孔 燕,唐 诚,冯海涛,等.抚仙湖北岸硝酸盐来源解析及主要影响因素研究 [J]. 中国环境科学, 2025,45(10):5695-5705.
Kong Y, Tang C, Feng H T, et al. Sources and key influencing factors of nitrate in northern Fuxian lake [J]. China Environmental Science, 2025,45(10):5695-5705.

抚仙湖北岸硝酸盐来源解析及主要影响因素研究

孔 燕[1],唐 诚[1],冯海涛[1],王俊松[1],王志芸[1],张晓旭[1],倪兆奎[2],王圣瑞[2*],苏 斌[3**] (1.云南省生态环境科学研究院,云南高原湖泊流域污染过程与管理重点实验室,云南 昆明 650034；2.北京师范大学珠海校区,水科学研究中心,广东 珠海 519087；3.云南师范大学地理学部,云南 昆明 650034)

摘要：为阐明抚仙湖入湖河流硝酸盐污染来源及其驱动机制,于2022年丰水期及枯水期采集了抚仙湖北岸区域独房大沟、抚澄河、窑泥沟和龙溪沟4条主要河流流域20个样品,综合运用氮氧同位素示踪、水化学分析和土地利用解析等方法,结合MixSIAR模型定量评估了不同氮污染源贡献,并探究了其硝酸盐氮污染主要影响因素.结果表明,硝态氮是抚仙湖入湖河流氮的主要形态,占总氮含量的60%以上,且雨季占比更高;土壤流失及污水粪肥是入湖河流硝酸盐主要来源,各来源贡献依次为土壤氮流失(31.1%~56.1%)、生活污水或粪肥氮(15.6%~38.9%)、化肥氮(10.2%~45%)和大气氮沉降(3.3%~16.7%);雨季抚澄河、窑泥沟生活污水贡献率显著升高,可能与径流冲刷效应及污水溢流相关;蔬菜种植区土壤硝酸盐流失贡献高于蓝莓、小麦及烤烟,且旱季灌溉会加剧其流失.

关键词：抚仙湖入湖河流；硝酸盐；来源；氮氧同位素；种植模式
中图分类号：X524 **文献标识码**：A **文章编号**：1000-6923(2025)10-5695-11

Sources and key influencing factors of nitrate in northern Fuxian lake. KONG Yan[1], TANG Cheng[1], FENG Hai-tao[1], WANG Jun-song[1], WANG Zhi-yun[1], ZHANG Xiao-xu[1], NI Zhao-kui[2], WANG Sheng-rui[2*], SU Bin[3**] (1.Yunnan Key Laboratory for Pollution Processes and Control of Plateau LakeWatersheds, Yunnan Institute of Environmental Science, Kunming 650034,China；2.Center of Water Research, Beijing Normal University at Zhuhai, Zhuhai 519087, China；3.Faculty of Geography,Yunnan Normal University, Kunming 650034, China). *China Environmental Science*, 2025,45(10)：5695~5705

Abstract：To elucidate the sources and driving mechanisms of nitrate pollution in the inflow rivers of northern Fuxian Lake, this study collected water and soil samples from 11sites across four major river catchments (Dufangdagou, Fucheng River, Yaonigou, and Longxigou) in the northern area during both the wet and dry seasons of 2022. An integrated approach combining nitrogen and oxygen isotope tracing, water chemistry analysis, land use assessment, and the MixSIAR model was employed to quantitatively determine the contributions of various nitrogen pollution sources and to identify the key factors influencing nitrate pollution. The results indicated that nitratenitrogen was the predominant nitrogen species, accounting for over 60% of total nitrogen (TN), with an increased proportion during the wet season. Soil nitrogen loss and sewage/manure discharge were identified as the primary sources of nitrate pollution, contributing 31.1%~56.1% and 15.6%~38.9%, respectively, followed by chemical fertilizer application (10.2%~45%) and atmospheric nitrogen deposition (3.3%~16.7%). Notably, the contribution from domestic sewage increased substantially in Fucheng River and Yaonigou catchments during the wet season, likely due to intensified runoff scouring and sewage overflow. In addition, soils under vegetable cultivation exhibited greater nitrate loss compared to those planted with blueberries, wheat, or tobacco, with irrigation during the dry season further exacerbating nitrogen loss. These findings highlight the urgent need for targeted management strategies to mitigate nitrate loss from legacy nitrogen pools in agricultural soils, particularly in vegetable fields.

Key words：inflow rivers of Fuxian lake；nitrate；source；nitrogen and oxygen isotope；planting mode

人类活动氮排放增加是造成河流及湖泊生态系统富营养化的重要原因,对水生态环境安全造成严重影响[12].硝酸盐氮(NO_3^--N)是水体氮的重要组成形式[3],水体硝酸盐氮浓度持续上升已经成为当前世界普遍面临的水环境问题之一[46],科学识别硝态氮的来源及其转化规律是水环境保护决策的重要支撑.当前水体硝态氮来源示踪主要使用同位素示踪技术、水化学主成分分析方法或者多技术联用等方法[78],其中硝酸盐(NO_3^-)的氮和氧同位素双同位素(δ^{15}N-NO_3^-、δ^{18}O-NO_3^-)示踪方法已被大量用于调查研究河流、地下水等水体中的NO_3^-的来源和输移

收稿日期：2025-02-26
基金项目：国家自然科学基金资助项目(U2202208)
* 责任作者, 教授, wangsr@bnu.edu.cn; ** 讲师, subin@ynnu.edu.cn

路径,如长江、珠江、黄河、海河等主要河流水系硝态氮污染特征及定量源解析[9-10]、滇池[11]、太湖[12]、鄱阳湖[13]等湖泊河流及地下水 NO_3^-来源示踪等.研究表明,河流及湖泊水体中 NO_3^-的来源和转化过程复杂,主要来源包含化肥氮、土壤氮、污水以及大气氮沉降等[14-16].氮氧双同位素示踪方法主要基于样品与各来源中 δ^{15}N-NO_3^-和 δ^{18}O-NO_3^-值范围的重叠性来识别样品中 NO_3^-的来源[17-19],而由于不同污染来源的δ^{15}N 值存在部分范围的重叠,加之污染源同位素时空异质性、同位素分馏作用等影响,一定程度上会导致 NO_3^-的来源判断误差[8],因此通常将水化学分析、土地利用方式等多重信息与同位素示踪结果进行联合分析[19-20].研究结果表明,不同土地利用方式下 NO_3^--N 浓度和 δ^{15}N-NO_3^-的分布特征不同,NO_3^-污染来源及输出均有所差异,且相关性在雨旱季均有所不同[13],同时人为活动影响下多种因素及其相互作用均会改变 NO_3^-来源及其输移强度[20-22].然而,当前大部分研究集中于土地利用类型、农事变化等单因素变化与同位素信息的综合分析之上,缺乏结合土地利用方式变化、截污措施变化、农事变化多重影响下,流域 NO_3^-污染来源、转化及其同位素信息变化的研究,同位素源识别结果的准确性及影响因素仍有待深入研究.

抚仙湖是我国蓄水量第三的淡水湖泊,且水质优良[23],其水生态环境研究及保护至关重要[24].随着抚仙湖流域社会经济的快速发展,湖体稳定维持Ⅰ类水质的压力日渐增大,全湖总氮浓度缓慢上升接近Ⅱ类水质,营养状态指数逐渐上升[25],主要入湖河流总氮浓度长期处于Ⅲ~Ⅴ类[24].农业面源等长期人为活动带来的氮素污染是抚仙湖营养状态指数上升的重要成因之一[26],根据相关研究,抚仙湖入湖河流总氮负荷量每年约 400t,且丰水期占比在 85%以上[27],对抚仙湖水质影响较大.因此,氮污染精准识别与防控对抚仙湖保护治理具有重要意义.抚仙湖流域地表水 NO_3^-来源研究不足,且主要是基于水化学监测[23-24,27],同时“十二五”以来抚仙湖实施了一系列保护治理工程,流域尤其是澄江县城所在地北岸的污染格局发生了较大变化,在此影响下急需探究主要入湖河流 NO_3^-时空变化特征及污染来源变化,提升抚仙湖保护整理精准性.因此,本研究考虑土地利用类型和保护治理措施差异,选取了抚仙湖北岸四条主要入湖河流,通过氮氧同位素示踪、水化学分析、土地利用分析相结合等方法,定量识别抚仙湖北岸主要入湖河流雨旱季 NO_3^-来源及贡献,阐明流域 NO_3^-污染来源及其与土地利用方式、治理措施等人为活动的关系,同时进行不同作物农田土壤的氮氧同位素特征及差异探索,以期为抚仙湖精准保护治理及决策提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

