

W型浅坝群对水流结构及典型鱼类聚集行为的影响

杨瑾^{1,2}, 唐玮^{3,4}, 蒋厅¹, 王丽^{1,2}, 陈俊文¹, 李文杰^{1,2}

(1.重庆交通大学 河海学院, 重庆 400074; 2.国家内河航道整治工程技术研究中心, 重庆 400074;
3.中交水运规划设计院有限公司, 北京 100007; 4.中交集团内河水运建设技术研发中心, 北京 100007)

摘要: W型潜坝作为一种新型的堰坝结构, 不仅具有消能、护岸、分流和改善通航条件等功能, 而且具有显著的生态功能。选取鲫鱼幼鱼为目标鱼类, 研究不同粒径组成的W型潜坝的河流流速分布及对目标鱼类聚集的影响, 探明W型潜坝的生境改良效果, 为裁弯河段生态涵养区建设提供依据。研究结果表明不同粒径的W型潜坝作用下, [10,20]mm较大粒径组成的W型潜坝透水性更好, 流速梯度小于小粒径组, 流态多样性高。在流量0.09 m³/s条件下, [10,20]mm粒径组成的W型潜坝鱼类聚集区域停留最多达到85次; [10,20]mm较大粒径组成的W型潜坝生境多样性高, 可以为试验鱼提供更好的栖息和庇护场所。因此, 在人工运河修建中裁弯河段生态涵养区建议选透水效果较好的大粒径潜坝方案。流态多样性指数与鱼类平均聚集度存在线性关系, 可作为评价栖息地质量的依据, 研究成果为河流生境异质性研究和生态优化设计提供理论支撑。

关键词: W型潜坝; 水流结构; 鱼类聚集行为; 流态多样性指数; 生境多样性

中图分类号: S931.1; TV64 文献标志码: A 文章编号: 1001-5485(2026)02-0009-09

Influence of W-shaped Submerged Dam Groups on Flow Structure and Aggregation Behavior of Typical Fish Species

YANG Jin^{1,2}, TANG Wei^{3,4}, JIANG Ting¹, WANG Li^{1,2}, CHEN Jun-wen¹, LI Wen-jie^{1,2}

(1.College of River and Ocean Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;
2.National Engineering Research Center of Inland Waterway Regulation, Chongqing 400074, China;
3.China Transportation Planning and Design Institute Co., Ltd., Beijing 100007, China; 4.CCCC Research and Development Center on Inland Navigation Construction Technology, Beijing 100007, China)

Abstract: [Objective] Submerged dams, as an important component of waterway regulation projects, can prevent from river and coastal erosion and also alter river flow patterns and improve river habitat environments. This study selects juvenile crucian carp as the target species to investigate the effects of W-shaped submerged dams with different particle size compositions on flow velocity distribution and the aggregation of target fish. It aims to clarify the habitat improvement effectiveness of W-shaped submerged dams and provide a theoretical basis for the construction of ecological conservation zones in cut-off river sections. [Methods] Crucian carp, a dominant fish species in the Pinglu Canal, were selected as the experimental species. Experiments on the influence of W-shaped submerged dam groups on flow structure and typical fish aggregation behavior were conducted in an annular flume. The W-shaped submerged dams were set with three particle size compositions ([5,10] mm, [5,20] mm, [10,20] mm), and four flow rate conditions (0.03, 0.045, 0.06, 0.09 m³/s) were set up. Under each test condition, 30 juvenile experimental crucian carp were placed, and the entire experimental process was recorded using a Nikon D7500 camera. Tracker software was used to collect and record the positions, frequencies, and total time where the experimental fish stayed for more than 1 minute. The average fish aggregation rate was used to evaluate the attraction effect of the W-shaped submerged dams on fish, and the flow pattern diversity index was used to quantify changes in flow

收稿日期: 2024-12-19; 修回日期: 2025-04-30; 接受日期: 2025-05-06

基金项目: 国家重点研发计划项目(2023YFC3208801); 重庆交通大学市级研究生导师团队建设项目(JDDSTD2022001)

作者简介: 杨瑾(1994-), 女, 重庆人, 博士研究生, 研究方向为水沙动力学与航道整治。E-mail: 625442154@qq.com

通信作者: 王丽(1986-), 女, 山东菏泽人, 副教授, 博士, 博士生导师, 研究方向为生态航道。E-mail: syauwangli@126.com

patterns. [**Results**] Under the action of W-shaped submerged dams of the same particle size, as the flow rate increased from $0.03 \text{ m}^3/\text{s}$ to $0.09 \text{ m}^3/\text{s}$, the area and flow velocity of the backwater zone upstream of the weir in the study area continuously increased, while the area of the triangular recirculation zone formed downstream of the weir gradually decreased. Under the action of W-shaped submerged dams of different particle sizes, those composed of larger particle sizes (10–20 mm) exhibited better permeability, smaller velocity gradients compared to smaller particle size groups, and higher flow pattern diversity. Analysis of the influence of W-shaped submerged dam groups on the aggregation behavior of experimental fish showed that at a flow rate of $0.09 \text{ m}^3/\text{s}$, the W-shaped submerged dams composed of 10–20 mm particle sizes had the highest number of stays in fish aggregation areas, reaching 85 times. These dams composed of larger particle sizes (10–20 mm) had high habitat diversity, providing better habitat and shelter for experimental fish. As the flow pattern diversity index increased, the average fish aggregation rate also showed an increasing trend. The river flow pattern diversity index and the average fish aggregation rate exhibited a linear relationship. [**Conclusion**] W-shaped submerged dams composed of larger particle sizes have high habitat diversity and can provide better habitat and shelter for experimental fish. In the construction of ecological conservation zones in cut-off river sections of artificial canals, it is recommended to select large-particle-size submerged dam schemes with better permeability effects. A good correlation is observed between the average fish aggregation degree and the flow pattern diversity index, enabling quantitative assessment of habitat diversity and providing theoretical support for research on river habitat heterogeneity and ecological optimization design. In the future, the long-term effects of different submerged dam design parameters on the ecosystems of target river sections can be further explored, and more influencing factors can be incorporated to investigate the ecological development of canals.

