

基于流量-水质 T-Copula 联合分布的赣江尾闾水系骨干河道氟化物水环境容量研究

杨 煊^{1,2}, 褚克坚^{1,2,3}, 秦 硕^{1,2}, 叶福竹^{1,2}, 顾 莉^{1,2,3}

(1. 河海大学浅水湖泊综合治理与资源开发教育部重点实验室; 2. 河海大学环境学院;
3. 河海大学长江保护与绿色发展研究院)

摘要:为解析赣江尾闾水系骨干河道氟化物水环境容量的时空特征,引入 T-Copula 函数构建了基于流量-水质联合概率密度分布的不确定性水环境容量计算框架。以氟化物为目标污染物,解析了 2024 年不同时期赣江尾闾水系骨干河道的氟化物水环境容量分布特征,并基于修正 OAT 方法开展了敏感性分析。结果表明,全年各骨干河道均具有一定的水环境容量,但部分河道存在潜在的超容量风险;赣江尾闾水系干流段与北支渔业用水区分别具有最大、最小水环境容量期望值;不同时期尾闾水系水环境容量期望值呈现一定的往复波动情势;河流流量的季节性分异是造成尾闾水系氟化物水环境容量动态变化的关键驱动因素。

关键词:河道水环境容量;流量-水质联合概率密度;T-Copula 函数;氟化物;赣江尾闾水系

Research on fluoride water environmental capacity in main channels of the lower Ganjiang River network based on joint distribution of flow rate with water quality using T-Copula model//Yang Xuan^{1,2}, Chu Kejian^{1,2,3}, Qin Shuo^{1,2}, Ye Fuzhu^{1,2}, Gu Li^{1,2,3} (1. Key Laboratory of Integrated Regulation and Resource Development on Shallow Lakes, Ministry of Education, Hohai University; 2. College of Environment, Hohai University; 3. Yangtze Institute for Conservation and Development, Hohai University)

Abstract: To analyze the spatiotemporal characteristics of the fluoride water environmental capacity in the main channels of the lower Ganjiang River network, the T-Copula function was introduced to construct an uncertainty water environmental capacity calculation framework based on the flow rate-water quality joint probability density distribution. Taking fluoride as the target pollutant, the distribution characteristics of the fluoride water environmental capacity in the main channels of the lower Ganjiang River network during different periods in 2024 were analyzed, and a sensitivity analysis was conducted based on the modified one-variable-at-a-time (OAT) method. The results indicate that all main channels possess a certain water environmental capacity throughout the year, although some channels face a potential risk of exceeding this capacity. The highest and lowest expected values of water environmental capacity were observed in the mainstream section of the lower Ganjiang River network and the northern branch's fishery water use zone, respectively. The expected values of the water environmental capacity in the river network during different periods exhibit a certain fluctuating pattern. The seasonal variation in river flow is identified as the key driving factor causing the dynamic changes in the fluoride water environmental capacity in the lower river network.

Key words: river water environmental capacity; flow rate-water quality joint probability density; T-Copula function; fluoride; the lower Ganjiang River network

随着城市化进程的不断加快和经济社会的快速发展,水资源供需矛盾日益尖锐,由此引发的环境压力日益凸显^[1]。河流作为重要的水资源供给来源,其水质和生态状况直接影响着区域水安全和城市的可持续发展^[2]。在推进污染物总量控制的大背景

下,对水环境容量的研究已成为学界关注的焦点^[3-5],其核算工作有利于区域环境质量评价工作的开展,并能促进区域水环境污染的综合防治和污染排放的合理布局^[6]。赣江作为江西省的母亲河,承担着重要的水资源供应和生态保护功能,其尾闾水

基金项目:赣江下游尾闾综合整治工程科研课题研究项目(JXTC2023020257C1);国家自然科学基金长江水科学联合基金项目(U2040209);国家自然科学基金项目(51879078)

作者简介:杨煊(2001—),男,硕士研究生,主要从事水环境模拟与污染治理研究。E-mail:231305020030@hhu.edu.cn

通信作者:褚克坚(1976—),男,副教授,博士,主要从事水环境模拟与污染治理研究。E-mail:kejianc@hhu.edu.cn

系在为南昌市及周边区域供水的同时,也接纳了其排放的绝大部分污染物^[7]。为判断水系河道污染物的容许容纳阈值,胡锋平等^[8]调查了赣江南昌段的化学需氧量(COD)和氨氮(NH₃-N)的污染负荷,并计算了相应的水环境容量;周刚等^[9]对赣江下游河段的COD和NH₃-N水环境容量进行了核算,给出了各控制断面的超标破坏段数以及各排污口的水环境容量方案;张丽凤^[10]对赣江流域自赣州至赣江入湖口各河段的COD和NH₃-N水环境实际容量与理想容量分别进行了核算。已有的河流水环境容量核算大多关注COD、氮、磷等水质指标^[3-5,8-10];而氟化物作为一种河流环境中广为检出的污染物质,因其高毒性和长期积累特性,对水生态系统与人体健康构成了不容忽视的威胁^[11]。刘正芳^[12]收集并分析了赣江上游8个水文站的氟化物水质监测数据,发现黄龙大桥断面氟化物质量浓度最大值为1 mg/L,达到Ⅲ类水质标准临界值,表明流域存在氟化物污染超标风险。尽管赣江流域部分河段已经存在氟化物容量不足的问题,但对其水环境容量的实质性研究迄今仍鲜见报道。因此,有必要深入探查河流氟化物水环境容量及其动态,为河流生态系统健康的维护与管控提供理论和数据支持。

以往河流水环境容量大多采用确定性方法进行核算,即以90%保证率或近10年最枯月平均流量作为设计流量,以河道实测目标污染物浓度作为设计背景浓度,计算得出确定性水环境容量^[8,10]。事实上,受气候及人类活动等影响,上游来流流量、污染物浓度、降解系数等关键控制参数往往存在随机性,使水环境容量表现出一定的不确定性^[3-5]。在赣江尾间水系工程上游区域,其骨干河道受闸控影响较弱,自然变异性较强,给水环境容量参数的计算带来了相当大的不确定性。因此,对赣江尾间水系开展考虑不确定性的水环境容量研究,不仅是科学严谨性的要求,更是实现有效环境管理、保障水生态安全的关键。

