



船闸对通航河流生态的影响研究^{*}

李文杰¹, 雷宗霖², 万 宇¹, 杜洪波¹, 宋 洋¹

(1. 重庆交通大学, 国家内河航道整治工程技术研究中心, 重庆 400074;

2. 重庆交通大学, 水利水运工程教育部重点实验室, 重庆 400074)

摘要: 通航河流上人类活动频繁, 且大坝的修建使得河流生态受到不同程度的损害, 河流生态承受巨大的压力。基于全球 34 条黄金航道、全球大坝数据和生态指标数据, 采用回归分析、因子分析的方法, 研究修建大坝对河流生态的影响与运行船闸降低河流生态压力的作用。结果显示, 大坝的修建显著增加了河流生态压力, 而运行船闸可降低河流生态压力升高幅度, 对生态具有改善作用。不同航道开发率的河流有无船闸处的生态压力不一致, 高大坝密度航道越易凸显船闸对河流生态的调节作用。研究成果可为生态环境保护目标下的河流航运规划建设提供理论支撑。

关键词: 通航河流; 大坝; 运行船闸; 生态压力

中图分类号: U 611

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2022)09-0092-07

Ecological impact of ship lock on navigable river

LI Wen-jie¹, LEI Zong-lin², WAN Yu¹, DU Hong-bo¹, SONG Yang¹

(1. National Inland Waterway Regulation Engineering Research Center, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;

2. Key Laboratory of Ministry of Education for Hydraulic and Waterway Transport Engineering,

Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: Frequent human activities on navigable rivers and the construction of dams have damaged the river ecology to varying degrees, and the river ecology is under enormous pressure. Based on 34 global golden waterways in the world, global dam data and ecological index data, the impact of dam on river ecology and the role of navigation locks in reducing ecological pressure are studied by regression analysis and factor analysis. The results show that the construction of dams significantly increases the ecological pressure of the river, while the navigation locks can reduce the increase of the ecological pressure of the river and improve the ecology. Ecological pressures of the different exploitation rate waterway with or without locks are not consistent, the waterway with high dam density is more likely to highlight the regulating effect of navigation lock on river ecology. The research results can provide theoretical support for the planning and construction of river shipping under the goal of ecological environmental protection.

Keywords: navigable river; dam; navigation lock; ecological pressure

河流在全球范围内支持复杂多样的生态系统, 提供重要的社会和经济服务保障, 是影响自然生态环境和人类社会经济系统发展的重要因素^[1-3]。人类以多种方式改变了河流天然连通性, 如修建水坝等^[4-5]。通航河流上人类活动频繁, 修建大坝虽可改善通航条件, 河流生态却因此承受了巨大

压力。通航基础设施的建设使得河流面临连通性丧失的压力, 并导致生物多样性和基本的生态系统服务功能下降^[6]。河流自由流动的能力由路径连通性决定, 这些路径使水体及其在整个河流环境中输送的生物体、沉积物、有机物和营养物能够流动和交换, 如何改善河流连通性、提高水生

收稿日期: 2022-01-07

^{*}基金项目: 重庆市自然科学基金项目 (cstc2021jcyj-jqX0009、cstc2021jcyj-msxm2522)

作者简介: 李文杰(1984—), 男, 博士, 教授, 从事航道水沙运动基础理论及航运规划研究。

生物多样性并增加相关生态系统服务价值仍然是一个挑战。

河流连通性对于保护生物多样性至关重要^[7], 修建水坝将原有连续的河流生态系统分隔成不连续的环境单元, 对鱼类最不利的影响是阻隔其洄游通道。船闸在运行过程中使河流上下游形成大片平稳的连通水体^[8], 可成为某些生物的栖息地和连通上下游的生物通道^[9]。三峡及葛洲坝船闸的调查统计与鱼类上下行标记试验验证了鱼类可以通过船闸实现上下行的交流^[10], 表明船闸可兼做鱼类洄游通道等过鱼设施^[11-12]。此外, 运行船闸可降低库区水体滞留、调节库区累计污染物和改善水质^[13]。然而, 对于船闸提供的连通水体对河流生态是否有显著的积极影响仍缺乏系统的深入研究。

