

编者按 南水北调中线工程是解决我国华北地区水资源短缺、实现水资源合理配置的重大战略性工程。丹江口水库作为中线工程的水源地，其水质保护对工程成败具有重要意义。丹江口库区位于秦巴山区，水土流失和农业面源污染比较突出。“十一五”至“十三五”期间，国家先后实施了3期《丹江口库区及上游水污染防治和水土保持规划》，点源污染基本得到控制，水土流失问题亦明显缓解。然而，库区范围内的农业面源污染输出问题依然未得到解决，加上丹江口大坝加高蓄水后水库消落区植被也面临退化风险，故库区面源控制和库滨生态屏障功能的恢复已成为水源地水质保障面临的重要课题。自本期开始，我们将就“南水北调中线水源地面源污染生态防控”陆续刊发3篇特邀专稿，重点探讨面源污染生态治理和生态屏障构建方法，为南水北调中线水源地及我国其他水库的水质保障提供借鉴和参考。本期刊发的论文《南水北调中线水源地小流域面源污染生态阻控》为该系列专稿之第1篇，其主要内容是，针对丹江口库区社会经济相对落后、农业面源突出的问题，以小流域为单元，探索面源污染生态阻控措施体系构建的技术方法。研究结果表明，库区小流域面源污染过程在汇水流域、汇水沟道、塘洼节点高度耦合，故生态阻控体系的技术措施在空间上应有衔接性，在功能上应有互补性，以实现小流域水土流失和面源污染的高效阻控。根据“系统治理”的治水方针，丹江口库区小流域面源生态阻控可按照“控山”“净水”“护林”“保田”“治村”的总体思路开展。



文章栏目：“南水北调中线水源地面源污染生态防控”特邀专稿

DOI 10.12030/j.cjee.202002069 中图分类号 X524 文献标识码 A

王超, 贾海燕, 雷俊山, 等. 南水北调中线水源地小流域面源污染生态阻控[J]. 环境工程学报, 2020, 14(10): 2615-2623.
WANG Chao, JIA Haiyan, LEI Junshan, et al. Ecological control of non-point source pollution based on small watershed in the water source of the Middle Route of South-to-North Water Diversion Project[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2020, 14(10): 2615-2623.

南水北调中线水源地小流域面源污染生态阻控

王超¹, 贾海燕¹, 雷俊山¹, 徐建锋¹, 雷沛², 尹炜^{1,*}

1. 长江水资源保护科学研究所, 武汉 430051

2. 南京大学环境学院, 污染控制与资源化研究国家重点实验室, 南京 210046

第一作者: 王超(1985—), 男, 博士, 高级工程师。研究方向: 流域水资源保护。E-mail: cwwhu@163.com

*通信作者: 尹炜(1978—), 男, 博士, 教授级高级工程师。研究方向: 流域水资源保护。E-mail: 2000yinwei@163.com

摘要 丹江口水库作为南水北调中线工程的水源地，水质保护极其重要，以小流域为单元建设面源污染生态阻控系统是控制库区氮磷输入的重要途径。结合丹江口库区现状，提出“控山”“净水”“护林”“保田”“治村”五位一体的小流域面源生态阻控总体思路，将汇水流域、汇水沟道、塘洼节点等区域的措施耦合衔接，功能上互补，形成生态阻控系统。小流域面源生态阻控技术的实施包括本底调查和问题识别、措施布局设计、工程建设和运行监测等步骤。该技术方法在丹江口库区的钱家沟小流域开展了应用实践，阻控系统建设完毕后的监测结果显示，小流域 TN 平均下降 33.9%，TP 平均下降 49.1%，总体阻控效果较好，可为南水北调中线水源地小流域的面源治理提供参考。

关键词 南水北调中线；丹江口水库；水源地；小流域；面源；生态阻控

南水北调是解决我国北方地区水资源短缺、实现水资源合理配置的重大战略性工程。丹江口水库作为中线工程的水源地，是京津冀豫地区的重要饮用水水源，水质安全问题决定了整个工程

收稿日期: 2020-02-14; 录用日期: 2020-07-06

基金项目: 国家重点研发计划(2019YFC0408901, 2019YFC0408904)