国内外学界对不确定性水环境容量开展了一系列研究,提出了蒙特卡罗^[3-5]、盲数理论^[13]、区间数法^[14]等考虑不确定性的容量计算方法。其中,区间数法将计算参数用区间表示,进行区间运算以得到目标函数结果范围,适用于已知参数最值而不知其精确分布及概率的情况;盲数理论基于计算参数值的区间范围及对应可信度,借助隶属函数进行模糊运算来处理由于语言描述、信息缺失或主观判断带来的不确定性;而蒙特卡罗方法基于参数概率分布,通过大量随机抽样,估计目标函数结果分布。与其他不确定性分析方法相比,蒙特卡罗方法在量化客

观不确定性方面具有更高的精度、灵活性和准确性^[15],在河流水环境容量计算方面得到了广泛应用。例如:Liu等^[3]采用蒙特卡罗方法对白溪水库流域的总氮与总磷水环境容量进行了不确定性核算;Li等^[5]借助蒙特卡罗方法,开展了对太湖水系总氮与总磷水环境容量的核算工作。这些研究虽然考虑了流量、水质等关键控制参数的不确定性,却选择分别考察各项参数的随机分布状况,即假设参数间相互独立,但是对于河流系统,流量、水质之间往往具有显著非线性关联^[16]。蒙特卡罗方法完全依赖于输入变量的分布情况,其本身无法处理流量与水质之间的相关性^[17],若将流量、水质参数分别以各自边缘分布的形式输入蒙特卡罗方法意味着忽略了流量与水质之间的统计相关性,而现实河道中流量变化将直接驱动河道水质同步发生改变。因此,选择不合理的输入分布可能会降低不确定性分析结果的可靠度,不可避免地制约了该方法的有效性与可靠性。

为进行更准确的不确定性分析,必须识别并恰当处理流量与水质参数之间的相关性,并构建流量、水质联合分布作为蒙特卡罗方法的输入分布。T-Copula函数^[18]是基于Sklar定理提出的概率统计方法,其核心在于通过参数或非参数方法,针对随机变量间的依赖结构建模,并度量随机变量间的相关性特征^[19],灵活刻画变量间的非线性、非对称性等复杂依赖关系,能够有效处理水环境中多元随机变量之间的相关性,为构建流量与水质的联合分布提供有效框架^[4,20]。为此,本文引入T-Copula函数构建河道流量-水质联合概率密度分布,提出了基于流量-水质联合概率密度分布的不确定性河流水环境容量计算方法,并以赣江尾间水系骨干河道为研究对象,以氟化物为目标污染物,计算了2024年不同时期骨干河道氟化物水环境容量的概率密度分布,解析了骨干河道水环境容量的时空动态特征,以期当地氟化物污染管控策略的制定与优化提供目标导向和理论支撑。

1 研究区概况

赣江是江西省最大的河流,也是长江主要支流之一,位于长江中下游南岸,源出赣闽边界武夷山西麓,自南向北纵贯江西全省,有13条主要支流汇入。赣江全长766 km,流域面积83 500 km²,其下游横穿南昌市境内。赣江尾间水系干流在八一大桥处分为东河和西河,东河在蛟溪头分为中支与南支;西河下游为主支,在樵舍分汊出北支,随后众多分支均汇入下游鄱阳湖。本文研究区域是指从南昌市生米大桥

到赣江各支流所建尾间工程所包含的河段,全长106.3 km,包含了尾间水系的干流、主支、北支、中支及南支的部分河段。

赣江尾间水系干流及支流划分如图 1(a)所示,各支枢纽工程位置、水功能区划分如图 1(b)所示。研究区域包括干流至各支流枢纽上游骨干河道,共分布有四种水功能区。分别于 2024 年 3 月、5 月、7 月、10 月及 12 月开展赣江尾间水系河道水质原位监测工作,共布设 18 个监测断面。监测断面位置示意图 1(b),断面名称与经纬度坐标见表 1。其中,W1、W3 与 W4 断面所截河道为饮用水水源区,面积约 17 km²,执行Ⅲ类水质标准,根据分支情况将该区域划分为 W1—W2 断面的干流段饮用水水源区、W2—W3 断面的西河饮用水水源区、W2—W4 断面的东河饮用水水源区三大计算河段。W3—W5 断面(主支工业用水区)、W4—W7 断面(东河工业用水区)、W7—W16 断面(南支工业用水区)为工业用水区,河道面积分别为 2.3、3.2、2.5 km²,执行Ⅳ类水质标准。W5—W9 断面(主支景观用水区)为景观娱乐用水区,面积约 14.3 km²,执行Ⅲ类水质标准。W11—W12 断面(北支渔业用水区)、W6—W14 断面(中支渔业用水区)、W16—W17 断面(南支渔业用水区)均为渔业用水区,面积分别为 0.6、11.6、4.0 km²,执行Ⅲ类水质标准。

