

大汶河流域水生态系统健康策略研究

王琳

中国海洋大学环境科学与工程学院, 山东 青岛

收稿日期: 2024年4月3日; 录用日期: 2024年4月29日; 发布日期: 2024年5月21日

摘要

综合运用“生态系统方法”，将流域人类活动作为生态系统的一部分，基于“自然的解决方案”(Nature-Based Solution)利用自然系统的自组织力原则，针对大汶河流域水生态问题现状及，提出了优化流域河水系结构，通过有目的地对生态系统进行设计，恢复河流的连通性和弯曲度；修复水源地和岸滩植被，利用植被调控水文过程与生态基流，创造一个功能良好人类干预下的水生态系统，实现对流域水生态系统综合修复，恢复流域水生态健康。

关键词

生态系统, 自组织, 水生态, 流域

Study on Water Ecosystem Health Strategy in Dawenhe River Basin

Lin Wang

College of Environmental Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao Shandong

Received: Apr. 3rd, 2024; accepted: Apr. 29th, 2024; published: May 21st, 2024

Abstract

By comprehensively applying the “ecosystem approach”, taking human activities in the basin as a part of the ecosystem, and based on the “nature-based solution” and the principle of self-organization of natural systems, this paper proposes to optimize the river system structure of the basin in view of the current situation of water ecological problems in the Dawen River Basin. Restoring river connectivity and curvature through purposeful ecosystem design; restoring the vegetation of water source and beach, using vegetation to regulate the hydrological process and ecological base flow, creating a water ecosystem with good function and human intervention, realizing the comprehensive restoration of the water ecosystem of the basin, and restoring the water ecological health of the basin.

Keywords

Ecosystem, Self-Organization, Water Ecology, Watershed

Copyright © 2024 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

流域是一个相对独立完整的地理单元，有明显的水文边界，是实施水生态可持续管理有效区域。人类为了满足自身发展需求，分流河流、建水库修塘坝，干扰自然水文过程，人类活动强度正以超过以往任何历史时期的速率增大[1]，对河湖及流域水循环的影响程度甚至已与自然因素的影响程度相当。人类活动对区域气候干旱有显著的放大作用，气候变化加剧，降雨年内季节性分化，加剧汛期洪水和枯水期干旱风险[2]。气候变化和人类活动加剧流域水资源时空分布差异，诱发频繁的流域洪水和干旱问题，影响流域水生态系统健康和区域经济社会可持续发展。

洪涝灾害是主要自然灾害之一，几乎占据全球自然灾害相关损失的 30% [3]。气候变化，极端天气频繁，流域水文循环变化剧烈，城市内涝频发，洪涝灾害问题日益严重。技术主导、单一学科引领的防洪工程措施，形成了深度依赖防洪工程减轻洪涝灾害固化范式，致使城市防洪标准从 20 年一遇、100 年一遇甚至提到了 200 年一遇的未来值。然而这些简单工程技术措施将损害流域生态系统，增加长期洪水风险[4]。筑堤防洪是防洪的主要工程措施，堤坝阻断了天然洪泛作用带来的营养补给和水分补给，打破了区域水文循环平衡，导致了生态环境退化。单一采用工程防洪措施使财政投入增大，在复杂的适应性系统之中，提升系统对单一扰动的抵御能力往往增强了其面临其他扰动的脆弱性[5] [6]。

减少人类干扰，形成基于自然的解决方案。欧盟委员会则将其定义为“来源于自然并依托于自然的解决方案，旨在以资源高效和适应性强的方式解决各种社会挑战，同时提供经济、社会和环境效益” [7]。基于自然解决方案，采取自然恢复为主、辅以人工修复，尽可能减少人为干扰的修复模式。开展全流域水生态系统现状评估，面向生态系统进行水文过程调控。降低人类修建水库，取水与防洪工程对流域泛洪区生态多样性的破坏；发挥泛洪区对湿地形成发展、物种生存繁衍及区域景观功能的维系作用[8]，控制主要因素协调泛洪区作用，维持适度的洪泛强度，控制洪泛区发展演化。

开展流域尺度的水生态过程系统修复。水生态修复通常是机械地对森林、耕地、草地、水体等要素的单一目标，局部修复效，忽略生态要素关联，多尺度整合与生态过程完整性的实践，亟需引入流域尺度的水生态系统性修复，形成流域多层次水生态可持续管理框架，保持生态功能和河流洪泛区生态多样性[9]。运用生态系统的自组织能力，适应而不是抵抗扰动，从防御型流域向韧性生态流域模式的转变，管理模式从“安全抵御洪水”向与雨洪资源“和谐共生”转变。

2. 研究区背景

大汶河流域是典型湖泊流域，由黄河下游山东境内最大的支流大汶河与山东省第二大淡水湖东平湖构成。大汶河在上游地区分为南北两条支流，南边支流柴汶河，流域的面积为 1944 km²，发源于莱芜市，在大汶口处汇入大汶河，全长约为 116 km，沿途有平阴河、光明河、羊流河、属村河汇入。北边支流牟汶河，流域面积 3711 km²，主要由羸汶河，石汶河和泮汶河三条支流组成，在戴村坝汇入大清河。如图

