

抚仙湖入湖河流面源污染雨季特征

杨镒萍¹, 王帅兵^{1*}, 谭馨¹, 李青¹, 岳志强², 杜近松²

¹玉溪师范学院化学生物与环境学院, 云南 玉溪

²玉溪市农业环境与农村能源工作站, 云南 玉溪

收稿日期: 2023年3月13日; 录用日期: 2023年4月18日; 发布日期: 2023年4月25日

摘要

为研究抚仙湖入湖流域农业污染对入湖水质的影响, 通过实验监测尖山河流域雨季时不同形态的氮、磷以及化学需氧量(COD)的质量浓度, 对入湖河流氮、磷、COD在2021年雨季时月变化和氮、磷、COD, 2020年、2021年年监测分布特征进行分析。结果表明: 2020年尖山河雨季入湖水体总氮的质量浓度为3.88~2.70 mg/L, 平均值为3.36 mg/L, 硝态氮平均浓度为2.03 mg/L, 占总氮的59.73%, 是最主要的赋存形态; 氨氮平均浓度为0.50 mg/L, 占总氮的15.02%, 总磷的质量浓度为0.26~0.21 mg/L, 平均值为0.23 mg/L, 正磷酸盐平均质量浓度为0.21 mg/L, 占总磷的89.67%, COD质量浓度为10.33~6.33 mg/L, 平均值为7.93 mg/L。2021年尖山河雨季入湖水体总氮的质量浓度为2.60~0.94 mg/L, 平均值为1.91 mg/L, 硝态氮平均浓度为0.16 mg/L, 占总氮的10.43%, 氨氮平均浓度为1.12 mg/L, 占总氮的57.86%, 是最主要的赋存形态; 总磷的质量浓度为0.28~0.19 mg/L, 平均值为0.25 mg/L, 正磷酸盐平均质量浓度为0.13 mg/L, 占总磷的51.33%, COD质量浓度为11.00~5.00 mg/L, 平均值为8.33 mg/L。整体较2020年呈现明显的下降趋势。

关键词

抚仙湖, 尖山河, 氮, 磷, COD

Characteristics of Non-Point Source Pollution in Rivers Entering Fuxian Lake during the Rainy Season

Yiping Yang¹, Shuaibing Wang^{1*}, Xin Tan¹, Qing Li¹, Zhiqiang Yue², Jinsong Du²

¹College of Chemical Biology and Environment, Yuxi Normal University, Yuxi Yunnan

²Yuxi Agricultural Environment and Rural Energy Workstation, Yuxi Yunnan

Received: Mar. 13th, 2023; accepted: Apr. 18th, 2023; published: Apr. 25th, 2023

*通讯作者。

文章引用: 杨镒萍, 王帅兵, 谭馨, 李青, 岳志强, 杜近松. 抚仙湖入湖河流面源污染雨季特征[J]. 环境保护前沿, 2023, 13(2): 387-394. DOI: 10.12677/aep.2023.132049

Abstract

In order to study the influence of agricultural pollution on the water quality of Fuxian Lake watershed, the mass concentrations of different forms of nitrogen, phosphorus and chemical oxygen demand (COD) in the rainy season of Jianshan River watershed were monitored experimentally. The monthly changes of nitrogen, phosphorus and COD in the rainy season of 2021 and the distribution characteristics of nitrogen, phosphorus and COD in 2020 and 2021 were analyzed. The results showed that the mass concentration of total nitrogen in the water entering the lake in the rainy season of Jianshan River in 2020 was 3.88~2.70 mg/L, with an average value of 3.36 mg/L. The average concentration of nitrate nitrogen was 2.03 mg/L, accounting for 59.73% of total nitrogen, which was the main occurrence form. The average concentration of ammonia nitrogen was 0.50 mg/L, accounting for 15.02% of total nitrogen. The mass concentration of total phosphorus was 0.26~0.21 mg/L, with an average value of 0.23 mg/L. The average mass concentration of orthophosphate was 0.21 mg/L, accounting for 89.67% of total phosphorus. The mass concentration of COD was 10.33~6.33 mg/L, with an average value of 7.93 mg/L. In 2021, the mass concentration of total nitrogen in the water of Jianshan River in the rainy season was 2.60~0.94 mg/L, with an average of 1.91 mg/L. The average concentration of nitrate nitrogen was 0.16 mg/L, accounting for 10.43% of total nitrogen, and the average concentration of ammonia nitrogen was 1.12 mg/L, accounting for 57.86% of total nitrogen, which was the most important form of occurrence. The mass concentration of total phosphorus was 0.28~0.19 mg/L, with an average of 0.25 mg/L. The average mass concentration of orthophosphate was 0.13 mg/L, accounting for 51.33% of total phosphorus. The mass concentration of COD was 11.00~5.00 mg/L, with an average of 8.33 mg/L. The overall trend is significantly lower than that in 2020.

