

**编者按** 本期刊发的《南水北调中线水源地缓坡型库岸生态屏障构建》一文系“南水北调中线水源地面源污染生态防控技术”特邀专稿之第 2 篇。其主要内容是, 针对丹江口水库缓坡型库岸地形特点和土地资源开发利用问题, 探索了库周生态屏障构建的技术方法。缓坡型库岸是丹江口水库重要库岸类型, 大坝加高前一直都是重要的土地资源。由于库区农业生产强度较大、植被覆盖度低, 故缓坡型库岸面源输出强度较高。根据研究结果, 提出了将消落区划分为拦滤净化带、固岸缓冲带、保土持水带和适度利用带, 并构建由生态塘、近自然湿地、生态透水坝和生态沟道组成的生态水系统的建议。消落区植被恢复能够杜绝土地无序耕种的行为, 并可减少新的污染源输入; 适度利用带的设置则可缓解土地利用与水质保护间的矛盾。



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.202002117

中图分类号 X524

文献标识码 A

王超, 尹炜, 雷沛, 等. 南水北调中线水源地缓坡型库岸生态屏障构建[J]. 环境工程学报, 2020, 14(11): 2930-2937.

WANG Chao, YIN Wei, LEI Pei, et al. Ecological barrier constructing in the gentle slope reservoir bank in the water source of Middle Route of South-to-North Water Diversion Project[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2020, 14(11): 2930-2937.

## 南水北调中线水源地缓坡型库岸生态屏障构建

王超<sup>1</sup>, 尹炜<sup>1,\*</sup>, 雷沛<sup>2</sup>, 贾海燕<sup>1</sup>, 雷俊山<sup>1</sup>

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** 丹江口水库缓坡型库岸农业生产强度大, 面源污染对库区水质产生威胁。构建库岸生态屏障, 是阻控库周面源, 减少消落区土地无序利用, 保障水库水质的重要手段。缓坡型库岸生态屏障构建的核心是消落区植被恢复和生态水系统建设。植被恢复将消落区划分为拦滤净化带(160~163.5 m)、固岸缓冲带(163.5~165 m)、保土持水带(165~167 m)和适度利用带(167~170 m), 适度利用带能够解决消落区土地无序耕种的问题。生态水系统建设根据现场微地形特征, 设计布局生态塘、近自然湿地、生态透水坝和生态沟道等措施。选择香花镇缓坡型库岸开展了应用实践, 构建的生态屏障对 TN、TP、TSS 的预计削减量分别为 3.94、0.23、315.79 t·a<sup>-1</sup>, 各污染物去除率在 75% 以上。上述研究结果可为南水北调中线水源地缓坡型生态屏障构建提供依据, 亦可为我国其他水库库岸生态建设提供借鉴和参考。

**关键词** 南水北调中线; 丹江口水库; 水源地; 缓坡; 生态屏障; 消落区; 面源污染

丹江口水库是南水北调中线工程水源地, 水质保护十分重要。随着库区点源逐步得到治理, 面源污染对丹江口水库水质的影响越来越大<sup>[1]</sup>。缓坡型库岸是丹江口水库重要的库岸类型, 大坝加高前一直都是库周群众重要的土地资源<sup>[2]</sup>。由于农业生产强度较大, 植被覆盖度低, 缓坡型库岸面源输出强度较高。已有研究显示, 丹江口库区面源污染产生的 TN 和 TP 负荷分别达到  $3.7 \times 10^4$  t 和  $1.9 \times 10^3$  t, 其中以缓坡型库岸面积最大的河南淅川县污染强度最高<sup>[3]</sup>。2013 年, 丹江口大坝加高工程完工, 坝顶高程从 162 m 加高至 176.6 m, 丹江口水库水位抬升后, 大量农田耕地将被淹没。然

收稿日期: 2020-02-29; 录用日期: 2020-07-06

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

而，近年来水库水位始终没有达到 170 m 的水位目标，消落区无序耕种现象依然时有发生<sup>[4]</sup>，加剧了库周面源污染输入。此外，新淹没区域土壤的氮磷释放<sup>[5]</sup>、库周土壤侵蚀<sup>[6]</sup>、以及周边农村生活<sup>[7]</sup>等面源污染都成为威胁库区水质的重要因素。

