

城市湖泊生态修复的水质响应研究

谢季遥¹, 陈星¹, 许钦², 崔广柏¹, 朱丽丽³

(1. 河海大学 水文水资源学院, 江苏 南京 210098; 2. 南京水利科学研究院 水文水资源研究所, 江苏 南京 210029; 3. 江苏省常熟市水利技术推广站, 江苏 常熟 215500)

摘要: 生态修复对遏制城市湖泊生态系统的退化意义重大, 寻找一种有效且简单的生态修复效果预测方法有利于进一步推动湖泊修复研究的发展。利用综合污染指数法、基于专家调查法的湖泊污染物浓度确定方法及水质提升贡献度分析了生态修复的水质响应, 并采用基于污染负荷平衡的水质模型预测了生态修复措施作用下的潜龙渠水质。结果表明: 4种污染物浓度均有下降, 潜龙渠水质提升显著, 但各污染物对不同修复措施的响应程度不同, COD的浓度控制需要污染源控制与修复净化的共同支撑, TN对各项措施的敏感性接近, TP、NH₃-N分别对污染源控制、生态补水敏感性最高。情景预测表明, 依据水质响应关系制定的生态修复方案, 能够稳定保持潜龙渠的生态修复效果。

关键词: 水质响应; 城市湖泊; 生态修复; 综合污染指数; 污染物浓度预测; 污染源敏感性; 情景组合

中图分类号: X826 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-643X(2019)01-0053-07

Study on water quality response for urban lake ecological restoration

XIE Jiyao¹, CHEN Xing¹, XU Qin², CUI Guangbo¹, ZHU Lili³

(1. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Hydrology and Water Resources Department, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing

210029, China; 3. Water Resources Technology Promotion Station of Changshu, Changshu 215500, China)

Abstract: Ecological restoration is of great significance in curbing the degradation of urban lake ecosystems. Finding an effective and simple prediction method for ecological restoration effects is conducive to further promote lake restoration research. In this paper, water quality response to ecological restoration is analyzed using comprehensive pollution index method, lake pollutant concentration determination method based on Delphi method and contribution to water quality improvement, and the water quality model based on pollution load balance is used to predict Qianlong lake's water quality under the ecological restoration measures. Results of calculation and evaluation illustrated that all of the concentrations of four pollutants declined and the water quality of Qianlong Lake significantly improved, while the response degree of different pollutants to ecological restoration measures was different. The control of COD concentration requires supports of pollution source control and repair purification. The sensitivity of TN to different measures are close. TP and NH₃-N showed highest sensitivity to pollution control and ecological hydrating, respectively. Scenario prediction showed that the ecological restoration scheme based on water quality response relationship enables Qianlong lake to maintain the ecological restoration effect stably.

Key words: water quality response; urban lake; ecological restoration; comprehensive pollution index; pollutant concentration prediction; sensitivity of pollution source; scene combination

收稿日期: 2018-07-25; 修回日期: 2018-09-19

基金项目: 国家自然科学基金项目(51579148, 51779146)

作者简介: 谢季遥(1994-), 女, 福建龙岩人, 硕士研究生, 研究方向为环境水文与水环境保护。

通讯作者: 陈星(1980-), 女, 新疆伊犁人, 博士, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为环境水文与水环境保护。

1 研究背景

在人类活动的强烈干扰下,城市浅水湖泊生态系统呈现逐步退化的趋势^[1-2]。修复城市湖泊生态系统、恢复和维持湖泊水体良好水质的措施研究成为热点^[1-3]。目前,运用恢复措施改善湖泊水环境质量的研究已经取得了一些成果^[4-10],疏浚、磷灭活和生物操纵等措施已经在工程实际中广泛应用^[9-14],一些学者通过建立数学模型分析湖泊营养盐的迁移及水质对生态修复措施响应^[6-10],但多数预测方法较为复杂、对资料的要求较高^[9-10],因此湖泊水质预测与水环境改善效果评价的简单方法研究具有现实意义。潜龙渠位于水网密集、水力联系紧密的苏州盛泽镇,受到发达的印染纺织业、农业耕种养殖以及生活污水的影响,水质逐年恶化^[15]。本文以潜龙渠为研究对象,采用水质综合污染指数法、基于专家调查法的湖泊污染物浓度确定方法及水质提升贡献度分析了生态修复的水质响应,运用基于污染负荷平衡的水质模型模拟、预测了生态修复措施作用下的水质变化,为城市浅水湖泊生态环境恢复提供参考。

