

文章编号:0559-9350(2022)01-0031-12

注重荒漠区胡杨林生态保护与修复的汉渗轮灌研究

白涛¹, 姬宏伟¹, 邓铭江^{1,2}, 周海鹰³, 凌红波⁴, 杨鹏年⁵

(1. 西安理工大学 教育部西北水资源与环境生态重点实验室, 陕西 西安 710048;

2. 新疆寒旱区水资源与生态水利工程研究中心, 新疆 乌鲁木齐 830000;

3. 新疆维吾尔自治区水利厅, 新疆 乌鲁木齐 830000; 4. 中国科学院 新疆生态与地理研究所, 新疆 乌鲁木齐 830000;

5. 新疆农业大学 水利与土木工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830000)

摘要: 针对传统生态调度“只放不灌”“大水漫灌”造成的生态水利用效率低、灌溉面积有限等实际问题, 本文基于荒漠区耐旱性植被胡杨特殊的生物节律, 提出汉渗轮灌的灌溉理念, 明确了汉渗轮灌的定义、内涵, 构建了汉渗轮灌系统和灌溉模式, 搭建了汉渗轮灌的基本框架。以我国最大的内陆河塔里木河下游为例, 基于汉渗轮灌的灌溉模式优化塔河下游原有的工程布局, 构建双通道+沟道、汉河的面状生态输水新方式, 制定了大西海子水库实时生态调度方案, 与胡杨林的汉渗轮灌系统相结合, 实现了2020年塔河下游生态调度与汉渗轮灌的应用实践。研究表明: (1) 相比于以前生态水在河道和台特玛湖无效蒸发, 此次生态水量的蒸发量仅占总水量的0.4%, 生态水的利用效率超过83%, 大大提高了生态水的利用效率; (2) 试验区地下水位提升0.28~0.84 m, 地下水存储水量约128万m³, 初步实现了储水于地下的“地下生态水银行”, 保障了生态调度与汉渗轮灌的可持续性; (3) 汉渗轮灌新增生态输水长度7 km, 新增胡杨林生态修复面积60万m², 为胡杨林的漂种、发芽、生长等健康生境提供了良好保障。研究成果可为荒漠区保护性植被的生态保护与修复提供新的思路和方法。

关键词: 汉渗轮灌; 生态调度; 面状输水方式; 地下生态水银行; 生态保护与修复

中图分类号: TV122

文献标识码: A

doi: 10.13243/j.cnki.slxb.20210277

1 研究背景

塔里木河(以下简称“塔河”)全长1321 km, 是中国乃至世界生态最为脆弱的流域之一^[1-2]。20世纪以来, 随着大规模农业和人工绿洲的开发, 塔河水资源时空格局发生显著改变, 大西海子以下360 km河道断流近30年, 生态环境遭到严重破坏, 胡杨林面积由1950年代的5.40万hm²减少到2006年的0.73万hm²^[3-4]。随着天然植被的大面积衰败, 下游由荒漠河岸胡杨林构成的绿色走廊濒临毁灭, 塔克拉玛干与库鲁克两大沙漠已成合拢态势, 针对塔河下游的生态保护与修复已刻不容缓。

为了保护塔河的生态环境, 2000—2019年以来实施了20余次生态输水, 结束了下游河道断流30年的历史^[5]。陈亚宁等^[6]对断流河道初期输水的生态效应进行了分析, 认为, 生态输水后, 随着地下水位的抬升, 天然植被得到拯救和恢复, 植被的响应范围也逐渐扩大, 但距保护塔河下游绿色走廊的目标还有很大差距。徐海量等^[7]利用长期监测平台, 研究生态输水前后地下水的动态变化过程, 结果表明: 生态输水后河道两侧的地下水深度由输水前的6~8 m抬升到了2~4 m, 离河距离50 m以内地下水位已成顶托态势。杨鹏年等^[8]建立并求解了断流河道间断输水后两岸地下水运动的一维非稳定

收稿日期: 2021-03-22; 网络首发时间: 2021-09-15

网络首发地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1882.TV.20210914.1713.002.html>

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC0405900); 国家自然科学基金面上项目(51879213); 中国博士后科学基金项目(2019T120933, 2017M623332XB); 陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2019JLM-52, 2018JQ5145); 陕西省水利科技计划项目(2017slkj-27); 新疆维吾尔自治区水利厅规设局项目(403-1005-YBN-FT61)

作者简介: 白涛(1983-), 博士, 副教授, 主要从事水资源系统工程研究。E-mail: baitao@xaut.edu.cn

通讯作者: 邓铭江(1960-), 中国工程院院士, 教授级高级工程师, 主要从事水资源系统工程研究。E-mail: xjdmj@163.com.net

流模型,预测了生态输水后沿河地下水位的响应过程。邓铭江等^[9]研究了塔河下游生态输水与生态调度,从生态调度角度对输水策略的时间、水量、形式等进行了探讨。LING Hongbo等^[10]对生态输水后植物多样性和群落稳定性进行分析,结果表明:在地表水影响下可有效增加植物群落物种数和提高植被群落稳定性,但植被群落未达到稳定状态,原因在于尚未发挥地下水系统对荒漠植被的保护作用。王希义等^[11]对输水后的生态效益与社会经济效益进行了评价,结果表明:生态输水后,塔河下游地区的未利用地面积变化不大,水域面积增加显著,耕地和建筑用地面积有所增加,但林地和草地的面积有所减少。

上述研究主要是针对生态输水后生态水文过程模拟及生态改善效果等,缺乏对陆生植被合理、科学、有效的灌溉方式及其与植被生态需水、水库生态调度供水之间的影响研究。从国内外研究现状看^[12-14],现行的生态调度以保护对象的需水过程作为控制目标,且聚焦水库的下泄过程,对于生态水量下泄后的演进、调节、灌溉、耗水等过程缺乏系统性、基础性的研究,特别是未考虑与水库下游的闸-坝-堤-泵等生态水利工程的联合运行,导致生态调度与水库下游荒漠河岸带植被的灌溉系统相脱节,造成生态调度的需水量过大、滞留时间短、灌溉效果差等问题,理论成果难以指导实践应用。