Keywords

Fuxian Lake, Jianshan River, Nitrogen, Phosphorus, COD

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

湖泊营养化问题已经成为全球各国存在的普遍问题。亚洲、非洲、北美洲、南美洲和欧洲分别有 54%、28%、48%、41%和 53%数量的湖泊受到了不同程度的富营养化影响[1]。而在我国,通过对北京密云水库[2][3]、河北滦河[4]、安徽巢湖[5]、云南洱海、滇池[6]、贵州红枫湖[7]、安徽太湖[8]等水域的调查研究结果均表明:农业生产中的 N、P 及农药流失已成为我国水体营养化又一主要的普遍性污染源。引起湖泊营养化的主要营养元素氮磷的来源可分为外源和内源,外源输入的影响远大于内源,而在外源输入当中农业面源影响较大。在湖泊流域中,河流水体在流经耕地时携带着氮磷等营养物质进入湖泊,这部分营养物质在风力和密度梯度等物化作用下与湖水混合,造成水体污染;同时这些污染物又通过沉积作用和矿化作用成为湖泊内在污染源对湖泊造成二次污染[9][10]。因此研究入湖水体的氮、磷、COD 含量是湖泊营养化研究的重要支撑。

抚仙湖位于我国西南云贵高原,总体水质维持在I类,是我国最重要的战备水源地。储水量 2.062×10^{10} m³,占全国淡水湖泊总蓄水量的 9.16%,湖容量 206 亿,平均水深 87 m,最大水深 158 m,是全国第二大深水湖泊。抚仙湖理论换水周期长达 167 年,生态系统简单脆弱,一旦污染将难以治愈[11]。从已开展

的研究工作来看,如今抚仙湖中氮磷含量较 20 世纪 80 年代有了非常显著的增加[12]。调查研究显示,进入抚仙湖的污染物中,总氮、总磷排放量最多的是抚仙湖流域的农业面源污染而这些污染物排放途径主要有渗漏、降雨引起的径流和回归水[13]。因此本研究针对抚仙湖入湖河流——尖山河流域雨季时不同形态的氮、磷以及化学需氧量(COD)的质量浓度、时空分布特征、雨季时月变化和 2020~2021 年分布特征进行分析,以期揭示尖山河流域氮、磷、COD 对抚仙湖营养化的影响及贡献,为抚仙湖营养化的防治提供科学依据。

2. 材料与方方法

尖山河小流域地处玉溪市澄江县西南部,位于北纬 $24^{\circ}32'00''\sim 24^{\circ}37'38''$,东经 $102^{\circ}47'21''\sim 102^{\circ}52'02''$ 之间;东临抚仙湖,西接晋宁县,南接禄充管委会,北接龙街镇广龙村委会。最高海拔在流域北部,为 2347.4 m,最低海拔在尖山河与抚仙湖的入湖口,为 1722 m,相对高差 625.4 m。流域内森林覆盖率为 21.4%,林草覆盖率为 47.9%。多年平均降雨量 1050 mm,雨季为 5 月下旬~10 月下旬,降雨量占全年总降雨量的 75%,旱季为 11 月上旬~次年 5 月中旬,降雨量占全年降雨量的 25%。

本研究根据尖山河雨季时间,于 2020 年、2021 年雨季系统采集河流水体,采样点情况如图 1 所示。现场使多功能水质参数仪(YSI-EXO2)测定 pH 值、电导等水质参数。水样采集后,样品在 $3\sim 5^{\circ}\text{C}$ 条件下冷却保存于聚乙烯瓶中。样品用浓硫酸分别酸化至 $\text{pH} < 2$ 和 $\text{pH} < 1$ 用于 24 h 内测定总氮和总磷的质量浓度。另取部分样品现场过滤,用于测试其他不同形态氮和磷的质量浓度。而为保证监测结果的可信度,每月至少采集两次样品,当出现突发性降水时,再补充采样监测。监测结果取多次实验结果平均值代表该月的质量浓度情况。

