

城市河流缺氧现象驱动因素识别及机制解析 ——以南京秦淮河为例*

郑婉婷¹, 李一平^{1**}, 潘泓哲¹, 刘 军², 柏 松², 赵明明², 胡 静², 谢鑫苗², 王亚宁¹, 金巧依¹, 余 晨¹

(1: 河海大学环境学院, 南京 210098)

(2: 江苏省南京环境监测中心, 南京 210019)

摘 要: 人为干扰和气候变化导致城市河流缺氧现象频发, 研究缺氧成因对于水生态保护至关重要。基于 2021 年丰水年与 2022 年枯水年秦淮河流域 4 个典型水质监测站实测数据, 分析了年际、汛期-非汛期和典型降雨事件 3 个时间尺度下溶解氧的变化规律。采用 Spearman 秩相关法识别了溶解氧变化的主要影响因素及驱动机制, 并构建了包含以上因素的决策树模型, 揭示了流域轻度、重度缺氧现象的控制因素阈值及其联合诱发过程。结果表明, 空间上, 秦淮河流域溶解氧浓度从上游到下游逐渐降低, 低值区位于外秦淮河入江口处的三汊河口站, 年均值为 5.37 mg/L。不同时间尺度上, 2022 年秦淮河流域溶解氧水平高于 2021 年, 4 站点溶解氧年均值上升 0.54~1.25 mg/L, 轻度及重度缺氧发生次数减少 0.1~3.7 倍; 4 站点汛期溶解氧均值比非汛期低 3.38~4.57 mg/L; 随着降雨强度的增大, 河流雨后缺氧现象减少, 中雨下的缺氧频率和程度最高。各河段的缺氧特征和机制不同, 周边汇水区域以林地和耕地为主且轻度缺氧发生居多的河段, 其轻度及重度缺氧现象由水温、pH 和高锰酸盐指数诱发。而在汇水区域以建成区为主且重度缺氧发生居多的河段, 汛期溶解氧变化多由总磷、氨氮和高锰酸盐指数驱动, 其轻度及重度缺氧现象的关键诱发因素包括水温、pH 和总磷。基于此, 对不同河段提出了针对性的防控措施, 有助于减缓城市河流缺氧现象。

关键词: 城市河流; 溶解氧; 时空变化; 驱动因素; 决策树模型; 缺氧机制

Driving factors identification and mechanism analysis of hypoxia in urban rivers— Considering the Qinhuai River in Nanjing*

Zheng Wanting¹, Li Yiping^{1**}, Pan Hongzhe¹, Liu Jun², Bai Song², Zhao Mingming², Hu Jing², Xie Xinmia², Wang Yaning¹, Jin Qiaoyi¹ & Yu Chen¹

(1: College of Environment, Hohai University, Nanjing 210098, P.R.China)

(2: Nanjing Environmental Monitoring Center of Jiangsu Province, Nanjing 210019, P.R.China)

Abstract: Human interference and climate change have led to frequent hypoxia in urban rivers. Studying the causes of hypoxia is crucial for aquatic ecological protection. Based on the measured data collected from four typical water quality monitoring stations in Qinhuai River Basin from the wet year of 2021 to the dry year of 2022, this study analyzed the spatiotemporal variation patterns of dissolved oxygen on three-time scales: annual, flood season to non-flood season, and typical rainfall events. The Spearman rank correlation method was used to identify the main influencing factors and driving mechanism of dissolved oxygen changes and a decision tree model including these factors was constructed to reveal the threshold of controlling factors and their joint induction process of mild and severe hypoxia in the basin. The results show that the dissolved oxygen concentration in the Qinhuai River Basin gradually decreases from upstream to downstream, with the low-value area located at the Sancha estuary station at the entrance of the

* 2024-07-04 收稿; 2024-09-22 收修改稿。

国家重点研发计划项目(2023YFC3208900, 2023YFC3208904)、国家自然科学基金项目(52039003)、江苏省环境监测科研基金项目(2101)、南京市环保科研课题资助项目(202214)和江苏省南京环境监测中心自主立项科研项目联合资助。

** 通信作者; E-mail: liyiping@hhu.edu.cn。

Qinhuai River, having an annual average of 5.37 mg/L and only 3.23 mg/L during the flood season. On different time scales, the dissolved oxygen level in Qinhuai River Basin in 2022 was better than that in 2021, with the annual average at four stations increasing by 0.54–1.25 mg/L and the number of mild and severe hypoxia events decreasing by 0.1–3.7 times. The average dissolved oxygen in flood season is 3.38–4.57 mg/L, lower than in non-flood season. With the increase in rainfall intensity, the phenomenon of oxygen deficiency in rivers after rain decreases, with the frequency and degree of oxygen deficiency under moderate rain being the highest, at 98.0% and 1.13 mg/L, respectively. The characteristics and mechanisms of hypoxia differ in each river reach. In the reaches where the surrounding catchment area is mainly forestland and cultivated land, mild anoxic events occur mostly, and mild and severe hypoxia events are mostly induced by water temperature, pH, and permanganate index. However, in the river sections where the catchment area is mainly built-up areas and severe anoxic events occur mostly, the change of dissolved oxygen during flood season is mainly driven by total phosphorus, ammonia nitrogen, and permanganate index. The key inducing factors of mild and severe anoxic events include water temperature, pH, and total phosphorus. Based on this, targeted prevention and control measures were proposed for different river sections to help mitigate hypoxia in urban rivers.

Keywords: Urban rivers; dissolved oxygen; spatiotemporal variation; driving factors; decision tree; hypoxia mechanism

溶解氧是我国河道水质评价的重要指标之一,溶解氧充裕对改善水环境及维持水生态系统健康具有重要意义^[1]。当水体的耗氧速率大于复氧速率时,溶解氧浓度开始降低,为适应缺氧环境,许多物种的生理形态及行为特征等将发生改变^[2]。此外,缺氧还会刺激沉积物中温室气体如甲烷和一氧化二氮的产生,形成极端气候—水环境—水生态间的恶性循环^[3-4]。随着社会经济的发展与不断增多的极端气候事件,目前全球河流均出现了不同程度的污染,缺氧现象频发^[5-6]。因此,研究城市河流缺氧现象的影响因素及驱动机制是推进水生态保护的科学基础。

河流缺氧现象的生消由耗氧过程(逸散作用、氧化作用和呼吸作用等)和复氧过程(大气复氧和浮游植物光合作用产氧等)共同主导^[7],受到自然要素(水温、降雨等)和人类活动(污染物排放、水利工程调控等)的综合影响^[8]。在高度城市化的河网区域,由于社会经济发达、人口密集,排水管网普遍存在结构性和功能性缺陷,雨后大量废污水经排放或排水系统溢流进入河流,易导致水体受到冲击污染,是目前城市雨天河流水质波动及缺氧现象加剧的重要诱因。

秦淮河作为长江下游的一条重要支流,在南京市的水环境保护和生态可持续发展中发挥着关键作用。近年来随着水环境整治力度加大,河流水质有了一定的提升,但目前仍面临水体汛期溶解氧长期不达标及雨后溶解氧陡降的突出现象。加之近年来受到极端气候的影响,2022年江淮流域呈现出明显的干旱少雨特征^[9],对河流水质达标及水生态稳定构成严峻考验。在气候变化和人类活动不断加剧的大背景下,秦淮河流域溶解氧的时空分布、主要影响因素以及诱发不同程度缺氧现象的控制因素阈值等都有待研究。然而,先前研究主要针对河流综合水质进行分析,在此基础上探讨溶解氧变化情况,单一针对缺氧情况及其机制的研究较少。机器学习可高效集成处理多来源数据,有效捕捉出变量之间的非线性关系^[10],其对于解析多因素间的复杂交互作用具有独特优势,目前已被广泛应用于地表水水质预测、水资源管理和水质评估等方向^[11-12],但鲜少用于识别河流缺氧的诱发过程。本文以秦淮河流域为例,选取2021年丰水年和2022年枯水年两个典型年份,基于高频实测数据对该区域上中下游典型站点的溶解氧分布进行多尺度、多方法耦合研究。结合 Spearman 秩相关法和决策树模型分析溶解氧变化的主要影响因素及其驱动机制,并解析河流程度、重度缺氧现象的控制因素阈值及其联合诱发过程,以期水环境治理与水生态保护提供借鉴。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

秦淮河流域位于长江下游,江苏省西南部,上游起源于溧水河、句容河两源,两源在洋桥站汇合为干流,全长 11.3 km,自东南向西北分为两支,北支为外秦淮河,流经三汊河口站继汇入长江,全长 23.6 km,主要控制性水工建筑物有武定门节制闸和三汊河口闸,前者承担着保障上游农田灌溉的有效水源供给和城区水体流动两大功能,后者在非汛期时关闸蓄水;西支为人工开挖的分洪河道秦淮新河,全长 18 km,非汛期时,秦淮新河枢纽由长江通过泵向城内补水;汛期时,开闸向长江泄洪^[13]。秦淮新河、秦淮河干流和外秦淮河河段

水质目标均为Ⅲ类,水体污染主要来源于沿线污水处理厂尾水排放和雨后排涝泵站排放。秦淮河流域属亚热带季风气候,年平均降雨量为 1106 mm 但分配不均,夏季降雨占到全年降雨的 60% 以上^[14]。近年来受全球变暖等极端气候和人为干扰影响,南京市年平均气温不断上升且降雨年际间差异明显,甚至在 2022 年出现了超 100 年一遇枯水,市内河流缺氧现象频发^[15]。