1 所示。大汶河由东平湖清河门、陈山口出湖闸入黄河，全长 231 km，流域面积 8944 km²。东平湖是山东省第二大淡水湖，总面积 117.94 km²，占东平县总面积的 8.8% [10]。

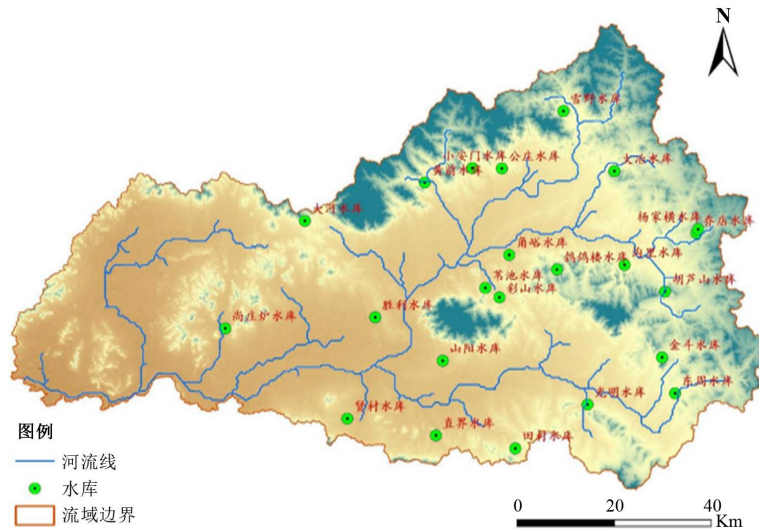


Figure 1. Dawen River Dongping Lake Basin range and location of large and medium-sized reservoirs
图 1. 大汶河东平湖流域范围与大中型水库位置图

3. 流域水文过程的人工干预与水资源利用

明永乐九年(1411)，在大汶河下游修建“戴村坝”，开挖近 90 公里建小汶河，使汶河水南注，为京杭大运河补水。戴村坝使大汶河从一条天然的河流，演变成成为水利航运设施，京杭大运河航运系统的枢纽，推动了明清两朝 600 年经济发展和南北文化交融，如图 2 所示。大汶河水环境适应性营建及改善，始于唐代，明代依据自然地势，适地理水，对小汶河、南旺湖、安山湖和蜀山湖自然水网进行改造，管控区域河网与降水，补充运河水量满足漕运需求，同时控制自然水域的范围，解决水患问题。

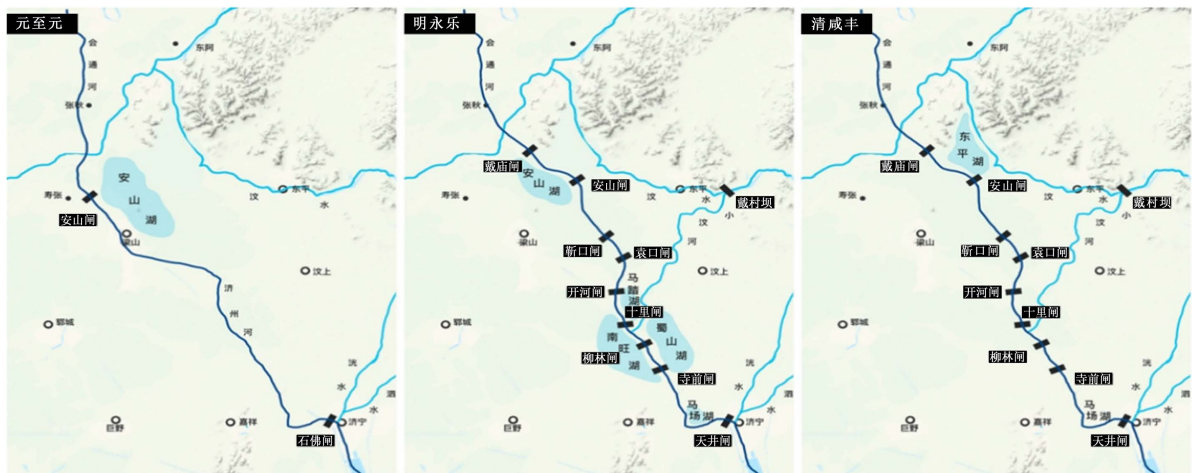


Figure 2. Dongping Lake formation process diagram in the Dawen River Basin
图 2. 大汶河流域东平湖成湖过程图

1855 年，黄河北迁夺大清河入海，大汶河为黄河支流，黄河洪水和大汶河洪水在东平地区汇集，演

变形成东平湖，调蓄黄河洪峰，成为自然滞洪区[11]。东平湖是历代政府对于客观生存环境的主动适应与有效改善，是水资源的适应性利用的典范。表 1 为流域人工干预水文工程的建设年代与功能。