开展库岸生态屏障建设，恢复植被系统和污染阻控能力，是控制库周面源污染的有效途径。在国外，河湖岸边带生态修复和保护技术推广应用较为普及<sup>[8-9]</sup>；我国从 20 世纪 90 年代开始开展岸边带保护与修复技术的研究与应用<sup>[10-11]</sup>，探索出设置植被缓冲带、调整土地利用、优化种植结构等有效措施<sup>[12-15]</sup>。丹江口水库缓坡型库岸农业生产强度大，土地资源利用和水质保护存在矛盾；同时新形成的消落区因水文情势改变将进入新一轮植被演替过程<sup>[16-17]</sup>，若不加以人工干预，植被恢复过程漫长且生态效益有限<sup>[18-19]</sup>。针对上述特点，国内外尚没有成熟的治理模式可供参考。本研究基于丹江口水库缓坡型库岸特殊的水文条件及其土地资源价值，选择典型区域探索生态屏障构建的技术方案，以期为南水北调中线水源地保护提供依据，亦为我国其他湖库岸带生态建设提供借鉴和参考。

## 1 区域概况

丹江口水库横跨河南、湖北两省，由汉江库段(汉库)和丹江库段(丹库)2部分组成。丹江口水利枢纽分初期工程和大坝加高工程两期建设，初期工程于 1973 年底竣工，水库正常蓄水位 157 m；大坝加高工程于 2013 年建成，正常蓄水位为 170 m，最低水位为 160 m。大坝加高后，160~170 m 水位线区间成为新的消落区。根据水库运行调节方式，每年 5 月初至 6 月 21 日，水库水位逐渐降低到夏季汛限水位 160 m；8 月 21—31 日逐渐抬高到秋季汛限水位 163.5 m；10 月 1 日以后，逐渐充蓄到正常蓄水位 170 m。

从地形条件看，汉库库岸以陡坡型为主，库岸曲折、立地陡峭，多为石质坡面，土地类型多为林地；丹库库岸以缓坡型为主，库岸地势平缓，消落区宽度从数百米到几公里，大坝加高前土地类型多为自然荒草漫滩和农耕地。缓坡型库岸土壤肥沃、水分充足，农业耕种比较普遍。根据各库周各区县统计资料，大坝加高前 160~170 m 高程范围耕种面积 25.67 km<sup>2</sup>，占消落区总面积的 10.52%，主要分布在淅川、丹江口、郧阳 3 区县，其中淅川县 14.4 km<sup>2</sup>，丹江口市 5.00 km<sup>2</sup>，郧阳区 6.27 km<sup>2</sup>(见 图 1)。根据国务院南水北调办 2010 年 5 月批准的《南水北调中线一期工程丹江口

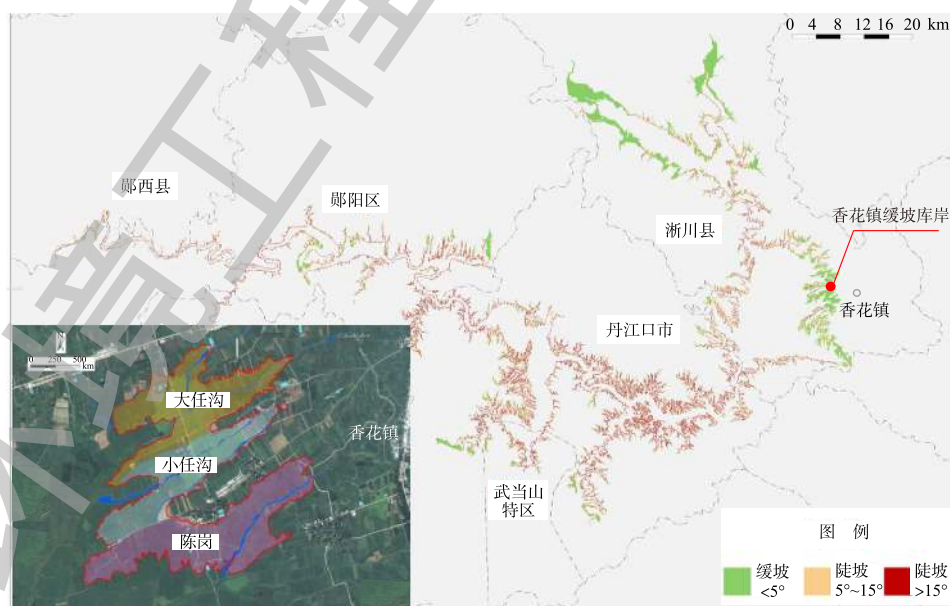


图 1 丹江口水库库岸坡度分布 (170 m 高程以下范围) 和项目区位置

Fig. 1 Distribution of Danjiangkou Reservoir bank slope (range below 170 m elevation) and location of the project area

水库初步设计阶段建设征地移民安置规划设计报告》，丹江口水库淹没涉及的区域应全部实施征地移民。2013年，水库移民征地工作全部完成，并完成了库底清理工作，为水库蓄水奠定了良好基础。然而，由于近年来上游来水量不足，最高水位仅达到167 m左右。由于消落区管理办法尚不完善，加上库周土地资源紧张，消落区无序耕种的现象依然存在。