抚仙湖位于云南省玉溪市(102°39′~10°300′, 24°13′~24°46′),地处长江流域和珠江流域分水岭地带,流域范围内涉及 3 县 8 镇 42 个行政村(社区)(图 1).流域总面积 674.69km^2,当湖面 85 高程为 1723.35m 时,水域面积约 216.6km^2,湖区最大水深 158.9m,平均水深 95.2m.流域共有大小入湖河流 103 条(含季节河、农田排灌沟),其中较大的有 27 条,主要集中在抚仙湖北岸,主要河流流经北岸澄江县城、龙街集镇及集中农田,且河床比降高、汇流时间短、易携带泥沙及污染负荷入湖.对于抚仙湖特殊的深水湖、无出流、换水周期长的自然地理特征来说,一旦进入富营养化状态,其付出的修复成本代价将难以估计[25].抚仙湖的保护治理工作开启于 20 世纪 90 年代,从“九五”至今均延续实施,“十五”至“十二五”期间抚仙湖水污染防治工作发生了从单项治理到综合治理,从单纯着眼于污染治理到治污与生态保护并重的流域综合治理思路转变,“十二五”期间流域污染综合控制体系基本建立,生态得到初步修复,“十三五”期间抚仙湖保护形势格局发生变化,保护治理进入提质增效、精准治理、综合调控阶段,依托《云南省抚仙湖山水林田湖草生态保护修复工程试点项目实施方案》、《抚仙湖流域水环境保护治理“十三五”规划》、《抚仙湖综合保护治理工作三年行动计划(2018~2020年)》等系列规划,开展环湖生态系统修复、主要污染源控制、产业结构调整与污染减排、入湖河流清水产流机制修复、流域综合监管体系建设五大类项目[28],自 2018 年起抚仙湖径流区实施了 3900hm^2 土地流转休耕[29],坝区休耕轮作实施后种植作物主要为烤烟、水稻、蓝莓、荷藕、香根草和桑叶[30],同时实施了抚仙湖北岸生态湿地建设、北岸生态调

蓄带建设、抚仙湖北部窑泥沟、洗菜沟、独房大沟水环境综合整治工程等生态修复及河流治理项目,2022 年实施了截污治污大会战等治污措施[31].

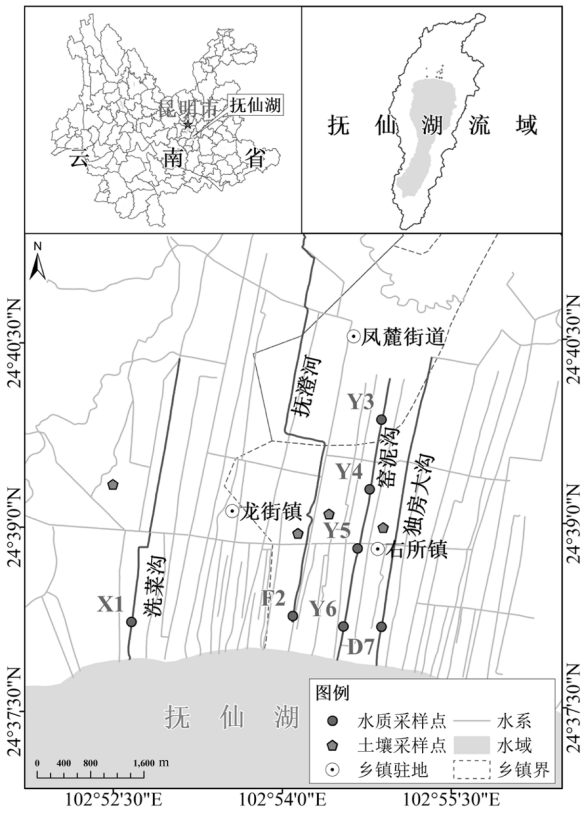


图 1　研究区及采样点示意

Fig.1　Study area and sampling site locations

抚仙湖主要入湖河流及入湖污染主要集中在北岸,为理清抚仙湖主要入湖河流污染物转移过程中源汇关系,结合实地走访与调查,综合考虑不同空间分异、土地利用、农业种植模式及政策措施实施区域的典型河流进行研究,在初步调查选点中,抚仙湖北岸独房大沟、抚澄河、窑泥沟和龙溪沟四条河流污染来源、污染过程、治理措施、农业种植模式均有所不同,因此最终选定为典型河流进行研究.北岸片区土地利用主要以林地与耕地为主,其中独房大沟、抚澄河、窑泥沟、龙溪沟子流域耕地面积分别为 4.99,6.76,2.07,3.89km^2,分别占子流域总面积的 51.40%、39.97%、50.04%、11.74%,耕地主要以水田及水浇地为主,城镇村镇用地分别为 2.22,4.88,1.30,3.02km^2,占子流域总面积比例分别为 20.72%、28.87%、31.26%、9.12%.

1.2　样品采集与实验测试

研究于 2022 年 4 月(旱季)和 2022 年 7 月(雨季)在抚仙湖流域进行河流干流控制断面、入湖口及主要污染贡献来源样品系统采集,共设置 7 个河流样点、4 个土壤样点、2 个水库及库塘样点,采样点分布情况如图 1 所示.共采集样品 20 个(旱季 13 个,雨季 7 个),其中河流样品包括洗菜沟(X1)、窑泥沟沿程(Y3~Y6)、抚澄河(F2)、独房大沟(D7)地表水样品枯丰水期共 14 个,土壤样品根据流域土地利用类型(图 2)和生产生活实际情况,选择蓝莓、小麦、烤烟蚕豆轮作、蔬菜耕作 4 种不同典型作物种植土壤于旱季采集土壤样品 4 个,选择河流主要来水水源水库及库塘采集水样样品 2 个.河流水样按照《水质采样方案设计技术规定(HJ4952009)》[32]和《水质河流采样技术指导(HJ/T521999)》[33]的相关规范,水样均采用 250mL 聚乙烯塑料瓶采集,确保瓶内无气泡后,用封口胶密封保存.土壤采集使用蛇形采样法采集表层 20cm 土壤并按 4:1 混样,带回实验室后按与蒸馏水比例 1:2 提取浸提液.

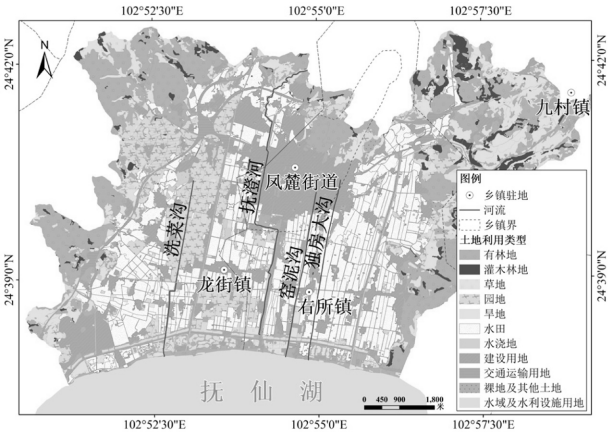


图 2　研究区域土地利用

Fig.2　Land use distribution in the study area

水样及土壤浸提液经 0.45μm 醋酸纤维滤膜过滤后,在云南师范大学云南省高原地表过程与环境变化研究重点实验室采用 Thermo ICS900 离子色谱仪测试 F、Cl、NO_2^-、NO_3^-、SO_4^{2-}阴离子,每个离子测试时做 3 组平行实验取平均值,实验室误差控制在 5%以内.水样 δ^{15}N-NO_3^-和 δ^{18}O-NO_3^-同位素测定在中国科学院地球环境研究所稳定同位素生物地球化学实验室完成,采用硝化细菌法[34],将经过 5~10d 培养的反硝化细菌离心,然后将菌液浓缩 5 倍,

再向顶空进样瓶注入 3mL 菌液,密封后利用高纯氮气吹扫 3h 以上,注入含 20nmol 氮的待测水样,将加入样品的细菌室温过夜培养后再注入氢氧化钠溶液,应用 Precon 与 253plus 稳定同位素质谱仪联机测试,国际标准 IAEANO_3^- (KNO_3^-)的分析精度:δ^{15}N 优于±0.3‰,δ^{18}O 优于±0.5‰.硝酸盐氮(NO_3^-–N)、总氮(TN)、总磷(TP)和化学需氧量(COD)按照《水和废水监测分析方法(第四版)》[35]在云南高原湖泊流域污染过程与管理重点实验室完成测试,误差控制在 5%以内.近 10a 的抚仙湖湖体及主要入湖河流数据获取于云南省生态环境监测中心监测数据;土地利用数据为地方资料收集后获得.

