

鄱阳湖入江水道水质风险评估方法的研究

周涵杰¹, 唐明^{1,2}, 许文涛¹, 谢千辰¹, 吴宇泽¹, 何力³

(1. 南昌工程学院水利与生态工程学院, 江西 南昌 330099; 2. 江西省水文水资源与水环境重点实验室, 江西 南昌 330099; 3. 抚河水文水资源监测中心, 江西 抚州 344100)

摘要: 为了量化鄱阳湖入江水道各监测断面的水质污染情况, 探讨水质风险的变化规律, 基于断面水质月际劣化速率对鄱阳湖入江水道的水质风险进行评估。选取吴城、都昌、老爷庙、星子和蛤蟆石断面的水质监测数据, 推导出不同情景下水质“超标”的风险, 并探讨水质风险在入江水道中的时空变化规律。结果表明: 鄱阳湖水水质月际劣化速率符合 P-III 分布; 本研究从有害事件发生概率的角度定义断面水质风险, 科学描述了鄱阳湖入江水道面临的水质问题, 设置的阈值能够合理刻画风险等级; 导致鄱阳湖入江水道水质劣化的主要指标为 TP、pH 值和 COD; 蛤蟆石断面水质“超标”的控制指标为 TP, 超标概率为 12.29%; 吴城和老爷庙断面的控制指标为 COD, 超标概率分别是 2.58% 和 2.73%; 都昌和星子断面则为 pH 值, 超标概率分别为 1.82% 和 3.29%。基于该方法, 可以预测相关水质指标的超标概率, 确定断面水质风险等级, 明确可能导致水质有害事件的主要指标, 从而为目标水体水质的精准管理提供技术支撑。

关键词: 水质劣化速率; 水质风险评估; 风险等级; 时空分布; 鄱阳湖入江水道

中图分类号: X824; X524

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2023)04-0099-08

Risk assessment method of water quality in the waterway of Poyang Lake to Yangtze River

ZHOU Hanjie¹, TANG Ming^{1,2}, XU Wentao¹, XIE Qianchen¹, WU Yuze¹, HE Li³

(1. School of Hydraulic & Ecological Engineering, Nanchang Institute of Technology, Nanchang 330099, China; 2. Jiangxi Key laboratory of Hydrology - Water Resources and Water Environment, Nanchang 330099, China; 3. Fuhe Hydrology and Water Resources Monitoring Center, Fuzhou 344100, China)

Abstract: In order to quantify the water quality pollution situation of the monitoring sections and explore the variation of water quality risk, the water quality risk of the waterway of Poyang Lake to Yangtze River was evaluated based on the monthly water quality deterioration rate of different monitoring sections. The water quality monitoring data of Wucheng, Duchang, Laoyemiao, Xingzi and Hamashi sections were selected to simulate the risks of exceeding water quality standards under different scenarios, and the spatial and temporal variation of water quality risk in the waterway was discussed. The results show that the monthly deterioration rate of water quality in Poyang Lake fits the p-III distribution. Because the water quality risk of the section is defined from the perspective of the probability of occurrence of harmful events, the water quality problems faced by the waterway of Poyang Lake to Yangtze River can be accurately described, and the proposed risk threshold can reasonably characterize the risk level. The main indices affecting water quality of the waterway are TP, pH and COD. TP is the control index that causes the water quality of Hamashi to exceed the standard, and the probability of exceeding the standard is 12.29%; the control index of Wucheng and Laoyemiao is COD, with the probability of exceeding the standard of 2.58% and 2.73% respectively; and pH is mainly responsible for the deterioration of water quality in Duchang and Xingzi, and the probability of exceeding the standard is 1.82% and 3.29% re-

收稿日期: 2022-09-15; 修回日期: 2023-02-10

基金项目: 江西省水利厅 2020 年重点科研项目(202022ZDKT06)

作者简介: 周涵杰(1998—), 男, 江西抚州人, 硕士研究生, 主要研究方向为水文与水资源。

通讯作者: 唐明(1972—), 男, 安徽桐城人, 博士, 副教授, 主要研究方向为水旱灾害风险管理、城市水利。

spectively. According to this method, the probability of exceeding the standard of relevant water quality indices can be predicted, the water quality risk level of the section can be determined, and the main indices that may lead to harmful water quality events can be found out, which can provide technical support for the accurate management of water quality of the target water body.

Key words: water quality deterioration rate; risk assessment for water quality; risk level; spatial and temporal distribution; the waterway of Poyang Lake to Yangtze River

1 研究背景

近年来,鄱阳湖水利枢纽工程受到社会各界的广泛关注,工程的环境影响评价于2022年5月进行了第二次信息公示,工程建成后的水质变化是被普遍关注的问题之一^[1-2]。拟建水闸位于鄱阳湖入江水道,在庐山市下游约12 km处,工程建成后,鄱阳湖的水流条件会产生一定变化,进而可能影响到湖泊水质及生态系统^[3]。基于历史水质监测数据开展鄱阳湖入江水道的水质风险评估,分析水质风险时空分布规律,既可以为当下的水质风险管理提供技术支撑,又可以为鄱阳湖水利枢纽工程的建设与运行提供水质变化分析的基础文献,具有重要的现实意义。

关于水质评估的相关研究成果丰富,常用到的方法有单因子法^[4]、综合水质指数法^[5]、模糊综合评价法^[6]、多元统计分析法^[7-8]等。但是从风险角度对水质进行评估的研究较少,且对水质风险的定义也并不统一。有学者认为水质风险是基于客观性、不确定性、可测性和动态性对水质污染发生可能性的定量描述^[9];也有学者认为水质风险是水体的污染浓度超过水质目标阈值造成污染事故的概率^[10],此外,有的学者将水质风险评估与人体健康风险评估建立关系,通过评估水体中化学或物理因子对人体造成损害的可能性及程度大小来对水质风险程度进行评价^[11-13];还有学者则侧重基于水体的污染程度对水质进行风险评估^[14-16]。

