

控制汉江丹江口至王甫洲区间伊乐藻的生态调度及其效果评估

辛小康^{1,2}, 熊斌³, 颜剑³, 李建¹, 田晓敏³

(1. 长江水资源保护科学研究所, 湖北 武汉 430051;
2. 长江水利委员会水旱灾害防御创新团队, 湖北 武汉 430010;
3. 湖北汉江王甫洲水力发电有限责任公司, 湖北 老河口 441800)

摘要:为科学有效控制汉江丹江口至王甫洲区间伊乐藻(*Elodea nuttallii*)过度生长繁殖, 研究生态调度的实施效果, 采用生物量调查法、分布面积统计法、数学模型模拟法等方法分析生态调度实施前后伊乐藻总生物量和分布面积的变化情况, 并探讨对丹江口水库下泄流量的需求。结果表明, 连续3年实施生态调度, 伊乐藻总生物量由2019年的4.8万t减少至2022年的40.11 t, 分布面积由11.60 km²减少至0.23 km², 减幅均达到了95%以上; 伊乐藻生物量占沉水植物总生物的比重从99.99%减少至17%, 生态调度效果较好; 春季生态调度应重点从增加流量极值比出发进行中度干扰, 夏秋季生态调度重点从满足0.14 m/s临界流速出发进行大流速冲刷。研究结果明确了王甫洲水库伊乐藻的生态调度需求, 为持续开展伊乐藻“灾害”防控提供了参考基础。

关键词:伊乐藻; 生态调度; 效果评估; 王甫洲水库

中图分类号:Q948 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-3075(2024)01-0152-08

生态系统结构稳定是生态系统持续发挥功能的基本前提(栾建国和陈文祥, 2004), 然而部分物种异常增殖, 打破生态平衡, 不仅危及水生态系统结构本身的安全, 而且对人类生产生活带来不利影响。近年来, 汉江王甫洲库区伊乐藻大量生长繁殖给生产、生态带来了严重影响。伊乐藻(*Elodea nuttallii*)隶属于水鳖科伊乐藻属, 是一种原产于美洲的多年生沉水草本植物, 雌雄异株, 既可有性繁殖, 也可营养繁殖; 能忍受一定程度低温, 长期高温条件下会死亡。伊乐藻最适合的光照强度为3 500~5 600 lx, 光合补偿点在400~500 lx(周晓红等, 2008), 一般可在3.5 m水深以下区域生长。当水温高于10℃时, 伊乐藻开始快速生长, 水温长期高于30℃时, 其冠层开始凋亡分解, 而当水温重新低于30℃后, 伊乐藻进行年内第2次萌发生长(Kunii, 1982; 霍大兵, 2008)。伊乐藻主要分布在低流速的区域(Mazej Grudnik & Germ, 2013), 在平均流速0.09 m/s的河流中为优势物种, 盖度达57.5%, 而在平均流速为0.14 m/s的河流仅占7%的盖度(Heidbüchel & Hussner, 2020)。伊乐藻茎秆较脆, 流速超过一定范围, 易形成断枝。伊乐藻常分布于中营

养或寡营养水体(靳萍等, 2013; Hoffmann et al, 2015), 是螃蟹、小龙虾和部分鱼类的主要食物(Pine & Anderson, 1991)。多年以来, 人们主要关注其如何在河湖水体中繁殖建群(霍大兵, 2008; 成小英和雍佳君, 2014), 对如何控制伊乐藻的研究并不多见。2014年以来, 汉江干流丹江口至王甫洲区间(王甫洲库区)持续出现伊乐藻大量生长繁殖, 导致航道阻塞, 影响水力发电设备正常运行, 阻碍洪水演进, 减小河道泄洪能力。在伊乐藻生长末期, 茎秆死亡后迅速分解, 成为内源污染, 对老河口水厂饮用水水源地水质造成影响(谢林仲和莫妙兴, 2012)。因此, 有必要对丹江口至王甫洲区间过度生长的伊乐藻群落进行适度控制。

相关文献对控制沉水植物过度生长进行了一些研究(张嘉琦等, 2013), 采用草鱼(*Ctenopharyngodon idellus*)、鳊(*Parabramis pekinensis*)等生物控藻(蔡树伯等, 2015; 王晓平等, 2016)虽然具有生态损伤小的优势, 但是鱼类增多后, 其排泄物会对水源地水质造成潜在风险。王甫洲库区伊乐藻量大面广, 机械打捞成本高, 在深水条件下实施难度大, 目前在研究区域被用作应急处置措施。作为老河口市的饮用水源地, 化学方法也不宜实施。生态调度方法具有影响范围广泛、作用效果直接、副作用小的特点, 对于相对敏感的丹江口至王甫洲江段而言较合适。

李建等(2023)总结了伊乐藻的生长特性, 利用2020年的水文、水生态调查数据, 结合中洲岛区域流速模拟初步分析了防控丹江口至王甫洲江段伊乐藻的生

收稿日期: 2023-11-11

基金项目: 国家重点研发计划课题(2021YFC3200304)。

作者简介: 辛小康, 1985年生, 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为流域水资源保护。E-mail: xin.xiaokang@163.com