Table 1. Major hydrological intervention projects in the Dawen River Basin

表 1. 大汶河流域主要水文干预工程

| 年代工程 | 功能 | 参考文献 |
|---|---|-----------|
| 1958 年修建围坝建东平湖水库 | 河水湖区北的清河门、陈山口两出湖闸流出湖进入黄河 | [10] [11] |
| 1959 年建雪野水库 | 大汶河支流羸汶河上游，总库容 2.21 亿 m ³ ，用于灌溉防洪，导致大汶河流入东平湖的径流量减少明显 | [12] [13] |
| 至 2023 年机井 2747 眼、大中型水库 23 座、塘坝 69 座、扬水站 11 座 | 流域主要河段防洪能力达到二十年一遇，人类活动的影响下产流能力减弱，大汶河径流量出现明显的下降趋势 | [13] [15] |
| 1963 年东平湖二级湖堤修复 | 东平湖改为单一滞洪人工管控水库，主要作用是削减黄河洪峰，调蓄黄河、汶河洪水 | [13] [15] |
| 2013 年南水北调运行 | 东平湖是南水北调东线工程的重要调蓄点 | |

经年修坝建闸，东平湖成为典型的人工调蓄“河-湖-库”系统，如图 3 所示，承接黄河分洪和大汶河来水，为“南水北调”东线工程调蓄，承担山东地区西水东送的重要任务，湖区主要通过大气降水和地表径流得到补给水源，湖区汇集了周边流域的表层和地下水，面积可达 9064.0 km²，补给系数可达 61.2，东平湖成为黄河和淮河的交叉点和分水岭。

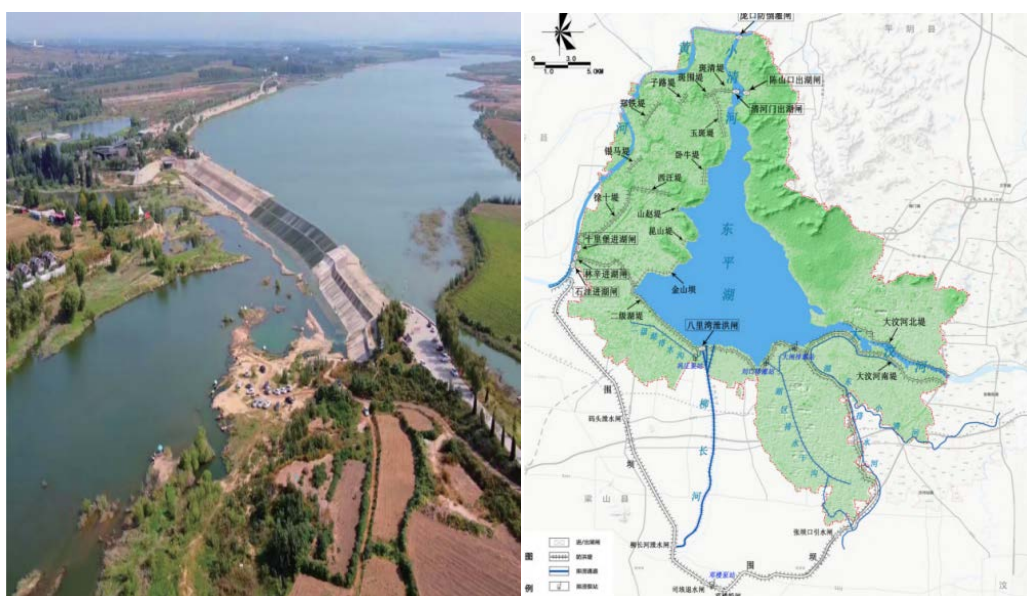


Figure 3. Current situation of Daicun Dam and Dongping Lake

图 3. 戴村坝和东平湖现状图

4. 影响大汶河流域水生态系统健康的主要因素

大汶河流域近百年来最大变化是修建蓄水工程，建成大中型水库 23 座，水库的主要功能为供水、水力发电、河流调节和防洪，水库运行是最具有代表性的影响水循环的人类活动之一[14]，水库运行过程增加了径流的不确定性[15]，通过蓄水和泄水使区域内的河流径流量重分配[16]，大型水坝、管道、人工水

库等要素直接影响流域生态水文循环过程[17]，对水生态系统造成时空破坏[18]。依据大汶河流域内 26 雨量站点和戴村坝水文站 1956~2016 年逐年天然径流量和实测径流量数据，流域内降水量、天然径流量、实测径流量均呈下降趋势，实测径流量的减少量远大于天然径流量的减少量[19]，主河道上修建的多个堤坝工程对径流的影响较大[19]，人类活动对流域径流量的影响较大。

1980~2018 年大汶河流域耕地被其他用地类型挤占，农村向城镇迁移，其他建设用地逐渐增加，第一产业用地逐渐转为第二、第三产业用地，大汶河流域发生着城镇化[20]，如图 4 所示。城市化是土地利用变化的主要形式之一，改变土地利用/植被覆盖(LUCC)等持续性特征，增加不透水面积，减少植被面积，改变水的消耗性使用以及减少入渗时间[21]，影响径流产生、汇流路径、蒸散发，对流域水生态产生重大的影响。