本文基于全球 34 条内河黄金航道, 分类统计

有无修建船闸条件下大坝处的生态压力值, 据此分析运行船闸对通航河流生态的影响, 以期为生态环境保护目标下的河流航运规划建设提供理论支撑。

1 研究方法

1.1 数据来源

1.1.1 全球黄金航道

根据河流航运承载力和社会经济指数, 从流域面积大于 10 万 km² 的 66 条大型内河航道中确定了 34 条内河黄金航道^[14]。

1.1.2 全球大坝

在全球 34 条内河黄金航道上共选取 209 个大坝, 结合卫星影像, 按照有无修建船闸将大坝分为“有坝有闸”和“有坝无闸”2 类, 其中“有坝有闸”99 处、“有坝无闸”110 处, 见表 1。

表 1 全球 34 条内河黄金航道有无修建船闸的大坝数量

河流编号	河流名称	有坝有闸	有坝无闸	河流编号	河流名称	有坝有闸	有坝无闸
1	长江	3	6	18	第聂伯河	5	0
2	珠江	3	5	19	顿河	5	5
3	阿穆尔河	0	0	20	苏联伏尔加河	10	1
4	红河	0	3	21	密西西比河	10	3
5	湄公河	2	4	22	哥伦比亚河	5	6
6	恒河	0	1	23	莫比尔河	7	6
7	雅鲁藏布江	0	1	24	圣劳伦斯河	8	6
8	戈达瓦里河	0	5	25	弗雷则河	0	0
9	奎师那河	0	4	26	亚马逊河	0	0
10	默哈讷迪河	0	2	27	奥里诺科河	0	1
11	印度河	0	4	28	巴拉那河	0	6
12	莱茵河	5	4	29	圣弗朗西斯科河	0	3
13	奥得河	7	3	30	托坎廷斯河	1	4
14	易北河	7	3	31	乌拉圭河	0	3
15	罗纳河	8	5	32	刚果河	0	0
16	卢瓦尔河	4	2	33	尼罗河	2	3
17	多瑙河	6	9	34	尼日尔河	1	2
				合计		99	110

1.1.3 生态指标

全球河流生态压力地图由 0~1 之间的不同生态压力指标值绘制, 生态压力值为无量纲负向指标, 即生态压力数值越低表示生态情况越好。依据全球内河黄金航道可持续发展评价方法中的生

态压力指数评价模型, 分别选取河流生态数据库中的径流扰动性、河流破碎化、不透水面比例、湿地不连通性、渔获物压力、水产养殖压力以及大坝密度等 7 个生态压力指标, 研究船闸对通航河流的生态影响。

1.2 分析方法

1.2.1 大坝位置处的生态压力

基于水库大坝数据，确定全球黄金航道上大坝的具体经纬度坐标，在河流生态数据库中选取距离闸坝最近的 4 个数据点，采用空间反距离加权插值法^[15]确定闸坝处生态指标值。

1.2.2 船闸对通航河流的生态影响分析

通过线性回归方法^[16]总体分析生态指标压力值与大坝密度的相关性，以有无船闸为条件分析修建船闸对河流生态压力的影响。由于生态指标间存在内在相关性，采用主成分分析方法^[17]将多维指标系统转化成低维指标系统，据此对比有无船闸大坝处的生态压力指标值，分析船闸在航道不同发展阶段对生态压力的影响。

1.2.3 典型河流分析

选取长江、莱茵河与密西西比河等国际典型航道，依据其大坝密度与有无船闸条件下因子压力值的分布情况，分析典型航道上运行船闸对河流生态的影响。

2 河流生态与大坝密度的关系

各生态指标压力值与大坝密度的回归分析见图 1，回归系数表示单位大坝密度增加引起的各生态压力值增量。结果表明，选取的 6 个生态指标压力值均与大坝密度呈正相关，即大坝密度越大生态指标压力也越大，说明大坝的修建对河流生态存在负面影响。大坝的修建改变了河流水文条件、切断了鱼类洄游通道，不仅增加了径流扰动指数与不透水面比例，而且因阻断了鱼类的洄游使得渔获物与水产养殖的压力升高^[18-19]；同时减缓了河流水体流速，破坏了湿地与河流的连通性，使得河流破碎化指数与湿地不连通性指数的压力升高^[20-21]。