Key words: W-shaped submerged dam; flow structure; fish aggregation behavior; flow diversity index; habitat diversity

0 引 言

裁弯取直是运河建设中常见的航道整治手段,使得上游洪水水位得以有效降低,比降加大,提高河流输沙能力,避免或者减轻河岸崩塌^[1-2],改善通航条件^[3]。但是裁弯取直工程对河道生态系统的影响不容忽视,裁弯后形成的牛轭湖,减弱了河道内的物质交换能力、河流自净能力,富营养化风险增加。顺直河道激增的流速使得河段内水生生物的适宜栖息地面积和种群数量急剧减少^[4-6]。在此背景下,利用裁弯河段作为运河工程建设的生态涵养区,补偿航道建设对生态环境的不利影响,保证整个河段的生态平衡与稳定,是近年来航道建设中新兴的生态保护措施。联合运用多种生境改良技术,保障和恢复运河裁弯河段的生态环境是生态涵养区建设的关键。潜坝作为一种常见的河道内构筑物,广泛应用于生境退化后的河流栖息地修复,也常用于生态涵养区的建设^[7]。

潜坝作为航道整治工程中的重要组成部分,不仅可以防止河流和海岸侵蚀等,还可以显著改变河流流动形态,改善河流栖息环境^[8-11]。Poulet^[12]研究了潜坝对鱼类群落的影响,结果表明潜坝对河道栖息地进行一定修复,为鱼类创造有利的生存环境。

Lechner 等^[13]通过研究丁坝对大型河流中仔鱼期的鱼类散布模式的影响,结果表明丁坝形状对于鱼类生存有重要影响。张新华等^[14]研究了潜坝布置形式对中华鲟栖息地的影响,发现布设潜坝后底部流速变化剧烈,坝头附近涡量增大。根据坝身是否透水,潜坝可分为透水潜坝和不透水潜坝。相比于不透水潜坝,透水潜坝既可起到控制和引导水流的作用,又可让一部分水流低速渗过丁坝流向坝田,达到降速、缓流、落淤的效果^[15]。Patel 等^[8]研究表明透水潜坝能起到保护坝头不受洪水期间剧烈紊流的影响,减小丁坝坝后回流区的作用。Huang 等^[16]利用水槽试验研究了不同类型的直线型潜坝和 W 型潜坝对水流多样性与鱼类聚集效应的影响,发现 W 型潜坝的鱼类聚集效应大于直线型潜坝。陆永军等^[17]基于 W 型潜坝的生态机制,提出了 W 型透水性潜坝能为鱼类和其他生物提供栖息地和产卵地,降低近岸的流速,提高近护岸设计的可靠性。

由上述研究可以看出,潜坝布置形式和结构有利于鱼类生境,而 W 型潜坝作为一种新型的潜坝结构,具有显著的生态优势,其独特的 W 型设计能够有效地调整水流速度和水深,为鱼类等水生生物提供更加适宜的生存环境。然而 W 型潜坝布置形式和坝体颗粒组成对水流流态及鱼类聚集效果的影响

有待进一步研究,以便有效指导人工运河修建中裁弯河段生态涵养区建设。本文选取鲫鱼幼鱼为目标鱼类,研究不同粒径组成的 W 型潜坝对流速分布及目标鱼类聚集的影响,探明 W 型潜坝的生境改良效果,为裁弯河段生态涵养区建设提供理论依据。

1 材料与方 法

1.1 试验装置与试验对象

试验在重庆交通大学航道厅的环形水槽中进行,为了更好地拍摄和记录试验鱼的行为,水槽的三面由透明钢化玻璃构成。水槽外观是 $9\text{ m} \times 3\text{ m} \times 0.7\text{ m}$ (长 \times 宽 \times 高)的长方体,水槽内壁和外壁的空间形成环形水道,宽 1 m 。因此,试验段取外侧中部长 1.8 m 直径,宽 1 m ,水深 0.3 m 的环形水槽。为了确保鱼类始终在试验区域内,在试验段的前后都安装了拦网。试验用 4 个直径为 13.33 cm 、电机功率 0.75 kW 、流量 $0.017\text{ m}^3/\text{s}$ 的卧式轴流泵来调节环形水道内流速。其中流量测量采用电磁流量计,流速测量使用厦门博意达科技有限公司生产的 LGY-II 型便携式流速测量仪。本次试验采用了尼康 D7500 相机来记录和保存试验过程,摄像机固定在水槽的正上方,采用高清红外外光多功能广角摄像头,试验布置如图 1 所示。

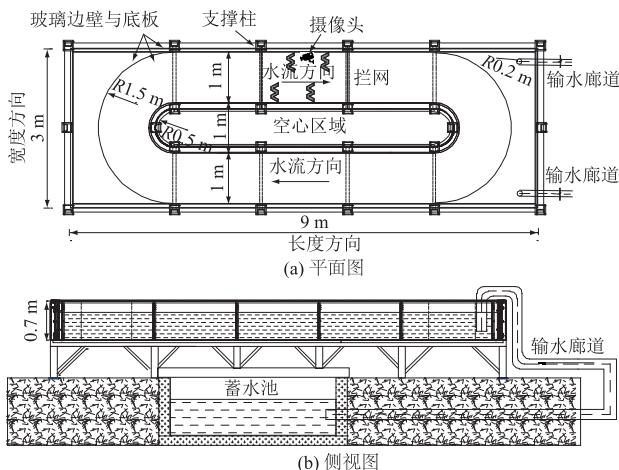


图 1 环形水槽试验装置

Fig.1 Annular flume test device

W 型潜坝沿水流方向呈 W 型,从坝根到坝头由 4 条直线潜坝组成,平铺底部每条堤防的轴线长度为 20 cm ,每条堤防宽度为 12 cm ,堆积表面每条堤防的轴线长度为 15 cm ,每条堤防宽度为 9 cm ,每条潜坝堆积高度为 5 cm 。每组试验在环形水槽中铺设了 4 个 W 型潜坝,计算得出总共所需碎石体积大约 $80\,000\text{ cm}^3$ 。环形水槽 W 型潜坝构造和布置情况如图 2 所示。

