

区域水生态基础设施与小清河的生态价值

孔祥荣¹, 王琳²

¹青岛市城市规划设计研究院, 山东 青岛

²中国海洋大学环境科学与工程学院, 山东 青岛

收稿日期: 2023年7月3日; 录用日期: 2023年8月4日; 发布日期: 2023年8月17日

摘要

小清河复航引起相关产业部门乘数扩张带来经济增长, 在推动经济社会发展, 也将增强区域生态环境压力。发挥小清河区位优势, 利用生态技术改善基础设施的生态功能, 优化人工河流自然形态, 增强区域生态源地的连通性, 形成具有水生态韧性的区域多功能生态基础设施。利用小清河区域多功能基础设施, 推动区域的可持续发展。本文第一次提出了区域多功能基础设施的概念, 突破了以城市行政边界为范围的生态规划, 强调了生态功能的跨行政边界性和多功能基础实施的前瞻性。

关键词

区域生态基础设施, 水生态, 生态网络, 连通性

Regional Hydrological Ecological Infrastructure and the Ecological Value of Xiaoqing River

Xiangrong Kong¹, Lin Wang²

¹Qingdao Urban Planning and Design Research Institute, Qingdao Shandong

²Institute of Environmental Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao Shandong

Received: Jul. 3rd, 2023; accepted: Aug. 4th, 2023; published: Aug. 17th, 2023

Abstract

The reopening of Xiaoqing River will cause the multiplier expansion of relevant industrial sectors to bring economic growth, promote economic and social development, and also enhance the pressure on regional ecological environment. By taking advantage of the location of Xiaoqing River, the

文章引用: 孔祥荣, 王琳. 区域水生态基础设施与小清河的生态价值[J]. 环境保护前沿, 2023, 13(4): 887-896.

DOI: 10.12677/aep.2023.134109

ecological function of infrastructure will be improved by ecological technology, the natural form of artificial river optimized, the connectivity of regional ecological source area enhanced, and regional multi-functional ecological infrastructure formed with water ecological resilience. Xiaoqing River's regional multifunctional infrastructure is utilized to promote the sustainable development of the region. This paper puts forward the concept of regional multifunctional infrastructure for the first time, which breaks through the ecological planning which takes the city administrative boundary as the scope, and emphasizes the cross-administrative boundary of ecological function and the forward-looking implementation of multifunctional foundation.

Keywords

Regional Ecological Infrastructure, Hydrological Ecology, Ecological Network, Connectivity

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

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



Open Access

1. 引言

人类发展是一个不断扩大的选择权过程,它以自然资源共享为前提[1]。但随着城市化进程的加快,大多数城市正在以最脆弱的生态环境和最少的自然资源承载着数量最多的人口,生态环境脆弱的直接诱因是生境破碎,生态景观之间连通性降低甚至消失,为了保持发展的可持续性,修复破碎生态环境,最直接有效的措施是修复连通性[2] [3] [4]。连通性可以维持生态景观重要的过程、生态恢复力和适应能力,特别是重构形成的功能景观生态网络,减轻了景观变化的破坏性影响[5] [6]。生态基础设施被认为是有效增强连通性的路径。1984年联合国教科文组织的“人与生物圈计划”(MAB)的报告中提出生态基础设施的概念,1999年,美国可持续发展委员会在报告中强调生态基础设施是一种能够指导土地利用和经济发展模式往更高效和可持续方向发展的关键战略[7]。欧盟委员会在2013年将生态基础设施定义为:具有其他环境特征的自然和半自然区域的战略规划网络,旨在提供广泛的生态系统服务。

基础设施是保证社会经济活动、改善生存环境、克服自然障碍、实现资源共享等为目的建立的公共服务设施[8]。生态基础设施的概念在实践应用中分为两类,一类是对常规基础设施赋予生态功能,如《加拿大城市绿色基础设施导则》(2001)中定义生态基础设施是基础设施工程的生态化,主要以生态技术改造或代替道路、排水、能源、洪涝灾害治理及废物处理系统基础设施[9];一类生态基础设施是由栖息地、自然保护区、森林、河流、沿海地带、公园、湿地、生态廊道及其他一切自然或半自然的构成,能够提供基础性支持功能的生态服务设施[10]。生态系统服务是指维持人类赖以生存的生态系统健康,提供供给服务、调节服务、生命承载服务和文化精神服务[11]。生态基础设施作为一个整体规划概念是全新的,反映了人们对于生态网络体系认识的新高度。区域生态基础设施具有跨地域边界的特点,泛欧洲生物和景观多样性战略(PEBDLS)提出修建适宜的空间环境,在欧洲构建生态网络,全面保护生态、生境和种群,是生态基础设施就是典型案例[12]。

