

Study on Ecosystem Comprehensive Treatment Model of Northern Mountain River in China

Beibei Guo¹, Qingfeng Chen¹, Donghua Yan²

¹Key Laboratory for Applied Technology of Sophisticated Analytical Instruments of Shandong Province, Shandong Analysis and Test Center, Jinan Shandong

²Hebei Provincial Academy of Environmental Sciences, Shijiazhuang Hebei
Email: chensdcn@163.com, guobei-bei2008@163.com

Received: Sep. 27th, 2017; accepted: Oct. 11th, 2017; published: Oct. 18th, 2017

Abstract

The trend and objective requirement of the treatment of northern mountain river in China are ecological harmony. The characteristics, treatment methods and main problems of northern mountain river were analyzed. Based on these main problems, an ecosystem comprehensive treatment model was proposed. This model could lower the pressure of flood control, repair river ecosystem and improve water quality of northern mountain river, and it achieves ecosystem comprehensive treatment of northern mountain river in "retention-storage-protection". This model would provide important theoretical basis and technical support for the ecosystem comprehensive treatment and sustainable development of northern mountain river in China.

Keywords

Northern Mountain River, Ecosystem Comprehensive Treatment, Ecology Permeable Dams, Ponds, Wetlands

我国北方山区河流生态综合治理模式探究

郭贝贝¹, 陈庆锋¹, 闫栋华²

¹山东省大型精密仪器分析应用技术重点实验室, 山东省分析测试中心, 山东 济南

²河北省环境科学研究院, 河北 石家庄

Email: chensdcn@163.com, guobei-bei2008@163.com

收稿日期: 2017年9月27日; 录用日期: 2017年10月11日; 发布日期: 2017年10月18日

摘要

基于生态和谐的山区河流综合治理的理念与方法是北方山区河流治理的趋势和客观需求。本文分析了我国北方山区河流的特点、治理方案以及主要存在的问题，并提出了适于我国北方山区河流的生态综合治理模式。该模式对于北方山区河流具有减轻防洪压力、修复河流生态和改善水质等作用，并从“截-蓄-保”三个方面实现了对北方山区河流的生态综合治理，为我国北方山区河流的生态综合治理和生态系统的可持续发展提供了重要的理论基础和技术支撑。

关键词

北方山区河流，生态综合治理，生态透水坝，库塘，湿地

Copyright © 2017 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 我国北方山区河流特点

我国北方山区河流处于干旱半干旱地带，冬季寒冷漫长，夏季炎热短促，大小河流众多，这些山区河流具有如下特点：

(1) 山区河流两岸山坡多为岩土结构，由于人为破坏与暴雨或持续降雨，造成山区水土流失严重，大量的泥沙和石块被冲下山体汇入河流，不仅增大了北方山区河流的防洪压力，而且对山区河流生态系统造成了严重的危害；

(2) 山区河流由于坡度陡、产汇流时间短、流速大，导致河道冲刷强、河道的形态和植被单一、河床侵蚀严重等生态破坏现象[1]；

(3) 山区河流多为季节性河流，降雨少且季节分配不均，汛期和融雪期水流峰高量大，不仅洪灾频发，威胁下游堤防安全，宝贵的水资源也白白流走；非汛期水资源极度缺乏，水力连通性差，不利于植被及微生物的生存，破坏了生态系统的稳定性[2]；

(4) 在汛期和融雪期时，山区径流污染产生时间短、发生面积广，导致山区河流面源污染严重，控制难度较大[3]。

2. 传统的北方山区河流治理方案

鉴于我国北方山区河流的特点，目前通常采用河道疏浚、堤防建设、防洪护岸等工程措施对山区河流进行治理[4]。

河道疏浚即通过工程手段对因山洪、泥石流等造成的河道淤积以及其他影响河道行洪能力的垃圾或违规搭建的一切滞洪、碍洪的建筑物进行清理。通过清淤疏浚，可以增大河道的行洪断面，提高河道泄洪的能力。白马关河、霍伦河等一些北方山区河流为保障行洪通道，对河道进行了清淤疏浚工程，提高了河道的行洪能力[5] [6]。