因此本文选取 2021 年丰水年和 2022 年枯水年两个典型年份,结合秦淮新河中游将军大道站、秦淮河干流上游洋桥站、外秦淮河中游七桥瓮站和下游三汊河口站 4 个水质监测站的长序列高频监测数据进行实例研究。如图 1 所示,4 个站点分别位于上游干流区域、中游河网区域以及下游入江口区域。总汇水面积排序为七桥瓮站>洋桥站>将军大道站>三汊河口站,且汇水区域土地利用类型也有所不同。将军大道站和七桥瓮站汇水区域土地利用类型均为林地>建成区>耕地,林地和建成区面积各占总汇水区面积约 30%,耕地面积占比约为 10%;洋桥站汇水区域以耕地为主,占比为 42%,建成区仅占 17.3%;三汊河口站建成区面积占比最大,达 62.9%。故 4 个站点可归类为:洋桥站为上游耕地类站点、将军大道站和七桥瓮站分别为中游和下游混合类站点,三汊河口站为下游建成区类站点。

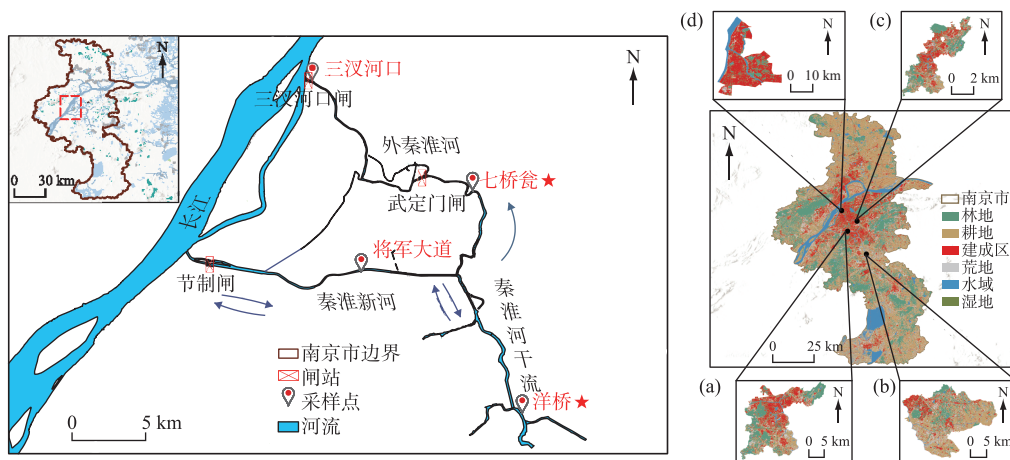


图 1 研究区域示意及典型站点周边土地利用类型(“★”表示该站点处为国家地表水考核断面, (a)、(b)、(c)和(d)依次代表将军大道站、洋桥站、七桥瓮站和三汊河口站)

Fig.1 Schematic diagram of the study area and land use types around typical sites

1.2 数据来源

2021—2022 年水情和降雨量数据来源于秦淮河水利工程管理处,监测指标包括流量、降雨量,并根据断面面积换算为流速,监测频率为 1 d/次;水质数据来源于南京市地表水水质自动监测站,监测指标包括溶解氧、水温、电导率、浊度、酸碱度、高锰酸盐指数、氨氮、总磷、总氮,监测频率为 4 h 一次,样品的监测参考《地表水和污水监测技术规范》(HJ/T 91—2002);研究区域土地利用数据来自欧洲航天局(ESA)发布的 2021 年全球 10 m 分辨率土地覆被数据产品^[16],结合区域实际情况,将土地利用类型划分为林地、耕地、建成区、荒地、水域和湿地 6 大类,并利用 ArcGIS 10.2 结合数字高程模型(DEM)数据提取得到 4 站点汇水区域的土地利用类型。

1.3 分析方法

1.3.1 缺氧、轻度缺氧和重度缺氧限值定义 目前国际对于缺氧的定义没有通用标准,有研究表明,当溶解氧大于 5.0 mg/L 时,大部分鱼类能正常活动;当溶解氧为 3.0~4.0 mg/L 时,敏感物种的生长将受到抑制^[17];当溶解氧为 2.0~3.0 mg/L 时,大量鱼类开始迁移甚至死亡;当溶解氧低于 2.0 mg/L 时,大多数底栖生物难以存活^[18]。我国《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)对各类水体功能区划分了不同的溶解氧限值,但尚未考虑其对地区优势水生生物的影响。为贴合研究区域溶解氧演替特征,将 2021—2022 年秦淮河流域地表水溶解氧浓度数据进行排序,统一将 0.25 分位数作为缺氧限值,对应溶解氧浓度约为 5.0 mg/L,即将河流溶

解氧浓度低于缺氧限值 5.0 mg/L 定义为缺氧现象,高于 5.0 mg/L 定义为富氧现象。进一步结合秦淮河流域生态状况,考虑本流域优势种群鲤形目(Cypriniformes)生存的溶解氧下限为 4.0 mg/L^[19],将 0.15 分位数作为轻度缺氧限值,对应溶解氧浓度约为 4.0 mg/L,故将溶解氧浓度位于 4.0~5.0 mg/L 定义为轻度缺氧现象,低于 4.0 mg/L 定义为重度缺氧现象。

1.3.2 Spearman 秩相关法 本文采用 Spearman 秩相关法计算相关系数矩阵以识别变量间相关程度,从而研究溶解氧与环境因素之间的相关性关系,区分出典型站点溶解氧变化的主要影响因素。Spearman 秩相关系数法是一种非参数统计方法,用于衡量两个变量之间的相关性,而不要求这些变量必须满足正态分布或线性关系的假设,因此能够适应多类型关系,特别是对于非线性关系的数据更具有稳健性。

1.3.3 决策树模型 决策树是解决分类问题的简单但有效的技术,其适用于多类型数据,能够自动进行特征选择并捕捉非线性关系,对数据异常值具有鲁棒性,且计算成本低,解释性强,是许多集成学习方法的基础。本研究使用 python 3.7 中的“sklearn”库建立决策树模型,以前文识别出的主要影响因素为因变量,进一步甄别了流域缺氧发生时的重要控制变量及其阈值,揭示了河流轻度、重度缺氧现象的联合诱发过程。

决策树递归地将数据集划分成不同的子集,通过连续寻找最优因子的最优划分来使样本子集达到最佳纯度,最终形成一个以二叉树的形式细分的树状分类结构。样本子集的纯度用数据集的熵值来度量,计算表达式为:

$$H(X) = -\sum_{i=1}^n P(x_i) \lg P(x_i) \quad (1)$$

式中, $H(X)$ 表示数据集的熵, $P(x_i)$ 表示数据集中第 i 个事件发生的概率, n 为事件总数。熵值越低,数据集的纯度越高,即节点内部样本的类别越一致。对于经过良好优化及训练的决策树,可以有效区分样本属于哪一类,相应的划分标准即为控制变量的限制阈值。

2 结果与分析

2.1 不同时间尺度下溶解氧变化规律

2.1.1 典型年际间溶解氧变化规律 由图 2 统计结果可知,2021 年将军大道、洋桥、七桥瓮、三汊河口 4 站点溶解氧整体均呈现出在夏季大幅降低后逐渐升高的趋势,低值区广泛分布于 5 月中旬至 10 月下旬。2022 年除了三汊河口站仍保持该趋势,其余站点均无长期缺氧现象出现。将军大道站和洋桥站溶解氧浓度在 2021—2022 年略有上升,2021 年年均值分别为 7.42 和 7.96 mg/L;2022 年年均值分别为 6.85 和 7.69 mg/L。而七桥瓮站点溶解氧浓度年际变化较大,2021 年溶解氧变化范围为 1.69~14.19 mg/L,年均值为 6.52 mg/L;2022 年年均值升高到 7.61 mg/L,变化范围为 3.59~15.72 mg/L。三汊河口站 2021 年溶解氧变化范围为 0.72~10.12 mg/L,平均值为 4.72 mg/L,2022 年较 2021 年年均值升高了 1.25 mg/L。结合表 1 可知,2021—2022 年将军大道站缺氧现象较少,且两年的轻度缺氧现象占比变化较小,分别为 58.3% 和 40.0%。洋桥站和七桥瓮站在 2022 年缺氧现象较 2021 年均大幅减少,尤其是后者减少了 3.7 倍,其中重度缺氧现象减少了 20.8 倍。而三汊河口站 2021 年和 2022 年缺氧现象发生最为频繁,分别达到了 178 次和 156 次。且该站在 2021—2022 年的缺氧特征从