水生态基础设施利用河流水系形成一个完整的功能体系,保障水系统综合生态系统服务的基础性空间结构。河流水系生态基础设施,是综合性的利用生态技术强化河流的生态功能,或者在已有传统的工程性灰色基础设施进行生态化改造;同时利用河流流域的湿地或者沿途湖泊,形成一个生命的系统;河流水系作为生态基础设施已经不仅有单一航运功能、泄洪功能,而是综合系统可持续地解决流域水生态健康与流域可持续发展[13]。通过生态途径,对水生态系统结构和功能进行调理,增强流域的生态系统的

整体服务功能。本文以山东省小清河流域为研究对象, 面向多功能可持续流域水生态规划, 利用水生态基础设施, 提升流域水生态韧性。

2. 小清河形成与功能

2.1. 重要泄洪航运河道

宋代刘豫(公元 1130~1137 年)为防洪排涝, 并兼有舟楫之利, 循历城济水故道, 挑挖疏浚, 成为独流入海河流, 并为增加水源, 在华山下筑泺堰, 使源于济南泉群的泺水, 注入新开河道[14]。公元 1891~1893 年经疏浚治理, 全河干流拓宽至 30 米, 河深 2.6~3 米, 两岸马道宽 30 米, 汇流群泉之水, 从寿光羊角沟到历城黄台桥全线恢复通航, 成为山东省重要的排洪和航运河道[15], 小清河航运进入繁盛期。小清河航运的三个起航点和终航点分别是济南黄台桥、寿光羊角沟、桓台索镇。清末时期, 小清河在寿光羊角沟实现海河联运, 在济南黄台桥实现与胶济铁路联运。

2.2. 生产生活用水与防洪

建国后, 为治理小清河, 济南市曾先后四次设立机构, 进行勘测规划, 并确定了“上蓄、中滞、下排”的流域治理原则。1950 年疏浚小清河 9.4 km。1952 年从津浦铁路东起, 沿小清河左岸, 距河 100 m 左右开挖新引河 1 条, 至五柳闸东 100 m 入小清河, 以承泄左岸排水和便利航运。1958 年, 济南市在小清河的支流中上游修建了大中型水库 5 座, 小型水库 73 座, 修建拦河坝 50 座, 总库容 1.84 亿 m^3 [16], 在全域范围内先后修建 1 座大型水库(太河水库), 7 座中型水库(杜张水库、大站水库、垛庄水库、杏林水库、萌山水库、石马水库、仁河水库), 滞洪区 7 处, 分别为上华山洼、小李家滞洪区、白云湖、芽庄湖、青纱湖、马踏湖(麻大湖)和巨淀湖。这些工程对消减洪峰, 减轻灾害, 发展灌溉、养殖等发挥了作用重要。小清河干流自西向东流经济南、淄博、滨州、东营、潍坊 5 个市, 12 个县(市、区), 全长 229 km, 流域面积 10433 km^2 , 约占全省总面积的 6.7%, 是鲁中地区一条重要的人工防洪排涝河道, 如图 1 所示, 兼有农田灌溉、海河联运等多种功能[17]。小清河航道通过河道清淤、修筑河堤、裁弯取直、修建分洪河道等, 以保障小清河发挥航运以及泄洪、灌溉等功能[18]。

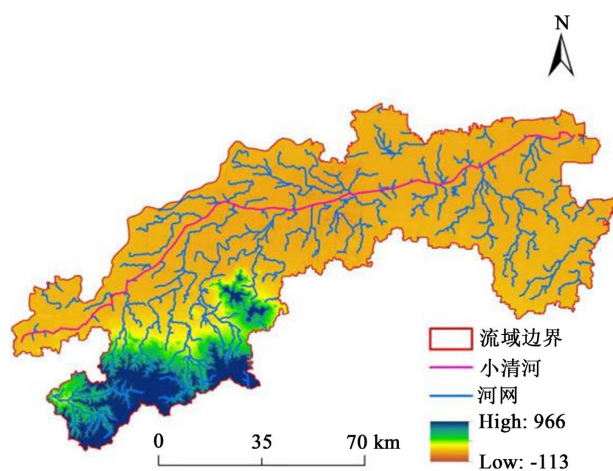


Figure 1. The geographical location of Xiaoqing River

图 1. 小清河地理位置

2.3. 小清河水环境治理与复航

20 世纪 70 年代后, 小清河是流域内主要的纳污河道, 沿岸人口稠密、排污企业数量较多, 工业废

水和生活污水的大量排入, 加重了小清河的水环境负荷, 水质开始恶化。按照《地表水环境质量标准》(GB3838-2002), 对小清河黄台桥、五龙堂、博昌桥和羊角沟 4 处断面 2010 年的年均值进行评价, 结果表明 4 处断面均为劣 V 类[19], 造成巨大的社会经济损失[20] [21]。近年来政府加强水污染治理[22], 小清河流域主要排污企业及污水处理厂分布, 如图 2 所示, 持续改善水环境。

