

滇池宝象河径流氮赋存形态变化特征^{*}

卢 官, 苏 斌^{**}

(云南师范大学 地理学部 云南省高原地理过程与环境变化重点实验室, 云南 昆明 650500)

【摘 要】作为滇池第二大入湖河流, 宝象河水质状况与滇池富营养化水平关系密切. 以滇池宝象河为例, 对流域径流总氮 (TN)、氨氮 ($\text{NH}_4^+ - \text{N}$)、硝酸盐氮 ($\text{NO}_3^- - \text{N}$) 和亚硝酸盐氮 ($\text{NO}_2^- - \text{N}$) 进行了系统监测与分析, 揭示了不同赋存形态氮素的时空变化特征和影响因素, 探究了宝象河径流氮素赋存形态的变化规律. 结果表明: 宝象河 TN 含量从上游至下游呈现增长趋势, 雨季 (5—10 月) 偏低, 旱季 (11 月—次年 4 月) 偏高; 在三氮浓度的空间变化方面, 宝象河 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 的空间变化特征与 TN 一致, 上游至下游呈现上升趋势, 与流域内用地类型的变化特征相对应; 在时间变化方面, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 雨季高于旱季, $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 则呈现雨季低于旱季的相反趋势, $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 含量总体偏低, 变化幅度不明显; 总溶解固体 (TDS)、氧化还原电位 (Eh) 和溶解氧 (DO) 等水环境因子是氮素赋存形态变化的主要影响因素; 宝象河水体氮素赋存形态在雨季主要受面源污染汇入影响, 以氨氮为主, 旱季主要受硝化作用影响, 以硝酸盐氮为主. 研究结果可为滇池流域水体污染治理和水环境修复提供依据.

【关键词】氮赋存形态; 面源污染; 富营养化; 城市化

【中图分类号】 X52 **【文献标志码】** A **【文章编号】** 1674-5639 (2025) 03-0116-10

DOI: 10.14091/j.cnki.kmxyxb.2025.03.017

滇池作为云南省最大的淡水湖泊, 有高原明珠之称, 在城市经济发展和生态文明建设方面发挥着重要作用^[1]. 尽管滇池被列入“三河三湖”项目, 系统实施了水污染防治五年规划等一系列治理工作^[2], 然而滇池入湖河流多, 出湖河流少, 水体更新周期长等地质地貌和水环境特征^[3,4], 在一定程度上增加了滇池水环境治理难度. 滇池沿岸城市化进程的加快也在进一步加剧着滇池水环境恢复的压力^[5]. 来自入湖河流的氮元素是滇池水体富营养化的重要制导因子, 不同赋存形态的氮在水环境中的作用和影响也不同. 氨氮是水体中的营养盐, 也是水体中的耗氧物质, 过量的氨氮会导致水体富营养化, 引发藻类过度生长现象, 形成赤潮和水华, 破坏水体的自净能力和生态平衡^[6]. 硝酸盐氮是含氮有机物无机化最终阶段的产物, 同时也是最稳定的含氮化合物^[7], 过量的硝酸盐氮进入水体中, 会促进藻类和水生植物的生长, 导致水体富营养化, 进而引发藻华和水质富氧等问题^[8]. 此外, 硝酸盐氮还通过渗透到地下水中, 对地下水造成污染, 超标的硝酸盐氮会对人体健康造成危害^[9]. 亚硝酸盐氮是水体氮循环的中间产物, 其性质不稳定, 既可以氧化为硝酸盐氮也可以还原为氨氮, 因此含量较少, 但因其毒性而受到广泛关注^[10,11]. 目前, 关于滇池入湖河流氮赋存形态的研究主要集中在氮素含量变化、面源识别、氮素输移通量等方面^[12-17]. 径流水体不同赋存形态氮素特征及其水环境过程尚未有系统研究.

有鉴于此, 本研究以滇池宝象河径流水体氮素赋存形态作为研究对象, 分析宝象河水体氮素赋存形态变化特征和机制, 探究氮污染形成的过程和环境效应, 以期对滇池流域水体富营养化的形成机理和水环境修复与改善工作提供参考.

^{*} **【收稿日期】** 2024-07-24

【作者简介】 卢官, 男, 云南临沧人, 云南师范大学在读硕士研究生, 研究方向为城市化与城市水资源、水体富营养化.

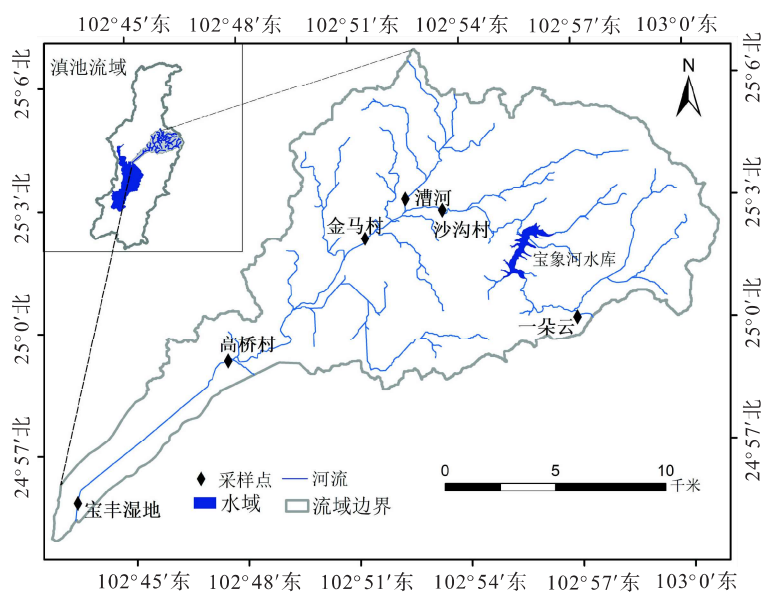
^{**} **【通信作者】** 苏斌, 男, 云南昆明人, 云南师范大学讲师, 博士, 研究方向为营养盐迁移过程及环境效应、城市水安全, E-mail: suynnu@163.com.

【基金项目】 云南师范大学博士科研启动项目 (01300205020503197); 云南省环境科学研究院项目 (01300206040219039).