2 材料和方法

2.1 研究对象

潜龙渠位于苏州市盛泽镇西北,地处北亚热带海洋性季风湿润区,气候温和,四季分明,雨量充沛,秋、冬季以西北风为主,春、夏季以东南风为主。多

年平均气温 15.3℃,多年平均降雨量 1 074.1mm,多年平均相对湿度 80%,多年平均风速 3.8 m/s。潜龙渠为圩内湖荡,圩内水面率 9.51%,湖泊平均水深 1.69 m,常水位下湖泊面积 0.27 km²,湖泊容积 46.31 × 10⁴ m³。周边水系呈现“三横两纵”形式,主要入湖河道为野河荡、长荡,出湖河道有燕头浜、金门头港,出、入湖水量基本相同,水系格局见图 1。湖泊中的营养物质由于印染纺织业等污染的影响逐年累积,生态环境遭受严重的破坏。通过生态修复,将喜潭潭和潜龙渠合并成一个湖泊,以发挥城市湖泊生态景观示范工程的辐射作用。

2.2 潜龙渠生态修复措施与水质监测

潜龙渠的生态修复分为 3 个阶段。第 1 阶段从 2011 年 6 月至 2012 年 8 月,控制外源污染,主要为生活、工业源的截污纳管。第 2 阶段从 2012 年 4 月至 2013 年 7 月,生态清淤与湖泊形态调整。合并喜潭潭和潜龙渠,优化湖泊岸线,并进行生态清淤。监测结果表明,潜龙渠底泥厚度 0.5 ~ 2.0 m, TN、TP、NH₃-N 和有效磷的含量分别在 1 421 ~ 1 567、1 221 ~ 1 505、608 ~ 731、878 ~ 1 012 mg/kg,底泥内氮、磷等污染物质含量较高。第 3 阶段从 2013 年 8 月至 2014 年 10 月,在形态调整的基础上进一步实施生态修复,建设生态护坡、人工湿地和生态浮床(位置见图 2),并进行水生植物恢复与生物操纵。潜龙渠形态调整前后湖泊形态参数对比见表 1,其中形态调整前的参数值为喜潭潭与潜龙渠之和。

表 1 潜龙渠形态调整前后湖泊形态参数对比表

对比时段	岸线长度/km	湖泊面积/km ²	岸线发展系数	湖底平均高程/m	最大水深/m	湖底平均坡度	常水位蓄水量/10 ⁴ m ³
形态调整前	4.94	0.27	2.66	-0.69	3.20	0.061	46.31
形态调整后	5.94	0.26	2.00	-0.38	3.60	0.058	46.14

注:形态要素参数值在常水位(2.60 m)下测算得到。

水质监测从 2011 年 6 月持续至 2014 年 10 月。2011 年 6 月至 11 月为现场调查及湖泊外源污染治理阶段,水质监测点位见图 1。2012 年 4 月至 2013 年 7 月,由于清淤工程的进行,无法监测湖内的水质情况,将监测点设置在野河荡、长东荡和新安港。2014 年 4 月,形态调整完成后的湖泊水质监测点位见图 2。水质监测为潜龙渠生态修复前后的水质变化以及各污染物的生态修复响应关系分析提供依据。基于现阶段的湖泊生态修复水质响应关系,设计由不同规模、不同类型的生态修复措施组成恢复方案,并预测各恢复方案作用下潜龙渠的水质变化。

2.3 研究方法

2.3.1 水质评价方法

(1)水质综合污染指数法。对比水质指标的实测值与其对应的水环境功能区类别的水质标准,分级评价水质,并通过污染贡献度识别主要污染物,直观地反映生态恢复措施对水质的影响^[5,16]。

$$Z = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Z_i = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{c_i}{B_i} \quad (1)$$

式中: Z 为综合污染指数; Z_i 为污染物 i 的污染指数; c_i 为污染物 i 的实测浓度, mg/L; B_i 为《地表水环境质量标准》(GB3838 - 2002)中污染物 i 的标准