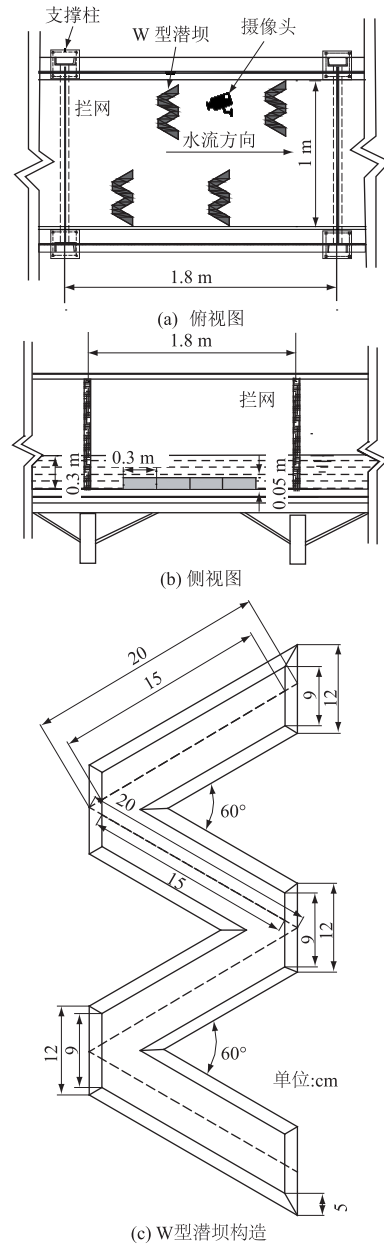


图 2 环形水槽中 W 型潜坝构造和布置

Fig.2 Structure and layout of W-shaped submerged dam in annular flume

平陆运河的优势种鱼类是鲫鱼和鲤鱼^[18],因此试验用鱼为人工繁养的鲫鱼幼鱼,选取体长 $6\sim 10\text{ cm}$ 的 400 尾正常鱼苗^[19]。在试验开始前鱼苗被放置在专门过渡水池中暂养一周,暂养期间水深保持 0.5 m ,水温 $14\sim 20\text{ }^\circ\text{C}$,溶氧量 $10\sim 14\text{ mg/L}$,pH 值为 $7.1\sim 7.3$,每天给鱼苗喂食 1 次。为了确保试验鱼在试验期间保持良好的生理状态和对水流的敏感性,试验前一日停止投喂饵料。试验结束后将试验用鱼放入另一暂养池,试验鱼在同一次试验中不重复使用。

1.2 试验设置

试验 W 型潜坝设置 3 组粒径组成,流量条件设

置为 4 种工况,研究不同水流条件下不同粒径组成的 W 型潜坝流态分布及鱼类聚集行为(表 1)。在每组试验条件下,将水体分为 4 层,分别为距离水槽底部 5、10、20、30 cm 水深,测量方式为测杆定位。在 5 cm 层水体平面中,每层隔 5 cm 长、5 cm 宽进行一次流速测量,流速测量点一共 720 个;在 10、20、30 cm 三层水体平面中,每隔 30 cm 长、10 cm 宽进行 1 次流速测量,流速测量点一共 280 个。每个点测量 3 次,每次时长 10 s,最终取 3 次流速平均值。再将导出的流速数据采用 Python 处理,最终形成每个工况 4 个平面的流速分布云图。

表 1 鱼类聚集试验工况

Table 1 Test conditions for fish aggregation

护底类型	流量/(m ³ ·s ⁻¹)	平均流速/(m·s ⁻¹)
[5,10]mm 碎石组成的 W 型潜坝	0.03、0.045、0.06、0.09	0.15、0.2、0.26、0.34
[5,20]mm 碎石组成的 W 型潜坝	0.03、0.045、0.06、0.09	0.15、0.2、0.26、0.34
[10,20]mm 碎石组成的 W 型潜坝	0.03、0.045、0.06、0.09	0.15、0.2、0.26、0.34

每次试验在水位和流速调整到试验条件后,于水槽试验段末端放置 30 条试验鱼,采用高精度摄像头记录试验鱼游动轨迹,记录时间为 30 min^[20],每项试验重复进行 3 组。通过 Tracker 软件的手动追踪模式对 30 条试验鱼在水槽中的相对位置进行标记,输出试验鱼每个时刻的相对坐标到绘图软件 Origin 中绘出边际直方图。通过 Tracker 软件处理视频,将一条试验鱼在某个位置徘徊停留时间>1 min 定义为偏好“栖息”,用 excel 记录每次“栖息”时间和总时间^[20-21]。将试验段区域分为 30 个鱼类分布斑块,绘出鱼类分布热力图。鱼类分布斑块划分如图 3 所示。

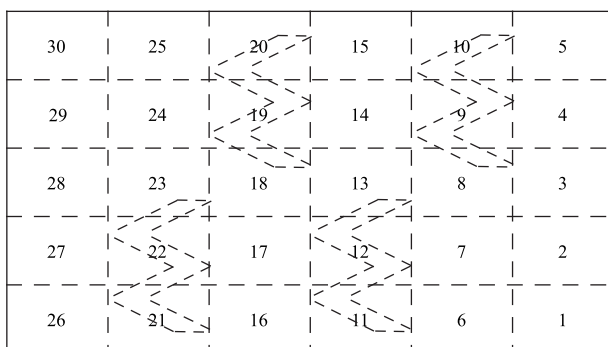


图 3 鱼类分布斑块划分

Fig.3 Zoning of fish distribution patches

1.3 数据分析

W 型潜坝的构建改变了局部水流分布和地形变化,鱼类聚集行为受到了影响^[21]。鱼类聚集行为通

过鱼类分布热力图表示,为了消除试验中误差影响,采用鱼类平均聚集率(Average Aggregation Rate, AAR)来表示 W 型潜坝对鱼类的吸引效果。计算式为

$$AAR = \frac{\sum_{j=1}^m M_j}{mM} \times 100\% \quad (1)$$

式中: M_j 为第 j 次观察时 W 型潜坝周围 5 cm 内区域聚集鱼数量; M 为每次试验释放的总鱼数量; m 为观测次数。

在流态多样性指数中引入 Shannon 多样性指数。通过类似的计算方法,来计算流态多样性指数 H_v , 计算式为

$$H_v = - \sum_{i=1}^n P_{vi} \ln(P_{vi}) \quad (2)$$

式中: H_v 为流态多样性指数; i 为流速斑块类型, $i=1, 2, \dots, 5$; n 为流速的斑块类型数目; P_{vi} 为第 i 种流速斑块面积在计算区域总面积的占比。