## 2 总体思路和技术框架

### 2.1 总体思路

缓坡型库岸受水文情势变化的影响，消落区植被系统退化，拦滤吸收和阻滞净化能力丧失或下降。库岸土地无序耕种造成土壤侵蚀和化肥流失，形成的面源污染对库区水质也会造成威胁。生态屏障构建的关键在于恢复消落区植被系统，强化库岸面源阻控能力，在此基础上形成消落区土地资源的可持续利用模式，协调水质保护和库周群众生存发展的关系(见图2)。

1) 构建消落区植被系统。水库调度造成的水文条件变化阻断了消落区植被的自然演替过程，可能造成植被群落退化消亡。通过植物群落的合理搭配和布局，能够引导库岸植被适应水文变化规律，促进群落的稳定化和生态环境效益的充分发挥。植被带布局以水库调度方式为依据，按照淹水时间的长短，在不同高程布设具有不同耐淹能力的植物群落，对草本、灌丛、乔木等不同植物群落类型进行合理搭配和种植。植被群落的优选配置过程中，应选择污染物吸收效率高、径流拦截能力强、根系固土能力强，并适应于库岸带地形地质条件的群落类型。

2) 充分利用微地形条件构建库周生态水系统。针对库岸带面源负荷高，坑塘沟道阻控能力差的问题，对自然的汇水沟道和坑塘湿地系统进行适当人工改造，形成基于生态塘/生态沟道/近自然湿地的生态水系统，增强库岸污染阻滞能力。生态水系统构建过程中，要结合消落区地形特征，合理搭配生态塘、生态沟道、近自然湿地等措施。针对水库水位变幅较大的特点，要基于不同措施的功能特点，合理安排水体系统的空间布局，保证在不同水位条件下都能够实现污染阻滞效果。

3) 建立消落区土地保护利用模式。根据国务院颁布的《全国大中型水利水电工程建设征地补偿和移民安置条例》，大中型水利水电工程建成后形成的水面和水库消落区土地属于国家所有，这些土地可以在服从水库统一调度和保证工程安全、符合水土保持和水质保护要求的前提下，通过当地县级人民政府优先安排给当地农村移民使用。当前，丹江口水库消落区尚存在无序耕种的问题，要建立合理的保护利用模式，有效引导库周群众积极参与，保障库岸生态屏障建设的持续开展。

### 2.2 技术框架

植被恢复过程中，将消落区划分为拦滤净化带、固岸缓冲带、保土持水带和适度利用带。拦滤净化带位于160~163.5 m高程范围内，淹水时间最长，主要种植生长速度快、养分吸收能力强的草本植物。此区域可拦截上游来水中夹带的枯枝落叶以及碎屑颗粒物，同时通过根系作用吸收净化水体中的营养物质。固岸缓冲带位于163.5~165 m范围内，淹水时间减少，植物群落以乔草群落为主。此区域位于拦滤净化带和保土持水带之间，具有较强的缓冲作用；同时乔木的发达根系能

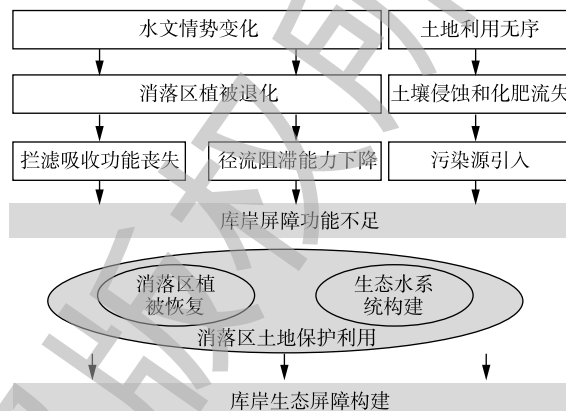


图2 丹江口水库缓坡型库岸面源生态阻控总体思路

Fig. 2 General idea of ecological resistance control for non-point source pollution in the gentle slope bank of Danjiangkou Reservoir



够抵抗风浪, 对库岸能够起到良好的固定作用。保土持水带位于 165~167 m 高程范围内, 淹水时间较短, 植物群落为乔灌草群落。乔灌草群落层次分明, 对降水缓冲作用明显, 能够减少降雨对土壤的侵蚀, 起到保土持水的作用。适度利用带位于 167~170 m 高程范围, 淹水时间最短, 植物群落以经济苗木为主, 能够实现一定的经济效益。该区带严格实施管护制度, 禁止使用化肥农药及其他可能污染土壤和水体的行为。