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

宝象河流域面积约为 302 km² (图 1), 约占整个滇池流域的 10%, 流域所属的官渡区内人口超过 100 万^[18]. 宝象河发源于老爷山, 自东北向西南依次流经大板桥镇、白土镇、小板桥镇、宝丰镇, 最终注入滇池^[19], 干流全长 36.2 km, 落差 105 m, 流域年均降雨量为 953 mm, 主要集中在 5—10 月, 汛期主要集中在 7—8 月^[20]. 汛期降雨量占多年平均值的 80% 以上, 年平均气温为 14.7 °C^[19]. 宝象河上游地区受人类活动的干扰比较小, 多为林地, 而中下游地区多为农业用地和城市建设用地. 自 2012 年长水机场通航以来, 流域内空港新区的建设活动频繁, 流域下垫面类型正在发生显著的改变, 不透水面呈现增长趋势.



注: 该图基于自然资源部标准地图服务网站审图号为云 S (2020) 102 的标准地图制作, 底图未做修改, 下同。

图 1 研究区和样点位置示意

1.2 样品采集与处理

在宝象河干流关键断面设置了 6 个采样点开展采样和现场监测分析, 采样点从上游至下游依次为一朵云、沙沟村、漕河、金马村、高桥村和宝丰湿地 (图 1). 在 6 个采样点中, 一朵云采样点位于水源地保护区, 为天然林地, 受人类活动干扰小, 在一定程度上能够反映流域相关水质指标的本底情况; 沙沟村、漕河采样点主要以农村和农业用地为主, 该区域的测试反映农业、农村地区的水质指标特征; 金马村和高桥村采样点位于城乡交界处, 该区域的监测反映了城乡交界处的水质指标特征; 宝丰湿地则以城市不透水面为主, 对该样点的监测则可以反映城市河道的水质指标特征. 采样时间为 2016 年 5 月—2017 年 4 月, 采样周期为每月一次. 水环境指标 pH、水温、Eh (Oxidation-reduction Potential)、NTU (Turbidity)、DO (Dissolved Oxygen)、TDS (Total Dissolved Solids) 等用 HORIBO (U-50) 水质监测仪现场测定, 每个水样检测 3 次, 取平均值作为最终输出值. 水样的采集和运输方法按照《水质 采样方案设计技术规范 (HJ 495—2009)》《水质 河流采样技术指导 (HJ/T 52—1999)》《水质 采样技术指导 (HJ 494—2009)》和《水质 样品的保存和管理技术规范 (HJ 493—2009)》等相关规范进行. 每次采集的样品量为 2 L, 用洗净的聚乙烯瓶存放和运输, 在 24 h 内运至云南师范大学云南省高原地理过程与环境变化研究重点实验室完成检测.

研究对样品中的 TN、NH₄⁺-N、NO₃⁻-N、NO₂⁻-N 进行了测试, 测试方法如表 1 所示, 水质分析实验严格按照平行对照实验要求开展, 实验误差控制在 5% 以内.

表 1 不同赋存形态氮的测试方法

项目	赋存形态氮			
	总氮(TN)	氨氮(NH ₄ ⁺ -N)	硝酸氮(NO ₃ ⁻ -N)	亚硝酸氮(NO ₂ ⁻ -N)
测试方法	碱性过硫酸钾消解 紫外分光光度法	纳氏试剂分光光度法	酚二磺酸光度法	分光光度法

2 结果与分析

2.1 宝象河 TN 的时空变化特征

宝象河水体 TN 含量变化范围在 0.05 ~ 19.00 mg/L 之间 (表 2), TN 空间变化特征如图 2 所示. 从空间变化看, 宝象河 TN 含量从上游至下游呈现出增长趋势. 上游一朵云至下游入湖口宝丰湿地 6 个采样点 TN 年平均值变化范围是 0.27 ~ 9.63 mg/L. 据表 2 可知, 宝象河 TN 含量值的最低值出现在一朵云采样点, 最高值位于河流入湖口处的宝丰湿地采样点, 其中漕河、金马村、高桥村和宝丰湿地 TN 年平均值高于《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002) V 类水限值 (TN≤2 mg/L)^[21]. 经查阅相关资料, 滇池水质在 2016 年首次由劣 V 类水转为 V 类水^[22], 当时正处于水质过渡期, 入湖河道水质较差^[23]. 一朵云采样点位于上游林区, 受人类活动影响小, 其 TN 含量若视为背景值, 则至下游入湖口宝丰湿地采样点处 TN 含量增长了 35 倍左右. TN 测试结果一定程度上反映了宝象河从上游至下游不同用地类型 TN 含量变化特征, 上游地区多为林地, 受人类活动干扰较少, 下游地区以城市建设用地为主, 人类活动密集, 各类污染源较多. 从不同季节看, 宝象河 TN 含量值雨季、旱季和年均值空间变化趋势一致, 均为从上游至下游逐渐升高. 不同的是 TN 含量平均值旱季大于雨季, 入湖口处宝丰湿地样点旱季为 10.42 mg/L 雨季为 8.84 mg/L. 这是因为雨季降雨过程中, 径流将面源污染物带入河流中, 但是河流水量较大, 稀释作用比较强, 河流总氮含量偏低. 除此之外, 旱季 TN 含量变化幅度大于雨季, 其最高值与最低值之间的差值, 在旱季为 10.29 mg/L, 而在雨季为 8.44 mg/L. 另外, 研究团队还对宝象河流域 TDN (总溶解态氮) 变化趋势以及其和环境因子的响应关系进行了调查, 结果发现宝象河 TDN 季节变化趋势和 TN 的变化趋势相同, 均为冬春季节 (旱季) 较高, 而夏秋季节 (雨季) 较低, 详细过程在团队另一篇文章^[24]中呈现.

2008 年, 普惠娟等^[25]对宝象河流域氮素特征进行了研究, TN 含量由上游至下游地区递增, 全流域 TN 均值变化范围为 3.86 ~ 22.86 mg/L, 与本研究总氮均值变化范围 0.27 ~ 9.63 mg/L 相比, 宝象河流域在 2008—2017 年 10 年间下降趋势明显. 根据《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)^[21]中的 TN 限值, 本研究中 2016—2017 年 TN 均值显示宝象河 6 个样点中有 4 个是劣 V 类水质. 自 2018 开始, 滇池流域总体水质已经改善为Ⅳ类水^[26], 2022 年宝象河成功申报为昆明市级美丽河道^[27]. 这是自 1996 年滇池被列入“三河三湖”重点治理项目以来, 各类积极治滇政策和措施的必然结果.