堤防建设主要是为了保护现状的村镇或其他重要保护对象，多采用混凝土或浆砌石墙等材料。通过工程措施兴建堤防，能够提高河道两岸的防洪能力，达到防洪减灾等目的。龙潭沟河等北方山区河流采用直立式硬质挡墙，有效地提高了河道的防洪能力[4]。

护坡护岸即利用工程措施提高河岸的抗冲刷能力，多采用块石、护坡砖等材料，防止因洪水的冲刷侵蚀、水流暴涨暴落等原因造成岸坡坍塌等现象。吉林省山区中小河流采用了块石护坡护岸工程，有效的保护了河岸，减轻水流对河岸的冲刷侵蚀[6]。

3. 存在问题

我国北方山区河流普遍采用的设计方案均为河道清淤、岸坡防护以及新建或加高防洪堤方案，治理方案单一、破坏生态平衡，主要存在的问题有以下三个方面：

(1) 治理方案单一，缺乏整体规划。某些北方山区河流的整治，只对险要段采取抛石护脚及砌石护坡的工程措施，只着重于局部处理，缺乏整体规划，致使一些工程整治效果不显著或者失败。

(2) 追求片面功效，破坏河流生态。在河道治理工程设计中，片面追求单一功效，如为追求防洪效果，新建或加高防洪堤方案等，这些硬性的工程覆盖措施固然可以防洪减灾，但却牺牲了河流生态等功能。如白马关河仅考虑防洪建设，忽略了河道生态环境保护、人水和谐相处等功能需求[5]。

(3) 材料硬化河道，破坏生态平衡。混凝土、浆砌石块等工程材料能够造成河道硬质渠化，破坏了生态可持续发展，且硬化所使用的刚性或半刚性治理工程结构不能很好的适应环境变化而造成结构破坏，甚至工程失事等现象[7]。

传统的工程措施已无法满足我国北方山区河流河道生态治理的趋势和客观需求。因此，迫切需要对北方山区河流进行全面综合治理，将生态学原理和河流治理工程相结合，恢复山区河流生态系统，使其不仅具有防洪功能，而且还具有维系水生态系统、降低面源污染等功能，实现生态可持续发展。

4. 北方山区河流生态综合治理模式

传统的山区河流工程治理模式对河流生态环境会造成一定程度的破坏。例如传统的浆砌石护岸很少考虑河道与生态环境、社会环境和人文环境的统一，致使水生植物生长区域减小，土壤中微生物的数量种类大大减少，并且出现河流河道污染物去除效率低、河流较难与周边的生态环境进行物质交换等现象，对整个生态系统造成严重的影响。基于生态学理念，北方山区河流的治理应扩展到河流生态环境修复、水环境改善等综合治理要求上，实现由传统单一的工程治理模式向多元组合的生态型综合治理模式转变。

目前，关于河流生态治理模式有多种，例如坝塘组合净化模式和塘-湿地组合净化模式，但是这两种模式在北方山区河流河道综合生态治理中都存在缺陷[8]。坝塘组合由于湿地系统的缺少，降低了北方山区河流水质的深度净化功能；塘-湿地组合净化模式由于缺少能够拦蓄洪水、阻挡泥沙和泥石流的坝，导致河道冲刷强、河床侵蚀严重等生态破坏现象。鉴于我国北方山区河流特点，我们将生态学原理与河流治理工程相结合，利用河流现有的洼地、空塘、河岸带以及湿地构建适用于北方山区河流的生态综合治理模式，即生态透水坝-库塘-湿地生态综合治理模式(图 1)，目前还没有关于该模式的研究报道。

4.1. 结构原理

北方山区河流生态综合治理模式包括设置于北方山区河流支流及其交汇处的生态透水坝、山区河流中下游的库塘以及与库塘相通的湿地三个子生态系统。

生态透水坝是由透水结构的石块垒筑而成，能够截留山坡上被降雨冲刷下来的泥沙和石块，起到了“截”的作用，并且生态透水坝能充分利用坝前的河道贮存一次或多次降水径流，在水资源短缺时能够减缓河水的快速流失，有利于山区河流生态系统的稳定。生态透水坝利用坝体上微生物和植物的共同作用吸收和降解水中的氮磷等污染物质，有效的降低面源污染负荷[9]。此外，在生态透水坝前放置三角锥木桩石笼，既保证了透水性，又可避免河流中的石块对坝体的直接撞击。因此，生态透水坝具有调节径