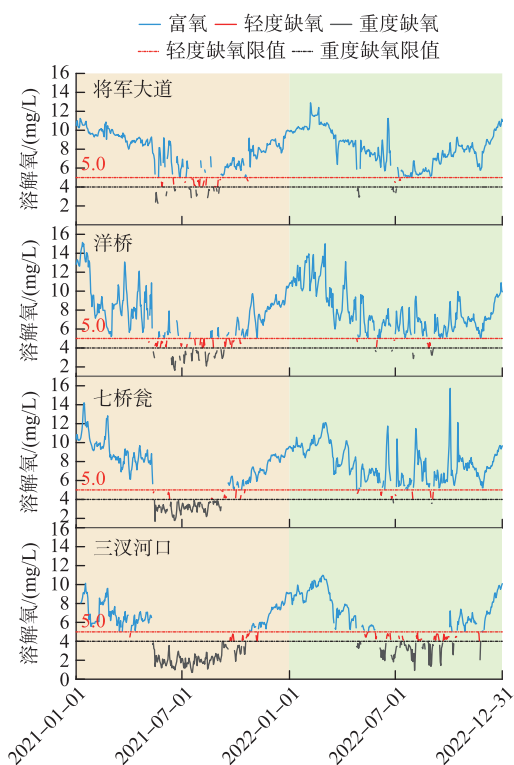


图 2 2021—2022 年典型站点溶解氧逐日变化

Fig.2 Daily variations of dissolved oxygen at typical stations during 2021-2022

以重度缺氧发生为主发展为两者并重,2022 年轻度缺氧发生比例增加 1.3 倍,重度缺氧发生比例降低 0.7 倍。

表 1 2021—2022 年典型站点溶解氧均值及缺氧情况

Tab.1 Statistics of average dissolved oxygen and hypoxia events at four stations during 2021–2022

站点	平均值/(mg/L)		缺氧频次		轻度缺氧频次		重度缺氧频次	
	2021 年	2022 年	2021 年	2022 年	2021 年	2022 年	2021 年	2022 年
将军大道	7.42	7.96	72	20	42	8	30	12
洋桥	6.85	7.69	113	32	60	19	53	13
七桥瓮	6.52	7.61	137	29	28	24	109	5
三汊河口	4.72	5.97	178	156	30	69	148	87

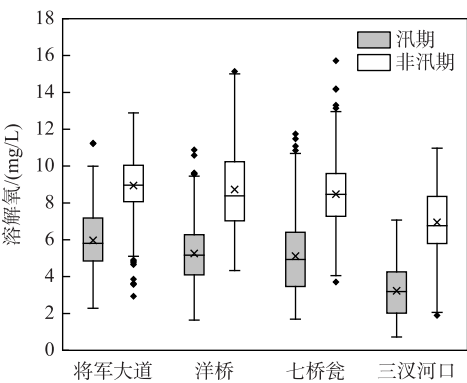


图 3 2021—2022 年溶解氧汛期和非汛期特征

Fig.3 Characteristics of dissolved oxygen during the flood and non-flood seasons during 2021–2022

对秦淮河流域 2021—2022 年发生的降雨进行整理划分,并结合区域降雨强度及河流氨氮浓度升高情况,选取了两年内产生溢流的中雨、中到大雨、大雨、大到暴雨、暴雨和大暴雨事件(详细降雨场次信息见表 2),统计了典型降雨前后各站点的溶解氧损失量(即缺氧量)和氨氮增量,结果如图 4 所示。

表 2 2021—2022 年秦淮河流域降雨特征划分及典型降雨场次信息

Tab.2 Classification of rainfall characteristics and information of typical rainfall events in the Qinhuai River Basin during 2021–2022

降雨等级	24 h 降雨量/mm	场次	序号	降雨等级	24 h 降雨量/mm	场次	序号
中雨	[17.0,25.0)	12	1~12	大到暴雨	[50.0,75.0)	5	37~41
中到大雨	[25.0,38.0)	15	13~27	暴雨	[75.0,100)	4	42~45
大雨	[38.0,50.0)	9	28~36	大暴雨	[100,200)	2	46、47

统计结果显示,随着降雨强度增大,秦淮河缺氧现象发生次数减少,中雨、中到大雨、大雨、大到暴雨、暴雨和大暴雨降雨前后缺氧现象发生频率依次递减,分别为 98.0%、85.0%、82.5%、75.0%、75.0% 和 50.0%。且中雨场次下的缺氧程度和氨氮增量也较大,4 站点单场次缺氧量为-0.48~5.17 mg/L,均值为 1.13 mg/L;氨氮增量为-0.03~1.52 mg/L,均值为 0.41 mg/L。各站点在雨后的缺氧现象发生频率不同,其中三汊河口站(图 4d)在雨后的缺氧现象发生频率最高,达 89.4%。同时其氨氮增量变化幅度最大,为-2.03~2.23 mg/L,均值为 0.76 mg/L。由于汊河口站溶解氧水平较低,其缺氧量范围波动有限,在-2.21~3.30 mg/L 之间,均值为 1.37 mg/L;洋桥站的缺氧现象发生频率最低,为 74.5%。因为洋桥站雨后氨氮平均增量最低,仅为 0.14

mg/L,故稀释过程占主要作用,更多地表现为雨后溶解氧升高。七桥瓮站和将军大道站(图4a、c)的缺氧现象发生频率递减,分别为87.2%和85.1%。将军大道站缺氧量范围最大,为-2.46~5.29 mg/L,这是由于该站溶解氧本底水平较高,受降雨污染影响程度大,且其为混合型站点,受到降雨径流和污水溢流带入的污染负荷影响较大。

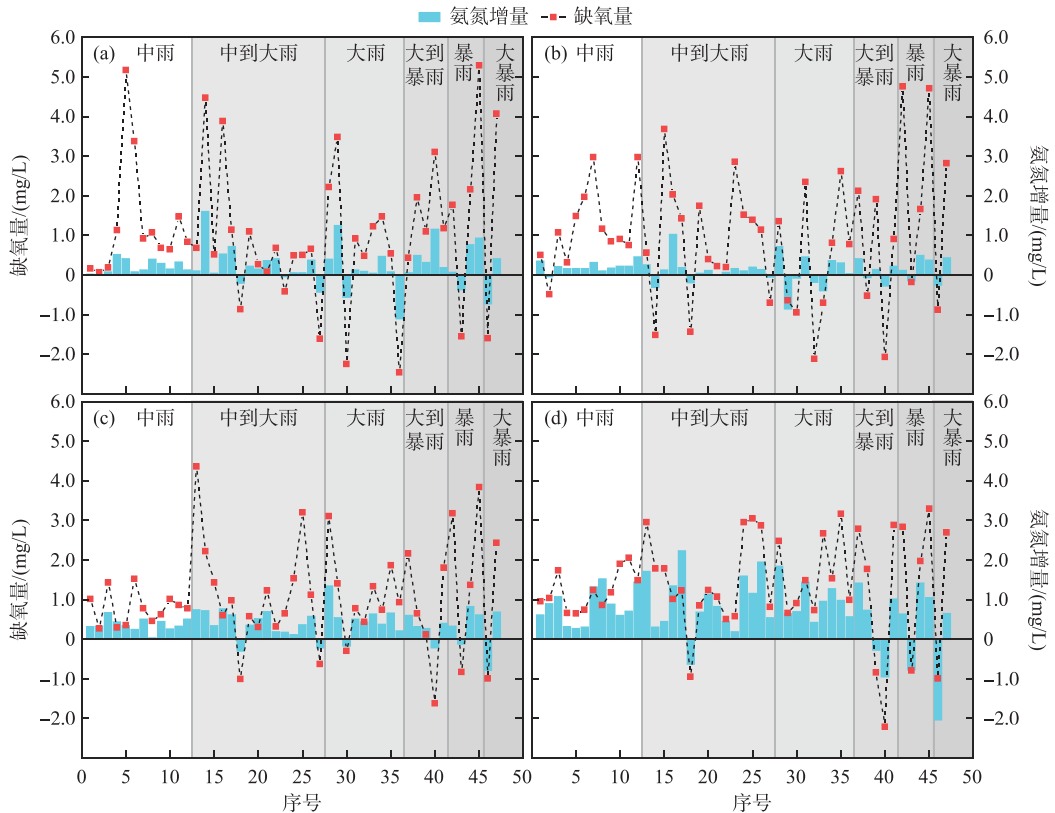


图4 2021—2022年不同强度单场次降雨的缺氧量和氨氮增量
((a)、(b)、(c)和(d)依次代表将军大道站、洋桥站、七桥瓮站和三汊河口站)

Fig.4 Oxygen deficit volume and ammonia nitrogen increment for different intensities of rainfall during 2021–2022

2.2 不同时间尺度下溶解氧变化的主要影响因素

附表 I 中统计了 4 站点在不同时间尺度下各水体理化指标与溶解氧的相关性,剔除了显著水平较低及关系不显著的水质指标,仅保留了相关性程度较高的指标。根据 Spearman 秩相关法分析结果可知,在年际尺度下,将军大道站、洋桥站、和三汊河口站在 2021 年和 2022 年溶解氧均与水温呈显著负相关($P < 0.01$),而七桥瓮站在 2021 年和 2022 年溶解氧与 pH 和水温均表现出显著相关性($P < 0.01$),2021 年溶解氧与 pH 和水温的相关性系数为 0.907 和 -0.879,2022 年为 0.620 和 -0.605。另外,4 站点在 2021 年溶解氧与流量均呈现显著相关关系,但 2022 年两者间均不存在显著关联;在汛期—非汛期尺度下,汛期 4 站点的溶解氧与总磷、氨氮和高锰酸盐指数的负相关性最为显著,尤其是三汊河口站,总磷、氨氮、高锰酸盐指数与溶解氧的相关性系数达到 -0.751、-0.727 和 -0.521($P < 0.01$)。而非汛期各站点的溶解氧变化主要受水温和 pH 影响;在降雨事件尺度下,水温为将军大道站和三汊河口站溶解氧的主要影响因素,相关性系数分别为 -0.639 和 -0.740($P < 0.01$)。其次为高锰酸盐指数和总磷,两站点相关性系数分别为 -0.600 和 -0.545、-0.452 和 -0.405($P < 0.01$)。pH、水温和总磷为洋桥站和七桥瓮站溶解氧的主要影响因素,相关性系数分别为 0.685 和 0.792、-0.636 和 -0.729、-0.622 和 -0.690($P < 0.01$)。最后,流量也在一定程度上影响了 4 站点溶解氧的