事实上,对于地处干旱区的塔河流域而言,河道外陆生植被的灌溉方式决定了灌溉耗水过程,是衔接植被需水过程和生态调度供水过程的核心因素^[15-16]。塔河流域的生态保护对象和生态需水主要来自于斑块状分布的胡杨和柽柳等河道外陆生植被,其灌溉方式对植被需水和生态调度供水具有关键的衔接作用和影响。因此,针对塔河流域存在的生态环境恶化和生物多样性减少等实际问题,本文从水库-河道-生态闸-沟道-泵站-汉河到植被根系的全过程、大尺度生态调控出发,创新荒漠区河岸植被的灌溉理念和模式,将水库生态调度与植被的灌溉系统相结合,构建塔河流域的生态修复体系和地下水生态修复平台,旨在提高生态水的利用效率、阻断两大沙漠的合拢态势、改善和修复塔河流域的生态系统,以实现水资源综合利用与生态保护的可持续发展。

2 研究区域概况

2.1 区域概况 塔河是我国第一长内陆河,是南疆各族人民赖以生存、繁衍和发展的“生命河”“母亲河”,具有自然资源相对丰富和生态环境极端脆弱的双重特性^[17]。塔河流域下游的胡杨林“绿色走廊”是重要的生态保护基地,在阻止塔克拉玛干与库鲁克两大沙漠合拢方面发挥着重要作用^[18]。塔河下游水系较为复杂,交叉众多,河曲发育。河道在大西海子水库以下分为东西两支,东为其文阔尔河,西为老塔里木河,两河大体平行,在阿拉干汇合。因此,该地区对于生态输水后胡杨林恢复程度的评估具有一定的代表性^[19]。

2.2 存在的问题 在人为努力和自然来水偏丰的共同作用下,2000—2019年向大西海子水库下游河道累计生态输水总计81.61亿 m^3 ,平均下泄水量4.13亿 m^3 ,超额完成了“水流到台特玛湖、年均下泄3.5亿 m^3 ”的预期目标,下游生态环境得到初步改善。但是,塔河下游的生态保护与修复仍任重道远。一方面,由于生态输水方式仅采用单通道输水或双通道输水^[20],导致生态保护与修复面积受限。输水方式的单一和粗犷导致主河道两侧地下水位已呈顶托态势,输水影响区域主要集中在河道两岸的低洼滩地和生态渠道延伸的有限地带,远离干流河道以及地势高的大部分区域无法覆盖,严重威胁到植被的孕育、出芽和生长,更不利于远离主河道区域的植被保护与修复。另一方面,由于缺乏水库、生态闸等控制性水利设施,灌溉模式落后、低效,导致生态调度与植被灌溉模式脱节严重,宝贵的生态水未完全消耗在植被修复过程中,下泄水量的40%注入尾间湖泊台特玛湖,导致湖面与湿地总面积超过500 km^2 ,大大超出了台特玛湖的适宜面积^[21]。随着台特玛湖湖区生态环境日益改善,一定程度上遏制了塔克拉玛干沙漠和库鲁克沙漠的合拢。但台特玛湖作为塔河的尾间湖泊,是各种盐分的富集之地^[22],湖水丰盈时可向南溢入喀拉和顺,再向东流出注入罗布泊^[23-24]。一旦台特玛湖的面积持续扩大,延伸至罗布泊北部的超大型钾盐矿,已是微咸水湖的台特玛湖盐碱浓度将持

续上升，造成周边区域的土壤盐碱化加剧，严重危及区域生态环境健康。

鉴于此，要将台特玛湖控制在适宜面积以内，亟需转变现有的生态输水方式，提高生态水沿程的利用效率，将生态水尽量消耗在两河区间的河岸植被胡杨林生态保护与修复实践中，既能够最大限度地满足河岸植被的河道外生态水量需求，又不至于将从源流、上游输送至下游的生态水直接汇流至尾间湖泊，导致台特玛湖面积无序扩大、盐碱浓度过高、区域生态环境恶化、水资源无效蒸发和浪费等生态问题。

图1为塔河干流天然植被类型分布图，按照典型水文断面阿拉尔、新渠满、英巴扎、乌斯满和恰拉将干流划分为5个区段^[25]。

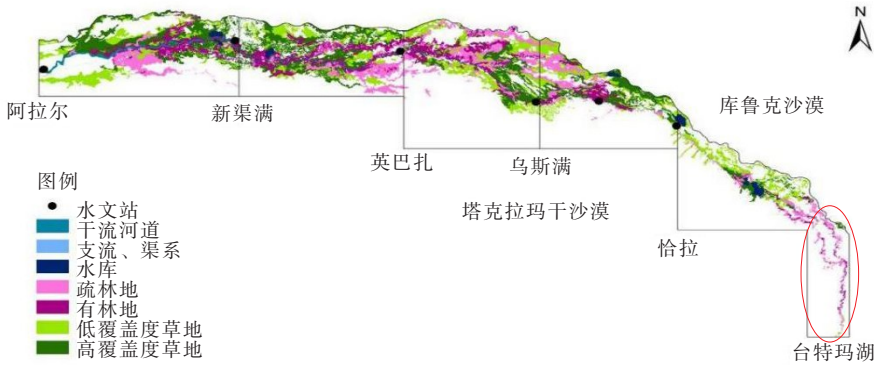


图1 塔河干流天然植被类型及分布概况

在塔河干流天然植被类型分布中，上游阿拉尔-英巴扎段、中游英巴扎-恰拉段的植被分布广、类型丰富，生态修复效果显著。下游恰拉断面以下，特别是大西海子水库下游的两河区间到尾间湖泊台特玛湖区间的空白区域(图1右下角)，植被稀少，仅沿主河道两侧500 m范围内分布疏林地，距离河道外700~1100 m胡杨体型较小且出现大面积枯亡的现象^[26]，大部分地区植被荒芜。20多年的生态输水对该区域的生态保护与修复效果并不显著，加之塔克拉玛干与库鲁克沙漠的双向风蚀作用和合拢态势，大西海子水库下游的河道生境和河岸植被面临严峻的威胁。作为季节性河流的塔河，受源流区、上中游区生活、生产和生态“三生”用水逐级消耗影响，大西海子水库下游的河道长达半年处于断流状态，特别是每年1—4月的枯水期，由于水库蓄水量不足、调节能力有限，大西海子水库下游阿拉干断面以下的干流河道内和河道外植被的河谷生态系统极其脆弱。

针对区域内胡杨林大面积枯亡、植被荒芜、河道生境和河岸植被生境敏感脆弱等诸多生态问题，亟需以大西海子水库下游的两河区间到尾间湖泊台特玛湖区间的空白区域作为重点区域，开展河岸植被灌溉模式的创新与多尺度生态调度研究，以实现塔河下游的生态保护与修复目标。

