佘星源,何术锋,林育青,等.汉江中下游多目标生态流量时空耦合计算 [J]. 中国环境科学, 2025,45(9):5093-5103.
She X Y, He S F, Lin Y Q, et al. Spatiotemporal coupling calculation of multi-objective ecological flow in the middle and lower Hanjiang River [J]. China Environmental Science, 2025,45(9):5093-5103.

汉江中下游多目标生态流量时空耦合计算

佘星源[1,2],何术锋[2*],林育青[2],李沁园[2],莫康乐[2],陈求稳[2] (1.西安理工大学,西北旱区生态水利国家重点实验室,陕西 西安 710048；2.南京水利科学研究院生态环境研究所,江苏 南京 210029)

摘要：基于水动力、水质、水生态模型,计算汉江中下游水质达标、水华防控和鱼类产卵需求 3 个目标的生态流量,并提出分时段、分类型、分区域的时间、空间耦合生态流量成果.时空耦合结果表明,黄家港、襄阳、皇庄、沙洋、仙桃 5 个断面生态流量分别为 330~904m^3/s、366~1135m^3/s、514~1160m^3/s、632~1236m^3/s、486~1013m^3/s,2~4 月生态流量取决于水华防控,6~9 月生态流量取决于水质达标,10~11 月生态流量取决于鱼类产卵需求,枯水期中游区域生态流量取决于水华防控,下游段生态流量取决于鱼类产卵需求,丰水期汉江中下游全段生态流量取决于水质达标.本文为河流生态流量系统性研究提供了一种新的思路,为河流水生态情况改善提供了科学依据和理论基础.

关键词：汉江中下游；水质；水华；鱼类产卵多目标生态流量
中图分类号：X522 **文献标识码**：A **文章编号**：1000-6923(2025)09-5093-11

Spatiotemporal coupling calculation of multi-objective ecological flow in the middle and lower Hanjiang River. SHE Xing-yuan[1,2], HE Shu-feng[2*], LIN Yu-qing[2], LI Qin-yuan[2], MO Kang-le[2], CHEN Qiu-wen[2] (1.State Key Laboratory of Eco-hydraulics in Northwest Arid Region of China, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China；2.Eco-environmental Research Department, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China). *China Environmental Science*, 2025,45(9)：5093~5103

Abstract：Based on hydrodynamic, water quality, and aquatic ecology models, the ecological flow requirements needed to meet water quality standards, suppress algal blooms, and support fish spawning in the middle and lower Hanjiang River were quantified, and temporally and spatially coupled ecological flow regimes by period, type, and region were proposed. The spatiotemporal coupling indicated that ecological flows at the Huangjiagang, Xiangyang, Huangzhuang, Shayang, and Xiantao sections ranged from 330~904m^3/s, 366~1135m^3/s, 514~1160m^3/s, 632~1236m^3/s, and 486~1013m^3/s, respectively. From February to April of the subsequent year, ecological flow was governed by algal bloom control requirements; from June to September, it was driven by water quality compliance; and from October to November, it was dictated by fish spawning needs. During the dry season, ecological flow in the midstream region was determined by algal bloom prevention and control, whereas in the downstream section it was determined by fish spawning requirements. During the flood season, ecological flow across the entire middle and lower Hanjiang River was governed by the attainment of water quality standards. This work provided a new perspective for the systematic study of ecological flow in rivers and offered scientific evidence and a theoretical foundation for river ecosystem improvement and related engineering applications.

Key words：middle and lower Hanjiang River；water quality；algal bloom；fish spawning；multi-objective ecological flow

生态流量是维持水生态系统健康与稳定的重要因素,科学计算和管理生态流量对保护水生生物多样、促进水生态环境的修复以及实现水资源的可持续利用具有重要意义[1-3].相关文献和报道表明,在低于生态基流的条件下,河流水质恶化、水华频发以及鱼类数量减少的现象增多[4-5].经验型基流比例法与 Tennant 法被用于通过调配水量控制污染负荷,却未能揭示水质-流量的动态耦合机制[3];量化计算叠加数值模拟虽提高了水质达标的精度,但仍局限于单一指标视角[1].为应对水华等极端生态事件,Copula 模型及水文阈值法给出了风险流量的定量判别,却因河段差异与多因子耦合缺失而影响适用性[6-7].改进栖息地法用于尝试满足漂流性卵鱼类在不同生命阶段的流量需求,但其需要持续监测与参数动态校正结果[8].国外研究虽已分别提出满足鱼类产卵、迁徙与栖息的最低保障流量标准[9-11],却尚

收稿日期：2025-02-17
基金项目：国家重点研发计划项目(2022YFC3203900,2023YFC3207803);国家自然科学基金青年基金资助项目(52400223);国家自然科学基金资助面上项目(52379070);长江水科学研究联合基金资助项目(U2240223)
* 责任作者, 工程师, sfhe@nhri.cn

未系统阐释河流生态过程在时间与空间尺度上的协同机制.现有的研究多聚焦河流单个因素计算生态流量,忽略了河流生态时间、空间上的整体性,难以满足河流生态需求,缺乏一定代表性.针对该问题,本研究以汉江中下游为研究区域,分别计算以水质达标、水华防控和鱼类产卵保障为目标的生态流量,探索以时间、空间上对 3 个目标计算所得生态流量结果的耦合,将耦合结果作为汉江中下游最终生态流量,并与其他方法计算进行对比验证其可行性.

1 数据与方法

1.1 研究区域和数据采集

汉江中下游流域上起丹江口、下至汉口入长江河口,地跨湖北、河南两省(30°~34°N,110°~114°E),全长 616km,流域总面积 $6.08\times10^4 km^2$[12],地形西北高东南低,处于亚热带季风气候区,年均流量为 $662.42m^3/s$,月均流量约为 $780.03m^3/s$,日均流量为 $781.67m^3/s$[13].本研究重点关注汉江中下游水质、水华以及鱼产卵问题,调查时段内,主要超标污染物为总氮(平均浓度 1.38mg/L[14])、总磷(0.01~0.09mg/L[15])、氨氮(0.056~0.83mg/L[14]).其中,水质超标情况出现在汉江中下游全段[16],水华爆发出现在汉江中下游中游段[17],鱼类产卵受到影响出现在汉江中下游下游段[18],如图 1.

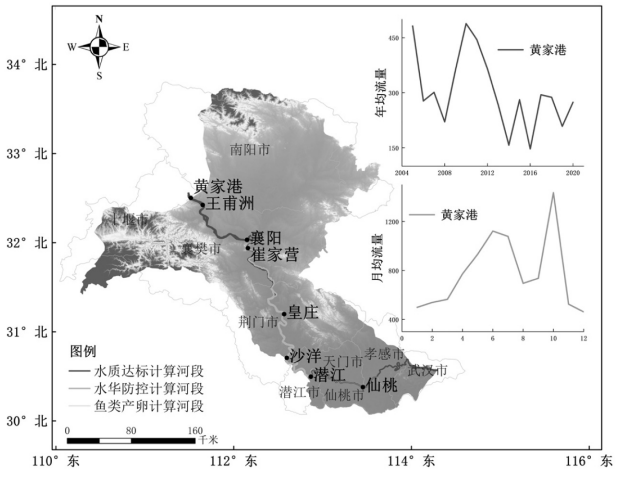


图 1 汉江中下游不同目标区段示意

Fig.1 Schematic diagram of different target sections in the middle and lower Hanjiang River

本次计算数据系列采用 1956~2017 年流量系数据行生态流量计算.选用的断面须具备完整、准确的数据特性,以及良好的代表性和控制性,同时确保水文学方法与水力学方法计算结果的一致性[19-20].最终确定的 5 个断面为黄家港、襄阳、皇庄、沙洋和仙桃.5 个主要计算断面基础数据情况如表 1 所示,各断面均有足够数据系列用于本次计算.