变化,其中将军大道站的溶解氧与流量呈现出显著的正相关关系($r_s=0.468, P<0.01$)。而洋桥站、七桥瓮站和三汊河口站均与流量呈现出显著的负相关关系,相关性系数分别为-0.581、-0.476 和-0.444。

2.3 轻度、重度缺氧现象诱发阈值

为探明流域水体轻度、重度缺氧现象的各控制因素阈值和联合诱发过程,采用 2021—2022 年 4 站点的溶解氧序列值为因变量,土地利用类型为属性变量,并结合 Spearman 相关性结果,以水温、降雨量、流量、pH、电导率、浊度、高锰酸盐指数、氨氮、总磷为自变量,共 9 个解释变量分别构建不同站点的分类决策树。研究采用五重交叉验证与网格搜索法相结合优化了树的最大深度和叶的最小尺寸共两个超参数,分别为 3 和 20,各站点的决策树分类结果如图 5 所示。

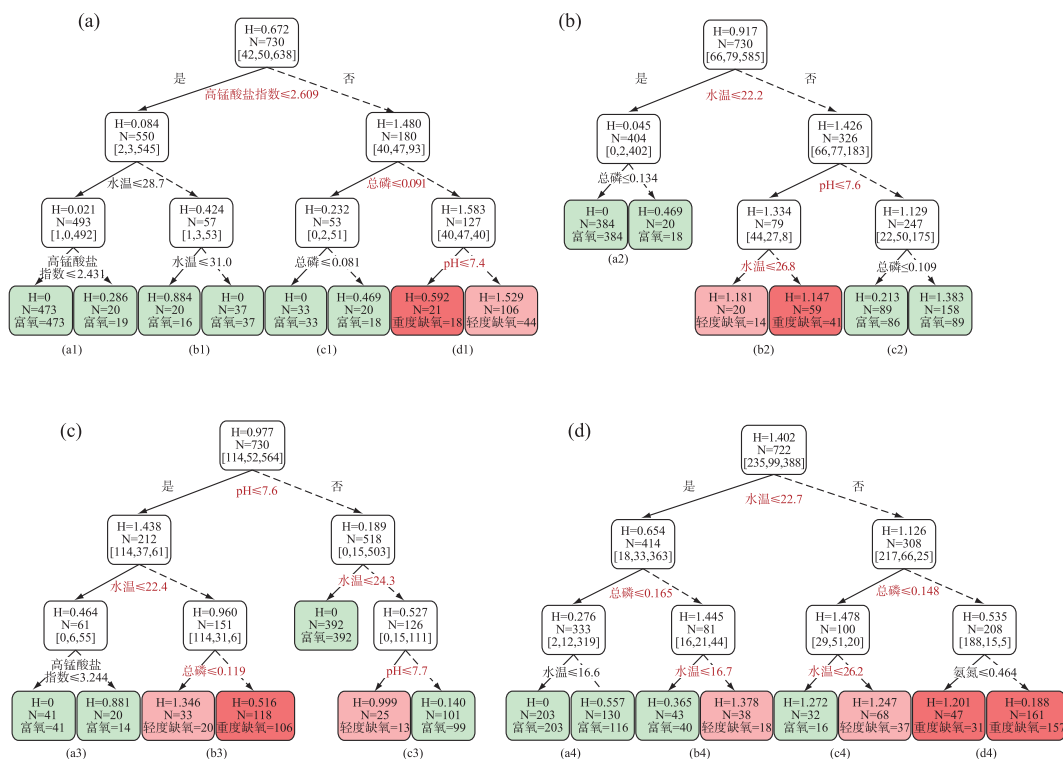


图 5 典型站点决策树分类结果

((a)、(b)、(c)和(d)依次代表将军大道站、洋桥站、七桥瓮站和三汊河口站,H为熵值、N为样本数)

Fig.5 Classification results of decision trees at typical stations

将军大道站决策树(图 5a)共有 730 个样本,其中包括 42 个重度缺氧样本、50 个轻度缺氧样本和 638 个富氧样本。训练集准确率为 89.86%,交叉验证准确率为 89.73%。决策树首先选择高锰酸盐指数来将样本划分为低营养或高营养水平,缺氧样本集中于右侧子树中(即高营养条件下)。总磷继续将右侧子树划分为低磷或高磷状态,其中,缺氧样本均被划分到高磷条件下的子树(d1)。最后,子树(d1)被 pH 进一步划分,将该站点轻度缺氧现象归因为:高锰酸盐指数 >2.609 mg/L、总磷 >0.091 mg/L 且 $pH>7.4$,发生概率为 41.5%;重度缺氧现象归因为:高锰酸盐指数 >2.609 mg/L、总磷 >0.091 mg/L 且 $pH\leq 7.4$,发生概率为 85.7%。

洋桥站决策树(图 5b)共有 730 个样本,其中包括 66 个重度缺氧样本、79 个轻度缺氧样本和 585 个富氧样本。训练集准确率为 86.58%,交叉验证准确率为 84.66%。决策树首先选择水温来将样本划分为低温或高温状态,缺氧样本集中于右侧子树中(即高温条件下)。pH 继续将每个子树划分,其中,缺氧样本均集中于低 pH 条件下的子树(b2)中。最后,子树(b2)被水温进一步划分,将该站点轻度缺氧现象(70%)归因为: $22.2^{\circ}\text{C}<\text{水温}\leq 26.8^{\circ}\text{C}$ 且 $pH\leq 7.6$;重度缺氧现象(69.5%)归因为:水温 $>26.8^{\circ}\text{C}$ 且 $pH\leq 7.6$ 。

七桥瓮站决策树(图 5c)共有 730 个样本,其中包括 114 个重度缺氧样本、52 个轻度缺氧样本和 564 个富氧样本。训练集准确率为 93.84%,交叉验证准确率为 92.33%。决策树首先选择 pH 来划分样本,左侧子树中(即低 pH 条件下)缺氧样本的比例远高于右侧子树。水温继续将每个子树划分为低温或高温状态。其中,缺氧样本均集中于高温条件下的子树(b3)和(c3)中。最后,子树(b3)和(c3)被总磷和 pH 进一步划分,将该站点轻度缺氧现象(60.6%、52%)归因为: $\text{pH} \leq 7.6$ 、水温 $>22.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 且总磷 $\leq 0.119\text{ mg/L}$, $7.6 < \text{pH} \leq 7.7$ 且水温 $>24.3\text{ }^{\circ}\text{C}$;重度缺氧现象(89.8%)归因为: $\text{pH} \leq 7.6$ 、水温 $>22.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 且总磷 $>0.119\text{ mg/L}$ 。

三汊河口站决策树(图 5d)共有 722 个样本,其中包括 235 个重度缺氧样本、99 个轻度缺氧样本和 388 个富氧样本。训练集准确率为 85.60%,交叉验证准确率为 82.41%。决策树首先选择水温来将样本划分为低温或高温状态,右侧子树中(即高温条件下)缺氧样本的比例远高于左侧子树。总磷继续将每个子树划分为低磷或高磷状态。其中,高磷条件下的子树(b4)和(d4)占缺氧样本的 88.7%,且重度缺氧样本均集中于高磷条件下的子树(d4)中。最后,子树(b4)~(d4)被水温和氨氮进一步划分,将该站点轻度缺氧现象(47.4%、54.4%)归因为: $16.7\text{ }^{\circ}\text{C} < \text{水温} \leq 22.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ 且总磷 $>0.165\text{ mg/L}$,水温 $>26.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 且总磷 $\leq 0.148\text{ mg/L}$;重度缺氧现象(90.4%)归因为:水温 $>22.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ 且总磷 $>0.148\text{ mg/L}$ 。

3 讨论

3.1 秦淮河溶解氧时空分布特征及我国不同地区河流溶解氧特征对比

近年来城市河道缺氧现象在我国频繁发生,不同地区城市河流缺氧的特征不尽相似,引起了广泛关注。黄炜惠等^[23]根据溶解氧背景值将全国分成 3 个区:北部高溶解氧背景值区(溶解氧年均值为 11~15 mg/L)、中部溶解氧背景值过渡区(溶解氧年均值为 9~11 mg/L)以及南部低溶解氧背景值区(溶解氧年均值为 7~9 mg/L)。本文研究区域为中部地区的代表性城市河流秦淮河,基于 4 站点监测数据,在年际、汛期—非汛期和典型降雨事件 3 个时间尺度下研究了溶解氧的时空变化规律。