3 汉渗轮灌的基本框架

河岸植被传统的灌溉方式以“大水漫灌”“洪水淹灌”为主，灌溉范围集中在河道两岸的低洼滩地和自然沟汊延伸的有限地带，垂向于干流河道方向的大部分区域无法得到有效灌溉，导致生态供水量大、滞留时间短、实际耗水少、灌溉效果差等一系列问题，浪费了有限、宝贵的水资源，生态保护与修复的目标难以实现。

在此背景下，为了扩大生态植被灌溉面积、增加灌溉强度和深度、提高灌溉效率，发挥流域内闸、坝、堤、泵等生态水利工程和自然沟道、河汊的直接调控作用，本文基于胡杨耐旱耐碱耐风沙、抗热抗风沙、水平根系发达且可萌发幼苗等特殊的物候节律，创新性提出了河岸保护性植被汉渗轮灌的灌溉新理念，旨在以最少的生态水获得最佳的生态保护与修复效果。

3.1 汉渗轮灌的定义及基本内涵 以寒旱区、荒漠区河道外的保护性植被胡杨为生态修复对象，通过天然沟道、河汊和已修建的生态闸、雍水坝、阻水堤、抽水泵等工程措施，构建“库、河、闸、

沟、泵、汉”联合调控的面状输水方式，根据植被需水和来水情势，在沟道和汉河形成先漫灌、后轮灌的适时、适量、适度的植被生态灌溉方式，称之为汉渗轮灌。

汉渗轮灌的基本内涵主要体现在“引、漫、渗、储、轮”五个方面。(1)“引”表示生态引水，即通过水库、河道、生态闸、沟道、汉河、低水头可移动式泵站等方式，实现远离干流河道、地势较高区域的生态引水，扩大灌溉控制和辐射的面积。(2)“漫”指大水漫溢，在主河道、沟汉内形成大水漫溢的灌溉方式，催生种子的着床、萌发。(3)“渗”指生态输水过程中由沟道和汉河的面状生态输水方式，地表水通过沟道、汉河渗入地下，维持植被良好的生存条件，提高生态系统的质量和稳定性。(4)“储”指储水于地下，即生态输水过程中通过沟道、汉河补充地下水，抬高地下水位，储水于地下，减少无效的水面蒸发，提高生态水的利用效率。(5)“轮”指植被的轮灌，体现在输水期间，对汉渗轮灌区进行逐级分区，依据耐旱性植被的物候特征和区域地下水位情况，计算各级生态分区的需水量，按照保护与修复的优先顺序排出各分区的灌溉顺序。原则上从最缺水的分区依次进行轮灌，反馈调整生态闸的放水次序、流速、持续时间等指标，逐步实现多个调度周期内“靶向灌溉、靶区灌溉、应灌尽灌”的生态保护与修复目标。

3.2 汉渗轮灌的系统构建 针对传统灌溉方式水流在灌区滞留时间短暂、水资源利用效率低、耗水量大等问题，基于汉渗轮灌的新灌溉理念，本文构建了汉渗轮灌系统，即通过水库调节，在河道内侧，利用生态闸、壅水坝、阻水堤、抽水泵等生态水利工程措施以及自然和人工开挖的沟道汉河等，充分改善水分供给条件，塑造有利于生态系统修复的生态水文过程，保证区域内植被能最大程度吸纳水分的生态灌溉系统。汉渗轮灌系统由工程体系和非工程体系两部分组成，如图2。

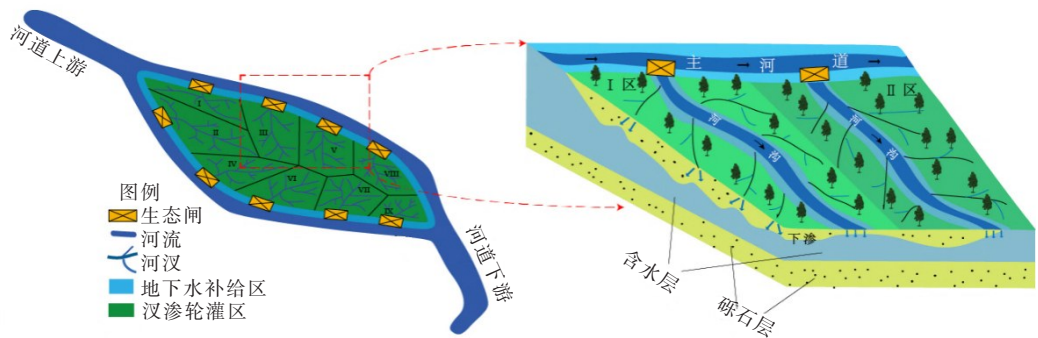


图2 汉渗轮灌系统

(1)工程体系。工程体系主要包括水库、生态闸、翻板闸、雍水坝、提水泵等生态水利工程。通过在主河道分段修建翻板闸或雍水坝、阻水堤，营造河水漫溢条件，扩大河道沿线受水范围。利用河岸边的生态闸将水引入主河道外的沟道中，在沟道中修建节制闸，抬升沟道内水位，实现沟道内植被的漫灌。利用移动式低水头的小型泵站实现汉河引水，对汉河内植被进行灌溉，从而抬升整个分区内的地下水位。

(2)非工程体系。非工程体系主要包括天然沟道、汉河以及人工开挖的支沟、支汉。利用两岸自然分布的汉河实施生态输水，扩大天然植被的受水范围，增加灌溉强度和深度，提高灌溉效率。

3.3 汉渗轮灌的灌溉模式 根据不同分区内的水分条件、植被分布，划分不同的生态保护与修复区。通过现有生态供水工程的布局特点和引水能力，结合各灌溉单元分区生态保护与修复的用水目标，提出翻板闸、壅水坝、阻水堤、提水泵等生态供水工程的合理布局方案，构建库、河、闸、沟、泵、汉联合调控的面状输水方式，形成三层级的汉渗轮灌灌溉模式(图3)。

依据河道外保护性植被的需水过程以及河道生态系统保护与修复的优先顺序，在沟道和汉河区形成先漫灌、后轮灌的适时、适量、适度的植被生态灌溉方式。一方面可以扩大天然植被的灌溉面积，另一方面通过沟道、汉河地表下渗补给地下水，储水于地下，改善植被生境条件，提高生态