选取 8 cm 鲫鱼的感应流速和临界游速来进行航道多样性的流速斑块的划分。8 cm 鲫鱼的感应流速是 0.12 m/s^[22],而临界游速则为 0.56~0.62 m/s^[23]。选取感应流速的一半为间隔,将流速划分为 5 个斑块类型,如表 2 所示。

表 2 流速斑块分类

Table 2 Classification of flow velocity patches

流速/(m·s ⁻¹)	斑块类型	流速/(m·s ⁻¹)	斑块类型
[0.00,0.06)	A1	[0.18,0.24)	A4
[0.06,0.12)	A2	[0.24,0.30]	A5
[0.12,0.18)	A3		

2 结果

2.1 W 型潜坝群流速分布特征及流态多样性

本研究试验鱼为底层鱼类,多沿水槽底部游动,因此选择水槽底部流场进行分析。在同一粒径的 W 型潜坝作用下,随着流量由 0.03 m³/s 增加至 0.09 m³/s,研究区域堰前壅水区的面积和流速不断增大,在堰后形成的三角形回流区的面积逐渐减少(图 4)。[5,10]mm 粒径组工况下,流量 0.03 m³/s 的流速分布差异较小,尤其内侧两个潜坝前后流速均在 0.04 m/s,流速斑块类型均为 A1,潜坝前后未形成多样流态(图 4(a₁));随着流量增加至 0.09 m³/s 时,流态多样性增加,水槽外侧 W 型潜坝坝前流速最大可达 0.22 m/s,而 W 型潜坝坝后缓流区流速为 0.1 m/s,水槽内侧 W 型潜坝坝前坝后流速差异>0.06 m/s,流速斑块存在不同(图 4(d₁))。在同一流量下,不同粒径的 W

型潜坝作用下, [10,20] mm 较大粒径组成的 W 型堰透水性更好, 堰体附近的流速变化较小, 对水流的扰动减小, 流速梯度小于小粒径组 (图 4(a₃)—图 4(d₃))。在流量 0.03 m³/s 条件下, W 型潜坝坝后缓流区流速均 < 0.12 m/s, 流速板块主要为 A1 与 A2, 3 组粒径差异不大。0.06 m³/s 流量下 [5,10] mm 粒径 W 型潜坝坝后回流区最大 (图 4(b₁)), 潜坝坝前坝后流速差异 > 0.06 m/s 而 [10,20] mm 粒径 W 型潜坝坝后回流区最小 (图 4(b₃))。

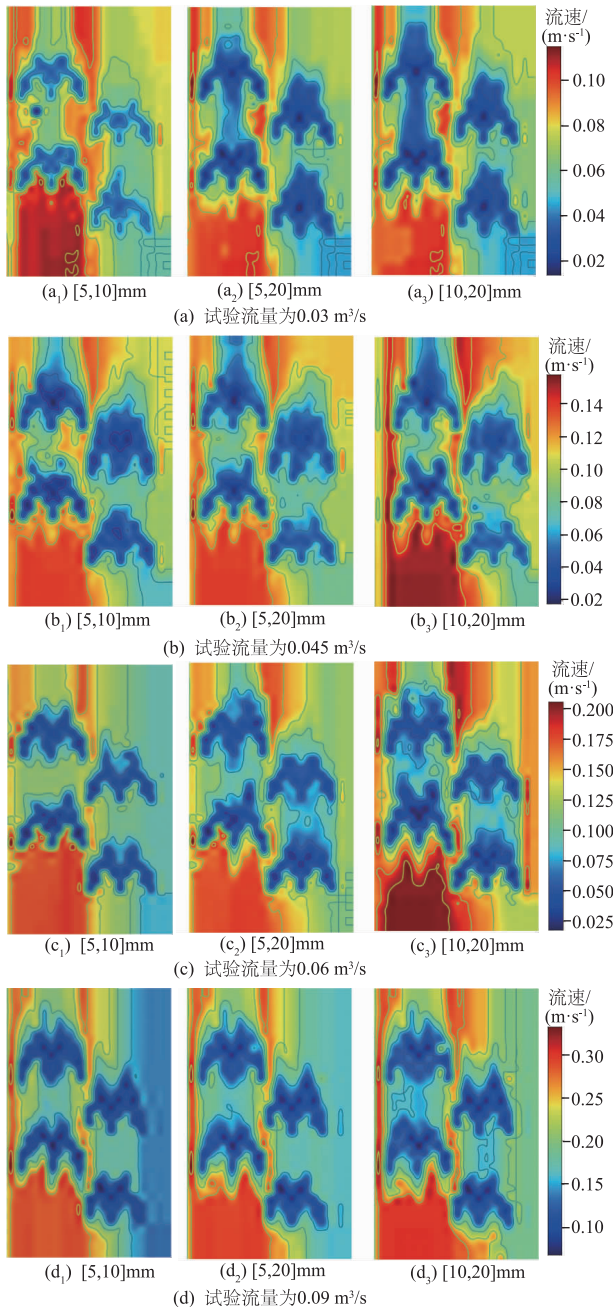


图 4 试验水槽距槽底 5 cm 处的流速分布

Fig.4 Contours of velocity distribution at 5 cm above bottom of experimental flume

从各组工况下流速斑块组成可知, 随流量不断增大, 流速分组增多, 流态多样性增加。根据各级

流速面积计算流态多样性指数, 流态多样性指数与流量呈现幂函数的关系。相同粒径下, 流态多样性指数与流量呈正相关 (图 5)。在同一流量下, [10,20] mm 粒径组成的 W 型潜坝流态多样性稍高于 [5,10] mm 粒径组成的 W 型潜坝和 [5,20] mm 粒径组成的 W 型潜坝。流量 0.09 m³/s 条件下, [10,20] mm 粒径组成的 W 型潜坝流态多样性指数最高 1.84, 而 [5,10] mm 粒径组成的 W 型潜坝流态多样性指数为 1.75。