态调度需求,为开展生态调度试验提供了基础。本文基于2020–2022年近3年的生态调度试验及2019–2022年4年现场生态调查结果,分析讨论了生态调度试验效果,进一步明确了控制研究区域内伊乐藻的生态调度需求,为持续开展伊乐藻“灾害”防控提供借鉴。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

研究区域为丹江口大坝至王甫洲大坝区间的汉江干流段,河长30 km,见图1。丹江口水库正常蓄水位170.0 m(黄海高程,下同),相应库容290.5亿m³,是一座以防洪、供水为主,结合发电、航运等综合利用的大型水利工程。王甫洲水利枢纽设计洪水位88.11 m,正常蓄水位86.23 m,调节库容0.28亿m³(王现正等,2020)。本河段属于顺直微弯河段,河道弯曲系数1.2,水深范围0~9.0 m,平均水深4.1 m,从上至下分布有羊皮滩、木排港、中洲岛、水岸新城凸岸等浅滩。

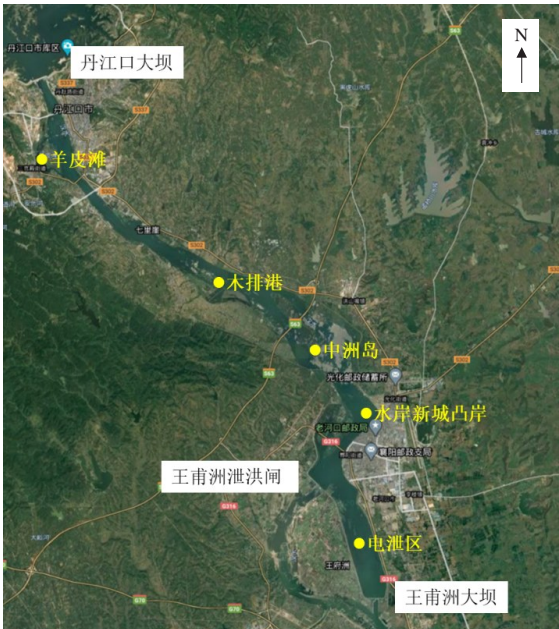


图1 研究范围示意
Fig.1 Map of the study area

1.2 研究方法

1.2.1 平面二维水动力数学模型 采用MIKE21水动力模型评估丹江口水库不同下泄流量(王甫洲水库不同入库流量)对研究河段流速的影响,MIKE21水动力模型控制方程为纳维–斯托克斯方程,并采用有限体积法求解计算得出流速场(DHI,2012)。

1.2.2 水生态调查与监测方法 分别于2019年8月,2020年6月、7月、8月、10月,2021年1月、2月、5月、7月、8月、11月,2022年2月、3月、5月、6月、8月、10月开

展现场调查共16次,调查了水深、流速、水温、气温、生物量和水草分布范围,调查时期重点选择春季萌发期及生态调度前、后时期。各指标监测采用规范推荐的分析方法,见表1。

表1 试验性生态调度监测分析方法
Tab.1 Monitoring and analysis of the aquatic ecological environment during ecological regulation of water discharge

项目	监测方法或使用仪器	依据
水深	便携式声学多普勒流速剖面仪	中华人民共和国水利部,2006
流速	便携式声学多普勒流速剖面仪	中华人民共和国水利部,2006
水温	HQ-30d多参数仪	国家环境保护总局,1991
气温	水银温度计	国家环境保护总局,1991
生物量	估算单位面积伊乐藻湿重	中华人民共和国水利部,2014
分布范围	无人机拍摄后结合地图软件分析	照片、影像

2 生态调度试验过程

2.1 2020年生态调度试验

2020年针对伊乐藻实施了第1次生态调度试验,调度时间从3月23日至4月30日。(1)调度流量过程:丹江口水库采用波动式下泄流量过程,分2次增加至1 100 m³/s,每次5 d,其余时间按照650 m³/s进行调度,整个调度历时39 d。丹江口水库下泄流量过程和王甫洲水库入库流量过程基本一致。(2)王甫洲水库水位调度过程:在水库正常蓄水位86.23 m基础上,采用波动式水位变化过程,分2次降低至85.8 m,每次5 d,其余时间按照正常蓄水位86.23 m进行调度。期间王甫洲入库流量及水位日均值过程见图2。

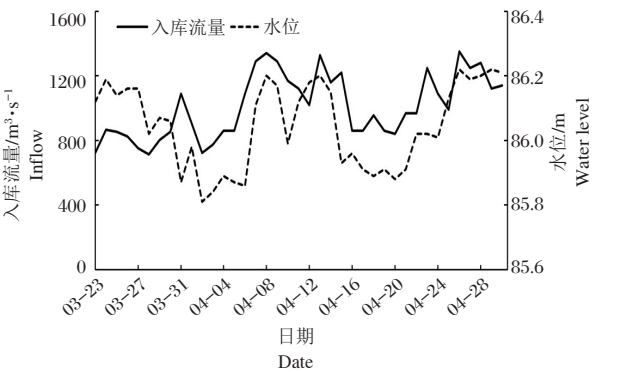


图2 2020年春季生态调度期间王甫洲入库流量和水位过程

Fig.2 Water inflow and water level of Wangfuzhou reservoir during spring ecological regulation in 2020