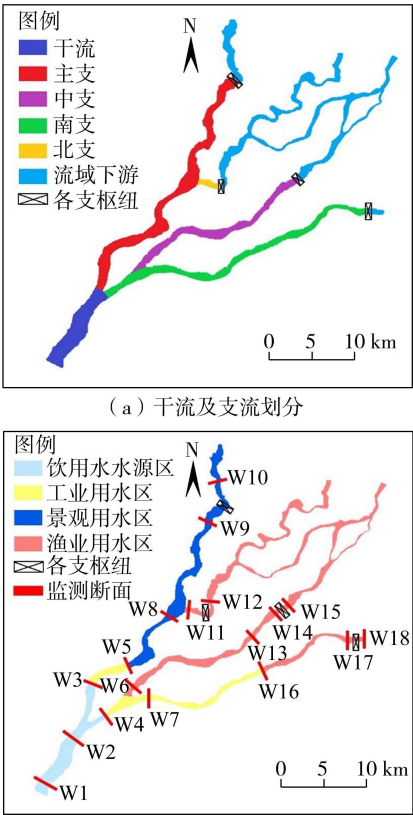


图 1 赣江尾间水系概况

表 1 赣江尾间水系水质监测点位

编号	断面名称	位置
W1	外洲水文站/国控生米	(28°62'N,115°83'E)
W2	八一大桥	(28°69'N,115°87'E)
W3	双港水厂	(28°74'N,115°89'E)
W4	城北水厂	(28°69'N,115°89'E)
W5	江豚观测点	(28°77'N,115°93'E)
W6	中支上游	(28°73'N,115°93'E)
W7	南支上游	(28°72'N,115°93'E)
W8	樵舍	(28°83'N,116°00'E)
W9	主支枢纽上游/鱼道	(28°95'N,116°04'E)
W10	主支枢纽下游/昌邑	(29°01'N,116°04'E)
W11	北支枢纽上游	(28°83'N,116°01'E)
W12	北支枢纽下游/蒋埠	(28°83'N,116°03'E)
W13	楼前	(28°79'N,116°07'E)
W14	中支枢纽上游/鱼道	(28°80'N,116°07'E)
W15	中支枢纽下游	(28°80'N,116°08'E)
W16	滁槎	(28°76'N,116°09'E)
W17	南支枢纽上游/省控吉里	(28°83'N,116°20'E)
W18	南支枢纽下游	(28°83'N,116°21'E)

2 研究方法

2.1 水环境容量计算方法

根据 DB32/T 4542—2023《河网水功能区水环境容量核定技术规范》,采用总体达标法计算水环境容量。总体达标法根据河网水功能区水质目标、设计水文条件及污染物综合降解系数,采用完全混合模型计算各时间和空间单元的水环境容量,经时间和空间求和得到河网区域水环境容量值。

2.2 T-Copula 联合分布构建与抽样

运用 T-Copula 函数^[18] 构建流量与水质联合分布,具体步骤是:①确定流量与水质各自的边际分布;②将流量与水质的原始样本通过概率积分变换转化为服从[0,1]区间均匀分布的序列;③引入 T-Copula 函数对变换后的数据进行拟合;④对拟合好的 T-Copula 联合分布进行随机抽样,生成大量符合联合特征的流量与水质样本;⑤通过边际分布的逆变换将样本还原到原始物理量尺度,从而获得流量与水质的联合抽样值。

2.3 蒙特卡罗抽样与模型参数设定

2.3.1 蒙特卡罗方法

本文采用蒙特卡罗方法^[21] 对赣江尾间水系骨干河道的氟化物水环境容量进行不确定性核算。具体做法是,将大量基于流量与水质联合分布生成的抽样值输入水环境容量计算模型,从而获得水环境容量的概率分布特征。

2.3.2 模型参数设定

2.3.2.1 设计流量

根据以往经验,水文参数基本服从皮尔逊Ⅲ型

(P-Ⅲ型)分布。以多年流量监测数据作为初始数据对 P-Ⅲ型曲线进行参数估计,并基于优化适线法^[22-23]得到最终的流量概率密度分布曲线,具体步骤是:①计算初始数据的样本均值、变差系数和偏态系数^[24];②计算 P-Ⅲ型分布的参数,包含形状参数 α 、尺度参数 β 和位置参数 α_0 ;③根据不同月的流量概率密度分布,使用蒙特卡罗方法进行随机抽样,并将多组抽样值作为水环境容量计算设计流量。

2.3.2.2 污染物监测浓度与水质标准

在水质监测过程中,各项步骤(如采样、保存、运输、仪器测量、数据记录等)均存在微小误差,导致水质监测值存在不确定性^[25-26]。其中,采样过程带来的不确定性通常呈现对数正态分布特征^[25],分析过程带来的不确定性则呈现正态分布特征^[26],水质监测值的不确定性往往是多误差叠加的结果。在许多研究中,通常假定监测浓度适用对数正态分布,而 Van Buren 等^[27]对水体中 14 种污染物的监测浓度分布进行了研究,发现对数正态分布对可溶性成分的分布拟合效果较差,而正态分布的拟合效果较好,氟化物为可溶性污染物,因此,选择正态分布作为氟化物监测浓度分布是更合理的。

正态分布通常由均值与标准差两项参数决定,以往研究指出,对于那些未收集到大量数据的水质参数可以假定其单一监测值为均值,且变异系数约等于该值的 10%^[28]。本文综合考虑监测过程中引入的不确定性大小以及水质参数取样范围的合理性,选择以氟化物质量浓度的实测值作为均值,以其 5%作为标准差构建正态分布。该设定反映了监测过程可能产生的有限偏差,同时确保抽样值主要分布在均值附近,避免出现较多极端值,使所得水质分布更符合实测数据特征,从而获得更贴近实际的水环境容量分布。

河流各计算单元的水质目标值由该河段的水功能区划确定,根据不同水功能区划的水质标准,结合 GB 3838—2002《地表水环境质量标准》,获得河流各计算单元的水质目标值。

2.4 参数敏感性分析

采用修正 OAT(one-variable-at-a-time)方法^[29]对水环境容量计算模型的各项参数的敏感度进行测试。其基本思路是,对水环境容量计算模型的流量或水质参数引入一定程度的扰动(通常取 10%^[30-31]),计算扰动对计算结果的影响程度,以此作为该参数对计算模型的敏感度。由于传统 OAT 方法仅适用于单一自变量指标的波动情形^[31],而本文所建模型的自变量为流量或水质参数抽样值组成的数据集,某一参数扰动即对该参数抽样数据集中

所有元素均引入 10%的变化。为此,本文对传统 OAT 方法进行改进,引入范数来量化参数抽样数据集扰动下氟化物水环境容量数据集的变化水平,具体计算公式为:

$$S_Q = \frac{\|W_{1.1} - W_{0.9}\| / 0.2 \|W\|}{(Q_{1.1} - Q_{0.9}) / 0.2 \|Q\|} \tag{1}$$

$$S_C = \frac{\|W_{1.1} - W_{0.9}\| / 0.2 \|W\|}{(C_{1.1} - C_{0.9}) / 0.2 \|C\|} \tag{2}$$