鉴于当前普遍存在的“水质风险管理意识不够以及水质风险概念和计算方法不统一,大多是基于监测或预测数据与国家水质标准《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)的直接比较来确定水质等级”等问题,本文参考Kaplan^[17]的风险定义构造水质风险评估模型,以“水质月际劣化速率”为研究变量,组建水质月际劣化速率样本,结合理论概率曲线进行拟合和参数优化,寻求其理论概率分布;基于“水质指标临界月际劣化速率”计算不同情景下各个水质指标在未来1个月内超过限值的概率,并根据最大概率所处的阈值区间判断该断面的水质风险

等级以及可能超标的主要水质指标,从而为目标水体的水质管理提供更加精准的技术支持。

2 数据来源与研究方法

2.1 研究区域与数据来源

鄱阳湖位于江西省北部,长江中下游南岸(东经115°31′~117°06′,北纬28°11′~29°51′),是我国第一大淡水湖泊。鄱阳湖以松门山为界,分为南、北两个部分,南面为主湖体,北面为长约40 km的入江水道与长江连通。鄱阳湖概况及水功能区划分如图1所示。

本次研究主要选取鄱阳湖入江水道中的吴城、都昌、老爷庙、星子和蛤蟆石5个水质监测站点的2016年1月—2019年12月的数据进行研究,数据中包含pH值、氨氮、总磷等21项指标。鉴于大部分金属元素、有毒物质的监测数据难以检出,仅以小于检测限的“区间数据”呈现,无法用于计算水质劣化速率,最后选择能够构建水质劣化速率样本的10个指标,分别为pH值、氨氮(NH₃-N, μg/L)、总磷(TP, μg/L)、溶解氧(DO, μg/L)、高锰酸盐(COD_{Mn}, μg/L)、化学需氧量(COD, μg/L)、五日生化需氧量(BOD₅, μg/L)、锌(Zn, μg/L)、氟化物(F⁻, μg/L)、砷(As, μg/L)。

2.2 水质风险的定义与计算方法

2.2.1 水质风险定义 Kaplan^[17]认为,描述风险时,应当同时回答3个问题,即会发生什么情景?这种情景发生的可能性有多大?如果真的发生了这种情景,其后果是什么?受此启发,本文以“水质监测指标月际劣化速率超过临界劣化速率”作为预设情景 S_j (j 代表水质监测指标的个数),其后果为“水质超标”事件的发生。则可将水质风险定义为:断面在未来1个月内出现预设情景 S_j ,从而导致“水质超标”的可能性 P_j 。

鉴于现行的《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)采取单因子评价规则,则任一预设情景 S_j 的出现都会导致有害事件的发生;本文综合考虑所有监测指标发生预设情景的可能性 P_j ,并将其中

出现最大“超标概率”的指标作为“控制性指标”,并

设置相应阈值来判断断面的水质风险等级。

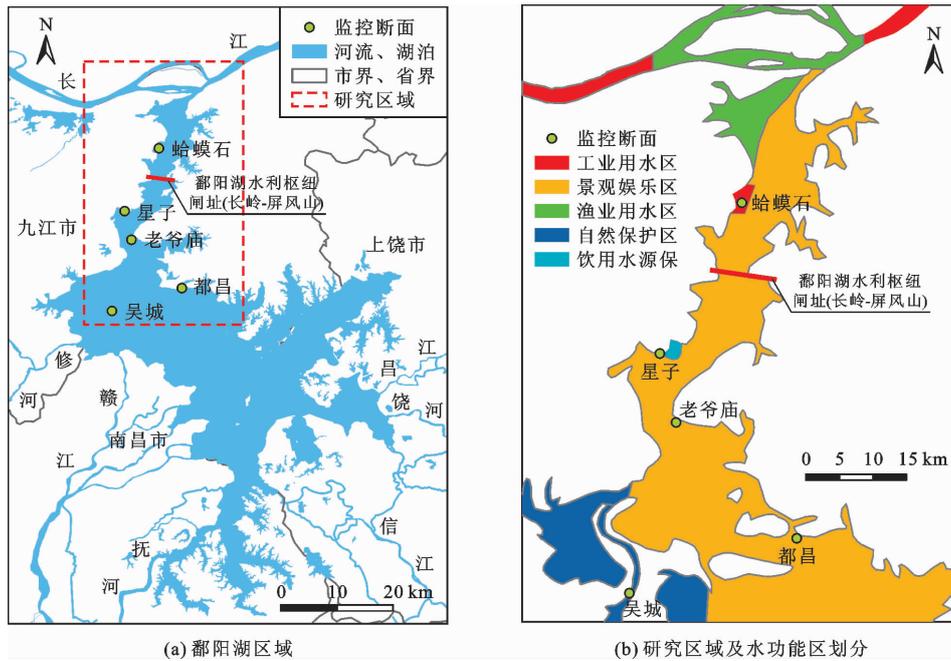


图 1 鄱阳湖概况及水功能区划分示意图

2.2.2 研究变量

(1) 水质指标月际劣化速率的定义。基于断面水质的历史监测数据(月尺度),构建水质指标月际劣化速率样本,分析其变化规律,为“超标概率”的计算提供支撑。

所选 10 项水质指标可以分为 3 种类型:

中立型指标:pH 值。该指标越接近于 7.5,则水质越优良。其月际劣化速率 v_{de-pHi} 可以表示为:

$$v_{de-pHi} = \frac{|I_{pHi} - I_{pH(i-1)}|}{t} \quad (1)$$

式中: I_{pHi} 为第 i 次 pH 监测值; $I_{pH(i-1)}$ 为第 $i-1$ 次 pH 监测值; t 为第 i 次与第 $i-1$ 次监测的间隔时间,d。