2.2 2021 年生态调度试验

2021 年针对研究区域的伊乐藻实施了 3 次生态调度试验,其中春季调度 2 次,夏季调度 1 次。2021 年 2 月 22–26 日通过丹江口电厂日间调峰方式实施了第 1 次生态调度,期间丹江口水库下泄流量在 591~1 280 m³/s 波动,平均下泄流量 941 m³/s; 2021 年 3 月 8–12 日实施了第 2 次生态调度,期间丹江口水库下泄流量在 464~1 240 m³/s 波动,平均下泄流量 873 m³/s; 2021 年 7 月 26–31 日,结合丹江口库区和上游地区降雨及汉江中下游防洪需求,丹江口水库加大下泄流量,首次开展了夏季生态调度试验,期间丹江口水库最大下泄流量达到 3 500 m³/s,调度持续 5 d,期间王甫洲入库流量及水位日均值过程见图 3。

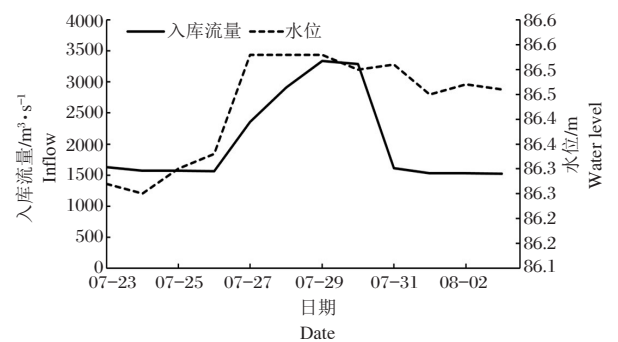


图 3 2021 年夏季生态调度试验期间王甫洲入库流量和水位过程

Fig.3 Water inflow and water level of Wangfuzhou reservoir during summer ecological regulation in 2021

2.3 2022 年生态调度试验

2022 年 2 月 1–15 日,实施了春季生态调度试验,期间王甫洲水库日均入库流量在 578~1 500 m³/s 之间波动,日均流量极值比(最大流量与最小流量比值)2.60,王甫洲坝前水位最高达到 86.20 m,最低 85.85 m。生态调度期间王甫洲水库入库流量及水位日均值变化见图 4。

3 结果与分析

3.1 生态调度控制伊乐藻的效果

3.1.1 伊乐藻总生物量变化 比较统计年内伊乐藻最大生物量以评估生态调度控藻工作实施效果。2019 年 8 月份研究区域伊乐藻最大总生物量达到了 4.8 万 t,在丹江口水库大流量下泄期间发生水草灾害,大量伊乐藻被冲刷至王甫洲水电站进水口,严重影响水电站正常运行。经过 2020 年春季生态

调度,2020 年 8 月份研究区域伊乐藻最大总生物量减少至 1.3 万 t,为 2019 年同期的 27%。2021 年春季持续开展生态调度,2021 年 8 月份研究江段伊乐藻最大总生物量进一步下降至 0.58 万 t,是 2020 年同期的 45%,2019 年同期的 12%。经过 2021 年夏秋季生态调度以及 2022 年春季生态调度作用,研究区域 2022 年伊乐藻最大总生物量仅为 40.11 t,远小于 2019–2021 年最大总生物量,见图 5。可以看出,生态调度控藻后,近 4 年伊乐藻最大总生物量呈逐年减小趋势,生态调度效果比较明显。

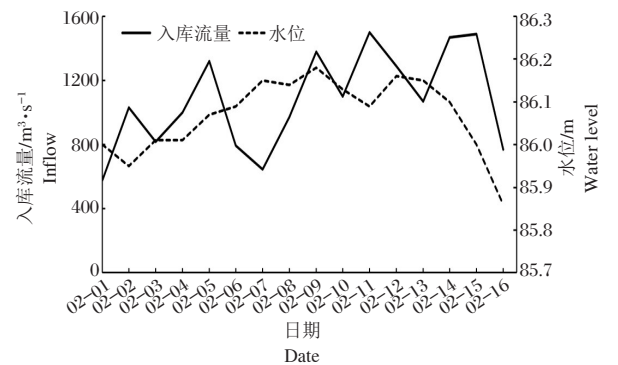


图 4 2022 年生态调度王甫洲入库流量和水位过程

Fig.4 Water inflow and water level of Wangfuzhou reservoir during spring ecological regulation in 2022