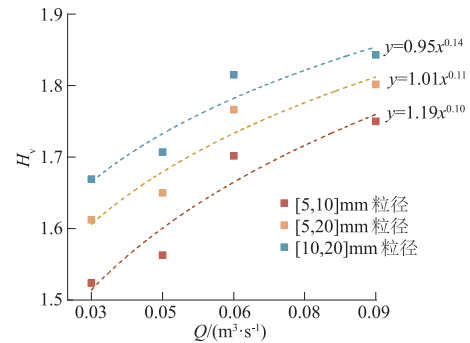


图 5 流态多样性指数与流量的关系

Fig.5 Relationship between flow pattern diversity index and flow rate

2.2 W 型潜坝群对试验鱼聚集行为的影响分析

随着流量的增加, 在 4 个 W 型潜坝背水区聚集的试验鱼不断增加, W 型潜坝背水区由于试验鱼驻留时间及频率不断增加形成试验鱼聚集热点区域 (图 6)。由图 6 可以看出, 在同组粒径不同流量下, 在流量较小的情况下鱼类分布较为均匀。在流量 0.06 m³/s 条件下, [10,20] mm 粒径组成的 W 型潜坝鱼类聚集区域停留次数最多达到 78 次。在流量 0.09 m³/s 条件下, [10,20] mm 粒径组成的 W 型潜坝鱼类聚集区域停留次数最多达到 85 次。在同一流量不同粒径下, [10,20] mm 粒径组成的 W 型潜坝附近会试验鱼聚集的效果较好 (图 6(a₃)—图 6(d₃))。总体来说, 在 W 型潜坝的作用下, 改变了局部的水流流速发生改变, 在三角形区域形成的较小流速环流区为鱼类提供了适宜栖息地。

2.3 W 型潜坝群影响下试验鱼行为响应规律

[5,10] mm 粒径组成的 W 型潜坝流态多样性指数随着流量由 1.52 增加至 1.75, 鱼类平均聚集率由 14.21% 增加至 21.07%。[5,20] mm 粒径组成的 W 型潜坝流态多样性指数随着流量增加由 1.61 增加至 1.80, 鱼类平均聚集率由 16.7% 增加至 22.60%。[10,20] mm 粒径组成的 W 型潜坝流态多样性指数 1.67~1.84, 鱼类平均聚集率为 18.42%~23.71%。随着流态多样性指数的增大, 鱼类平均聚集率也呈现出增大趋势。河流流态多样性指数与鱼类平均

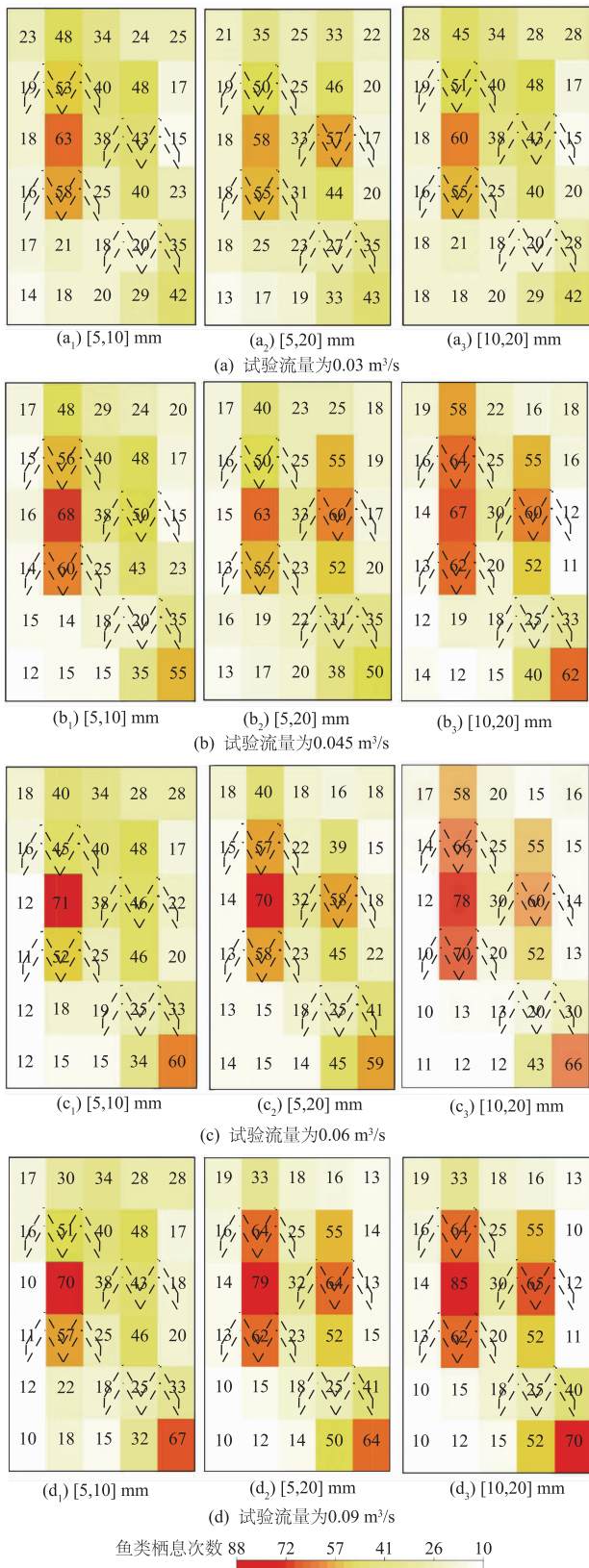


图6 各工况下的鱼类热力分布

Fig.6 Thermal distribution maps of fish under different conditions

聚集率呈线性关系(图7),表明河流流态多样性指数与鱼类平均聚集率之间存在直接的、可预测的关联。

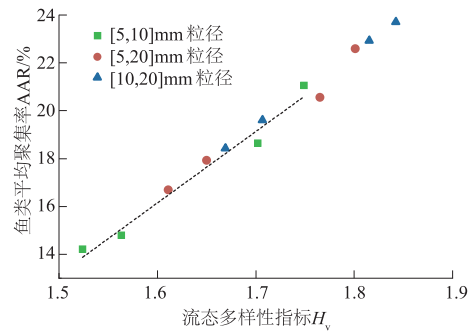


图7 河流流态多样性指数和鱼类平均聚集率的关系

Fig.7 Relationship between river flow pattern diversity index and average fish aggregation degree