正向型指标:DO。该指标越大,则水质越优良。其月际劣化速率 v_{de-DOi} 可表示为:

$$v_{de-DOi} = \begin{cases} 0 & (I_{DOi} \geq I_{DO(i-1)}) \\ \frac{I_{DO(i-1)} - I_{DOi}}{t} & (I_{DOi} < I_{DO(i-1)}) \end{cases} \quad (2)$$

式中: I_{DOi} 为第 i 次 DO 监测值, $\mu\text{g/L}$ 。

逆向型指标: $\text{NH}_3\text{-N}$ ($\mu\text{g/L}$)、TP ($\mu\text{g/L}$)、 COD_{Mn} ($\mu\text{g/L}$)、 COD ($\mu\text{g/L}$)、 BOD_5 ($\mu\text{g/L}$)、Zn ($\mu\text{g/L}$)、 F^- ($\mu\text{g/L}$)、As ($\mu\text{g/L}$) 等 8 项水质指标。这些指标越小,则水质越优良。其月际劣化速率(以 TP 为例)可表示为:

$$v_{de-TPi} = \begin{cases} \frac{I_{TPi} - I_{TP(i-1)}}{t} & (I_{TPi} > I_{TP(i-1)}) \\ 0 & (I_{TPi} \leq I_{TP(i-1)}) \end{cases} \quad (3)$$

式中: I_{TPi} 为第 i 次 TP 监测值, $\mu\text{g/L}$ 。

(2) 水质指标临界月际劣化速率的定义。为了评估预设情景 S_j 出现的概率,需要构建描述评估周期内水质变化的变量——临界月际劣化速率,其定义为:在评估周期内,由待评估水质降至国家水质标准下限值时的平均下降速率($\mu\text{g}/(\text{L} \cdot \text{d}^{-1})$),也是该时段的最大允许降速。当月际劣化速率超过该临界值时,就会发生“水质超标”的有害事件。

各类型水质指标临界月际劣化速率的计算公式如下:

中立型指标(pH 值):

$$v_{de-pH-max} = \frac{1.5 - |I_{de-pH-0} - I_{de-pH-s}|}{30} \quad (4)$$

式中: $I_{de-pH-0}$ 为某一时刻断面的 pH 值; $I_{de-pH-s}$ 为 pH 的标准限值,Ⅲ类和Ⅳ类水标准限值均为 6~9。

正向型指标(DO):

$$v_{de-DO-max} = \frac{I_{de-DO-0} - I_{de-DO-s}}{30} \quad (5)$$

式中: $I_{de-DO-0}$ 为某一时刻断面的 DO 值, $\mu\text{g/L}$; $I_{de-DO-s}$ 为 DO 的标准限值, $\mu\text{g/L}$,Ⅲ类水标准限值为 5 000 $\mu\text{g/L}$,Ⅳ类水标准限值为 3 000 $\mu\text{g/L}$ 。

逆向型指标(以 TP 为例):

$$v_{de-TP-max} = \frac{I_{de-TP-s} - I_{de-TP-0}}{30} \quad (6)$$

式中: $I_{de-TP-0}$ 为某一时刻断面 TP 的监测值, $\mu\text{g/L}$;

$I_{de-TP-s}$ 为 TP 的标准限值, $\mu\text{g/L}$, III 类水标准限值为 $50 \mu\text{g/L}$; IV 类水标准限值为 $100 \mu\text{g/L}$ 。

2.2.3 水质指标超标概率计算 基于水质月际劣化速率的理论概率密度函数, 计算水质临界月际劣化速率出现的概率 P_j , 即单个水质指标的“超标概率”, 可以表示为:

$$P_j = P(x > v_{de-j-\max}) = \int_{v_{de-j-\max}}^{\infty} f_j(x) dx$$

$$= 1 - \int_0^{v_{de-j-\max}} f_j(x) dx \quad (7)$$

式中: P_j 为第 j 个水质指标超过水质限值的概率; $v_{de-j-\max}$ 为第 j 个水质指标的临界月际劣化速率, $\mu\text{g}/(\text{L} \cdot \text{d})$; $f_j(x)$ 为第 j 个水质监测指标月际劣化速率的理论概率密度函数。

2.2.4 断面水质风险的计算与阈值

(1) 断面水质风险计算。如前所述, 选择所有水质指标中出现最大“超标概率”的指标作为该断面水质风险的“控制性指标”, 其概率亦为断面在未来 1 个月内出现“水质超标”事件的最大可能性。则断面水质风险计算公式为:

$$P = \max P_j = \max P_j(x > v_{de-j-\max}) \quad (8)$$

式中: P 为断面水质风险。

(2) 水质风险阈值的设置。对水质劣化风险的阈值设置是合理判定风险程度的关键, 许多学者根据研究对象的不同水功能分区设置相应的风险阈值, 以获得合理的风险评估的效果^[18-19]。鄱阳湖入江水道的水质虽然总体较好, 但是该水道属于开放式的自然河道, 流域内的点、面源污染影响较大, 水质存在年内及年际间的波动; 而且, 不同的水功能区对水质的要求亦不同。因此, 基于水功能区需求设置相应的风险阈值非常重要。

地表水功能区划是根据水域的使用目的和保护目标设置不同的水质管理目标, 确保水域水质始终优于该目标。根据江西省 2007 年颁布的《江西省地表水(环境)功能区划》, 吴城断面位于自然保护区范围, 都昌、星子及老爷庙断面均处于鄱阳湖景观娱乐用水区范围, 水质管理目标均为 III 类; 蛤蟆石监测点处于鄱阳湖九江工业用水区范围, 水质管理目标为 IV 类标准。因此, 当断面水质指标低于所在水功能区的最低标准限值(III 类或 IV 类)时, 即可判定其发生了有害水质事件。