的成败。丹江口库区及上游农业人口占比较高,广大农村地区比较落后,农村分散生活污水、畜禽养殖污水、农田流失的化肥等导致农业面源污染非常普遍^[1-3]。另外,丹江口库区水土流失问题比较突出,水土流失产生的泥沙颗粒物输出也是面源污染的重要来源^[4-6]。“十一五”至“十三五”期间,丹江口库区及上游水土保持和水污染防治规划的实施使库区及上游面源污染问题得到了一定程度的缓解,但总体来看,面源污染依然是威胁水源地水质的重要因素^[7-9]。郑艳霞等^[10]采用基流分割的方法分析了主要入库河流的点面源结构,结果显示:堵河、汉江干流、淇河、老灌河、天河、丹江等6条河流的面源对TN负荷总量的贡献比例范围为40%~68%,其中堵河、汉江干流和淇河总氮的面源贡献比例都超过60%。宋国强等^[11]对十堰市入库总氮的来源进行了估算,结果表明面源污染是库区总氮最大的来源,占比高达59%^[12]。因此,面源污染已经成为丹江口水库氮磷物质的主要来源。

从“十五”开始,国家就陆续投入大量资金进行技术研发和工程治理,对重点流域面源负荷的削减起到了积极作用。然而,由于来源多,分布广,产生过程随机,农村和农业面源污染控制仍然是流域水环境治理的重要内容^[13]。以小流域为单元的面源污染生态阻控是针对面源污染产生、输移和汇集特点,以水的产流、汇流和径流过程为重点,以微地形调整和沟塘水系生态化改造为主要手段,使养分在流域内得到逐级削减和滞留,以达到减少面源污染的一种系统性方法^[14]。面源污染生态阻控措施包括生态塘、生态沟渠、自然湿地、人工湿地等^[15]。这些措施已经在丹江口库区面源控制中得以应用,并取得了较好的效果^[16-18],但尚无流域层面的面源阻控系统构建方法和案例。本研究针对丹江口库区的农村生产生活方式相对落后及农村面源突出的问题,以小流域为单元,探索面源生态阻控系统构建的技术方法,以为库区面源污染的治理提供参考。

1 区域概况

丹江口水库位于汉江中上游,横跨豫鄂两省,地处鄂西北、豫西南交界处的大巴山、秦岭与江汉平原过渡地带,位于汉江、丹江汇合处,属丘陵盆地型水库(见图1)。丹江口大坝位于汉江中上游交界处的峡谷末端、湖北省丹江口市境内汉江与丹江汇合点下0.8 km处,控制流域面积 $9.52 \times 10^4 \text{ km}^2$,占汉江流域集水面积的60%。区域属北亚热带大陆性季风气候区,多年平均气温 15°C ,多年平均降水量815 mm。丹江口库区及上游具有典型“老、少、边、穷”特点。2015年,该流域的总人口约有 1.374×10^4 人,城镇居民人均可支配收入约25 000元,农民人均纯收入约8 500元,均低于全国平均水平。区域位于秦巴山集中连片贫困地区,国家扶贫工作重点县26个,省级扶贫工



图1 丹江口水库位置图

Fig. 1 Location of Danjiangkou Reservoir

作重点县 8 个，经济社会发展总体水平较低^[19]。

丹江口库区属于农业主产区，种植业占主导地位。据统计，2017 年，十堰市施用化肥总量约 1.3×10^5 t，每公顷耕地化肥施用负荷为 550~900 kg，远超过发达国家化肥施用安全标准上限 225 kg^[20]。库区典型小流域农业生产及生活对总氮贡献达到 46%，畜禽养殖对总氮贡献达到 30%^[21]。水库周边地区以丘陵为主，地形破碎、坡度陡，加之表层土疏松浅薄，易受侵蚀，经雨水冲刷后容易形成水土流失^[22]。据统计，丹江口库区及上游有 2.19×10^4 km² 的水土流失面积，经过 3 期丹江口库区水土保持治理工程（“丹治”工程）的治理，丹江口库区及上游水土流失问题得到明显改善，但仍然是水土流失防控的重点区域^[23]。

2 小流域面源生态阻控总体思路和技术框架

2014 年 3 月 14 日，习近平总书记提出了“节水优先、空间均衡、系统治理、两手发力”的新时代治水方针，坚持山水林田湖草是一个生命共同体，强调要用系统思维统筹山水林田湖草治理。“系统治理”工作方针要求以生态系统的整体性、系统性内在规律为依据，尊重自然、顺从自然、保护自然。根据“系统治理”的治水方针，新时期河湖治理必须要以系统工程的思路来统筹安排山水林田湖草各要素的治理工作。结合丹江口库区现状情况，提出“山水林田村”五位一体的小流域面源生态阻控总体思路（见图 2）。由于山坡土壤侵蚀，林地水土流失，农田径流输出，以及村落分散污水是小流域面源污染的主要来源，面源阻控的基本措施可总结为“控山”“净水”“护林”“保田”“治村”。“控山”即对山坡的土壤侵蚀问题实施水土保持措施；“护林”即对水源涵养能力较弱的疏幼林进行封育治理；“保田”即对农田实施保土耕作植物护坎等保护措施；“治村”即对村落的分散污水和垃圾污染进行综合治理。

