沿河道的两侧;NDVI 值大于 0.3(高)的主要分布在更靠近河道的区域(详见图 6)。从时间上来看,NDVI 值小于 0.1 的区域面积总体上呈现先减少后增加的趋势,由 2020 年的 237.65km² 减

少到2022年的233.18km²,之后增加到2024年的258.12km²,近5年增幅为8.62%;NDVI值介于0.1和0.3之间的区域面积呈现先增加后减少趋势,由2020年的89.84km²增加到2022年的92.43km²,之后减小到2024年的70.76km²,近5年减幅为21.24%;NDVI值大于

0.3的区域面积呈现先增加后减少趋势,由2020年的2.26km²增加到2022年的3.55km²,之后减小到2024年的0.46km²,近5年减幅为79.74%。从植被归一化指数的角度看,低覆盖度(NDVI<0.1)的植被面积显著增加,约占研究区总面积的78.38%。

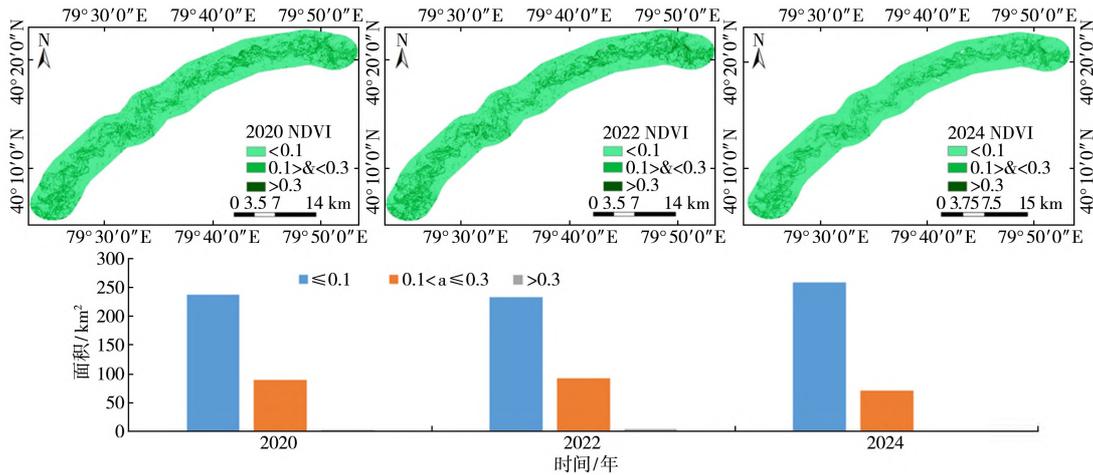


图6 NDVI时空变化及面积占比

这主要是由于研究区以裸地为主,在生态输水后,可能出现大面积的“水体”和“湿润裸土”,同时在原本的裸土上可能会长出稀疏的草本植物,导致NDVI<0.1的区域显著增加。而对于NDVI>0.1的区域呈现“先增后减”的趋势,主要是由于在输水初期,充足的水分迅速激活了河岸带休眠的植被,特别是草本植物,使其快速生长返青,导致NDVI>0.1的区域面积在短期内达到峰值。然而,随着地表水分的蒸发和下渗,以及草本植物完成其短暂的生命周

期,植被的生理活性开始下降并逐渐枯萎,使得NDVI>0.1的区域面积随之回落。这一过程清晰地揭示了干旱区生态系统对脉冲式水资源输入的敏感依赖性和动态响应过程。

测算近5年的FVC发现,研究区主要以FVC值小于0.1(低)的区域为主;FVC值介于0.1和0.3之间(中)的区域主要分布在沿河道的两侧;FVC值大于0.3(高)的零星分布在更靠近河道并沿河道分布的区域(详见图7)。从时间上来看,FVC值小于0.1的面积总体上呈