本文根据“控制性指标”超标概率的大小, 将水质风险划分为高、中、低、无 4 个等级, 并设置相应的等级间阈值。参考《全国重要饮用水水源地安全保

障评估指南》(试行)中提出的取水口水质达标率须达到 80% 以上, 将“高风险”的最低风险阈值设置为 20%, 当断面水质劣化速率超过限值的概率达到 20% 时, 便可定义该断面水质进入高风险区。根据正态分布的“ 3σ ”原则, 设置“低风险”的上限阈值为 0.135%, 当断面水质劣化速率超过限值的概率高于 0.135% 时, 可以认为断面水质进入“低风险”区间。参照城市公共设施与居民用水的供水保证率的标准(一般控制在 95% 以上), 将“低风险”的上限阈值设置为 5%, 当断面水质超过限值的概率高于 5%、低于 20% 时, 认为水质处于“中风险”区间。断面水质风险阈值的具体设置如表 1 所示。

表 1 基于水质指标劣化速率的水质风险阈值一览表

风险等级	风险阈值/%
无	$P < 0.135$
低	$0.135 \leq P < 5$
中	$5 \leq P < 20$
高	$P \geq 20$

2.2.5 水质风险的计算流程 综上, 可以将断面水质风险的计算分为水质月际劣化速率的理论概率分布推算、水质临界月际劣化速率计算、断面水质风险计算与分级共 3 个模块, 计算流程如图 2 所示。

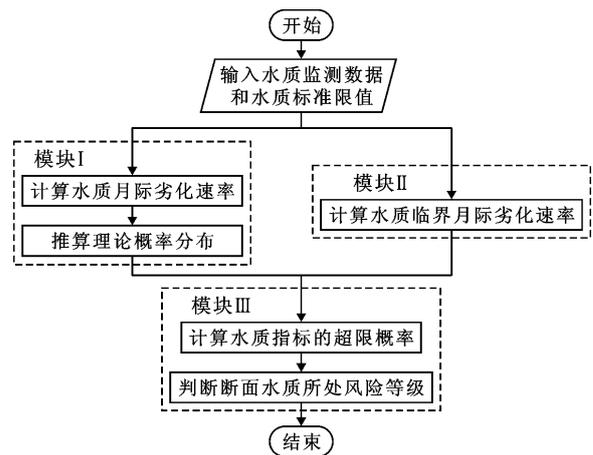


图 2 水质指标“超标概率”计算流程

3 结果与分析

3.1 水质指标劣化速率的变化特征

图 3 为鄱阳湖入江水道 5 个水质监控断面各项水质指标的月际劣化速率在监测期(2016-01—2019-12)内的四分位图。

图 3(a) 显示, pH 值劣化速率上下四分位差异

明显,所有断面的中位数均大于 0,说明 pH 值的波动明显,劣化现象较为普遍。此外,均值普遍大于中位数,说明局部时段存在较大劣化速率。图 3(b)~3(j)显示,NH₃-N、TP、DO、COD_{Mn}、COD、BOD₅、Zn、F⁻、As 在绝大多数断面的中位数为 0,说明这些指

标在监测期内围绕零值波动,至少有一半的时间没有出现劣化情况。但值得注意的是,这些指标在不少断面的平均劣化速率接近甚至超过了上四分位,说明以上指标出现较大劣化速率的概率较高,劣化速率波动的相对幅度较大。