式中: S_Q 、 S_C 分别为流量与水质参数的敏感度; $W_{1.1}$ 、 $W_{0.9}$ 分别为将对应参数抽样值提高、降低 10%得到的水环境容量计算结果数据集; $Q_{1.1}$ 、 $Q_{0.9}$ 分别为将流量抽样值提高、降低 10%得到的流量抽样值数据集; $C_{1.1}$ 、 $C_{0.9}$ 分别为将水质抽样值提高、降低 10%得到的水质抽样值数据集; W 、 Q 、 C 分别为水环境容量、流量、水质初始计算结果或抽样值数据集。

3 结果与分析

3.1 不确定性氟化物水环境容量核算参数分布

基于赣江尾间水系外洲水文站在三峡大坝蓄水后的流量监测数据(2004—2022 年),以各年 3 月、5 月、7 月、10 月、12 月流量监测数据对 P-Ⅲ型分布进行参数估计,得到外洲站不同时期流量概率密度分布情况,以此作为赣江尾间水系干流段设计流量概率密度分布。而尾间工程干流下游分支众多,参考周苏芬等^[32-33]对赣江尾间区域分流特征的研究结果,干流下游各分支设计流量由干流设计流量抽样值及各支流分流比计算获得。基于 2024 年 5 次氟化物质量浓度原位监测数据,对正态分布进行参数估计,得到各监测断面不同时期氟化物质量浓度概率密度分布情况。随后将外洲站流量概率密度分布与其氟化物质量浓度概率密度分布作为边际分布,基于 Sklar 定理与 T-Copula 函数计算公式,构建流量-氟化物质量浓度联合概率密度分布,结果见图 2。由图 2 可知,外洲站 2024 年 3 月联合概率密度峰值位于氟化物质量浓度为 0.245~0.255 mg/L、流量为 1 500~2 500 m³/s 处,表明 3 月外洲站流量及氟化物质量浓度以该组合出现的概率较大;5 月联合概率密度峰值出现在流量极端值附近,流量监测值常在 2 000 m³/s 左右及 7 000 m³/s 以上,对应氟化物质量浓度为 0.180~0.190 mg/L;7 月联合概率密度峰值位于氟化物质量浓度为 0.180~0.185 mg/L、流量为 500~5 000 m³/s 处,说明该月河道氟化物质量浓度在全年中有较大概率相对较低,且该月流量分布范围相对较广;10 月外洲站氟化物质量浓度与流量的联合概率密度呈双峰分布,其峰值位于氟化物质量浓度为 0.300~0.320 mg/L、流量分别为

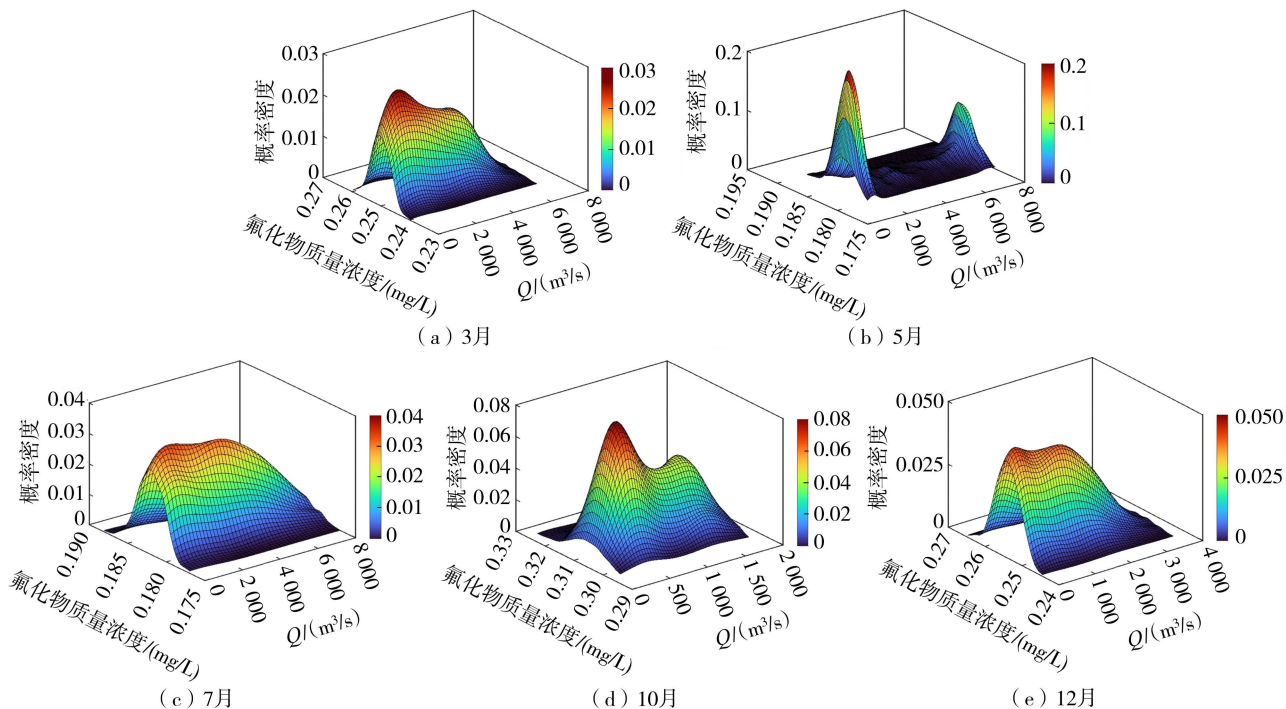


图2 外洲站流量-氟化物质量浓度联合概率密度分布

300~500 m³/s 及 1 300 m³/s 左右处;12 月联合概率密度峰值则位于氟化物质量浓度为 0.250~0.260 mg/L、流量为 500~2 000 m³/s 处,表明该月外洲站流量通常小于 2 000 m³/s,且常年流量数据相对稳定。

总体上看,3 月、7 月及 12 月的联合分布表现为单峰形态,且概率密度集中,说明这几个月的流量与氟化物质量浓度之间存在相对固定的搭配关系,水质-流量组合的不确定性较弱,对应的水环境容量分布范围也较窄。相比之下,5 月与 10 月则呈现多峰特征,概率密度分散,说明这两个月水质-流量组合波动性较强,直接导致水环境容量计算结果的上下限差距较大,表现出更强的不确定性。这可能与季节过渡期的水文特征有关:5 月处于春夏交替阶段,10 月处于秋冬交替阶段,降水过程波动显著,易造成流量在高值与低值区间的聚集,从而形成联合分布的双峰格局。