3 讨论

本文通过分析3种粒径组成的W型潜坝对鱼类聚集行为的影响,研究人工运河修建中裁弯河段生态涵养区建设优化方案。在水动力特性方面,人工运河中的裁弯河段改变河流的地形和流态,从而也会影响鱼类的栖息地。潜坝的布置方式改变了流场分布^[24-26],从流速分布云图(图4)发现当水流过W型潜坝时,由于坝体的阻水作用,坝体面向水侧的流速逐渐减小。水流上游受到限制,流向W型潜坝边角两侧,在坝后形成多个高流速旋涡。由于W型潜坝的斜堤倾斜,受到两条堤头形成约60°夹角的混合效应影响,在堤下侧形成三角缓流区域。本文通过试验发现,[10,20]mm较大粒径组成的W型潜坝透水性更好,流速梯度小于小粒径组,流态多样性高。在不同流量条件下,粒径较大的W型潜坝流态分布较好。从潜坝局部水流运动特性可以看出,[10,20]mm较大粒径组成的W型潜坝方案较其他两组粒径更好。

从鱼类生境角度看,鱼类对水流特性的响应是很敏感的^[27-28],粒径较大的透水W型潜坝具有较小的水力梯度,水流扰动较小,生境多样性高,可以为试验鱼提供更好的栖息和庇护场所^[29]。鱼类在流速较低的区域出现的次数更多,这是因为缓流区提供了相对稳定和安全的环境,有助于鱼类节省能量^[30]。随着流量的增大,流速梯度变化更加明显,鱼类从前期的分布散漫到后期的抱团聚集,说明W型潜坝对鱼类群体的庇护效果更佳。鱼类的聚集行为与胡杰龙^[26]和李健超^[4]等学者的研究结果一致。因此,W型潜坝作为生态坝体改善了鱼类栖息地质量,这一发现与刘明洋等^[31]、李强等^[32]、Dongkyun等^[33]得到的“生态坝的存在有利于水生生物生境”研究结果相呼应。

从生境评价指标上,本研究采用 Shannon 指数的流态多样性作为衡量栖息地质量的指标,定量化评价河流的生境多样性变化。研究表明鱼类平均聚集度与流态多样性指数存在线性关系,表明流态多样性指数与鱼类偏好生境之间存在直接的、可预测的关联。流态多样性指数可以表征鱼类的偏好生境,可为河流生境异质性研究和生态优化设计提供理论支撑。这一发现与 Mathon 等^[34]、Oberdoff 等^[35]、Aleixo 等^[36]学者的研究结果相呼应,他们指出生境多样性对物种丰富度有较强的影响,生境多样性是衡量生境质量的重要指标。因此,在人工运河修建中裁弯河段生态涵养区建设中建议选透水效果较好的大粒径潜坝方案,潜坝建设参数优化可采取流态多样性指数作为评价栖息地质量的依据。

4 结 论

本文研究了 W 型潜坝群对运河裁弯河段的流态分布及鱼类聚集的影响,分析 W 型潜坝群鱼类栖息地质量改良效果,主要结论如下:

(1) 试验结果表明较大粒径组成的 W 型潜坝生境多样性高,可以为试验鱼提供更好的栖息和庇护场所,在人工运河修建中裁弯河段生态涵养区建设中建议选透水效果较好的大粒径潜坝方案。

(2) 鱼类平均聚集度与流态多样性指数存在较好的相关性,可以定量化评价生境多样性,为河流生境异质性研究和生态优化设计提供了理论支撑。

未来的研究将进一步探索不同潜坝设计参数对生态系统的长期影响,结合更多生态因子,优化生态涵养区建设方案,推动人工运河生态化发展。

参考文献(References):

- [1] 刘亚,姚仕明,郭小虎,等. 下荆江自然裁弯物理模型试验研究[J]. 长江科学院院报, 2025, 42(11): 9-15. (LIU Ya, YAO Shi-ming, GUO Xiao-hu, *et al.* Physical Model Study of Natural Meander Cutoff in the Lower Jingjiang River[J]. Journal of Changjiang River Scientific Research Institute, 2025, 42(11): 9-15. (in Chinese))
- [2] 陈天伟. 宁夏苦水河沟湾段裁弯治理及效果分析[J]. 人民黄河, 2019, 41(3): 65-68. (CHEN Tian-wei. Analysis of the Cut-off Management of Gouwan Section of Kushui River in Ningxia and Its Effect[J]. Yellow River, 2019, 41(3): 65-68. (in Chinese))
- [3] 罗亚伟,朱殿芳. 裁弯取直工程对河道防洪影响分析[J]. 水利建设与管理, 2011, 31(10): 74-79. (LUO Ya-wei, ZHU Dian-fang. Analysis of Influence of Bend-cutting and Straightening Project on River Flood Control[J]. Water Resources Development & Management, 2011, 31(10): 74-79. (in Chinese))
- [4] 李健超. 多布水电站坝下流场分析及鱼类洄游水力生境指标研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2022. (LI Jian-chao. Analysis of Dam Flow Field of Duobu Hydropower Station and Study on Hydraulic Habitat Index of Fish Migration[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2022. (in Chinese))
- [5] 刘鹏飞, 景丽, 任泷, 等. 固城湖鱼类群落结构现状及其与环境因子的关系[J]. 大连海洋大学学报, 2022, 37(5): 841-849. (LIU Peng-fei, JING Li, REN Long, *et al.* Current Fish Community Structure and Its Relationship with Environmental Factors in Gucheng Lake, Nanjing China[J]. Journal of Dalian Ocean University, 2022, 37(5): 841-849. (in Chinese))
- [6] 焦飞宇, 白玉川, 周潮洪. 裁弯取直工程对河流健康的影响研究[C]//2013 城市防洪国际论坛论文专集. 上海: 中国土木工程学会、中国水利学会、中国市政工程, 2013. (JIAO Fei-yu, BAI Yu-chuan, ZHOU Chao-hong. Influence of Chute Cutoff on River Health[C]//Proceedings of the 2013 International Symposium on Urban Flood Control. Shanghai: China Civil Engineering Society and Chinese Hydraulic Engineering Society, 2013. (in Chinese))
- [7] 孙羽, 张兵, 孙东坡, 等. 河道整治中的生态环境问题与生态协调的河道整治[J]. 水利水电技术, 2017, 48(5): 102-109. (SUN Yu, ZHANG Bing, SUN Dong-po, *et al.* Ecology Environment in River Harness and the River Harness Based on Ecology Coordinate[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2017, 48(5): 102-109. (in Chinese))
- [8] PATEL H K, ARORA S, LADE A D, *et al.* Flow Behaviour Concerning Bank Stability in the Presence of Spur Dike—a Review[J]. Water Supply, 2023, 23(1): 237-258.
- [9] 蔡露, 金瑶, 潘磊, 等. 过鱼设施设计中的鱼类行为研究与问题[J]. 生态学杂志, 2018, 37(11): 3458-3466. (CAI Lu, JIN Yao, PAN Lei, *et al.* Issues on Fish Behaviors in the Design of Fish Passage Facilities[J]. Chinese Journal of Ecology, 2018, 37(11): 3458-3466. (in Chinese))
- [10] 邬鑫. 三峡变动回水区典型河段鱼类栖息地景观格局研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2023. (WU Xin. Study on the Landscape Patterns of Fish Habitats in Typical River Sections in the Fluctuating Backwaters of Three Gorges Reservoir[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2023. (in Chinese))
- [11] 钱振家, 徐金铖, 余友斌, 等. 水流对鱼类游泳行为和生理代谢的影响的研究进展[J]. 中国农学通报, 2011, 27(10): 10-15. (QIAN Zhen-jia, XU Jin-chen, YU You-bin, *et al.* Research Progress on the Influence of Water Flow on Fish Swimming Behavior and Physiological Metabolism[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2011, 27(10): 10-15. (in Chinese))