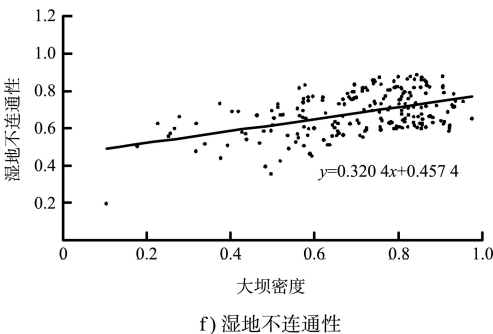
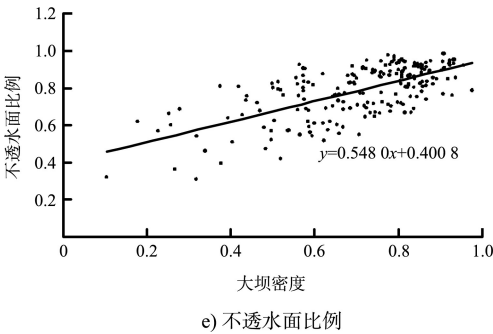
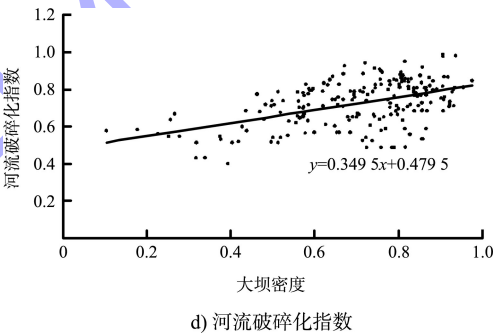
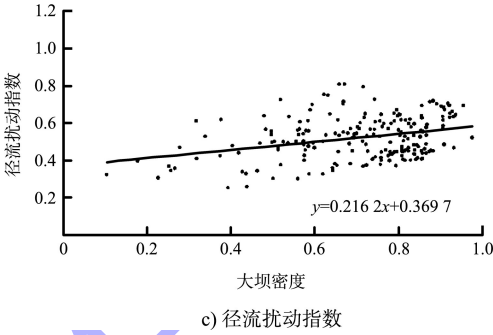
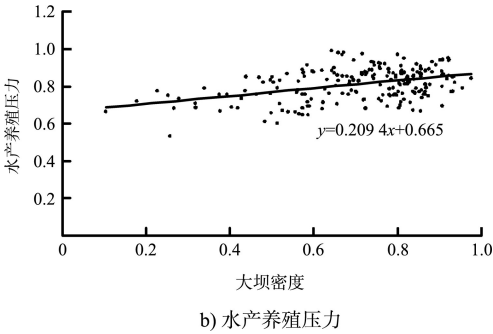
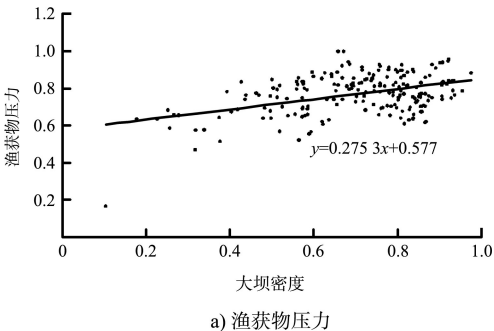


图 1 全球河流的各项生态指标压力值与大坝密度关系

各生态指标压力值与大坝密度的回归系数分别为: 渔获物压力 0.275 3; 水产养殖压力 0.209 4; 径流扰动指数 0.216 2; 河流破碎化指数 0.349 5; 不透水面比例 0.548 0; 湿地不连通性 0.320 4。由此可见, 大坝的修建更显著影响了河流破碎化指数、不透水面比例和湿地不连通性指数。

3 船闸对生态压力变化的影响

根据有无修建船闸将大坝分为 2 类, 将其生态压力指标分别与大坝密度进行回归分析, 其对比情况见图 2。结果显示: 运行船闸处与无船闸处相比, 生态压力指标回归系数绝对数值的下降范围为 0.026~0.261, 其中径流扰动指数下降最少,

不透水面比例指数下降最多。相对比例的下降范围为 11%~60%, 其中径流扰动指数下降最少, 渔获物压力指数下降最多。运行船闸处生态压力值回归系数比无船闸处低, 单位大坝密度增加时运行船闸处生态压力值增加幅度更小, 说明船闸对受大坝影响的河流生态具有改善作用。运行船闸可连通大坝上下游水体, 为鱼类提供洄游通道^[22], 使得运行船闸处渔获物压力与水产养殖压力低于无运行船闸处; 同时大体积连通水体也改善了河流的连通性, 使得运行船闸处河流破碎化、径流扰动指数、不透水面比例与湿地不连通性等指标压力值低于无船闸处^[23]。