表 2 宝象河各采样点不同时间的 TN 含量 mg/L

时间	采样点 TN 含量					
	一朵云	沙沟村	漕河	金马村	高桥村	宝丰湿地
2016-05	0.05	1.03	4.05	7.53	5.65	13.05
2016-06	0.39	0.78	4.71	7.29	5.92	8.16
2016-07	1.09	1.06	4.74	4.77	4.78	9.58
2016-08	0.35	0.88	3.94	4.72	4.62	5.76
2016-09	0.30	1.05	4.40	5.69	4.64	6.89
2016-10	0.24	1.54	4.53	6.17	6.26	9.62
雨季 ^①	0.4±0.36	1.06±0.26	4.39±0.34	6.03±1.21	5.31±0.72	8.84±2.55
2016-11	0.17	2.03	4.25	4.65	7.88	7.24
2016-12	0.27	0.61	4.26	4.89	5.35	8.78
2017-01	0.12	0.96	4.16	5.45	5.61	7.38
2017-02	0.17	0.72	5.46	6.18	12.02	19.00
2017-03	0.12	1.83	5.65	6.64	7.88	9.81

续表 2

时间	采样点 TN 含量					
	一朵云	沙沟村	漕河	金马村	高桥村	宝丰湿地
2017-04	0.09	0.20	4.04	4.80	4.61	10.31
旱季 ^②	0.13 ± 0.06	1.06 ± 0.72	4.64 ± 0.72	5.44 ± 0.82	7.22 ± 2.71	10.42 ± 4.38
年均 ^③	0.27 ± 0.28	1.06 ± 0.52	4.52 ± 0.55	5.73 ± 1.03	6.27 ± 2.14	9.63 ± 3.52

注: ①“雨季”值为2016年5—10月采样平均值; ②“旱季”值为2016年11月—2017年4月采样平均值; ③“年均”值为所有采样月平均值。

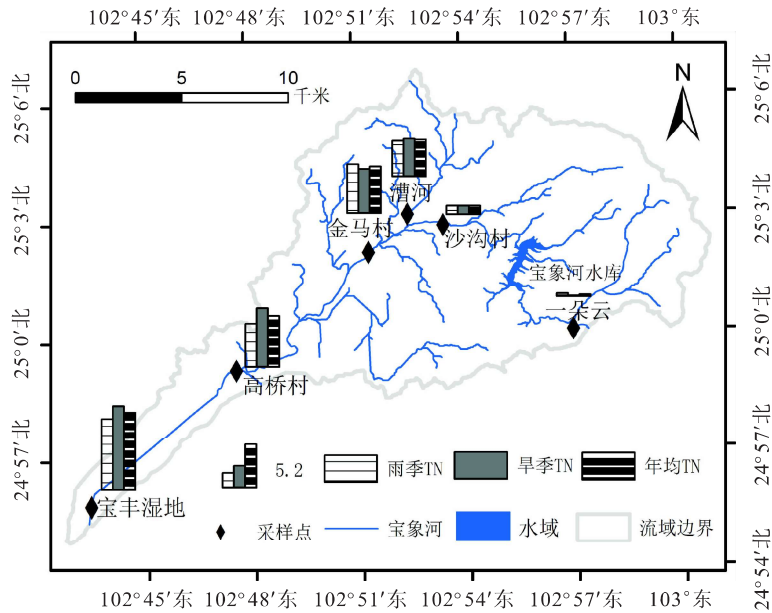


图2 宝象河年均总氮 (TN)、雨季和旱季总氮含量空间分布特征

2.2 不同赋存形态氮素的时空变化特征

2.2.1 不同赋存形态氮素的空间变化特征

宝象河各样点三氮年均值的空间变化特征见表3、图3, 各月份三氮的空间变化特征如图4。由表图可见, 宝象河 NH_4^+-N 、 NO_3^--N 、 NO_2^--N 含量的年均值差异较大。 NH_4^+-N 年均值的变化范围为 0.08 ~ 2.86 mg/L, 最低值出现在一朵云采样点, 最高值出现在宝丰湿地采样点。 氨态氮从上游至下游总体呈现出上升趋势。 NO_3^--N 年均值的变化范围为 0.48 ~ 3.75 mg/L, 最低值出现在一朵云采样点, 最高值出现在宝丰湿地采样点。 NO_3^--N 与 NH_4^+-N 的空间变化特征类似, 从河流上游至下游总体呈现出逐渐增长的趋势。 NO_2^--N 含量较少, 其含量的年均值变化范围为 0 ~ 0.57 mg/L, 最低值在一朵云采样点, 最高值在金马村采样点, 总体上也呈现出从上游到下游上升的趋势。 综上, 宝象河 NH_4^+-N 、 NO_3^--N 、 NO_2^--N 与 TN 的空间变化特征一致, 由河流上游至下游呈现出升高趋势。 其径流氮素赋存形态的空间变化特征和其流域用地类型相互对应, 上游地区为水源保护地, 属天然林地, 生态环境良好, 故一朵云采样点各类赋存形态氮素含量最少; 沙沟村、漕河采样点多为农业和农村用地, 各类氮素在水体中的含量升高; 金马村、高桥村采样点地处城乡交界地区, 人类活动作用的强度增加, 三氮在水中的含量随之升高。 宝丰湿地位于河流入湖口处, 汇集了流域内的污染物质, 各类氮素含量均为全流域最高值。

表3 宝象河各样点不同赋存形态氮含量的年均值

mg/L

赋存形态	年均氮含量						均值变化范围	总体方差
	一朵云	沙沟村	漕河	金马村	高桥村	宝丰湿地		
NH_4^+-N	0.08 ± 0.10	0.27 ± 0.32	1.01 ± 0.82	2.17 ± 1.54	1.99 ± 1.20	2.86 ± 1.69	0.08 ~ 2.86	1.25
NO_3^--N	0.02 ± 0.02	0.45 ± 0.29	2.37 ± 1.23	1.71 ± 1.06	1.79 ± 0.95	3.57 ± 2.73	0.44 ~ 3.57	1.42
NO_2^--N	0	0.02 ± 0.02	0.19 ± 0.21	0.57 ± 0.53	0.47 ± 0.20	0.50 ± 0.18	0 ~ 0.57	0.44