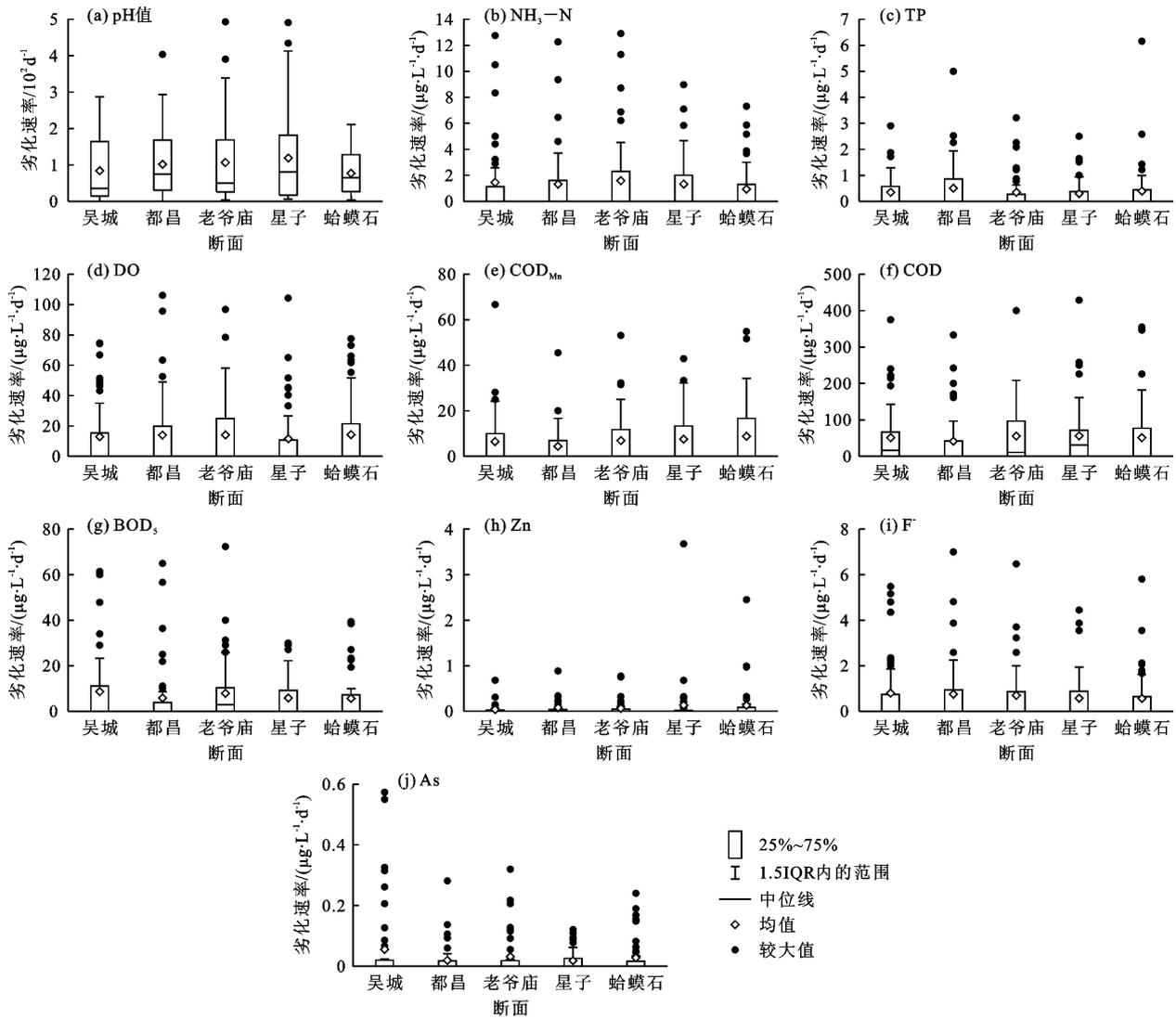


图 3 鄱阳湖入江水道 5 个水质监控断面各水质指标月际劣化速率分位图

3.2 水质指标月际劣化速率的理论概率分布与规律

依据断面原始监测数据(2016-01—2019-12),计算水质月际劣化速率,组建研究样本,每个样本包含 47 个数据;运用数学期望公式计算水质指标劣化速率的经验频率,并采用 P-Ⅲ、正态、指数和对数正态共 4 种分布函数类型开展理论概率分布的检验,基于曲线拟合的决定系数 R^2 选出最优的分布。

3.2.1 理论概率分布的筛选 对鄱阳湖入江水道 5 个断面的 10 种水质指标月际劣化速率的理论概率曲线进行拟合,各类型分布曲线的不同拟合优度

范围的占比见表 2。由表 2 可以看出,50 组样本中, P-Ⅲ分布线型的 R^2 大于 0.90 的比例占到了 70%, 大于 0.85 的比例达到 92%, 较其他分布函数有明显优势。因此,可认为水质指标月际劣化速率样本基本满足 P-Ⅲ型曲线分布。

3.2.2 断面水质指标月际劣化速率的理论概率密度函数主要参数 根据历史监测数据可以分析出各个断面所有水质监测指标的月际劣化速率的理论概率密度函数 $f_j(x)$ 。以星子断面为例,P-Ⅲ分布的概率密度函数的 3 个参数如表 3 所示。

表2 基于不同分布函数类型的断面水质劣化速率
频率曲线拟合优度占比 %

R^2 范围	P-III 分布	正态 分布	指数 分布	对数正 态分布
大于0.90	70	2	8	8
0.85~0.90	22	2	2	6
0.75~0.85	6	6	14	64
0.60~0.75	2	30	52	20
小于0.60	0	60	24	2

3.3 鄱阳湖入江水道断面水质风险的计算结果

鄱阳湖属于季节性、吞吐型、过水性湖泊,受周边人类活动和季节变化的影响,入江水道的水质在空间和时间上均存在差异。

3.3.1 水质风险的空间分布 选取各断面“2016-01—2019-12 实测数据”各指标的平均值作为待评

估水质,通过计算“超标”概率,可以展现其面临的平均水质风险,探究其空间分布规律。

由于鄱阳湖具有“高水湖相、低水河相”的特征,TP指标的评价标准一直存在争议。如果按照湖泊的标准,不少监测值已超过Ⅲ类水限值,属于Ⅳ类水;如果按照河道的标准,又不符合现状考核的实际。因此,本文计算吴城、都昌、老爷庙和星子断面超过Ⅲ类水的风险时,不计入TP指标。各断面水质的“超标”概率与风险等级如表4所示。

3.3.2 水质风险的季节分布 选取各断面“2016-01—2019-12 实测数据”中各指标的季节平均值作为待评估水质,通过计算“超标”概率,可以展现其在各季节面临的水质风险,探究其季节分布规律。同样以星子断面为例,各季节水质的“超标”概率与风险等级如表5所示。

表3 星子断面各项水质指标月际劣化速率基于P-III分布的主要参数

参数	pH	NH ₃ -N	TP	DO	COD _{Mn}	COD	BOD ₅	Zn	F ⁻	As
α	2.294	0.974	0.789	0.595	1.624	0.726	1.665	0.100	0.635	1.148
β	1.184	0.452	0.159	0.364	0.114	0.096	0.149	0.058	0.077	0.330
α_0	-0.749	-0.834	-2.005	-0.479	-6.680	-1.961	-5.375	-0.420	-2.511	-1.601

表4 鄱阳湖入江水道5个断面各水质指标“超标”概率与风险等级 %

断面	水质控制类别	断面最大超标概率	风险等级	pH	NH ₃ -N	TP	DO	COD _{Mn}	COD	BOD ₅	Zn	F ⁻	As
				吴城	Ⅲ类	2.58	低	1.52	0.09		1.29	0.08	2.58
都昌	Ⅲ类	1.82	低	1.82	0.04		1.65	0.01	1.54	0.68	0.00	0.00	0.00
老爷庙	Ⅲ类	2.73	低	2.53	0.10		0.97	0.03	2.73	0.94	0.00	0.00	0.00
星子	Ⅲ类	3.29	低	3.29	0.01		0.91	0.12	3.10	0.15	0.00	0.00	0.00
蛤蟆石	Ⅳ类	12.29	中	0.03	0.00	12.29	0.18	0.00	0.27	0.00	0.00	0.00	0.00