1.3 数据分析

同位素数据处理及硝酸盐氮来源贡献定量使用 R 语言运行 MixSIAR 模型对丰水季和枯水季水体中硝酸盐在各污染源的贡献率进行计算,算法如下:

$$X_{ij}=\sum_{k=1}^{k}p_k(S_{jk}+c_{jk})+\varepsilon_{jk}$$
$$S_{jk}\sim N(\mu_{jk},\omega_{jk}^2)$$
$$C_{jk}\sim N(\lambda_{jk},\tau_{jk}^2)$$
$$\varepsilon_{jk}\sim N(0,\sigma_{jk}^2) \quad (1)$$

式中:X_{ij} 为混合样 i 中同位素 j 的比值(i=1,2,3,…,N; j=1,2,3,… J); S_{jk} 为源 k 中同位素 j 的比值(k=1,2,3,…,K),其平均值为 μ,标准偏差为 ω;P_k 为所要计算的源 k 的比例;C_{jk} 为源 k 中同位素 j 的分馏因子(平均值 λ,标准偏差 τ);ε_{ij} 为混合样 i 中同位素 j 比值的残余误差(平均值 0,标准偏差 σ).

使用 Excel、Origin 软件对水化学数据、相关性系数等进行处理和分析制图.

2 结果与分析

2.1 北岸主要入湖河流水化学离子特征

抚仙湖 4 条主要入湖河流水化学组成如表 1 所示.各河流样点旱季 F^-、Cl^-、NO_3^-和 SO_4^{2-}浓度均值分别为 1.11,27.59,1.02,35.12mg/L,雨季均值分别为 0.89,27.64,2.41,0.73mg/L.独房大沟和窑泥沟 Cl^-浓度及 SO_4^{2-}较高,表明河流受污水排放等人为干扰程度相对较高,且窑泥沟虽经过湿地处理后 Cl^-及 SO_4^{2-}有所下降,但流至调蓄池及入湖口又有所回升(图 3),表明上游湿地建设对水化学离子有一定削减作用,但下游持续污染汇入仍将导致河流水质下降;龙溪沟雨旱季 NO_3^-浓度分别达到 2.47 和 4.82mg/L,较高的 NO_3^-浓度说明有可能受到农事活动影响[22].四条河流 Cl^-浓度雨旱季变化不大,NO_3^-浓度雨季比旱季增长 136.3%,表明雨季 NO_3^-离子更易流失.

表 1 抚仙湖流域典型河流断面地表水水化学特征

Table 1 Chemistry characteristics of surface water at typical river sections in Fuxian Lake Basin

季节	点位	F^- (mg/L)	Cl^- (mg/L)	NO_2^- (mg/L)	NO_3^- (mg/L)	SO_4^{2-} (mg/L)	$n(NO_3^-)/n(Cl^-)$
旱季	独房大沟	1.31	41.73	\	0.87	58.58	0.02
	抚澄河	1.03	4.52	\	0.25	15.02	0.06
	龙溪沟	0.98	13.46	0.45	2.47	24.17	0.18
	窑泥沟	1.11	50.65	\	0.49	42.72	0.01
	平均值	1.11	27.59	\	1.02	35.12	0.07
雨季	独房大沟	0.85	38.89	0.01	0.01	0.01	0.85
	抚澄河	0.84	14.40	0.52	4.81	1.09	0.84
	窑泥沟	1.11	48.35	0.01	0.01	0.01	1.11
	龙溪沟	0.77	8.91	0.33	4.82	1.09	0.77
	平均值	0.89	27.64	0.22	2.41	0.73	0.13

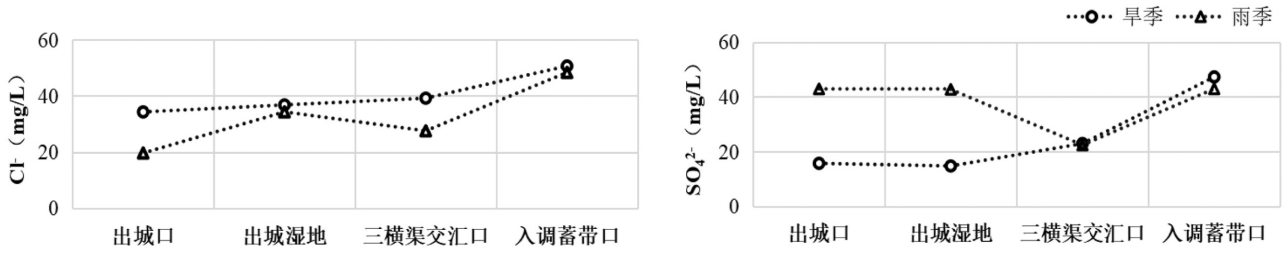


图 3 窑泥沟 Cl^-与 SO_4^{2-}沿程浓度变化特征

Fig.3 Concentration Changes of Cl^- and SO_4^{2-} along the course of the Yaonigou

2.2 北岸主要入湖河流营养盐浓度特征

如图 4 所示,旱季抚仙湖四条典型入湖河流各样点 NO_3^-–N、TN、TP 和 COD 浓度变化范围分别为 0.25~4.22,0.29~5.33,0.05~0.68,7.88~44.93mg/L,

除抚澄河达到地表水 II 类水质标准外(地表水环境质量标准 GB38382002[36]),其余 3 条河流均超过 V 类标准限值.雨季四条河流 NO_3^--N、TN、TP 和 COD 浓度变化范围分别为 0.62~10.40,2.56~13.92,0.181~1.27,20.34~95.84mg/L,水质指标浓度相较旱季显著升高,其中 TN 及 NO_3^--N 均值相较于旱季升高 2~3 倍,雨季均为劣 V 类水质.4 条河流中以窑泥沟水质指标污染最为突出,穿过县城后窑泥沟水质已较差,旱季窑泥沟湿地净化沉淀后 TN、NO_3^--N 显著下降 90%左右,但雨季湿地削减效果减弱,尤其是 NO_3^--N 不降反升,同时随着下游污染继续汇入,NO_3^--N 浓度持续升高.总体来看,4 条主要入湖河流均呈现不同程度的氮磷和有机污染,尤其是雨季地表径流对河流水质造成较大影响,同时 NO_3^--N 是抚仙湖入湖河流的主要氮素赋存形态,平均浓度为(2.36±2.50)mg/L,占 TN 含量的 60%以上.