通常情况下，小流域面源污染过程在汇水流域、汇水沟道和塘洼节点高度耦合。汇水流域产生的面源径流汇集到沟道，决定污染负荷的强度和规模；沟道逐级传输，决定污染负荷的传输路径和方向；塘洼节点汇集滞留，决定径流停留时间和污染物的滞留效率。构建生态阻控系统的关键在于不同区域阻控措施的有机结合，技术措施在空间上应有衔接性，在功能上应有互补性。在汇水流域，通过水土保持、村落整治、农田治理等措施减少土壤侵蚀颗粒物输出和农村农业污染产生源；在汇水沟道，通过沟渠生态化改造、岸边生态缓冲带等技术措施拦截集水区的径流污染输出；在塘洼节点，通过湿地构建、塘堰生态化改造等技术措施深度净化汇水沟道的污染径流。因此，小流域面源生态阻控系统构建是以小流域为整体，通过汇水流域-汇水沟道-塘洼节点的措施耦合，实现小流域面源污染的综合防治。

“十一五”至“十三五”期间，为落实国务院批复的《丹江口库区及上游水污染防治与水土保持

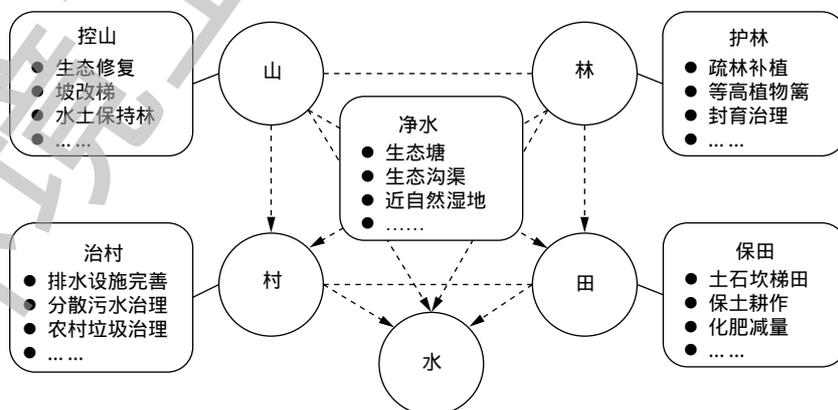


图 2 小流域面源生态阻控总体思路和技术框架

Fig. 2 General idea and technical framework of ecological control of non-point source in small watershed

规划》，湖北、陕西等省份先后实施了3期“丹治”工程，库区小流域形成了较好的水土保持工程基础^[23]。在汇水流域层面，很多小流域开展了土坎梯田、保土耕作、简易坡面水系、退耕还经果林、水保林、封禁治理等措施，形成了相对完善的水土流失防控体系。然而，在小流域汇水沟道和塘洼节点，农田径流产生的氮磷营养盐和村落分散污水雨水径流尚无有效的拦截措施，坡面径流也缺少进一步缓冲过渡和强化净化。因此，丹江口库区小流域面源生态阻控要充分结合已有水土保持措施，重点针对汇水沟道和塘洼节点，构建生态塘、生态沟渠、近自然湿地等阻控措施形成的面源生态阻控系统。

3 小流域面源生态阻控实施流程

基于以上总体思路和技术框架，丹江口库区小流域面源生态阻控应针对地形地貌和环境特征，明确小流域面源污染基本特征和主要问题；在充分调查水土保持措施体系的基础上，因地制宜提出生态阻控措施的布局方式，重点给出沟塘水体等微地形结构的生态化改造方案。具体来说，面源生态阻控系统建设分为小流域本底调查和问题识别，措施布局设计，工程建设和运行监测等步骤，如图3所示。

1) 小流域本底调查和问题识别。调查小流域社会经济、自然地理等基本特征，总结人口分布、种植结构、土地利用方式、地形条件等因素对面源污染的影响。重点了解小流域的水土保持措施现状，总结开展过的小流域治理工作取得的成效和不足，明确面源污染治理的短板。开展小流域现场勘察，详细调查村落用水排水方式、农田作物类型和种植方式、地块类型分布情况等与面源污染密切相关的因素。重点勘察小流域沟塘水系等微地形结构，为面源阻控措施的布局和设计提供依据。