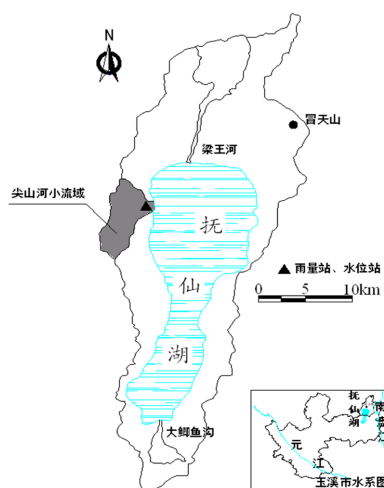


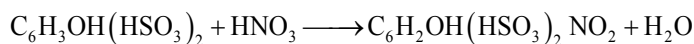
Figure 1. Monitoring small watershed location [14]

图 1. 监测小流域位置[14]

总氮的质量浓度 ρ_{TN} 采用碱性过硫酸钾氧化-紫外分光光度法测定,在 $120^{\circ}\text{C}\sim 124^{\circ}\text{C}$ 下,碱性过硫酸钾溶液使样品中含氮化合物的氮转化为硝酸盐,采用紫外分光光度法于波长 220 nm 和 275 nm 处,分别测定吸光度 A_{220} 和 A_{275} ,按公式(1)计算校正吸光度 A,总氮(以 N 计)含量与校正吸光度 A 成正比。

$$A = A_{220} - 2A_{275} \quad (1)$$

硝态氮的质量浓度 $\rho_{\text{NO}_3\text{-N}}$ 采用酚二磺酸法测定,土壤用饱和 $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 溶液浸提,在微碱性条件下蒸发至干,土壤浸提液中的 $\text{NO}_3\text{-N}$ 在无水的条件下能与酚二磺酸试剂生成硝基酚二磺酸。



氨氮的质量浓度 $\rho_{\text{NH}_4^+-\text{N}}$ 采用纳氏试剂比色法测定, 以游离态的氨或铵离子等形式存在的氨氮与纳氏试剂反应生成淡红棕色络合物, 该络合物的吸收光度与氨氮含量成正比, 于波长 420 nm 处测量吸光度。

总磷的质量浓度 ρ_{TP} 、正磷酸盐的质量浓度 $\rho_{\text{PO}_4^{3-}-\text{P}}$ 采用钼锑抗分光光度法测定, 在酸性条件下, 正磷酸盐与钼酸铵、酒石酸锑氧钾反应, 生成磷钼杂多酸, 被还原剂抗坏血酸还原, 则变成蓝色络合物, 通常即称磷钼蓝。

COD 的质量浓度采用 HACH 比色法, 用一定量的重铬酸钾在强酸性溶液中, 加入硫酸汞去除氯离子干扰, 在银催化下, 经过高温消解反应后的溶液 COD 浓度与吸光度成线性关系, 符合朗伯-比尔定律, 在 620 nm 处比色得出样品浓度。

降雨量用建议气象观测站数据, 并采用自记雨量观测仪结合日记雨量观测仪互相校正观测。

3. 结果与讨论

3.1. 氮、磷、COD 雨季时月变化

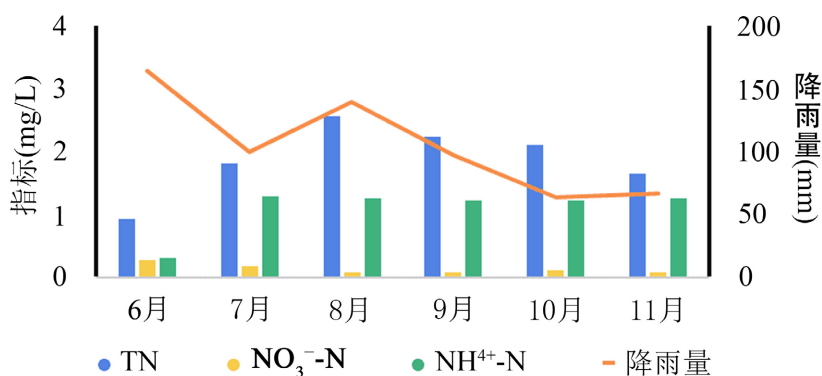


Figure 2. Monthly changes of total nitrogen, nitrate nitrogen, ammonia nitrogen and rainfall in Jianshan River Basin during the rainy season in 2021