- 2022, 38 (32): 133–138. (QIAN Zhen-jia, XU Jin-cheng, YU You-bin, *et al.* Effects of Water Flow on Fish Swimming Behavior and Physiological Metabolism; Research Progress [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2022, 38(32): 133–138. (in Chinese))
- [12] POULET N. Impact of Weirs on Fish Communities in a Piedmont Stream [J]. River Research and Applications, 2007, 23(9): 1038–1047.
- [13] LECHNER A, KECKEIS H, SCHLUDERMANN E, *et al.* Shoreline Configurations Affect Dispersal Patterns of Fish Larvae in a Large River [J]. ICES Journal of Marine Science, 2014, 71(4): 930–942.
- [14] 张新华, 邓 晴, 文 萌, 等. 弯曲分汊浅滩潜坝对洄游鱼类栖息地的影响研究 [J]. 工程科学与技术, 2020, 52(1): 18–28. (ZHANG Xin-hua, DENG Qing, WEN Meng, *et al.* Impact of Submerged Spur Dike on Migrating Fish Habitat in Bending Branched Shoal [J]. Advanced Engineering Sciences, 2020, 52(1): 18–28. (in Chinese))
- [15] IQBAL S, PASHA G A, GHANI U, *et al.* Flow Dynamics around Permeable Spur Dike in a Rectangular Channel [J]. Arabian Journal for Science and Engineering, 2021, 46(5): 4999–5011.
- [16] HUANG T, LU Y, LIU H. Effects of Spur Dikes on Water Flow Diversity and Fish Aggregation [J]. Water, 2019, 11(9): 1822.
- [17] 陆永军, 陆 彦, 王兆印, 等. 航道整治工程作用下的水沙过程及河流生态效应研究 [R]. 南京: 南京水利科学研究所, 2013. (LU Yong-jiu, LU Yan, WANG Zhao-yin, *et al.* Study on Process of Flow and Sediment and Ecological Effects on River with Waterway Regulation [R]. Nanjing: Nanjing Hydraulic Research Institute, 2013. (in Chinese))
- [18] 路 嘉, 唐 玮, 王 丽, 等. 平陆运河世纪工程鱼类资源现状及多样性研究 (英文) [J]. 水利水电技术 (中英文), 2025, 56(4): 131–144. (LU Jia, TANG Wei, WANG Li, *et al.* Current Status and Diversity of Fish Resources in the Pinglu Canal Century Project [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2025, 56(4): 131–144. (in Chinese))
- [19] 丁 宁, 王子聪, 黄明海, 等. 流道宽度及来流速度对鲫鱼运动模式的影响 [J]. 长江科学院院报, 2020, 37(3): 64–69. (DING Ning, WANG Zi-cong, HUANG Ming-hai, *et al.* Influences of Flow Path Width and Incoming Flow Velocity on Crucian's Motion Pattern [J]. Journal of Changjiang River Scientific Research Institute. 2020, 37(3): 64–69. (in Chinese))
- [20] 张金玉, 石小涛, 林晨宇, 等. 光环境对鲢幼鱼行为特性与上溯趋势的影响 [J]. 水产学报, 2025, 49(7): 1–16. (ZHANG Jin-yu, SHI Xiao-tao, LIN Chen-yu, *et al.* Effects of Light Environment on Behavioral Traits and Upstream Swimming Activeness of Juvenile Hypophthalmichthys Molitrix [J]. Journal of Fisheries of China, 2025, 49(7): 1–16. (in Chinese))
- [21] 梁 砚. 鱼类行为对流场的响应及其模拟研究 [D]. 武汉: 武汉大学, 2022. (LIANG Yan. Research on Response of Fish Behaviour to Flow Field and Fish Movement Modelling [D]. Wuhan: Wuhan University, 2022. (in Chinese))
- [22] 陈振武. 典型鱼类游泳特性试验研究 [D]. 郑州: 华北水利水电大学, 2021. (CHEN Zhen-wu. Experimental Study on Swimming Characteristics of Typical Fish [D]. Zhengzhou: North China University of Water Resources and Electric Power, 2021. (in Chinese))
- [23] 鲜雪梅, 曹振东, 付世建. 4 种幼鱼临界游泳速度和运动耐受时间的比较 [J]. 重庆师范大学学报 (自然科学版), 2010, 27(4): 16–20. (XIAN Xue-mei, CAO Zhen-dong, FU Shi-jian. The Comparison of Critical Swimming Speed and Endurance at High Speed of Four Species of Juvenile Fish [J]. Journal of Chongqing Normal University (Natural Science), 2010, 27(4): 16–20. (in Chinese))
- [24] 高雅楠. 潜坝群对河道行洪能力影响分析: 以大凌河西支生态工程为例 [D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2019. (GAO Ya-nan. Influence of Submerged Dike Group on Flood Discharge Capacity of River Channel: Case Study on Daling River West-branch Ecological Project [D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2019. (in Chinese))
- [25] 刘 明. 堆石体生态潜坝渗流特性试验研究 [D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2018. (LIU Ming. Experimental Study on Seepage Characteristics of Ecological Submerged Dam with Rockfill Body [D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2018. (in Chinese))
- [26] 胡杰龙. 新型透水丁坝水力特性及其对鱼类行为影响研究 [D]. 重庆: 重庆交通大学, 2021. (HU Jie-long. Hydraulic Characteristics of A New Permeable Spur Dike and Its Effect on Fish Behavior [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2021. (in Chinese))
- [27] 孙立元, 危起伟, 张 辉, 等. 基于水声学的长江上游向家坝至宜宾江段鱼类空间分布特征 [J]. 淡水渔业, 2014, 44(1): 53–58. (SUN Li-yuan, WEI Qi-wei, ZHANG Hui, *et al.* Surveys on Spatial Distribution of Fishes Based on Hydroacoustics from Xiangjiaba Dam to Yibin Reach of the Upper Yangtze River [J]. Freshwater Fisheries, 2014, 44(1): 53–58. (in Chinese))
- [28] AN R, LI J, LIANG R, *et al.* Three-dimensional Simulation and Experimental Study for Optimising a Vertical Slot Fishway [J]. Journal of Hydro-Environment Research, 2016, 12: 119–129.
- [29] 李 燕, 李 锋, 张 闯, 等. 长江上游保护区重庆段