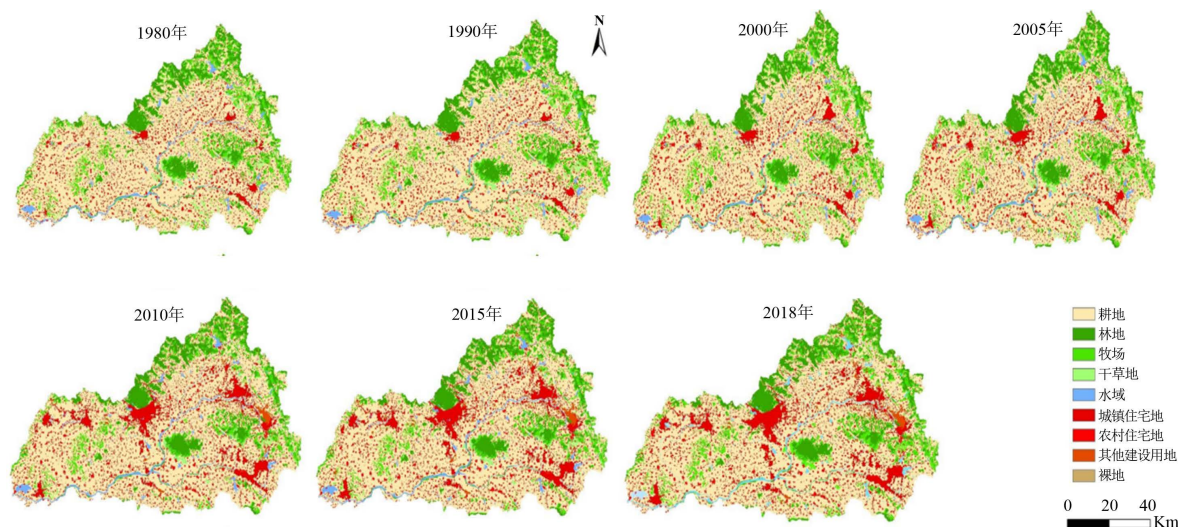


Figure 4. Changes in land use types in the Dawen River Basin
图 4. 大汶河流域土地利用类型变化图

5. 流域城市水环境主要问题

自然条件下，河流水系形态是水自然动力与地形地貌之间相互作用的结果[22]，遵循自然发育规律。自然状态下，大汶河流域为树枝状结构，如图 1 所示，符合水系结构 Horton 定律[23]。然而，流域的城市化地区，受城市化影响，城市空间组织形式使城市河道发生了从河流资源向土地资源的变化，阻断了水系发育演变进程[24]，河网的水系结构与连通水平发生剧烈变化，破坏了自然河流水系的有机形态。大汶河流域主要城市，泰安市城区以 5~8 km²/年速度扩张，城市局部性暴雨频次增高，1985 年至 2016 年，全市共发生较大水灾 14 次，其中，较为严重的 5 次[25]。泰安市城市排水(雨水)防涝综合规划(2016~2030)，河道防洪标准均已经提高至 50 年一遇，流域水循环过程由天然水循环向天然 - 人工二元水循环转变[26]。出现全流域径流减少与建成区洪涝灾害频发的现象，表明自然状态的水文过程已经失衡。

如图 5 所示，泰安市建成区主要河道奈河位置与现状图，1987 年开始填埋支流，截弯取直，修建拦河坝、硬化河道，按照 30 年一遇防洪标准修建岸堤。奈河水系的长度和河流宽度减少，河道用地萎缩，河道岸墙全部硬化，河流生态岸线消失，河槽形态改变，河流水质恶化，水系生态环境健康下降。截止 2022 年 9 月，泰安市 53 个河道水质监测断面，优良水体(I~III 类) 35 个，占 66% [27]。拦河坝使河流的流速、水深等水力学特征发生变化，改变了水系的连续性和河流的自然连通状态，水体自净能力以及水环境容量减弱。



Figure 5. Current status of river water environment and water quality, location of Naihe River and current status of shoreline in Tai'an City

图 5. 泰安市河道水环境水质现状、奈河位置与岸线现状图

6. 修复大汶河流域水生态系统健康策略

运用“生态系统方法”，生态系统方法不是一种具体的计算方法，而是[28]一种跨学科的综合性思维方式。生态系统方法中，人类作为生态系统的一部分，通过有目的地对生态系统进行设计，创造一个功能良好人类干预下的水生态系统。基于“自然的解决方案”(Nature-Based Solution)利用自然系统的自组织力，以平衡自然系统的方式管理自然系统；对于水生态系统就是将流域设想成一个能促进与组织其各项环境条件之间动态关系的、有生命力的土地[29]，对流域水生态系统要素、成分、秩序、生态位与水系进行综合修复。