3.1.2 伊乐藻空间分布面积变化 为了进一步说明生态调度实施效果,根据现场调查结果统计了 2019–2022 年度伊乐藻生长高峰期的分布面积(图 5),2019 年 8 月份,伊乐藻分布区域遍布整个丹江口至王甫洲江段,总面积约为 11.60 km²,2020 年经过春季生态调度后,伊乐藻面积减少至 2.02 km²,2021 年经过生态调度之后,面积减少至 0.48 km²,2022 年伊乐藻分布总面积进一步减少至 0.23 km²,伊乐藻生长高峰季节的分布面积呈现出逐年减小趋势,进一步印证了生态调度效果明显的结论。

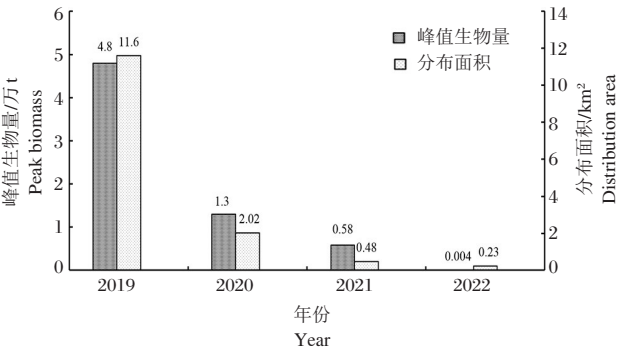


图 5 王甫洲库区伊乐藻峰值总生物量及分布面积年度变化
Fig.5 Annual changes of total biomass and area of *Elodea nuttallii* in Wangfuzhou reservoir

3.2 生态调度机理讨论

目前关于生态调度控制伊乐藻的机理研究并不多,经过现场持续监测,推测可能的原因主要有中度扰动机制和大流速冲刷机制。

3.2.1 中度扰动机制 中度干扰假说(intermediate disturbance hypothesis)是由美国生态学家 Connell 等于1978年提出的一个生态学假说,认为一个生态系统处在中等程度干扰时,其物种多样性最高(Connell, 1978; Ward & Stanford, 1983)。从生态调度过程中的流量变化来看,春季生态调度试验流量并不大,并未达到伊乐藻根茎断裂所需的冲刷流量1 500 m³/s以上(李建, 2023),但仍然起到抑制伊乐藻生长的效果,特别是生态调度实施后,王甫洲库区的伊乐藻春季萌发时间比未开展生态调度时期推迟1个月左右,其原因正是入库流量的波动干扰作用。统计2016年以来王甫洲入库流量在春季的极值比(最大流量与最小流量比值)(表2),可以看出,2017年和2019年发生水草灾害年份,1-3月份水草萌发季节的流量波动不足,流量极值比仅为1.32和1.34,而2016年、2018年、2020年、2021年未发生水草灾害年份,其1-3月流量极值比均大于2.0。说明在春季沉水植物萌发季节,实施中等尺度干扰,能够限制某些优势物种过度生长,促进生物多样性。

3.2.2 大流速冲刷机制 伊乐藻茎秆较脆,遇到较大流速冲刷时极易断裂,这也是2017年和2019年在秋汛来临时大量断枝堆积到电站取水口前的原因。槐文信等(2020)、Heidbüchel和Hussner(2020)开展原位观测和室内试验认为流速是影响沉水植物在水中覆盖度的重要因素,这主要是由于大流速易使伊乐藻茎秆断裂,从而减少生物量,也减少了第2次萌发的繁殖体。通过对2011年以来王甫洲水库入库流量过程进行分析发现,2017年和2019年发生水草灾害年份的上一年度甚

至前几个年度长时间来水偏枯,其中2012-2016年出现连续5个枯水年,伊乐藻在连续枯水环境下可以跨年年度累积生长,形成了基数很大的繁殖体,在2017年夏季达到了很高的生物量,当2017年秋季洪水到来时,在大流量冲刷作用下,大量伊乐藻被冲刷至王甫洲电厂取水口前,形成水草灾害。2019年水草灾害发生前,在2018年也遭遇了较枯水文过程,全年未出现大流量洪水脉冲,同时2019年1-3月份水草萌发季节和4-6月份水草快速生长季节的流量过程缺少波动性,秋季洪水到来时即发生了水草灾害,见图6。而在2021年,夏秋季借助大洪水过程开展生态调度,王甫洲水库最大入库流量超过了3 500 m³/s,大量伊乐藻通过泄水闸被冲走,库区伊乐藻残留量不多,下一年伊乐藻大量繁殖已不具备条件。

表2 2016-2022年王甫洲水库1-3月入库流量极值统计
Tab.2 Water inflow extremes in Wangfuzhou reservoir from January to March, 2016 to 2022

年份	最大流量 /m³·s ⁻¹	最小流量 /m³·s ⁻¹	极值比	是否发生 水草灾害
2016年	593	287	2.07	未发生
2017年	495	374	1.32	发生
2018年	1030	478	2.15	未发生
2019年	665	495	1.34	发生
2020年	1090	518	2.10	未发生
2021年	1320	467	2.83	未发生
2022年	1530	531	2.88	未发生