2) 措施布局设计。措施布局重点考虑如下原则：村落区域以小型人工湿地处理设施为主，就近布局坑塘系统，对村落污水深度净化；农田区域在已有的土石坎梯田、保土耕作等水保措施基础上，布局植物护坎、植被缓冲带和生物过滤带等措施，强化农田径流阻控；山林区域以生态修复、坡改梯、疏林补植、封育治理等水保措施为主；坑塘沟道区域以近自然湿地、生态塘、河道湿地和生态沟渠为主，强化坑塘沟道的面源阻控净化。绘制示范小流域社会经济、地形高程、水文水系等基础信息专题图件，在专题图件的基础上，完成工程施工设计。生态塘、生态沟渠、近自然湿等阻控措施应充分利用现有地形，因地制宜，以微地形改造为主。

3) 工程建设和运行监测。与地方相关部门沟通协作，将面源污染生态阻控系统建设与地方小流域治理对接融合，依托小流域综合治理规划推进实施。制定监测方案，监测颗粒物、总氮、总磷等面源污染典型指标，评估面源污染的生态阻控效果。

4 钱家沟小流域典型案例

4.1 小流域概况

钱家沟为丹江口库周典型的丘陵沟谷型小流域，在库区具有很好的代表性。小流域位于丹江

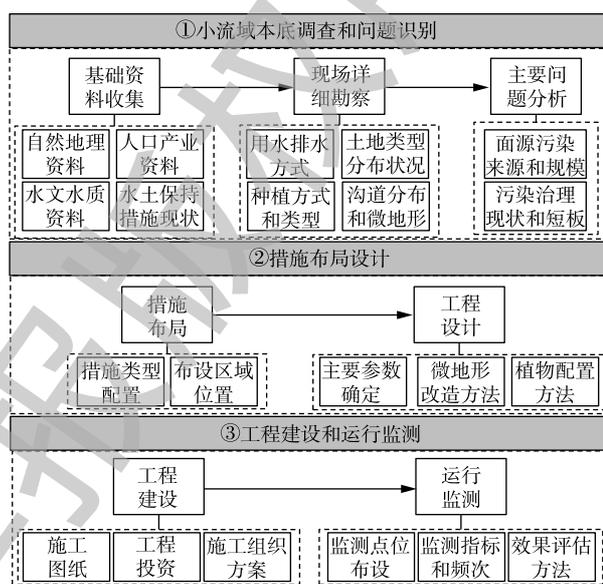


图3 小流域面源生态阻控实施流程

Fig. 3 Implementation process of ecological control for non-point source pollution in small watershed

口市浪河镇钱湾村，沟道长度约 2.3 km，居民规模 80 户。钱家沟为一狭长的 U 型山谷，坡面多为林地，山谷为农田。主沟紧贴南侧山脚，最上游为浪河镇友谊水库，沿途陆续有小型支沟汇入。南侧山坡小型支沟直接汇入主沟，沟头多分布有蓄水塘，旱季支沟基本无水。北侧山坡分布有 3 条主要支沟，沟头同样分布有蓄水塘。农田区沟道以灌溉沟渠为主，大量毛细沟纵横交错，同时分布有若干水塘和干塘。项目实施前，丹江口市已经在该小流域实施了坡改果梯、等高植物篱、退耕还经济林等水土保持工程措施，但村落散排污水、农田径流等面源问题尚无针对性防控措施。

4.2 措施布局

基于沟道地形条件和面源污染分布，依托已有的小流域治理基础，提出山坡立体防护-山谷综合治理-沟道逐级阻控的技术方案。山坡立体防护以现有水土保持措施为主，包括坡改梯、水土保持林、等高植物篱等。山谷区域农田和村落集中，面源污染输出强度大，主要措施包括优化种植结构减少农田养分流失、建设小型人工湿地净化散排生活污水、整治农村环境减少村落面源等。沟道逐级阻控主要针对汇流节点开展沟塘湿地生态化改造，包括近自然湿地、生态塘、生态沟渠等，强化面源污染的沉淀、阻滞和净化效果。除已有的水土保持措施外，小流域面源生态阻控系统涉及近自然湿地 3 处、生态塘 3 处、生态沟渠 3 段、植物护坎 17 处、小型人工湿地 1 处(见图 4)。坡面降雨径流依次进入 1#近自然湿地、2#近自然湿地、3#近自然湿地，以及下游的生态沟渠、生态塘等，最后通过 3#生态塘流出。上游山麓村落的分散生活污水依地势首先流入 3#近自然湿地，在进入生态沟渠，然后依次经过 1#生态塘、2#生态塘后进入生态沟渠，最后通过 3#生态塘流出；下游村落分散污水通过管网进入小型人工湿地，净化后进入 3#生态塘，最后流出。沿途农田耕地的灌溉退水和降雨径流就近进入近自然湿地、植物护坎等阻控措施，逐级阻控净化后通过 3#生态塘流出。