表 1 研究断面流量数据统计表

Table 1 Research Cross-Sectional Flow Data Statistical Table

数据年限	1956~2017	1965~2009	1956~2017	1965~2013	1972~2017
断面名称	黄家港	襄阳	皇庄	沙洋	仙桃

1.2 计算方法

1.2.1 基于水质达标的生态环境需水量推求方法 基于水动力水质模型[21-23]的汉江中下游的关键水质指标沿程变化,使用均方根误差检验模型精确度,计算满足河段水质达标的最大与最小生态流量 Q_d 与 Q_u,以确定整个江段的生态流量目标.由于汉江中下游干流中污染物沿程变化更为显著[24-26],对各河段上下断面之间可以采用一维水动力水质模型建立联系,主要考虑稀释和一阶降解过程,动力学过程如下方程式表示:

$$-dC/dt = kC \tag{1}$$

$$C = C_0 e^{-kt} \tag{2}$$

$$t = L/v \tag{3}$$

式中:C_0 为初始浓度;C 为经过时间 t 的浓度;降解时间 t 可通过河段区间长度 L 与其平均流速 v 来确定;v 的取值由水动力水质模型计算而来;k 为污染物的综合降解系数.

计算每一个断面满足水质达标的生态流量,计算式如下:

$$C_u = (Q_c C_c + Q_h C_h)/(Q_c + Q_h) \leqslant C_{达标} \tag{4}$$

$$Q_u = Q_c + Q_h \tag{5}$$

式中:C_u 为上游断面污染物浓度;Q_c 为引调水水量;Q_h 为汉江的河段设计流量;C_c 和 C_h 分别为长江和汉江丰水期的本底浓度值;$C_{达标}$ 为断面的水质目标值;Q_u 为满足上游水质达标的生态环境需水量.

在满足上一断面水质要求的前提下,计算下游断面的生态流量.河段污染物来源有 4 部分:上游汉江来流携带 $Q_h C_h$;调水携带 $Q_c C_c$;支流输入 $Q_m C_m$ 以及区间入河污染负荷强度 M_1.满足下游水质达标的生态流量计算式如下:

$$C_d=\left(Q_cC_c\exp^{(-kt)}+Q_hC_h\exp^{(-kt)}+Q_mC_m+M_1\right)/\left(Q_c+Q_h+Q_m\right)\leqslant C_{达标} \tag{6}$$

$$t=L_2/v \tag{7}$$

$$Q_d=Q_h+Q_c+Q_m \tag{8}$$

$$v\sim f(Q_d) \tag{9}$$

式中:C_d 为河段下游断面的污染物浓度;Q_d 为满足上游水质达标的生态环境需水量;L_2 为河段 2 的河道长度;v 为河段 2 的流速.

1.2.2　基于水华防控的生态流量推求方断面通量法:根据藻类生长及河道内物质运输,某一时间内某段河道的藻类生物量变化为:

$$\begin{aligned}&\text{藻类生物量增长}=\text{净生长量}+\\&\text{输入通量}-\text{输出通量}-\text{死亡量}\end{aligned} \tag{10}$$

藻类净生长量: $P_1=\mathrm{PM}_d\times C_0$;$P_1$ 为藻类净生长量,$\mathrm{g/(m^3\cdot d)}$;PM_d 为净生长率,$\mathrm{d^{-1}}$;C_0 为藻类密度,$\mathrm{g/m^3}$;藻类死亡量: $P_2=WS_d\times C_0$;P_2 为藻类死亡量,$\mathrm{g/(m^3\cdot d)}$;WS_d 为死亡率,$\mathrm{d^{-1}}$;C_0 为藻类密度,$\mathrm{g/m^3}$.

某一时间段内在水华发生断面流入、流出的通量公式为:

$$W=K\sum_{i=1}^{n}C_{xi}Q_c/n \tag{11}$$

式中:K 为时段转换系数,基于流量、监测时间段的长度以及所研究的水体流域的实际情况确定;n 为估算时段样品数;C_{xi} 为藻类流入流出的密度,$\mathrm{g/m^3}$;Q_c 为断面流量,$\mathrm{m^3/s}$.当 n=1 时藻类流入、流出通量分别为 W_1 和 W_2,具体公式如下:

$$W_1=KC_1Q_c \tag{12}$$

$$W_2=KC_2Q_c \tag{13}$$

式中:C_1 为藻类流入时的密度;C_2 为藻类流出时的密度.将 P_1、P_2、W_1、W_2 代入上式得:

藻类生物增长:

$$\Delta m=\mathrm{PM}_d\times C_0+KC_1Q_c-KC_2Q_c-WS_d\times C_0,$$

当藻类生物量增长≤0 时,即河段内单位水体藻类逐步减少,水华得到防控,由此可以推算出防控水华所需的流量 Q_c:

$$Q_c\geqslant C_0(\mathrm{PM}_d-WS_d)/K\left(C_2-C_1\right) \tag{14}$$

抑制流速法:依据藻类生长与流速的关系[27-30],当流速处于 0.08~0.6m/s 时,河流都有可能爆发水华,但藻类在不同的营养盐条件下的适宜流速不同.研究汉江流域水华爆发时流速的大小发现,当流速处于 0.4~0.6m/s 时,藻类生长受到抑制,参考断面实际情况确定藻类抑制流速 v 为 0.5m/s,与断面面积 A 相乘得到满足水质条件的流量 Q_u.

通过上述两种方法计算基于水华防控的断面生态流量,取二者外包线作为计算结果,再运用水动力[31-34]与水生态[35-38]耦合模型,通过相对误差检验模型精确度,模拟冬春季水华防控所需的水动力条件,对比分析计算与模拟所得的数据,最终求得汉江中下游基于水华防控的断面生态流量.

1.2.3　基于鱼类产卵的生态流量推求方法由于研究的江段水平尺度远大于垂直尺度,因此采用二维水动力模型[39]确定区间水流特性,推导出繁殖场中的流速分布情况,以及产卵场范围内的流速和水深分布[18],模型网格数量为 5532 个,节点数为 3006 个[18].二维水动力模型如下:

连续性方程:

$$\partial H/\partial t+\partial q_x/\partial x+\partial q_y/\partial q_y=0 \tag{15}$$

动量方程:

X 方向:

$$\begin{aligned}&\partial q_x/\partial t+\partial\left(Uq_x\right)/\partial x+\\&\partial\left(Vq_x\right)/\partial y+g\partial H^2/2\partial x=\\&gH\left(S_{0x}-S_{fx}\right)+\\&\partial\left(H\tau_{xx}\right)/\rho\partial x+\partial\left(H\tau_{xy}\right)/\rho\partial y\end{aligned} \tag{16}$$

Y 方向:

$$\begin{aligned}&\partial q_y/\partial t+\partial\left(Uq_y\right)/\partial x+\\&\partial\left(Vq_y\right)/\partial y+g\partial H^2/2\partial y=\\&gH\left(S_{0y}-S_{fy}\right)+\\&\partial\left(H\tau_{yx}\right)/\rho\partial x+\partial\left(H\tau_{yy}\right)/\rho\partial y\end{aligned} \tag{17}$$

式中:H 为水深;U、V 分别是在 X、Y 方向水深的平均速度;g 是重力加速度;ρ是水体密度;S_{0x}、S_{0y} 是河床 X、Y 方向的坡度;S_{fx}、S_{fy} 是相应的摩阻坡度;τ_{xx}、τ_{xy}、τ_{yx}、τ_{yy} 是水平方向湍流应力张量的分量;q_x、q_y 是 X、Y 方向的单宽流量,按下式计算:

$$q_x=H\cdot U \tag{18}$$

$$q_y=H\cdot V \tag{19}$$

1.2.4　多目标生态流量时空耦合推求方法将基于水质达标、水华防控和鱼类产卵目标计算的生态流量进行时间、空间耦合,具体计算方法如下:

时间耦合:

$$\mathrm{SYT}_h=\begin{bmatrix} x_{11} & \cdots & x_{1j} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{i1} & \cdots & x_{ij} \end{bmatrix}, i=1\cdots5, j=1\cdots12 \quad (20)$$

$$K_h=\mathrm{SYT}_h\cdot/\mathrm{JB} \quad (21)$$

$$\mathrm{SY}_{\hbar}=\mathrm{Max}\left(\mathrm{JB}_s\times K_{h_{mn}}\right), \quad s=1\cdots5, m=1\cdots12, n=1\cdots12 \quad (22)$$

式中:x 为生态流量;SYT_h 为不同目标生态环境需水矩阵;JB 为各断面基本生态环境需水矩阵;K_h 为修正系数矩阵;SY_h 为适宜生态环境需水的计算结果.