3.3 生态调度需求分析

采用平面二维水动力数学模型计算研究区域生态调度前后的垂线平均流速分布,分析靠冲刷抑制伊乐藻生长繁殖的临界流速阈值及调度流量需求。模拟2020年3月20日(春季生态调度前)区域整体平均流速为0.09 m/s,4月10日(调度期间)区域整体平

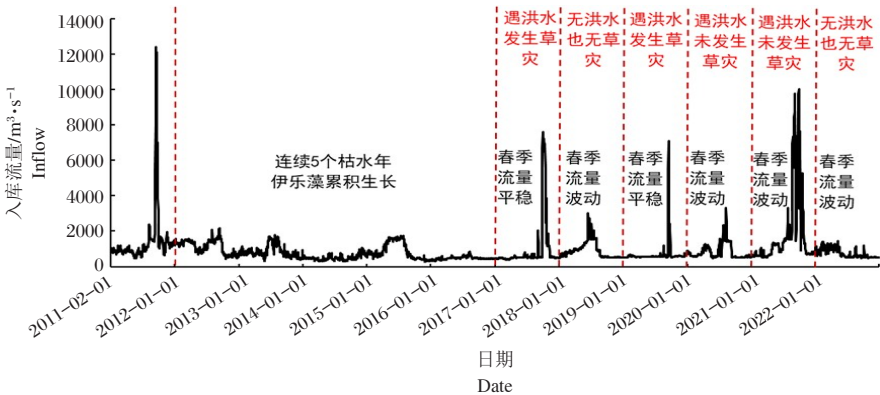


图6 王甫洲入库流量过程与水草灾害关系

Fig.6 Relationship between water inflow to Wangfuzhou reservoir and excessive growth of *Elodea nuttallii*

均流速增加至 0.14 m/s,增幅 55.6%,整体水动力改善效果较为明显。2021 年春季生态调度前整体流速约为 0.12 m/s,最大流速 2.53 m/s。2 月 22–26 日第 1 次生态调度期间区间平均流速增加至 0.21 m/s,最大值增加至 3.07 m/s;3 月 8–12 日第 2 次生态调度期间区间平均流速增加至 0.15 m/s,最大值增加至 2.88 m/s。7 月 27–30 日丹江口水库单次大流量下泄期间,丹江口至王甫洲区间整体平均流速从调度前约 0.27 m/s 增加至调度期间 0.41 m/s,最大流速从调度前 3.01 m/s 增加至调度期间 3.51 m/s。伊乐藻分布

比较集中的 3 个典型区域调度前后平均流速及最大流速变化见表 3。根据模拟分析结果,生态调度试验期间,中洲岛、木排港流速基本达到了 0.14 m/s 的临界流速阈值,而水岸新城由于其特殊地形构造,春季生态调度流速未能达到阈值。

进一步设计了不同入库流量和王甫洲水库水位下降相结合的调度工况,用数学模型模拟重点调控区域水岸新城和中洲岛区域的流速,统计结果见表 4,可以看出,考虑到王甫洲水库水位降幅超过 0.5 m 不利于电站本身的安全,要达到冲刷中洲岛伊

表 3 生态调度试验期间典型区域流速模拟分析

Tab.3 Simulation of flow velocities in typical areas during ecological regulation of discharge

区域	时段	日期	入库流量/m ³ ·s ⁻¹	平均流速/m·s ⁻¹	最大流速/m·s ⁻¹
水岸新城	生态调度前	2020 年 3 月 20 日	650	0.09	/
	生态调度期间	2020 年 3 月 23 日–4 月 30 日	809~1160	0.11	/
	生态调度前	2021 年 2 月 18 日–2 月 21 日	591	0.03	0.05
	生态调度期间	2021 年 2 月 22 日–2 月 26 日	589~1210	0.09	0.14
	生态调度期间	2021 年 3 月 08 日–3 月 12 日	506~1240	0.07	0.14
	生态调度前	2021 年 7 月 23 日–7 月 26 日	1210	0.07	0.13
	生态调度期间	2021 年 7 月 27 日–7 月 30 日	1500~3500	0.15	0.20
中洲岛	生态调度前	2020 年 3 月 20 日	650	0.06	/
	生态调度期间	2020 年 3 月 23 日–4 月 30 日	809~1160	0.12	/
	生态调度前	2021 年 2 月 18 日–2 月 21 日	591	0.07	0.13
	生态调度期间	2021 年 2 月 22 日–2 月 26 日	679~1210	0.15	0.26
	生态调度期间	2021 年 3 月 08 日–3 月 12 日	506~1240	0.14	0.28
	生态调度前	2021 年 7 月 23 日–7 月 26 日	1210	0.22	0.59
	生态调度期间	2021 年 7 月 27 日–7 月 30 日	1500~3500	0.44	1.02
木排港	生态调度前	2020 年 3 月 20 日	650	/	/
	生态调度期间	2020 年 3 月 23 日–4 月 30 日	809~1160	/	/
	生态调度前	2021 年 2 月 18 日–2 月 21 日	591	0.10	0.25
	生态调度期间	2021 年 2 月 22 日–2 月 26 日	679~1210	0.18	0.33
	生态调度期间	2021 年 3 月 08 日–3 月 12 日	506~1240	0.13	0.37
	生态调度前	2021 年 7 月 23 日–7 月 26 日	1210	0.23	0.33
	生态调度期间	2021 年 7 月 27 日–7 月 30 日	1500~3500	0.44	1.04