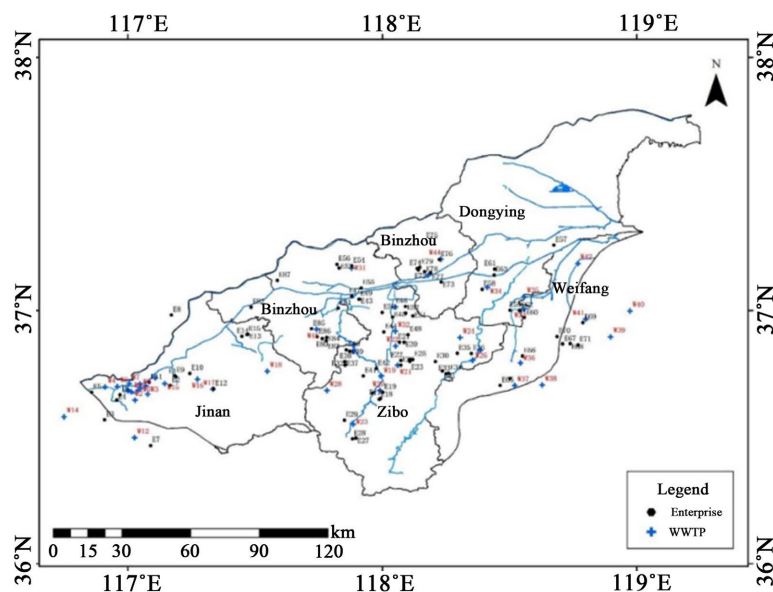


Figure 2. The distribution of major sewage enterprises and sewage treatment plants in the Xiaoqing River Basin [23]
图 2. 小清河流域主要排污企业及污水处理厂分布[23]

1997 年, 因水资源紧张等原因, 小清河彻底断航。2020 年山东省政府《关于加快省会经济圈一体化发展的指导意见》明确贯通航运“黄金水道”, 加快小清河复航工程。为满足小清河 III 级航道通航标准, 重建设施和航道, 改建三级航道 169 公里, 新建、改建船闸 4 座、桥梁 36 座, 改造水利、管道、线缆等设施 777 个[24], 2023 年 6 月复航工程竣工。

在恢复通航的工程化改造过程中, 对小清河的生态功能关注不足, 没有利用小清河构建区域水生态网, 增强区域的水生态韧性。本文提出小清河的生态价值, 为后续区域的水生态功能规划及提升提供理论和技术框架。

3. 区域多功能水生态基础设施

3.1. 给河流空间

如果小清河是山东地区抵御洪水历史见证, 那么在荷兰洪水是国家集体记忆的重要组成部分, 历史、文学和民间传说通常洪水管理称为“与水狼的战斗” [25]。1996 年, 荷兰数千年的洪水管理发生了历史性的转变, 提出了给河流空间 RftR 战略, 给水空间提出了三种价值平衡的理念, 水力有效 - 保护土地免受洪涝, 生态稳健 - 构建几乎不需要维护的自然过程, 提升现有景观的文化内涵和美感[26], 按照自然节律调节洪水, 而不是使用暴力[27]的技术措施。

3.2. 水生态基础技术措施

主要技术措施, ① 修复水生态通道, 形成生态与水环境耦合的系统。生态系统中最重要是组成部分的联通性, 通过联通系统连接种, 群和生态系统, 在多营养级之间进行营养分配。连接良好的生态系统

具有储存营养源的能力, 生态系统不同组成部分在处理营养源中承担了不同的角色。水生态系统具备联系大气与陆地景观能力, 在水生态系统和陆地生态系统之间形成动态联系, 这种联系可以在两种生态系统之间形成转运营养源的通道[28]。② 保持通道的自然状态。自然状态下生物多样性水平高, 营养盐截留和传递通道多, 人工开发后, 住宅和农业取代了自然植被, 导致营养传递通道减少, 生物多样性下降, 流域下游的浮游植物增加[29]。③ 恢复河(湖)滨带, 河(湖)滨带被用作缓冲区, 拦截从陆地环境进入淡水环境污染物[30], 湖滨带的坡度要小于 15%~20%, 有利于大型水生植物生长[31]。④ 有效的河滨带宽度。河流廊道的宽度与水生态功能密切相关, 不同廊道宽度可适应不同水生态功能的需要[32], 廊道宽度、功能定位和生态效益如表 1 所示。河流廊道的连通性通常以纵向、横向和垂直维度来表示。受河流廊道空间和时间异质性的影响, 不同类型的河流廊道连通性对河流所承受的抗逆性不同[33]。