表5 星子断面各水质指标不同季节“超标”概率与风险等级 %

季节	断面最大超标概率	风险等级	pH	NH ₃ -N	TP	DO	COD _{Mn}	COD	BOD ₅	Zn	F ⁻	As
春季	3.20	低	3.04	0.01		0.76	0.10	3.20	0.25	0.00	0.00	0.00
夏季	4.19	低	4.19	0.01		2.19	0.14	2.23	0.10	0.00	0.00	0.00
秋季	3.65	低	3.06	0.01		1.72	0.14	3.65	0.10	0.00	0.00	0.00
冬季	4.11	低	4.11	0.02		0.25	0.10	3.57	0.18	0.00	0.00	0.00

4 讨论

4.1 断面水质风险空间分布的规律分析

TP是水质评价中的关键因子,也是湖泊、河流

两种水质标准中限值变化较大的因子。按照湖泊标准,除蛤蟆石断面外,其余断面均已超出目标水质的标准限值。表4显示,蛤蟆石断面“控制性指标”为TP,其平均水质风险等级为“中”。总体来看,入江

水道的 TP 污染较严重,对水质劣化的贡献最大。这一结果既与沿线排污、湖区采砂及船舶通航等因素有关,也与鄱阳湖的河湖两相特征有关,需要引起相关监管部门的关注,同时应采取相应措施降低水体中 TP 浓度并积极与相关部门沟通,探讨“基于河湖两相判别”开展水质评价的可能性^[20]。

在不考虑 TP 指标的情况下,吴城、都昌、老爷庙和星子断面平均水质风险等级均为“低”,吴城、老爷庙断面“控制性指标”为 COD,都昌和星子断面“控制性指标”为 pH 值。因此,这些断面需要加强沿线城镇生活污水和工业废水的排查,针对性地研究 COD、pH 值超标的原因与控制措施,防止水质有害事件的突发。

4.2 水质风险季节分布的规律分析

如前所述,入江水道中控制断面水质风险的主

要指标为 TP、pH 与 COD,图 4 给出了入江水道 5 个断面该 3 个主要指标水质风险的季节分布规律。

从图 4(a)中的 TP 指标来看,TP 劣化速率的“超标”概率受季节影响明显,呈“春—夏”下降,“夏—冬”上升的趋势,这种变化可能与水位的季节性变化有关;从图 4(b)中的 pH 值来看,除都昌断面外,其他断面 pH 值劣化速率“超标”概率的季节变化规律一致,均呈现出夏、冬季高而春、秋季低的现象,都昌断面则是“春—秋”下降、“秋—冬”上升,5 个断面各季度的 pH 值“超标”概率不高,均处于“低”风险区;从图 4(c)中的 COD 指标来看,除吴城断面外,其他断面 COD 劣化速率的“超标”概率均具有夏季最低而秋、冬、春季较高的特点,吴城断面则是春季最高而夏、秋、冬季较低,各断面所有季度的“超标”概率均处于“低”风险区。

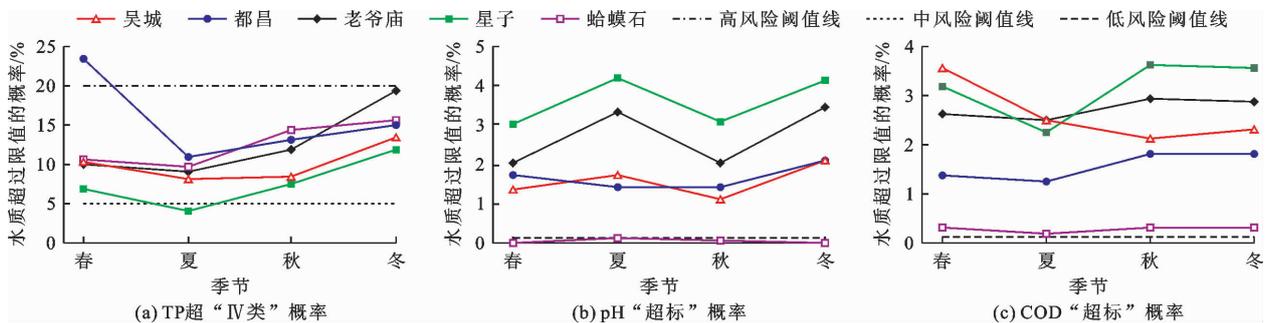


图4 鄱阳湖入江水道5个断面主要指标水质风险的季节分布规律

4.3 与其他研究的比较

笔者所在课题组在前期研究中也曾分析过鄱阳湖入江水道 TP 监测值的时空分布规律及其驱动因素,发现了入江水道中老爷庙-星子段 TP 浓度呈现下降趋势,而星子-蛤蟆石段呈现出上升趋势,这种变化主要与沿线排污及采砂作业有关;TP 浓度在枯水期要高于丰水期,其背后的驱动因素主要是鄱阳湖水位的季节性变化^[21],上述规律与本研究中 TP 劣化风险的时空分布规律总体上是一致的。但前期研究是基于水质指标的历史监测数据来描述过去一段时间内的时空变化规律,并以此作为未来变化的趋势,并不能基于水质指标的实测数据来量化未来水质劣化的可能性。

此外,与鄱阳湖水水质时空分布规律及水质评估相关的研究较多,主要采用综合水质指数(water quality index, WQI)和主成分分析法。鲁照等^[22]基于 WQI 法对鄱阳湖水水质进行了评估,发现水质季节性规律明显,冬季水质最差,夏季水质最好,与本文水质风险的季节规律较为一致。WQI 法是通过