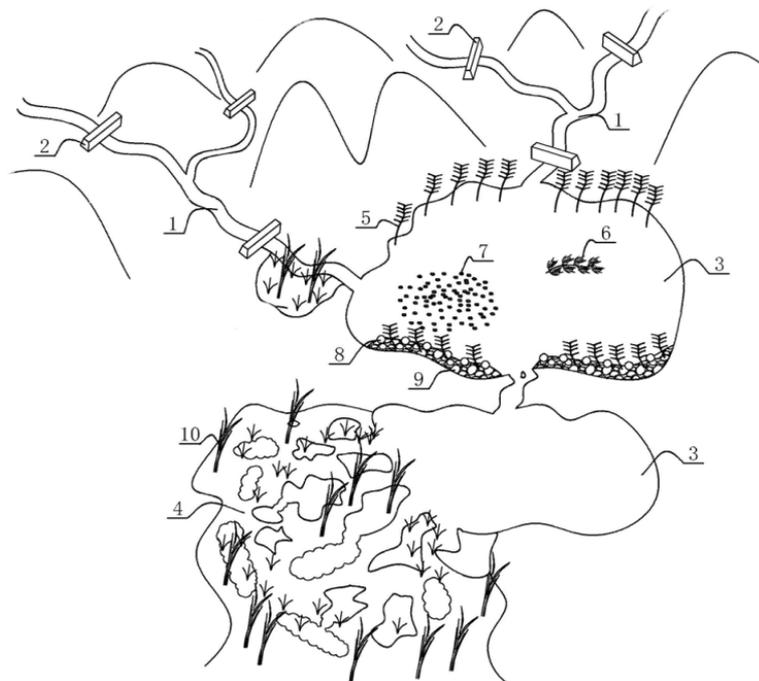


Figure 1. Ecosystem comprehensive treatment model of northern mountain river: (1) mountain river; (2) ecological permeable dam; (3) pond; (4) wetland; (5) emergent aquatic plant; (6) submerged plant; (7) floating plant; (8) timber pile; (9) gravel; (10) aquatic plant

图 1. 北方山区河流生态综合治理模式示意图: (1) 山区河流; (2) 生态透水坝; (3) 库塘; (4) 湿地; (5) 挺水植物; (6) 沉水植物; (7) 浮水植物; (8) 木桩; (9) 砾石; (10) 水生植物

流流量、拦截面源污染、阻挡砂石和泥石流的作用。

库塘在中国已有千余年的历史，能够有效地用于生活污水、工业废水以及暴雨径流的处理等[10]。将库塘应用到北方山区河流生态综合治理中，利用库塘存储容量大的特点来蓄积、沉淀和净化河水，并延长洪水的停留时间，缓冲山区洪水，起到了“蓄”的作用[11] [12]。另外，库塘系统利用其内植物以及微生物的吸收和降解作用，能够有效削减面源污染和净化河流水质。

湿地系统是一种处于水域和陆地交汇处的独特生态系统，目前在国内外应用广泛，主要应用于城市污水和面源污染的控制[13]。湿地生态系统主要通过沉积作用、植物吸收以及土壤的吸附、截留、过滤和微生物分解等作用对水质进行进一步净化，起到了“保”的作用[14]。它不但能够净化水质，而且具有调节径流、恢复河流岸边带、营造河流自然景观的作用。

该北方山区河流生态综合治理模式将三个子系统有机组合形成的生态透水坝 - 库塘 - 湿地系统，不但能够调节河流径流量、减轻防洪压力、消减面源污染、提供生态服务和旅游娱乐等功能，而且在非汛期水资源极度缺乏的情况下，能够对降雨径流进行多级有效蓄积，减少河流断流天数，改善山区河流的水文条件，从“截 - 蓄 - 保”三个方面实现了对北方山区河流的生态综合治理。

4.2. 结构设置

生态透水坝在山区河流支流及其交汇处均有设置，通过测量筑坝河道的深度、宽度、堤坡、边坡等尺寸和相关的设计资料，估算生态透水坝的尺寸[9]。生态透水坝的坝体由碎石、砂石或砾石材料构筑而成，背水面为下宽上窄的阶梯形状，增加坝体的牢固性；迎水面固定有三角锥木桩石笼，其内填充有避