- 鱼类重要栖息地水环境及鱼类分布特征研究[J]. 广西科学, 2024, 31(2): 295-301. (LI Yan, LI Feng, ZHANG Chuang, *et al.* Study on the Water Environment and Fish Distribution Characteristics of Fish Important Habitat in Chongqing Section of the Upper Reaches of Yangtze River Reserve [J]. Guangxi Sciences, 2024, 31(2): 295-301. (in Chinese))
- [30] 吴青怡, 曹振东, 付世建. 鳊鱼和宽鳍鱮幼鱼流速选择与运动能量代谢特征的关联[J]. 生态学报, 2016, 36(13): 4187-4194. (WU Qing-yi, CAO Zhen-dong, FU Shi-jian. Flow Velocity Selection and Its Relationship to Locomotive Energetic Metabolism in Chinese Bream (*Parabramis Pekinensis*) and Pale Chub (*Zacco Platypus*) [J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(13): 4187-4194. (in Chinese))
- [31] 刘明洋, 李 永, 王 锐, 等. 生态丁坝在齐口裂腹鱼产卵场修复中的应用[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2014, 46(3): 37-43. (LIU Ming-yang, LI Yong, WANG Rui, *et al.* Application of Ecological Spur Dike Repairing Schizothorax Prenanti Spawning Ground [J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2014, 46(3): 37-43. (in Chinese))
- [32] 李 强, 刘 锐, 李冰冻, 等. 航道整治丁坝对城区中小河流鱼类栖息地的影响研究[J]. 科学技术与工程, 2016, 16(19): 57-62. (LI Qiang, LIU Rui, LI Bingdong, *et al.* Effect of Spur Dikes for Waterway Regulation on Fish Habitat in the Small to Middle Scale Municipal Rivers [J]. Science Technology and Engineering, 2016, 16(19): 57-62. (in Chinese))
- [33] DONGKYUN I M, KANG H. Two-dimensional physical habitat modeling of effects of habitat structures on urban stream restoration [J]. Water Science and Engineering, 2011, 4(4): 386-395.
- [34] MATHON L, BALETAUD F, LEBOURGES-DHAUSSY A, *et al.* Three-dimensional Conservation Planning of Fish Biodiversity Metrics to Achieve the Deep-sea 30×30 Conservation Target [J]. Conservation Biology, 2025, 39(2): e14368.
- [35] OBERDORFF T, DIAS M S, JÉZÉQUEL C, *et al.* Unexpected Fish Diversity Gradients in the Amazon Basin [J]. Science Advances, 2019, 5(9): eaav8681.
- [36] ALEIXO M H F, POSSAMAI L C, CASTRO K S P, *et al.* Habitat Complexity versus Habitat Heterogeneity: Invertebrates Prefer Macrophyte Stands with Intermediate Biomass and High Functional Diversity [J]. Freshwater Biology, 2024, 69(9): 1278-1291.

(编辑:罗玉兰)

长江科学院青年职工获国际著名出版社“威立中国高贡献作者奖”

长江科学院作为第一单位发表在威立出版集团(Wiley)期刊《Earth Surface Processes and Landforms》2025年第6期的学术论文“Lagrangian Simulation of Bedload-sized Particle Trajectories at a 90° River Confluence”受到业内广泛关注,第一作者倪玉芳博士被授予“威立中国高贡献作者奖”。

该论文主要依托国家自然科学基金青年基金项目“液坝作用下复式河槽局部三维水沙运动规律研究”开展,主要内容是开发三维水沙耦合求解器,首次通过数值模拟手段揭示河流90°垂直交汇口颗粒输移通道的形成机理与主要影响因素。该三维水沙耦合求解器属于水力学专业模型系列,通过在OpenFOAM平台上二次开发得到,基于欧拉-拉格朗日法,并充分考虑了水流与颗粒、颗粒与颗粒之间的相互作用,主要应用于山区河流颗粒输移、冰川融水诱发颗粒输移规律研究,可为山区河流与冰川下游防灾减灾工作提供技术支持。

Wiley出版社1807年创建于美国,是一家拥有超过200年历史的全球知名出版机构,其出版期刊涵盖科学、技术、医学和人文社科等领域,旗下包含《Water Resources Research》《Geophysical Research Letters》等水利行业知名期刊。Wiley出版社在广受中国作者认可的期刊中,统计中国作者发表文章在3个自然月内的全文阅读下载量,从中选择下载量最高的数篇,经过严格评选后授予“威立中国高贡献作者奖”,感谢中国作者在推动科技进步方面所作出的巨大贡献。该奖项代表了中国科研院所与科研人员积极参与全球热点、前沿科技工作,共同推动学科发展与科技创新的贡献。

(摘自:长江水利科技网[2026-01-30])