3.2 氟化物水环境容量动态变化

基于赣江干流、主支、北支、中支和南支的流量-氟化物质量浓度 T-Copula 联合概率密度分布,采用蒙特卡罗方法对联合分布进行随机抽样,得到流量及氟化物质量浓度抽样值。根据 DB32/T 4542—2023《河网水功能区水环境容量核定技术规范》得出氟化物日水环境容量,并换算得到月水环境容量。各骨干河道不同时期的概率密度分布见图 3,累积概率密度分布见图 4。

由图 3 和图 4 可知,各骨干河道在各时期均具

有较高概率具备水环境容量。2024 年氟化物水环境容量在空间上表现出明显差异,总体呈现北支最小,中支次之,干流显著高于中支,而南支与主支水环境容量相近且整体处于较高水平的分布格局。氟化物水环境容量在时间上总体呈现出 3—5 月先有所上升,后持续下降至 10 月最低值,随后又在 12 月有所回升的波动情势。主支和南支在 5 月具有相对较高的氟化物水环境容量,这可能与 5 月河道流量较大有关,且赣江尾间水系主支与南支均分布有工业用水区,其相对较低的水质要求(执行Ⅳ类水质标准)也导致其具有更大的氟化物水环境容量。

值得注意的是,从图 3 可以看出,仍有部分河道在特定时期存在超容量风险。部分河道氟化物水环境容量概率密度函数曲线在水环境容量为零处截断,表明其有概率不具备水环境容量。其中,干流、北支和中支存在较高的超容量风险,尤其是在 10 月和 12 月,这可能是因为这两月河道流量较低,且以上 3 个河道水功能区为饮用水水源区或渔业用水区,均执行Ⅲ类水质标准,对氟化物质量浓度要求相对严格。