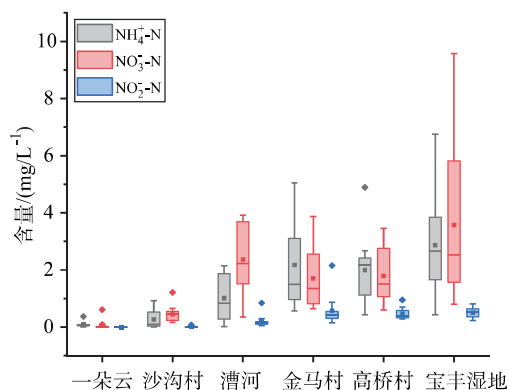


图3 宝象河各样点不同赋存形态氮素的空间特征

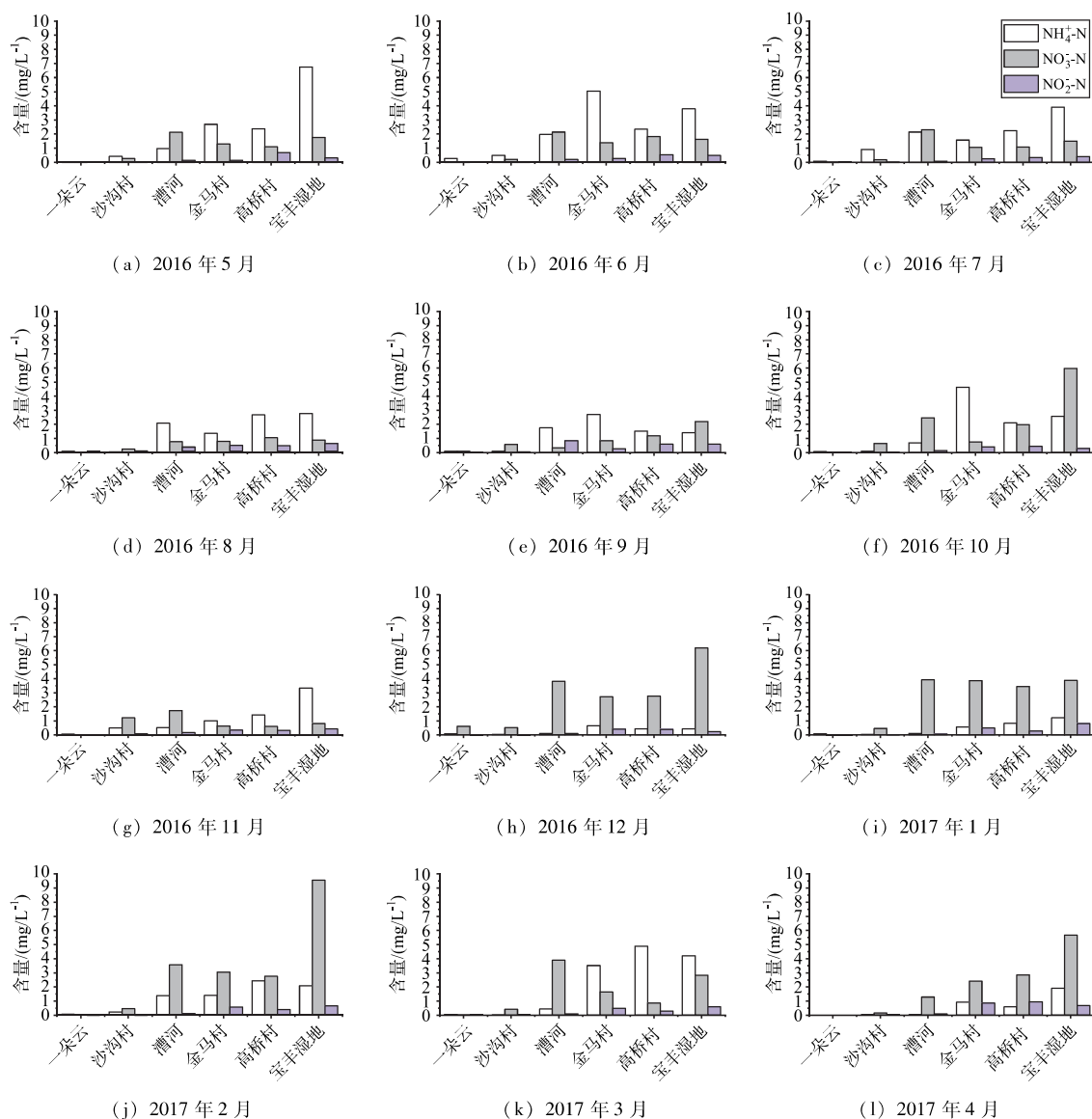


图4 宝象河各月份不同赋存形态氮素的空间变化特征

2.2.2 不同赋存形态氮素的时间变化特征

宝象河各月份三氮的时间变化特征如表4、图5, 各河段三氮时间变化特征如图6所示。据表4、图5可知, 从三氮时间变化特征看, 宝象河 NH_4^+-N 平均含量最高值为 2.32 mg/L , 出现在6月份, 最低值为 0.28 mg/L ,