图 2. 2021 年雨季尖山河流域总氮、硝氮、氨氮及降雨量的月变化

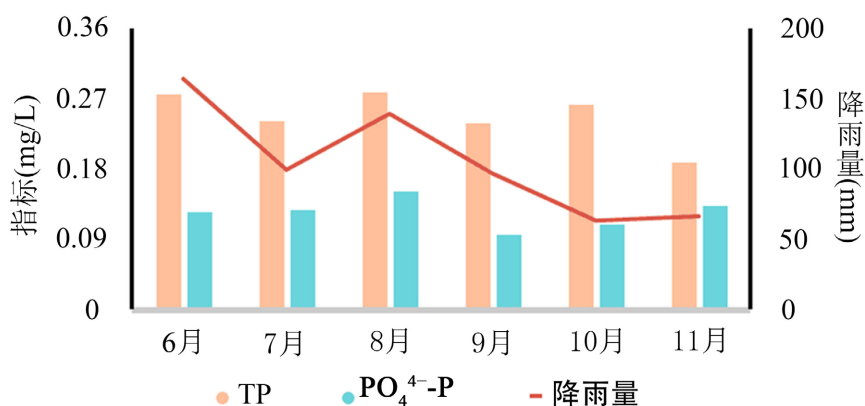


Figure 3. Monthly changes of total phosphorus, phosphate and rain fall in Jianshan River basin during the rainy season in 2021

图 3. 2021 年雨季尖山河流域总磷、磷酸盐及降雨量的月变化

图 2 表明, 伴随着降雨量的减少总氮、硝态氮的质量浓度随之减小。总氮质量浓度最高的月份是 8 月, 质量浓度 ρ_{TN} 为 2.60 mg/L, 最低月在 9 月, 质量浓度 ρ_{TN} 为 0.94 mg/L, 平均值为 1.91 mg/L。硝态

氮的含量在雨水初期含量最大, 质量浓度 $\rho\text{NO}_3^- \text{-N}$ 为 0.29 mg/L, 随着降雨硝态氮的质量浓度逐渐减小, 直至 11 月降至 0.10 mg/L 为最小值。氨氮质量浓度变化整体比稳定, 最高质量浓度 $\rho\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 出现在 7 月为 1.32 mg/L, 最低质量浓度出现在 6 月为 0.32 mg/L, 平均值为 1.12 mg/L。尖山河雨季时期, 入湖河流水体以 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 为主要的输送形态。按照《地表水环境质量标准》(GB3838-2002) [15] 尖山河雨季时期向抚仙湖输送的水体其 $\rho\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 符合 IV 类水环境质量标准, 按照氨氮平均质量浓度判定水体属于 IV 类水, ρTN 符合 V 类水环境质量标准, 按照总氮平均质量浓度判定水体属于 V 类水。

图 3 表明: 水体中磷的含量随着降雨量的减少而呈现减小的趋势。总磷的质量浓度 ρTP 最大浓度出现在初始降雨为 0.28 mg/L, 整体出现下降趋势后至 11 月为最小浓度为 0.19 mg/L, 平均值为 0.25 mg/L。正磷酸盐的质量浓度与降雨量相关性不明显, 正磷酸盐的质量浓度 $\rho\text{PO}_4^{3-} \text{-P}$ 在 8 月达到最大值 0.15 mg/L, 在 9 月出现最小监测值 0.10 mg/L, 平均值为 0.13 mg/L。根据《地表水水质标准》(GB3838-2002) [15] 雨季时, 尖山河小流域向抚仙湖输送水体 ρTP 符合 IV 类水环境质量标准, 按照总磷的平均质量浓度判定水体属于 IV 水。