6.1. 优化流域河水系结构，恢复河流的连通性和弯曲度

分析大汶河流域水系结构，依据自然水系具有分形特征，水系分维的平均值应在 1.7 左右[30]，优化城市水体的空间布局，恢复水系的长度和河流宽度，为水生物提供更多的栖息地；对于指定河段，拆除硬质堤岸，就行生态化修建；对水文连通重点主河道上堤坝(图 6)工程进行改建设计，增强不同水体之间的水力联系，促进物质能量的输送转移，促进水生态系统的形成、发展、演替、稳定以及促进生物和营养物质的交换[31][32]，增强水体的调蓄功能，抵御洪涝灾害风险的能力；按照 50a 一遇，划定改建堤坝后泛洪区范围，利用河流的弯曲的“动能自补偿”作用，按照水流的能量大小、流量、比降等特征值，计算河流的弯曲系数[33]。在河流的自然修复中，恢复河流弯曲度(图 6)。

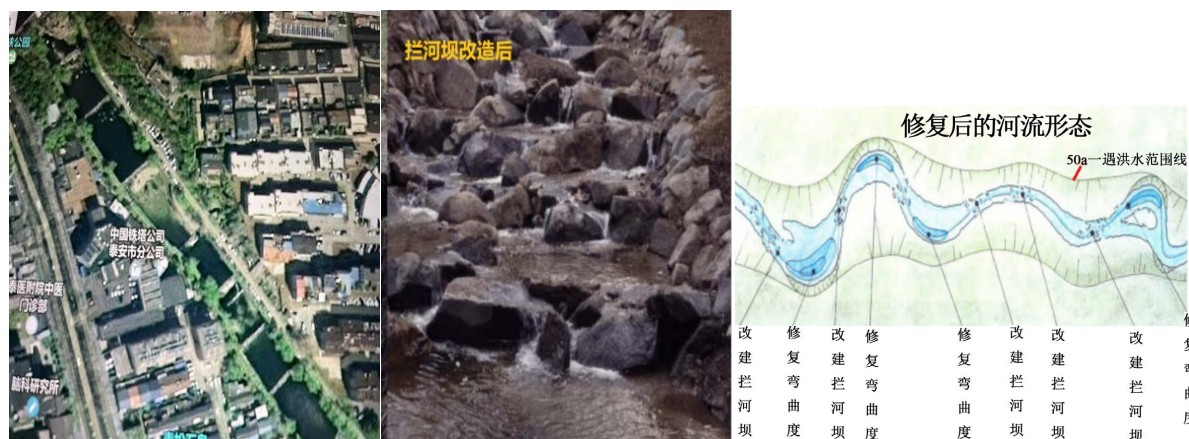


Figure 6. Current status of the barrage in the upper reaches of the Nai River in Tai'an City, diagram of restoring river connectivity and curvature

图 6. 泰安市奈河上游拦河坝现状图、恢复河流连通性与弯曲度示意图

6.2. 利用植被调控水文过程与生态基流

植被可以通过径流的调控、截留过程、下渗过程等影响流域的水文过程，植被变化可显著改变地表水分平衡的重要组成部分——蒸散发量，进而影响水文过程，具体如表 2 所示。

Table 2. Effect of vegetation on hydrological processes

表 2. 植被对水文过程的影响

| 功能 | 植被与水文过程 |
|-------|--|
| 植被类型 | 天然林地表覆盖度高，对地表的扰动较小，对径流的调控性强，阔叶林对径流调蓄能力最强，灌木林最弱，混合植被与灌草植被均可有效延迟径流开始时间，减缓径流流速；草本植被可增加水力粗糙度减缓流速，控制径流和土壤侵蚀，增加降雨和水分入渗的初始损失，滞留泥沙，改变径流和下渗过程，增强草地植被的水分利用效率。 人工林地和农田受施肥、除草及收割等人为因素影响，地表扰动大、暴露时间长，对径流的调控能力较差。 |
| 植被覆盖度 | 植被覆盖程度提升，土壤侵蚀速率指数衰减，植被对水分的利用及调控逐渐增强。 |
| 蒸散发 | 植被退化会导致的蒸散发耗水量减少； 植被覆盖增加地面产水量的下降，蒸散发的上升。 |

2020 年，水利部印发《第一批重点河湖生态流量保障目标(试行)》要求生态基流保证率原则上应不小于 90% [34]。模拟大汶河流域蒸散发时空变化，量化了植被、降水和径流过程关系，给出植被覆盖度和降水变化对径流过程的影响，确定流域植被对径流开始的时间，径流流速减缓影响，科学调整植被覆盖面积，控制河道洪水峰值，保证河道基流。在流域植被优化中，水源地和河流岸线泛洪区线型空间是重点调控区域。

6.2.1. 优化流域水源地植被

合理规划水源地植被生态系统，增强水源涵养功能。水源涵养功能主要指森林对河水流量增减的影响作用，在特定时空尺度上森林生态系统通过植被层、枯落物层和土壤层等实现的降水截留、蓄持和时空调配，并衍生出调节气候、侵蚀及水质等的综合作用表征[35]。大汶河流域水库塘坝水源地众多，合理规划水源地植被，增强流域自然调控能力。