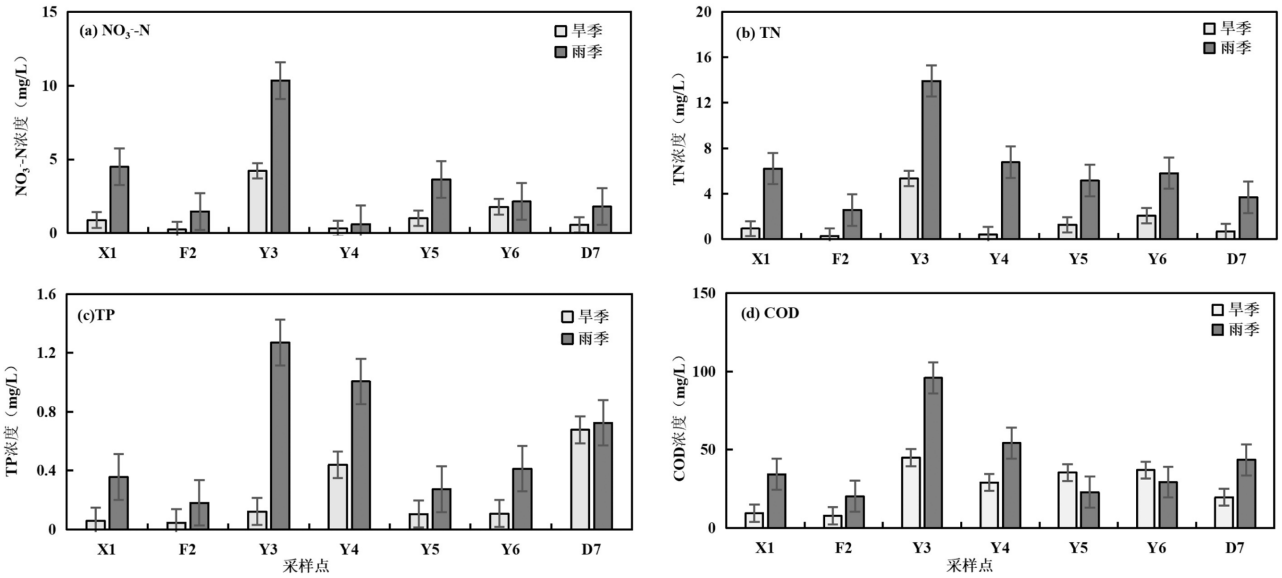


图 4　主要入湖河流采样点氮磷及有机质浓度特征

Fig.4　Concentrations of nitrogen, phosphorus, and organic matter in inflow rivers

2.3　北岸主要入湖河流硝酸盐同位素特征

图 5 表明抚仙湖北岸主要入湖河流中 δ^{15}N-NO_3^-和 δ^{18}O-NO_3^-特征值及其季节变化,旱季河流 7 个样品主要入湖河流 δ^{15}N-NO_3^-值范围为 2.39‰~14.48‰,平均值为(6.36 ± 6.17)‰;δ^{18}O-NO_3^-值范围为 14.41‰~2.71‰,平均值为(5.77±6.50)‰.雨季河流 7 个样品 δ^{15}N-NO_3^-与 δ^{18}O-NO_3^-值相较旱季略有升高,其中 δ^{15}N-NO_3^-值为 2.89‰~18.80‰,平均值为(9.19±5.46)‰,δ^{18}O-NO_3^-值为 7.46‰~3.30‰,平均值为(2.42±4.10)‰.从不同入湖河流之间的差异来看,以独房大沟与窑泥沟 δ^{15}N-NO_3^-值最高,抚澄河 δ^{15}N-NO_3^-值较低但雨季同位素信号增强;δ^{18}O-NO_3^-值则以窑泥沟最低,独房大沟最高.从河流沿程变化来看,旱季窑泥沟上游至下游 δ^{15}N-NO_3^-值呈升高趋势,δ^{18}O-NO_3^-值则降低,雨季上游至下游沿程变化不明显.

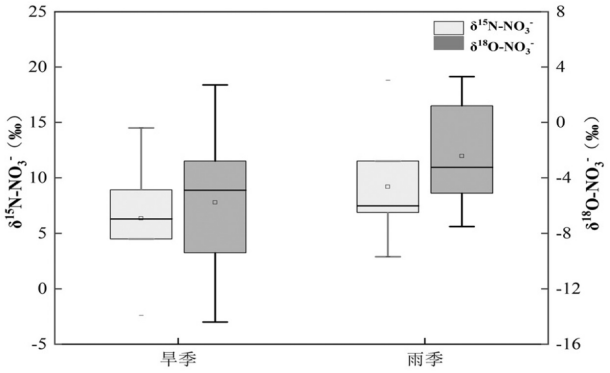


图 5　主要入湖河流 δ^{15}N-NO_3^-和 δ^{18}O-NO_3^-值分布

Fig.5　Distributions of δ^{15}N-NO_3^- and δ^{18}O-NO_3^- in inflow rivers

2.4　主要入湖河流氮长期变化特征与湖体响应

基于近 10a 来云南省生态环境监测中心长期监测的抚仙湖全湖平均及主要入湖河流水质氮素数据(图 6),2013~2023 年之间抚仙湖全湖平均 TN 浓度

为 0.13~0.22mg/L,波动幅度较窄,2013 年起呈小幅上升趋势至 2018 年达到高值,而后逐渐回落至 10a 前相当水平;主要入湖河流抚澄河 TN 浓度总体呈下降趋势,由 2013 年 30.14mg/L 的月度高值下降至 2019 年的最低月度值 0.57mg/L,“十四五”期间继续下降,基本维持在Ⅲ~Ⅳ类水质标准之间,雨季有所回升波动至 V 类或劣 V 类,龙溪沟、窑泥沟 TN 总体稳定但均超过Ⅳ类标准限值.湖体 NH_3–N 浓度在 0.02~0.84mg/L 之间,总体呈波动下降趋势,2023 年较 2013 年下降 53.77%,主要入湖河流抚澄河 NH_3–N 浓度总体下降但雨季波动变化趋势较为显著,龙溪沟 NH_3–N 基本维持Ⅱ类以下,窑泥沟 NH_3–N 部分月份超过 V 类标准.单纯从人为活动的保护治理措施来看,抚仙湖北岸河流氮变化也许与“十三五”期间实施的抚仙湖系统治湖,以及休耕轮作、截污大排查等根本性措施的实施有所关联,河流 TN、NH_3–N 浓度有一定下降趋势,但反映到湖体上 TN、NH_3–N 浓度无显著下降趋势,波动范围较小,表明抚仙湖湖体水质波动并不是单纯与河流水质波动有关,同时有可能受到气象水文环境因子、深水湖湖内物质物理化学生物复杂过程作用及人为活动的综合影响[27].

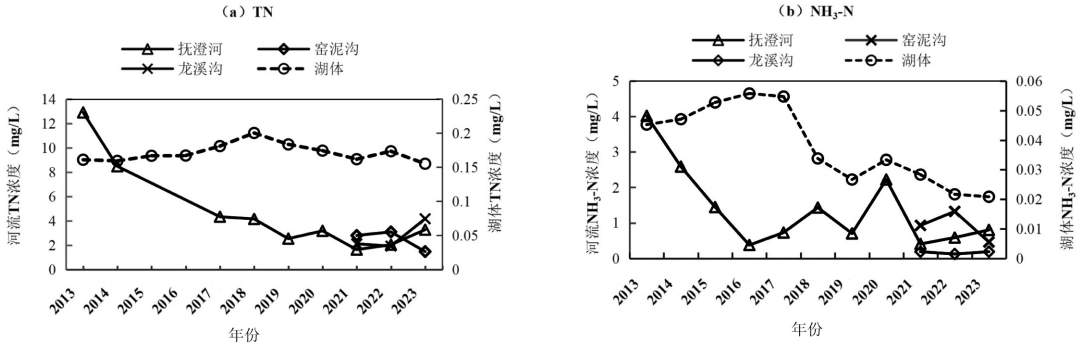


图 6 近 10a 来抚仙湖河湖水体氮浓度变化特征

Fig.6 Changes in nitrogen concentrations of Fuxian Lake and inflow rivers over the past decade

3 讨论

3.1 抚仙湖北岸主要入湖河流硝酸盐来源及贡献解析

3.1.1 硝酸盐来源定性解析 Cl^-离子来源包括化肥、生活污水、工业废水等,当前研究普遍利用水体中 Cl^-作为指示剂,采用 $n(Cl^-)$和 $n(NO_3^-)/n(Cl^-)$的关系辅助判别硝酸盐的不同来源,该种判别方法是硝酸盐来源定性解析的经常使用的方法之一[37-38].抚仙湖 4 条主要入湖河流 $n(Cl^-)$和 $n(NO_3^-)/n(Cl^-)$的关系表明(图 7),抚澄河、龙溪沟水体中 NO_3^-主要来源于农业活动,独房大沟水体中 NO_3^-主要来源于生活污水或粪肥,窑泥沟 NO_3^-主要来源于生活污水或粪肥,且从上游至下游生活污水或粪肥污染指示越来越显著.相比旱季,除了窑泥沟出城口点位,其余点位雨季变化不大,考虑降雨稀释作用降低了出城口 Cl^-浓度.