出现在 12 月份, 变化幅度较大, 呈现出旱季低于雨季的特点。NO₃⁻-N 平均含量最高值为 3.60 mg/L, 出现在 12 月份, 最低值为 0.54 mg/L, 出现在 8 月份, 呈现出旱季高而雨季低的特点。NO₂⁻-N 平均含量值各月份都偏低, 变化幅度较小。根据图 6 可知, 从各个河段氮赋存形态的时间变化特征来看, 以天然林地为主的一朵云采样点 NO₂⁻-N 含量低于检测限, 雨季 NH₄⁺-N 占比高, 旱季以 NO₃⁻-N 占比高。以农田、农村为主的沙沟村和漕河采样点三氮季节变化与一朵云采样点相同, NH₄⁺-N 含量值雨季占比偏高而旱季偏低, NO₃⁻-N 含量变化与之相反, 而 NO₂⁻-N 含量少且无明显变化特征。位于城乡交界处的金马村、高桥村采样点, 以及位于城市不透水面地区和宝丰湿地也呈现出相似特点, 即 NH₄⁺-N 含量值雨季占比偏高而旱季偏低、NO₃⁻-N 含量变化与之相反, 而 NO₂⁻-N 含量值随时间变化相对稳定。宝象河三氮时间变化特征与多位前人的研究结果相似, 例如罗欢等^[28]通过构建的流域-海湾一体化水环境模型发现雨季水体氨氮含量相当于旱季氨氮含量的 5.3 倍。Cao^[29]、Zhao 等^[30]研究发现污水在旱季对河流硝酸盐的贡献率要高于雨季, 因此旱季硝酸盐污染水平较高。

表 4 不同时间宝象河氮赋存形态含量均值

mg/L

项目	氮赋存形态含量均值		
	NH ₄ ⁺ -N	NO ₃ ⁻ -N	NO ₂ ⁻ -N
2016-05	2.20 ± 2.42	1.10 ± 0.82	0.22 ± 0.26
2016-06	2.32 ± 1.82	1.21 ± 0.88	0.25 ± 0.23
2016-07	1.81 ± 1.31	1.03 ± 0.85	0.18 ± 0.18
2016-08	1.29 ± 0.98	0.54 ± 0.41	0.24 ± 0.22
2016-09	1.08 ± 1.02	0.75 ± 0.76	0.34 ± 0.78
2016-10	1.69 ± 1.78	1.97 ± 2.16	0.22 ± 0.19
雨季 ^①	1.73 ± 0.49	1.10 ± 0.49	0.24 ± 0.05
2016-11	1.13 ± 1.18	0.83 ± 0.59	0.22 ± 0.16
2016-12	0.28 ± 0.25	3.60 ± 2.09	0.19 ± 0.18
2017-01	0.47 ± 0.48	2.59 ± 1.85	0.27 ± 0.18
2017-02	1.27 ± 0.96	3.24 ± 3.42	0.29 ± 0.30
2017-03	2.19 ± 2.26	1.61 ± 1.50	0.25 ± 0.26
2017-04	0.58 ± 0.75	2.07 ± 2.11	0.43 ± 0.45
旱季 ^②	0.99 ± 0.70	2.32 ± 1.03	0.28 ± 0.08
年均 ^③	1.36	1.71	0.26
总方差	0.70	1.00	0.07

注: ①“雨季”值为 2016 年 5—10 月采样平均值; ②“旱季”值为 2016 年 11 月—2017 年 4 月采样平均值; ③“年均”值为所有采样月平均值。

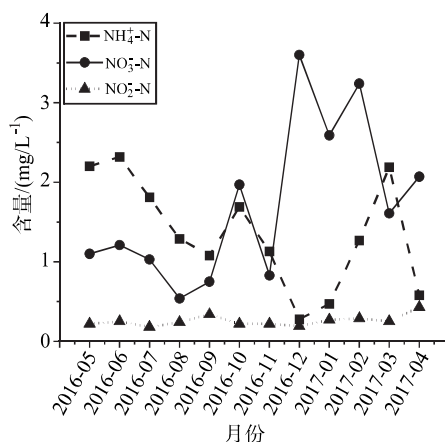
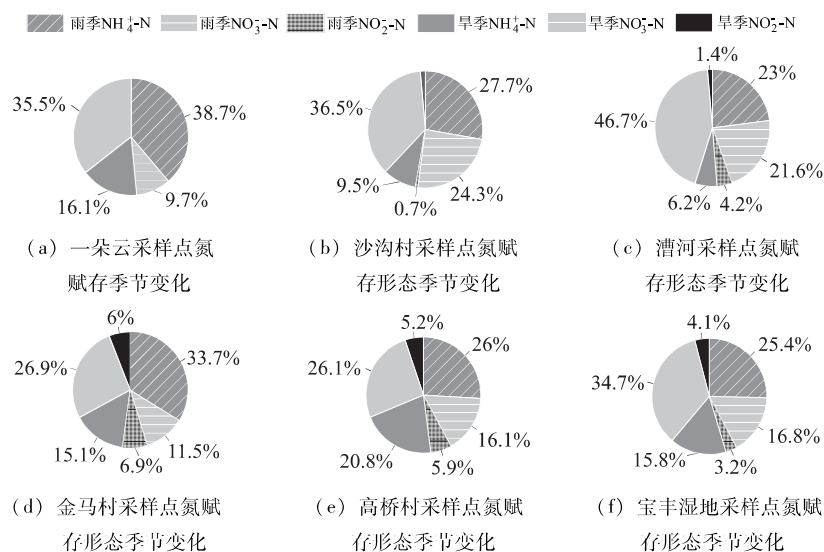


图 5 宝象河各月份氮赋存形态均值



3 讨论

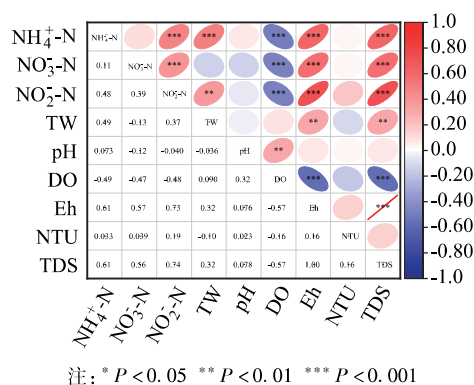
3.1 环境因子对不同赋存形态氮素的影响

为了解宝象河环境因子对氮赋存形态变化的影响,综合宝象河 6 个样点 12 个月份的环境因子均值得到表 5,以宝象河水温、pH、DO、Eh、NTU (浊度)、TDS,6 个环境因子作为解释变量,以 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 含量值作为响应变量,运用相关性分析方法研究其内在联系,结果如图 7 所示。