6.2.2. 科学规划泛洪区湿地生态系统

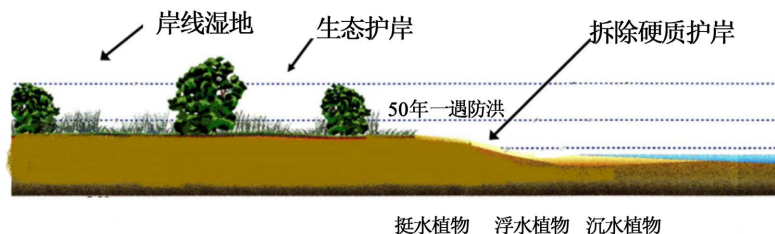


Figure 7. ecological bank protection and floodplain constructed wetland

图 7. 生态护岸与泛洪区人工湿地

合理规划河流洪泛区空间、建设生态廊道以恢复河流自然的水文形态。在模拟如图 6 的河流洪泛区内拓宽河道，规划湿地，强化水生态功能；泛洪区湿地为狭长的湿地生态斑块，边缘长，如果可以分割成若干的分支斑块，可以形成较强内部基因差异，在不同的分支斑块存在不同的基因，形成独立的群落，两个分支斑块中间邻近的斑块的植被优势种形成的速度快。斑块由复杂边缘和多个分支斑块构成，这个斑块与邻近斑块之间的物质和生物交流会增加，斑块多样性形成速度快；沿河流流向，设计狭长的湿地

斑块, 湿地将沿着河流方向迅速蔓延, 蔓延进一步强化边缘的复杂性, 增强生物的多样性[36], 如图 7 所示。

6.3. 利用多功能绿色基础设施改进城市水生态环境

城市绿色基础设施是自然和人类社会绿色生命支持系统, 保护生物多样性, 提升生态系统服务和创造高质量人居环境。城市市政基础设施的绿色化, 对流域内建成区市政基础设施进行生态化改造, 将排洪减涝、雨洪利用与城市的景观有机融合, 赋予常规基础设施生态功能; 将雨洪管理与利用和城市建设合理结合, 实现雨洪资源就地回用, 既有效利用了雨水资源, 减轻污水处理厂的压力, 也缓解了城市水涝的发生。对城市内中、小型水体及小区景观水体进行有效保护, 较大规模的水体进行水生态功能改造, 实现自然收集、自然渗透、自然净化的功能。利用河道泛洪区湿地系统建设, 扩大滨河森林湿地、建设可持续排水系统, 为周边建筑防洪标准达到 50 年一遇创造条件; 加强景观功能间的协同效应、提升景观单元的多种功能性, 在保护生态环境的同时支撑社会可持续发展。

6.4. 形成基于自然动力的水生态系统管理

水生态系统是开放系统, 从太阳获取高质量的能量, 反馈形成组织行为, 保持系统的结构与功能, 这种机制就是自组织。利用水生态系统自组织功能进行流域雨洪管理成为趋势, 1996 年, 荷兰数千年的雨洪管理发生了历史性的转变, 提出了给河流空间战略, 形成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[37], 按照自然节律调节洪水, 而不是使用暴力[38]的技术措施。

实施流域自然导向下的雨洪管理, 调节流域洪水节律, 恢复河漫滩湿地。通过适度的水位波动促进湿地种子的萌发和幼苗建植, 水位波动期间, 暂时的洪水会使种子在河岸上梯度分布, 水位下降时, 在空间和时间上创造各种土壤水分条件, 以满足多物种的发芽要求[39], 水位波动管理可以用于促进湖滨带或河岸带植被的自然恢复[40]。利用现代水利设施和调控技术, 科学调控大汶河流域水库塘坝, 模拟形成满足流域河滨带湿地植被生态的水文过程。

7. 形成流域水生态新文明形态

东平湖是大汶河下泄, 遇到黄河受阻形成的盆地汇集成湖, 是历史变化叠加长时段自然环境基础的社会表现, 呈现了不同历史时期的文明形态。明朝修建戴村坝拦截汶水, 使其南流, 通过设计三合土坝、窦公堤与南端主坝这三段高低不同、长短不一的坝段, 实现“水盛, 则浸入清河, 以疏其溢; 水落, 则尽挟入南, 以济其涸, 此坝之利也”[41], 保证小汶河引水流量的蓄泄, 调控运河水量, 是水自然驱动的水动力利用的农业文明形态; 近现代, 技术与材料推动了人工设施建设, 大兴水利工程, 是水资源利用的工业文明形态; 90 年代的来源于自然并依托于自然的解决方案, 是生态文明时代开端, 是雨洪管理的生态文明形态。

不同时代水文明形态形成带动了地域社会繁盛。明朝修建戴村坝, 大汶河成为南望闸关键枢纽水源, 推动东平湖区域成为中国经济地理上核心区域和南北文化的渡地带, 崔育区域 600 年繁荣; 面对未来气候异常和局部区域的趋势性干旱, 流域内人类的耗水与全球气候变暖的影响程度是同一个数量级, 甚至超过气候异常的影响, 在大汶河流域探索, 以自然系统的自组织力, 恢复流域水生态健康, 具有重要的时代价值。