时间上,整体而言,2022 年秦淮河流域水质优于 2021 年,一方面表现为 4 站点溶解氧浓度水平均有所上升,增幅最高达到 26.5%;另一方面,4 站点轻度、重度缺氧发生次数大幅减少,尤其是七桥瓮站,缺氧现象较 2021 年降低了 3.7 倍。虽然 2022 年为枯水年,气温较往年偏高且水动力偏弱,理论上有利于河流缺氧现象的出现。但实际上降雨径流携带、管网混接及合流制溢流进入河道的污染也大幅减少。且经实地调研发现,2022 年夏季在秦淮河流域多处支流及主干河道存在藻类聚集现象,二者叶绿素 *a* 浓度高达 71.2 和 52.7 $\mu\text{g/L}$ 。瞬时溶解氧浓度可达饱和溶解氧的 2~3 倍,故使该年溶解氧平均水平有所提升,这与江苏省秦淮河水利工程管理处的报道一致^[9]。同时,秦淮河流域溶解氧也展现出了明显的汛期—非汛期变化,这一规律在北部秦岭流域、中部四湖流域、南部珠江流域^[24-26]等区域均有发现,但北部城市河流的溶解氧汛期下降程度普遍低于中部和南部。本研究中 4 站点汛期溶解氧平均浓度比非汛期均有所降低,造成这一差异的原因可以归结为以下 3 点:①汛期水温较高,使得氧气在水体中的溶解度变低;②汛期降雨冲刷导致水体中有机污染物等耗氧物质显著增加。同时带入的氮、磷促进藻类过度繁殖,其呼吸作用及死亡分解将消耗水体溶解氧;③汛期降雨导致水体的混浊度增加,阻碍了光的穿透,抑制水生植物的光合作用。另外,在典型降雨事件下溶解氧变化规律也不同,随着降雨强度增大,河流缺氧现象发生次数降低,中雨前后河流缺氧现象发生次数频率最高为 98.0%且缺氧程度也较大,4 站点场次缺氧量均值达 1.13 mg/L。陈焰等^[27]提出随着降雨强度的增大,城市河流氨氮等污染组分浓度先上升后下降,不同降雨强度下的水质变化取决于降雨起稀释作用还是冲刷作用。故推测在中雨强度下,降雨冲刷地面带入秦淮河流域的污染物对溶解氧的消耗程度大于稀释和复氧程度。

空间上,从秦淮新河、秦淮河上游干流至外秦淮河下游入江口(将军大道—洋桥—七桥瓮—三汊河口),溶解氧平均浓度均呈现递减趋势。尤以三汊河口站水质最差,两年溶解氧均值仅为 5.37 mg/L,重度缺氧发生次数高达 235 次,约为中上游站点的 3 倍。这是因为三汊河口站为下游建成区类站点,位于外秦淮河下游入江口处,雨后接收了大量城市面源污染和城镇污水溢流,超过了该段河流的水环境容量,使水质波动恶化^[28]。

此外,我国北—中—南部河流溶解氧时空变化呈现出不同的特征。杨丽娜等^[29]指出,在北部大辽河近入

海河段的溶解氧呈入海口高、河段上游低的分布趋势,与秦淮河流域呈现的下游入江口低、上游高的趋势相反。大辽河近入海河段虽然平均气温较低但污染严重,夏季溶解氧浓度介于 1.36~4.77 mg/L 之间,平均为 3.44 mg/L,与本研究水质最差的三汊河口站汛期的溶解氧水平相当;汪凌佳^[30]则发现中部典型城市杭州城区 7 条城市内河多年溶解氧平均水平(4.60 mg/L)低于秦淮河流域平均水平(6.84 mg/L);杨艾琳等^[31]指出 2016—2020 年南部福建省河流的溶解氧多年平均值为 7.7 mg/L,由于其研究区域包含了全省 64 个河流点位,溶解氧平均值比南京市主城区的秦淮河流域略高,且其低氧检出频率在 9—11 月达到峰值,推测是由于南方高温持续时间较长,汛期长于中部地区,故缺氧现象出现的时间有所推迟。经以上对比发现,秦淮河流域虽位于中部城市主城区,但其溶解氧水平在全国处于中等较优的状态。

3.2 不同时间尺度下典型站点溶解氧的影响因素差异及驱动机制分析

本文考虑气象(水温 and 降雨量)、水文(流量)、水质(pH、电导率、浊度、高锰酸盐指数、氨氮、总磷和总氮)等环境变量作为溶解氧变化的影响因素。经分析可知,在年际尺度下,由于水温直接影响溶解氧的溶解特性,温度升高会降低氧气在水中的溶解度,同时会导致水生生物的代谢速率加快,增加对氧气的需求量,两者共同作用导致水体溶解氧水平降低。故在将军大道站、洋桥站和三汊河口站,水温均是溶解氧变化的首要驱动因素;而在七桥瓮站溶解氧与 pH 的相关性程度略高于水温,呈现显著的正相关关系,这一结果与王春等^[32]对于秦淮河低氧成因的最新研究一致。这是因为七桥瓮站位于河道转弯处,周边为湿地公园,较缓的水流和较好的环境条件为浮游植物生长提供了条件,大量浮游植物进行光合作用释放氧气,同时光合作用过强打破了水体中的碳酸盐平衡导致 pH 升高^[33-34]。此外,各站点溶解氧与流量的相关性程度在 2022 年显著降低,是由于 2022 年江淮流域降雨、来水均严重偏少。

在汛期—非汛期尺度下,各营养因素与溶解氧的相关性显著增强。特别是在汛期,各站点水温对于溶解氧的影响大幅降低,而总磷和氨氮成为溶解氧变化的主要影响因素。总磷和氨氮的变化实际上反映了水体中呼吸、氧化和硝化过程。其中磷作为导致水体富营养化的重要因素之一,当其过量时,会导致藻类和其他水生植物的过度生长,形成藻华^[35]。大量的藻类残体降解消耗水体溶解氧;而以氨氮为反应物的硝化反应会消耗溶解氧而使其转化为亚硝态氮和硝态氮。总磷和氨氮与溶解氧相关性的提升在将军大道站和三汊河口站表现得最为明显,将军大道站作为秦淮新河混合型站点,其上游秦淮新河枢纽在汛期会向长江排水,故该站点接收了大量的秦淮河干流来水和周边复杂汇水,导致其营养物质通量较其他时段增加。而三汊河口站汇水范围中建成区的比例最高,而建成区通常具有较高的不透水面积和较大的人口基数,这会导致降雨时径流系数增大,加剧地表径流污染和城镇排水系统雨天溢流污染^[36],且其位于外秦淮河下游,接纳了来自上游各支流及排涝站的污染输入^[37],故在该站点水体耗氧过程占据了主导地位,导致溶解氧浓度下降。在非汛期,水温和 pH 为驱动溶解氧变化的主要影响因素。在将军大道和三汊河口站,水温是主要驱动因素;在洋桥和七桥瓮站, pH 和水温对于溶解氧的影响程度相近,高锰酸盐指数对于洋桥站溶解氧变化的影响也同样明显。已有研究表明,高锰酸盐指数主要受生活和工业废水排放及农业活动,如天然有机物腐殖质污染、农田有机肥面源污染影响^[38]。洋桥站作为中游耕地类站点,周边汇水中含有丰富的腐殖质,会促进水体中微生物生长代谢消耗氧气,从而导致水体中溶解氧浓度下降。

在短期降雨事件尺度下,溶解氧变化主要由水温、营养物质和水文因素所驱动,三者的影响程度逐个递减。由于降雨导致水温的剧烈变化对溶解氧的影响是直接且快速的,有研究指出夏季时由于雨水径流携带下垫面热量进入河道而使水温在降雨初期就呈现升高现象^[39]。因此,在短期尺度下,水温是溶解氧变化的首要驱动因素。而降雨事件带来的营养物质输入和水文条件变化存在一定的延迟效应^[40],在短期内对水体溶解氧产生的影响较水温来说更为滞后。同时,浊度和流量在很大程度上调控了各站点溶解氧的变化,这一特征比汛期时更加明显。推测典型降雨引起的浊度增加不仅阻碍了水生植物和浮游植物的光合作用,还扰动了底栖生物栖息地环境,破坏生态平衡,对水生生态系统造成了多方面的负面影响。同时更多的颗粒吸附大量可分解的有机物,进而导致溶解氧浓度下降^[41]。除了将军大道站之外,其他 3 个站点的溶解氧均与流量呈现显著负相关关系,这是由于在典型降雨事件情况下,河道水动力条件较好,且将军大道站位于秦淮新河,为引江清水通道,来水水质优良,水动力复氧过程占主导作用,因此该站点处溶解氧随流量的增大而升高。而对于其他 3 个站点,来水多为污染负荷较大的面源汇水,耗氧过程占主导作用,进而导致河流溶