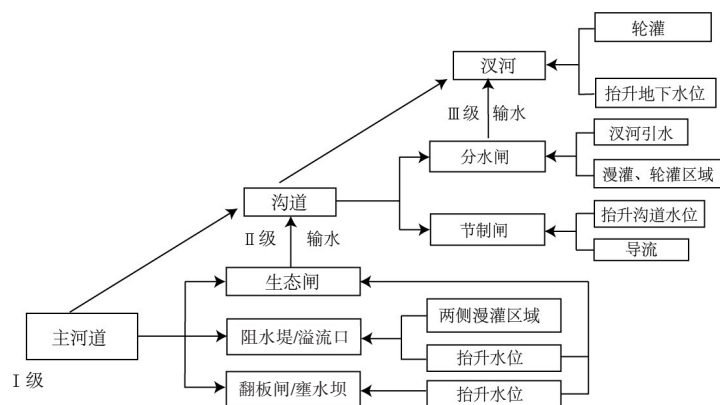


图3 三层级汉渗轮灌模式

系统的质量和稳定性，获得最佳的生态保护与修复效果。

3.4 汉渗轮灌与农业灌溉的区别 相比于传统的农业灌溉，针对河岸植被灌溉的汉渗轮灌重点考虑生态保护与修复目标，在干旱、荒漠区采用汉渗轮灌的方式可提高生态水的利用效率，以达到最优的生态保护与修复效果。二者之间的区别如表1所示。

表1 农业灌溉与汉渗轮灌区别

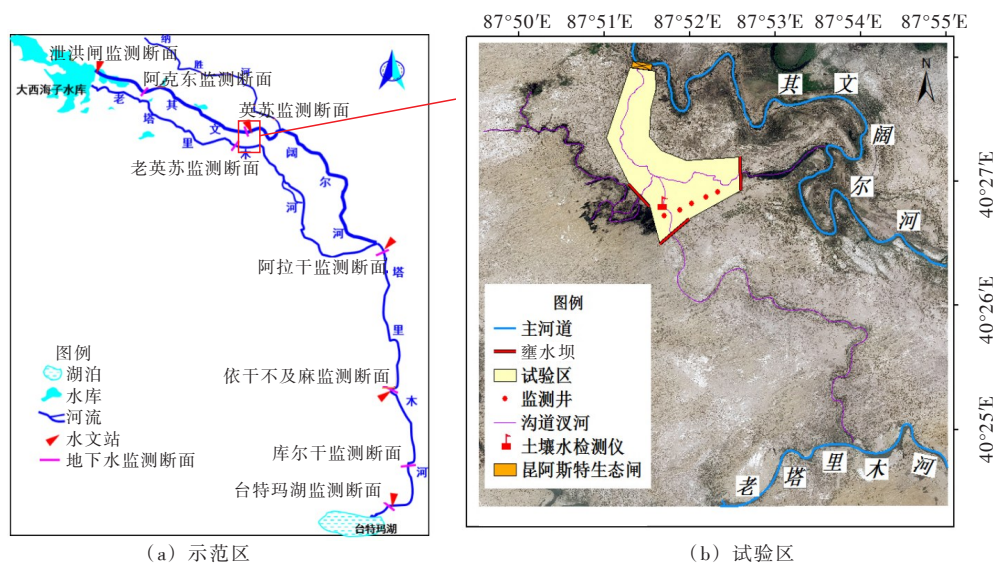
	农业灌溉	汉渗轮灌
学科类别	农田水利学	生态学、河道动力学、系统工程学等交叉学科
基本定义	研究农田水分状况和地区 水情变化规律及其调节措施的科学	研究生态调度与系统响应、生态输水效应、植被水分胁迫规律及 工程调节措施的科学方法
发展历程	大水漫灌→喷灌、滴灌、薄膜灌	大水漫灌、沟汉渗漏、分区轮灌→汉渗轮灌
灌溉对象	大田作物	保护性河岸植被
任务目的	农业高产、稳产	生态保护与修复

4 实例应用

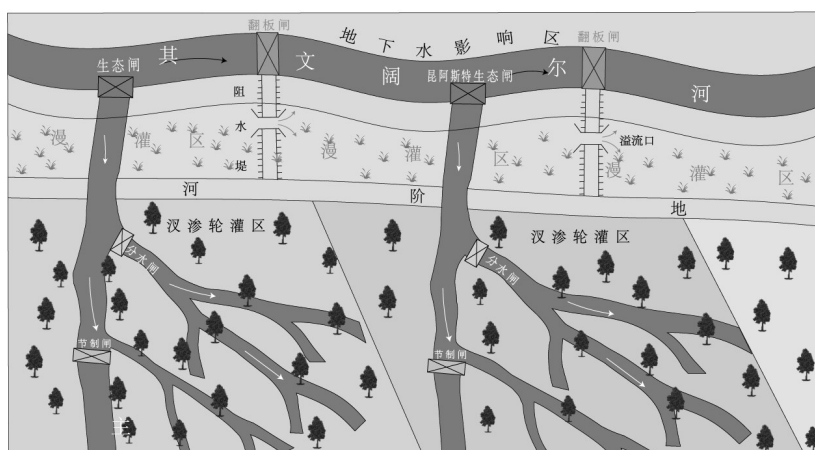
4.1 示范区、试验区的选取 针对塔河下游河岸植被稀少、河道季节性断流、河谷和河岸生态脆弱等实际问题，塔河下游的汉渗轮灌以大西海子水库下游区域作为示范区(如图4(a))，包括调控主体大西海子水库，东侧的其文阔尔河和与西侧的老塔河组成的两河区间，涉及下游英苏、阿拉干、依干不及麻、库尔干等关键控制断面和尾间湖泊—台特玛湖。大西海子水库至阿拉干的塔河干流河段长204.5 km，东侧的其文阔尔河和与西侧的老塔河组成了生态补水的双通道输水形式。

通过对示范区内水库、渠道、生态闸等水利工程和沟汉发育等实地调研，考虑到部分生态闸由于沙丘淤积、设计不合理等原因已无法正常运行等实际因素，本文在两河之间选取昆阿斯特生态闸至雍水坝所控制的沟道、汉河作为生态调度与汉渗轮灌的试验区(如图4(b))。已建的昆阿斯特生态闸距离大西海子水库较近，从其文阔尔河右岸取水便利，且闸内的沟道、汉河发育完整，保证了其文阔尔河右岸与老塔河左岸的水系连通，有利于塔河下游双通道输水后在两河之间形成面状输水效果。此外，试验区内胡杨等植被的空间异质性较强。离河100 m的范围分布着大量的胡杨幼林和近熟林；离河100~500 m范围，以近熟和成熟的胡杨林为主；离河500 m以外、地下水影响1 km范围内，以成熟和过熟的胡杨林为主。受常年输水不畅的不利影响，昆阿斯特生态闸控制的两河区间的沟道、汉河区域地下水位低且河道外生态系统极为脆弱，选择该区域作为试验区是实现生态调度与汉渗轮灌试验的理想场所。

