

引用格式: 陶志忠, 高云云, 王荣嘉. 西苕溪流域水源地氮素时空分布特征及其对降雨的响应[J]. 浙江农林大学学报, 2025, 42(4): 835–843. TAO Zhizhong, GAO Yunyun, WANG Rongjia. Temporal and spatial distribution of nitrogen in Xitiaoqi Watershed and its response to rains[J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2025, 42(4): 835–843.

西苕溪流域水源地氮素时空分布特征及其对降雨的响应

陶志忠¹, 高云云¹, 王荣嘉²

(1. 安吉县水利局, 浙江 安吉 313300; 2. 浙江农林大学 林业与生物技术学院, 浙江 杭州 311300)

摘要: 【目的】水体氮污染依然是当前流域水环境的首要威胁。太湖流域是中国东部经济发达地区的重要水源地, 但目前流域水质处于轻度污染状态, 因此探究太湖流域水体氮素特征, 可为流域水环境的改善提供参考依据。【方法】以太湖上游重要水源区西苕溪流域为研究区, 基于浙江省安吉县水文站 1956—2023 年的降雨观测数据及 2016—2023 年的水质监测数据, 分析该区降雨在不同时间维度上的差异, 探究研究区水体氮素的时空动态分布特征, 明确西苕溪流域水库型水源地水体氮素随时间的变化特征。【结果】研究区降雨量呈上升趋势, 且每年 5—9 月为雨季, 降雨量占全年降雨量的 60.04%。时间维度上, 由于雨季较多的降雨对水体有稀释作用, 因而雨季水库型水源地水体氮素质量浓度一般低于非雨季, 特别是 2023 年雨季老石坎水库水体氮素质量浓度仅为 $0.02 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 已达 I 类水标准; 空间维度上, 流域整体呈现西南部流域源头水体氮素质量浓度较低, 而中部及东北部人类活动较多的中下游氮素质量浓度较高的特征。对于流域整体水质而言, 2016 年西苕溪流域水体氮素质量浓度最大值为 $9.09 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 均值为 $3.19 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 流域整体水质属劣 V 类。而在 2023 年, 西苕溪流域水体氮素质量浓度均值为 $1.32 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 整体符合 IV 类水的要求。【结论】2016—2023 年, 流域水质整体呈现好转态势。降雨是影响水体氮素质量浓度的关键因素, 在全年尺度上水体氮素质量浓度与降雨量呈负相关, 而在季节尺度上水体氮素质量浓度与降雨量呈正相关。图 4 参 29

关键词: 水体氮污染; 面源污染; 水源地; 太湖流域

中图分类号: X832 文献标志码: A 文章编号: 2095-0756(2025)04-0835-09

Temporal and spatial distribution of nitrogen in Xitiaoqi Watershed and its response to rains

TAO Zhizhong¹, GAO Yunyun¹, WANG Rongjia²

(1. Anji County Bureau of Water Resources, Anji 313300, Zhejiang, China; 2. College of Forestry and Biotechnology, Zhejiang A&F University, Hangzhou 311300, Zhejiang, China)

Abstract: [Objective] Nitrogen pollution in water is still the primary threat to the current water environment in watershed. The Taihu Lake Basin is an important water source area for the economically developed coastal areas in eastern China, but its water quality is currently in a mildly polluted state, and thus, the study of nitrogen characteristics in Taihu Lake Basin provides the reference for improving the water environment of the basin. [Method] This paper took the Xitiaoqi Watershed, an important water source area in the upper reaches of Lake Taihu, as the research area. Based on the rainfall observation data of Anji County Hydrological Station from 1956 to 2023 and the water quality monitoring data from 2016 to 2023, the difference of rainfall in different time dimensions was analyzed, the dynamic distribution characteristics of water nitrogen in the study area were investigated, and the characteristics of water nitrogen change with time in the reservoir-type water source in

收稿日期: 2024-06-20; 修回日期: 2025-03-14

基金项目: 国家自然科学基金青年基金资助项目 (32401664); 浙江农林大学科研启动项目 (2022LFR083)

作者简介: 陶志忠 (ORCID: 0009-0003-0147-7994), 工程师, 从事水文水利工程与水文监测研究。E-mail: 369263964@qq.com。通信作者: 王荣嘉 (ORCID: 0000-0001-7399-4921), 副教授, 博士, 从事森林与水环境研究。E-mail: wangrongjia0112@163.com