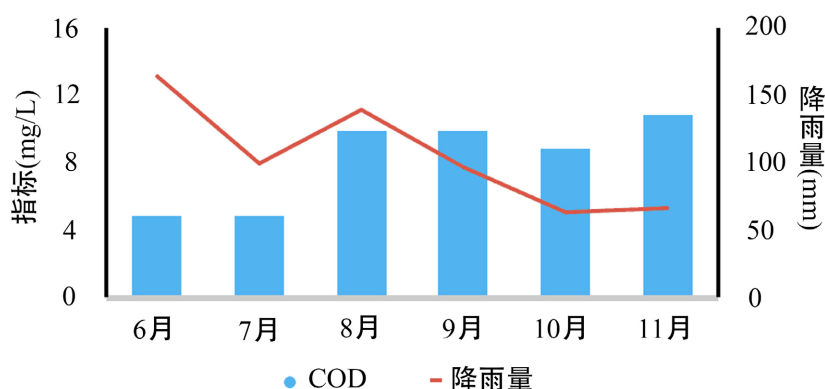


Figure 4. Monthly variation of COD and rain fall in Jianshan River Basin in 2021 rainy season
图 4. 2021 年雨季尖山河流域 COD 及降雨量的月变化

图 4 表明 COD 质量浓度整体呈现一个增加的趋势且与降雨量的相关性不大。COD 质量浓度在 11 月到达最大质量浓度 11.00 mg/L, 6 月和 7 月是最小质量浓度为 5.00 mg/L, 平均浓度为 8.33 mg/L。根据《地表水水质标准》(GB3838-2002) [15] 雨季时, 尖山河小流域向抚仙湖输送水体中 COD 含量满足 I 类水的标准, 按照 COD 平均质量浓度判定水体属于 I 类水。

上述的结果综合表明: 6 月初始降雨量处于最大时, 硝态氮及总磷含量处于较大浓度值, 在 7 月降雨量减少后至 8 月降雨量出现小高峰, 与此对应总磷质量浓度达到最大, 总氮、COD 质量浓度处于小高峰, 之后降雨量呈现下降趋势各指标浓度出下一一定下降。但 COD 含量在 11 月出现最大值, 除了实验带来的误差还有可能是前几个月水体中营养元素的增加导致水体中生物的增多, 使得水中腐殖质分解速度加快而导致 COD 质量浓度增加。COD 的含量满足《地表水水质标准》(GB3838-2002) [15] I 类水的标准。然而总氮、氨氮、总磷的含量远超地表水的标准, 究其原因主要是因为其农业面源。2021 年 6 月、7 月属农忙时节, 尖山河流域内受农业活动的影响, 大量的氮肥、磷肥或复合肥投入使用, 导致未被吸收利用的化肥随着雨季降水形成地表径流进入水体, 最终输送进抚仙湖。此外, 尖山河流域内城镇污水的排放[13]也有可能导导致水体内氮、磷浓度较大。

3.2. 2020 年~2021 年氮、磷、COD 变化对比

图 5 表明: 总氮的质量浓度 2021 年较 2020 年每个月都呈现明显的下降趋势。2020 年总氮最大质量

浓度出现在9月,为3.88 mg/L,对比2021年9月总氮的质量浓度为2.27 mg/L,同比下降率为41.49%,2020年11月是总氮质量浓度的最小值为2.70 mg/L,对比2021年11月同比下降了65.19%。2021年8月是总氮质量浓度的最大值,对比2020年8月同比下降率为29.15%,2021年6月浓度为总氮质量浓度的最小值,较2020年同比下降74.66%。2021年较2020年总氮的平均质量浓度下降了43.15%。

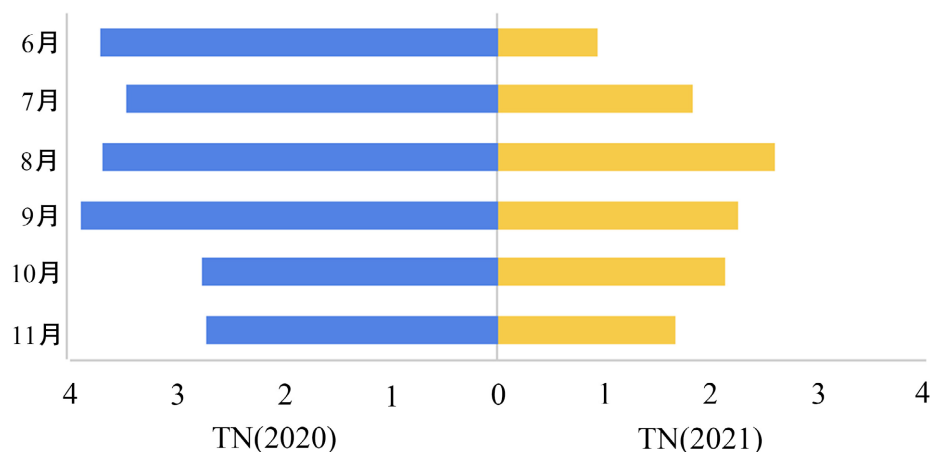


Figure 5. Changes of total nitrogen in Jianshan River Basin during the rainy season from 2020 to 2021
图 5. 2020 年~2021 年雨季尖山河流域总氮的变化