4.2 工程布局的优化 为了实现胡杨等河道外植被的汉渗轮灌和大西海子水库的生态调度，根据三层级的汉渗轮灌模式以及汉渗轮灌系统的组成，在现有大西海子水库、昆阿斯特生态闸及闸口以南



的3座雍水坝等工程布局的基础上,本文通过引入翻板闸、节制闸、分水闸、泵站等闸泵群调控子系统以及阻水堤、溢流口、人工开挖的汉河等优化工程布局。具体的布置过程如下:(1)在其文阔尔河主河道内设置翻板闸,目的是壅高河道水位,将水流漫溢至左右河岸,增加漫灌区域面积和生态水在河岸持续漫溢的时长;(2)在河岸设置阻水堤和溢流口,将河岸多余的生态水由漫灌区向下游输移,达到层层消耗生态水的目的,避免生态水迅速回归主河槽后流入尾间湖泊,导致河岸植被灌溉不充分;(3)通过昆阿斯特生态闸将主河道生态水引入沟道,在河阶地以上区域设置节制闸和分水闸以抬高水位,引导水流进行支沟和汉河以进行汉渗轮灌;(4)对于高阶地以上区域采用提水泵抽水至沟道外的汉河。



通过上述控制性工程的合理布局和优化,将两河区间划分为两个一级区:河岸漫灌区和汉渗轮灌区。以汉渗轮灌区为例,各一级区由于流河道的生态闸单独控制,按沟道又可划分为若干个二级区,按汉河可分为若干个三级区。以此类推,将试验区划分为由相应闸群一一控制的不同层级的分区,实现灌溉单元的分区。按照各分区控制的面积测算植被的类型、数目以及土壤含水率、地下水埋深等,以确定不同分区的生态需水过程。结合各灌溉单元分区的需水目标,建立闸-坝-堤-泵等生态水利工程群的调控系统,以耗水最少、生态修复效果最优为原则,达到汉渗轮灌的生态输水目

的，实现靶向灌溉、靶区灌溉和应灌尽灌的生态补水效果，在极端干旱、资源型缺水的塔河流域，推进生态调度向科学、精准、高效的制度化、常态化转变。

4.3 生态输水方式的转变 塔河流域以往生态输水方式采用单通道输水和双通道输水^[20]，主要集中在河道两岸的低洼滩地和生态渠道延伸的有限地带，远离干流河道以及地势高的绝大部分区域无法覆盖，严重威胁到胡杨等保护性植被的孕育、漂种、出芽和生长，更不利于两河区间腹地的生态保护与修复。

本文统计分析了2000—2019年塔河下游历次的生态输水情况，对塔河下游的生态输水方式进行了总结^[9]，具体分为以下4个阶段：(1)单通道输水，在来水较少的情形下，利用其文阔尔河或老塔里木河其中一条通道轮换输水；(2)双通道输水，利用其文阔尔河和老塔里木河两条通道同时输水；(3)汉河输水，主河道输水时，利用两岸分布的汉河实施生态输水，扩大天然植被受水范围；(4)面状输水，在沟汉上修建闸、坝，营造河水漫溢条件，通过沟汉扩大河道沿线受水范围。

在汉渗轮灌试验区，若仅采用单通道或双通道轮换输水(图6)，地下水影响宽度仅1.2 km，灌溉范围有限，大部分区域无法得到有效灌溉^[27]。因此，为了巩固和提升下游生态输水成效，以实现生态水的高效利用以及扩大生态修复的范围，在试验区构建三级汉渗轮灌系统和调控工程总体布局的前提下，本文提出了“双通道+沟道、汉河”的面状生态输水方式(图7)。

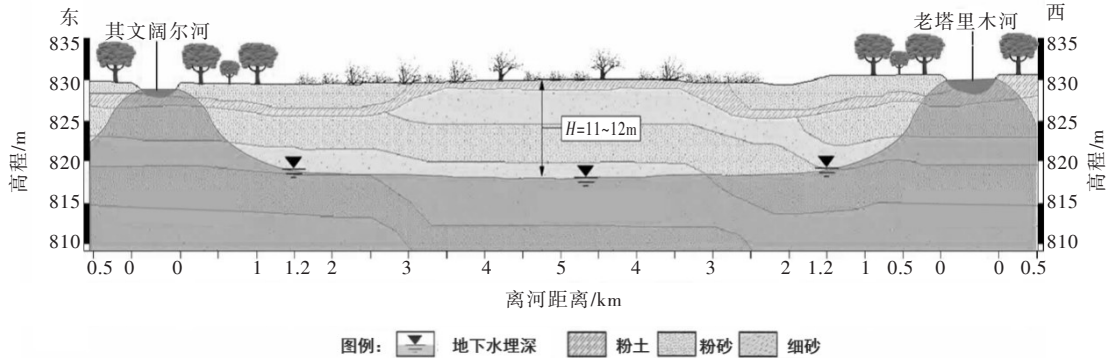


图6 塔河下游主河道输水方式(单通道、双通道)及其对地下水埋深的影响

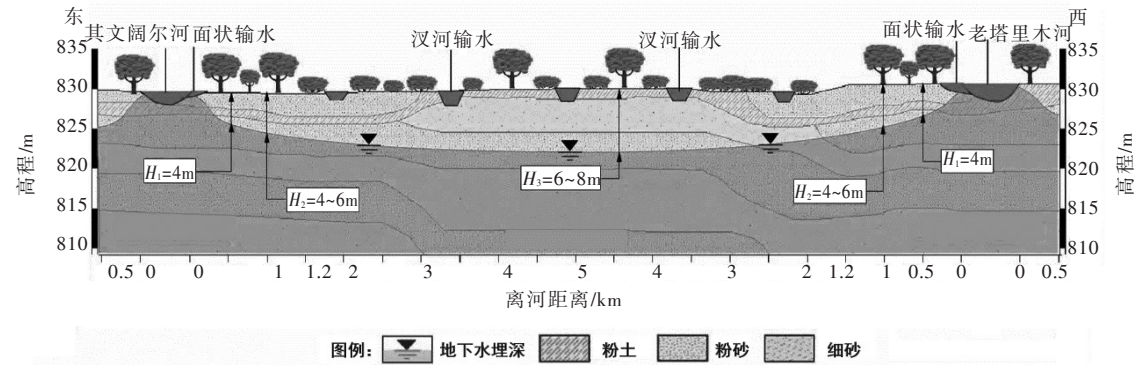


图7 塔河下游双通道+沟道、汉河的面状生态输水方式及其对地下水埋深的影响

通过“双通道+沟道、汉河”的面状生态输水方式，可使距河道2 km以内的地下水位维持在4~6 m的深度，既能满足胡杨林漂种、发芽与生长的需水要求，也可以防止土壤次生盐渍化。通过生态输水方式的转变，一方面扩大了生态保护与修复的受水面积；另一方面通过沟汉漫灌迅速补给地下水，将丰水年宝贵的生态水储藏于地下，建立“地下生态水银行”，改善植被生境条件，提高生态保护与修复系统的稳定性和可持续性。