Xitiaoxi Watershed were defined. [Result] Rainfall in the study area showed an upward trend, and the rainy season was from March to September each year, with accounting for 60.04% of the annual rainfall. From the time dimension, due to the dilution effect of heavy rainfall in rainy season on water body, the water nitrogen concentration of reservoir-type water source in rainy season was generally lower than that in non-rainy season. In particular, the water nitrogen concentration of Laoshikan Reservoir in rainy season in 2023 was only $0.02 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, which had reached the Class I water standard. From the spatial dimension, the water nitrogen concentration in the southwest of the watershed was lower, while the nitrogen concentration in the middle and lower reaches where human activities were more frequent was higher. As for the overall water quality of the watershed, the maximum nitrogen concentration of Xitiaoxi Watershed in 2016 was $9.09 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, and the average was $3.19 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, indicating that the basin belonged to inferior Class V water. In 2023, the average nitrogen concentration in Xitiaoxi Watershed was $1.32 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, which met the requirements of Class IV water. [Conclusion] From 2016 to 2023, the water quality of the watershed as a whole improved. Rainfall was a key factor affecting nitrogen quality concentration in water bodies, on the annual scale, water nitrogen concentration was negatively correlated with rainfall, while on the seasonal scale, water nitrogen concentration was positively correlated with rainfall. [Ch, 4 fig. 29 ref.]

Key words: water nitrogen pollution; non-point source pollution; water source area; Taihu Lake Basin

随着人口的增长, 粮食需求逐渐增大, 为提高粮食产量, 许多地区大量使用氮肥^[1]。然而大量未被利用的氮素进入周边环境造成严重污染。如在秦淮河流域, 包括动物养殖在内的农业生产活动能够导致当地 43% 的氮污染^[2]。陆地上的农业氮污染同样能够影响到周边地区, 在中美洲的珊瑚群地区, 农业生产和牲畜养殖对沿海地区氮污染贡献率高达 92%^[3]。施肥等农业活动不仅污染当地环境, 还会威胁周边环境, 甚至达到氮素地球极限的阈值^[4-5], 从而威胁整个生态系统。可见, 由氮素导致的水污染是当前环境治理的热点问题。水体氮污染能够导致水体富营养化^[6]与流域水质恶化^[7], 进而威胁流域生态安全与当地居民的身体健康^[8]。有研究表明: 当摄入的饮用水硝态氮含量超标时, 能够增加人体致癌率^[9], 引发多种疾病^[10]。近 40 a 间, 中国农业面源污染总氮污染负荷增加了 196.2%, 其中农业化肥的施用及家畜养殖对总氮污染贡献最大, 占 72.3%~80.8%^[11]。这也表明调控氮素污染是改善水环境的当务之急。

太湖是中国第三大淡水湖, 位于东部经济发达的沿海地区, 同时也是该地区重要的水源地^[12]。但近年来, 由于城市化、工业化等因素, 农业化肥的过度使用对周边环境的威胁越来越大。1985—2015 年, 太湖总氮 (TN) 质量浓度为 $1.79 \sim 3.63 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 平均质量浓度为 $2.63 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 水质属于劣 V 类^[13]。当前太湖氮污染物总负荷为 2.60 万 t^[14], 水质处于轻度污染状态^[15]。西苕溪流域是太湖上游重要的水源地之一, 年入湖径流量达 26 亿 m^3 , 占太湖入湖总量的 $1/4$ ^[16]。流域内有多处水库型水源地, 例如赋石水库、老石坎水库和凤凰水库等, 其中赋石水库是浙北地区最大的水库型水源地。WANG 等^[15, 17]在赋石水库周边研究发现: 在以毛竹 *Phyllostachys edulis* 为主要植被和经济作物的林地, 雨后地表径流的总氮质量浓度最高可达 $9.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 是 V 类水标准的 4.75 倍, 可见, 氮素是影响本区水质的关键因素。然而, 流域是调控水环境的基本单元, 目前单一水库的水体氮污染研究无法反映整个流域的氮污染状况, 因此, 有必要进一步开展流域尺度上水体氮污染的特征研究。

鉴于此, 本研究以太湖上游西苕溪流域为研究区, 结合固定监测站的长期降雨观测数据与水质监测数据, 探究太湖水源地水体氮素的时空动态特征及其对降雨的响应, 以期对相关决策部门改善流域水环境提供科学依据。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

西苕溪流域 ($30^{\circ}23' \sim 30^{\circ}53' \text{N}$, $119^{\circ}14' \sim 119^{\circ}53' \text{E}$) 位于中国东部沿海地区, 地势西南高、东北低。该