图 4 钱家沟小流域面源污染生态阻控措施布局

Fig. 4 Layout of ecological control measures for non-point source pollution in Qianjiagou Watershed

4.3 工程设计

坡改果梯、植物护坎等均为传统的水土保持措施，设计方法参考《水土保持工程设计规范》；人工湿地设计参考《人工湿地污水处理技术规程》(DG/TJ 08-2100-2012)。近自然湿地、生态塘、

生态沟渠等面源阻控措施无相关设计规范，具体设计方案如下。

1) 近自然湿地设计方案。近自然湿地的原始地貌一般为浅水沼泽地，湿地建设将依据现场地形条件，对沼泽湿地进行修整，提高污染净化和阻控能力。以2#近自然湿地为典型介绍该类措施的建设方法。2#近自然湿地建设前上游农田灌渠排水在北侧部分汇集，前端建有挡墙，水深1 m左右，中间深两边浅。挡墙以上水深逐渐变浅，挡墙上游10 m处以上基本无水，植被生长杂乱。湿地改造主要内容为：中间修建土埂，用于导流，延长水力停留时间；导流土埂之间种植水生植物，土埂上植草；湿地前端浅水区种植挺水植物，深水区种植沉水植物；修整原有挡墙，设置出水口与外部灌渠连接(见图5)。

导流埂采用梯形断面设计，顶部宽度30 cm，底部宽度50 cm，高度为30 cm，导流埂间距为50 cm。在导流埂之间种植美人蕉，种植密度为10~16株·m⁻²；导流土埂上端和侧面种植龙须草，株距0.25 m；深水区种植香蒲，种植密度为10~16株·m⁻²。导流埂数量为17条，导流埂之间平均水深10 cm，湿地进水流量约10 m³·d⁻¹，进水在湿地中的停留时间约为3.3 d。

2) 生态塘设计方案。生态塘的原始地貌一般为废弃塘堰或者低洼坑塘，通过适当的微地形改造和植物措施，增强其污染阻控能力。以2#生态塘为典型说明该类措施的建设方法。2#生态塘建设