生态水系统由生态塘、近自然湿地、生态透水坝和生态沟道等组成。生态塘是对天然塘堰加以人工修整, 强化植物措施, 径流在塘内滞留沉降, 有机物通过植物和微生物降解<sup>[20]</sup>。近自然湿地是对低洼沼泽地进行微地形改造, 强化已有植被条件, 提升水力停留时间, 形成径流净化系统<sup>[21]</sup>。生态透水坝利用砾石或碎石在河道中适当位置人工垒筑坝体, 通过调节坝体的过流量, 减缓径流流速, 强化拦滤和沉降过程, 控制面源污染<sup>[22]</sup>。生态沟道是对现有汇水沟道进行适当改造, 增加水力停留和植物吸收, 实现面源径流净化<sup>[23]</sup>。

植被功能带是库岸生态屏障的主要部分, 生态水系统是重要补充。二者构通过拦截过滤、沉降吸收等作用对消落区土壤本身的存量污染和库周汇入径流污染起到深度净化作用, 保证入库径流水质良好。植被功能带的建设能够杜绝消落区无序耕种的行为, 减少了新的污染源输入, 而适度利用带的设置缓解了土地利用和水质保护的矛盾。上述保护利用模式应由县级人民政府统一规划, 乡政府和村委会具体实施, 通过引入企业投资、建立合作社等模式<sup>[24]</sup>, 实现大面积推广。

### 3 香花镇库岸典型案例

香花镇库岸位于河南省淅川县, 紧邻丹江口水库, 同时紧靠南水北调中线工程陶岔取水口; 地理坐标为北纬 32°44'30"~33°45'50", 东经 110°39'40"~110°41'15", 高程为 160~170 m, 面积为 2.16 km<sup>2</sup>。项目区由 3 个小流域组成, 分别为大任沟流域, 小任沟流域和陈岗流域(见图 1)。区内主要土地利用类型为农耕地, 伴随着少量的林地、村庄和自然坑塘斑块, 是缓坡型库岸带的典型代表。

#### 3.1 消落区植被恢复设计

根据课题组对丹江口水库消落区恢复适宜物种的筛选成果<sup>[18]</sup>, 结合区域主要经济苗木类型, 确定消落区的植被恢复物种。选择乔木物种 16 种, 分别为落羽杉、池杉、竹柳、旱柳、枫杨、乌桕、大叶女贞、梨树、五角枫、油松、广玉兰、楝树、柿树、白蜡、罗汉松、樟树、杨树; 选择灌木物种 6 种, 分别为桑树、紫穗槐、石榴、紫薇、紫荆、夹竹桃; 选择草本物种 4 种, 分别为狗牙根、香根草、芦苇、芦竹。

各植被功能带的植物群落模式有: 拦滤净化带以香根草、芦苇、芦竹为主要种植物种, 分别布置在不同的库湾, 既可以满足生态截污及净化作用, 又便于对 3 种耐水湿草本植物的水体净化效果进行对比研究; 固岸缓冲带以竹柳、旱柳、落羽杉、池杉、桑树、狗牙根、香根草作为主要建群物种, 分别营造以竹柳-香根草、竹柳-狗牙根、旱柳-香根草、旱柳-狗牙根、落羽杉-香根草、落羽杉-狗牙根、池杉-香根草、池杉-狗牙根、桑树-香根草、桑树-狗牙根为主的 10 种不同群落类型; 保土持水带以落羽杉、池杉、竹柳、旱柳、枫杨、乌桕、桑树、紫穗槐、香根草、狗牙根作为主要建群物种, 主要营造竹柳-桑树-香根草、竹柳-桑树-狗牙根、旱柳-桑树-香根草、旱柳-桑树-狗牙根、竹柳+旱柳-香根草、竹柳+旱柳-狗牙根、枫杨-桑树-狗牙根、枫杨+乌桕-紫穗槐-狗牙根+美人蕉+黄菖蒲、旱柳+乌桕-紫穗槐+桑树-狗牙根+黄菖蒲、枫杨+旱柳-紫穗槐+桑树-狗牙根、枫杨+旱柳+乌桕-桑树+紫穗槐-狗牙根、枫杨+竹柳-紫穗槐+桑树-狗牙根等群落配置模式; 适度利用带植物以罗汉松、油松、樟树、大叶女贞、梨树、五角枫、广玉兰、楝树、柿树、白蜡、杨树、石榴、紫薇、紫荆、夹竹桃作为主要选育物种, 同时结合场地现状条件, 部分图斑搭配种植