不同的 NO_3^-来源具有不同的 $\delta^{15}N\text{-}NO_3^-$和 $\delta^{18}O\text{-}NO_3^-$特征值范围组成,参考 Heaton T H[39]、Xue D[40], Xing G[41]等文献的大气降雨、硝酸盐氮肥、氨态氮肥、土壤有机氮、粪便和生活污水的 $\delta^{15}N\text{-}NO_3^-$和 $\delta^{18}O\text{-}NO_3^-$值范围,如图 8 所示,抚仙湖流域典型河道 $\delta^{15}N\text{-}NO_3^-$和 $\delta^{18}O\text{-}NO_3^-$旱季主要分布在化肥、土壤氮、生活污水或粪肥的范围中,表明几种污染源混合作用导致抚仙湖北岸流域主要河流 NO_3^-流失.雨季 $\delta^{15}N\text{-}NO_3^-$高于旱季,除抚澄河外三条河流 $\delta^{15}N\text{-}NO_3^-$和 $\delta^{18}O\text{-}NO_3^-$均落于生活污水或粪肥期间范围,表明生活污水和粪肥污染是雨季抚仙湖河流水体 NO_3^-的主要贡献源.已有研究结果表明,微生物反硝化将增加水样品中的 $\delta^{15}N\text{-}NO_3^-$和 $\delta^{18}O\text{-}NO_3^-$值,降低 NO_3^-含量,并产生 1.3:1 至 2.1:1 区间的 $\delta^{15}N\text{-}NO_3^-$和 $\delta^{18}O\text{-}NO_3^-$比值[42],本研究中入湖河流 $\delta^{18}O\text{-}NO_3^-$和 $\delta^{15}N\text{-}NO_3^-$值均未落在 1:1.3 至 1:2.1 线性范围中,表明采样期间水体中反硝化现象较弱.$\delta^{15}N\text{-}NO_3^-$和 $\delta^{18}O\text{-}NO_3^-$双同位素图判别方法与 $n(Cl^-)$和 $n(NO_3^-)/n(Cl^-)$的关系辅助判别方法研究结果大致相符,均表明各污染源的混合作用以及沿程污水的汇入是影响抚仙湖北岸入湖河流 NO_3^-迁移转化的主

要因素.

3.1.2　硝酸盐来源贡献定量解析　在 NO_3^-来源定性识别基础上,使用 MixSIAR 模型带入大气降水(雨季)、化肥(氨肥、硝肥)、土壤有机氮和粪便污水同位素值作为端元计算各污染源贡献,不同 NO_3^-来源的均值和标准差来自现场采样或近似流域文献等相关成果[39-41].根据 3.1.1 节分析,本研究样点同位素监测值表明研究区未发生显著反硝化反应,因此在溯源结果计算中将分馏因子设置为 0.源贡献解析结果表明(图 9),抚仙湖北岸入湖河流 NO_3^-主要来源于土壤氮、生活污水或粪肥、化肥的复合污染,不同流域不同污染源的贡献率各不相同且雨旱季差异显著.从污染源污染贡献率的季节变化来看,旱季土壤氮流失、生活污水或粪肥、化肥对 NO_3^-贡献率变化区间分别为 31.1%~56.1%,其中抚澄河土壤流失氮污染源对 NO_3^-贡献显著,龙溪沟 NO_3^-主要由土壤氮及化肥贡献,窑泥沟及其沿程 NO_3^-来源则呈现显著的生活污水或粪肥及土壤流失氮混合污染.雨季土壤流出氮、生活污水或粪肥、化肥、大气沉降对硝态氮贡献率变化区间分别为 34.7%~56.1%、17%~36.5%、10.2%~15.8%、3.3%~16.7 %,相比旱季,抚澄河、窑泥沟生活污水或粪肥来源占比上升,其中窑泥沟出城口生活污水来源比例上升至 46.2%,龙溪沟、窑泥沟土壤流失氮贡献比例均有所上升,其中龙溪沟土壤流失氮贡献率相比旱季上升 21.30%,表明雨季降雨径流冲刷导致土壤侵蚀氮素流失量增大,以及雨季生活污水溢流情况更为突出.杨晓宇等[21]和纪晓亮等[43]研究结论与本研究结果一致.

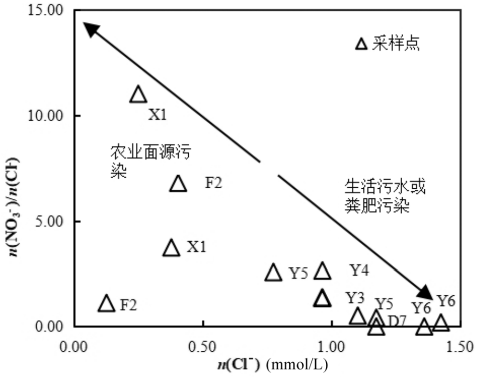


图 7　抚仙湖北岸入湖河流 Cl^-与 NO_3^-/Cl^-物质的量浓度关系

Fig.7　Relationship between Cl^- molar concentration and NO_3^-/Cl^- molar ratios in inflow rivers of northern Fuxian Lake

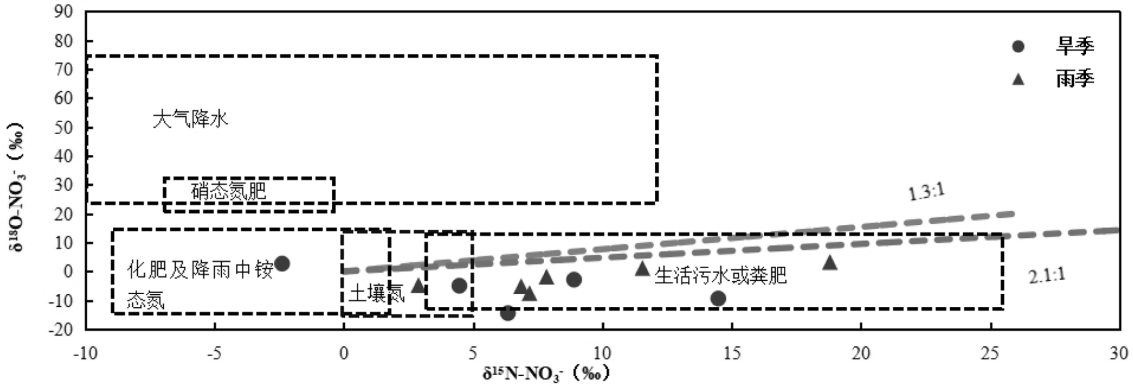


图 8　抚仙湖北岸入湖河流 $\delta^{15}N\text{-}NO_3^-$和 $\delta^{18}O\text{-}NO_3^-$双同位素

Fig.8　Dualisotope plot of $\delta^{15}N\text{-}NO_3^-$ and $\delta^{18}O\text{-}NO_3^-$ in inflow rivers of northern Fuxian Lake

根据以上溯源结果,抚仙湖北岸主要入湖河流 NO_3^-主要污染来源以土壤累积氮流失与生活污水为主,尤其在常年农田种植比较集中的抚澄河、龙溪沟土壤流失贡献率达到 50%以上.表明休耕轮作等措施实施后,虽然化肥使用量降低,但多年化肥施用累积在土壤中的氮素污染仅通过几年周期的休耕及种植结构调整措施的实施并不能完全削减,土壤累积氮污染的大幅削减需要更长的时间周期[44].同时,截污治污会战后,澄江县城截污管网雨污混流、污水溢流状况有一定程度改善[31],但县城老城区管网改造工作尚未完成,城周村镇生活污水截污管网尚不完善,本研究结果也表明雨季流域生活污水溢流污染现象仍然存在.此外,近 10a 来抚仙湖河湖水体氮浓度变化特征表明(图 6),“十三五”期间实施休耕轮作等一系列治理措施后,主要入湖河流氮素虽有一定下降趋势,但反映到湖体上仍仅有微小波

动,抚仙湖深水湖泊湖体水质对主要入湖河流水质变化的响应仍显滞后,湖体水质改善周期较长难度较大.总体来看,抚仙湖保护治理措施取得一定成效,但长期累积性氮污染仍需较长的削减周期,城镇村庄污水截污体系仍需进一步开展精细化管控治理,抚仙湖保护仍任重道远.