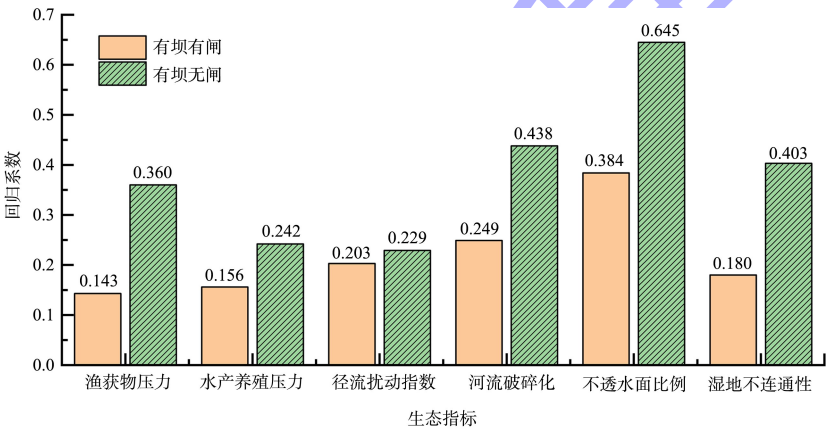


图 2 有无修建船闸处生态指标与大坝密度的回归系数

采用主成分分析法将 6 个河流生态指标系统降维成 2 个因子指标: 第一公因子 F_1 主要表达河流基本信息, 在径流扰动指数和河流破碎化指标上载荷系数较大, 故对其解释力度较大并且因子表达的信息趋于该 2 项生态指标; 第二公因子 F_2 主要趋于对受大坝影响河流在生态表现上的信息表达, 在渔获物压力、不透水面比例、水产养殖压力和湿地不连通性指标上载荷系数较大, 故对其解释力度较大并且因子表达的信息趋于该 4 项生态指标。2 个公因子对 6 个原始指标信息的表达比例为 62%, 能较好地解释原始指标的信息。根据公因子在各指标上的载荷系数, 其表达式如下:

$$F_1 = -0.033a - 0.015b + 0.711c + 0.554d + 0.066e + 0.019f \tag{1}$$

$$F_2 = 0.348a + 0.307b - 0.132c + 0.051d + 0.345e + 0.255f \tag{2}$$

式中: a 为渔获物压力; b 为水产养殖压力; c 为径流扰动指数; d 为河流破碎化指数; e 为不透水面比例指数; f 为湿地不连通性指数。

根据表达式可计算出 2 个公因子的压力值, 其值与大坝密度的回归结果见图 3。对于第一公因子, 无论大坝密度高低, 运行船闸处压力值均低于无船闸处, 且随着大坝密度升高运行船闸处压力升高幅度更小, 见图 3a)。河流受到大坝干扰其压力值便升高, 运行船闸提供连通水体, 对受影响河流具有调节作用, 所以无论航道开发与大坝密度高低情况如何, 运行船闸处第一因子压力值均低于无船闸处。

对于第二公因子，低大坝密度时运行船闸处生态压力值高于无运行船闸处，高大坝密度时运行船闸处生态压力值低于无运行船闸处，见图 3b)。由于航道发展前中期开发率低，大坝密度低，运行船闸处受人类活动影响强烈，故低大坝密度和低航道开发率时，运行船闸处第二公因子压力值高于无船闸处。随着航道开发率的提高，大坝密度上升，无论有无船闸处均受到繁忙的人类活动影响，且受到的影响趋于一致。然而，运行船闸对受大坝影响河流的生态具有调节作用，所以当航道开发率与大坝密度升高时，有无船闸处第二因子压力值逐渐接近，突破大坝密度临界点后，运行船闸处第二因子压力值低于无船闸处。