Table 1. Suitable width value of river ecological corridor [35]-[42]

表 1. 河流生态廊道适宜宽度值[35]-[42]

廊道宽度(m)	功能定位	生态效益
3~12	与物种多样性相关性接近于零	仅能满足无脊椎动物生存需要
15	河流廊道的最小设计宽度	有效控制河流浑浊度维持水质清澈
30	固土护坡, 稳固河岸的最低设计宽度	可调节周围环境的温度控制河流营养元素的流失
60~100	生物多样性保护的最低设计宽度	有效减少河流沉积物满足高等植物种群生存需求
100~200	保护鸟类种群的最佳设计宽度	维持鸟类生物多样性可组建较为丰富的物种群落
≥400	自然丰富的景观结构最佳设计宽度	可创造自然生境满足高等动物基本生存需求

图 3 对比了自然状态与人工开发后, 对河流水系积水区的水生态过程的影响, 表明近自然状态的水系过程能够提升水系的水生态价值, 为此提出了近自然的水系修复理论, 用水生态技术措施进行水生态修复。

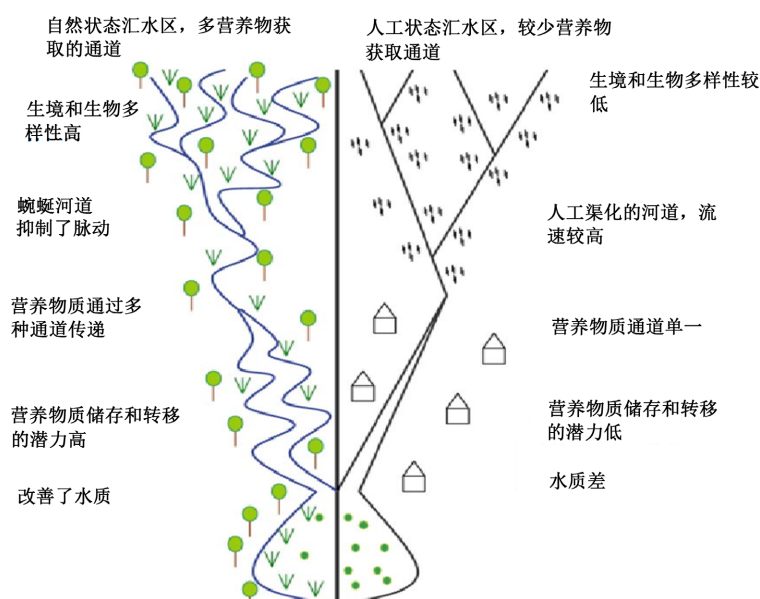


Figure 3. The comparison between the natural state and artificially developed China Unicom function [34]

图 3. 自然状态与人工开发后的联通功能对比[34]

3.3. 构建区域性多功能水生态网络

1980年, Vannote 等人提出河流连续体理论, 认为水生态空间是一个连续的整体, 河流生态系统具有整体性[43], 是物理标量纵向连续变化与生物群落相适应的整体。河流还拥有河道的景观, 具有时空的异质性, 汇水区、河道和支流范围, 都进行着物质、能量和有机质交换, 符合景观基质、斑块、廊道和嵌块景观生态学理论[44]。Bennett and Wit 和 Bennett 认为自然半自然景观单元形成生态网是保护和修复生态功能, 维持生态多样性的有效措施[45] [46]。水生态网络系统可以增加河道的复杂性, 自然泛洪区面积, 非建筑用地调蓄洪水的的功能。

4. 小清河的区域功能

4.1. 小清河是区域基础设施。

小清河是重要的排洪通道。全线按5年一遇除涝标准扩挖河槽, 20年一遇防洪标准(济南市区50年一遇)全线修筑和加高培厚两岸堤防。治理后, 干流防洪能力济南市区段由 $100\text{ m}^3/\text{s}$ 提高到 $390\sim 450\text{ m}^3/\text{s}$, 中游胜利河口段由 $230\text{ m}^3/\text{s}$ 提高到 $900\text{ m}^3/\text{s}$, 下游入海口段由 $500\text{ m}^3/\text{s}$ 提高到 $2000\text{ m}^3/\text{s}$ 。小清河改变流域水文过程, 不同空间位置的湿地具有特定的水文情势, 在流域尺度发挥水文功能。