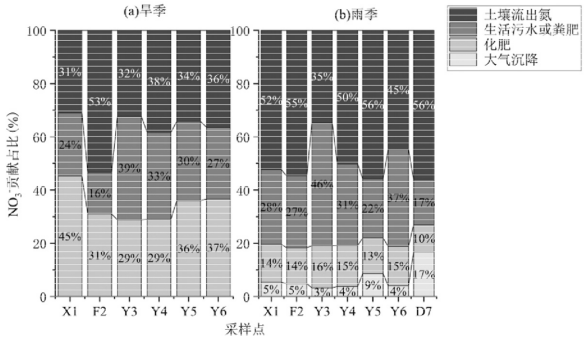


图 9 抚仙湖北岸入湖河流硝酸盐污染来源及贡献率

Fig.9 Sources and contribution rates of NO_3^- pollution in inflow rivers of northern Fuxian Lake

3.2 土地利用及人为活动对抚仙湖北岸硝酸盐来源的影响

已有研究表明河流子流域土地利用类型是河流水质变化的重要影响因子,农用地化肥使用、农村生活污水污染均会引起 NO_3^--N 及$\delta^{15}N\text{-}NO_3^-$的变化[18-19].将抚仙湖土地利用方式与本研究 NO_3^-、硝酸盐同位素、硝酸盐不同污染来源贡献占比研究结果进行相关性分析(图 10),抚仙湖林地、草地、园地、未利用土地面积与 NO_3^-、硝酸盐同位素、硝酸盐不同污染来源贡献占比均无显著相关性,而人为活动影响较为强烈的耕地与居民建设用地则与硝酸盐同位素、硝酸盐污染来源贡献占比有一定相关性,说明此两类土地利用类型为硝酸盐氮素重要的输出源,研究结果与王鹏等[13]类似.耕地面积与土壤流出氮来源占比呈显著正相关(r=0.84),表明耕地长期耕作后土壤中累积了大量氮素,即使实施了近年的休耕轮作政策,土壤氮含量有一定程度下降[45],但仍是抚仙湖流域硝酸盐的主要来源,而耕地面积与化肥、粪肥占比呈负相关,表明在流域实施产业结构调整后,大面积的耕地休耕或轮作为较少施用化肥的蓝莓集中种植土地,导致化肥、粪肥的施用与耕地面积大小已经没有简单的线性关系,而是更大程度上受到人为保护治理政策及活动的影响.居民生活用地面积与 $\delta^{15}N\text{-}NO_3^-$呈显著负相关($r$=0.77),与 Ide 等[20]及 Johannsen 等[46]研究中居民用地由于生活污水的排放的影响与 $\delta^{15}N\text{-}NO_3^-$呈显著正相关的结论相反.独房大沟、窑泥沟自然汇水流域土地利用类型中城镇农村居民用地仅分别为 2.22 及 1.3km^2,远低于抚澄河子流域及龙溪沟子流域,但实地调查显示澄江县城老城区溢流的生活污水通过暗沟汇入这两条河流,导致了生活污染的发生,表明在人为活动的剧烈影响下,地下暗沟及排污方式重构了河流自然水文连通性,自然汇水流域土地利用已不能完全表达其与氮素等污染来源的复杂关系,该结论与孙然好等[47]关于人类活动干扰下流域系统氮素运移路径异化的研究结果一致.

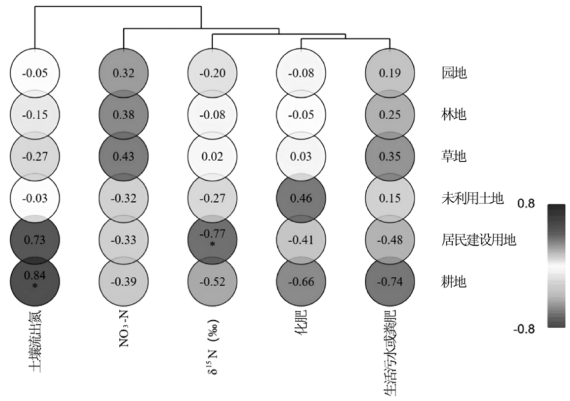


图 10 土地利用方式与 NO_3^-、硝酸盐同位素、硝酸盐污染来源贡献占比相关性关系

Fig.10 Correlations between land use patterns, NO_3^- concentrations, nitrate isotopic signatures, and NO_3^- pollution source contribution

*代表 P<0.05,**代表 P<0.01,***代表 P<0.001

3.3 不同作物农田土壤硝酸盐流失特征及其污染占比探索

抚仙湖北岸实施休耕轮作后,农用地种植作物发生较大变化,种类多样且面积占比不一,本研究将土壤氮来源进一步细化划分至不同作物农田土壤来源并进行同位素测试,利用 MixSIAR 对不同种植作物土壤氮、生活污水或粪肥、化肥、水库或库塘补给水源对抚仙湖北岸主要入湖河流 NO_3^-污染贡献占比进行探索.

雨旱季采样期间,流域内种植作物主要有蓝莓、烤烟蚕豆轮作、小麦、蔬菜等.根据 MixSIAR 模型计算结果显示(图 11),旱季抚澄河 NO_3^-来源为蔬菜

(24%)及烤烟(18%)种植地块土壤流出氮,占总量的42%;龙溪沟 NO_3^-来源为烤烟种植地块土壤流出氮(32%)与生活污水(25%),窑泥沟硝酸盐来源为生活污水(25%)与蔬菜种植地块(19%),雨季抚澄河、窑泥沟烤烟蚕豆轮作、蓝莓土壤氮流出和化肥所贡献的NO_3^-占比有所增加,但仍然小于蔬菜土壤氮流失贡献的 NO_3^-占比.不同作物种类由于施肥等管理措施不同、对土壤中氮素的吸收利用能力不同,导致土壤中硝态氮累积及流失存在差异[44,48],由于蔬菜种植过程中氮肥投入量高于小麦等作物,肥料吸收利用率较低,抚仙湖蔬菜种植地块土壤流失氮占比高于其他作物种植土壤流失氮,且更易随着旱季浇灌等农事行为流失;由于烤烟、蓝莓是合作社集中种植模式,地块排灌系统相对完善,因此雨季降雨冲刷下烤烟、蓝莓地块土壤累积的氮较旱季更容易流失[49],但仍低于蔬菜种植土壤氮流失.总体来看,蔬菜种植土壤 NO_3^-累积氮贡献大于蓝莓、小麦、烤烟种植土壤,休耕轮作调整的大规模种植蓝莓、烟豆轮作等作物,相比仍种植蔬菜的地块,能在一定程度上减少土壤 NO_3^-氮流失.

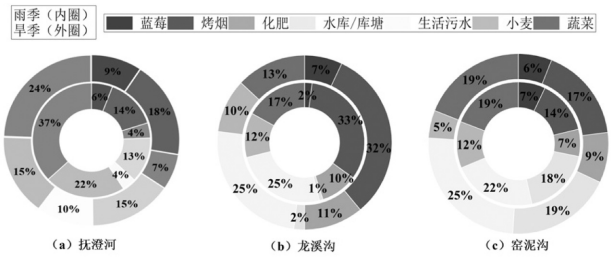


图 11　土壤氮来源划分至不同作物农田土壤计算后抚仙湖硝酸盐污染来源贡献

Fig.11　Contribution of nitrate pollution sources based on cropspecific soil nitrogen partitioning in the Fuxian Lake catchment

综上,将土壤氮来源进一步细化划分至作物农田土壤来源的同位素测试与 MixSIAR 计算探索,研究结果与实际情况及相关研究结论基本一致,但当前尚未深入研究不同种植作物及种植模式氮氧同位素特征及其定量,且目前已有研究表明地表水NO_3^-污染定量识别过程中仍然伴随不确定性[40],尤其是在农作物施肥和轮作模式影响下,集水区氮素输出的时空变异无法避免,导致土壤氮贡献率的不确定性增大.本研究提供了一种不同作物农田土壤来源同位素测试和贡献占比计算的可能性,为进一步增加氮氧同位素污染来源定量识别的结果可靠性,后续研究过程中,需通过建立径流小区等方式,进一步通过建立深入开展不同种植作物、不同施肥、浇灌种植模式、不同降雨条件下土壤氮氧同位素变化与流失强度的研究,可为有氮素削减需求区域提供种植作物及模式选择的科学支撑,精准削减氮污染.

4　结论

4.1　抚仙湖北岸主要入湖河流氮素污染突出,尤其是雨季 TN 及 NO_3^--N 浓度均值相较于旱季增长近2~3 倍.NO_3^--N 是抚仙湖北岸入湖河流的主要氮素赋存形态,平均浓度为(2.36±2.50)mg/L,占 TN 含量的 60%以上,且雨季 NO_3^-离子更易流失,表明控制流域硝态氮污染是进一步改善抚仙湖入湖河流氮污染的关键.