枫杨、乌桕、旱柳、桑树、紫穗槐等营造示范区特色景观林。

植被恢复共涉及 113 个图斑，32 种群落配置模式(见图 3)。其中 160~163.5 m 淹没区图斑 17 个，总面积约 71.80 hm<sup>2</sup>；163.5~165 m 淹没区图斑 32 个，总面积约 29.92 hm<sup>2</sup>；165~167 m 淹没区图斑 30 个，总面积约 43.46 hm<sup>2</sup>；167~170 m 淹没区图斑 34 个总面积约 72.34 hm<sup>2</sup>。

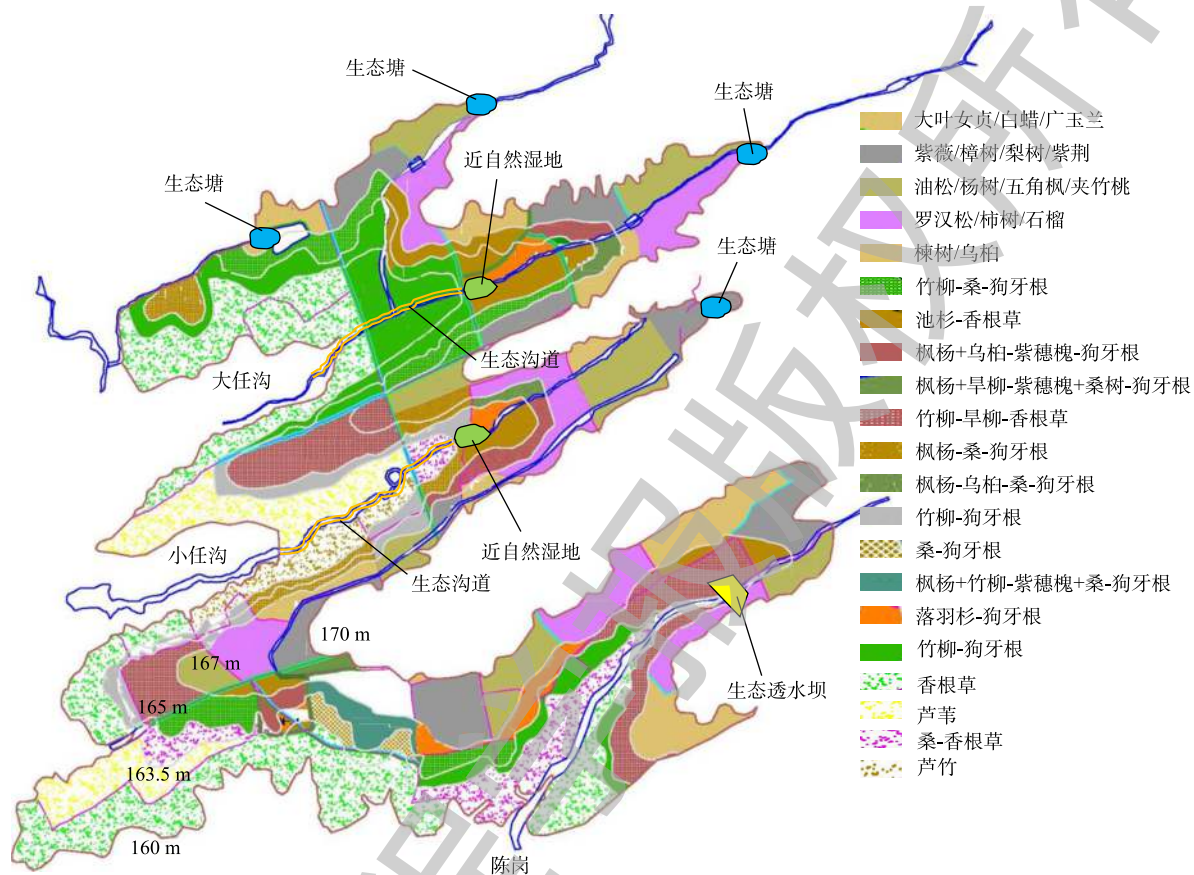


图 3 香花镇缓坡型库岸生态屏障构建措施布局

Fig. 3 Distribution of ecological barriers measures in the gentle slope bank of Xianghua Town

### 3.2 生态水系统设计

结合项目区水系汇流情况及坑塘分布现状带，对流域内已有的沟渠、坑塘进行简单人工修整改造，形成“塘-湿地”水系统，共布设 9 处水系统措施(见图 3)。

大任沟布设生态塘 3 处(位于 170 m 高程)，近自然湿地 1 处(位于 164 m 高程)，生态沟道 1 处(位于 160~163.5 m 高程)；小任沟布设生态塘 1 处(位于 170 m 高程)，近自然湿地 1 处(位于 164 m 高程)，生态沟道 1 处(位于 160~163.5 m 高程)；陈岗小流域地形起伏较大，仅在坡降最大处(位于 165 m 高程)布设生态透水坝 1 处。构建的生态水系统能够在不同水文情景下满足面源阻控需求。正常蓄水位 170 m 条件下，生态塘来对上游沟道来水发挥阻控作用。秋季汛限水位 163.5 m 条件下，“生态塘-近自然湿地-生态透水坝”系统共同发挥生态阻控作用。夏季汛限水位 160 m 条件下，生态沟道可在“生态塘-近自然湿地”系统的基础上，进一步发挥阻控作用，确保入库径流水质优良。