8. 结论

大汶河流域是黄河流域山东段的重要流域, 大汶河流域的东平湖是南水北调和黄河入海前的最后一

个大型湖泊，对大汶河进行流域尺度水生态健康的潜在风险研究，进行流域尺度的水生态健康修复是黄河流域生态保护的关键。

大汶河流域现状分析显示，大规模的人工设施，水库、塘坝建设改变了流域汇水分区，东平湖成为黄河和淮河的交叉点和分水岭。持续的城镇化进程，改变流域土地利用/植被覆盖，流域实测径流量的持续减少；大汶河流域主要城市泰安市城区快速扩张，城市局部性暴雨频次增高，流域水循环过程由天然水循环向天然-人工二元水循环转变，河网的水系结构与连通水平发生剧烈变化，破坏了自然河流水系的有机形态，全流域径流减少与建成区洪涝灾害频发表明自然状态的水文过程已经失衡。

提出了优化流域河水系结构，恢复河流的连通性和弯曲度，利用植被改善流域径流过程，形成基于自然过程的水生态修复与管理，建立新的水生态文明形态的策略。

参考文献

- [1] Wagener, T., Sivapalan, M., Troch, P.A., *et al.* (2010) The Future of Hydrology: An Evolving Science for a Changing World. *Water Resources Research*, **46**, W05301. <https://doi.org/10.1029/2009WR008906>
- [2] Li, Y., Tao, H., Yao, J., *et al.* (2016) Application of a Distributed Catchment Model to Investigate Hydrological Impacts of Climate Change within Poyang Lake Catchment (China). *Hydrology Research*, **47**, 120-135. <https://doi.org/10.2166/nh.2016.234>
- [3] Dong, Y. and Frangopol, D.M. (2017) Probabilistic Life-Cycle Cost-Benefit Analysis of Portfolios of Buildings under Flood Hazard. *Engineering Structures*, **142**, 290-299. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.03.063>
- [4] Burby, R.J., Deyle, R.E., Godschalk, D.R. and Olshansky, R.B. (2000) Creating Hazard Resilient Communities through Land-Use Planning. *Natural Hazards Review*, **1**, 99-106. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1527-6988\(2000\)1:2\(99\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1527-6988(2000)1:2(99))
- [5] Holling, C.S. and Meffe, G.K. (1996) Command and Control and the Pathology of Natural Resource Management. *Conservation Biology*, **10**, 328-337. <https://doi.org/10.1046/j.1523-1739.1996.10020328.x>
- [6] Roberge, M. (2002) Human Modification of the Geomorphically Unstable Salt River in Metropolitan Phoenix. *The Professional Geographer*, **54**, 175-189. <https://doi.org/10.1111/0033-0124.00324>
- [7] Maes, J. and Jacobs, S. (2017) Nature-Based Solutions for Europe's Sustainable Development. *Conservation Letters*, **10**, 121-124. <https://doi.org/10.1111/conl.12216>
- [8] 赵弈, 刘月辉, 曹宇. 辽河三角洲盘锦湿地防洪功能研究[J]. 应用生态学报. 2000, 11(2): 261-264.
- [9] Junk, W.J., Bayley, P.B. and Sparks, R.E. (1989) The Flood Pulse Concept in River Floodplain Systems. *Special Publication of the Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, **106**, 110-127.
- [10] 林文盘, 何凡能. 我国淡水湖泊资源开发探讨——以东平湖为例[J]. 自然资源学报, 1990(1): 11-19.
- [11] 山东省黄河位山工程局东平湖志编纂委员会. 东平湖志[M]. 济南: 山东大学出版社, 1993.
- [12] 和桂玲, 吴春澍. 雪野水库大坝裂缝成因分析与加固措施[J]. 水利规划与设计, 2007(2): 56-58.
- [13] 孙蓉, 孙秀玲, 宫雪亮, 芦昌兴. 大汶河戴村坝径流序列一致性影响分析[J]. 水电能源科学, 2017, 35(9): 17-21.
- [14] Brown, P.H., Tullios, D., Tilt, B., *et al.* (2009) Modeling the Costs and Benefits of Dam Construction from a Multidisciplinary Perspective. *Journal of Environmental Management*, **90**, S303-S311. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2008.07.025>
- [15] He, S., Yin, X., Shao, Y., *et al.* (2021) Post-Processing of Reservoir Releases to Support Real-Time Reservoir Operation and Its Effects on Downstream Hydrological Alterations. *Journal of Hydrology*, **596**, Article ID: 126073. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126073>
- [16] Wang, X., De Linage, C., Famiglietti, J., *et al.* (2011) Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) Detection of Water Storage Changes in the Three Gorges Reservoir of China and Comparison with *in Situ* Measurements. *Water Resources Research*, **47**, W12502. <https://doi.org/10.1029/2011WR010534>
- [17] Hwang, J., Kumar, H., Ruhi, A., Sankarasubramanian, A. and Devineni, N. (2021) Quantifying Dam-Induced Fluctuations in Streamflow Frequencies across the Colorado River Basin. *Water Resources Research*, **57**, 29-35. <https://doi.org/10.1029/2021WR029753>
- [18] Lozanovska, I., Rivaes, R., Vieira, C., *et al.* (2020) Streamflow Regulation Effects in the Mediterranean Rivers: How Far and to What Extent Are Aquatic and Riparian Communities Affected? *Science of the Total Environment*, **749**, Article ID: 141616. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141616>