解氧浓度不断降低。

3.3 轻度、重度缺氧诱发阈值解析与应对策略探讨

通过9个解释变量、1个属性变量与1个响应变量构建了4个站点的分类决策树。结果显示在将军大道站,高锰酸盐指数和总磷是缺氧现象的重要控制变量,这和前文相关性分析中降雨事件尺度下的结果一致,证明该站处缺氧现象的发生受降雨条件下的主要影响因素所驱动。当高锰酸盐指数 >2.609 mg/L、总磷 >0.091 mg/L且 $\text{pH}>7.4$ 时,该站处有41.5%的概率会发生轻度缺氧现象;而当其他条件不变而 $\text{pH}\leq 7.4$ 时,则有85.7%的概率会发生重度缺氧现象,说明 pH 值是指示缺氧严重程度的关键因素,当 pH 值较低(≤ 7.4)时,更有利于有机物分解和营养盐释放,进一步加剧缺氧状况^[42];在洋桥站,水温 and pH 是溶解氧变化的重要控制变量,前者也是区分该处轻度、重度缺氧的关键因素,这和前文年尺度下的相关性分析结果一致;在七桥瓮站, pH 、水温和总磷是溶解氧变化的重要控制变量,这和前文年尺度下的相关性分析结果一致。当 $\text{pH}\leq 7.6$ 、水温 >22.4 °C且总磷 ≤ 0.119 mg/L时,该站处有60.6%的概率会发生轻度缺氧现象。当其中其他条件不变而总磷 >0.119 mg/L,则有89.8%的概率会发生重度缺氧现象,以上结果也映证了在该站点总磷对于缺氧程度具有良好的预警作用;在三汊河口站,水温和总磷是溶解氧变化的重要控制变量,也是控制其缺氧程度的重要因素。当 16.7 °C $<$ 水温 ≤ 22.7 °C且总磷 >0.165 mg/L时,该站处有47.4%的概率会发生轻度缺氧现象。或在气象因素不利于溶解氧升高的子树(c4)中,当温度阈值升高到水温 >26.2 °C且磷阈值降低到总磷 ≤ 0.148 mg/L时,该站处亦有54.4%的概率会发生轻度缺氧现象,这一结果定性地揭示了不同驱动因素间的局部补偿规律,Huo等^[43]基于数学模型和情景分析得出了类似的结论。综合洋桥站、七桥瓮站和三汊河口站的决策树模型结果可以发现,在高温条件下(子树b2、b3、c3、c4和d4)的缺氧发生率高达86.2%,从侧面映证了在较长时间尺度下水温对于缺氧现象发生的贡献程度之大。

综合来看,秦淮河流域汛期缺氧问题突出,应根据不同站点处缺氧特征和机制进行分类治理、精准施策,由此提出以下几点建议:

①对于将军大道等中游混合类站点,即位于河流中游,汇水区域包含林地、建成区和耕地且面积占比相近的站点,轻度缺氧占总体缺氧现象的比例较高,要密切关注降雨事件尤其是中雨、中到大雨情况下考核断面溶解氧的亏损范围,并开展精准截留,减少沿线相关泵站排放及城市排水系统溢流污染入河量。同时可辅以人工调度措施,增加水体的流动性,促进水体自净^[44]。

②对于洋桥等上游耕地类站点,即位于河流上游且汇水区域以耕地为主的站点,轻度缺氧现象占比较高,需加强排查和监测汇水范围内的农业和养殖业等面源污染,摸清其发生规律及水质响应机制,完善监管机制,持续推进化肥农药减量增效及养殖粪污减量排放,并加强农田退水、养殖尾水、农村生活污水生态治理^[45]。尤其在汛期气温大幅升高时,需严格控制农业面源污染负荷,可采取应急调度、缓冲带建设等措施,提高水体含氧量;

③对于七桥瓮等下游混合类站点,即位于河流下游缓水流区,汇水区域包含林地、建成区和耕地且面积占比相近的站点,重度缺氧现象占比较高,应完善监测网络,在常规监测中同步加密测量叶绿素等相关指标。尤其在枯水年的汛期,需加强水体藻类监测,可采用生态修复、分散调蓄、精准截流、排涝泵站雨前预降水位等过程拦截及末端净化措施,控制城市排水系统溢流污染、雨水径流冲刷等造成的磷负荷输入^[46],防止河流出现水华现象,保障水体含氧量维持在较高水平。

④对于三汊河口等下游建成区类站点,即位于河流下游且汇水区域以建成区为主的站点,重度缺氧现象占比极高,需及时开展汛期及雨后污染截留,或增加污水处理设施,减少未经处理或处理不完全的污水直接排入河。还应建立“城网站厂河”一体化的系统管理体系^[47],制定雨污分流、海绵城市建设等源头减量措施,削减城市地表径流和排水系统溢流污染入河通量,减少氨氮、总磷等营养物质对于河流溶解氧的消耗。

可进一步将以上措施凝练为针对2类典型特征城市河段的缺氧应对策略:

①周边汇水区域以林地和耕地为主(较高的自然植被和农田覆盖度使径流携带的土壤颗粒和肥料输入增加)且轻度缺氧现象发生居多的河段,其缺氧现象主要由水温、 pH 和高锰酸盐指数诱发。此类河段的溶解氧水平受降雨的影响程度较大,故要密切关注降雨时河道溶解氧变化,并采取雨前泵站预降水位、植被缓

冲带建设等预防策略来减缓缺氧程度。

②周边汇水区域以建成区为主(较大的不透水面积和人口基数使径流产流和排水系统溢流污染加剧)且重度缺氧现象发生居多的河段,汛期溶解氧变化由总磷、氨氮和高锰酸盐指数等营养因素所驱动。此类河段轻度及重度缺氧的关键诱发因素为水温和总磷。因此需建立一体化的源头减量、过程控制和末端治理体系,尤其在汛期气温升高时,需及时开展雨后污染截留或增加污水处理设施,减少城镇生活污水溢流及径流污染入河。

4 结论

本研究以秦淮河流域为例,选取 2021 年丰水年和 2022 年枯水年两个典型年份,结合高频数据及统计建模方法,对流域典型站点的溶解氧时空分布、驱动因素、影响机制及轻度和重度缺氧诱发过程进行了多尺度、多方法耦合研究,得出结论如下:

1)秦淮河流域溶解氧呈现出显著的时空变化格局。年际间,秦淮河流域溶解氧水平在枯水年 2022 年优于丰水年 2021 年,4 站点溶解氧年均值上升 0.54~1.25 mg/L;汛期—非汛期下,各河段汛期溶解氧平均值比非汛期低 3.38~4.57 mg/L;典型降雨事件下,随着雨强增大,河流缺氧现象发生次数降低,中雨下的缺氧频率和程度最高。空间上,从秦淮新河、秦淮河上游干流至外秦淮河下游(将军大道—洋桥—七桥瓮—三汊河口),溶解氧均值逐渐降低,尤其是三汊河口站的溶解氧年均值仅为 5.37 mg/L,重度缺氧频率约为中上游站点的 3 倍。

2)在周边汇水区域以林地和耕地为主(较高的自然植被和农田覆盖度使径流携带的土壤颗粒和肥料输入增加)且轻度缺氧发生居多的河段,缺氧现象由水温、pH 和高锰酸盐指数诱发。对于此类河段要密切关注降雨时河道溶解氧变化,并采取精准调蓄、植被缓冲带建设等措施减缓缺氧程度。

3)在周边汇水区域以建成区(较大的不透水面积和人口基数使径流产流和排水系统溢流污染加剧)为主且重度缺氧发生居多的河段,汛期溶解氧变化多由总磷、氨氮和高锰酸盐指数驱动。故在汛期气温升高时,需及时开展雨后污染截留或增加污水处理设施,减少城镇生活污水溢流及径流污染入河。此类河段轻度及重度缺氧的关键诱发因素为水温和总磷。

5 附录

附表 I 见电子版(DOI:10.18307/2025.0321)。

6 参考文献

- [1] Zhang YN, Gao XP, Sun BW *et al.* Oxygen evolution and its drivers in a stratified reservoir: A supply-side perspective for informing hypoxia alleviation strategies. *Water Research*, 2024, **257**: 121694. DOI: 10.1016/j.watres.2024.121694.
- [2] Quesada CG, Herdman J, Berasain GE *et al.* Influence of sewage discharge on dissolved oxygen concentration and fish diversity in the Girado Stream and Chascomús Lake. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2023, **195**(12): 1433. DOI: 10.1007/s10661-023-12070-3.
- [3] Liu SY, Gao QZ, Wu JX *et al.* The concentration of CH₄, N₂O and CO₂ in the Pearl River estuary increased significantly due to the sediment particle resuspension and the interaction of hypoxia. *Science of the Total Environment*, 2024, **911**: 168795. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.168795.
- [4] Li LL, Yan RH. Concentration, spatial distribution, and response to ecological restoration of N₂O in urban river networks of lakeside city. *J Lake Sci.*, 2024, **36**(5): 1412-1424. DOI: 10.18307/2024.0522. [李玲玲, 闫人华. 滨湖城市河网 N₂O 溶存浓度、空间分布及对生态修复的响应. 湖泊科学, 2024, **36**(5): 1412-1424.]
- [5] Aldrich AZ. Global study of hypoxia in rivers shows it is more prevalent than previously thought. *Limnology and Oceanography Letters*, 2023.
- [6] Zhi W, Klingler C, Liu JT *et al.* Widespread deoxygenation in warming rivers. *Nature Climate Change*, 2023, **13**: 1105-1113. DOI: 10.1038/s41558-023-01793-3.
- [7] Bouriqi A, Ouazzani N, Benaissa H *et al.* Typology and classification of water quality in an intermittent river in a semi-arid Mediterranean climate. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2024, **196**(4): 381. DOI: 10.1007/s10661-024-12514-4.
- [8] Chen Y, Yao YQ, Li YP *et al.* Vertical distribution of dissolved oxygen and chlorophyll-*a* and its influencing factors in Xiangxi River Reservoir bay in summer. *Water Resources and Power*, 2023, **41**(4): 69-72. [陈怡, 姚亚芹, 李一平等. 夏季香溪河库湾溶解氧与叶绿素 *a* 日间垂向分布特征及影响因子初探. 水电能源科学, 2023, **41**(4): 69-72.]