空间耦合:

$$f_n\left(x_i\right)=k_i f_{n+1}\left(\hat{x}_i\right), i=1\cdots12, n=1\cdots5 \quad (23)$$

$$k_i=\left(\mathrm{SY}_{n+1}\right)_i/\left(\mathrm{SY}_n\right)_i, i=1\cdots12, n=1\cdots5 \quad (24)$$

式中:$f_n\left(x_i\right)$ 和 $f_{n+1}\left(\hat{x}_i\right)$ 为不同断面适宜生态环境需水过程;k_i 为空间修正系数;$\left(\mathrm{SY}_{n+1}\right)_i$ 和 $\left(\mathrm{SY}_n\right)_i$ 为不同断面适宜生态环境需水数值.

2 生态流量计算结果

2.1 基于水质达标的生态环境需水量结果

表 2 基于水质达标的生态环境需水量结果(m^3/s)

Table 2 Ecological water demand results based on water quality standards (m^3/s)

断面	6 月	7 月	8 月	9 月
黄家港	447	453	442	440
襄阳	422	248	370	419
皇庄	812	786	749	875
沙洋	792	836	820	892
仙桃	436	462	453	470

通过实际调查与文献查找,汉江中下游丰水期存在 NH_3–N 全江段超标现象[16,40];汉江中下游枯水期存在 TP 的显著超标现象,主要集中在皇庄以下断面[15-16,41].同时期 NH_3–N 的浓度较长江高[16],可通过引调长江水源(长江荆江河段引水至汉江高石碑镇兴隆河段)缓解其超标问题;同时期TP浓度较长江低[42],只能通过控制入河污染负荷来管理其超标,从而达到水质达标(Ⅱ类水)的目标.因此,选择 NH_3–N 达标作为汉江中下游丰水期(6~9 月)水质保障断面水质目标的生态流量估算依据.控制丰水期 NH_3–N 浓度,整合多种排污情境[43-45],确定皇家港、襄阳、皇庄、沙洋和仙桃 5 个断面在 6~9 月基于水质达标的生态流量范围.再通过多年平均流量以及一维水动力水质模型[46]模拟结果进行校核,计算得到平均均方根误差为 10%,误差较小,模型合理[16].最终,断面水质保障的生态环境需水量计算结果如表 2 所示.

2.2 基于水华防控的生态流量结果

基于水华防控进行汉江中下游干流典型断面生态环境需水量定值研究,采用断面通量法和抑制流速法得到的汉江中下游 12~4 月典型断面生态环境需水量对比见表 3.

表 3 基于水华防控的各断面生态环境需水量阈值(m^3/s)

Table 3 Thresholds for ecological water demand at various sections based on algal bloom prevention and control (m^3/s)

主要控制断面	方法	12 月	1 月	2 月	3 月	4 月
沙洋	断面通量法(Q_c)	695	890	890	890	695
	抑制流速法(Q_u)	741	741	741	741	741
仙桃	断面通量法(Q_c)	750	937	937	937	750
	抑制流速法(Q_u)	736	736	736	736	736

表 4 基于水华防控的生态流量(模型模拟结果,m^3/s)

Table 4 Ecological flow for algal bloom prevention and control (model simulation results, m^3/s)

断面	12 月	1 月	2 月	3 月	4 月
沙洋	695	890	890	890	695
仙桃	820	947	947	947	820

表 5 基于水华防控的生态流量(m^3/s)

Table 5 Ecological flow for algal bloom prevention and control (m^3/s)

月份	成果	沙洋	仙桃
12	流量观察法	/	/
	水质流量控制法	/	700
	水文拐点法	/	/
1	流量观察法	/	776
	水质流量控制法	/	700
	水文拐点法	/	682
2	流量观察法	/	762
	水质流量控制法	/	700
	水文拐点法	/	608
3	流量观察法	/	816
	水质流量控制法	/	700
	水文拐点法	/	690
4	流量观察法	/	/
	水质流量控制法	/	700
	水文拐点法	/	772

通过构建的水动力模型与水生态模型,矫正相关参数,对比分析水华计算与模拟所得的数据,对计

算结果进行校核,计算得到的相对误差较小[17],模型吻合度较高,取外包线作为最终结果.具体见表 4.

通过流量观察[47]、水质控制法[48]及水文拐点法[49]对汉江中下游水华控制需求的生态流量进行计算,关键控制断面的生态流量见表 5.

2.3　基于鱼类产卵需求的生态流量结果

根据《湖北省汉江中下游梯级枢纽 2019 年针对产漂流性卵鱼类自然繁殖联合生态调度实施方案》,四大家鱼产卵存触发流速为 1.11~1.49m/s、适宜流速为 1.40~1.60m/s.使用多年实测数据对模型边界条件进行设置、率定和验证[50].通过对关键断面进行分类,选出对鱼类有特定生境需求的断面[51].根据历史及现状调查结果,识别并划分断面特殊流量需求时段,最终确定仙桃水文站的数据进行四大家鱼产卵场的生态流量计算.利用建立的二维水动力模型,设计不同流速梯度作为输入参数,计算仙桃段的流速值,直至满足 1.40~1.60m/s 的流速条件,模型验证后[18],模拟结果可信.依据四大家鱼的产卵需求,对汉江中下游干流典型断面的生态流量进行定量研究.具体见表 6.

表 6　基于四大家鱼产卵流速的生态流量(模型模拟结果,m^3/s)

Table 6　Ecological flow based on the spawning flow velocities of the four major Chinese carps(model simulation results, m^3/s)

断面	月份	生态流量
仙桃	1	323
	2	389
	3	324
	4	326
	5	486
	6	585
	7	740
	8	863
	9	675
	10	552
	11	528
	12	478

表 7　基于四大家鱼产卵流速的生态流量(m^3/s)

Table 7　Ecological flow based on the spawning flow velocities of the four major Chinese carps (m^3/s)

断面	12 月	1 月	2 月	3 月	4 月
仙桃	750	937	937	937	750

根据收集整理的汉江中下游仙桃水文站多年的逐日流量资料,利用水文学[52-53]法计算得到的结果见表 7.

2.4　多目标生态流量时空耦合结果

2.4.1　时间耦合计算结果　根据设定的需水目标,分别计算了黄家港、襄阳、皇庄、沙洋以及仙桃各断面的不同生态流量过程(表 2、表 5、表 7).在此基础上挑选了每个监测断面上的最大生态流量值,确定这些值作为各监测断面的最佳生态流量时间耦合结果.此外,通过对各断面生态流量过程的深入分析,确认了时间耦合成果中仙桃断面为关键控制断面.仙桃断面时间耦合生态流量过程详见表 8.