表5 宝象河环境因子均值

项目	水温/℃	pH	DO/(mg · L ⁻¹)	Eh/mV	NTU/(mg · L ⁻¹)	TDS/(g · L ⁻¹)
2016-05	21.12 ± 1.79	7.14 ± 0.38	10.5 ± 2.81	43.4 ± 23.7	35.28 ± 14.8	0.28 ± 0.15
2016-06	22.29 ± 2.88	7.24 ± 0.37	10.04 ± 3.16	43.08 ± 22.22	38.72 ± 17.5	0.28 ± 0.14
2016-07	20.33 ± 2.33	7.69 ± 0.41	11.2 ± 2.98	44.38 ± 23.74	43.49 ± 9.92	0.28 ± 0.15
2016-08	20.89 ± 1.95	7.07 ± 0.3	10.01 ± 2.76	44.88 ± 22.89	52.01 ± 24.45	0.29 ± 0.15
2016-09	20.57 ± 2.88	7.42 ± 0.4	9.87 ± 2.58	44.67 ± 21.85	76.56 ± 55.34	0.29 ± 0.14
2016-10	19.04 ± 1.91	7.2 ± 0.27	9.28 ± 2.96	46.57 ± 22.98	86.28 ± 49.52	0.3 ± 0.15
2016-11	12.39 ± 1.41	7.49 ± 0.21	8.24 ± 2.74	44.28 ± 16.85	105.58 ± 37.6	0.29 ± 0.11
2016-12	10.44 ± 2.27	7.09 ± 0.33	8.27 ± 2.55	47.63 ± 24.77	55.29 ± 13.11	0.31 ± 0.16
2017-01	13.12 ± 1.72	7.18 ± 0.24	8.31 ± 2.43	46.28 ± 23.75	56.34 ± 18.17	0.3 ± 0.15
2017-02	11.75 ± 1.7	7.67 ± 0.25	8.93 ± 1.66	47.43 ± 25.26	65.11 ± 5.17	0.3 ± 0.16
2017-03	15.98 ± 2.54	6.96 ± 0.34	7.19 ± 2.52	44.09 ± 22.36	80.35 ± 17.89	0.28 ± 0.14
2017-04	19.37 ± 2.77	6.5 ± 0.32	9.87 ± 2.05	47.61 ± 21.31	86.31 ± 31.47	0.31 ± 0.14
均值	17.36	7.25	9.46	44.83	64.51	0.29
总方差	4.60	0.43	2.66	20.96	33.93	0.13

相关性分析结果表明, TDS、Eh 和 DO 对宝象河氮赋存形态变化的影响显著。宝象河 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 含量变化与 TDS 呈现出显著的正相关, P 值均小于 0.001, 相关系数分别为 0.61、0.56 和 0.74。这可能是因为, 宝象河流域中游、下游以农田和城市为主, 所产生的农业和城市面源污染随着地表径流进入河流, 同时氮素随着面源污染中的 TDS 进入河流, 导致河流中两者的含量变化趋势相似。宝象河 Eh 和各类氮赋存形态也呈现出显著的正相关性, 与 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 含量值的相关系数分别为 0.61、0.57、0.73, P 值均小



于 0.001. Eh 对水体中所含物质的宏观氧化还原性具有指示意义, Eh 值越大, 氧化性越强, Eh 值越小, 还原性越强, 较高的氧化还原电位驱动着三氮的溶解作用. 与 Hilmi A^[31] 和 Helard D^[32] 等前人的研究相同的是, 本研究中的 TDS 与 Eh 呈现出显著的正相关性 ($P < 0.001$). 除了 TDS 和 Eh 以外, 宝象河水温变化与 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 存在正相关关系, 水温也是影响氮素赋存形态的重要因子. DO 含量值变化与氮赋存形态的变化呈现出显著的负相关性, DO 与 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 含量值的相关系数分别为 -0.49, -0.47, -0.48. 这可能是因为, 伴随着宝象河流域内频繁的人类活动, 大量含氮污染物通过地表、地下径流进入河流, 造成河流中微生物大量繁殖, 而这些微生物数量的增加又会促进其呼吸作用和硝化反硝化作用, 因此河流中的 DO 消耗量明显增加^[33]. 综上可知, TDS、Eh、DO 和水温是影响宝象河氮素赋存形态变化的关键因子.

3.2 面源污染对氮素赋存形态的影响

宝象河流域雨季为 5—10 月, 旱季为 11 月到第二年 4 月, 雨季是面源污染进入河流的高峰时期. 本次研究发现, 宝象河雨季和旱季氮赋存形态存在差异, 从三类氮素比重上看, 旱季硝酸占比高, 雨季则氨氮占比较高 (图 8). 整合雨季 6 个月不同用地类型下各采样点三类氮素含量得到表 6, 可知氨氮是雨季各个用地类型下氮素的主要赋存形态, 伴随降雨对地表冲刷而进入的面源污染可能是导致雨季氨氮含量较高的原因^[34]. 前人的研究也印证了此观点, 鲍思敏等^[35] 研究发现, 河流旱季和雨季的氨氮含量存在显著差异, 雨季雨水冲刷河岸, 加强了营养物质的输入, 导致雨季氨氮含量明显高于旱季. 郑昊等^[36] 探讨了东江湖流域未来土地利用变化对面源污染负荷的影响评估, 结果表明流域面源污染受降水、径流等自然过程影响, 氨氮输出负荷集中在雨季, 氨氮负荷随河流径流量增加而增加. 此外, 硝化与反硝化作用是影响氮素转化循环的主要机制, 硝化作用是微生物把氨氮氧化为硝酸盐的过程, 反硝化是在厌氧环境下细菌把硝酸盐还原为氮气的过程^[37]. 旱季来自面源的氮素减少, 硝化作用的发生使水体氨态氮转化为硝态氮是宝象河旱季 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 含量占比较高的主要原因. Xuan 等^[38] 研究了珠江流域典型城市化河流中硝酸盐来源和积累机制, 结果发现在旱季河流中硝化作用占据主导作用, 与本研究所显示的结果一致.