3.3 氟化物水环境容量时空分布特征

为进一步分析氟化物水环境容量的空间分布与时间动态特征,对各功能区河段水环境容量概率密度分布期望值进行计算。

图 5 为尾间水系骨干河道各水功能区河段氟化物水环境容量期望值空间分布特征箱线图。总体上看,各河段氟化物水环境容量期望值存在明显的空

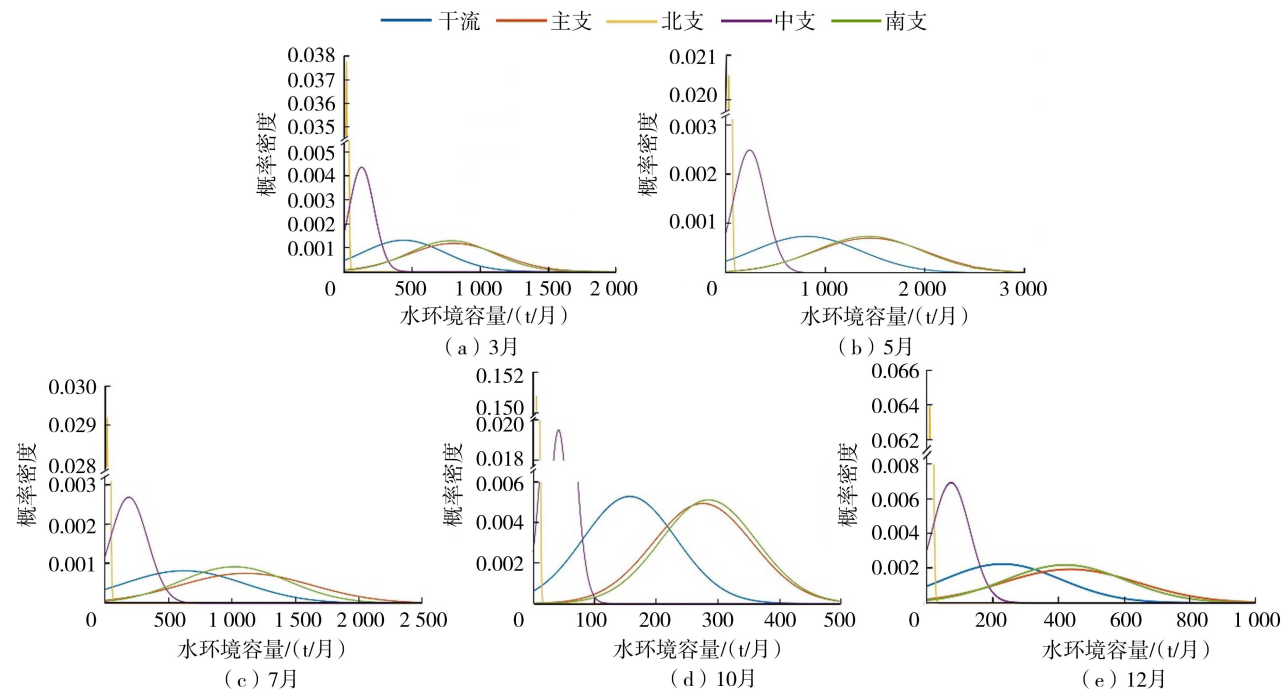


图3 各骨干河道不同时期氟化物水环境容量概率密度分布

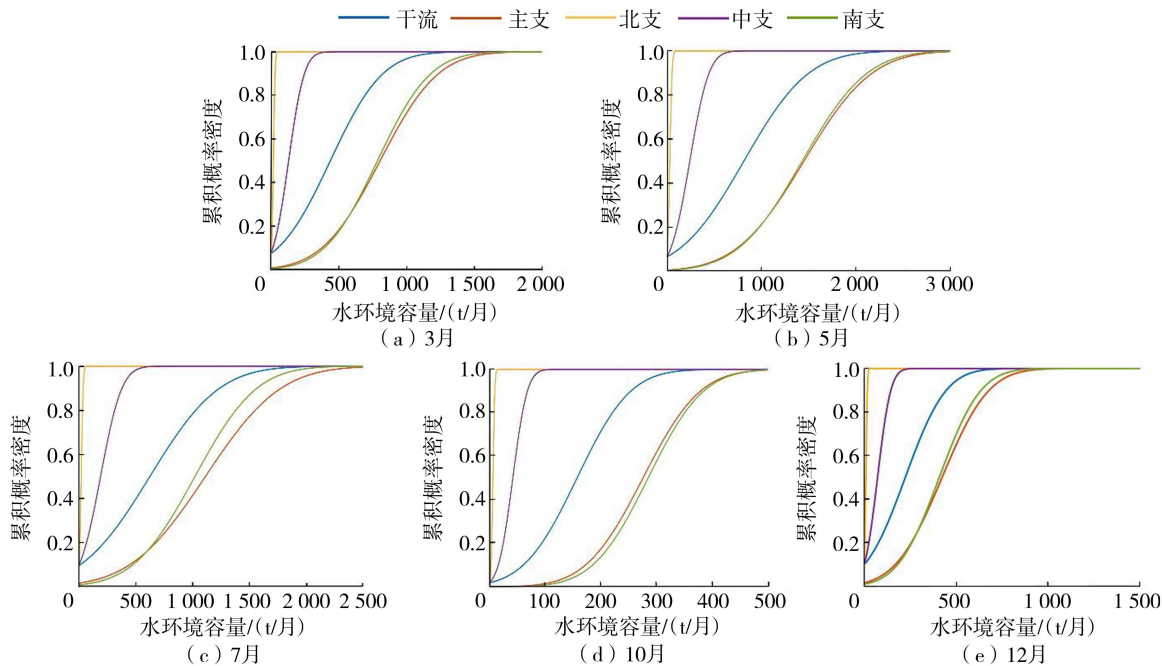


图4 各骨干河道不同时期氟化物水环境容量累积概率密度分布

间差异,整体表现为北支渔业用水区最小,南支渔业用水区略高于北支;南支工业用水区与中支渔业用水区水环境容量相近,且均高于前两者;东河饮用水水源区、主支景观用水区与西河饮用水水源区水环境容量基本相当,并进一步增大;主支工业用水区与东河工业用水区水环境容量相近,且高于前述各功能区;赣江干流段水环境容量最大,显著高于其他所有功能区。这一排序清晰地反映了氟化物水环境容量在尾闾水系各河段的空间分异规律。值得注意的是,尽管赣江干流段与北支渔业用水区全年氟化物质

量浓度未见显著差异,但前者水环境容量期望值(157.35~822.92 t/月)达到后者(5.85~29.46 t/月)的27.1~33.5倍。

图6为各水功能区河段氟化物水环境容量期望值在2024年不同时期的动态变化特征。各水功能区河段氟化物水环境容量的时变过程基本一致,总体呈3—5月上升、而后持续下降至10月、12月有所回升的振荡波动情势。其中,5—10月全流域整体氟化物水环境容量变化幅度最大,10月水环境容量各河段平均期望值(枯水期,765.29 t/月)约为

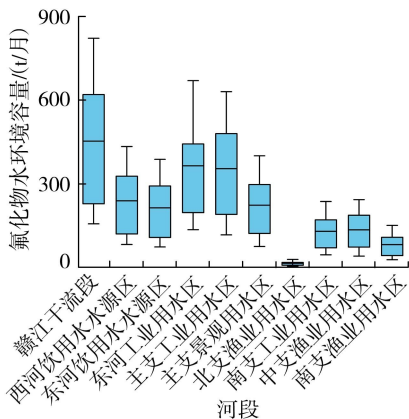


图5 各水功能区河段氟化物水环境容量期望值空间分布特征箱线图

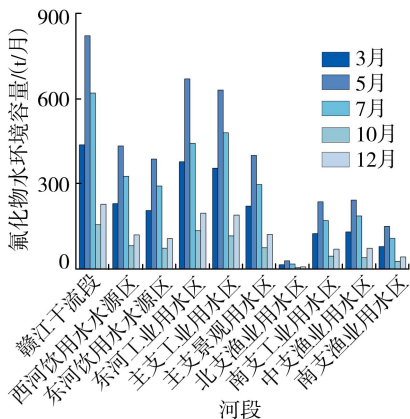


图6 各水功能区河段氟化物水环境容量期望值时间动态特征

5月(丰水期,4011.43 t/月)的19.1%;中支渔业用水区降幅最高,10月水环境容量各河段平均期望值(41.14 t/月)仅为5月(243.83 t/月)的16.9%。

结合研究区域实际情况来看,其骨干河道氟化物水环境容量的时间动态变化特征可能受降雨量、气温、区域污染物点源和面源排放等因素的综合影响。其中,南昌气象站所收集的1993—2022年各月实测降水与气温数据的季节性变化显著,降水量由低到高排序为:秋季(9—11月)、冬季(12月至次年2月)、春季(3—5月)、夏季(6—8月),同时相关研究月份气温呈现出3—7月连续上升,后持续下降至12月最低值的变化情势;长三角地区氟化物污染物排放主要源于工业企业,特别是光伏及半导体企业的废水点源排放^[34],各时期工业废水排放强度主要与生产计划有关^[35];区域城市用水强度在7—10月相对较高,其他时期则相对较低^[36-37]。

2024年3月区域陆续开展春耕工作^[38],含氟化肥和农药的使用量随着农业活动的增强而增加,且区域3月降水量处于全年较高水平,迫使河道接受更多的氟化物农业面源污染。同时,该月河道流量高于冬季而低于夏季,虽氟化物农业污染入河量相

对其他时期较高,但该月河道氟化物水环境容量相对较高,高于10月与12月,低于5月与7月;5—7月区域逐渐过渡到夏季,农业活动有所减弱,城市用水量逐渐增加^[36],同时受季风气候影响,降水量与气温在该时期逐渐提升,大量降水使得城市氟化物面源入河量有所增加,也为河道带来大量流量,加速了河道氟化物污染物的迁移扩散行为,而气温的提升也促进了氟化物污染物的生物转化过程,综合使得5月与7月的河道具有全年最大的氟化物水环境容量;10月与12月区域进入秋冬季节,该时期降水量与气温相对较低,虽然城市与农村面源也相对较少,但河道流量、水位、流速都相对较低,氟化物污染物在河道中聚集且难以迁移至下游,再加上生物转化过程逐渐受限,使得该时期氟化物水环境容量远低于春夏两季。