小清河流域承担了流域防洪、调洪蓄水和生产生活用水功能。小清河流域内的有大中型水库和滞洪区, 其中1座大型水库, 8座中型水库和上华山洼、小李家、白云湖、芽庄湖、青纱湖、马踏湖及巨淀湖等滞洪区, 承担了区域生产生活供水功能。

小清河是贯穿济南、滨州、淄博、东营、潍坊五市的海河直达运输的通道, 如图4所示, 航道可满足2000吨级船舶安全通行需要, 成为区域重要的基础设施。小清河复航后, 京杭运河、小清河、新万福河“一纵两横”内河航运骨架基本建立, 小清河成为鲁中地区一条重要的排水河道, 兼顾两岸农田灌溉、内河航运, 具有海、河联运等多功能的河道。



Figure 4. The distribution of ports along the Xiaoqing River after the resumption of navigation

图4. 复航后小清河沿线港口分布

4.2. 小清河流域空间特征与生态功能。

小清河是区域性的人工河流。小清河干流自西向东流经济南、淄博、滨州、东营、潍坊5个市, 12个县(市、区), 全长229 km, 流域面积 $10,433\text{ km}^2$, 约占全省总面积的6.7%。形成了自然与半自然的河网系统。流域内南部为山区丘陵地势高, 北部为山前冲积洪积扇和黄河冲积平原地势低, 小清河支流几乎全部分布在干流南侧, 干流位于流域的最北部, 流向总体呈自西南向东北方向, 如图1所示。呈典型的单侧梳齿状分布。小清河流域水系复杂, 支流众多, 一级支流46条, 全流域河网密度为 $0.266\text{ km}/\text{km}^2$, 流域完整系数为0.290。流域各河流, 除干流常年有水外, 各支流均为季节性河流。

小清河是流域多尺度湿地的主要连接通道。小清河流域多年平均天然径流深 78.2 mm, 流域内湿地面积 2624.42 hm², 湿地涵养水源量约为 205.23 万 m³, 如表 2 和图 1 所示, 流域主要湿地。湿地是流域环境物质的汇聚地, 生物多样性丰富, 通过小清河通道连接, 小清河复航设计宽度 70~130 m, 提供了湿地间的交流通道, 持了区域生态平衡。

Table 2. Main wetlands in the Xiaoqing River Basin

表 2. 小清河流域主要湿地

湖泊名称	功能
巨淀湖	位于潍坊, 淄河、张僧河和阳河等汇聚形成, 季节性湖泊, 湖区面积约 16.6 km ² 亩[47]
马踏湖	位于淄博市境内, 小清河南岸最大的洼地, 面积 26.6 km ² 小清河支流的天然蓄滞洪区, 国家湿地公园和山东省重点生态功能保护区, 马踏湖紧邻村庄, 外围缓冲带较窄或无缓冲带, 外侧多农田, 存在农村生产生活污染。
青纱湖	位于小清河与杏花河之间, 面积约 4.76 km ²
芽庄湖	小清河南岸支流杏花河水系上游, 湖区总面积约 5.95 km ² 漯河及湖区周边来水, 流域面积 464 km
白云湖	济南市最大的天然淡水湖泊湿地, 总面积 1627.5 hm ² [48], 白云湖周围进行了农业和养殖业开发。

5. 修复小清河流域水生态系统, 形成区域多功能水生态基础设施

小清河已经是区域重要的航运、防洪和供水基础设施, 具备了成为区域多功能区域生态基础设施的条件。由于小清河的跨城市行政边界, 进行了行政区域的单一的湖泊的规划整治, 河道治理工程, 全流域的整体性水生态研究与规划还没有形成。

5.1. 修复区域湿地景观单元的联通性, 构建区域水生态网络设施

小清河流域多系山洪河道, 通过小清河联通, 形成了流域水生态廊道总体形态为单侧梳齿状分布。小清河各支流河流缓冲区构成了水生态廊道网络的支动脉, 贯穿于河流发源地至流域出口, 连接了流域不同位置生态空间, 主要为 46 支流及缓冲区, 包括连接部分生态源地湿地和山体。湿地通过水文过程与湿地生态系统相互作用, 发挥洪水削减、水沙拦蓄、水质净化和补给地下水等功能。在流域尺度上, 湿地生态系统以水循环为纽带, 通过影响流域蒸散发、入渗、地表径流、地下径流和河道径流等方式[49], 改善流域的水生态环境。修复小清河流域支流的水生态通道, 如图 5 所示, 白云湖与小清河的通道已经裁弯取直, 通道两侧没有足够宽度的过渡带和缓冲区, 修复白云湖与小清河支流的近自然状态, 恢复蜿蜒曲折的流路, 强化生态水网的纽带功能, 形成具有韧性的基础性支持功能的生态服务设施。