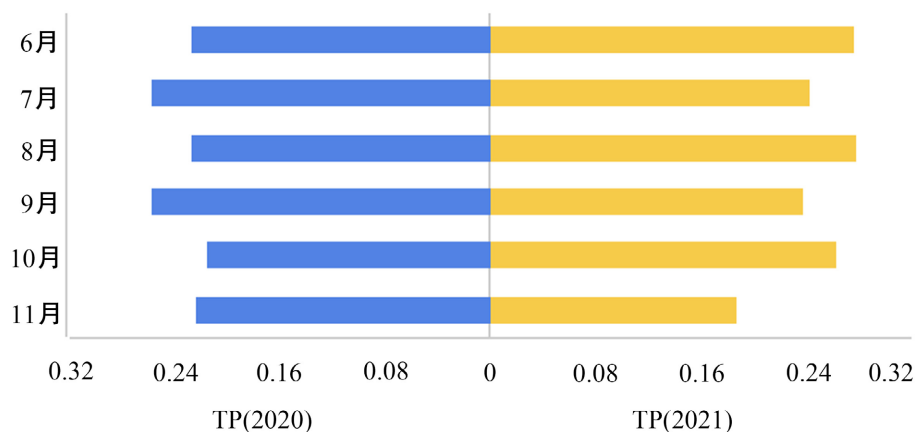


Figure 6. Changes of total phosphorus in Jianshan River Basin during the rainy season from 2020 to 2021
图 6. 2020 年~2021 年雨季尖山河流域总磷的变化

图 6 表明:总磷浓度 2021 年相较 2020 年整体上没有明显变化。2020 年总磷最大质量浓度出现在 9 月为 0.26 mg/L,2021 年同比下降率为 7.69%,2020 年 10 月为总磷最小质量浓度为 0.21 mg/L,与之相比 2021 年 10 月同比增长 23.81%。2021 年 8 月为总磷的最大质量浓度与 2020 年相比,同比增长 21.74%,2021 年 11 月浓度为总磷质量浓度的最小值,与 2020 年相比同比下降率为 13.64%。2021 年整体总磷平均质量浓度相比 2020 年同比增加 8.70%。

图 7 表明:COD 浓度较 2020 年在 2021 年整年变化趋势不明显。2020 年 COD 最高质量浓度的月份为 10 月为 10.33 mg/L,相较于 2021 年同比下降率 12.88%,2020 年 7 月为 COD 最小质量浓度,相较于 2021 年同比下降了 21.01%。2021 年 11 月 COD 最大质量浓度为 11.00 mg/L,与 2020 年相比同比增长 13.75%,2021 年 COD 最小质量浓度出现在 6 月,与 2020 年相比较同比下降 28.57%。2021 年 COD 平均质量浓度相较于 2020 年同比增长了 5.04%。

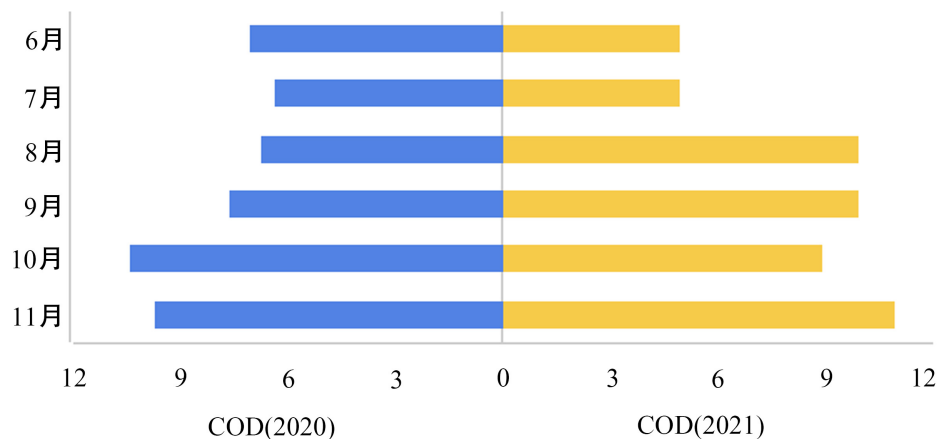


Figure 7. Changes of COD in Jianshan River Basin during the rainy season from 2020 to 2021