值,mg/L; n 为污染物个数。

$$K_i = Z_i / (nZ) \times 100\% \quad (2)$$

式中: K_i 为污染物 i 的污染贡献度。



图 1 潜龙渠周边水系及水质监测点位图

(2) 基于专家调查法的湖泊污染物浓度确定方法。潜龙渠的水质监测点分布在湖内及主要出入湖河道。各水质监测点的监测数据可能存在差异,并且在生态修复过程中,其位置因湖泊形态的改变有所调整。为全面反映生态修复作用下的水质变化,采用基于专家调查法的湖泊污染物浓度确定方法综合分析各水质采样点的监测数据。

水质监测点分为湖内和出入湖河道两类,两两比较相同类型中不同的水质采样点,根据表 3 的评分标准赋分。

表 3 基于专家调查法的湖泊污染物浓度确定方法赋分表

重要性比较	极为重要	重要	同等重要	次要	极为次要
分数	4	2	1	0.5	0.25

为了便于水质变化的比较,对各水质采样点得分进行归一化处理,得到权重系数。对各水质监测点的监测数据进行加权计算即可确定污染物的浓度:

$$\beta_j = \frac{g_j}{\sum g_j} \quad (3)$$

$$p_i = \sum (\beta_j c_{i,j}) \quad (4)$$

式中: β_j 为水质监测点 j 的权重系数; g_j 为水质监测点 j 的得分; p_i 为污染物 i 的加权平均浓度,mg/L; c_{ij} 为污染物 i 在水质监测点 j 测得的浓度,mg/L。

(3) 水质提升贡献度。对比生态修复措施实施前后的水质指标值,评价各项生态修复措施的水质改善贡献度。

$$\lambda_i = \frac{(p_i - p'_i)}{p_i} \times 100\% \quad (5)$$

式中: λ_i 为某项生态修复措施对提升水质指标 i 的

表 2 综合污染指数对应的水质分级

综合污染指数	≤ 0.25	0.26 ~ 0.40	0.41 ~ 0.50	0.51 ~ 0.99	≥ 1
水质等级	优质	良好	轻度污染	中度污染	重度污染



图 2 潜龙渠形态调整后水质监测及生态修复工程点位图

贡献度; p_i 和 p'_i 分别为生态修复前后污染物 i 的浓度,mg/L。

2.3.2 基于污染负荷平衡的水质模型 生态修复措施将通过污染负荷的削减、湖泊水体自净能力提升等方面的作用,提升潜龙渠的水质。考虑生态修复措施的作用机制,从污染物质量平衡方程的角度概化潜龙渠的水质模型:

$$V_i \frac{dp_i}{dt} = W_i + \sum (Q_{in} p_{i,in}) - \sum (Q_{out} p_{i,out}) - p_i E_i - \eta_i p_i \quad (6)$$

式中: V_i 为湖泊容积,km³; p_i 为湖泊中污染物 i 的浓度,mg/L; W_i 为污染物 i 的负荷量,指除通过入湖河道以外进入湖泊的外源污染量,t/a; $p_{i,in}$ 、 $p_{i,out}$ 为污染物 i 流入、流出湖泊的浓度,mg/L; E_i 为污染物 i 的综合降解系数,d⁻¹; η_i 为污染物 i 的沉积因数,km³/a。

微分方程(6) 提供了计算污染物变化趋势的定量框架。借助矩阵求解微分方程^[4-7]:

$$[A][p] = \{W\} \quad (7)$$

$$[A] = [Q_{out} + E_i + \eta_i \quad -Q_{in}] \quad (8)$$

$$[p] = [p_i \quad p_{i,in}] \quad (9)$$

运用 Matlab 进行矩阵运算即可得到污染物浓度。考虑到湖泊的内源污染可能随时间呈加重趋势、水体自净能力将随健康水生态系统的建立逐步提升,通过专家咨询等方式,运用校正系数 δ_i 校准模拟结果,即:

$$P_i = p_i + \delta_i \quad (10)$$

式中: P_i 为校正后的污染物 i 的模拟值,mg/L; δ_i 为校正系数。

3 结果与分析

3.1 生态修复的水质总体响应过程

根据公式(1)计算潜龙渠的综合污染指数,结果见图3。由图3可见,随着生态修复工程的逐步实施,潜龙渠的综合污染指数大幅降低,2014年10月已降至0.645,水质等级由重度污染转变为中度污染,生态修复对潜龙渠水质的积极影响已经初步显现。综合污染指数的降幅表明,外源污染控制对水质提升的贡献最为突出,其次是生态清淤与湖泊形态调整,修复净化措施起到了巩固、维持生态恢复成果的作用。