5.2. 用生态技术改善基础设施的生态功能

流域的湖泊紧邻村庄, 外围缓冲带较窄或无缓冲带, 如白云湖, 紧邻村庄, 外侧多农田和养殖开发(如图 6), 农村面源污染依然存在, 水体富营养化。应在各支流河流的入河口处建设人工湿地, 沿每条河流缓冲带, 发挥河流湿地和缓冲带对污水的净化功能减轻径流对湖泊的污染, 恢复河流生态系统的生物多样性维护河流生态健康。用低影响开发技术城市建设用地和村庄用地的生态化改造, 减少城市和村庄开发建设对流域水生态的影响。对流域污水处理设施进行生态化提升, 保障入河湖水质的同时, 提升设施的生态功能。

5.3. 完善多功能水生态基础设施生态韧性

小清河干流主要由降雨径流、地下水和城市排水补给, 通过 GIS 分析、地形图及现状图分析, 识别

汇水通道、坑塘洼地、分水岭等水生态敏感区,并结合流域的水生态空间格局构建,预留水系、湖泊等防涝用地空间,将现状坑塘进一步扩建为雨水塘等生态设施,防治源头湿地开始退化,沼泽湿地萎缩、源头水量减少、湿地植被群落结构改变、生物多样性降低。不仅重视对湖泊周围环境和个别点源污染进行治理,应综合考虑湖泊流域的自然条件和社会经济条件,对整个流域湖泊进行综合规划,科学制定流域内资源开发、生产发展和环境保护的政策实现流域内人地关系的和谐发展和生态环境的良性发展。



影像图来自山东省国土空间数据监测中心

Figure 5. The position of the mouth of the Xiaoqing River and Baiyun Lake tributaries flowing into the Xiaoqing River

图 5. 小清河与白云湖支流入小清河河口位置



影像图来自山东省国土空间数据监测中心

Figure 6. The development of agricultural and breeding land around Baiyun Lake

图 6. 白云湖周围农业和养殖业用地开发情况

6. 结论

小清河历史挖掘的选址为小清河成为区域水生态基础设施创造地理生态条件。宋代开挖小清河,选址在区域河流下游,成为区域重要的防洪与航运通道,在近代城市建设和乡村发展中,小清河主要发挥了宣泄和供水的功能。

现代小清河恢复航运,小清河成为区域多功能基础设施,承载了流域济南、淄博、滨州、东营、潍坊 5 个市,12 个县(市、区)的快速的城市化进程,流域经济社会发展带来的环境压力增加。

在区域层面研究小清河区域基础设施的生态功能,改变以城市行政边界为范围,河湖规划修复。以小清河流域为研究边界,修复强化小清河流域河流的连通性,增强生态韧性,用生态技术强化基础设施的水生态功能,使小清河不仅是区域交通水利基础设施,还成为重要的生态多功能基础设施,为区域的可持续发展提供韧性保障。