表 4 不同工况组合条件下典型区域流速值模拟结果

Tab.4 Simulation results of flow velocities in typical areas under different conditions

入库流量/m ³ ·s ⁻¹	不同水位下水岸新城岸边流速/m·s ⁻¹					不同水位下中洲岛尾部岸边流速/m·s ⁻¹				
	86.23 m	85.73 m	85.23 m	84.73 m	84.23 m	86.23 m	85.73 m	85.23 m	84.73 m	84.23 m
	△Z=0	△Z=-0.5	△Z=-1.0	△Z=-1.5	△Z=-2.0	△Z=0	△Z=-0.5	△Z=-1.0	△Z=-1.5	△Z=-2.0
1100	0.04	0.06	0.07	0.08	0.09	0.08	0.08	0.08	0.09	0.10
1200	0.05	0.06	0.08	0.09	0.10	0.08	0.08	0.09	0.10	0.11
1300	0.05	0.07	0.08	0.09	0.11	0.09	0.09	0.10	0.11	0.12
1400	0.06	0.08	0.09	0.10	0.11	0.09	0.10	0.10	0.12	0.13
1500	0.06	0.08	0.09	0.11	0.12	0.10	0.10	0.11	0.12	0.14
1600	0.06	0.08	0.10	0.12	0.13	0.11	0.11	0.12	0.13	0.15
1700	0.07	0.09	0.10	0.12	0.13	0.12	0.12	0.13	0.14	0.15
1800	0.07	0.09	0.11	0.13	0.14	0.12	0.13	0.13	0.15	0.16
1900	0.08	0.10	0.12	0.13	0.15	0.13	0.13	0.14	0.15	0.17
2000	0.08	0.10	0.12	0.14	0.15	0.14	0.14	0.15	0.16	0.17
3000		1.40					0.21			

注:△Z为王甫洲水库水位变幅,m/d。
Note: △Z is the amplitude of the water level of the Wangfuzhou reservoir, m/d.

乐藻 0.14 m/s 的临界流速,丹江库水库下泄流量应不低于 1 500 m³/s,要达到冲刷水岸新城伊乐藻临界流速,丹江口水库下泄流量应不低于 3 000 m³/s,同时王甫洲水库调节水位降幅不应小于 0.5 m。

结合中度扰动机制和大流速冲刷机制,研究提出春季和夏秋季调度需求如下:(1)春季考虑到南水北调中线工程供水需求,丹江口水库下泄流量受限,建议丹江口水库采用波动式下泄方式,其峰值流量按照 2 月份最低流量(生态流量 490 m³/s)的 2.0~3.0 倍进行设定,并且应保证峰值流量不小于 1 000 m³/s,峰值流量尽可能达到冲刷中洲岛伊乐藻的临界流量 1 500 m³/s。调度持续时间不少于 5 d,峰值流量过程不少于 2 次。(2)结合夏秋季防洪需求,丹江口水库下泄峰值流量尽量达到 3 000 m³/s,同时王甫洲水库水位采用降低水位运行方式,水位从正常蓄水位 86.23 m 降低 0.5 m 左右,保证水岸新城浅滩处达到 0.14 m/s 临界流速,调度持续时间不少于 5 d,峰值流量过程不少于 2 次。

3.4 生态调度对生物群落的影响

2019–2022 年现场调查结果显示,汉江干流丹江口至王甫洲区间水生植物物种组成发生了较大变化

(图 7),从 2019 年伊乐藻生物量占比最大,逐渐演替为穿叶眼子菜(*potamogeton perfoliatus linn*)、竹叶眼子菜(*Potamogeton wrightii Morong*)、菹草(*Potamogeton crispus*)等本土物种的比例大于伊乐藻,特别是 2021 年大洪水过后,本土物种在演替竞争中成功战胜了外来入侵种伊乐藻。伊乐藻占比从 2019 年的 99.99% 减少至 2022 年的 17%,穿叶眼子菜、竹叶眼子菜、菹草等本土物种生物量占比从 2019 年不到 1% 增加至 2022 年约 70%。对比分析伊乐藻生物量和分布面积以及水生植物物种结构变化,生态调度引起的中等尺度扰动对水生植物的影响是全面的,对于外来入侵物种具有较强的抑制作用,对于提高水生植被的生物多样性具有促进作用。