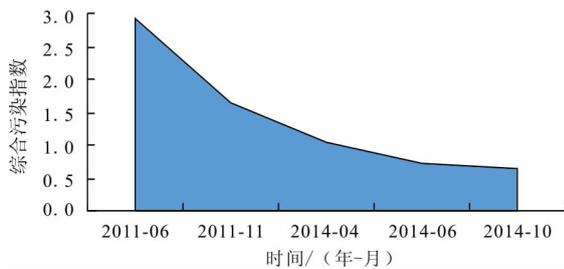


图3 潜龙渠综合污染指数变化图

3.2 污染物对生态修复的响应过程

水质监测点权重系数计算结果见表4。运用基

于专家调查法的湖泊污染物浓度确定方法综合分析各水质采样点的监测数据,得到污染物的浓度变化过程,并根据公式(2)计算污染物的贡献度,结果见图4。由图4可知,4种污染物浓度均有较大幅度的降低,水质由生态修复前的劣V类提升至Ⅲ~Ⅳ类,水环境状况改观显著。图4(b)、4(d)显示,COD和TN的污染贡献度较大,分别为38.43%和32.57%,是潜龙渠污染物的主要控制指标。目前的生态修复方案分别将两者的浓度降至15.0~23.7 mg/L、0.62~1.82 mg/L。表征有机污染的COD的污染贡献度在生态修复的实施过程中升高,原因可能是其他污染物浓度得到抑制的同时,水生植物的恢复使湖泊内的有机物含量升高。出入湖河道的TN浓度最高值低于湖内,其浓度最低值与湖内接近,故推测TN超标主要受内源污染的影响。尽管COD、TN的代谢能力将随着水生态健康系统的建立逐步提升,但在未来的生态修复中需着重考虑水生植物的残留生物量以及TN的内源污染控制。图4(a)、4(c)表明,现阶段的生态修复方案已有效控制了TP和NH₃-N的浓度,达到Ⅱ类或Ⅲ类标准。由图4(a)可见,夏季湖内TP浓度较高,因此夏季的TP浓度控制是未来污染控制中关注的重点。