参考文献

- [1] 联合国开发计划署. 人类发展报告[R]. 纽约: 联合国开发计划署, 2011.
- [2] Crooks, K.R. and Sanjayan, M.A. (2006) *Connectivity Conservation*. Cambridge University Press, Cambridge. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511754821>
- [3] Hilty, J.A., Lidicker, W.Z. and Merenlender, A.M. (2006) *Corridor Ecology: The Science and Practice of Linking Landscapes for Biodiversity Conservation*. Island Press, Washington DC.
- [4] Bennett, A.F. (2003) *Linkages in the Landscape. The Role of Corridors and Connectivity in Wildlife Conservation*. World Conservation Union, Gland. <https://doi.org/10.2305/IUCN.CH.2004.FR.1.en>
- [5] Mastrangelo, M.E., Weyland, F., Villarino, S.H., Barral, M.P., Nahuelhual, L. and Littera, P. (2014) Concepts and Methods for Landscape Multifunctionality and a Unifying Framework Based on Ecosystem Services. *Landscape Ecology*, **29**, 345-358. <https://doi.org/10.1007/s10980-013-9959-9>
- [6] Beller, E.E., Spotswood, E.N., Robinson, A.H., Anderson, M.G., Higgs, E.S., Hobbs, R.J., Suding, K.N., Zavaleta, E.S., Grenier, J.L. and Grossinger, R.M. (2019) Building Ecological Resilience in Highly Modified Landscapes. *BioScience*, **69**, 80-92. <https://doi.org/10.1093/biosci/biy117>
- [7] 周艳妮, 尹海伟. 国外绿色基础设施规划的理论与实践[J]. 城市发展研究, 2010, 17(8): 87-93.
- [8] 金凤君. 基础设施与人类生存环境之关系研究[J]. 地理科学进展, 2001, 20(3): 276-285.
- [9] Mirza, M.S. and Haider, M. (2003) The State of Infrastructure in Canada: Implications for Infrastructure Planning and Policy. *Infrastructure Canada*, **29**, 17-38.
- [10] Mander, U., Jagonaegi, J., et al. (1988) Network of Compensative Areas as an Ecological Infrastructure of Territories. In: Schreiber, K.F., Ed., *Connectivity in Landscape Ecology: Proceedings of the 2nd International Seminar of the International Association for Landscape Ecology, Münster, 1987*, Ferdinand Schöningh, Paderborn, 35-38.
- [11] Costanza, R., et al. (1997) The Value of the World's Ecosystem Services and Natural Capital. *Nature*, **387**, 253-259. <https://doi.org/10.1038/387253a0>
- [12] Jongman, R.H.G., Bouwma, I.M., Griffioen, A., Jones-Walters, L. and Van Doorn, A.M. (2011) The Pan European Ecological Network: PEEN. *Landscape Ecology*, **26**, 311-326. <https://doi.org/10.1007/s10980-010-9567-x>
- [13] 俞孔坚, 韩西丽, 朱强. 解决城市生态环境问题的生态基础设施途径[J]. 自然资源学报, 2007, 22(5): 808-816.
- [14] (元)于钦. 齐乘(卷二)[M]. 济南: 济南出版社, 2016.
- [15] 山东省地方志编纂委员会. 山东省志·自然地理志[M]. 济南: 山东人民出版社, 1996: 94-96.
- [16] 马吉刚, 梅泽本, 夏泉, 等. 山东小清河污水治理现状及对策[J]. 水土保持研究, 2003, 10(2): 108-111.
- [17] 时响, 王毅, 纪瑶. 小清河防洪综合治理工程取得的成效及建议[J]. 山东水利, 2022(3): 7-10.
- [18] 周雨露, 杨永峰, 袁伟影, 等. 基于 GIS 的济南小清河流域生态敏感性分析与评价[J]. 西北林学院学报, 2016, 31(3): 50-56, 62.
- [19] 矫桂丽, 王立萍, 祖晶, 等. 小清河水质评价与污染源分析[J]. 治淮, 2011(12): 86-87.
- [20] 刘长余, 武瑞锁. 小清河流域的水污染治理[J]. 华北水利水电学院学报, 2001, 22(3): 84-86.
- [21] 山东省环境保护厅[EB/OL]. <http://www.sdein.gov.cn/>, 2010.
- [22] 刘文杰. 小清河流域水环境保护政策回顾性评价[D]: [硕士学位论文]. 济南: 山东大学, 2017.
- [23] 闫先收. 小清河流域典型抗生素分布、来源及风险评估[D]: [硕士学位论文]. 济南: 山东师范大学, 2018.
- [24] 山东省交通规划设计院. 小清河复航工程可行性研究报告[R]. 济南: 山东省交通规划设计院, 2017: 69-70.
- [25] TeBrake, W.H. (2002) Taming the Waterwolf: Hydraulic Engineering and Water Management in the Netherlands during the Middle Ages. *Technology and Culture*, **43**, 475-499. <https://doi.org/10.1353/tech.2002.0141>
- [26] Klijn, F., de Bruin, D., de Hoog, M., Jansen, S. and Sijmons, D. (2013) Design Quality of Room-for-the-River Measures in the Netherlands: Role and Assessment of the Quality Team (Q-Team). *International Journal of River Basin Management*, **11**, 287-299. <https://doi.org/10.1080/15715124.2013.811418>
- [27] Ministry of Infrastructure and the Environment (2014) Deltaprogramma 2015. Werken aan de delta, De beslissingen om Nederland leefbaar en veilig te houden.
- [28] Lundberg, J. and Moberg, F. (2003) Mobile Link Organisms and Ecosystem Functioning: Implications for Ecosystem Resilience and Management. *Ecosystems*, **6**, 0087-0098. <https://doi.org/10.1007/s10021-002-0150-4>
- [29] Yachi, S. and Loreau, M. (1999) Biodiversity and Ecosystem Productivity in a Fluctuating Environment: The Insur-