表 8　时间耦合控制断面(仙桃)生态流量

Table 8　Ecological flow at the time-coupled control section (Xiantao)

月份	生态流量(m^3/s)
1	953
2	937
3	916
4	766
5	486
6	1013
7	1013
8	1013
9	1013
10	552
11	528
12	741
年径流量(亿 m^3)	260.68

表 9　空间耦合后的适宜生态流量(m^3/s)

Table 9　Appropriate ecological flow after spatial coupling (m^3/s)

月份	黄家港	襄阳	皇庄	沙洋	仙桃
1	631/83%	669/93%	709/84%	743/79%	953/66%
2	675/91%	683/100%	690/99%	759/84%	937/77%
3	659/81%	742/72%	864/69%	888/67%	916/73%
4	495/100%	716/72%	820/71%	856/69%	766/85%
5	363/100%	488/100%	514/100%	632/100%	486/100%
6	640/88%	1027/57%	996/65%	1117/76%	1013/87%
7	904/62%	1135/54%	1160/55%	1236/56%	1013/75%
8	637/100%	932/88%	1143/76%	1235/57%	1013/84%
9	574/100%	976/100%	1018/100%	1118/100%	1013/100%
10	330/100%	472/100%	596/100%	642/100%	552/100%
11	341/100%	366/100%	670/100%	679/96%	528/100%
12	529/100%	627/94%	687/100%	741/76%	741/81%
年径流量(亿 m^3)	178.08	232.16	259.41	279.89	260.68

注:1)黄家港、襄阳、皇庄、沙洋和仙桃站6~9月计算的流量为水质保障生态需水,沙洋、仙桃站12月~次年4月计算的流量为水华防控生态流量,仙桃站1~12月计算的流量为时间耦合结果(满足水质达标、水华防控和鱼类产卵需求), 黄家港、襄阳、皇庄、沙洋和仙桃站1月~12月计算流量为空间耦合计算值.(2)100%代表实际流量满足生态流量,83%表示黄家港断面1月份生态流量满足程度为83%

2.4.2 空间耦合计算结果 依据表 8 计算结果,以仙桃断面推求其他控制断面的适宜生态流量,并与实际流量进行对比,计算满足率.黄家港、襄阳、皇庄、沙洋、仙桃等 5 个主要控制断面空间耦合成果及满足率见表 9 所示.

3 讨论

3.1 多目标生态流量时空耦合结果分析及合理性

本研究首次将水质达标、水华防控和鱼类产卵需求 3 个生态目标进行耦合计算,从系统整体的角度出发,综合考虑多种生态需求,全面反映流域生态系统的复杂性,并提高生态流量计算的合理性和适宜性.

一方面,多目标生态流量时间耦合结果涵盖了不同月份的生态流量,整体来看(图 2),汉江中下游的生态流量在夏季达到高峰,而冬季和春季的生态流量则相对较低,反映出季节性变化对生态流量的显著影响,确保在不同季节和水文条件下,生态需求能够得到合理满足.

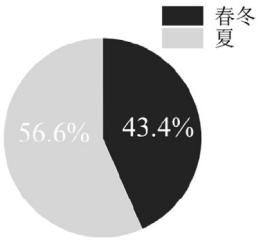


图 2 汉江中下游不同季节需水量占比

Fig.2 Proportion of water demand in the middle and lower hanjiang riveracross different seasons

在对比多目标生态流量时间耦合结果和其他方法计算的生态流量[16](表 5、表 7)结果后,可以看出多目标生态流量时间耦合结果所呈现的生态环境需水过程具有更高的综合性和时效性,反映了季节性变化对生态需求的影响.一维水动力-水质模型计算和流量观察、水质控制法及水文拐点法计算的生态流量虽然提供了重要的参考数据,但未能充分体现生态需求的动态变化,而水文学法计算的生态流量缺乏对整体生态系统的全面考虑[54].因此,多目标生态流量时间耦合结果不仅在数据上更为详尽,还在生态流量的时空耦合分析中提供了更为科学的依据,确保了生态需求在不同季节和水文条件下的合理满足,具有更高的实用价值和指导意义.结合生境模拟法与目标水质法的生态流量计算,虽然实现了两种方法的协同应用,但在执行生态目标时过于僵化,未能充分体现流量的多样性,对季节差异的反映也存在不足,难以真实展现季节变化特征,未能完全满足水文规律要求[55].基于协同学分析法和调控阈值界限的生态流量计算,忽略了时间序列特征,导致部分情况下的系统有序度评价结果与实际演化趋势不符[56-57].本研究计算得出的仙桃断面 1~12 月的时间耦合生态流量过程分别为:953,937,916,766,486,1013s,1013,1013,1013,552,528 和 741m^3/s.其中,6~9 月为水质达标目标时段,所需生态需水分别为 1013,1013,1013,1013m^3/s.李晶晶等[58]的研究表明,皇庄断面 10 月生态环境需水量最大,为 901m^3/s.12 月~次年 4 月为水华防控目标时段,所需生态需水分别为 953,937,916,766,741m^3/s.殷大聪等[59]在分析汉江中下游枯水期硅藻水华暴发的水文阈值时发现,为保证河段不发生水华,对应 75%、85%和 90%保证率下的平均流量应不低于 500,700 和 800m^3/s.谢敏[7]和刘强[60]等研究表明,当汉江中下游流域的流量达到 500 或 600m^3/s 以上时,流域内不会发生水华.5~10 月为鱼类产卵目标时段,所需生态需水分别为 486,1013,1013,1013,1013 和 552m^3/s.费启航等[61]研究表明,汉江下游四大家鱼产卵期(5~8 月)和生长期(9~11 月)的生态流量分别为最低 1310m^3/s 及最低 441m^3/s.综上所述,本研究计算的多目标生态流量时间耦合结果,满足水质达标、水华防控以及鱼类产卵的需求,符合生态流量的季节性和复杂性,生态流量计算的结果具有准确性.

另一方面,多目标生态流量空间耦合结果涵盖了黄家港、襄阳、皇庄、沙洋和仙桃 5 个主要控制断面的生态流量.考虑了各断面在水质达标、水华防控和鱼类产卵需求方面的差异性以及上游、中游和下游之间的水量传递和相互影响,反映了不同断面在各个月份的需水量变化,强调了水质保障生态需水、水华防控生态需水和鱼类产卵生态需水的不同需求.显示各断面的生态水需求在季节性和水文条件下表现出显著差异,以及流域内生态流量需求的复杂性和动态性.多目标生态流量空间耦合结果提供了更为全面、系统的生态流量分析.相较于其他方法计算的生态流量(表 2、表 6 和表 8),多目标生态流