各项水质指标赋权得到综合指标,该指标可以反映水体的总体污染程度,但无法评价水体的适用性,而且该方法不能精准识别个别超标指标对水质的影响,可能将已经超标的水体误判为总体质量尚可。万金保等^[23]运用主成分分析法对鄱阳湖水水质进行了研究,发现 TP 和 TN 是鄱阳湖的主要污染物,与本文结论一致。主成分分析法可以通过对历史监测数据的分析得出主要污染因子及其贡献率,以此作为当前或今后一段时间内水质管理的参考依据,但同样不能基于水质指标的实测数据来量化未来一段时间内的水质变化。

4.4 本文方法的局限性

在鄱阳湖入江水道的水质监测中,大部分重金属、有毒物质的含量极小,部分时段难以检出,仅以小于仪器的检测限值来记录,无法完整地计算出这些指标的月际劣化速率,因此,本文仅评价了 10 项水质指标,在其他目标水体的水质评估中,可以根据其历史监测数据来选择需要分析的水质指标。此外,本文依据鄱阳湖入江水道的实际水功能区划设

置风险阈值,可能并不完全适用于其他水体(比如,饮用水源地),在应用到其他水域时,需要根据水体的具体功能调整风险阈值。

5 结 论

本文从水质有害事件发生概率的角度定义了断面水质风险,用水质风险预测代替了监测数据(或预测数据)与标准的直接比较;通过计算鄱阳湖相关水质指标在未来出现“超标”的概率,确定所选断面水质风险的大小与等级,找出可能导致水质有害事件的主要指标,从而为目标水体的精准管理提供技术支撑。主要结论如下:

(1)水质指标月际劣化速率的理论概率分布类型比较结果显示,P-Ⅲ分布的拟合效果最好;基于P-Ⅲ分布的优化适线法可以很好地展示水质指标月际劣化速率的变化规律。

(2)本文提出的阈值能够将断面水质风险控制在合理范围内,符合鄱阳湖实际现状。随着今后水质本底逐渐向好,亦可参照“城镇供水保障程度”对阈值进行适当调整。

(3)导致鄱阳湖入江水道水质劣化的主要指标为TP、pH值和COD,其中贡献最大的是TP。蛤蟆石断面的控制指标是TP,超标概率为12.29%;在不考虑TP指标的情况下,造成吴城和老爷庙断面“超标”的控制指标是COD,超标概率分别为2.58%和2.73%;都昌和星子断面的控制指标是pH值,“超标”概率分别为1.82%和3.29%。

(4)TP劣化速率的“超标”概率受季节影响明显,呈“春—夏”下降、“夏—冬”上升的趋势;除都昌外,其他断面的pH值劣化速率的“超标”概率季节变化规律一致,呈现出夏、冬季高而春、秋季低的现象;除吴城断面外,其他断面COD劣化速率的“超标”概率均具有夏季最低而秋、冬、春季较高的特点。

参考文献:

[1] 唐昌新,张晓航,邬年华,等. 拟建鄱阳湖水利枢纽工程对水龄的影响模拟分析[J]. 中国水利水电科学研究院学报,2018,16(3):195-206.

[2] 杨中华,朱政涛,槐文信,等. 鄱阳湖水利调控对湖区典型丰枯水年水动力水质影响研究[J]. 水利学报,2018,49(2):156-167.

[3] HO H, HUANG Guoxian, LIANG Dongfang. Hydrodynamics and pollutant transport modeling of Poyang Lake, China for the study of downstream engineering control's effect [C]// Wuxi: Proceeding of the 2nd Conference of Global Chinese Scholars on Hydrodynamics, 2016.

[4] 顾薇娜,李琳,何琴,等. 单因子指数法在饮用水水质评价中的探索与应用[J]. 给水排水,2016,52(S1):150-154.

[5] 翟振起,黄廷林,陈凡. 茜坑水库水质评价及污染源解析[J]. 水资源与水工程学报,2021,32(6):57-64.

[6] 何福娟,刘永强. 基于动态可变模糊综合评判法地下水水质评价[J]. 水资源与水工程学报,2017,28(6):38-43.

[7] 周及,关卫省,付林涛. 基于多元统计的西安市河流水质评价及污染源解析[J]. 水资源保护,2020,36(2):79-84+104.

[8] TIWARI N K, DAS GUPTA S, SWAIN H S, et al. Water quality assessment in the ecologically stressed lower and estuarine stretches of River Ganga using multivariate statistical tool [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2022, 194: 469.

[9] QIN Guoshuai, LIU Jianwei, XU Shiguo, et al. Pollution source apportionment and water quality risk evaluation of a drinking water reservoir during flood seasons [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2021, 18(4): 1873.

[10] 冯民权,张园园. 基于MATLAB的贝叶斯网络供水工程水质风险分析[J]. 黑龙江大学学报,2015,6(1):5-11.

[11] 窦小涵,潘叶,王腊春,等. 基于模糊综合优化模型的水质评价与重金属污染健康风险分析——以贵州省铜仁市碧江区饮用水源地为例[J]. 水土保持通报,2022,42(1):173-183+190.

[12] 刘子奇,仇付国,李红岩,等. 华北平原某区农村供水水质与健康风险评估[J]. 环境化学,2021,40(7):2054-2063.

[13] 段小龙,郝凯越,黄德才,等. 林芝市饮用水源地健康风险评估[J]. 水资源与水工程学报,2020,31(3):97-101.

[14] 麻林,刘凌,宋兰兰,等. 调水过程中望虞河的水质风险分析[J]. 河海大学学报(自然科学版),2014,42(1):13-18.

[15] 张紫霞,刘鹏,王妍,等. 典型岩溶流域不同湿地水体氮磷分布及富营养化风险评价[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版),2020,48(5):99-107.

[16] KANNEL P R, LEE S, LEE Y-S, et al. Application of water quality indices and dissolved oxygen as indicators for river water classification and urban impact assessment [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2007, 132: 93-110.