李丽君等^[28]通过分析输水方式对生态环境的影响发现，通过实施面状输水，可以有效的抬升地下水位，提高植被对水分的获取能力，且双通道输水区域的影响距离是单通道的2倍以上，从一定意义上论证了双通道、汉河等面状输水的优势。

5 塔河下游生态调度与汉渗轮灌的效果分析

5.1 试验设计 从生态修复的角度看,生态调度输水时段应与天然植物落种时间形成一种时间上的契合。部分研究表明:10月份为胡杨和怪柳的集中落种繁育期^[29]。本文以10月中旬作为生态调度与汉渗轮灌的最佳时机。为了量化生态调度与汉渗轮灌的应用效果,在试验区内共设置5个地下水监测断面(5眼长观测井),监测井距沟道侧向距离分别为50 m(左、右岸各1处)、150 m(左岸)、300 m(左岸)、500 m(左岸);设土壤含水率监测点1处、雍水坝1座。为了将沟道内的灌溉范围扩大至沟道外的汉河,设置小型的可移动式低水头泵站1座,通过泵站抽水将沟道内生态水输移至沟道外的汉河,如图8。生态调度实施前,对昆阿斯特生态闸等闸群进行了检修,对闸后的沟道、汉河进行了疏浚,为生态调度与汉渗轮灌提供了前期保障。

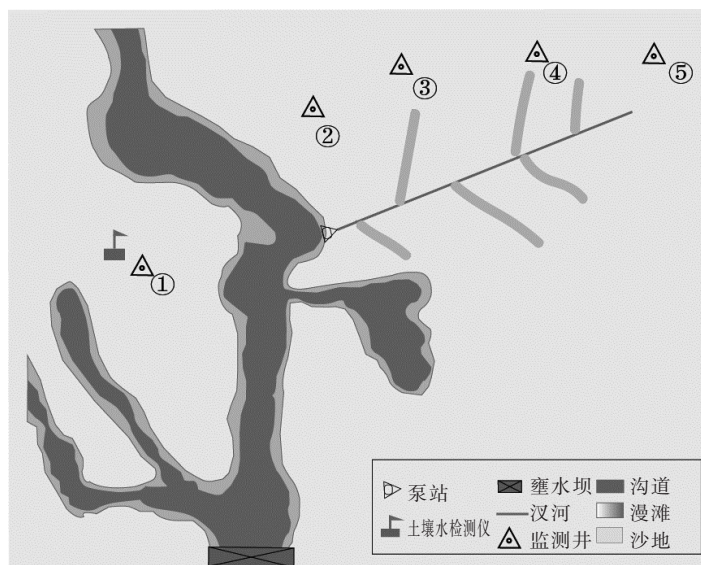


图8 汉渗轮灌试验区的监测位置分布

本试验于2020年10月11—20日开展了塔河下游第一次生态调度与汉渗轮灌。此次试验自大西海子水库下泄生态流量开始,生态输水持续10 d。为了实现“双通道+沟道、汉河”的面状输水方式,满足河道内生态流量、台特玛湖的补湖水量和河道外汉渗轮灌水量的要求,本文制定了大西海子水库的实时生态调度方案,如表2所示。大西海子水库下泄流量由老泄洪闸的其文阔尔河输水流量、新放水闸的老塔里木河输水流量和大西海子二库龙口下泄流量组成,入库流量、水位、下泄流量、输水流量等均为日平均值。

大西海子水库日平均下泄生态流量 $44.16 \text{ m}^3/\text{s}$,其中其文阔尔河生态输水流量 $11.15 \text{ m}^3/\text{s}$,老塔河生态输水流量 $31.77 \text{ m}^3/\text{s}$ 。经昆阿斯特生态闸口自北向南至沟道内雍水坝,作为汉渗轮灌具体的试验区。昆阿斯特生态闸口日平均引水流量为 $1.78 \text{ m}^3/\text{s}$,生态流量从闸口到达雍水坝坝址断面的流达时间为6 h,沟道内的输水距离3 km,沟汉总输水长度约7 km。

由表2可知:大西海子累计入库水量 4217.62 万 m^3 ,新闸(其文阔尔河)、老闸(老塔里木河)和二库龙口累计下泄水量 4044.64 万 m^3 ,实时调度期间大西海子水库初末的库容变化量(蓄水量)为 174 万 m^3 ,三者之间满足水量平衡,验证了实时调度方案的可行性和可靠性。

5.2 应用效果 通过生态调度与汉渗轮灌试验运行,改变了试验区常年无水到达沟道、汉河的现状,打通了其文阔尔河与老塔里木河横向的水力联系,实现了两河区间“双通道+沟道、汉河”的面状生态输水方式,抬高地下水埋深以补充沟汉内的地下水资源量,储水于地下以减少尾间湖泊巨大的水面蒸发,初步构建了“地下生态水银行”。

表2 塔河下游大西海子水库实时生态调度方案

时间 (月.日)	大西海子水库				其文阔尔河	老塔里木河	二库龙口	昆阿斯特生态闸	
	入库流量 /(m ³ /s)	水位 /m	初始库容 /万 m ³	下泄流量 /(m ³ /s)	输水流量 /(m ³ /s)	输水流量 /(m ³ /s)	下泄流量 /(m ³ /s)	引水流量 /(m ³ /s)	累计引水量 /万 m ³
10.11	57.96	845.90	350.00	59.12	20.30	36.73	2.09	2.00	17.28
10.12	63.34	845.85	340.00	54.08	18.30	34.73	2.05	2.00	34.56
10.13	58.53	846.11	420.00	50.43	14.50	34.25	1.68	2.00	51.84
10.14	54.61	846.29	490.00	47.67	11.50	34.87	1.30	1.90	68.26
10.15	51.74	846.41	550.00	44.80	8.50	35.03	1.27	1.90	84.67
10.16	56.19	846.53	610.00	46.93	11.50	34.19	1.24	1.80	100.22
10.17	38.24	846.62	690.00	45.18	10.80	33.19	1.19	1.60	114.05
10.18	36.00	846.55	630.00	42.48	10.20	31.16	1.12	1.60	127.87
10.19	35.90	846.47	570.00	39.37	9.50	28.80	1.07	1.50	140.83
10.20	35.64	846.40	540.00	38.07	8.20	28.80	1.07	1.50	153.79
10.21		846.35	524.00						