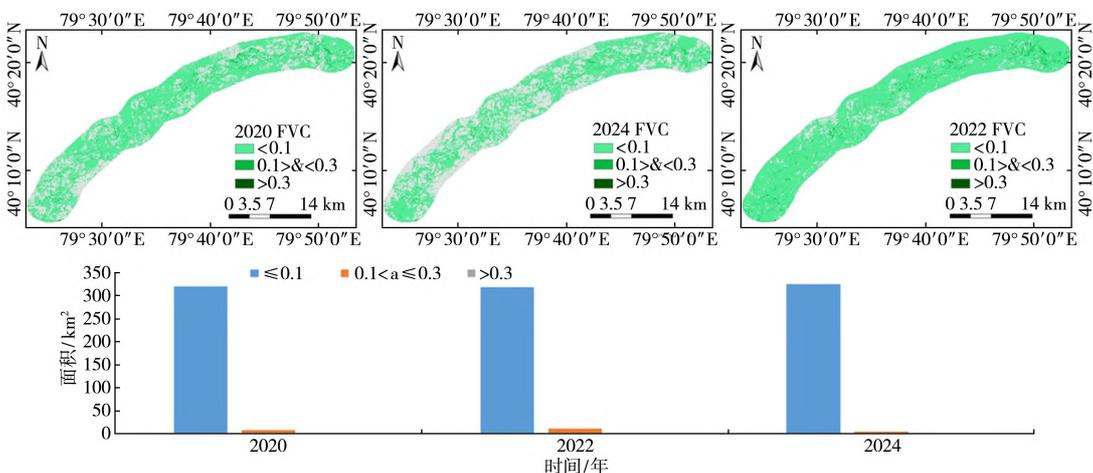


图7 FVC时空变化及面积占比

先减少后增加的趋势,由 2020 年的 320.91km^2 减少到 2022 年的 318.71km^2 ,之后增加到 2024 年的 325.21km^2 ,近 5 年增幅为 1.34%;FVC 值介于 0.1 和 0.3 之间的面积呈先增加后减少趋势,由 2020 年的 8.88km^2 增加到 2022 年的 11.10km^2 ,之后减小到 2024 年的 4.61km^2 ,近 5 年减幅为 48.09%;FVC 值大于 0.3 的面积呈逐渐减少的趋势,由 2020 年的 0.07km^2 减少到 2022 年的 0.05km^2 ,之后减小到 2024 年的 0.03km^2 ,近 5 年减幅为 51.68%。可见植被覆盖度表现为低覆盖度的植被(<0.1)面积显著增加,约占研究区总面积的 98.59%。

2.3 喀什噶尔河流域水系连通管理建议

基于河道断流和生态输水效应的分析发现,喀什噶尔河流域下游断流导致的生态问题,需要通过加强流域水资源科学管理,深化流域水利管理体制,强化并落实流域最严格水资源管理制度,制定科学合理的规划及调水/补

水和治理方案等一系列措施来解决。从物质基础与管理体制方面共同为水系连通性的改善提供可行性保障,进而提升流域水资源承载力,遏制生态退化趋势,最终实现人与自然和谐共生。

建议充分利用现有的水利枢纽、库、渠等水利设施,以及喀什噶尔河流域的源流河道,在流域上游构建连通各主要源流河流的有利于“丰枯互补,空间互济”的水系连通体系(详见图 8),在中游开展河道综合治理疏浚工程,在下游构建叶尔羌河与喀什噶尔河流域的河-河、河-库水系连通体系。针对喀什噶尔河下游断流多年,原有河道普遍存在过水不畅、被农田侵占等问题,特别是下游上段与末段,已经失去明显的河道与河岸岸线,被农田挤占或被作为农田排渠等问题,要实现流域的水系连通,打通断流河道间的水力联系,结合具体情况与实际需求,逐步疏浚并综合治理过水河道。