免沿河道滚下的石块直接撞击坝体的砾石层，同时起到净化水质的作用；另外，在生态透水坝上种植水生植物，以提高氮、磷等污染物质的去除效果。生态透水坝示意图如图2所示。

库塘的位置、形态和深度依据山区河流当地的地形地貌特征、土地利用的要求以及经济发展水平等因素，充分利用现有的洼地、空塘和开阔地进行构建，尽量保存原有河道的自然景观，恢复河流的自然流态和生态功能。库塘的设置数量可为一个或多个，多个库塘依次相通，以增强其蓄水、防洪和净化能力[8]。在库塘中种植挺水植物、沉水植物和浮水植物，以增强对污染物的降解能力。库塘的周围设置有岸边缓冲带，岸边缓冲带采用木桩和砾石护岸，并种植有水生植物。

在山区河流生态库塘下游利用现有的湿地和开阔区域设置湿地系统，并在湿地中种植水生植物，利用湿地中的土壤基质、水生植物和微生物对水质进行进一步净化。在实际应用过程中，要综合考虑山区地形地貌特征、土地利用要求等因素，不同类型的湿地系统可以通过串联或并联的方式进行组合，以达到逐级消减污染物负荷的目的[15]。

在山区河流两侧恢复河流岸边带生态系统，构建河流岸边带水系统。在河流岸边带内种植水生植物，为鱼类、微生物和两栖动物提供生物栖息地，达到恢复河流岸边带生态系统和河流自然景观的目的。为了保持山区河流的自然形态，防御洪水及水流对河岸的冲刷，河流河道非拐弯处和拐弯处均设置三角锥木桩石笼，如图3所示。

4.3. 植物种类和基质材料的选择

根据流域污染物的特点，植物要选择对流域特征污染物去除能力强、生物量大、并且适应北方山区河流水量变化大的本地优势物种。同时，物种的多样性、季节性搭配、经济性和植物群落配置最优原则等问题也是需要考虑的。芦苇、菖蒲、水葱和美人蕉等植物在我国北方广泛存在，并且已有研究报道表明这些植物能够有效的去除氮、磷等营养物质[16]。

在基质材料选择时，也应尽量选择吸收能力强、资源相对丰富的本地或附近区域的材料。传统工程材料往往是破坏河流生态环境的主要因素，所使用的混凝土等材料硬质渠化河道，阻断了水土交换，破坏生态平衡。基质材料选择时也要考虑材料的生态友好性，使北方山区河流治理达到最好的工程和生态治理效果[7]。

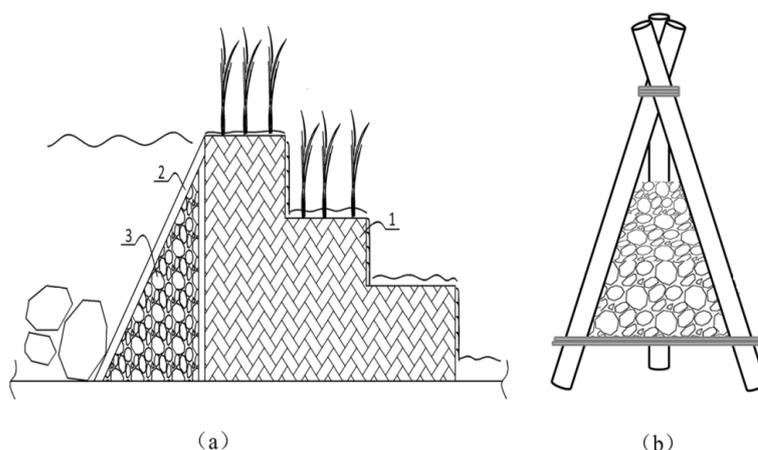


Figure 2. (a) Schematic diagram of ecological permeable dam: (1) ecological permeable dam; (2) quadrihedron timber pile; (3) gravel stone cage. (b) quadrihedron timber pile stone cage