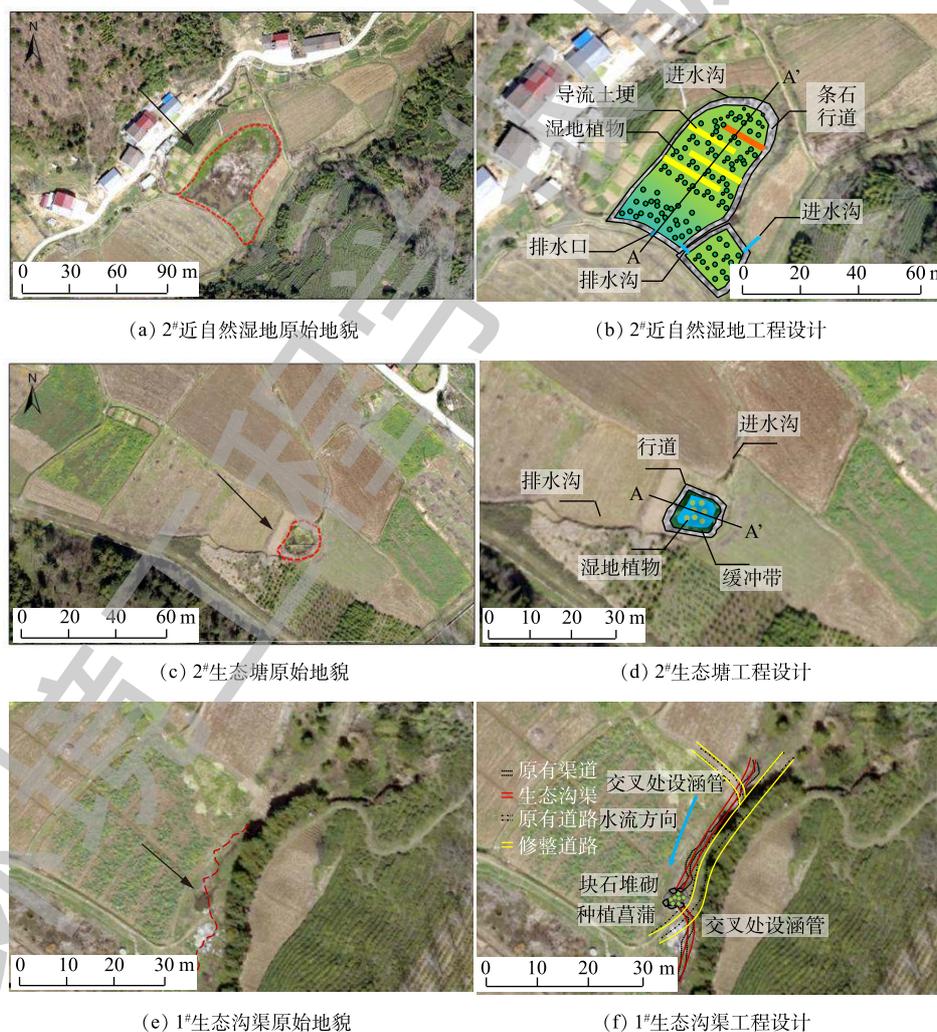


图5 钱家沟小流域面源生态阻控典型工程设计

Fig. 5 Design of typical ecological control measures for non-point source pollution in Qianjiagou Watershed

前为塘底杂草较多, 沼泽化严重, 水深不足 0.5 m, 岸边植被稀疏, 周边为苗圃和耕地。生态塘改造主要内容为: 依据现场地形, 完善汇水和排水沟道系统, 坡面设置植被缓冲, 水塘内部种植水生植物(见图 5)。

首先对生态塘进水沟道进行疏浚清理以保证周边农田径流能够进入生态塘; 在出口设置溢流堰, 以控制生态塘水深; 对排水沟进行疏浚清理以连通生态塘与主沟道。然后对边坡进行整理, 水面以上种植美人蕉形成缓冲区, 周边铺设条石方便行走。最后进行水生植物配置, 在生态塘中种植香蒲、荷花等, 种植密度为 $10\sim 16$ 株 \cdot m $^{-2}$ 。2 $^{\#}$ 生态塘有效面积 120 m 2 , 设计水深 1.5 m, 水力停留时间约为 18 d。

3) 生态沟渠设计方案。生态沟渠即对原有排水沟渠进行生态化改造, 优化沟渠形状及护坡结构, 并在重要节点设置沉降池。以 2 $^{\#}$ 近自然湿地附近的生态沟渠为典型说明该类措施的建设方法。该段渠道长度 20 m, 现状为道路和沟道并行, 道路靠近山体, 为机耕路, 沟道靠近农田。沟道上游有田间道路跨过沟道与机耕路连通, 沟道通过涵管穿道路而过。沟道下游有一水坑, 机耕路于水坑以下与沟道相交, 相交处为乱石, 水流穿乱石而过进入下游沟道。沟渠整治方案主要为道路修整、沟道整理和坑塘改造, 整治方案见图 5。

首先进行道路修整, 对原有机耕路进行土方夯实和道路修筑, 坑塘下游沟道与机耕路交汇处铺设涵管, 以保持机耕路连通。然后进行沟道整理, 清除沟道杂草, 整理边坡, 在沟渠边坡和渠道底部种植水生、湿生植物, 在渠底种植狐尾藻、菖蒲和沮草等, 在边坡常水位线以下种植狐尾藻、灯芯草、沮草等。最后开展坑塘改造, 将水坑改造为沉降池, 在水坑周边堆砌大型块石, 内部种植菖蒲, 种植密度为 $5\sim 18$ 株 \cdot m $^{-2}$ 。

4) 小型人工湿地设计方案。建设水平潜流人工湿地。小型人工湿地服务范围内有村民 8 户, 常住人口 30 人。按照人均生活用水定额 200 L \cdot d $^{-1}$ 计算, 湿地进水量为 6 m 3 \cdot d $^{-1}$ 。根据《人工湿地污水处理技术规程》(DG/TJ 08-2100-2012), 人工湿地宽度为 5.5 m, 长度为 14.4 m。水平潜流人工湿地沿水流方向分为配水区、工作区和集水区, 集配水区人工湿地填料粒径为 16~100 mm; 工作区填料层根据位置为粒径为 2~20 mm。采用的湿地植物为美人蕉和鸢尾, 种植密度为 $5\sim 16$ 株 \cdot m $^{-2}$ 。