生态调度与汉渗轮灌前后昆阿斯特生态闸与沟道、汉河水面漫溢效果对比如图9、图10所示。图9是2020年10月11日调度前和2020年10月20日调度后昆阿斯特生态闸后的水面对比。引起图9(a)生态闸后有一定水面面积的主要原因是生态闸漏水。图10是2020年10月11日生态调度前和2020年10月20日生态调度后沟道、汉河的汉渗轮灌效果对比图。



图9 生态调度前后昆阿斯特生态闸口水面对比效果

由图9、图10可以看出：通过实时生态调度与汉渗轮灌试验，将生态水量引入原来干涸的沟道、汉河，大幅增加了生态闸后的水面漫溢面积，扩大沟汉内河岸植被胡杨林的灌溉面积，满足了胡杨和怪柳的集中落种繁育和生长需要，实现了两河区间保护性河岸植被胡杨林的生态保护与修复。

通过对实时生态调度与汉渗轮灌试验中流量、地下水位等要素实时监测数据分析可知：昆阿斯特生态闸总引水水量约154万m³，其中用于补充地下水、抬高地下水位的水量约为64万m³，占比42%；根据以往塔河生态输水经验^[20]，生态输水初期，生态水主要耗散于包气带和地下水补给，且二者所占的比例接近，则假定包气带补水量同样为64万m³。因此，本次生态输水中用于包气带和地下水补给的总水量为128万m³，占比83%。根据塔里木河下游生态输水对河道水面蒸发量的研究成果^[30]，河道中生态水的蒸发量约为0.67万m³，占比仅0.4%。

通过实时监测试验区内地下水观测井，地下水埋深的变化如表3所示。

由分析可知：(1)5眼地下水监测井的地下水位分别提高0.84、0.84、0.28、0和0m，试验区地下



图 10 生态调度输水前后沟道、汉河的汉渗轮灌效果

表 3 试验区输水前后各监测井地下水埋深

地下水监测井编号	经度/(°)	纬度/(°)	输水前地下水埋深/m	输水后地下水埋深/m
1	87.84114	40.44621	4.64	3.80
2	87.86332	40.44619	5.55	4.71
3	87.86443	40.44613	5.48	5.20
4	87.86619	40.44519	6.31	6.31
5	87.86848	40.44590	9.72	9.72

水位得到明显提升，且离河愈近，地下水响应的幅度愈大。远离河道 300 m 范围以外区域的地下水位尚未发生变化，表现出了一定的滞后性。(2)试验区地下水位提升 0.28 ~ 0.84 m，地下水存储水量约 128 万 m³，保障了生态调度与汉渗轮灌的可持续性。(3)生态调度与汉渗轮灌实践改变了试验区内常年无水的现状，河道外植被的灌溉范围明显扩大，沟道、汉河的总输水长度达 7 km，新增胡杨林生态修复面积 60 万 m²，为胡杨林的漂种、发芽、生长等健康生境提供了良好保障。(4)相比于生态水在汇入台特玛湖过程中的河道水面蒸发，实施汉渗轮灌的河道水面蒸发量仅占总水量的 0.4%，生态水的利用效率超过 83%，得到了大大提高。

6 结论与建议

(1)提出了干旱荒漠区河岸植被的三层级灌溉新理念——汉渗轮灌，从定义、内涵、系统、工程布置等方面，初步构建了汉渗轮灌的基本框架，为与生态调度相结合奠定了前期基础。(2)基于汉渗轮灌的灌溉模式，优化了塔里木河下游生态保护与修复的工程布局，构建了“双通道+沟道、汉河”的面状生态输水新方式，将大西海子水库实时生态调度与胡杨林的汉渗轮灌系统相结合，成功实现了生态调度与汉渗轮灌的实践应用。(3)通过生态调度与汉渗轮灌实践，显著增加了胡杨林的灌溉和生态修复面积，抬高了试验区地下水位埋深，降低了无效的水面蒸发，大大提高了生态水的利用效率，验证了生态调度与汉渗轮灌的合理性和有效性。(4)由于大西海子至阿拉干两河区间汉渗轮灌工程体系尚未建成，相关配套措施任不够完善，本次生态调度与汉渗轮灌实践仅针对昆阿斯特闸所控制的沟道作为生态调度与汉渗轮灌试验区，今后将从大西海子水库至阿拉干断面两河区间的其他生态闸控制的沟道进行汉渗轮灌实践，通过多年的监测数据补充和完善汉渗轮灌生态修复体系。