生态塘主要是对原有坑塘进行生态化改造<sup>[25]</sup>，改造内容包括：对排水沟进行疏浚清理，连通生态塘与主沟道；修整进水沟渠，保证周边农田径流能够进入生态塘；对边坡进行平整，水面以上部分种植美人蕉，形成缓冲区；生态塘内种植香蒲。近自然湿地主要是对原有低洼沼泽湿地进行修整<sup>[26]</sup>，内容包括：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，土壤上植草；湿地浅水区种植挺水植物，深水区种植沉水植物；对排水沟进行疏浚清理，保证上游沟道和周边径流能够汇入湿地系统。生态透水坝位于田间废弃河道，坝体分为控制层、溢流层、稳定层和过滤层，分别由不同粒径碎石和砾石构成<sup>[27]</sup>。生态沟道针对项目区溪沟泥沙淤积，边坡坍塌等问题，开展清淤及加固防护，并在沟道种植芦苇、香蒲等湿生植物，控制沟道侵蚀、减少水土流失和面源污染。

### 3.3 污染阻控效果评估

利用输出系数法<sup>[28]</sup>估算项目区 3 条沟道流域范围的面源污染负荷产生量。基于项目区 1:2 000 地形图，统计得到 170 m 高程以上各地类面积；170 m 高程以下消落区全部按林地计算。降雨量取南阳地区多年平均降雨量 800.5 mm。根据丹江口水库调度规程，170、163.5 和 160 m 水位大致对应冬春季、秋季和夏季，结合淅川县降雨季节分布特征<sup>[29]</sup>，3 种水位对应的降雨量占比约为 10%、30%、60%。按照该比例分配年均降雨量，计算 3 种水位的面源负荷产生量，结果见表 1。面源负荷主要集中在 163.5 m 和 160 m 2 个水位时期，170 m 水位时负荷量较少。

研究表明，生态塘对 TN、TP、TSS 去除率分别为 34.7%、34.8%<sup>[30]</sup> 和 42.4%<sup>[31]</sup>；近自然湿地对 TN、TP、TSS 去除率分别为 62.9%、54.7%、73.5%<sup>[32]</sup>；生态透水坝对 TP、TSS 去除率分别为 19.0%、28.1%<sup>[33]</sup>；植被功能带对 TN、TP、TSS 去除率分别约为 70%、64%、80%<sup>[34]</sup>；生态沟道对 TN、TP、TSS 去除率分别 53.2%、71.8%、80.2%<sup>[35]</sup>。各项措施按照串联关系逐级累积，计算得到不同水文情境下的污染负荷去除量，结果如表 1 所示。项目区全年对 TN、TP、TSS 的削减量分别为 3.94、0.23、315.79 t·a<sup>-1</sup>，各污染物去除率在 77%~88%；夏季 (160 m 水位) 项目区对 TN、TP、TSS 的削减量分别为 2.11、0.12、169.69 t·a<sup>-1</sup>，各污染物去除率在 85% 以上。虽然冬春季 (170 m 水位) 污

表 1 香花镇缓坡型库岸生态屏障面源负荷阻控效果评估

Table 1 Evaluation of load resistance control effect of non-point source of ecological barriers in the gentle slope bank of Xianghua Town