图 2. (a) 生态透水坝示意图：(1) 生态透水坝；(2) 三角锥木桩；(3) 砾石石笼；(b) 三角锥木桩石笼

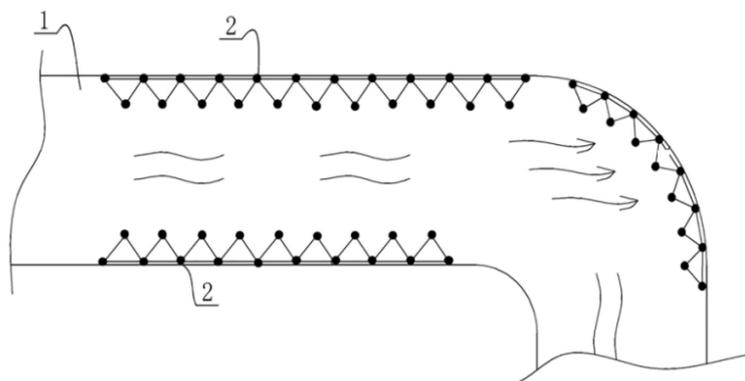


Figure 3. Bank protection structure diagram of quadrihedron timber pile stone cage (1) channel of mountain rival; (2) quadrihedron timber pile stone cage

图 3. 三角锥木桩石笼护岸结构示意图: (1) 山区河流河道; (2) 三角锥木桩石笼

4.4. 经济效益分析

北方山区河流生态综合治理模式的经济成本主要包括山区河流调查成本、设计成本、土地成本、工程材料费、人工建设费、日常运行和维护成本等。利用河流现有的洼地、空塘以及湿地构建的北方山区河流河道生态治理模式, 不需要额外占用土地资源, 减少人工建设费并且利用库塘进行蓄水, 能够节约调水成本, 具有很大的经济效应, 有利于该模式在北方山区河流中的推广应用。工程材料如石料可以就地取材, 成本低廉, 既节约了成本而且一般不需要后期维护费用。另外, 由于该模式具有建设和运行成本低、出水水质好、抗冲击力强、操作简单、维护和运行费用低廉等优点, 在北方山区河流治理方面具有良好的适应性, 基本不需要专业人员管理和操作。

5. 北方山区河流生态综合治理模式应用

海河流域永定河水系洋河段发源于内蒙古兴和县的东洋河, 流经内蒙古自治区兴和县、河北省张家口市怀安县、万全县、宣化区、下花园区, 在怀来县夹河村与桑干河汇合, 该流域降水多分布在 7、8 和 9 月三个月, 可占全年降水量的 70%~80%, 常发生中小面积高强度集中暴雨。清水河是海河流域永定河水系上游洋河上的一条较大支流, 地处冀西北山间盆地, 全境山峦起伏, 沟壑纵横, 地势由东北向西南倾斜, 海拔高程在 800~2000 m 之间, 河道纵坡较陡, 坡度为 4‰~10‰, 汛期洪水具有涨落迅速, 洪峰流量大、历时短等特点, 且土壤多为砂壤土、砂砾石黄土和亚粘土。清水河流域上游植被覆盖度低, 河道比降大, 水流湍急, 其中西沟水土流失严重。海河流域永定河水系洋河段是典型的北方山区河流, 以该流域为例探讨北方山区河流生态综合治理模式适用情况。

清水河北泵房至老鸭庄断面有多级生态透水性石坝和橡胶坝, 通过北泵房及老鸭庄断面的水质监测结果, 考察坝系统对污染物的截留效果; 响水堡水库位于洋河下花园区, 可作为生态透水坝-库塘-湿地系统中的塘系统, 以响水堡水库上游 1 km 处作为塘系统的上游, 以水库出口作为塘系统的下游, 考察库塘系统对山区河流生态治理的贡献; 洋河河谷下花园段存在多级串联湿地系统, 是北方山区生态综合治理模式中理想的湿地系统, 该湿地系统以洋河下花园段水质保护和生态涵养工程上游作为湿地系统的上游, 鸡鸣驿作为湿地系统的下游, 各监测断面的具体位置及周边环境见图 4 及表 1。

2015~2016 年对洋河流域设定的监测断面的水质进行考察, 各监测断面的水质数据及各子系统对污染物的去除效果如图 5 所示。由图 5(a)可知, COD 的含量在 23.3 mg/L~52.4 mg/L, TP 的含量在 0.08 mg/L~0.41 mg/L, TN 的含量在 5.41 mg/L~6.8 mg/L, $\text{NH}_3\text{-N}$ 的含量在 0.10 mg/L~0.35 mg/L, SS 的含量在 20 mg/L~520