图 7. 2020 年~2021 年雨季尖山河流域 COD 的变化

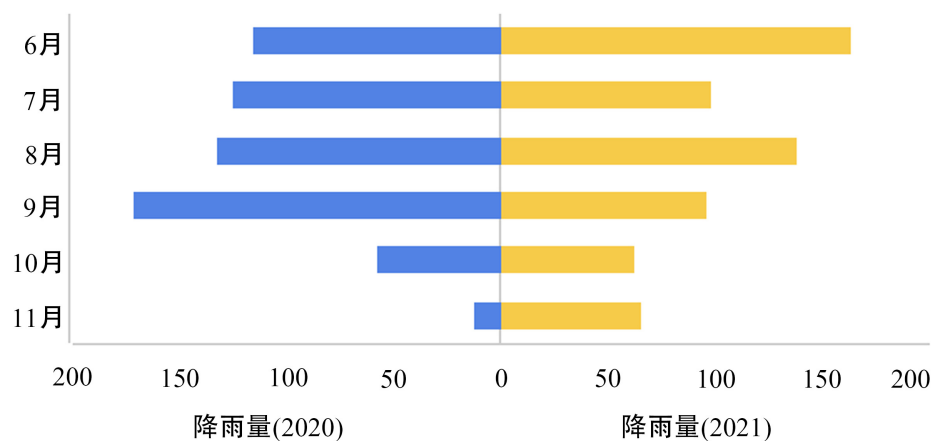


Figure 8. Changes in rain fall in Jianshan River Basin during the rainy season from 2020 to 2021

图 8. 2020 年~2021 年雨季尖山河流域降雨量的变化

图 8 表明：2021 年降雨量与 2020 年相比较下没有明显变化趋势。2020 年 9 月为最大降雨量，与之相比下 2021 年同比下降率为 43.34%，11 月为 2020 年降雨量最小月份，2021 年同比增长率为 451.67%。2021 年整体平均降雨相较于 2020 年同比增长 2.95%。

上述的结果综合表明：2021 年整体较 2020 年，总氮平均质量浓度下降了 43.15%，总磷平均质量同比增加 8.70%，COD 平均质量浓度同比增长了 5.04%，氮元素呈现明显下降，而总磷、COD 略微有所上升。之所以出现这样的结果的原因有不同的土地利用类型，种植不同的作物使得需要施用不同的肥料、农药，通过降雨，水体携带大量的肥料、农药残留而进入水体。此外，流域境内城镇化的快速发展以及农村生活污水、畜禽粪便使得流域污染加剧[16]。尖山河属于抚仙湖重要入湖河流，同时也是季节性河流[17]，雨季时降雨量的不同对流域内水体中营养物质的稀释作用不同从而呈现这样的监测结果。

4. 结论

本文通过实验监测尖山河流域雨季时不同形态的氮、磷以及化学需氧量(COD)的质量浓度，对入湖水体氮、磷、COD 在 2021 年雨季时月变化和氮、磷、COD，2020 年、2021 年年监测分布特征进行分析，得出以下结论：

(1) 2021 年尖山河雨季入湖水体 ρ_{TN} 为 2.60~0.94 mg/L，平均值为 1.91 mg/L，硝态氮平均浓度为 0.16

mg/L, 氨氮平均浓度为 1.12 mg/L; ρ_{TP} 为 0.28~0.19 mg/L, 平均值为 0.25 mg/L, 正磷酸盐平均质量浓度为 0.13 mg/L; COD 质量浓度为 11.00~5.00 mg/L, 平均值为 8.33 mg/L。