小流域	季节	水位/m	面源负荷产生量/(t·a <sup>-1</sup> )			阻控措施和污染物去除率	面源负荷削减量/(t·a <sup>-1</sup> )		
			TSS	TN	TP		TSS	TN	TP
大任沟	冬春季	170	12.78	0.17	0.02	生态塘	5.42	0.06	0.01
	秋季	163.5	53.61	0.72	0.04	生态塘+植被功能带+近自然湿地	51.97	0.67	0.04
	夏季	160	62.68	0.84	0.05	生态塘+植被功能带+近自然湿地+生态沟道	62.30	0.81	0.05
	全年		129.07	1.73	0.11	—	119.69	1.54	0.1
小任沟	冬春季	170	5.12	0.08	0.01	生态塘	2.17	0.03	0.00
	秋季	163.5	45.94	0.62	0.03	生态塘+植被功能带+近自然湿地	44.54	0.58	0.03
	夏季	160	55.02	0.74	0.04	生态塘+植被功能带+近自然湿地+生态沟道	54.68	0.72	0.04
	全年		106.08	1.44	0.08	—	101.39	1.33	0.07
陈岗	冬春季	170	11.67	0.16	0.02	—	0.00	0.00	0.00
	秋季	163.5	52.49	0.71	0.04	植被功能带	41.99	0.50	0.03
	夏季	160	61.56	0.83	0.05	植被功能带+生态透水坝	52.71	0.58	0.04
	全年		125.72	1.7	0.11	—	94.7	1.08	0.07
合计	冬春季	170	29.57	0.41	0.04	污染物去除率：TSS 26%，TN 21%，TP 21%	7.59	0.09	0.01
	秋季	163.5	152.04	2.05	0.12	污染物去除率：TSS 91%，TN 85%，TP 80%	138.51	1.74	0.10
	夏季	160	179.26	2.41	0.14	污染物去除率：TSS 95%，TN 87%，TP 88%	169.69	2.11	0.12
	全年		360.87	4.87	0.30	污染物去除率：TSS 88%，TN 81%，TP 77%	315.79	3.94	0.23



染物去除能力相对较弱,但由于面源产生量较少,对面源负荷削减需求较低,所以不会造成面源负荷大量输入。

#### 4 结论

1) 丹江口水库缓坡型库岸生态屏障建设的关键在于消落区植被恢复和库岸生态水系统构建。植被恢复将消落区划分为拦滤净化带、固岸缓冲带、保土持水带和适度利用带,适度利用带能够解决消落区土地无序耕种的问题。生态水系统通过坑塘沟道的微地形生态化改造,形成生态塘、近自然湿地、生态透水坝和生态沟道等,能够对库周面源径流起到阻控作用。

2) 香花镇缓坡型库岸的生态屏障构建选择 16 种乔木、6 种灌木、4 种草本植物进行消落区植被恢复,布设生态塘 4 处、近自然湿地 2 处、生态透水坝 1 处、生态沟道 2 处形成生态水系统。

#### 参考文献

- [1] 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.
- [2] 张元教,李慧娟.南水北调工程丹江口水库消落区保护与利用管理研究[J].水利经济,2011(1):43-46.
- [3] 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.
- [4] 拜振英,齐锡蕊.丹江口水库河南库区移民土地整合调查分析[J].人民长江,2015,46(1):101-104.
- [5] 王剑,尹炜,赵晓琳,等.丹江口水库新增淹没区农田土壤潜在风险评估[J].中国环境科学,2015,35(1):157-164.
- [6] 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.
- [7] 付静尘,韩烈保.丹江口库区农户对面源污染的认知度及生产行为分析[J].中国人口·资源与环境,2010,20(5):74-78.
- [8] SHAH J J F, DAHM C N, GLOSS S P, et al. River and riparian restoration in the Southwest: Results of the National River Restoration Science Synthesis Project[J]. Restoration Ecology, 2007, 15(3): 550-562.
- [9] FLÁVIO H M, FERREIRA P, FORMIGO N, et al. Reconciling agriculture and stream restoration in Europe: A review relating to the EU Water Framework Directive[J]. Science of the Total Environment, 2017, 596: 378-395.
- [10] 张建春,彭补拙.河岸带研究及其退化生态系统的恢复与重建[J].生态学报,2003,23(1):56-63.
- [11] 董哲仁.河流生态恢复的目标[J].中国水利,2004(10):6-9.
- [12] 李春华,叶春,陈小刚,等.太湖湖滨带植物恢复方案研究[J].中国水土保持,2012(7):35-38.
- [13] 颜昌宙,金相灿,赵景柱,等.湖滨带的功能及其管理[J].生态环境,2005,14(2):294-298.
- [14] 叶春,金相灿,王临清,等.洱海湖滨带生态修复设计原则与工程模式[J].中国环境科学,2005,24(6):717-721.
- [15] 蔡书良,黄川.三峡库区湖岸带土地利用研究[J].水土保持学报,2009,16(5):51-55.
- [16] 冯义龙,先旭东,王海洋.重庆市区消落带植物群落分布特点及淹水后演替特点预测[J].西南师范大学学报(自然科学版),2007,32(5):112-117.
- [17] 苏维词.三峡库区消落带的生态环境问题及其调控[J].长江科学院院报,2004,21(2):32-34.
- [18] 王培,王超.丹江口水库消落带植被群落恢复模式研究[J].人民长江,2018,49(2):11-14.
- [19] 程瑞梅,王晓荣,肖文发,等.消落带研究进展[J].林业科学,2010,46(4):111-119.
- [20] 尹澄清,毛战坡.用生态工程技术控制农村非点源水污染[J].应用生态学报,2002,13(2):229-232.
- [21] 姚鑫,杨桂山.自然湿地水质净化研究进展[J].地理科学进展,2009,28(5):825-832.
- [22] 董慧峪,王为东,强志民.透水坝原位净化山溪性污染河流[J].环境工程学报,2014,8(10):4249-4253.
- [23] 王振旗,沈根祥,钱晓雍,等.抗侵蚀型生态沟渠构建及其稻田应用效果[J].环境工程学报,2014,8(9):4047-4052.
- [24] 李恩,孙为平.农民专业合作社于生态农业发展的价值研究[J].农业经济,2010(11):39-40.