量空间耦合涵盖了更广泛的生态因素、满足不同生态需求之间的相互关系以及综合考量了整体水环境.多目标生态流量空间耦合结果展现了各断面在不同季节间的生态流量需求变化和动态关系,反映了生态流量的复杂性.其通过揭示水质、水华和生物需求之间的相互影响,强化了对生态系统的全面理解.此外,多目标生态流量空间耦合结果不仅强调了水质、水华和生物需求的相互影响,还为流域的生态水资源管理提供了更强有力的科学依据,更有助于制定综合性管理策略以保障流域生态安全和可持续发展.通过赋权进行空间耦合计算,虽然更全面、协调且动态地评估水资源承载力,但权重计算方法存在主观性较强、指标相互影响难以确定的问题[62].利用耦合 SWAT 和 PHABSIM 模型计算的生态流量,综合考虑流域对河道生境的影响,但模型耦合存在空间尺度差异[63].流域水资源配置模型[53]对不同的生态流量情景和管理策略进行分析,该模型对河段尺度的分析仍较为概略,未充分揭示每个河段的细致生态特性和河段之间生态联系的空间异质性及相互作用,对于各河段生态流量响应差异的机制探讨不够详尽[64].基于区间可行域的河流生态流量多方法耦合模型,局限于断面尺度的生态流量计算,未充分考虑流域尺度上,区域生态需水的差异及空间异质性,缺乏对不同地理区位对生态流量影响的深入分析,未完全反映流域内生态环境的空间差异[65].本研究计算得到空间耦合生态流量为(黄家港断面)330~904m^3/s,(襄阳断面)366~1135m^3/s,(皇庄断面)514~1160m^3/s,(沙洋断面)632~1236m^3/s,(仙桃断面)486~1013m^3/s.吴兴华等[66]研究分析 1992~2019 年间汉江中下游地区藻类水华爆发期间的枯水期流量,发现皇庄、沙洋和仙桃等关键断面的平均流量至少高于 425m^3/s 才能控制水华的发生.李晶晶[58]的研究采用 Tennant 法、RVA 法以及数值模拟法计算各断面生态环境需水量得到的结果为(黄家港断面)376~474m^3/s,(襄阳断面)350~517m^3/s,(皇庄断面)486~1089m^3/s,(沙洋断面)620~850m^3/s.综上所述,本研究计算的多目标生态流量空间耦合结果,综合考量了各断面多目标间的差异性、河道水量传递及其相互影响,以及各区域在不同季节与水文条件下的生态需求特征,满足水质达标、水华防控以及鱼类产卵的需求,生态流量计算的结果具有准确性.

3.2　多目标生态流量的合理性与可行性

研究对适宜生态流量与多年平均天然径流量比例的合理性进行评估.根据湖北省水利厅的数据[13],汉江的年均径流量为 577 亿 m^3,时间耦合分析结果显示,以仙桃断面计算的年径流量为 260.68 亿 m^3.在空间耦合结果中,以黄家港断面计算的年径流量为 178.08 亿 m^3,以襄阳断面计算的年径流量为 232.16 亿 m^3,以皇庄断面计算的年径流量为 259.41 亿 m^3,以沙洋断面计算的年径流量则达到了 279.89 亿 m^3,以仙桃断面再次计算的年径流量为 260.68 亿 m^3.上述计算结果表明,这些径流量不仅能够全面满足汉江中下游区域的径流需求,同时还能覆盖并满足文中提及的基于水质、水华及鱼类产卵目标的生态流量.然而,汉江中下游存在的工程措施及气候变化,致使枯水期生态基流不足,丰水期洪峰集中[67],洪峰削弱时序后移[68],部分月份生态流量满足度偏低(表 9),增加了水体水质恶化、水华暴发[69-70]以及鱼类产卵障碍[71]的风险,建议梯级水库联合调度及引江济汉,及时弥补生态水量缺口.此外,还采用了工程措施建成后的流量数据,计算了多目标耦合计算的生态流量置信区间(表 10).结果显示气候变化和水利枢纽建设对多目标耦合计算的生态流量存在一定影响,其中在丰水期和下游断面影响波动较大,整体波动则相对平缓.以上分析表明,多目标耦合计算的生态流量具有可行性和实用性.

表 10　汉江中下游适宜生态流量(含有置信区间)(m^3/s)

Table 10　Ecological flow rate in middle and lower Hanjiang River (including confidence intervals)(m^3/s)

月份	黄家港	襄阳	皇庄	沙洋	仙桃
1	631±36	669±55	709±44	743±34	953±33
2	675±47	683±54	690±47	759±38	937±39
3	659±52	742±52	864±47	888±37	916±47
4	495±37	716±32	820±38	852±33	766±43
5	363±60	488±68	514±89	632±90	486±71
6	640±62	1027±66	996±104	1117±103	1013±77
7	904±168	1135±148	1160±290	1236±278	1013±208
8	637±174	932±174	1143±264	1235±257	1013±206
9	574±264	976±245	1018±288	1118±258	1013±366
10	330±58	472±71	596±82	642±85	552±72
11	341±48	366±64	670±65	679±60	528±51
12	529±44	627±57	687±56	741±50	741±46

进一步对适宜生态流量占多年平均天然径流量比例进行合理性判别的评估后发现,多年平均来

水频率条件下,适宜生态流量占多年平均天然径流量比例始终保持在 50%以下.这一比例的控制有效地实现了经济社会发展与生态环境保护之间的用水关系的良好协调性[72].特别是在考虑到不同频率的来水状况时,所得结果不仅强化了多目标耦合计算的生态流量结论的科学性,还为在“丰增枯减”[73]模式下开展生态水量调度提供了重要的参考依据.因此,可以认定,以适宜生态环境全年需水量占多年平均天然径流量比例开展的合理性判别,在理论与实践上均具有高度可信性及引导意义.

本研究尚存两方面局限:一是生态流量时空耦合优化仍停留在控制断面层面,未能在流域尺度上统筹上下游连通、支干流汇入及多用水部门需求,难以兼顾防洪、供水、灌溉、发电与生态保护等综合目标;二是方法体系未显式纳入气候变化情景,忽视了未来降水格局与蒸散过程的不确定驱动,可能导致所获生态流量方案在长期尺度上失稳或失效.因此,后续研究需结合 RCP/SSP 情景气候预测、降尺度与偏差订正技术,并引入鲁棒优化方法,构"建流域尺度—多目标协同—气候情景驱动"的综合决策框架,以提升生态流量配置的系统适用性和长期稳健性.

4 结论

4.1 构建和实施了一种多目标生态流量耦合计算方法,实现了多目标生态流量成果的时间、空间耦合计算与协调平衡.

4.2 时间耦合结果表明,6~9 月为水质达标目标时段,生态流量分别为 1013,1013,1013,1013m^3/s.12 月~次年 4 月为水华防控目标时段,生态流量分别为 953,937,916,766,741m^3/s.5~10 月为鱼类产卵目标时段,生态流量分别为 486,1013,1013,1013,1013 和 552m^3/s.强调了在不同季节和水文状况下采用灵活的生态流量管理策略的必要性.

4.3 空间耦合结果表明,枯水期中游区域以水华防控为约束,下游段则主要考虑鱼类的产卵需求,而丰水期全段则以水质为主要约束,显示了生态流量管理措施需考虑不同区域在生态需求上的差异.

参考文献:

[1] 张 颖,侯庆志,田福昌,等.基于水质水量耦合模型的湟水西宁市段生态流量计算及模拟分析 [J]. 水力发电, 2023,49(8):6-13,120.
Zhang Y, Hou Q Z, Tian F C, et al. Ecological Flow Calculation and Simulation Analysis of Huangshui River in Xining Section Based on Water Quality and Water Quantity Coupling Model [J]. Water Power, 2023,49(8):6-13,120.

[2] 易 燃,谈广鸣,常剑波,等.基于分布流量法的长江宜昌段生态需水研究 [J]. 中国农村水利水电, 2023,(12):94-102.
Yi R, Tan G M, Chang J B, et al. Ecological Water Requirement in Yichang Section of the Yangtze River Based on Distribution flow Method [J]. China Rural Water and Hydropower, 2023,(12):94-102.

[3] 梁恒德,王启优,崔 琴,等.渭河上游水质时空变化及生态流量研究 [J]. 水利规划与设计, 2024,(7):34-42.
Liang H D, Wang Q Y, Cui Q, et al. Research on spatial-temporal variation of water quality and ecological discharge in the upper stream of Weihe river [J]. Water Resources Planning and Design, 2024,(7):34-42.