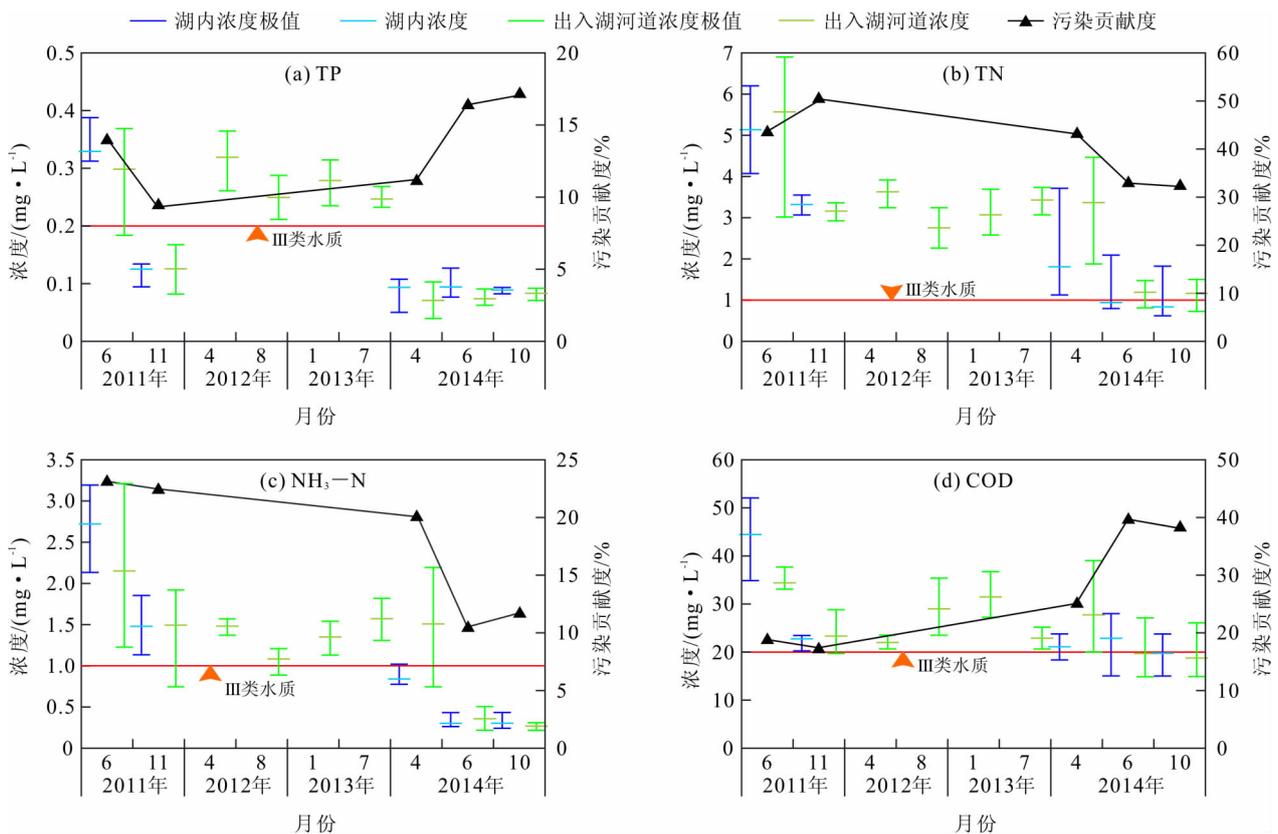


图4 2011-2014年潜龙渠污染物浓度变化图

表 4 各水质监测点的权重系数

L1	L2	L3	L4	L5	S1	S2	S3	S4	S5	S6
0.04	0.35	0.17	0.35	0.09	0.15	0.30	0.30	0.15	0.03	0.07
L'1	L'2	L'3	L'4	L'5	S'1	S'2	S'3	S'4		
0.02	0.19	0.37	0.37	0.05	0.12	0.50	0.25	0.13		

3.3 潜龙渠水质情景预测

3.3.1 水质模型的建立与参数率定 潜龙渠是一个面积较小的城市湖泊,全湖水质在空间上差异性较小,因此假定采取的湖泊生态修复措施改善水质时能达到全湖均匀的效果。采用基于污染负荷平衡的水质模型预测生态修复作用下的潜龙渠水质。潜龙渠的形态参数见表 1。模型初始条件为夏、秋季湖内污染物的浓度值,分别采用基于专家调查法的湖泊污染物浓度确定方法综合分析 2014 年 6 月、10 月湖内各水质采样点的监测值得到的结果,见表 5。边界条件为污染物经河道流入、流出潜龙渠的量以及负荷量。经测量,入湖河道野河荡、长东荡的平均流量分别为 3、1.5 m³/s,出湖河道新安港、人福港的平均流量分别为 2、2.5 m³/s。经过污染源控制,潜龙渠现状入湖污染量见表 5。

表 5 潜龙渠污染物浓度值及入湖污染量

污染物	污染浓度/(mg · L ⁻¹)		入湖污染量/(t · a ⁻¹)
	夏季	秋季	
TP	0.094	0.089	0.46
TN	0.950	0.840	3.92
NH ₃ -N	0.300	0.300	3.74
COD	22.800	19.800	14.52

模型涉及的参数为污染物的综合降解系数及沉积因数。假定生态修复措施的实施不改变同种污染物的沉积因数^[4],主要通过综合降解系数的变化体现湖泊水体自净能力的提升。根据相关文献[4]及 3.2 节污染物对生态修复的响应关系,污染物沉积因数约为湖内污染物浓度的 3% ~ 5%。模型率定期为 2011 年 6 月、11 月,验证期为 2014 年 6 月、10 月。由于通过生态修复措施建立健康的湖泊生态系统需要相对漫长的时间,潜龙渠生态修复的第 3 阶段(2013 年 8 月至 2014 年 10 月)方才进行人工湿地等的建设,因此认为率定期与验证期各污染物的综合降解系数无显著变化。假定沉积因数和综合降解系数的值进行模型计算,比较模拟值与预测值,验证结果见表 6。由表 6 可知,模拟值与实测值的相

对误差均在 15% 之内,表明率定的参数能够较好地模拟水质情况。参数率定结果见表 7。

表 6 水质模拟验证结果 mg/L

污染物	2014 年 6 月			2014 年 10 月		
	实测值	模拟值	误差/%	实测值	模拟值	误差/%
TP	0.094	0.107	13.8	0.089	0.077	-13.5
TN	0.95	0.87	-8.4	0.84	0.96	14.3
NH ₃ -N	0.30	0.27	-10.0	0.30	0.33	10.0
COD	22.80	24.60	7.9	19.8	17.9	-9.6