- [9] 康智瑜, 章小娟, 程瀛. 江苏省秦淮河水利工程管理处 久经“烤”验 跑出抗旱“加速度”. 中国水利报, 2022-08-23(7).
- [10] Li K, Xu T, Xi JY *et al.* Multi-factor analysis of algal blooms in gate-controlled urban water bodies by data mining. *Science of the Total Environment*, 2021, **753**: 141821. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.141821.
- [11] Hu LY, Jiang XL, Zhou JH *et al.* Application of LSTM considering time steps in runoff prediction of Ganjiang River Basin. *J Lake Sci*, 2024, **36**(4): 1241-1252. DOI: 10.18307/2024.0454. [胡乐怡, 蒋晓蕾, 周嘉慧等. 考虑记忆时间的 LSTM 模型在赣江流域径流预报中的应用. 湖泊科学, 2024, **36**(4): 1241-1252.]
- [12] Cheng WQ, Yuan DB, Xiong P *et al.* Construction and evaluation of city water quality index prediction model based on multiple machine learning algorithms. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2023, **43**(11): 144-152. DOI: 10.13671/j.hjkxxb.2023.0182. [程婉清, 袁定波, 熊鹏等. 基于多种机器学习算法的水质指数预测模型构建与评估. 环境科学学报, 2023, **43**(11): 144-152.]
- [13] Min KX, He Q, Liu JL *et al.* Current situation analysis of water management in Qinhuai River basin. *China Flood & Drought Management*, 2022, **32**(12): 101-105. [闵克祥, 何琴, 刘建龙等. 秦淮河流域水利治理现状分析. 中国防汛抗旱, 2022, **32**(12): 101-105.]
- [14] Fang GX, Zhong HY, Wen X. Analysis of precipitation characteristics in Nanjing from 1951 to 2020. *Jiangsu Water Resources*, 2022, (11): 50-53. [方功先, 钟华昱, 闻昕. 1951—2020 年南京市降水量变化特征分析. 江苏水利, 2022, (11): 50-53.]
- [15] Li Y, Miao DH, Guo LJ. Practice and discussion on emergency water supply for drought relief in Shijiu Lake area from Qinhuai River in Nanjing. *China Industrial Economics*, 2024: 1-5. [李益, 缪大宏, 果利娟. 南京市秦淮河向石臼湖地区抗旱应急补水实践与探讨. 中国防汛抗旱, 2024: 1-5.]
- [16] Zamaga D, Kerchove R, Keersmaecker W *et al.* ESA Worldcover 10 m 2021 v200.
- [17] Bulakhova NA, Meshcheryakova EN, Berman DI. Pallas' spadefoot *Pelobates vespertinus* (Pelobatidae, *Amphibia*) tolerates extreme hypoxia. *The European Zoological Journal*, 2023, **90**(1): 431-442. DOI: 10.1080/24750263.2023.2217201.
- [18] Gao F, Zhao HD, Zhao PF *et al.* Benthic microbial communities and environmental parameters of estuary and hypoxic zone in the Bohai Sea, China. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2022, **10**(12): 1862. DOI: 10.3390/jmse10121862.
- [19] Ye QQ, Gan Y, Zhao XY *et al.* Research on the aquatic ecological health assessment of the Qinhuai River based on the index of biological integrity. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2023, **43**(10): 407-418. DOI: 10.13671/j.hjkxxb.2023.0133. [叶奇青, 甘燕, 赵鑫莹等. 基于生物完整性指数的秦淮河水生态健康评估研究. 环境科学学报, 2023, **43**(10): 407-418.]
- [20] Liu YX, Gao YH, Wang ZB *et al.* Review of overflow pollution control of urban combined drainage systems. *Environmental Engineering*, 2023, **41**(12): 32-47. [刘宇轩, 高雅弘, 王振北等. 城镇合流制排水系统溢流污染控制综述. 环境工程, 2023, **41**(12): 32-47.]
- [21] Yu ZH, Liu PF, He YX *et al.* Temporal and spatial variation of rainfall characteristics under high urbanization in the Lake Taihu Plain. *J Lake Sci*, 2022, **34**(6): 2134-2143. DOI: 10.18307/2022.0625. [于志慧, 刘鹏飞, 何玉秀等. 太湖平原高度城镇化下降雨特征时空变化研究. 湖泊科学, 2022, **34**(6): 2134-2143.]
- [22] Zhou JC, Li JQ, Yang C. Simulation study on the influence of regional characteristic parameter and rainfall grade difference of combined sewer overflow. *Water & Wastewater Engineering*, 2021, **57**(9): 44-52. [周金成, 李俊奇, 杨超. 区域特征参数及降雨等级差异性对合流制系统溢流影响模拟研究. 给水排水, 2021, **57**(9): 44-52.]
- [23] Huang WH, Ma CZ, Li WP *et al.* Spatial-temporal variations of dissolved oxygen and their response to global warming in China. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2021, **41**(5): 1970-1980. DOI: 10.13671/j.hjkxxb.2020.0330. [黄炜惠, 马春子, 李文攀等. 我国地表水溶解氧时空变化及其对全球变暖的响应. 环境科学学报, 2021, **41**(5): 1970-1980.]
- [24] Xu GC, Zhao CZ, Xiong P *et al.* Impact of land use and landscape pattern on spatial-temporal change of water quality in typical watersheds of Qinling Mountains. *Northwest Hydropower*, 2023, (4): 1-7. DOI: 10.3969/j.issn.1006-2610.2023.04.001. [徐国策, 赵超志, 熊萍等. 土地利用和景观格局对秦岭典型流域水质时空变化的影响. 西北水电, 2023, (4): 1-7.]
- [25] Sun YY, Liu LH. Strategies and suggestions to enhance water security in the Four-Lake Basin. *China Water Resources*, 2023, (9): 59-62. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1123.2023.09.018. [孙媛媛, 刘伦华. 提升四湖流域水安全保障能力的对策与建议. 中国水利, 2023, (9): 59-62.]
- [26] Chen SP, Tan GH. Investigation on pollution characteristics of black-odorous water in Xinhui urban section of Yingzhouhai River. *Sichuan Environment*, 2023, **42**(5): 167-176. [陈树沛, 谭光辉. 江门市新会区英洲海城区段黑臭水体污染特征研究. 四川环境, 2023, **42**(5): 167-176.]
- [27] Chen Y, Xia R, Zeng SD *et al.* Variation characteristics of water pollution and its response to rainfall in urban rivers: A case study of Xinfeng River Basin. *China Rural Water and Hydropower*, 2022, (11): 153-158, 164. DOI: 10.12396/znsd.220047. [陈焰, 夏瑞, 曾思栋等. 城市河流水体污染变化特征及其对降雨的响应关系——以新凤河流域为例. 中国农村水利水电, 2022, (11): 153-158, 164.]
- [28] Deng YJ, Li YP, Pan HZ *et al.* Influencing mechanism of precipitation pollution intensity in Qinhuai River Basin based on random forest. *Environmental Science*, 2025, **46**(1): 193-203. DOI: 10.13227/j.hjxx.202401263. [邓雅静, 李一平, 潘泓哲等. 基于随机森林的秦淮河流域水体汛期污染强度影响机制. 环境科学, 2025, **46**(1): 193-203.]
- [29] Yang LN, Li ZY, Zhang XQ. Distribution characteristics of dissolved oxygen and mechanism of hypoxia in the upper estuarine zone of the Daliaohe River. *Environmental Science*, 2011, **32**(1): 51-57. DOI: 10.13227/j.hjxx.2011.01.007. [杨丽娜, 李正炎, 张学庆. 大辽河近