4.2　土壤流失及污水粪肥是北岸入湖河流 NO_3^-主要来源,土壤氮、生活污水或粪肥、化肥、大气沉降对 NO_3^-贡献率变化区间分别为 31.1%~56.1%、15.6%~ 38.9%、10.2%~45%、3.3%~16.7%,雨季抚澄河、窑泥沟生活污水或粪肥来源贡献占比较旱季上升.硝酸盐来源受人为活动与土地利用的影响较大.抚仙湖蔬菜种植地土壤氮流失对 NO_3^-来源贡献占比高于蓝莓、小麦、烤烟种植土壤,且更易随着旱季浇灌等农事行为流失.

参考文献：

[1] Bijay‑Singh, Craswell E.Fertilizers and nitrate pollution of surface and ground water: an increasingly pervasive global problem [J]. SN Applied Sciences, 2021,3(4),DOI:10.1007/s42452021045218.

[2] Mclsaac G F, David M B, Gertner G Z, et al. Nitrate flux in the Mississippi River [J]. Nature.2001,414(6860):166‑167.

[3] Ji X L, Shu L L, Chen W L, et al. Nitrate pollution source apportionment, uncertainty and sensitivity analysis across a ruralurban river network based on $\delta^{15}N/\delta^{18}O\text{-}NO_3^-$ isotopes and SIAR modeling [J]. Journal of Hazardous Materials, 2022,438:129,480.

[4] Cui R Y, Zhang D, Hu W L,et al. Nitrogen in soil, manure and sewage has become a major challenge in controlling nitrate pollution in groundwater around plateau lakes, Southwest China [J]. Journal of Hydrology, 2023,620:129,541.

[5] Archana A, Thibodeau B, Geeraert N, et al. Nitrogen sources and cycling revealed by dual isotopes of nitrate in a complex urbanized environment [J]. Water Research, 2018,142:459‑470.

[6] Zhang Y, Li F, Zhang Q, et al. Tracing nitrate pollution sources and

transformation in surface and groundwaters using environmental isotopes [J]. Science of the Total Environment, 2014,490:213−222.

[7] Ren X W, Yue F J, Tang J H, et al. Nitrate transformation and source tracking of rivers draining into the Bohai Sea using a multitracer approach combined with an optimized Bayesian stable isotope mixing model [J]. Journal of Hazardous Materials, 2024,463:132,901.

[8] 徐志伟,张心昱,于贵瑞,等.中国水体硝酸盐氮氧双稳定同位素溯源研究进展 [J]. 环境科学, 2014,35(8):3230−3238.
Xu Z W, Zhang X Y, Yu G R, et al. Review of dual stable isotope technique for nitrate source identification in surface and groundwater in China [J]. Environmental Science, 2014,35(8):3230− 3238.

[9] 任奕蒙,岳甫均,徐 森,等.利用氮氧同位素解析赤水河流域水体硝酸盐来源及其时空变化特征 [J]. 地球与环境, 2019,47(6):820−828.
Ren Y M, Yue F J, Xu Sen, et al. Temporal and spatial variation of nitrate sources in the Chishui River Watershed based on isotope approach [J]. Earth and Environment, 2019,47(6):820−828.

[10] 韦英怀,胡敏鹏,陈丁江.我国主要河流水系硝态氮污染特征及定量源解析 [J]. 环境科学, 2024,45(2):755−767.
Wei Y H, Hu M P, Chen D J. Nitrate pollution characteristics and its quantitative source identification of major river systems in Chinae [J]. Environmental Science, 2024,45(2):755−767.

[11] 陈清飞,陈安强,崔荣阳,等.滇池周边浅层地下水硝酸盐来源及转化过程识别 [J]. 环境科学, 2023,44(11):6062−6070.
Chen Q F, Chen A Q, Cui R Y, et al. Identification of nitrate source and transformation process in shallow groundwater around Dianchi Lake [J]. Environmental Science, 2023,44(11):6062−6070.

[12] 陈自祥.利用水体中溶解性硝酸根离子中的氮氧同位素组成来识别中国太湖和巢湖水体中氮污染源的研究 [D]. 北京:中国科学技术大学, 2012.
Chen Z X.Using Nitrogen and Oxygen isotopic compositions in dissolvednitrate to identify nitrate sources in Taihu Lake and ChaohuLake, China [D]. Beijing: University of Science & Technology of China, 2012.

[13] 王 鹏,齐述华,陈 波.土地利用方式影响下的赣江硝态氮浓度和氮稳定同位素分布特征 [J]. 湖泊科学, 2015,27(6):1011−1019.
Wang P, Qi S H, Chen B. Characteristics of nitrate and nitrogen stable isotope in Ganjiang River under the influence of land use [J]. Journal of Lake Sciences, 2015,27(6):1011−1019.

[14] Jin Z F, Zheng Q, Zhu C Y, et al. Contribution of nitrate sources in surface water in multiple land use areas by combining isotopes and a Bayesian isotope mixing model [J]. Applied Geochemistry, 2018,93: 1019.

[15] Liu C, Li S, Lang Y, et al. Using $\delta^{15}N\text{-}NO_3^-$ and $\delta^{18}O\text{-}NO_3^-$ values to identify nitrate sources in karst ground water, Guiyang, Southwest China [J]. Environmental Science & Technology, 2006,40(22):6928−6933.

[16] Li C, Li S, Yue F, et al. Identification of sources and transformations of nitrate in the Xijiang River using nitrate isotopes and Bayesian model [J]. Science of The Total Environment, 2019,646:801−810.

[17] Yi Q T, Chen Q W, Hu L M, et al. Tracking nitrogen sources, transformation, and transport at a basin scale with complex plain river networks [J]. Environmental Science & Technology, 2017,51(10): 5396−5403.

[18] 王开然,郭 芳,姜光辉,等.^{15}N 和 ^{18}O 在桂林岩溶水氮污染源示踪中的应用 [J]. 中国环境科学, 2014,34(9):2223−2230.
Wang K R, Guo F, Jiang G H, et al. Application of ^{15}N and ^{18}O to nitrogen pollution source in karst water in Eastern Guilin [J]. China Environmental Science, 2014,34(9):2223−2230.

[19] Xia Y, Li Y, Zhang X, et al. Nitrate source apportionment using a combined dual isotope, chemical and bacterial property, and Bayesian model approach in river systems [J]. Journal of Geophysical ResearchBiogeosciences, 2017,122:214.

[20] Ide J, Somura H, Nakamura T, et al. Hydrological effects on relationships between $\delta^{15}N$ of river nitrate and land use in arural river basin, western Japan [J]. River Research and Applications, 2014.DOI: 10.1002/rra.2756.

[21] 杨晓宇,孙 晖,王 岩,等.典型引调水受水流域氮时空分布特征及硝酸盐来源解析以汾河水库上游流域为例 [J]. 中国环境科学, 2024,44(7):3823−3831.
Yang X Y, Sun H, Wang Y, et al. Characterization of spatial and temporal distribution of nitrogen and source analysis of nitrate in a typical water diversion receiving basin: A case study on upper reaches of Fenhe Reservoir [J]. China Environmental Science, 2024,44(7): 3823−3831.

[22] 许晓媛,李彤阳,尹高飞,等.降雨、施肥对补水河流周边土壤硝态氮迁移分布的影响 [J]. 中国生态农业学报(中英文), 2024,32(7): 1206−1217.
Xu X Y, Li T Y, Yin G F,et al. Effects of rainfall and fertilization on soil nitrate nitrogen migrationdistribution around water replenishing rivers [J]. Chinese Journal of EcoAgriculture, 2024,32(7):1206−1217.

[23] 王延杰,梁启斌,王艳霞,等.抚仙湖子流域尺度氮排放清单构建及关键源解析 [J]. 环境科学, 2024,45(4):2150−2159.
Wang Y J, Liang Q B, Wang Y X, et al. Construction of nitrogen emission inventory at subbasin scale and analysis of key sources in Fuxian Lake Watershed [J]. Environmental Science, 2024,45(4):2150−2159.