Table 1. The location of detection sites
表 1. 监测位点

编号	采样点	经度/E°	纬度/N°	海拔/m
1	北泵房	114.89	40.86	846.99
2	老鸦庄	114.85	40.76	699.29
3	水库上游	114.94	40.62	651.1
4	响水堡水库	115.13	40.52	583.21
5	示范区上游	115.21	40.49	541.45
6	鸡鸣驿	115.28	40.45	473.56

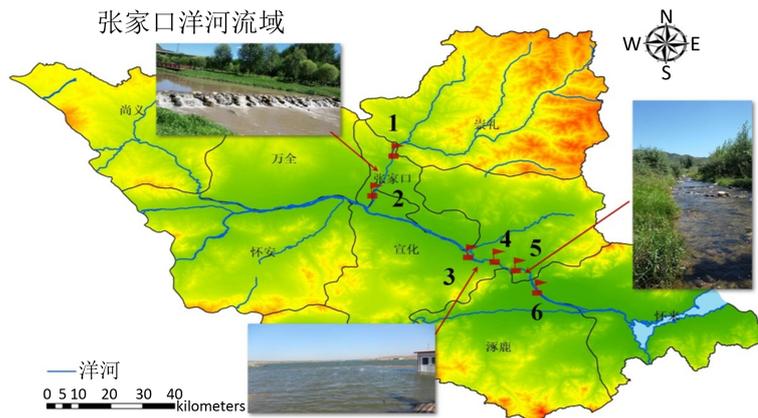


Figure 4. The location and environment of detection sites
图 4. 监测断面位置及环境

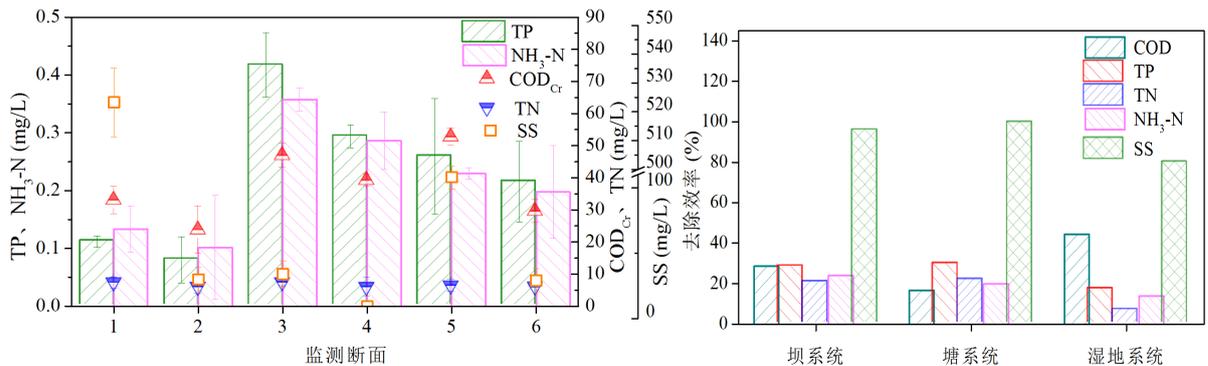


Figure 5. The results of water quality and the removal efficiencies of pollutions by subsystem
图 5. 水质监测结果及各系统对污染物的去除效果

mg/L。由图 5(b)可知,坝系统对 COD、TP、TN、NH₃-N 的去除效率分别为 28.57%、28.3%、20.5%、24.0%,对 SS 的去除效率达到 95% 以上,说明坝系统能够有效截留山坡上被降雨冲刷下来的泥沙和石块,发挥了“截”的作用;塘系统对 COD、TP、TN、NH₃-N、SS 的去除效率分别为 16.7%、29.58%、21.63%、20.0% 以及 99.8%,由于流域降水多分布在 7、8 和 9 三个月,当地人们利用响水堡水库进行蓄水,不但能够缓冲汛期山区洪水对庄稼的破坏,还在旱季为农业提供充足的用水,充分发挥其“蓄”的作用;湿地系统对 COD、TP、TN、NH₃-N、SS 的去除效率分别为 44.0%、17.1%、6.7%、13.9% 以及 80.0%,说明湿地系统能够有效的降低面源污染负荷,它不但能够净化水质,还具有恢复河流岸边带、营造河流自然景观,为当地人们提供了