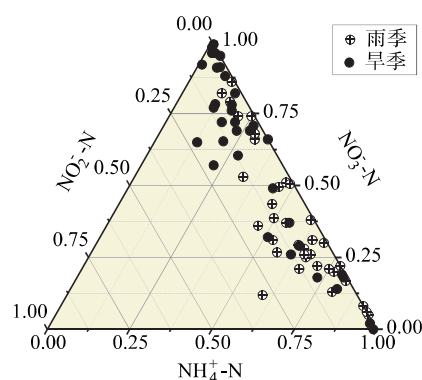


图 8 宝象河氮赋存形态季节变化

表 6 宝象河流域雨季不同用地类型下氮赋存形态含量均值

mg/L

用地类型	氮赋存形态含量		
	$\text{NH}_4^+ - \text{N}$	$\text{NO}_3^- - \text{N}$	$\text{NO}_2^- - \text{N}$
农村农业用地	0.41 ± 0.79	0.36 ± 0.93	0.01 ± 0.24
城乡交界区	2.39 ± 1.44	1.11 ± 0.83	0.56 ± 0.52
城市建设用地	3.53 ± 1.82	2.33 ± 1.84	0.44 ± 0.14

4 结 论

4.1 宝象河氮赋存形态变化特征和影响因素

1) 宝象河径流 TN 含量变化范围在 0.05 ~ 19 mg/L 之间, 呈现从上游到下游逐渐增长的趋势, 在入湖口处达到最大值. 总氮含量总体呈现雨季低于旱季的特征. $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 含量的空间变化特征和 TN 含量的空间变化特征一致, 从上游至下游逐渐增长. $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 含量旱季低于雨季, $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 含量则呈现旱季高于雨季的特点.

2) TDS、Eh、DO 和水温是影响氮素赋存形态的关键因子, 其中 TDS、Eh 与 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 呈现出显著正相关关系, DO 与 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 则呈现出显著负相关关系. 水温和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 呈现出显著正相关关系. 宝象河水体氮素赋存形态在雨季主要受面源污染汇入影响和主导, 以氨氮为主; 旱季主要受水体硝化作用影响和主导, 以硝酸盐氮为主.

4.2 研究不足与展望

本研究的时间为 2016—2017 年,数据较老,存在一定缺陷和不足.一方面,从研究结果上看,不同氮赋存形态的时空变化规律、其与环境因子之间的相互关系以及面源污染对氮素输入的影响等方面的结论与其他研究相互印证,对宝象河流域氮污染治理和滇池氮素输入控制具有参考和借鉴意义.但是另一方面,水质是一个动态变化的过程,需要对其进行长时间序列的持续关注.滇池水质近年来发生了较大变化,在未来的研究中,可以从宝象河放眼滇池流域,开展最新的水质调查与评价,对水质的新变化与驱动因素进行研究,促进滇池流域生态的可持续发展.

[参考文献]

- [1] 杨枫,许秋瑾,宋永会,等.滇池流域水生态环境演变趋势、治理历程及成效[J].环境工程技术学报,2022,12(3):633-643.
- [2] 冯庆.流域水污染防治的适应性管理探讨:基于滇池流域水污染防治规划[J].生态经济,2021,37(6):178-184.
- [3] 李大风.滇池表层水体微塑料空间分布特征及影响因素[D].昆明:云南师范大学硕士学位论文,2023.
- [4] 苏斌.滇池宝象河径流过程氮素赋存形态转化机理及其对氮输移通量的影响研究[D].昆明:云南师范大学博士学位论文,2019.
- [5] 孟丹,杨晓梅,刘岳明,等.基于多源地理数据的磷肥制造场地污染潜在风险评价:以昆明市为例[J].中国环境科学,2023,43(增刊1):357-367.
- [6] LI D, XU X, LI Z, et al. Detection methods of ammonia nitrogen in water: a review [J]. Trends in Analytical Chemistry, 2020, 127: 115890.
- [7] 郑瑞.复州河上游氮污染调查及水质净化技术研究[D].大连:大连理工大学硕士学位论文,2018.
- [8] AKTER S, ABDELGAWAD H, BEEMSTER G T S, et al. Synergistic effect of nitrate exposure and heatwaves on the growth, and metabolic activity of microalgae, *Chlamydomonas reinhardtii*, and *Pseudokirchneriella subcapitata* [J]. Scientific Reports, 2024, 14: 2764.
- [9] LI D, ZHAI Y, LEI Y, et al. Spatiotemporal evolution of groundwater nitrate nitrogen levels and potential human health risks in the Songnen Plain, Northeast China [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2021, 208: 111524.
- [10] 董岭.红皮病人参异常代谢及红皮物质形成机理探讨[D].长春:吉林农业大学博士学位论文,2023.
- [11] 赵茜.三亚湾近岸海域浮游植物群落结构分析及水环境质量评价[D].三亚:海南热带海洋学院硕士学位论文,2023.
- [12] 米娟.滇池沉积物—水界面中氮的赋存形态及其在循环中的作用[D].昆明:昆明理工大学硕士学位论文,2011.
- [13] 李辉.滇池柱状沉积物中氮赋存形态及其分布特征研究[D].昆明:昆明理工大学硕士学位论文,2012.
- [14] 张润宇,朱元荣,吴丰昌.滇池沉积物中氮的分布特征及其水环境影响[C]//中国矿物岩石地球化学学会.中国矿物岩石地球化学学会第13届学术年会论文集.贵阳:《矿物岩石地球化学通报》编辑委员会,2011:465.
- [15] 卜鸡明,何佳,焦立新,等.滇池流域入湖河流溶解性有机质的分布及来源[J].环境科学学报,2020,40(8):2795-2804.
- [16] 严长安,杜展鹏,姚波,等.滇池宝象河流域氮磷流失空间格局解析[J].环境科学研究,2020,33(12):2695-2704.
- [17] 赵磊,袁国林,张琰,等.基于GIS和USLE模型对滇池宝象河流域土壤侵蚀量的研究[J].水土保持通报,2007,27(3):42-46.
- [18] 罗婧,陶冕,李冲,等.滇池藻毒素时空分布特征及其与环境因子的相关性分析[J].环境科学研究,2023,36(8):1498-1507.
- [19] 程国微,杜展鹏,严长安,等.水质监测频率与极端气候对高原湖泊入湖河流氮磷通量估算的影响[J].环境科学学报,2020,40(11):3982-3989.
- [20] 苏斌,史正涛,叶燎原,等.宝象河雨季径流过程氮素输移特征及来源示踪[J].环境化学,2019,38(3):686-696.
- [21] 国家环境保护总局,国家质量监督检验检疫总局.地表水环境质量标准:GB 3838—2002[S].北京:中国标准出版社,2002.
- [22] 吴雪,邓义祥,何佳,等.对滇池流域山水林田湖草一体化保护和系统治理的思考[J].中国环境管理,2024,16(3):66-74.