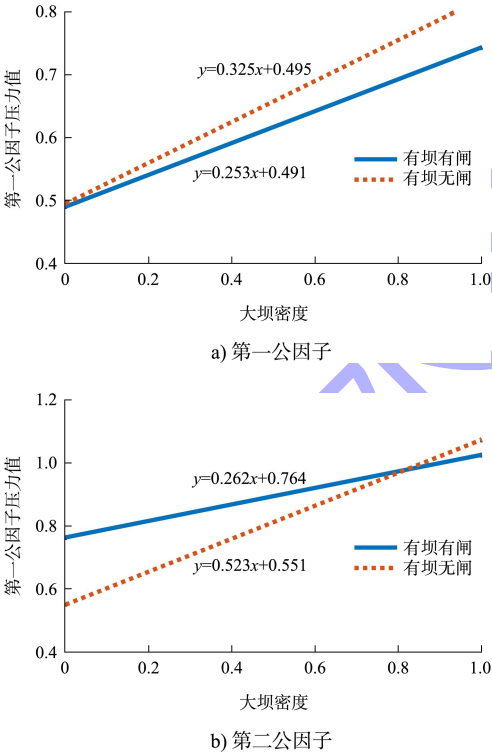


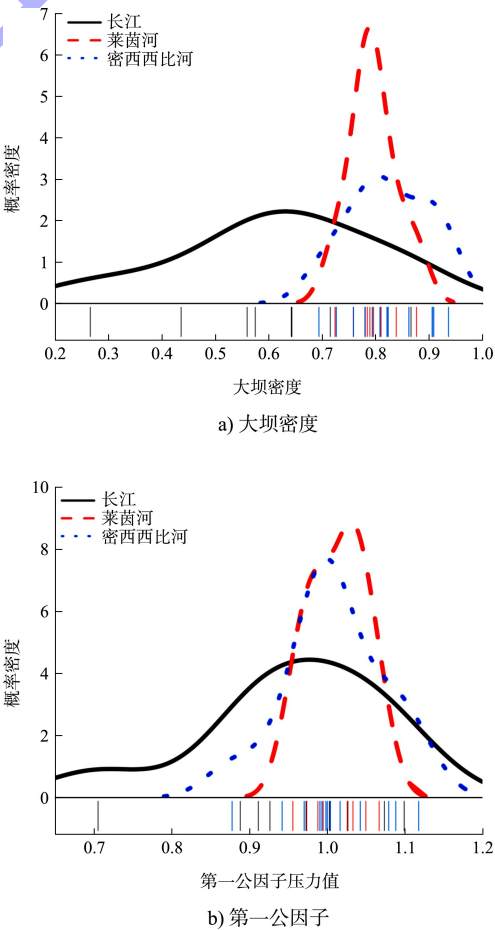
图 3 因子压力值与大坝密度关系

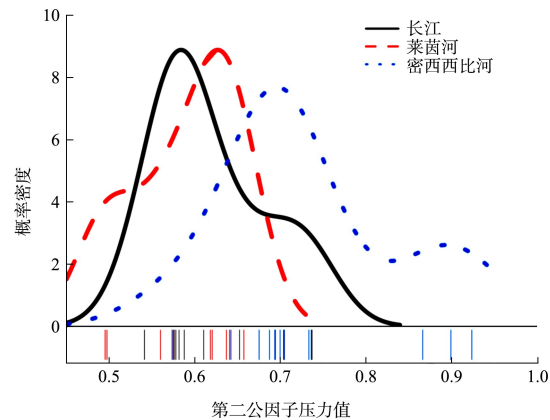
如图 3 所示，运行船闸处第一公因子与第二公因子的回归系数均小于无运行船闸处，表明船闸对通航河流生态的改善具有积极作用。运行船闸处第一公因子、第二公因子回归系数与无船闸处相比，绝对值下降分别为 0.072、0.261，百分比下降分别为 22%、50%，表明运行船闸对第二

公因子的调节作用强于第一公因子。在筑坝的蓄水河流中运行船闸可改善河流的水体连通性^[24]，使得河流生态表现方面的相关指标在受运行船闸调节作用时表达更加强烈。

4 典型通航河流生态压力分析

选取长江、莱茵河与密西西比河 3 条典型河流，分析典型河流上大坝密度与因子值数据分布情况，大坝密度与公因子的带轴须分布曲线见图 4。如图 4a) 所示，3 条河流中长江上大坝密度最低、数据分布均匀且近似符合正态分布；而莱茵河与密西西比河上的大坝密度数据分布集中在高密度区，表明与莱茵河、密西西比河相比，长江航道仍处于发展前中期。如图 4b)、c) 所示，3 条河流的第一公因子压力值分布接近，且密西西比河上第二公因子受大坝干扰最强，压力值分布最高。