(2) 2021 年与 2020 年相比, 总氮的平均质量浓度下降了 1.45 mg/L, 下降率为 43.15%; 硝态氮平均质量浓度下降了 1.87 mg/L, 下降率为 92.12%; 总磷的平均质量浓度上升了 0.02 mg/L, 上升率为 8.70%; 正磷酸盐下降了 0.08 mg/L, 下降率为 38.10%; COD 的平均质量浓度上升了 0.40 mg/L, 上升率为 5.04%。

在以往的抚仙湖面源污染研究中很少有对各种污染物的综合测定与分析, 更多的是针对某种元素不同时期、不同流域浓度变化的研究, 本次监测是针对同一流域连续时间内水质元素变化。使该流域对抚仙湖营养化尤其是雨季的影响提供参考, 为以后的研究打下理论基础。

5. 展望

虽然抚仙湖水质仍保持在 I 类水, 但仍需澄江市人民乃至云南省高度重视抚仙湖的治理, 加强对入湖水体综合治理与入湖水体水质的常规监测。坚持环境管理的“全民共治、源头防治、标本兼治”的原则, 严格环保执法与治理力度, 加强公众的环保意识与参与, 大力推进生态文明建设共同守护抚仙湖。降低抚仙湖流域农田面源污染, 促进生态环境保护与改善工作不断取得新进展并最终实现可持续发展。

参考文献

- [1] Nyenje, P.M., Foppen, J.W., Uhlenbrook, S., *et al.* (2010) Eutrophication and Nutrient Release in Urban Areas of Sub-Saharan Africa: A Review. *Science of the Total Environment*, **408**, 447-455.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2009.10.020>
- [2] 徐谦, 等. 密云水库水源保护[Z]. 农、林、牧业发展与非点源污染相关关系研究(内部资料), 1998: 56-61.
- [3] 刘振国, 付素华. 密云石闸小流域水土流失规律研究[J]. 北京水利, 2000(3): 11-12.
- [4] 王少明. 滦河上游地区水土流失与面源污染源的治理[J]. 水利水电科技进展, 1997, 17(3): 50-51.
- [5] 阎伍久, 陈飞星. 巢湖流域不同土地利用类型地表径流污染特征研究[J]. 长江流域资源与环境, 1998, 7(3): 275-277.
- [6] 蒋晓辉. 滇池面源污染及其综合治理[J]. 云南环境科学, 2000(4): 33-34.
- [7] 赵吉发. 红枫湖流域面源污染调查研究[J]. 环保科技, 1995, 17(1): 1-49.
- [8] 张荣保, 姚琪, 计勇. 太湖典型小流域非点源污染物流失规律研究[J], 人民长江, 2004, 35(10): 38-44.
- [9] Ni, Z.K. and Wang, S.R. (2015) Historical Accumulation and Environmental Risk of Nitrogen and Phosphorus in Sediments of Erhai Lake, Southwest China. *Ecological Engineering*, **79**, 42-53.
<https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2015.03.005>
- [10] Pearce, A.R., Chambers, L.G. and Hasenmueller, EA. (2017) Characterizing Nutrient Distributions and Fluxes in a Eutrophic Reservoir, Midwestern United States. *Science of the Total Environment*, **581-582**, 589-600.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.12.168>
- [11] 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.
- [12] 冯慕华, 潘继征, 柯凡, 李文朝. 云南抚仙湖流域废弃磷矿区水污染现状[J]. 湖泊科学, 2008, 20(6): 766-772.
- [13] 陈红, 王声跃, 刘俊. 抚仙湖流域农业面源污染控制研究[J]. 云南环境科学, 2002, 21(3): 27-29.
- [14] 白文忠, 王克勤. 抚仙湖典型小流域烤烟坡地产流产沙及氮磷流失特征[J]. 中国水土保持科学, 2009, 3(3): 46-51.
- [15] 国家环境保护总局, 国家质量监督检验检疫总局. 中华人民共和国国家标准: 地表水环境质量标准 GB3838-2002 [S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [16] 牛远, 胡小贞, 王琳杰, 张有林, 余辉, 曹熏子, 何永俊, 尹骄, 姜霞. 抚仙湖流域山水林田湖草生态保护修复思路与实践[J]. 环境工程技术学报, 2019, 9(5): 482-490.
- [17] 杨鑫鑫, 朱兆洲, 张晶, 李硕. 抚仙湖入湖河流氮磷的时空分布特征[J]. 天津师范大学学报: 自然科学版, 2020, 40(5): 37-43.