- 入海河段水体溶解氧分布特征及低氧成因的初步分析. 环境科学, 2011, **32**(1): 51-57.]
- [30] 汪凌佳. 杭州市近十五年主要地表水水环境质量状况研究[学位论文]. 杭州: 浙江大学, 2019.
- [31] Yang AL, Yang F, Li SB *et al.* Spatiotemporal characteristics of dissolved oxygen and control mechanism of hypoxia (low oxygen) in the watershed-coastal system in Fujian Province. *Environmental Science*, 2022, **43**(11): 4950-4960. DOI: 10.13227/j.hjks.202206033. [杨艾琳, 杨芳, 李少斌等. 福建省流域-近海溶解氧时空格局与低氧调控机制. 环境科学, 2022, **43**(11): 4950-4960.]
- [32] Wang C, Liu J, Xie XM *et al.* Research on the distribution of dissolved oxygen and causes of low oxygen in the surface water of Nanjing: A case study of Qiqiaoweng in Waiqinhuai River. *Environmental Monitoring and Forewarning*, 2022, **14**(3): 63-69. DOI: 10.3969/j.issn.1674-6732.2022.03.011. [王春, 刘军, 谢鑫苗等. 南京市地表水溶解氧分布特征及低氧成因初探——以外秦淮河七桥瓮为例. 环境监测与预警, 2022, **14**(3): 63-69.]
- [33] Jin H, Liang W B, Chen M *et al.* Water quality characteristics and pollution source analysis of Qinhuai River during rainstorm events. *Environmental Protection Science*, 2024, **4**: 77-86. [金辉, 梁文伯, 陈鸣等. 暴雨期间秦淮河水质特征及其污染源解析. 环境保护科学, 2024, **4**: 77-86.]
- [34] Xia W, Zhang M, Zhou M *et al.* Spatio-temporal dynamics of dissolved oxygen and its influencing factors in Lake Xiannv Jiangxi, China. *J Lake Sci*, 2023, **35**(3): 874-885. DOI: 10.18307/2023.0330. [夏威, 张萌, 周慇等. 大型深水湖泊溶解氧时空变化及驱动因素: 以江西仙女湖为例. 湖泊科学, 2023, **35**(3): 874-885.]
- [35] Chen YQ, Cui YJ, Huang HS *et al.* Rainfall impact on the disappearance of algal blooms in Xiangxi River of Three Gorges Reservoir under stratified density current. *J Lake Sci*, 2023, **35**(2): 519-529. DOI: 10.18307/2023.0210. [陈聿奇, 崔玉洁, 黄浩昇等. 分层异重流背景下降雨对三峡水库香溪河水华消退的影响. 湖泊科学, 2023, **35**(2): 519-529.]
- [36] Ren CD, Song XM, Song MM. Response of runoff processes to land use changes in the Qinhuai River Basin. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2023, **39**(21): 139-151. [任朝达, 宋晓猛, 宋明明. 秦淮河流域径流过程对土地利用变化的响应. 农业工程学报, 2023, **39**(21): 139-151.]
- [37] Xu R, Deng YJ, Li YP *et al.* Response relationship between water quality and rainfall characteristics in front pond of typical urban drainage pumping stations of Qinhuai River. *Journal of Hohai University: Natural Sciences*, 2024, **52**(1): 11-20, 28. [徐荣, 邓雅静, 李一平等. 秦淮河流域典型排涝泵站前池水质与降雨特征响应关系. 河海大学学报: 自然科学版, 2024, **52**(1): 11-20, 28.]
- [38] Begum MS, Lee MH, Park TJ *et al.* Source tracking of dissolved organic nitrogen at the molecular level during storm events in an agricultural watershed. *Science of the Total Environment*, 2022, **810**: 152183. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.152183.
- [39] Li XN, Yu Y, Zheng SW *et al.* Study on urban river water temperature changes and drainage illicit connection assessment methods based on field monitoring. *Environmental Engineering*, 2023, **41**(S2): 767-773. [李小宁, 俞悦, 郑世威等. 基于野外监测的城市河道水温变化与管道混接评估方法研究. 环境工程, 2023, **41**(S2): 767-773.]
- [40] Zhang XY, Chen L, Yu Y *et al.* Water quality variability affected by landscape patterns and the associated temporal observation scales in the rapidly urbanizing watershed. *Journal of Environmental Management*, 2021, **298**: 113523. DOI: 10.1016/j.jenvman.2021.113523.
- [41] Xu C, Liu GZ, Chen XH. Spatiotemporal variations and influencing factors of river dissolved oxygen in Dongguan section of Dongjiang River, Pearl River Basin. *J Lake Sci*, 2022, **34**(5): 1540-1549. DOI: 10.18307/2022.0510. [徐闯, 刘广州, 陈晓宏. 珠江流域东江(东莞段)溶解氧时空变化及其影响因素. 湖泊科学, 2022, **34**(5): 1540-1549.]
- [42] Wang YR, Feng MH, Wang JJ *et al.* Algal blooms modulate organic matter remineralization in freshwater sediments: A new insight on priming effect. *Science of the Total Environment*, 2021, **784**: 147087. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.147087.
- [43] Huo SL, He ZS, Ma CZ *et al.* Stricter nutrient criteria are required to mitigate the impact of climate change on harmful cyanobacterial blooms. *Journal of Hydrology*, 2019, **569**: 698-704. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2018.12.030.
- [44] He T, Xue CH, Sun JR *et al.* Research progress on forms and influencing factors of nitrogen and phosphorus in particulate matters in urban stormwater runoff. *Environmental Engineering*, 2024, **42**(8): 61-71. DOI: 10.13205/j.hjgc.202408008. [赫恬, 薛重华, 孙家荣等. 城市雨水径流颗粒物中氮磷赋存特征及其影响因素研究进展. 环境工程, 2024, **42**(8): 61-71.]
- [45] Wang M, Geng RZ. A review on the mechanisms and assessing methods for time lags in the responses of nitrogen loss to best management practices. *Acta Ecologica Sinica*, 2024, **44**(8): 3132-3141. DOI: 10.20103/j.stxb.202307271601. [王萌, 耿润哲. 农业面源氮污染控制措施滞后效应形成机理与评估方法研究进展. 生态学报, 2024, **44**(8): 3132-3141.]
- [46] Huang W, Zhu Q. Exploration and practice of ecological concept on urban river comprehensive treatment—A case study of the outer Qinhuai River, Nanjing. *Haihe Water Resources*, 2023, (12): 9-12. [黄伟, 诸青. 城市河道综合治理生态理念探索与实践——以南京外秦淮河为例. 海河水利, 2023, (12): 9-12.]
- [47] Yang WM, Liu JT, Li MY *et al.* Research and practice of wastewater system planning for continuous improvement of water environment. *Water & Wastewater Engineering*, 2023, **59**(5): 50-55. [杨伟明, 刘江涛, 李明远等. 面向水环境持续改善的污水系统规划研究与实践. 给水排水, 2023, **59**(5): 50-55.]

附表I 典型站点溶解氧和各影响因素之间相关性程度

Attached Tab.I Degree of correlation between dissolved oxygen and driving factors at typical stations

站 点	年际尺度				汛期-非汛期尺度				降雨事件尺度	
	2021 年		2022 年		汛期		非汛期		r_s	因素
	r_s	因素	r_s	因素	r_s	因素	r_s	因素		
将 军 大 道 站	-0.885**	水温	-0.863**	水温	-0.687**	总磷	-0.869**	水温	-0.639**	水温
	-0.711**	高锰酸 盐指数	0.488**	总氮	-0.509**	水温	-0.385**	总磷	-0.600**	高锰酸 盐指数
	-0.686**	总磷	0.332**	pH	0.508**	pH	-0.375**	浊度	-0.545**	总磷
	-0.485**	浊度	0.278**	电导率	-0.508**	氨氮	-0.289**	高锰酸 盐指数	-0.488**	浊度
	0.337**	电导率	-0.212**	浊度	-0.506**	高锰酸 盐指数	-0.262**	pH	0.482**	pH
	0.323**	流量	-0.183**	总磷	-0.345**	浊度	0.193**	总氮	0.468**	流量
	-0.798**	水温	-0.656**	水温	0.657**	pH	0.750**	pH	0.685**	pH
	0.700**	pH	0.489**	pH	-0.546**	氨氮	-0.631**	水温	-0.636**	水温
	-0.681**	浊度	0.410**	高锰酸 盐指数	-0.404**	流量	0.535**	高锰酸 盐指数	-0.622**	总磷
	0.644**	总氮	-0.292**	浊度	-0.363**	降雨量	-0.189**	降雨量	-0.581**	流量
七 桥 瓮 站	0.643**	电导率	0.278**	总氮	-0.363**	总磷	-0.186**	浊度	-0.569**	浊度
	-0.565**	总磷	0.269**	电导率	-0.310**	浊度	0.148**	总磷	0.487**	总氮
	-0.540**	流量	0.211**	氨氮	-0.191**	高锰酸 盐指数	0.133**	总氮	0.484**	电导率
	0.907**	pH	0.620**	pH	0.861**	pH	0.710**	pH	0.792**	pH
	-0.879**	水温	-0.605**	水温	-0.788**	总磷	-0.684**	水温	-0.729**	水温
	-0.821**	浊度	-0.416**	总磷	-0.784**	氨氮	0.255**	电导率	-0.690**	总磷
	-0.739**	总磷	0.371**	总氮	-0.637**	高锰酸 盐指数	-0.251**	浊度	-0.666**	浊度
	-0.655**	流量	-0.343**	浊度	-0.564**	浊度	-0.236**	总磷	-0.603**	高锰酸 盐指数
	0.625**	总氮	0.328**	电导率	-0.473**	流量	0.171**	总氮	-0.476**	流量
	-0.844**	水温	-0.860**	水温	-0.751**	总磷	-0.761**	水温	-0.740**	水温
三 汊 河 口 站	-0.740**	总磷	0.695**	pH	-0.727**	氨氮	-0.518**	浊度	0.487**	电导率
	-0.733**	高锰酸 盐指数	-0.568**	浊度	-0.521**	高锰酸 盐指数	-0.411**	总磷	-0.452**	高锰酸 盐指数
	-0.688**	流量	0.549**	总氮	-0.394**	流量	0.302**	总氮	-0.444**	流量
	0.655**	电导率	0.513**	电导率	-0.265**	降雨量	0.274**	电导率	-0.405**	总磷
	0.591**	总氮	-0.435**	总磷	-0.257**	总氮	-0.210**	氨氮	0.357**	总氮

**表示相关性显著, $P < 0.01$ 。