- [23] 张英, 邵智, 吴雪, 等. 滇池流域汛期污染特征及分区分管策略研究 [J]. 环境污染与防治, 2024, 46 (7): 1076-1084.
- [24] 王丽娟, 史正涛, 叶燎原, 等. 滇池流域宝象河水体溶解态氮变化特征及其环境影响因子研究 [J]. 中国农村水利水电, 2019 (9): 125-128.
- [25] 普惠娟, 张乃明, 杨振兴, 等. 滇池宝象河流域水体氮素特征及影响因素 [J]. 水土保持通报, 2009, 29 (6): 123-125.
- [26] 新华社. “高原明珠”滇池连续六年全湖保持Ⅳ类水质 [EB/OL]. (2024-01-16) [2024-09-16]. https://www.gov.cn/yaowen/tupian/202401/content_6926360.htm#1.
- [27] 中新网云南. 昆明市官渡区生态文明建设交出“硬核答卷” [EB/OL]. (2022-10-01) [2024-09-16]. <https://www.yn.chinanews.com.cn/news/2022/1001/70133.html>.
- [28] 罗欢, 陈秀洪, 吴琼, 等. 深圳湾流域面源与截排溢流污染特征及其对水环境的影响 [J]. 自然资源学报, 2020, 35 (12): 3018-3028.
- [29] CAO M, HU A, GAD M, et al. Domestic wastewater causes nitrate pollution in an agricultural watershed, China [J]. Science of the Total Environment, 2022, 823: 153680.
- [30] ZHAO Y, ZHENG B, JIA H, et al. Determination sources of nitrates into the Three Gorges Reservoir using nitrogen and oxygen isotopes [J]. Science of the Total Environment, 2019, 687: 128-136.
- [31] HILMI A, ULFA A M, WIJAYA, et al. Study of seawater intrusion in coastal aquifer using total dissolved solid, conductivity and salinity measurement in Labuhan Kertasari Village, West Sumbawa [J]. Journal of Physics: Conference Series, 2021, 1816 (1): 012064.
- [32] HELARD D, INDAH S, WILANDARI M. Spatial variation of electrical conductivity, total suspended solids, and total dissolved solids in the Batang arau river, west sumatera, Indonesia [J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2021, 1041 (1): 012027.
- [33] 金辉, 梁文伯, 陈鸣, 等. 暴雨期间秦淮河水水质特征及其污染源解析 [J]. 环境保护科学, 2024, 50 (4): 77-86.
- [34] 周同, 温倩倩, 康晶, 等. 农业面源污染对我国农村地表水的影响与对策研究 [J]. 环境监控与预警, 2022, 14 (6): 1-7.
- [35] 鲍思敏, 张凯, 丁城志, 等. 澜沧江下游补远江大型底栖动物群落结构的时空分布及其影响因素 [J]. 湖泊科学, 2024, 36 (2): 536-550.
- [36] 郑昊, 贺华翔, 李海明, 等. 东江湖流域未来土地利用变化对面源污染负荷的影响评估 [J]. 中国农村水利水电, 2023, (11): 69-78.
- [37] 李思远, 侯青叶, 杨忠芳, 等. 氮同位素分馏机制、分析测试与示踪技术及其在生态环境中的应用 [J]. 中国地质, 2024, 51 (5): 1617-1643.
- [38] XUAN Y, TANG C, CAO Y. Mechanisms of nitrate accumulation in highly urbanized rivers: evidence from multi-isotopes in the Pearl River Delta, China [J]. Journal of Hydrology, 2020, 587: 124924.

The Characteristics of Nitrogen Forms in the Runoff of Baoxiang River in Dianchi Lake

LU Guan, SU Bin

(Yunnan Key Laboratory of Plateau Geographical Processes and Environmental Change, Faculty of Geography,
Yunnan Normal University, Kunming, Yunnan, China 650500)

Abstract: As the second largest river entering Dianchi Lake, the water quality of Baoxiang River is closely related to the eutrophication level of Dianchi Lake. Taking Baoxiang River of Dianchi Lake as an example, the runoff total nitrogen (TN), ammonia nitrogen ($\text{NH}_4^+\text{-N}$), nitrate nitrogen ($\text{NO}_3^-\text{-N}$) and nitrite nitrogen ($\text{NO}_2^-\text{-N}$) were systematically monitored and analyzed. The spatio-temporal variation characteristics and influencing factors of different nitrogen forms were revealed, and the variation regularity of runoff nitrogen forms in Baoxiang River was explored. The results showed that TN content increased from the upper reaches to the lower reaches of Baoxiang River, and was lower in rainy season (May-October) and higher in dry season (November-April). $\text{NH}_4^+\text{-N}$, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ and $\text{NO}_2^-\text{-N}$ in Baoxiang River are consistent with TN in terms of spatial variation of nitrogen concentration, and show an upward trend from upstream to downstream, which corresponds to the variation characteristics of land use types in the basin. In terms of time variation, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ in rainy season was higher than that in dry season, while $\text{NO}_3^-\text{-N}$ showed the opposite trend of lower than that in dry season, and the content of $\text{NO}_2^-\text{-N}$ was generally low, and the variation range was not obvious. Water environmental factors such as total dissolved solids (TDS), REDOX potential (Eh) and dissolved oxygen (DO) were the main influencing factors of nitrogen occurrence. In the rainy season, the nitrogen occurrence forms in the water of Baoxiang River were mainly affected by the pollution of non-point sources with main ammonia nitrogen, and in the dry season mainly nitrification with main nitrate nitrogen. The results can provide a basis for water pollution control and water environment restoration in Dianchi Basin.

Key words: nitrogen occurrence form; non-point source pollution; eutrophication; urbanization

(责任编辑: 陈伟超)