4 结论

伊乐藻在汉江干流丹江口至王甫洲区间过度繁殖对生态和生产造成不利影响,适度控制伊乐藻生长具有重要意义,生态调度方法具有可行性。

(1)控制汉江干流丹江口至王甫洲区间伊乐藻生长繁殖的临界流速为 0.14 m/s 左右。

(2)生态调度抑制伊乐藻生长繁殖的机制主要

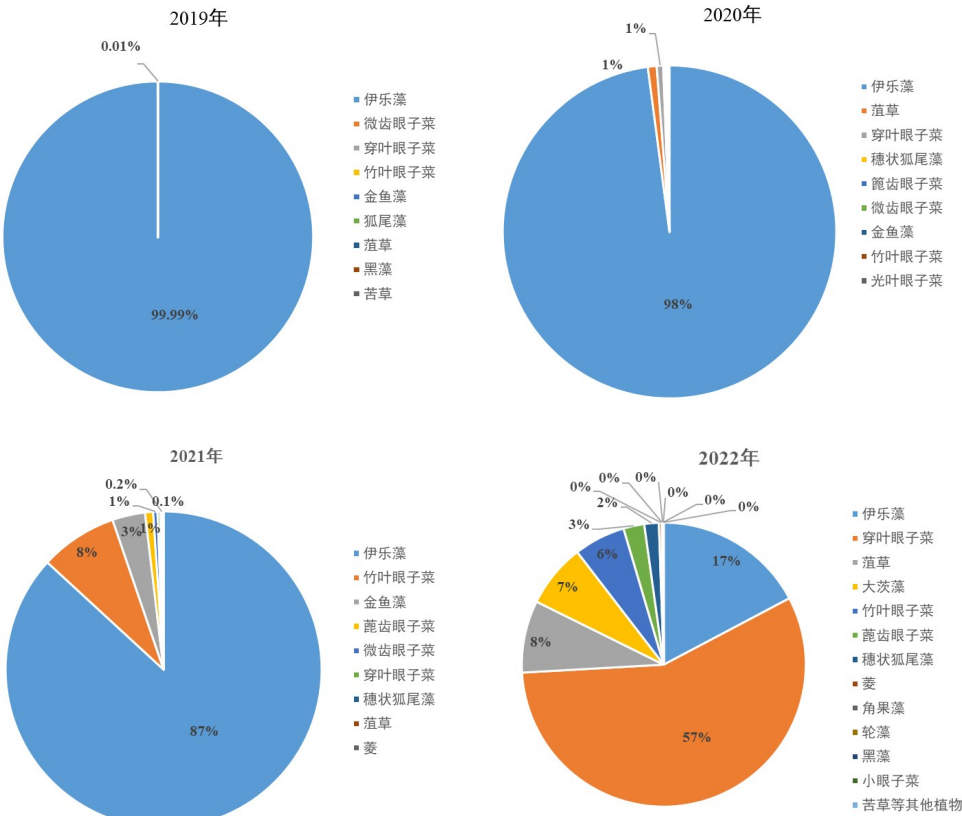


图 7 王甫洲库区近 4 年水生植物群落结构变化

Fig.7 Changes in aquatic plant community structure in Wangfuzhou reservoir over a four year period (2019–2022)

是中度扰动机制和大流速冲刷机制,中度扰动机制使得春季伊乐藻萌发受到影响,促进水生植物的多样性;大流速冲刷机制主要利用伊乐藻茎秆易折断特点,减少现存繁殖体。

(3)2020–2022 年丹江口水库联合王甫洲水库的生态调度试验效果表明:生态调度控制伊乐藻过度繁殖的效果很好,总生物量和分布面积减少 95% 以上,生态调度实施后王甫洲库区水生植物物种组成呈现出多样性增加趋势。

(4)生态调度有春季、夏秋季 2 个时期,春季受限于丹江口水库下泄流量限制,可采用波动幅度较大的流量过程(极值比大于 2)进行干扰,峰值流量不小于 $1\,000\text{ m}^3/\text{s}$;夏秋季利用丹江口水库泄洪过程,可采用大流量冲刷,峰值流量不低于 $3\,000\text{ m}^3/\text{s}$,将断枝从泄洪闸排走。

参考文献

- 成小英,雍佳君,2014. 伊乐藻对硝氮、磷胁迫的急性响应[J]. 安全与环境学报,14(6):336–340.
- 蔡树伯,赵辉,陈建立,2015. 北大港水库沉水植物过度生长控制技术研究[J]. 现代农业科技,(9):219,227.
- 国家环境保护总局,1991. 水质 水温的测定温度计或颠倒温度计测定法:GB13195–91[S]. 北京:中国质检出版社.
- 槐文信,朱政涛,杨中华,等,2020. 基于水动力的植被消长模型及河道植被演替模拟[J]. 人民长江,51(1):174–179.
- 霍大兵,2008. 伊乐藻生长特性及种植技术[J]. 安徽农学通报,14(15):226,233.
- 靳萍,胡灵卫,靳同霞,等,2013. 伊乐藻光合能力对三种生态因子的响应[J]. 水生态学杂志,34(1):25–29.
- 李建,丁洪亮,颜剑,等,2023. 汉江中段伊乐藻过度生长的生态调控研究[J]. 水生态学杂志,44(4):29–34.
- 栾建国,陈文祥,2004. 河流生态系统的典型特征和服务功能[J]. 人民长江,35(9):41–43.
- 谢林伸,莫妙兴,2012. 富营养条件下水质对伊乐藻与菹草生物质腐烂速率的影响[J]. 安徽农业科学,40(30):14630–14632.
- 王晓平,王玉兵,杨桂军,等,2016. 不同鱼类对沉水植物生长的

影响[J]. 湖泊科学,28(6):1354–1360.