表 7 参数率定结果

污染物	沉积因数/(km ³ · a ⁻¹)		综合降解系数/d ⁻¹	
	夏季	秋季	夏季	秋季
TP	1.76 × 10 ⁻⁵	2.08 × 10 ⁻⁵	0.195	0.189
TN	1.37 × 10 ⁻⁵	1.61 × 10 ⁻⁵	0.048	0.065
NH ₃ -N	1.96 × 10 ⁻⁵	2.31 × 10 ⁻⁵	0.163	0.048
COD	1.18 × 10 ⁻⁵	1.38 × 10 ⁻⁵	0.047	0.026

3.3.2 水质模拟情景设置 本文采用的生态修复措施主要通过污染负荷的削减以及湖泊水体自净能力的提升改善潜龙渠水质,前者依赖于外源污染的截污控源、入湖河道的水污染治理以及内源污染的控制;后者通用人工湿地、生态护坡等生态修复措施,由综合降解系数的变化体现。由于外源污染可能随着社会经济的发展增加、内源污染的影响随着底泥的沉积逐渐显现,需要调整现有的生态修复方案以稳定维持Ⅲ类水质。因此,根据 3.1、3.2 节生态修复的水质及污染物响应关系,针对现有方案中能够改变力度的污染源控制、人工湿地、生态护坡、生态浮床等措施,同时考虑生态补水措施增加的必要性,设计了 9 种措施组合情景,见表 8。以期通过模拟不同规模、不同类型的生态修复措施组合作用下的水质变化,评估各生态修复措施的水质改善贡献度,制定未来能够稳定维持Ⅲ类水质的生态修复方案。

3.3.3 不同情景水质预测结果分析 生态补水和截污控源分别通过促进水体流动和截留输入湖泊的污染物的量改善水质,可直接通过模型计算得出。

根据相关参考文献^[11-14],得到单位面积人工湿地、生态护坡、生态浮床对污染物的净化效果,将其体现在综合降解系数上进行模型计算^[17-18],即可得到各情境的水质预测结果。人工湿地、生态护坡、生态浮床的单位综合降解系数提升率见表9。

表8 情景设计

情景	生态修复方案				
	截污控源/%	人工湿地/%	生态护坡/%	生态浮床	生态补水/(m ³ ·s ⁻¹)
1	+15	不变	不变	不变	无
2	+30	+25	+15	+1处	2
3	不变	+25	+15	+1处	无
4	不变	+25	+15	+1处	2
5	-20	+25	+15	+1处	2
6	-40	+25	+15	+1处	2
7	-50	不变	不变	不变	无
8	-50	+25	+15	+1处	无
9	-50	+25	+15	+1处	2

注:(1)截污控源指通过外源污染控制改变的人湖污染量;(2)生态补水“2 m³/s”指夏季6-8月,向潜龙渠引Ⅲ类优质水2 m³/s。

表9 单位生态修复措施综合降解系数提升率

季节	人工湿地/(%·m ⁻²)	生态护坡/(%·km ⁻¹)	生态浮床/(%·m ⁻²)
夏季	1.26 × 10 ⁻³	6.06	0.35
秋季	1.20 × 10 ⁻³	5.49	0.28