[4] 关于引江补汉工程环境影响报告书的批复 [EB/OL]. [2025-05-08].https://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/xxgk11/202206/t20220613_985368.html.
Approval of the Environmental Impact Report for the Jiang River Diversion to Supplement the Han River Project [EB/OL]. [2025-05-08].https://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/xxgk11/202206/t20220613_985368.html.

[5] 夏 军,林忠辉,占车生,等.长江流域水生态调度与长江模拟器研发 [J]. 中国科学院院刊, 2023,38(12):1767-1780.
Xia J, Lin Z H, Zhan C S, et al. Ecological operation in Yangtze River basin with Yangtze River Simulator [J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2023,38(12):1767-1780.

[6] 农翕智,赖 程,靖 争,等.基于 Copula 函数的汉江生态流量定值及水华调控风险研究 [J]. 长江科学院院报, 2025,42(5):34-42.
Nong X Z, Lai C, Jing Z, et al. A Copula-based Comprehensive Method for River Ecological Flow Quantification and Algal Bloom Risk Assessment in the Hanjiang River, China [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2025,42(5):34-42.

[7] 谢 敏,王新才,管光明,等.汉江中下游“水华”成因分析及其对策初探 [J]. 人民长江, 2006,(8):43-45.
Xie M, Wang X C, Guan G M, et al. Preliminary Analysis of the Causes of Algal Blooms and Countermeasures in the Middle and Lower Reaches of the Han River [J/OL]. Yangtze River, 2006,(8):43-45.

[8] 易 燃,陈小娟,陶江平,等.改进的栖息地法求解多种产漂流性卵鱼类生态流量方法研究 [J]. 中国农村水利水电, 2024,(9):45-51,59.
Yi R, Chen X J, Tao J P, et al. A Study on the Improved Habitat Method for Solving the Ecological Flow of Various Fish With Pelagic Eggs [J]. China Rural Water and Hydropower, 2024,(9):45-51,59.

[9] Mamun A, Shawwash Z, Abdalla A, et al. Application of a goal programming algorithm to incorporate environmental requirements in a multi-objective Columbia River Treaty Reservoir optimization model [J]. Canadian Water Resources Journal / Revue canadienne des ressources hydriques, 2015,40(1):111-125.

[10] Piman T, Cochrane T A, Arias M E, et al. Assessment of flow changes from hydropower development and operations in Sekong, Sesan, and Srepok Rivers of the Mekong Basin [J]. Journal of Water Resources

Planning and Management, 2013,139(6):723−732.

[11] Yang R, Feng J, Tang J, et al. Incorporating multilevel dynamic game and robust multi−objective optimization for cross−border river governance: A Lancang-Mekong case study [J]. Journal of Cleaner Production, 2025,513:145702.

[12] 潘雅婧,王仰麟,彭　建,等.基于小波与 R/S 方法的汉江中下游流域降水量时间序列分析 [J]. 地理研究, 2012,31(5):811−820.
Pan Y J, Wang Y L, Peng J, et al. Precipitation change in middle and lower reaches of Hanjiang River: Based on wavelet analysis and R/S analysis [J]. Geographical Research, 2012,31(5):811−820.

[13] 湖北省水利厅 [EB/OL]. [2025−02−07]. https://slt.hubei.gov.cn/.
Hubei Provincial Department of Water Resources [EB/OL]. [2025−02−07]. https://slt.hubei.gov.cn/.

[14] 郑继利.汉江中下游水生态环境演变情况研究 [D]. 荆州:长江大学, 2019.
Zheng J L. Study on the evolution of water ecological environment in the middle and lower reaches of Hanjiang River [D]. Jingzhou: Yangtze University, 2019.

[15] 杨　卫,李瑞清.长江和汉江总磷污染特征及成因分析 [J]. 中国农村水利水电, 2021,(1):42−47.
Yang W, Li R Q. Characteristics and causes of the total phosphorus pollution in the Yangtze River and Han River [J]. China Rural Water and Hydropower, 2021,(1):42−47.

[16] 何术锋,佘星源,林育青,等.汉江中下游水质时空特征及环境流量确定 [J]. 水力发电学报, 2024,43(11):17−26.
He S F, She X Y, Lin Y Q, et al. Temporal and spatial characteristics of water quality and environmental discharge in the middle and lower reaches of Hanjiang River [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2024,43(11):17−26.

[17] 何术锋,胡　威,杨早立,等.汉江中下游藻华暴发特征及生态流量阈值 [J]. 中国环境科学, 2024,44(1):363−370.
He S F, Hu W, Yang Z L, et al. Characteristics of algal bloom and its threshold of ecological flow in the middle and lower Hanjiang River [J/OL]. China Environmental Science, 2024,44(1):363−370.

[18] 张　辉,曾晨军,李　婷,等.基于四大家鱼产卵需求的汉江中下游生态流量研究 [J]. 水生态学杂志, 2022,43(3):1−8.
Zhang H, Zeng C J, Li T, et al. Ecological flow in the mid−lower Hanjiang River based on spawning demands of the four major Chinese carps [J/OL]. Journal of Hydroecology, 2022,43(3):1−8.

[19] 薛笑薇,苗　蔚,欧延静,等.基于水文水力学水生态结合法的大渡河生态流量研究 [J]. 生态学报, 2024,44(15):6487−6498.
Xue X W, Miao W, Ou Y J, et al. Study on ecological flow of Dadu River based on combined hydrology−hydraulics−water ecology method [J]. Acta Ecologica Sinica, 2024,44(15):6487−6498.

[20] 李正勤,柯浩成,田晋华,等.基于不同水文学方法的河流生态基流研究——以渭河甘肃段为例 [J]. 水土保持研究, 2023,30(4):177−183.
Li Z Q, Ke H C, Tian J H, et al. Study on river ecological base flow based on different hydrology methods——A case study of Weihe River in Gansu Province [J/OL]. Research of Soil and Water Conservation, 2023,30(4):177−183.

[21] 李丽兰.运用圣维南等效原理简化边界条件的验证及分析 [J]. 红水河, 2019,38(1):35−37.
Li L L. Verification and Analysis of Simplified Boundary Condition by Saint−Venant Equivalence Principle [J]. Hongshui River, 2019,38(1):35−37.

[22] 董文军,杨则燊.一维圣维南方程的反问题研究与计算方法 [J]. 水利学报, 2002,(9):61−65.
Dong W J, Yang Z S. Calculation method for inverse problem of 1−D St. Venant equations [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2002,(9):61−65.

[23] 贾瑞鹏,李桂秋,窦　明,等.生态补水对孝妇河湿地水华的预防效果模拟 [J]. 中国环境科学, 2024,44(1):121−131.
Jia R P, Li G Q, Dou M, et al. Simulation of the preventive effect of ecological water replenishment on hydrophobia in Xiaofu River wetlands [J]. China Environmental Science, 2024,44(1):121−131.

[24] 马奥兰,刘　慧,毛胜军,等.汉江下游河水−地下水侧向交互带中溶解态锰的分布特征 [J]. 地球科学, 2022,47(2):729−741.
Ma A L, Liu H, Mao S J, et al. Distribution characteristics of dissolved manganese in the lateral hyporheic zone between river and groundwater in the lower reaches of the Han River [J]. Earth Sciences, 2022,47(2):729−741.

[25] 窦　明,谢　平,夏　军,等.南水北调中线工程对汉江水华影响研究 [J]. 水科学进展, 2002,(6):714−718.
Dou M, Xie P, Xia J, et al. Influence of the water transfer project from south to north (middle route) on algalbloom in Hanjiang River [J]. Advances in Water Science, 2002,(6):714−718.

[26] Chatila J G, Townsend R D. Modeling of pollutant transport in compound open channels [J]. Canadian Water Resources Journal, 1998,23(3):259−271.