[17] KAPLAN S. The words of risk analysis [J]. Risk Analysis, 1997, 17(4): 407-417.

[18] YU Ruolan, ZHANG Chen. Early warning of water quality degradation: a copula-based Bayesian network model for highly efficient water quality risk assessment [J]. Journal of Environmental Management, 2021, 292: 112749.

(下转第117页)

- 学学报,2018,26(5):940-953.
- [9] 杨法暄,郑乐,钱会,等. 基于 DPSIR 模型的城市水资源脆弱性评价——以西安市为例[J]. 水资源与水工程学报,2020,31(1):77-84.
- [10] 王文圣,金菊良,丁晶,等. 水资源系统评价新方法——集对评价法[J]. 中国科学(E辑:技术科学),2009,39(9):1529-1534.
- [11] 王栋,梁忠民,常文娟,等. 基于模糊集对分析的引江济太调水效益综合评价[J]. 水资源保护,2017,33(1):35-40.
- [12] 吴凡,陈伏龙,丁文学,等. 基于模糊集对分析-五元减法集对势的新疆水资源承载力评价[J]. 长江科学院院报,2021,38(9):27-34.
- [13] 原彩萍,刘原一,职璐爽. 基于模糊集对法的山西省水资源脆弱性评价[J]. 水资源保护,2021,37(5):112-116+130.
- [14] 王宏伟,张鑫,邱俊楠. 模糊集对分析法在水资源安全评价中的应用[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版),2011,39(10):209-214.
- [15] 沈俊源,吴凤平,于倩雯. 基于模糊集对分析的最严格水安全综合评价[J]. 水资源与水工程学报,2016,27(2):92-97.
- [16] 刘洪霞,冯益明,管文轲. 新疆沙产业状况与水资源承载力研究[J]. 干旱区地理,2020,43(5):1202-1209.
- [17] 邹君,杨玉蓉,谢小立. 地表水资源脆弱性:概念、内涵及定量评价[J]. 水土保持通报,2007,27(2):132-135+145.
- [18] 张修宇,秦天,杨淇翔,等. 黄河下游引黄灌区水安全评价方法及应用[J]. 灌溉排水学报,2020,39(10):18-24.
- [19] 凌红波,徐海量,乔木,等. 基于 AHP 和模糊综合评判的玛纳斯河流域水资源安全评价[J]. 中国沙漠,2010,30(4):989-994.
- [20] 张志君,陈伏龙,龙爱华,等. 基于模糊集对分析法的新疆水资源安全评价[J]. 水资源保护,2020,36(2):53-58+78.
- [21] 王文圣,李跃清. 水文水资源集对分析[J]. 南水北调与水利科技,2011,9(2):27-32.
- [22] 沈时兴,金菊良,宋松柏,等. 水文水资源集对分析的理论基础探讨[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版),2013,36(12):1481-1488.
- [23] 鲁晓,董增川,张城,等. 基于集对分析的水资源承载状态评价研究[J]. 人民黄河,2020,42(11):53-57+116.
- [24] 王文圣,金菊良,李跃清. 基于集对分析的自然灾害风险度综合评价研究[J]. 四川大学学报(工程科学版),2009,41(6):6-12.
- [25] 王文圣,李跃清,金菊良,等. 水文水资源集对分析[M]. 北京:科学出版社,2010.
- [26] 黄星,陈伏龙,赵琪,等. 新疆和田河径流丰枯评价及组合分析[J]. 干旱区研究,2021,38(6):1570-1578.
- [27] GARG H, KUMAR K. An advanced study on operations of connection number based on set pair analysis[J]. National Academy Science Letters, 2019, 42(4): 351-354.
- [28] 金菊良,张浩宇,崔毅,等. 联系数伴随函数的若干问题探讨[J]. 黑龙江大学工程学报,2020,11(2):1-10.
- [29] 金菊良,郭涵,李征,等. 基于水资源承载力动态评价的五元引力减法集对势方法[J]. 灌溉排水学报,2021,40(6):1-7.
- [30] 金菊良,张浩宇,陈梦璐,等. 基于灰色关联度和联系数耦合的农业旱灾脆弱性评价和诊断研究[J]. 灾害学,2019,34(1):1-7.
- [31] 周念清,赵露,沈新平,等. 基于压力驱动模型评价长株潭地区水资源脆弱性[J]. 同济大学学报(自然科学版),2013,41(7):1061-1066.
- [32] 职璐爽,薛惠锋. 基于熵权法的城市水资源脆弱性研究——以广东省为例[J]. 水土保持通报,2018,38(5):322-329.
- [33] 范玲,王会肖,刘昌明,等. 基于压力-状态-响应模型的新疆水资源脆弱性评价[J]. 南水北调与水利科技(中英文),2022,20(6):1052-1064.

(上接第106页)

- [19] 汤玉强,李清伟,左婉璐,等. 内梅罗指数法在北戴河国家湿地公园水质评价中的适用性分析[J]. 环境工程,2019,37(8):195-199+189.
- [20] 王华,方少文,邓燕青,等. 大型通江湖泊河-湖两相判别及水质监测评价优化方法[M]. 北京:科学出版社,2022.
- [21] 张书滨,周涵杰,谢千辰,等. 鄱阳湖入江水道总磷时空分布规律及采砂影响简析[J]. 江西水利科技,2021,47(6):404-410.
- [22] 鲁照,黄河清,徐力刚,等. 基于熵权的 WQI 法在鄱阳湖水水质评价中的应用[J]. 环境监测管理与技术,2021,33(4):30-34.
- [23] 万金保,何华燕,曾海燕,等. 主成分分析法在鄱阳湖水水质评价中的应用[J]. 南昌大学学报(工科版),2010,32(2):113-117.