注:单位提升率指每 m² 人工湿地、生态浮床或每 km 生态护坡提升综合降解系数的百分比。

图5为不同情景的综合污染指数。由图5可见,秋季的水质优于夏季,且对潜龙渠水环境改善贡

献度最高的生态修复措施是截污控源,其次是生态补水,强化现有的人工湿地、生态护坡、生态浮床等措施提升水质的效果相对不显著。

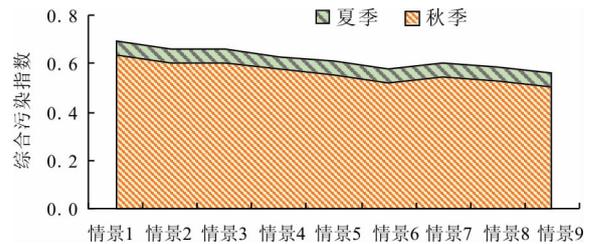


图5 水质响应情景模拟-综合污染指数

利用基于污染负荷平衡的水质模型进行情景模拟,并根据式(5)计算各生态修复方案的水质提升贡献度,结果见图6。图6(d)所示为COD的情景模拟结果。由图6(d)可见,其对污染源控制的敏感性较低,对生态补水的敏感性略高于人工湿地、生态护坡和生态浮床,表明目前的生态修复方案已有效控制了污染源,浓度的进一步降低主要依赖于修复净化措施的加强。图6(b)为TN的情景模拟结果。由图6(b)可见,TN对温度的敏感性高且各生态修复措施对其的作用效果差异不大。考虑到TN是底泥释放的主要污染物且夏季发生突发性水质恶化问题的风险高^[19],因此未来的生态修复需加强内源污染的防治以及夏季TN浓度的控制。图6(a)为TP的情景模拟结果。由图6(a)可见,其对污染源控制的敏感性显著高于修复净化措施。图6(c)的NH₃-N模拟结果表明,其对生态补水的敏感性最高,污染源控制对降低NH₃-N浓度的效果不突出。由图6(a)和(c)可知,目前的生态修复方案对控制TP、NH₃-N的浓度成效显著:9种情景的TP、NH₃-N均达到Ⅲ类或Ⅲ类标准。

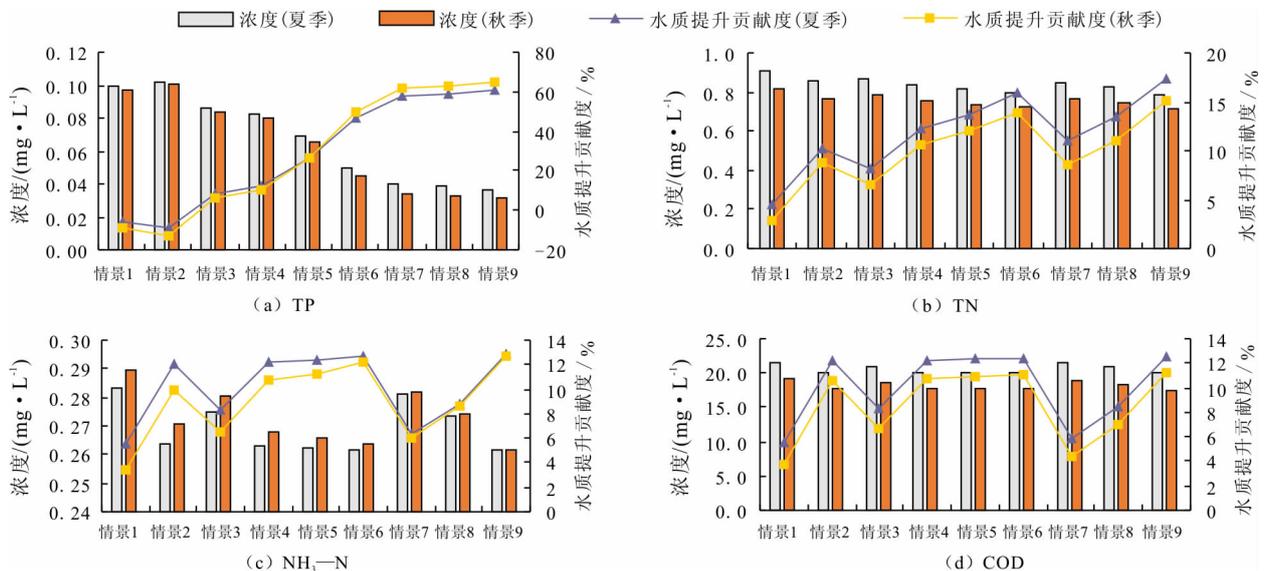


图6 水质响应情景模拟结果

4 结 论

本文运用基于污染负荷平衡的水质模型模拟了生态修复措施作用下的潜龙渠水质,分析了生态修复措施的水质响应,结论如下:

(1) 经过污染源控制、修复净化等生态恢复措施,潜龙渠的水环境得到显著改善,4种污染物浓度均有下降。生态修复中采取的截污控源、湖泊形态调整、生态清淤、生态护坡、人工湿地、生态浮岛、水生植物恢复、生物操纵等措施具有科学性和可行性。