参 考 文 献：

[1] 徐海量,樊自立,杨鹏年,等.塔里木河近期治理评估及对编制流域综合规划的建议[J].干旱区研究,

- 2016, 33(2): 223-229.
- [2] CHEN Y, LI W, XU C, et al. Desert riparian vegetation and groundwater in the lower reaches of the Tarim River basin[J]. Environmental Earth Sciences, 2014, 73(2): 547-558.
 - [3] 杨戈, 郭永平. 塔里木河下游末端实施生态输水后植被变化与展望[J]. 中国沙漠, 2004, 24(2): 167-172.
 - [4] 张丽华, 陈亚宁, 李卫红. 塔里木河下游生态输水对植物群落数量特征的影响[J]. 干旱区研究, 2006(1): 32-38.
 - [5] 新疆维吾尔自治区人民政府. 塔里木河流域近期综合治理规划报告[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2002.
 - [6] 陈亚宁, 张小雷, 祝向民, 等. 新疆塔里木河下游断流河道输水的生态效应分析[J]. 中国科学(地球科学), 2004, 34(5): 475-482.
 - [7] 徐海量, 宋郁东, 陈亚宁. 塔里木河下游生态输水后地下水变化规律研究[J]. 水科学进展, 2004, 15(2): 223-226.
 - [8] 杨鹏年, 邓铭江, 董新光, 等. 间歇输水河道两侧一维地下水非稳定流运动研究——以塔里木河下游为例[J]. 干旱区地理, 2008(5): 101-106.
 - [9] 邓铭江, 周海鹰, 徐海量, 等. 塔里木河下游生态输水与生态调度研究[J]. 中国科学(技术科学), 2016, 46(8): 864-876.
 - [10] LING H, YAN J, XU H, et al. Estimates of shifts in ecosystem service values due to changes in key factors in the Manas River basin, northwest China[J]. Science of the Total Environment, 2019, 659: 177-187.
 - [11] 王希义, 彭淑贞, 徐海量, 等. 大型输水工程的生态效益与社会经济效益评价——以塔里木河下游为例[J]. 地理科学, 2020, 40(2): 147-153.
 - [12] 彭少明, 尚文绣, 王煜, 等. 黄河上游梯级水库运行的生态影响研究[J]. 水利学报, 2018, 49(10): 1187-1198.
 - [13] 邓铭江, 周海鹰, 徐海量, 等. 塔里木河下游生态输水与生态调度研究[J]. 中国科学(技术科学), 2016, 46(8): 864-876.
 - [14] 王瑞玲, 黄锦辉, 葛雷, 等. 基于黄河鲤鱼栖息地水文-生态响应关系的黄河下游生态流量研究[J]. 水利学报, 2020, 51(9): 1175-1187.
 - [15] XU H, MAO Y, LI J. The ecological characteristics of the riparian vegetation affected by river overflowing disturbance in the lower Tarim River[J]. Environmental Geology, 2009, 58(8): 1749-1755.
 - [16] 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(2): 170-177.
 - [17] 宋郁冬, 樊自力, 雷志栋, 等. 中国塔里木河水资源与生态问题研究[M]. 乌鲁木齐: 新疆人民出版社, 2000.
 - [18] 徐海量. 流域水文过程与生态环境演变的耦合关系[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2005.
 - [19] 塔依尔江·艾山, 玉米提·哈力克, 艾尔肯·艾白不拉, 等. 塔里木河下游阿拉干断面胡杨林空间分布特征及其影响因素[J]. 干旱区资源与环境, 2011, 25(12): 156-160.
 - [20] 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.
 - [21] 樊自立, 徐海量, 傅苡仪, 等. 台特玛湖湿地保护研究[J]. 第四纪研究, 2013, 33(3): 594-602.
 - [22] 王慧玲, 吐尔逊·哈斯木. 生态输水前后台特玛湖生态环境变化探究分析[J]. 生态科学, 2020, 39(1): 93-100.
 - [23] 胡实, 莫兴国, 林忠辉. 未来气候情景下我国北方地区干旱时空变化趋势[J]. 干旱区地理, 2015, 38(2): 239-248.
 - [24] 樊自立, 徐海量, 张鹏, 等. 新疆车尔臣河及其水资源利用研究[J]. 干旱区研究, 2014, 31(1): 20-26.
 - [25] 邓铭江. 新疆十大水生态环境保护目标及其对策探析[J]. 干旱区地理, 2014, 37(5): 865-874.
 - [26] 刘登峰, 田富强. 塔里木河下游河岸生态水文演化模型[M]. 北京: 科学出版社, 2015.
 - [27] 邓铭江, 杨鹏年, 周海鹰, 等. 塔里木河下游水量转化特征及其生态输水策略[J]. 干旱区研究, 2017, 34(4): 717-726.
 - [28] 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.

- [29] 买尔燕古丽·阿不都热合曼, 艾里西尔·库尔班, 阿迪力·阿不来提, 等. 塔里木河下游胡杨物候特征观测[J]. 干旱区研究, 2008(4): 525-530.
- [30] 王万瑞, 艾克热木·阿布拉, 陈亚宁, 等. 塔里木河下游生态输水对地下水补给量研究[J]. 干旱区地理, 2021, 44(3): 670-680.

Study on the ditch rotation irrigation for ecological protection and restoration of *Populus euphratica* forests in the desert area

BAI Tao¹, JI Hongwei¹, DENG Mingjiang^{1, 2}, ZHOU Haiying³, LIN Hongbo⁴, YANG Pengnian⁵

(1. The Ministry of Education Northwest Water Resources and Environment Key Laboratory,

Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;

2. Engineering Research Center of Water Resources and Ecological Water Conservancy

in Cold and Arid Area of Xinjiang, Urumqi 830000, China;

3. Water Resources Department of Xinjiang Uygur Autonomous Region, Urumqi 830000, China;

4. Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830000, China;

5. College of Water Conservancy and Civil Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830000, China)

Abstract: The extensive management mode of traditional ecological operation (e.g. flood irrigation) has caused practical problems such as low efficiency of ecological water use and limited irrigation area. Based on the special biorhythm of drought-tolerant *Populus euphratica* in desert area, this paper puts forward the irrigation concept of Ditch Rotation Irrigation(DRI), defines the definition and connotation of DRI, constructs the DRI system, and builds the basic framework of DRI. Aiming at practical problems such as the deterioration of the ecological environment, the reduction of biodiversity, the ineffective evaporation of ecological water, and the low utilization efficiency. Take the lower reaches of the Tarim River which is the largest inland river in my country as an example, the irrigation mode based on the DRI has optimized the original engineering layout of the lower reaches of the Tarim River and constructed a new planar ecological water delivery method with double channels, channels and branch rivers. Developed a real-time scheduling scheme Daxihaizi ecological reservoir, and the poplar branch infiltration rotational irrigation system combined to achieve the practical application of Tarim River ecological operation in 2020 with the DRI. The results show that: (1) Compared with the previous ecological water evaporation in the river and Taitema Lake, the evaporation of ecological water only accounted for 0.4% of the total water volume, and the utilization efficiency of ecological water exceeded 83%, which greatly improved the utilization efficiency of ecological water. (2) The groundwater level in the test area is increased by 0.28-0.84m, and the groundwater storage capacity is about 1.28 million cubic meters, which realizes the underground ecological water bank that stores water in the ground, and ensures the sustainability of ecological dispatch and DRI. (3) The new ecological water delivery length of the ditch infiltration irrigation is 7km, and the newly added *Populus euphratica* forests ecological restoration area is 600,000 square meters, which provides a good guarantee for the healthy habitat of the *Populus euphratica* forests such as floating seeding, germination and growth. The research results provide new ideas and new methods for the ecological protection and restoration of the protective vegetation in the desert area.

Keywords: Ditch Rotation Irrigation; ecological regulation; planar water conveyance method; underground ecological water bank; ecological protection and restoration

(责任编辑: 韩 昆)