4.4 阻控系统运行效果

钱家沟小流域面源污染生态阻控 2018 年 4 月建设完成, 监测工作于 2017 年 12 月—2019 年 10 月持续开展, 逐月监测。单项措施阻控效果监测在生态沟渠、近自然湿地、生态塘、人工湿地进口和出口布设监测点位, 监测时段为 2019 年 4 月—2019 年 10 月, 污染物去除率为入流和出流浓度平均值之差与入流浓度平均值的比值; 小流域总体阻控效果监测在沟道出口布设点位, 监测时段为 2017 年 12 月—2019 年 10 月, 污染物去除率为阻控系统建设前(2017 年 12 月—2018 年 4 月)和建设后同期(2018 年 12 月—2019 年 4 月)浓度平均值之差与建设前浓度平均值的比值。监测内容包括 TN、TP、TSS。

根据各项生态工程措施的面源阻控效果监测结果(见表 1), TN 平均去除率为 17%~56%, 人工湿地对 TN 阻控效果最好。TP 平均去除率为 18%~84%, TSS 平均去除率为 30%~87%, 人工湿地对二者的去除比例均为最高。根据工程建设前后小流域出口的水质监测结果, 面源阻控系统建设前 TN 浓度为 1.17~3.78 mg \cdot L $^{-1}$, 建设后 TN 浓度为 1.23~3.47 mg \cdot L $^{-1}$, 平均去除率为 33.9%; 面源阻控系统建设前 TP 浓度为 0.02~0.11 mg \cdot L $^{-1}$, 建设后 TP 浓度为 0.01~0.08 mg \cdot L $^{-1}$, 平均去除率为 49.1%, 总体阻控效果较好。阻控系统对 TSS 的去除效果不明显, 可能是因为小流域水土保持措施基础较好, 颗粒物流失已经得到较好控制的原因。

表1 钱家沟小流域主要生态工程措施面源污染阻控效果
Table 1 Non-point source pollution control effect of main measures in Qianjiagou Watershed

监测点位	TN			TP			TSS		
	入流浓度/ (mg·L ⁻¹)	出流浓度/ (mg·L ⁻¹)	平均去除 率/%	入流浓度/ (mg·L ⁻¹)	出流浓度/ (mg·L ⁻¹)	平均去除 率/%	入流浓度/ (mg·L ⁻¹)	出流浓度/ (mg·L ⁻¹)	平均去除 率/%
生态沟渠	0.54~11.57	0.39~8.64	35	0.02~0.26	0.02~0.25	18	3~22	1~42	53
近自然湿地	0.51~4.68	1.05~2.38	17	0.01~0.16	0.01~0.07	63	2~65	1~25	59
生态塘	0.45~5.32	0.24~2.58	36	0.01~0.15	0.01~0.13	34	2~19	1~15	30
人工湿地	9.20~40.29	8.74~22.58	56	3.66~7.52	0.31~1.26	84	18~200	1~42	87

5 结语

丹江口库区小流域面源生态阻控按照“控山”“净水”“护林”“保田”“治村”的总体思路开展,阻控系统各项措施在空间衔接,功能上互补。阻控系统建设要充分结合已有水土保持措施,重点强化汇水沟道和塘注节点的面源阻控能力。组控系统建设包括小流域本底调查和问题识别、措施布局设计、工程建设和运行监测等步骤。库周钱家沟小流域的应用实践表明,面源阻控系统建设后,TN和TP下降很多,总体阻控效果良好,可为南水北调中线水源地小流域的面源治理提供参考。

参考文献

- [1] 姜世英,韩鹏,贾振邦,等.南水北调中线丹江口库区农业面源污染PSR评价与基于GIS的空间特征分析[J].农业环境科学学报,2010,29(11):2153-2162.
- [2] 杨林章,冯彦房,施卫明,等.我国农业面源污染治理技术研究进展[J].中国生态农业学报,2013,21(1):96-101.
- [3] 李秀芬,朱金兆,顾晓君,等.农业面源污染现状与防治进展[J].中国人口资源与环境,2010,20(4):81-84.
- [4] 胡甲均,张玉华.丹江口库区及其上游水土流失现状及防治对策[J].中国水利,2003(7):47-49.
- [5] 莫明浩,方少文,涂安国,等.水土流失面源污染及其防控研究综述[J].中国水土保持,2012(6):32-33.
- [6] 廖纯艳.构建水土流失防治体系 建设水清地绿天蓝美丽长江[J].人民长江,2015,46(19):44-47.
- [7] 方怒放,史志华,李璐.基于输出系数模型的丹江口库区非点源污染时空模拟[J].水生态学杂志,2011,32(4):7-12.
- [8] 雷沛,曾祉祥,张洪,等.丹江口水库农业径流小区土壤氮磷流失特征[J].水土保持学报,2016,30(3):44-48.
- [9] 刘毅,陶勇,万开元,等.丹江口库区坡耕地柑桔园不同覆盖方式下地表径流氮磷流失特征[J].长江流域资源与环境,2010,19(11):1340-1344.
- [10] 郑艳霞,程超,辛小康.丹江口水库入库非点源污染负荷的计算与讨论[J].人民长江,2015,46(10):46-51.
- [11] 宋国强,殷明,张文漫,等.十堰市入库总氮对丹江口水库总氮浓度贡献的初步估算[J].环境科学与技术,2006,29(增刊):164-165.
- [12] 贾海燕,徐建锋,李海燕,等.农业小流域土地利用格局变化对氮素输出的影响:以丹江口库区胡家山小流域为例[J].人民长江,2019,50(2):28-33.
- [13] 杨林章,施卫明,薛利红,等.农村面源污染治理的“4R”理论与工程实践:总体思路与“4R”治理技术[J].农业环境科学学报,2013,32(1):1-8.
- [14] 施卫明,薛利红,王建国,等.农村面源污染治理的“4R”理论与工程实践:生态拦截技术[J].农业环境科学学报,2013,32(9):1697-1704.