- [19] 李勇刚, 赵龙, 李建新, 等. 黄河下游大汶河流域水文要素演变特征研究[J]. 山东农业大学学报(自然科学版), 2023, 54(1): 104-111.
- [20] 杨旭洋. 变化环境下流域径流演变特征及归因分析研究——以大汶河流域为例[D]: [博士学位论文]. 西安: 西安理工大学, 2023.
- [21] Cuo, L., Lettenmaier, D.P., Mattheussen, B.V., *et al.* (2008) Hydrologic Prediction for Urban Watersheds with the Distributed Hydrology-Soil-Vegetation Model. *Hydrological Processes*, **22**, 4205-4213. <https://doi.org/10.1002/hyp.7023>
- [22] 陈菁. 城镇化过程中应保护天然水系——从几则案例说起[J]. 中国水利, 2014(22): 21-23.
- [23] Horton, R. (1945) Erosional Development of Streams and Their Drainage Basins: Hydrophysical Approach to Quantitative Morphology. *Bulletin of the Geological Society of America*, **56**, 275-370. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1945\)56\[275:EDOSAT\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1945)56[275:EDOSAT]2.0.CO;2)
- [24] 孟飞, 刘敏, 吴健平, 等. 高强度人类活动下河网水系时空变化分析——以浦东新区为例[J]. 资源科学, 2005, 27(6): 156-161.
- [25] 泰安市海绵城市专项规划(2016-2030) [Z]. 泰安市住房和城乡建设局, 济南市市政工程设计研究院(集团)有限责任公司, 2016-12.
- [26] 秦大庸, 陆垂裕, 刘家宏, 等. 流域“自然-社会”二元水循环理论框架[J]. 科学通报, 2014, 59(4-5): 419-427.
- [27] 张伯瀚. 农户参与河道生态保护意愿的影响因素研究——以大汶河流域泰安段为例[D]: [硕士学位论文]. 泰安: 山东农业大学, 2023.
- [28] Jacob Kalf. 湖沼学-内陆水生态系统[M]. 北京: 高等教育出版社, 2011.
- [29] 大卫·弗莱切尔, 高健洲. 景观都市主义与洛杉矶河[J]. 风景园林, 2009(2): 54-61.
- [30] Claps, P. and Oliveto, G. (1996) Reexamining the Determination of the Fractal Dimension of River Networks. *Water Resources*, **32**, 3123-3135. <https://doi.org/10.1029/96WR01942>
- [31] Pringle, C. (2003) What Is Hydrologic Connectivity and Why Is It Ecologically Important? *Hydrological Processes*, **17**, 2685-2689. <https://doi.org/10.1002/hyp.5145>
- [32] Chadwick, M. (2008) Stream Ecology: Structure and Function of Running Waters. *Freshwater Biology*, **53**, 1914. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2427.2008.01997.x>
- [33] 姚文艺, 郑艳爽, 张敏. 论河流的弯曲机理[J]. 水科学进展, 2010, 21(4): 533-540.
- [34] Bhaduri, A., Bogardi, J., Siddiqi, A., *et al.* (2016) Achieving Sustainable Development Goals from a Water-12-Perspective. *Frontiers in Environmental Science*, **4**, Article No. 64. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2016.00064>
- [35] 刘效东, 张卫强, 冯英杰, 等. 森林生态系统水源涵养功能研究进展与展望[J]. 生态学杂志, 2022, 41(4): 784-791.
- [36] Forman, R.T.T. (1995) Land Mosaics: The Ecology of Landscapes and Regions. Cambridge University Press, Cambridge. <https://doi.org/10.1017/9781107050327>
- [37] 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>
- [38] Ministry of Infrastructure and the Environment (2014) Deltaprogramma 2015. Werken Aan De Delta, De Beslissingen Om Nederland Leefbaar En Veilig Te Houden.
- [39] Lenssen, J.P.M., Ten Dolle, G.E. and Blom, C. (1998) The Effect of Flooding on the Recruitment of Reed Marsh and Tall for Plant Species. *Plant Ecology*, **139**, 13-23. <https://doi.org/10.1023/A:1009754505028>
- [40] Coops, H., Vulink, J.T. and Van Nes, E.H. (2004) Managed Water Levels and the Expansion of Emergent Vegetation along a Lakeshore. *Limnologica*, **34**, 57-64. [https://doi.org/10.1016/S0075-9511\(04\)80022-7](https://doi.org/10.1016/S0075-9511(04)80022-7)
- [41] 左慧元. 黄河金石录[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 1999.