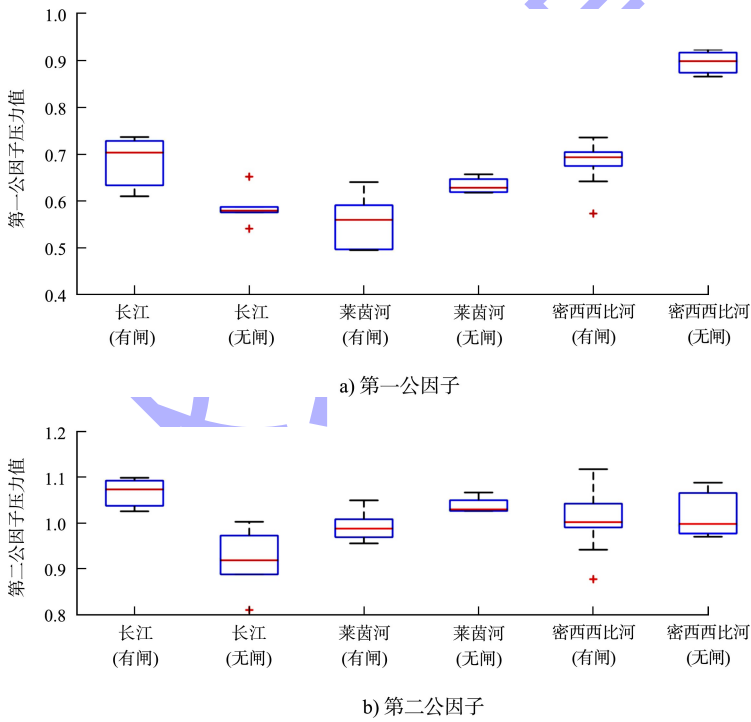




c) 第二公因子

注：分布曲线是以变数值为横坐标、以累积频率(概率)为纵坐标的曲线图，即概率分布函数的图形。横坐标上的轴须说明频数，竖杠表示出现相应的数字。

图 4 典型河流上大坝密度与因子值数据分布



注：每个方框中的线条是中位数，表示数据的中位数；框的边缘是第 1 个四分位数(75%分位数)和第 3 个四分位数(25%分位数)；“+”表示超出最小观察值(下边缘)和最大观察值(上边缘)的异常值截断点限制范围之外的数据。

图 5 典型河流上有无船闸处的因子值数据分布

5 结论

- 1)全球范围内，大坝密度越高的河流，生态压力值越大，大坝密度与生态压力值呈正相关关系。
- 2)大坝密度升高时，“有坝有闸”类大坝的生态压力值增加幅度比“有坝无闸”类大坝小，运行船闸对受大坝影响河流生态具有改善作用。
- 3)受航道发展阶段、经济发展水平、人类活

为阐明典型河流上运行船闸对生态的积极影响，将 2 类因子值按有无船闸进行分类比较，见图 5。对于莱茵河与密西西比河，运行船闸处第一公因子和第二公因子压力值均低于无运行船闸处，表明对于莱茵河与密西西比河等航道开发率相对较高的发达航道，运行船闸促进上下游水体连通，对河流生态的改善具有重要作用。对于长江，运行船闸处第一公因子和第二公因子压力值均高于无运行船闸处，可能是由于长江开发率不足，大坝密度低且坝址分布集中(多位于金沙江流域)，因此在有船闸处受人类活动影响较强，在生态压力的表现上高于无船闸处。

- 动等多因素影响，不同河流有无船闸处生态压力会呈现出不一致的情况。随着黄金航道的发展，高大坝密度的航道中船闸对河流生态的调节作用更为显著。
- 4)本文基于全球 34 条黄金航道、全球大坝数据和生态指标数据，从生态角度研究运行船闸对通航河流的影响，仅局限于对全球河流的宏观分析，后期需要进一步研究运行船闸在航道不同发

展阶段对生态的影响，并且重点关注河流在生态表现方面受船闸调节作用的大坝密度临界点。

参考文献：

[1] 刘昌明, 李宗礼, 王中根, 等. 河湖水系连通的关键科学问题与研究方向[J]. 地理学报, 2021, 76(3): 505-512.

[2] 李宗礼, 刘昌明, 郝秀平, 等. 河湖水系连通理论基础与优先领域[J]. 地理学报, 2021, 76(3): 513-524.