休闲娱乐场所的作用。通过调查发现,生态透水坝-库塘-湿地生态综合治理模式对山区河流污染物的去除及悬浮物的截留具有明显的作用,由于坝的数量、塘的大小和湿地的规模会影响该模式对山区河流水质净化效果,因此在山区河流构建生态透水坝-库塘-湿地生态综合治理模式时,应根据水质目标和现场条件进行设置。

6. 总结

传统的北方山区河流治理工程措施无论是堤防建设、河道疏浚还是护坡护岸,无疑都是基于防洪而采取的传统工程措施,但已满足不了人们对河流景观、河流生态等方面的需求,因此必须在考虑河流生态系统平衡的基础上,对河道进行适度的整治。生态透水坝-库塘-湿地北方山区河流生态综合治理模式将生态学原理和河流治理工程相结合,既能够减轻北方山区河流防洪压力,又能够从“截-蓄-保”三个方面实现了对北方山区河流的生态综合治理,为我国北方山区河流的生态综合治理和生态系统可持续发展提供了重要的理论基础和技术支撑。

基金项目

海河北系永定河-洋河段水污染控制与水质改善技术集成与综合示范(2015ZX07203-005);海河下游多水源灌排交互条件下农业排水污染控制技术集成与流域示范课题(2015ZX07203-007)。

参考文献 (References)

- [1] 李孝彬. 北方山区农村河道整治初探[J]. 中国水利, 2013(12): 25-26.
- [2] 石山. 是防洪排洪, 还是蓄洪用洪?——对我国北方缺水地区水利对策的新思考[J]. 科技导报, 2001, 19(0107): 25-27.
- [3] 颜淼, 陈求稳, 吴文强. 典型山区流域面源污染模型研究——以曹家路流域为例[J]. 中国水土保持, 2009(6): 33-35.
- [4] 杨玲, 汤万龙, 刘青林. 北京山区河流综合治理理念探讨[J]. 水利规划与设计, 2013(3): 21-23.
- [5] 姜天钊. 白马关险工混凝土护坡施工技术[J]. 水利建设与管理, 2004, 24(3): 14-15.
- [6] 王景志, 朱文. 山区中小河流治理措施的探讨[J]. 吉林水利, 2008(8): 59-60.
- [7] 陈云飞, 孙东坡, 何胜男. 河道整治工程对河流生态环境的影响与对策[J]. 人民黄河, 2015, 37(8): 35-38.
- [8] 陈庆锋, 单保庆, 马君健, 等. 塘和湿地技术在面源污染控制中的应用组合模式探讨[J]. 湿地科学与管理, 2008, 4(4): 36-39.
- [9] 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.
- [10] 张立秋, 王宝贞, 王琳, 等. 处理城市污水的生态塘系统设计[J]. 中国给水排水, 2000, 16(2): 38-40.
- [11] 彭世彰, 高焕芝, 张正良. 灌区沟塘湿地对稻田排水中氮磷的原位削减效果及机理研究[J]. 水利学报, 2010, 41(4): 406-411.
- [12] 毛战坡, 尹澄清, 单宝庆, 等. 水塘系统对农业流域水资源调控的量化研究[J]. 水利学报, 2004(12): 76-83.
- [13] Vymazal, J., Březinová, T. and Koželuh, M. (2015) Occurrence and Removal of Estrogens, Progesterone and Testosterone in Three Constructed Wetlands Treating Municipal Sewage in the Czech Republic. *Science of the Total Environment*, **536**, 625-631. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.07.077>
- [14] 王萌, 陈艳芳, 王黎明. 基于人工湿地在北方山区河道生态修复中的应用[J]. 黑龙江水利科技, 2010(3): 91-92.
- [15] 李锋民, 单时, 王昊云, 等. 好氧/厌氧多级串联潜流人工湿地脱氮效果[J]. 环境科学, 2011, 32(1): 151-157.
- [16] 汤显强, 李金中, 李学菊, 等. 七种水生植物对富营养化水体中氮磷去除效果的比较研究[J]. 亚热带资源与环境学报, 2007, 2(2): 8-14.

期刊投稿者将享受如下服务：

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：sd@hanspub.org