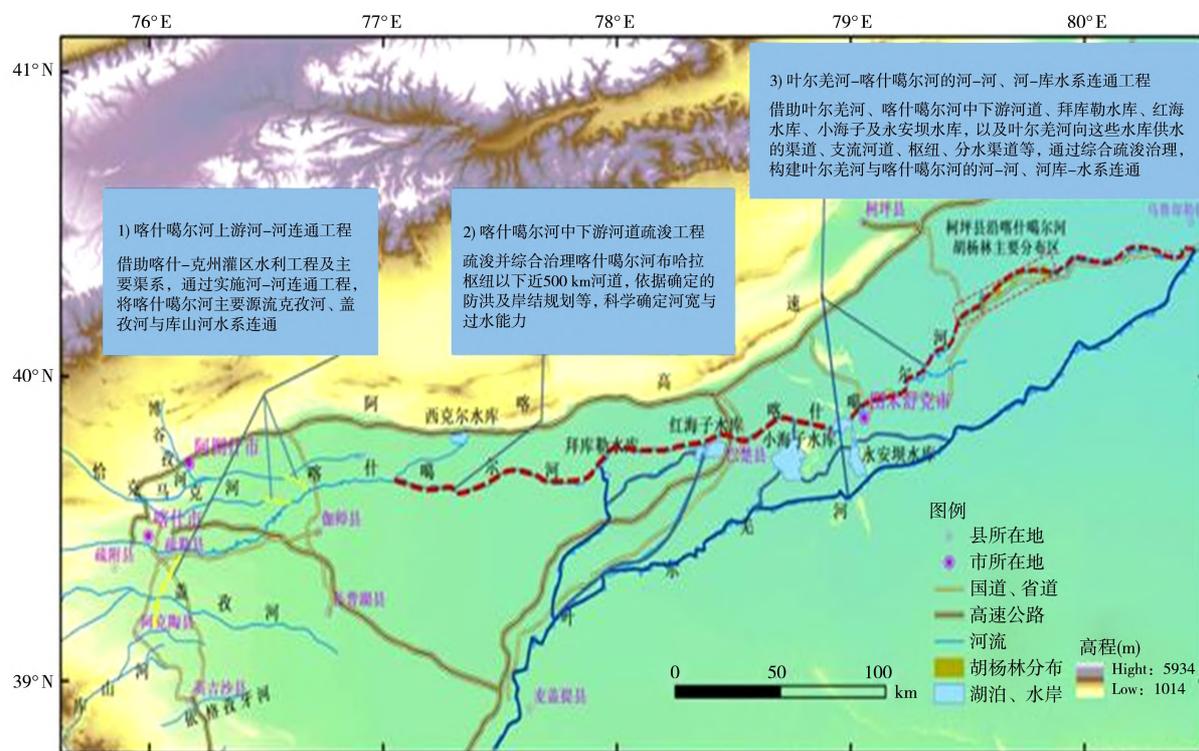


图 8 喀什噶尔河下游水系连通建设措施

此外,阿克苏河作为塔里木河水量最大的源流,水资源充沛,由库玛拉克河和托什干河汇

流而成。建议加强阿克苏河下游与喀什噶尔河下游的水系连通,加强从沙井子灌区到哈拉坤

胡杨林区荒漠河岸林的生态修复和生态需水保障。借助胜利渠、新井子水库构建阿克苏河与喀什噶尔河下游河道的水力联系,洪水期由胜利渠、新井子水库向哈拉坤胡杨林区实施生态输水,充分利用汛期流经柯坪县阿恰勒镇的苏贝希沟-加依洛萨依河洪水资源,通过疏导引入哈拉坤胡杨林区(详见图9),以补充单一由叶尔羌河向胡杨林区调水的不足。