3.4 水环境容量动态变化关键驱动因子

赣江尾间工程各骨干河道流量及水质的敏感度计算值见表3。其中,各支流量参数敏感度介于0.629~0.908之间,干流流量参数敏感度最高;各支水质参数敏感度介于0.182~0.296之间,北支水质参数敏感度最高。总体上看,流量敏感度平均值为0.722,水质敏感度平均值为0.240,前者约为后者的3.01倍,说明尾间水系中驱动氟化物水环境容量动态变化的关键因素为河道流量。流量扰动通过改变河道的水动力条件和稀释扩散能力,直接驱使水环境容量发生改变;当流量增加时,河道稀释能力增强,紊动加剧,污染物混合效率提升,从而显著提高了水体自净能力,水环境容量也有所提升;流量减少时,稀释效应减弱,水环境容量相应缩减。水质则主要通过改变水体的剩余承载空间来驱动水环境容量变化:当污染物浓度上升时,河流可容纳的新增污染物量迅速下降,水环境容量随之下降;当污染物浓度降低时,水体可容纳污染物余量增加,水环境容量相应提升。相较流量扰动,水质的扰动往往不能完整地作用到水环境容量,导致水环境容量对水质变化的敏感度较低,这可能与工业排放特征及氟化物在河道中的转化过程有关。其中,工业污染排放具有相对稳定和连续的特征^[35],受稳定的流量与排放源影响,一段时间内河道会形成相对稳定的浓度场。当某断面水质被引入扰动时,污染物仍在持续输入,同时污染物在河道中的迁移扩散过程会对水质局部扰动产生削弱和平滑作用,使得断面水质逐渐趋于原有水平,从而直接导致水环境容量计算结果未发生较大改变。而在短时间尺度内,氟化物的去除或转化过程(如沉淀、吸附)对其浓度的影响有限,远

不及流量带来的迁移扩散过程的影响。

表 3 各骨干河道流量与水质参数敏感度

参数	干流	主支	北支	中支	南支
流量	0.908	0.680	0.714	0.629	0.680
水质	0.182	0.290	0.296	0.251	0.182

4 结 论

a. 各骨干河道全年均具有一定的氟化物水环境容量,但部分河道存在潜在的超容量风险。其中,北支水环境容量最小,中支次之,干流显著高于中支,而南支与主支水环境容量基本持平且相对高于其他河道。

b. 空间上,赣江尾闾水系干流段与北支渔业用水区分别具有最大、最小氟化物水环境容量期望值;时间上,不同时期尾闾水系水环境容量期望值呈现一定的往复波动情势,总体呈 3—5 月上升、而后持续下降至 10 月、12 月有所回升的振荡波动情势。

c. 敏感度计算结果显示流量参数敏感度显著高于水质参数,表明河流流量的季节性分异是造成尾闾水系氟化物水环境容量动态变化的关键驱动因素。

参考文献:

[1] Wang Shijun, Wang Dan, Yang Xianghua. Urbanization and its impacts on water environment in Tumen River Basin[J]. Chinese Geographical Science, 2002, 12(3): 273-281.

[2] 范中亮,王剑楠,许佳,等. 浅析水环境对城市可持续发展的影响[J]. 水资源与水工程学报, 2009, 20(2): 83-86. (Fan Zhongliang, Wang Jiannan, Xu Jia, et al. Impact analysis of water environment on urban sustainable development[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2009, 20(2): 83-86. (in Chinese))

[3] Liu Ruimin, Sun Chengchun, Han Z X, et al. Water environmental capacity calculation based on uncertainty analysis:a case study in the Baixi watershed area, China [J]. Procedia Environmental Sciences, 2012, 13: 1728-1738.

[4] Li Jiaqi, Shen Zhenyao. Uncertainty analysis and economic value prediction of water environmental capacity based on Copula and Bayesian model:a case study of Yitong River, China[J]. Journal of Environmental Management, 2024, 359:121059.

[5] Li Ranran, Zou Zhihong. Water environmental capacity analysis of Taihu Lake and parameter estimation based on the integration of the inverse method and Bayesian modeling [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2015, 12 (10): 12212-

12224.

[6] 夏青. 水环境容量[J]. 环境保护科学, 1981(4): 21-29. (Xia Qing. Water environmental capacity [J]. Environmental Protection Science, 1981 (4): 21-29. (in Chinese))

[7] 刘文强,郁达伟,李昆,等. 降雨特征对赣江南昌段河流断面不同水期的水质影响分析[J]. 环境工程, 2023, 41(8): 91-99. (Liu Wenqiang, Yu Weida, Li Kun, et al. Effects of rainfall characteristics on river water quality in different water periods:a case study of Nanchang section in the Ganjiang River [J]. Environmental Engineering, 2023, 41(8): 91-99. (in Chinese))

[8] 胡锋平,侯娟,罗健文,等. 赣江南昌段污染负荷及水环境容量分析[J]. 环境科学与技术, 2010, 33(12): 192-195. (Hu Fengping, Hou Juan, Luo Jianwen, et al. Analysis of pollution loading and water environmental capacity of Gan River in Nanchang [J]. Environmental Science & Technology, 2010, 33 (12): 192-195. (in Chinese))

[9] 周刚,雷坤,富国,等. 河流水环境容量计算方法研究 [J]. 水利学报, 2014, 45(2): 227-234. (Zhou Gang, Lei Kun, Fu Guo, et al. Calculation method of river water environmental capacity [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2014, 45(2): 227-234. (in Chinese))

[10] 张丽凤. 赣江流域水污染物总量分配及控制方案研究: 以袁河为例[D]. 南昌:南昌大学, 2010.

[11] Zuo Huan, Chen Liang, Kong Ming, et al. Toxic effects of fluoride on organisms [J]. Life Sciences, 2018, 198: 18-24.

[12] 刘正芳. 2007—2019 年桃江水质变化及其驱动因子分析[D]. 赣州:江西理工大学, 2021.