- 王现正,杨波,连雷雷,2020. 丹江口水库至王甫洲河段冲淤变化对水位影响[J]. 水资源研究,9(5):493–502.
- 张嘉琦,方祥光,高晓月,等,2013. 沉水植物过度生长的生物控制技术研究进展[J]. 农业环境与发展,30(3):66–68.
- 周晓红,王国祥,冯冰冰,2008. 光照对伊乐藻(*Elodea nuttallii*)幼苗生长及部分光能转化特性的影响[J]. 生态与农村环境学报,24(4):46–52.
- 中华人民共和国水利部,2006. 声学多普勒流量测验规范:SL337–2006[S]. 上海:复旦大学出版社.
- 中华人民共和国水利部,2014. 水库渔业资源调查规范:SL167–2014[S]. 北京:中国水利水电出版社.
- Connell, J H, 1978. Diversity in tropical rainforests and coral reefs[J]. Science, 199:1302–1310.
- Kunii H, 1982. The critical temperature for the active growth of *Elodea nuttallii*[J]. Japanese Journal of Ecology, (32): 111–112.
- Mazej Grudnik Z, Germ M, 2013. Spatial pattern of native species *Myriophyllum spicatum* and invasive alien species *Elodea nuttallii* after introduction of the latter one into the Drava River (Slovenia)[J]. Biologia, 68(2):202–209.
- Heidbüchel P, Hussner A, 2020. Falling into pieces: In situ fragmentation rates of submerged aquatic plants and the influence of discharge in lowland streams[J]. Aquatic Botany, (160):103164.
- Hoffmann M, Raeder U, Melzer A, 2015. Influence of environmental conditions on the regenerative capacity and the survivability of *Elodea nuttallii* fragments[J]. Journal of Limnol, 74(1):12–20.
- Pine R T, Anderson W J, 1991. Plant preferences of triploid grass carp [J]. Journal of Plant Management, (29):80–82.
- Denmark Hydrodynamic Institute (DHI), 2012. Manual of MIKE 21 & MIKE 3 Flow Model FM——Hydrodynamic and Transport Module[R]. Copenhagen.
- Ward J, Stanford J, 1983. The intermediate-disturbance hypothesis: an explanation for biotic diversity patterns in lotic ecosystems[J]. Ann Arbor Science Publishers:347–356.
- (责任编辑 熊美华)

Ecological Regulation and Effectiveness Evaluation of *Elodea nuttallii* Controlling in Danjiangkou–Wangfuzhou Section of Hanjiang River

XIN Xiao-kang^{1,2}, XIONG Bin³, YAN Jian³, LI Jian¹, TIAN Xiao-min³

- (1. Changjiang water Resources Protection Research Institute, Wuhan 430051, P.R. China;
2. Changjiang River Water Resources Commission Innovation Team for Flood and Drought Disaster Prevention, Wuhan 430010, P.R. China;
3. Hubei Hanjiang Wangfuzhou Hydropower Co., Ltd., Laohekou 441800, P.R. China)

Abstract : In recent years, excessive growth of *Elodea nuttallii* in the Wangfuzhou reservoir area of Hanjiang River has adversely effected the ecological environment and services. It is therefore important to control *E. nuttallii* growth. Previous research has shown that ecological control of *E. nuttallii*, is feasible and reliable, and it was used in the Wangfuzhou reservoir area during the period 2020–2022. We studied Hanjiang River from Danjiangkou to Wangfuzhou, measured the effectiveness of ecological control and identified the Danjiangkou reservoir discharge pattern that most effectively controlled *E. nuttallii*. The study was based on data collected over the 3 years (2020–2022) of monitoring ecological regulation in Wangfuzhou reservoir and 4 years of in situ ecological monitoring in the study area (2019–2022). Biomass surveys, statistics on the area of distribution, and mathematical model simulations were used to analyze and evaluate the changes in biomass, and distribution area before and after implementation of ecological control. The total biomass of *E. nuttallii* decreased from 48 000 tons in 2019 to 40.11 tons in 2022 and, after ecological control for 3 years, the distribution area decreased from 11.60 km² to 0.23 km², a decrease of over 95%. The proportion of *E. nuttallii* biomass in the total biomass of submerged plants decreased from 99.99% to 17%, indicating effective control. We recommend ecological discharge regulation that focuses on moderate *E. nuttallii* control by increasing the extreme flow ratio in spring, and focuses on high flow velocity erosion with a critical flow velocity of 0.14 m/s in summer and autumn. Our study identified the optimal discharge flows from Danjiangkou reservoir for controlling *E. nuttallii*, and provides a reference for preventing excessive *E. nuttallii* growth.

Key words:*Elodea nuttallii*; ecological regulation; effectiveness evaluation; Wangfuzhou reservoir