- [25] 周艳文. 利用天然河浜及沟塘湿地深度净化污水处理厂尾水的研究[J]. *安徽农学通报*, 2015, 21(23): 68-70.
- [26] 郑军, 陈庆华, 张荣斌, 等. 植物床-沟壕系统的藻类捕获功能[J]. *环境工程学报*, 2012, 6(12): 4263-4267.
- [27] 田猛, 张永春. 用于控制太湖流域农村面源污染的透水坝技术试验研究[J]. *环境科学学报*, 2006, 26(10): 1665-1670.
- [28] 蔡明, 李怀恩, 庄咏涛, 等. 改进的输出系数法在流域非点源污染负荷估算中的应用[J]. *水利学报*, 2004, 35(7): 40-45.
- [29] 王铁军, 肖焯, 黄志刚, 等. 近40年南阳市降水量及降水类型分布特征[J]. *南阳师范学院学报*, 2015(6): 41-45.
- [30] 王晓玲, 李建生, 李松敏, 等. 生态塘对稻田降雨径流中氮磷的拦截效应研究[J]. *水利学报*, 2017, 48(3): 291-298.
- [31] 尹澄清, 单保庆, 付强, 等. 多水塘系统: 控制面源磷污染的可持续方法[J]. *Ambio-人类环境杂志*, 2001, 30(6): 39-45.
- [32] 万金保, 兰新怡, 汤爱萍. 多级表面流人工湿地在鄱阳湖区农村面源污染控制中的应用[J]. *水土保持通报*, 2010, 30(5): 121-124.
- [33] 袁淑方, 王为东, 董慧峪, 等. 太湖流域源头南苕溪河口生态工程恢复及其初期水质净化效应[J]. *环境科学学报*, 2013, 33(5): 1475-1483.
- [34] 黄沈发, 吴建强, 唐浩, 等. 滨岸缓冲带对面源污染物的净化效果研究[J]. *水科学进展*, 2008, 19(5): 722-728.
- [35] 刘福兴, 陈桂发, 付子轼, 等. 不同构造生态沟渠的农田面源污染物处理能力与实际应用效果[J]. *生态与农村环境学报*, 2019, 35(6): 787-794.

(本文编辑: 靳炜, 郑晓梅)

## Ecological barrier constructing in the gentle slope reservoir bank in the water source of Middle Route of South-to-North Water Diversion Project

WANG Chao<sup>1</sup>, YIN Wei<sup>1,\*</sup>, LEI Pei<sup>2</sup>, JIA Haiyan<sup>1</sup>, LEI Junshan<sup>1</sup>

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** The agricultural production intensity in the bank of Danjiangkou Reservoir is high and the water quality in the reservoir area is threatened by non-point source pollution. The construction of ecological barrier is an important means to prevent and control peripheral non-point sources of the reservoir, reduce the disorderly use of land in the water-level-fluctuation zone and guarantee the water quality of the reservoir. The core of the ecological barrier construction in the gentle slope reservoir bank is the vegetation restoration and ecological water system construction. Vegetation restoration divided the subsidence area into filter blocking and purification zone (160~163.5 m), shore solid buffer zone (163.5~165 m), soil retaining and water holding zone (165~167 m) and moderate utilization zone (167~170 m). Moderate utilization zone can solve the problem of land disordered cultivation in the water-level-fluctuation zone. In the construction of ecological water system, measures such as ecological ponds, near natural wetlands, ecological permeable dams and ecological gullies are designed according to the site microtopographic characteristics. The gentle slope bank of Xianghua Town was selected to carry out the application practice. The estimated reduction amounts of TN, TP and TSS by the constructed ecological barrier were 3.94, 0.23 and 315.79 t·a<sup>-1</sup>, respectively, and their corresponding removal rates were above 75%. This study can provide the basis for the construction of gentle slope ecological barrier for water source in the middle route of South-to-North Water Diversion Project, and also provide reference for other reservoir bank ecological construction in China.

**Keywords** Middle Route of South-to-North Water Diversion Project; Danjiangkou Reservoir; water source; gentle slope; ecological barrier; water-level-fluctuation zone; non-point source pollution