(2) 污染源控制是提升潜龙渠水质最有力的措施。各污染物对不同生态修复措施的响应程度不同:COD浓度的进一步控制主要依赖于修复净化措施的加强;TN对各生态修复措施的敏感性接近且易受温度变化的影响;TP对截污控源的敏感性最高;NH₃-N对生态补水的影响显著。

(3) 优质的湖泊水环境需要完整的水生态系统支撑,健康水生态系统的恢复需要相对漫长的时间。尽管现阶段部分水质指标无法稳定维持Ⅲ类标准,但从情景模拟的结果来看,依据水质响应关系制定的生态修复方案能够使潜龙渠达到健康的城市湖泊水质的要求。

参考文献:

- [1] GROCHOWSKA J, AUGUSTYNYIAK R, ŁOPATA M. How durable is the improvement of environmental conditions in a lake after the termination of restoration treatments[J]. *Ecological Engineering*, 2017, 104:23-29.
- [2] ROSINSKA J, KOZAK A, DONDAJEWSKA R, et al. Water quality response to sustainable restoration measures - Case study of urban Swarzędzkie Lake[J]. *Ecological Indicators*, 2018, 84:437-449.
- [3] DUNALSKA J A, WIŚNIEWSKI G. Can we stop the degradation of lakes? Innovative approaches in lake restoration [J]. *Ecological Engineering*, 2016, 95:714-722.
- [4] CHAPRA S C, DOLAN D M, DOVE A. Mass-balance modeling framework for simulating and managing long-term water quality for the lower Great Lakes [J]. *Journal of Great Lakes Research*, 2016, 42(6):1166-1173.
- [5] 张玉平,张丹,孙振中.上海市淀山湖水域春夏季水质特征及环境容量分析[J]. *水资源与水工程学报*, 2017, 28(6):90-96.
- [6] KONG Xiangzhen, DONG Lin, HE Wei, et al. Estimation of the long-term nutrient budget and thresholds of regime shift for a large shallow lake in China[J]. *Ecological Indicators*, 2015, 52:231-244.
- [7] KATSEV S. When large lakes respond fast: A parsimonious model for phosphorus dynamics[J]. *Journal of Great Lakes Research*, 2017, 43(1):199-204.
- [8] 李兰,马凤友,周文财,等.引水济湖工程措施的生态环境影响评价方法[J]. *水资源保护*, 2011, 27(5):70-74+77.
- [9] JAROSIEWICZ A, WITEK Z. Where do nutrients in an inlet-less lake come from? The water and nutrient balance of a small mesotrophic lake[J]. *Hydrobiologia*, 2014, 724(1):157-173.
- [10] ZHANG Tao, PATRICIA A. SORANNO, KENDRA SPENCE CHERUVELIL et al. Evaluating the effects of upstream lakes and wetlands on lake phosphorus concentrations using a spatially-explicit model[J]. *Landscape Ecology*, 2012, 27(7):1015-1030.
- [11] 葛媛,郑于聪,王怡雯.复合人工湿地在水处理中的应用进展[J]. *环境科学与技术*, 2018, 41(1):99-108.
- [12] 林青皓,陈科平.生态护坡技术的应用及植物群落的配置[J]. *河南科技*, 2018(6):158-160.
- [13] 王金旺,杨升,夏海涛,等.新型生态浮岛对改善水质的效果[J]. *浙江农业科学*, 2017, 58(10):1837-1841+1845.
- [14] 吕家展,张顺涛,李葱碧,等.生态浮岛种植水生植物水质改善效果评价[J]. *环境科学与技术*, 2017, 40(S1):191-195.
- [15] 沈颜奕,陈星.城市湖泊生态系统健康评价与修复研究[J]. *水资源与水工程学报*, 2017, 28(2):82-85+91.
- [16] 夏凡,胡圣,龚治娟,等.不同水质评价方法的应用比较研究——以丹江口水库入库河流为例[J]. *人民长江*, 2017, 48(17):11-15+24.
- [17] 李晶莹,曹升乐,杨裕恒.沂沭泗流域降解系数及纳污能力测算研究[J]. *水资源与水工程学报*, 2017, 28(1):26-31.
- [18] 冯帅,李叙勇,邓建才.太湖流域上游河网污染物降解系数研究[J]. *环境科学学报*, 2016, 36(9):3127-3136.
- [19] 张涛,陈求稳,易齐涛,等.太湖流域上游平原河网区水质空间差异与季节变化特征[J]. *湖泊科学*, 2017, 29(6):1300-1311.