[27] 黄　鹏,田腾飞,张文安,等.水动力条件对水体中藻类生长的抑制作用 [J]. 环境工程, 2018,36(12):64−69.
Huang P, Tian T F, Zhang W N, et al. Inhibition of algae growth in water by hydrodynamic force [J]. Environmental Engineering, 2018, 36(12):64−69.

[28] 周　静,苟　婷,张洛红,等.流速对不同浮游藻类的生长影响研究 [J]. 生态科学, 2018,37(6):75−82.
Zhou J, Gou T, Zhang L H et al. The effect of flow velocity on the growth of different phytoplankton [J]. Ecological Science, 2018, 37(6):75−82.

[29] 魏　桢,贾海峰,姜其贵,等.再生水补水河道中流速对浮游藻类生长影响的模拟实验 [J]. 环境工程学报, 2017,11(12):6540−6546.
Wei Z, Jia H F, Jiang Q G, et al. Simulation experiment of phytoplankton growth induced by flow velocity in rivers replenished with reclaimed water [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2017,11(12):6540−6546.

[30] Belzile C, Gosselin M. Free−living stage of the unicellular algae *Coccomyxa* sp. parasite of the blue mussel (*Mytilus edulis*): low−light adaptation, capacity for growth at a very wide salinity range and tolerance to low pH. J. Invertebr. Pathol., 2015,132:201−207.

[31] 段　扬,秦　韬,王京晶,等.丹江口水库三维水动力模拟研究 [J]. 人民黄河, 2018,40(3):119−122,156.
Duan Y, Qin T, Wang J J, et al. research on Three−dimensional hydrodynamic simulation of Danjiangkou Reservoir [J]. Yellow River, 2018,40(3):119−122,156.

[32] 张素香,许新发,徐　兴,等.鄱阳湖水龄季节性变化特征 [J]. 湖泊科学, 2018,30(1):199−210.

Zhang S X, Xu X F, Xu X, et al. Seasonal variations of water age in Lake Poyang [J]. Journal of Lake Sciences, 2018,30(1):199−210.

[33] 张永勇,花瑞祥.基于水动力−水质模型的湖库纳污能力量化 [J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2016,37(5):33−39.
Zhang Y Y, Hua R X. Quantization of pollutants bearing capacity in lakes or reservoirs based on hydrodynamic−water quality model [J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition), 2016,37(5):33−39.

[34] 沈尚荣.苏州中心城区河网水动力水质水生态模型及联控联调方案研究 [D]. 武汉:华中科技大学, 2019.
Shen S R. Study on hydrodynamic−water quality−water ecology model and joint control schemes of river network in central area of Suzhou [D/OL]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2019.

[35] 邹 锐,周 璟,孙永健,等.垂向水动力扰动机的蓝藻控制效应数值实验研究 [J]. 环境科学, 2012,33(5):1540−1549.
Zou R, Zhou J, Sun Y J, et al. Numerical Experiment Study on the Algae Suppression Effect of Vertical Hydrodynamic Mixers [J/OL]. Environmental Science, 2012,33(5):1540−1549.

[36] 徐婉珍.基于EFDC的潘家口水库富营养化模拟 [J]. 安徽农业科学, 2015,43(34):115−118,290.
Xu W Z. Simulation of Eutrophication in panjiakou reservoir based on EFDC model [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2015,43(34): 115−118,290.

[37] 李一平,王静雨,滑磊.基于 EFDC 模型的河道型水库藻类生长对流域污染负荷削减的响应——以广东长潭水库为例 [J]. 湖泊科学, 2015,27(5):811−818.
Li Y P, Wang J Y, Hua Lei. Response of algae growth to pollution reduction of drainage basin based on EFDC model for channel reservoirs: A case of Changtan Reservoir, Guangdong Province [J]. Journal of Lake Sciences, 2015,27(5):811−818.

[38] 龚 然,何 跃,徐力刚,等.EFDC(Environmental Fluid Dynamics Code)模型在湖库水环境模拟中的应用进展 [J]. 海洋湖沼通报, 2016,(6):12−19.
Gong R, He Y, Xu L G, et al. The application progress of environmental fluid dynamics code (EFDC) in lake and reservoir environment [J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 2016, (6):12−19.

[39] 赵尚飞,杜彦良,王 瑜,等.松花江梧桐河生态修复工程鱼类栖息地模拟及调查 [J]. 水生态学杂志, 2019,40(5):1−8.
Zhao S F, Du Y L, Wang Y, et al. Wutong river fish habitat survey and modeling under ecological restoration [J]. Journal of Hydroecology, 2019,40(5):1−8.

[40] 张 胜,林 莉,王 珍,等.汉江中下游丰枯水期水质时空变化特征 [J]. 长江科学院院报, 2021,38(8):47−53.
Zhang S, Lin L, Wang Z, et al. Spatio−temporal variation of water quality in middle−lower Hanjiang River [J]. Journal of Changjiang River Scientific Research Institute, 2021,38(8):47−53.

[41] 陈 峰,王文静,何 涛,等. 2022 年夏季汉江中下游水华成因及对策分析 [J]. 人民长江:1−13.
Chen F, Wang W J, He T, et al. Analysis of cause and countermeasures for summer bloom in the middle and lower reaches of Hanjiang River in 2022 [J]. Yangtze River, 2022:1−13.

[42] 安堃达,张 帅,程继雄,等.长江干流湖北段沿江城市水质状况及变化趋势研究 [J]. 环境科学与管理, 2020,45(7):156−160.
An K D, Zhang S, Cheng J X, et al. Analysis on water quality status and change trend of cities along Yangtze River in Hubei [J]. Environmental Science and Management, 2020,45(7):156−160.

[43] 李大鸣,柳瑞英,罗 珊,等.渤海新区海岸带陆域环境研究Ⅰ:污染负荷估算模型 [J]. 干旱区资源与环境, 2020,34(1):71−78.
Li D M, Liu R Y, Luo S, et al. Land environment of coastal zone in Bohai New AreaⅠ: Pollution load estimation model [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2020,34(1):71−78.

[44] 郭洪鹏,张 维,宋文华,等.控制单元农业面源污染负荷总量分配方法 [J]. 水电能源科学, 2019,37(11):74−78.
Guo H P, Zhang W, Song W H, et al. Study on distribution method of total load of non−point agricultural pollution in control unit [J]. Water Resources and Power, 2019,37(11):74−78.

[45] 包 鑫,江 燕.半干旱半湿润地区流域非点源污染负荷模型研究进展 [J]. 应用生态学报, 2020,31(2):674−684.
Bao X, Jiang Y. Research progress on non−point source pollution models for semi−arid and semi−humid watersheds [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2020,31(2):674−684.

[46] 方浩川.扬州市河网水动力及水质模型建立与应用 [D]. 扬州:扬州大学, 2021.
Fang H C. Establishment and application of hydrodynamic and water quality model for Yangzhou River network [D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2021.

[47] Rantz S E. Measurement and computation of streamflow [M]. US Department of the Interior, Geological Survey, 1982.

[48] Batley G E. Quality assurance in environmental monitoring [J]. Marine Pollution Bulletin, 1999,39(1−12):23−31.

[49] Richter B, Baumgartner J, Wigington R, et al. How much water does a river need [J]. Freshwater Biology, 1997,37(1):231−249.

[50] 廖耀星,高玮志,张 轩,等.基于深度学习和水动力模型的洪水演进快速模拟方法 [J]. 中国防汛抗旱, 2024,34(2):16−22.
Liao Y X, Gao W Z, Zhang X, et al. Rapid simulation of flood routing using deep learning and hydrodynamic model [J/OL]. China Flood & Drought Management, 2024,34(2):16−22.