图9 胜利渠-新井子水库与苏贝希沟-加依洛萨依河补给哈拉坤胡杨林生态需水示意图

3 讨论与结论

本研究全面分析了喀什噶尔河下游生态输水对河岸生态系统的影响。作为一种间歇式水文干预,其效果并非均质,而是受水分输移路径与不同植被功能群的响应共同影响。在空间上,生态恢复效应以河道为中心向外梯度递减:近河道区域因直接接受地表淹没和快速的地下水补给,成为“水-土-植被”系统全面改善的核心区;而远离河道的区域则依赖于滞后且衰减的地下水侧向补给,生态改善程度相对有限。在生物群落上,不同功能群响应迥异:以胡杨为代表的深根乔木对地下水位的恢复作出长期、根本的响应,是衡量生态系统恢复成效的关键指标;而浅根的灌木与草本则对表层土壤水分表现出高度敏感的快速响应,其种群繁盛呈现快速生长与迅速衰退特点。深刻理解这一时空异质性规律,对于未来优化输水方案(如调控水量与时长)以惠及更广泛的胡杨林区域,并建立兼顾短期爆发式与长期持续性效益的综合评估体系,具有重要意义。

目前,生态输水已成为中国生态修复与保护的国家战略,并从早期的单点工程措施演进为融合“制度-技术-市场”的协同治理体系,其核心在于确立“以水定绿、以水定发展”的可持续原则,为全球干旱区治理贡献了中国方案^[13-15]。例如,塔里木河下游的生态输水常被视为西北内陆河治理的经典范式。自2000年以来,通过实施“小流量、多时段”的精准输水策略并结合根系导灌等技术,该工程不仅实现了显著的生态恢复成效,也为干旱区荒漠化治理积累了宝贵经验^[2,3,16]。喀什噶尔河的生态输水实践因其独特的地理与社会经济背景,提供了与塔里木河范式形成互补的差异化经验。作为一个涉及跨境水源协调、高密度农业区节水置换,以及尾间湖泊湿地抢救性修复的复杂系统,喀什噶尔河的治理经验对于完善和推广国家层面的生态补偿与水资源管理政策具有独特的价值。

本研究证实,对喀什噶尔河下游进行生态输水,是改善区域水文状况、修复退化生态系统的有效途径。研究结果清晰地表明,持续的生态补水不仅能显著提高土壤含水量、抬升地下水位,还能有效降低土壤盐渍化,从而为河岸带植被的恢复与生长创造有利条件。因此,为巩固并扩大这些已取得的生态效益,实现流域的可持续发展,必须坚持工程措施与制度建设并重。这需要一个多维度的综合策略:在制度层面,应致力于完善跨境生态补偿机制,探索将“水电换生态水”等模式纳入国际合作框架;在政策层面,需建立农业节水强制性反哺生态的闭环机制,并辅以水权交易等市场化工具;在技术层面,应总结艾西曼湖等的成功经验,推广标准化的湿地智慧修复方案;在社会层面,应通过将生态管护纳入公益性岗位、探索“生态合作社+碳汇收益”等模式,激活社区参与的治理动能。通过将有效的工程措施与创新的制度、政策、技术及社会治理模式相结合,才能为该区域构筑坚实的生态安全屏障,为促进区域可持续

发展与生态文明建设提供有力支撑。

参考文献:

- [1] TAO H, GEMMER M, SONG Y, et al. Ecohydrological responses on water diversion in the lower reaches of the Tarim River, China [J]. *Water Resources Research*, 2008, 44 (8): 1944–7973.
- [2] 李玉朋, 陈亚宁, 叶朝霞, 等. 塔里木河下游输水 20a 的生态响应[J]. *干旱区地理*, 2021, 44(03): 700–707.
- [3] 陈亚宁, 吾买尔江·吾布力, 艾克热木·阿布拉, 等. 塔里木河下游近 20a 输水的生态效益监测分析[J]. *干旱区地理*, 2021, 44(03): 605–611.
- [4] BAO A M, HUANG Y, MA Y G, et al. Assessing the effect of EWDP on vegetation restoration by remote sensing in the lower reaches of Tarim River [J]. *Ecological Indicators*, 2017, 74: 261–275.
- [5] BARNETT J, ROGERS S, WEBBER M, et al. Sustainability: Transfer project cannot meet China's water needs [J]. *Nature*, 2015, 527(7578): 295–297.
- [6] 盛方毓, 高凡, 徐海量, 等. 2000~2022 年喀什噶尔河流域植被覆盖度时空变化及其影响因素分析[J]. *环境科学*, 1–24.
- [7] 支博远, 闫志云, 曾妍妍, 等. 喀什噶尔河流域灌区地下水质空间变化及影响因素分析[J]. *节水灌溉*, 2022(10): 37–43.
- [8] 申得有, 李升, 高远, 等. 新疆喀什噶尔河流域土壤盐渍化分布特征及时空演化分析[J]. *科学技术与工程*, 2022, 22(24): 10461–10469.
- [9] 陈亚宁, 郝兴明, 陈亚鹏, 等. 新疆塔里木河流域水系连通与生态保护对策研究[J]. *中国科学院院刊*, 2019, 34(10): 1156–1164.
- [10] 郭丽君. 新疆喀什噶尔河流域水生态系统现状评价及修复对策研究[J]. *新疆环境保护*, 2024, 46(01): 28–34.
- [11] 魏恒, 赵成义, 孙栋元. 塔里木河上游绿洲典型地表特征土壤水分入渗性能研究[J]. *冰川冻土*, 2010, 32(04): 837–843.
- [12] 杨劲松, 姚荣江, 王相等, 等. 中国盐渍土研究: 历程、现状与展望[J]. *土壤学报*, 2022, 59(01): 10–27.
- [13] 于永明, 刘淑娟, 袁宏波, 等. 生态输水对青土湖白刺灌丛沙堆土壤水分及质地的影响[J]. *西北林学院学报*. 2025, 40(03): 171–178.
- [14] 马玉其, 王军政, 程勇, 等. 新疆开都——孔雀河流域天然植被生态需水量研究[J]. *环境与可持续发展*, 2020, 45(03): 139–143.
- [15] 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(02): 31–40.
- [16] 刘斌. 2023 年度叶尔羌河流域生态输水效益评估[J]. *云南水力发电*, 2025, 41(02): 5–8.

Research on Ecological Effects and Optimization Scheme of Ecological Water Conveyance in the Lower Reaches of Kashgar River

WANG Junzheng¹, LIU Chuanxiu^{*2}, Adilijiang·NURMAMAT¹, YAO Xinwang¹,
YU Shaoping¹, ZHANG Tianju²

(1. Yarkant River Water Conservancy Management Center of Tarim River Basin, Shache 844700, China;

2. Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China)

Abstract: Ecological water transfer as an important way to promote ecosystem restoration in inland river basins in arid basins. As one of the major tributaries of the Tarim River—China's largest inland river, the Kashgar River has experienced severe water shortages in its lower reaches, resulting in significant ecological degradation. In recent years, ecological water conveyance projects have saved the ecological systems along the lower reaches of the river. However, there is still a lack of research on the quantitative assessment of the effectiveness of ecological water diversion in restoring the ecology of this region. Therefore, this paper comprehensively sorts out the causes of river flow interruption in the lower reaches of Kashgar River, combines remote sensing image data and field survey data, comprehensively evaluates the ecological hydrological effects of the ecological water conveyance project implemented in the study area since 2022, and further proposes an optimization plan for ecological water conveyance. The results show that ecological water conveyance enhances soil moisture content and raises the groundwater level. During the water conveyance period, the soil moisture content in the study

area can be maintained between 25.77% and 37.34%, and the groundwater level can be raised to between 0.09 and 0.29 meters. At the same time, ecological water conveyance promotes vegetation growth, increasing the areas with Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) and Fractional Vegetation Cover (FVC) less than 0.1 by 8.62% and 1.34%, respectively. Furthermore, the ecological effects accumulate with the number of water conveyances. Therefore, we propose that water conveyance and water system connectivity projects should be carried out continuously based on local conditions to ensure the continued improvement of the ecosystem in the lower reaches of the Kashgar River, and to establish stable hydraulic connections with surrounding water systems as soon as possible. The research results will help with the rational allocation of regional water resources and provide important scientific reference for the protection and restoration of ecosystems in arid river basins.

Keywords: inland river; river flow interruption; water conveyance; ecological effects

(责任编辑 安祺)