- [15] 于江华, 徐礼强, 高永霞, 等. 面源污染管理中不同类型工程设施的性能比较[J]. 环境工程学报, 2015, 9(8): 112-120.
- [16] 汪涛, 夏伟, 雷俊山, 等. 生态塘链对农村畜禽养殖尾水的深度净化效果[J]. 湖北农业科学, 2019, 58(10): 62-67.
- [17] 朱惇, 尹炜, 徐建锋. 丹江口典型小流域面源污染控制措施优化配置研究[C]//中国水土保持学会水土保持规划设计专业委员会. 中国水土保持学会水土保持规划设计专业委员会2015年年会论文集. 昆明, 2015: 139-145.
- [18] 贾海燕, 徐建锋, 尹炜. 丹江口库区生态清洁小流域建设思路探讨[C]//中国水土保持学会水土保持规划设计专业委员会. 中国水土保持学会水土保持规划设计专业委员会2015年年会论文集. 昆明, 2015: 90-95.
- [19] 王华新, 马泽民. 南水北调丹江口库区扶贫攻坚政策调研报告[J]. 当代农村财经, 2014(12): 35-37.
- [20] 房珊瑚. 丹江口库区农用化肥非点源污染负荷及空间分布特征研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2018.
- [21] 龚世飞, 丁武汉, 肖能武, 等. 丹江口水库核心水源区典型流域农业面源污染特征[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(12): 2816-2825.
- [22] 赵文耀, 胡家庆. 丹江口水库流域面源污染现状分析[J]. 南水北调与水利科技, 2007, 5(2): 56-58.
- [23] 刘震. 总结经验再接再厉全力推进“丹治”工程建设[J]. 中国水土保持, 2014(12): 6-8.
- (本文编辑: 靳炜, 郑晓梅)

Ecological control of non-point source pollution based on small watershed in the water source of the Middle Route of South-to-North Water Diversion Project

WANG Chao¹, JIA Haiyan¹, LEI Junshan¹, XU Jianfeng¹, LEI Pei², YIN Wei^{1*}

1. Changjiang Water Resources Protection Institute, Wuhan 430051, China

2. State Key Laboratory of Pollution Control and Resources Reuse, School of the Environment, Nanjing University, Nanjing 210046, China

*Corresponding author, E-mail: 2000yinwei@163.com

Abstract Danjiangkou Reservoir, as the water source of the middle route project, water quality protection is very critical. The basic way to control the non-point source pollution is to build the ecological control system of non-point source pollution in the watershed unit. Based on the current situation of Danjiangkou reservoir area, the general idea of five-in-one ecological control for the non-point source control in the watershed unit: ‘controlling mountains’, ‘purifying water’, ‘protecting forests’, ‘protecting farmland’, ‘governing villages’ was put forward. The measures at catchment basin, catchment channel and pond node are connected and functionally complementary to form non-point source pollution control system in small watershed. The implementation of ecological control scheme of non-point source pollution includes background investigation, problem identification of small watershed, measures layout and design, project construction and operation monitoring. The application practice of technological approaches were carried out at Qianjiagou small watershed in Danjiangkou Reservoir, after the construction of the non-point source resistance control system, the total nitrogen and total phosphorus in the small watershed decreased by 33.9% and 49.1% on average. The overall resistance control effect of small watershed was good, which can provide reference for pollution control of non-point source in Danjiangkou Reservoir area.

Keywords Middle Route of South-to-North Water Diversion Project; Danjiangkou Reservoir; water source; small watershed; non-point source pollution; ecological control