[51] 李修峰,黄道明,谢文星,等.汉江中游江段四大家鱼产卵场现状的初步研究 [J]. 动物学杂志, 2006,(2):76−80.
Li X F, Huang D M, Xie W X, et al. Spawning sites of four major Chinese carps in the middle reaches of Hanjiang River [J/OL]. Chinese Journal of Zoology, 2006,(2):76−80.

[52] 葛金金,彭文启,张汶海,等.确定河道内适宜生态流量的几种水文学方法——以沙颍河周口段为例 [J]. 南水北调与水利科技, 2019, 17(2):75−80.
Ge J J, PengW Q, Zhang W H, et al. Comparison of several hydrological methods to determine the ecological flow for instream river [J]. South−to−North Water Transfer sand Water Science & Technology, 2019,17(2):75−80.

[53] 张 强,崔 瑛,陈永勤.基于水文学方法的珠江流域生态流量研究 [J]. 生态环境学报, 2010,19(8):1828−1837.
Zhang Q, Cui Y, Chen Y Q. Evaluation of ecological instream flow of the Pearl River basin, south China [J/OL]. Ecology and Environmental Sciences, 2010,19(8):1828−1837.

[54] 李　强,王俏俏,陈红丽,等.生态流量方法应用现状研究 [J]. 生态学报, 2024,44(1):36−46.
Li Q, W Q Q, Chen H L, et al. Progress and perspectives on ecological flow assessment methods in China.Acta Ecologica Sinica, 2024,44(1): 36−46.

[55] 李新宇.基于生境模拟法和目标水质法的生态流量研究 [D]. 山东农业大学, 2024.
Li X Y. Study on Ecological Flow Based on Habitat Simulation Method and Target Water Quality Method [D/OL]. Shandong Agricultural University, 2024.

[56] 姚　娜,陈　方,甘升伟,等.协同学在水资源可持续利用评价中的应用研究 [J]. 水文, 2017,37(6):29−34.
Yao N, Chen F, Gan S W, et al. Application of synergetics in evaluation of sustainable water resources utilization [J]. Journal of China Hydrology, 2017,37(6):29−34.

[57] 田一鹏.基于协同学理论的辽宁省水资源可持续利用评价 [J]. 水利技术监督, 2019,(1):160−162,174,178.
Tian Y P. Evaluation of sustainable utilization of water resources in Liaoning province based on synergetics theory [J]. Technical Supervision in Water Resources, 2019,(1):160−162,174,178.

[58] 李晶晶.基于生态健康稳定的汉江中下游干流生态需水量研究 [D]. 武汉:华中农业大学, 2023.
Li J J. Research on ecological water demand of the middle and lower reaches of the han river based on ecological health and stability [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2023.

[59] 殷大聪,尹正杰,杨春花,等.控制汉江中下游春季硅藻水华的关键水文阈值及调度策略 [J]. 中国水利, 2017,(9):31−34.
Yin D C, Yin Z J, Yang Chunhua, et al. Key hydrological thresholds related to algae bloom in middle and lower reaches of Hanjiang River and studies on mitigation measures [J]. China Water Resources, 2017, (9):31−34.

[60] 刘　强,陈　进,黄　薇.南水北调工程实施后汉江水华发生可能性研究 [J]. 长江流域资源与环境, 2005,(1):60−65.
Liu Q, Chen J, Huang W. Predictions on water sources and environment carrying ability in hanjiang river after the implementation of south to north water diversion project—possibilities of algal blooming occurrence in backwater area in xinglong hinge and xiangfan reach of the hanjiang river [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2005,(1):60−65.

[61] 费启航,彭　涛,由星莹,等.基于四大家鱼栖息地模拟的汉江下游生态流量研究 [J]. 人民长江, 2023,54(10):35−43.
Fei Q H, Peng T, You X Y, et al. Ecological flow in lower Hanjiang River based on habitat simulation of four major Chinese carps [J]. Yangtze River, 2023,54(10):35−43.

[62] 孟昊杰,王立权,张　柠,等.基于水资源空间耦合协调模型的太原市水资源承载力评价 [J]. 黑龙江大学工程学报, 2023,14(1):60−68.
Meng H J, Wang L Q, Zhang N, et al. Evaluation of water resources carrying capacity in Taiyuan City based on spatial coupling coordination model of water resources [J/OL]. Journal of Engineering of Heilongjiang University, 2023,14(1):60−68.

[63] Kim Y W, Lee J W, Woo S Y, et al. Design of Ecological flow (E−flow) considering watershed status using watershed and physical habitat models [J]. Water, 2023,15(18):3267.

[64] Ghannem S, Bergillos R J, Paredes−Arquiola J, et al. Coupling hydrological, habitat and water supply indicators to improve the management of environmental flows [J]. Science of The Total Environment, 2023,898:165640.

[65] 马兴华,周买春,解河海.基于区间可行域的河流生态流量多方法耦合模型研究 [J]. 人民珠江, 2018,39(6):37−40,76.
Ma X H, Zhou M C, Xie H H. Research on multi−method coupled model of river ecological flow based on interval feasible regions [J]. Pearl River, 2018,39(6):37−40,76.

[66] 吴兴华,殷大聪,李　翀,等.2015~2016 年汉江中下游硅藻水华发生成因分析 [J]. 水生态学杂志, 2017,38(6):19−26.
Wu X H, Yin D C, Li C, et al. Analysis of factors Influencing diatom blooms in the middle and lower Hanjiang River [J/OL]. Journal of Hydroecology, 2017,38(6):19−26.

[67] 王暄宇,顾文权,胡雅洁,等.变化环境下汉江流域水循环要素响应规律 [J]. 中国农村水利水电, 2024,(7):35−44.
Wang X Y, Gu W Q, Hu Y J, et al. Response law of water cycle elements in Hanjiang River Basin under changing environment [J]. China Rural Water and Hydropower, 2024,(7):35−44.

[68] 王　雪,李　雨,刘秀林,等.水库及引调水工程影响下汉江中下游水位和流量演变分析 [J]. 水文, 2025,45(3):54−63.
Wang X, Li Y, Liu X L, et al. Evolution of the water level and discharge in the middle and lower reaches of the Han River under the influence of reservoirs and water diversion projects [J]. Journal of China Hydrology, 2025,45(3):54−63.

[69] 陈淑娴,尚睿华,冯予诚,等.兴隆水利枢纽对汉江河岸带氮素分布特征的影响 [J]. 水文地质工程地质, 2021,48(3):182−190.
Chen S X, Shang R H, Feng Y C, et al. Effects of Xinglong Hydro−Junction on nitrogen distribution in the Hanjiang River riparian zone [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2021,48(3):182−190.

[70] Shen L, Dou M, Xia R, et al. Effects of hydrological change on the risk of riverine algal blooms: case study in the mid−downstream of the Han River in China [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2021,28(16):19851−19865.

[71] Rosenfeld J S. Developing flow-ecology relationships: Implications of nonlinear biological responses for water management [J]. Freshwater Biology, 2017,62(8):1305−1324.

[72] 张金艳.大通河流域河流水文健康评价及生态流量研究 [D]. 西安:西北大学, 2021.
Zhang J Y. Study on hydrological health assessment and ecological flow in Datong River basin [D/OL]. Xi′an: Northwest University, 2021.

[73] 王镜淋.基于用水总量控制的王英水库水量调度模型研究 [D]. 武汉:武汉大学, 2018.
Wang J L. A study on reservoir operation model and its application based on the control of gross water consumption [D]. Wuhan: Wuhan University, 2018.

作者简介：佘星源(2001−),男,安徽芜湖人,西安理工大学硕士研究生,主要从事水力学及河流动力学方面研究.发表论文 1 篇.2230420060@stu.xaut.edu.cn.