- ance Hypothesis. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, **96**, 1463-1468. <https://doi.org/10.1073/pnas.96.4.1463>
- [30] Parkyn, S.M., Davies-Colley, R.J., Costley, K.J. and Croker, J.G. (2002) Planted Riparian Buffer Zones in New Zealand: Do They Live up to Expectations? *Restoration Ecology*, **11**, 436-447. <https://doi.org/10.1046/j.1526-100X.2003.rec0260.x>
- [31] Duarte, C.M. and Kalff, J. (1986) Littoral Slope as a Predictor of the Maximum Biomass of Submerged Macrophyte Communities. *Limnology and Oceanography*, **31**, 1072-1080. <https://doi.org/10.4319/lo.1986.31.5.1072>
- [32] Yiwei, C. (2014) Research on Ecological Space Planning Oriented Urban River Landscape Planning. *Journal of Landscape Research*, **6**, 31-39, 42.
- [33] Wohl, E. (2017) Connectivity in Rivers. *Progress in Physical Geography*, **41**, 345-362. <https://doi.org/10.1177/0309133317714972>
- [34] Brookes, J.D., Aldridge, K., Wallace, T., Linden, L. and Ganf, G.G. (2005) Multiple Interception Pathways for Resource Utilization and Increased Ecosystem Resilience. *Hydrobiologia*, **552**, 135-146. <https://doi.org/10.1007/s10750-005-1511-8>
- [35] 徐晓龙, 王新军, 朱新萍, 贾宏涛, 韩东亮. 1996-2015年巴音布鲁克天鹅湖高寒湿地景观格局演变分析[J]. 自然资源学报, 2018, 33(11): 1897-1911.
- [36] 栾庆祖, 李波, 叶彩华, 张新时, 张英. 北京市三维景观格局的局地气象环境影响初探[J]. 生态环境学报, 2019, 28(3): 514-522.
- [37] Tagil, S., Gormus, S. and Cengiz, S. (2018) The Relationship of Urban Expansion, Landscape Patterns and Ecological Processes in Denizli, Turkey. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, **46**, 1285-1296. <https://doi.org/10.1007/s12524-018-0801-3>
- [38] Li, H.L., Peng, J., Liu, Y.X. and Hu, Y.N. (2017) Urbanization Impact on Landscape Patterns in Beijing City, China: A Spatial Heterogeneity Perspective. *Ecological Indicators*, **82**, 50-60. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.06.032>
- [39] Tanner, E.P. and Fuhlendorf, S.D. (2018) Impact of an Agri-Environmental Scheme on Landscape Patterns. *Ecological Indicators*, **85**, 956-965. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.11.043>
- [40] Pătru-Stupariu, I., Stupariu, M.S., Stoicescu, I., Peringer, A., Buttler, A. and Fürst, C. (2017) Integrating Geo-Biodiversity Features in the Analysis of Landscape Patterns. *Ecological Indicators*, **80**, 363-375. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.05.010>
- [41] Feng, Y., Liu, Y. and Tong, X. (2018) Spatiotemporal Variation of Landscape Patterns and Their Spatial Determinants in Shanghai, China. *Ecological Indicators*, **87**, 22-32. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.12.034>
- [42] Yin, C.H., Liu, Y.F., Wei, X.J. and Chen, W.Q. (2018) Road Centrality and Urban Landscape Patterns in Wuhan City, China. *Journal of Urban Planning and Development*, **144**, Article ID: 05018009. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)UP.1943-5444.0000441](https://doi.org/10.1061/(ASCE)UP.1943-5444.0000441)
- [43] Vannote, R.L., Minshall, G.W., Cummins, K.W., Sedell, J.R. and Cushing, C.E. (1980) The River Continuum Concept. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, **37**, 130-137. <https://doi.org/10.1139/f80-017>
- [44] WSAHGP (2004) Stream Habitat Restoration Guidelines (Final Draft). Prepared for Washington State Aquatic Habitat Guidelines Program, and Co-Published by the Washington Departments of Fish and Wildlife and Ecology and U.S. Fish and Wildlife Service.
- [45] Bennett, G. (2004) Integrating Biodiversity Conservation and Sustainable Use, Lessons Learnt from Ecological Networks. International Union for Conservation of Nature, Gland.
- [46] Bennett, G. and Wit, P. (2001) The Development and Application of Ecological Networks: A Review of Proposals, Plans and Programmes. IUCN/AID Environment, Amsterdam.
- [47] 邹春辉. 巨淀湖地区多指标记录下的全新世环境演变[D]: [硕士学位论文]. 济南: 济南大学, 2019.
- [48] 济南市自然资源与规划局. 济南城市发展战略规划(2018-2050年) [EB/OL]. http://nrp.jinan.gov.cn/art/2019/4/3/art_43830_3510948.html?xgkhide=1, 2019-04-03.
- [49] Golden, H.E., Lane, C.R., Amatya, D.M., et al. (2014) Hydrologic Connectivity between Geographically Isolated Wetlands and Surface Water Systems: A Review of Select Modeling Methods. *Environmental Modelling & Software*, **53**, 190-206. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2013.12.004>