[13] 李如忠,汪家权,王超,等. 不确定性信息下的河流纳污能力计算初探[J]. 水科学进展, 2003, 14(4): 459-463. (Li Ruzhong, Wang Jiaquan, Wang Chao, et al. Calculation of river water environmental capacity under unascertained information [J]. Advances in Water Science, 2003, 14(4): 459-463. (in Chinese))

[14] Parmele L H. Errors in output of hydrologic models due to errors in input potential evapotranspiration [J]. Water Resources Research, 1972, 8(2): 348-359.

[15] Papadopoulos C E, Yeung H. Uncertainty estimation and Monte Carlo simulation method [J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2001, 12(4): 291-298.

[16] Zavareh M M J, Mahjouri N, Rahimzadegan M, et al. A drought index based on groundwater quantity and quality: application of multivariate copula analysis [J]. Journal of Cleaner Production, 2023, 417: 137959.

[17] Chang Chehao, Tung Y K, Yang J C. Monte Carlo simulation for correlated variables with marginal distributions [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1994, 120(3): 313-331.

- [18] Demarta S, McNeil A J. The t copula and related copulas [J]. International Statistical Review, 2005, 73 (1): 111-129.
- [19] Sklar M. Fonctions de répartition à n dimensions et leurs marges[J]. Annales de l'ISUP, 1959, 8(3): 229-231.
- [20] Li Jiaqi, Shen Zhenyao, Cai Jianying, et al. Copula-based analysis of socio-economic impact on water quantity and quality: a case study of Yitong River, China[J]. Science of the Total Environment, 2023, 859: 160176.
- [21] James F. Monte Carlo theory and practice[J]. Reports on Progress in Physics, 1980, 43(9): 1145-1189.
- [22] 邢广军. P-Ⅲ曲线拟合软件的研发与应用[J]. 水文, 2009, 29(2): 74-77. (Xing Guangjun. Development and application of P-Ⅲ curve fitting software[J]. Journal of China Hydrology, 2009, 29(2): 74-77. (in Chinese))
- [23] 金光炎. 论水文频率计算中的适线法[J]. 水文, 1990 (2): 1-6. (Jin Guangyan. On line fitting method in hydrologic frequency calculation [J]. Journal of China Hydrology, 1990(2): 1-6. (in Chinese))
- [24] 慕平, 慕星. 经验频率公式的比较与选择[J]. 人民黄河, 2023, 45(7): 48-51. (Mu Ping, Mu Xing. Comparison and selection of empirical frequency formulas[J]. Yellow River, 2023, 45(7): 48-51. (in Chinese))
- [25] Ramsey M H, Ellison S L R. Combined uncertainty factor for sampling and analysis[J]. Accreditation and Quality Assurance, 2017, 22(4): 187-189.
- [26] Thompson M, Howarth R J. The frequency distribution of analytical error [J]. Analyst, 1980, 105 (1257): 1188-1195.
- [27] Van Buren M A, Watt W E, Marsalek J. Application of the log-normal and normal distributions to stormwater quality parameters[J]. Water Research, 1997, 31(1): 95-104.
- [28] Liu C, Bennett D H, Kastenber W E, et al. A multimedia, multiple pathway exposure assessment of atrazine: fate, transport and uncertainty analysis [J]. Reliability Engineering & System Safety, 1999, 63(2): 169-184.
- [29] Cho E, Arhonditsis G B, Khim J, et al. Modeling metal-sediment interaction processes: parameter sensitivity assessment and uncertainty analysis [J]. Environmental Modelling & Software, 2016, 80: 159-174.
- [30] Hamby D M. A review of techniques for parameter sensitivity analysis of environmental models [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 1994, 32(2): 135-154.
- [31] Lenhart T, Eckhardt K, Fohrer N, et al. Comparison of two different approaches of sensitivity analysis [J]. Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, 2002, 27 (9-10): 645-654.
- [32] 周苏芬, 黄志文, 唐立模, 等. 赣江尾间多级分汊河道分流影响因素及联动响应分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2019, 47(2): 163-169. (Zhou Sufen, Huang Zhiwen, Tang Limo, et al. Analysis on influencing factors of flow diversion ratio and linkage response of multistage bifurcations in the Ganjiang River [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2019, 47(2): 163-169. (in Chinese))
- [33] 陈珺, 嵇敏, 林江, 等. 赣江尾间河段水沙特性及河床演变[J]. 水利水电科技进展, 2012, 32(3): 1-5. (Chen Jun, Ji Min, Lin Jiang, et al. Runoff-sediment characteristics and riverbed evolution of Ganjiang River sink [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2012, 32(3): 1-5. (in Chinese))
- [34] 陈恒飞. 半导体行业废水中氟化物排放标准及处理技术分析[J]. 广东化工, 2024, 51(17): 131-133. (Chen Hengfei. Emission standards and treatment of fluoride in semiconductor industry wastewater technical analysis [J]. Guangdong Chemical Industry, 2024, 51(17): 131-133. (in Chinese))
- [35] Sun Chu, Li Baojie, Chen Lei, et al. An improved hourly-resolved atmospheric NO_x emission inventory of industrial sources based on Continuous Emission Monitoring System data: case of Jiangsu Province, China [J]. Journal of Cleaner Production, 2023, 419: 138192.
- [36] 张誉, 徐巧, 刘志刚, 等. 沿海某城市居民生活用水趋势与特性研究[J]. 城镇供水, 2023 (1): 89-93. (Zhang Yu, Xu Qiao, Liu Zhigang, et al. Research on the trend and characteristic of water consumption in a coastal city [J]. City and Town Water Supply, 2023 (1): 89-93. (in Chinese))
- [37] 刘波, 汪紫薇, 王文鹏, 等. 我国城市用水效率关键指标时空格局分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2020, 48(6): 534-541. (Liu Bo, Wang Ziwei, Wang Wenpeng, et al. Spatiotemporal characteristics analysis of major indicators of urban water use efficiencies over mainland China [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2020, 48(6): 534-541. (in Chinese))
- [38] 刘华星, 李天荣. 江西发布春耕春播农事建议: 早稻大面积直播期安排在4月上中旬[EB/OL]. (2024-03-07) [2025-09-05]. <https://www.jxcn.cn/system/2024/03/07/020421969.shtml>.

(收稿日期: 2025-03-31 编辑: 俞云利)