[24] 杨春艳,李天翠,施艳峰,等.抚仙湖近十年水质变化特征及保护措施初探 [J]. 人民长江, 2021,52(11):47−55.
Yang C Y, Li T C, Shi Y F, et al. Study on variation characteristics of water quality and protection measuresfor Fuxian Lake in past decader [J]. Yangtze Rive, 2021,52(11):47−55.

[25] 张洪森,角媛梅,陈 凡,等.云南九大高原湖泊流域人类活动强度对水质的多尺度影响 [J]. 湖泊科学, 2024,36(2):430−442.
Zhang H S, Jiao Y M, Chen F, et al. Multiscale impacts of human activity intensity on water quality in nine plateau lake basins in Yunnan Province [J]. Journal of Lake Sciences, 2024,36(2):430−442.

[26] 倪兆奎,王圣瑞,金相灿,等.云贵高原典型湖泊富营养化演变过程及特征研究 [J]. 环境科学学报, 2011,31(12):2681−2689.
Ni Z K, Wang S R, Jin X C, et al. Study on the evolution and characteristics of eutrophication in the typical lakes on Yunnan Guizhou Plateau [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2011,31(12): 2681−2689.

[27] 高 伟,陈 岩,徐 敏,等.抚仙湖水质变化(1980−2011 年)趋势与驱动力分析 [J]. 湖泊科学, 2013,25(5):635−642.
Gao W, Chen Y, Xu M, et al. Trend and driving factors of water quality change in Lake Fuxian(1980~2011) [J]. Journal of Lake Sciences,

2013,25(5):635−642.

[28] 张晓旭,孔　燕,冯海涛.抚仙湖水生态环境保护治理回顾及中长期治理策略研究 [M]. 云南:云南科技出版社, 2023:82−100.
Zhang X X, Kong Y, Feng H T. Review of water ecological environment protection and management of Fuxian Lake and research on mediumand longterm management strategies [M]. Yunnan: Yunnan Science and Technology Press, 2023:82100.

[29] 官朝弼.玉溪年鉴(2019) [M]. 玉溪:中共玉溪市委党史研究室, 2019:233.
Guan C B. Yuxi Yearbook (2019) [M]. Yuxi: CPC Yuxi Municipal Party History Research Office, 2019:233.

[30] 邹　锐,张月霞等.抚仙湖流域休耕轮作农业面源污染监测及效果评估项目 2019 年度报告 [R]. 云南省生态环境科学研究院, 2020.
Zou R, Zhang Y X, et al. 2019 annual report on monitoring and effect evaluation of agricultural nonpoint source pollution in fallow and crop rotation agriculture in Fuxian Lake Basin [R]. Yunnan Institute of Environmental Science, 2020.

[31] 吴坤娱.澄江做好抚仙湖保护治理大排查大整改大提升 [N]. 玉溪日报, 2022,1020(003).
Wu K Y. Chengjiang does a good job in the investigation, rectification and improvement of Fuxian Lake protection and management [N]. Yuxi Daily, 2022,1020(003).

[32] HJ4952009　水质采样方案设计技术规定 [S].
HJ4952009　Water quality—Technical regulation on the design of sampling programmes [S].

[33] HJ/T521999　水质河流采样技术指导 [S].
HJ/T521999　Water qualityGuidance on sampling techniques of rivers [S].

[34] Xu C Y, Li Y Z, Li Q Z, et al. Measurement of ^{15}N and ^{18}O isotope abundance of nitrate using denitrifier method on TracegasIsotope Ratio Mass Spectrometry [J]. Advanced Materials Research,2013, 726731:13461349.DOI:10.4028/www.scientific.net/AMR.726731.1346.

[35] 国家环境保护总局《水和废水监测分析方法》委会.《水和废水监测分析方法(第四版)》 [M]. 北京:中国环境科学出版社, 2022:210−212;244−247;254−267.
Committee on Monitoring and Analysis Methods for Water and Wastewater, State Environmental Protection Administration. Monitoring and analysis methods for water and wastewater Edi. [M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2022:210−212;244−247; 254−267.

[36] GB38382002　地表水环境质量标准 [S].
GB38382002　Environmental quality standards for surface water [S].

[37] He S, Li P, Su F, et al. Identification and apportionment of shallow groundwater nitrate pollution in Weining Plain, northwest China, using hydrochemical indices, nitrate stable isotopes, and the new Bayesian stable isotope mixing model (MixSIAR) [J]. Environmental Pollution, 2022,298:118852.

[38] Zhao Z H, Zhang M L, Chen Y, et al. Traceability of nitrate polluted hotspots in plain river networks of the Yangtze River delta by nitrogen and oxygen isotopes coupling bayesian model [J]. Environmental Pollution, 2022,315:120438.

[39] Heaton T H E. Isotopic studies of nitrogen pollution in the hydrosphere and atmosphere: A review [J]. Chemical Geology: Isotope Geoscience Section, 1986,59(1):87−102.

[40] Xue D, Botte J, De Baets B, et al. Present limitations and future prospects of stable isotope methods for nitrate source identification in surface and groundwater [J]. Water Research, 2009,43(5):1159−1170.

[41] Xing G, Cao Y, Shi S, et al. N pollution sources and denitrification in waterbodies in Taihu Lake region [J]. Science Chinachemistry, 2001, 44(3):304−314.

[42] Jin Z, Wang J, Chen J, et al. Identifying the sources of nitrate in a small watershed using $\delta^{15}N$ $\delta^{18}O$ isotopes of nitrate in the Kelan Reservoir, Guangxi, China [J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2020,297:106936.

[43] 纪晓亮,舒烈琳,陈　铮,等.楠溪江硝态氮来源定量识别及其不确定性分析 [J]. 中国环境科学, 2021,41(8):3784−3791.
Ji X L, Shu L L, Chen Z, et al. Quantitative identification of riverine nitrate sources and uncertainty analysis in the Nanxi River [J]. China Environmental Science, 2021,41(8):3784−3791.

[44] 杜彩艳,吴　迪,李家逵,等.施氮量对抚仙湖流域烟田氮磷流失及氮素利用的影响 [J]. 中国农学通报, 2023,39(3):80−87.
Du C Y, Wu D, Li J K, et al. Nitrogen application rate affects soil nitrogen and phosphorus loss and tobacco nitrogen utilization in the Fuxian Lake Basin [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2023, 39(3):80−87.

[45] 叶远行,陈安强,李　林,等.休耕对抚仙湖周边农田土壤剖面和浅层地下水中氮累积的影响 [J]. 环境科学, 2024,45(6):3225−3233.
Ye Y H, Chen A Q, Li L, et al. Effect of fallow on nitrogen accumulation in soil profile and shallow groundwater in cropland around Fuxian Lake [J]. Environmental Science, 2024,45(6):3225−3233.

[46] Johannsen A, Dahnke K, Emeis K. Isotopic composition of nitrate in five German rivers discharging into the North Sea [J]. Organic Geochemistry, 2008,39(12):1678−1689.

[47] 孙然好,陈利顶,王　伟,等.基于“源”“汇”景观格局指数的海河流域总氮流失评价 [J]. 环境科学, 2012,33(6):1784−1788.
Sun R H, Chen L D, Wang W, et al. Correlating landscape pattern with total nitrogen concentration using a locationweighted sinksource landscape index in the Haihe River Basin, China [J]. Environmental Science, 2012,33(6):1784−1788.

[48] 李正兆,高海鹰,张　奇,等.抚仙湖流域典型农田区地下水硝态氮污染及其影响因素 [J]. 农业环境科学学报, 2008,(1):286−290.
Li Z Z, Gao H Y, Zhang Q, et al. Nitrate pollution of groundwater and the affecting factors in typical farmlands of Fuxianhu Lake catchment [J]. Journal of AgroEnvironment Science, 2008,(1):286−290.

[49] 蒋鸿昆,高海鹰,张　奇,等.抚仙湖梁王河流域农业耕作与流域水质响应关系研究 [J]. 环境科学, 2007,(10):2294−2300.
Jiang H K, Gao H Y, Zhang Q, et al. Response of water quality to agricultural cultivation in Liangwanghe River catchment of Fuxianhu Lake Region [J]. Environmental Science, 2007,(10):2294−2300.

作者简介：孔　燕(1987),女,云南通海人,高级工程师,硕士,主要从事河湖污染控制研究.发表论文 10 余篇.15478600@qq.com.