[3] GRILL G, LEHNER B, THIEME M, et al. Mapping the world's free-flowing rivers[J]. Nature, 2019, 569: 215-221.

[4] MESSENGER M L, LEHRER B, COCKBURN C, et al. Global prevalence of non-perennial rivers and streams[J]. Nature, 2021, 594: 391-397.

[5] 方佳佳, 王烜, 孙涛, 等. 河流连通性及其对生态水文过程影响研究进展[J]. 水资源与水工程学报, 2018, 29(2): 19-26.

[6] VOROSMARTY C J, MCLINTYRE P B, GESSNER M O, et al. Global threats to human water security and river biodiversity[J]. Nature, 2010, 467: 555-561.

[7] ARBOLEYA E, Fernández S, CLUSA L, et al. River connectivity is crucial for safeguarding biodiversity but may be socially overlooked. insights from Spanish University Students[J]. Frontiers in environmental science, 2021(9): 643820.

[8] 王承恩, 杨桥培, 李英文. 船闸兼做过鱼设施的研究进展及应用[J]. 四川水力发电, 2015, 34(4): 78-80, 84.

[9] 向经文, 王从锋, 刘德富, 等. 葛洲坝船闸过鱼时空特性研究[J]. 长江流域资源与环境, 2015, 24(3): 455-463.

[10] 姜伟, 唐锡良, 高勇. 三峡及葛洲坝船闸对鱼类的上下行交流作用研究[C]//中国海洋湖沼学会, 中国动物学会. 中国海洋湖沼学会、中国动物学会鱼类学分会 2012 年学术研讨会论文集. 兰州: [出版社不详], 2012: 181-182.

[11] 熊锋, 王从锋, 刘德富, 等. 葛洲坝 1 号船闸启闭闸门对近闸区域鱼类活动规律的影响[J]. 水生态学杂志, 2014, 35(5): 8-14.

[12] 朱海峰, 刘流, 路波, 等. 鱼类下行过坝相关工程措施综述[J]. 长江科学院院报, 2015, 32(10): 33-37.

[13] WANG Y G, ZHANG W S, ZHAO Y X, et al. Modelling water quality and quantity with the influence of inter-basin water diversion projects and cascade reservoirs in the

Middle-lower Hanjiang River[J]. Journal of hydrology, 2016, 541: 1348-1362.

[14] WANG Y C, CHEN X B, BORTHWICK A G L, et al. Sustainability of global Golden Inland Waterways[J]. Nature communications, 2020, 11(1): 1-13.

[15] LUKASZYK S. A new concept of probability metric and its applications in approximation of scattered data sets[J]. Computational mechanics, 2004, 33(4): 299-304.

[16] CAMBRIDGE U C, COHEN P C. Applied multiple regression/correlation analysis for the behavioral sciences[J]. Journal of the royal statistical society series D (The Statistician), 2003, 52(4): 691.

[17] HERVÉ A, WILLIAMS L. Principal component analysis[J]. Wiley interdisciplinary reviews. Computational statistics, 2010, 2(4): 433-459.

[18] SU X L, ZENG B, HUANG W J, et al. Effects of the Three Gorges Dam on preupland and preriparian drawdown zones vegetation in the upper watershed of the Yangtze River, P.R. China[J]. Ecological engineering, 2012, 44: 123-127.

[19] WU H P, CHEN J, XU J J, et al. Effects of dam construction on biodiversity: A review[J]. Journal of cleaner production, 2019, 221: 480-489.

[20] VAN LOOY K, TORMOS T, SOUCHON Y. Disentangling dam impacts in river networks[J]. Ecological indicators, 2014, 37: 10-20.

[21] LIN Q C. Influence of dams on river ecosystem and its countermeasures[J]. Journal of water resource and protection, 2011, 3(1): 60-66.

[22] ARGENT D G, KIMMEL W G. Influence of navigational lock and dam structures on adjacent fish communities in a major river system[J]. River research and applications, 2011, 27(10): 1325-1333.

[23] WALKER J R, HASSALL C. The effects of water chemistry and lock-mediated connectivity on macroinvertebrate diversity and community structure in a canal in northern England[J]. Urban ecosystems, 2021, 24(3): 491-500.

[24] LORKE A, MCGINNIS F D, MAECK A, et al. Effect of ship locking on sediment oxygen uptake in impounded rivers[J]. Water resources research, 2012, 48(12): W12514.1-W12514.7.

(本文编辑 王传瑜)