区属亚热带海洋性季风气候，光照充足，气候温和，雨量充沛，四季分明，全年平均气温为 12.2~15.6℃，年均降雨量为 1 100.0~1 900.0 mm，年均降雨天数为 164.0 d，年均日照时数为 2 015.0 h。流域面积为 2 268.0 km²，多年平均流量为 46.5 m³·s⁻¹，多年平均径流量为 14.93 亿 m³ (丰水年为 24.10 亿 m³，枯水年为 4.40 亿 m³)，约占太湖上游入湖量的 27%。该区主要粮食作物为水稻 *Oryza sativa*，经济作物为茶 *Camellia sinensis* 和集约经营的毛竹。

研究区内有赋石水库、老石坎水库、凤凰水库以及天子岗水库等多座大中型水库。其中，赋石水库为浙北地区最大的水库型水源地，位于研究区西部；老石坎水库位于研究区西南部；凤凰水库位于研究区东南部。以上 3 座水库均位于西苕溪上游，而天子岗水库位于流域东北部，属于下游地区。可见，水库型水源地是研究区典型水源地形式。

1.2 数据收集及指标测定

研究区降雨数据 (1956—2023 年) 由安吉县水文站测定获取，用于探究时间维度上大气降雨的变化特征。降雨量用 20 cm JDZ05 翻斗式雨量器观测，径流数据根据监测河流的水位、流量等观测数据计算而来。径流量数据采用流速仪测流量计算而得，流量测验使用水文缆道测流，断面数据采用借用或实测方式确定。

研究区水质数据收集于 2016—2023 年，用于解析西苕溪流域水体氮素时空分布特征。采样时间为每月中旬且采样前 3 d 无降水，此时流量相对稳定，可避免降水冲刷对河流水质测定结果的影响。采样过程中用保温箱和冰袋低温冷藏保存水样。采样完成后用冰箱 4℃ 保存水样，以减少水样中微生物对水样氮素质量浓度的影响。水样测定指标主要为总氮，测定方法为过硫酸钾氧化-紫外分光光度法^[18]。

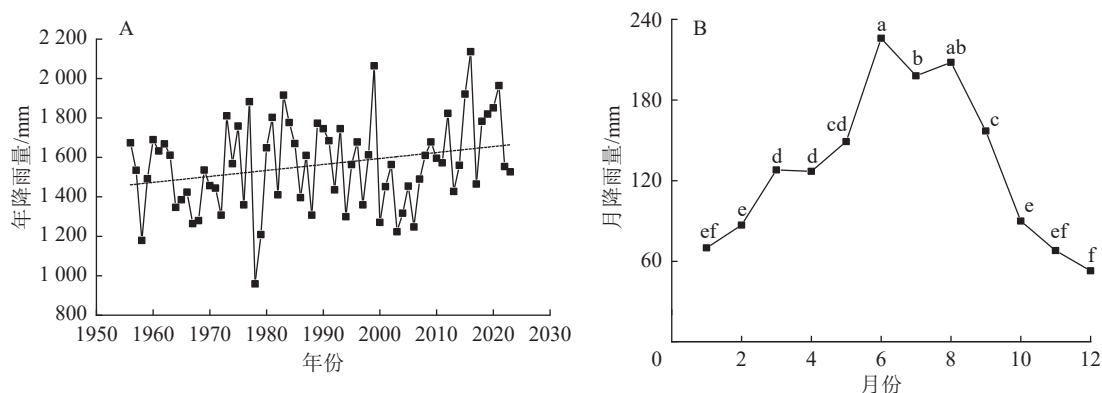
1.3 数据处理与分析

采用 Excel 2016 绘制研究区降雨、径流 (水质浓度) 等数据随时间的变化。利用 ArcGIS 将研究区各采样点水质数据空间分布进行可视化。使用 SPSS 19.0 对降雨及不同水质采样点的氮素质量浓度进行最小显著差异法 (LSD) 和邓肯显著性分析，使用 Origin 2021 对大气降雨与水体氮素质量浓度进行 Pearson 相关性分析。

2 结果与分析

2.1 大气降雨在时间维度的动态变化

如图 1A 所示：研究区多年平均降雨量为 1 563.0 mm，然而 1978 年降雨量不足 1 000.0 mm。随着时间的迁移，1999 和 2016 年的降雨量均超过 2 000.0 mm，分别为 2 064.0 和 2 136.0 mm。可见，研究区降雨量虽年际间差异较大，但总体呈上升趋势。



图B中不同字母表示月降雨量差异显著 ($P < 0.05$)。

图 1 1956—2023 年大气降雨量的年际 (A) 和月际 (B) 分布特征

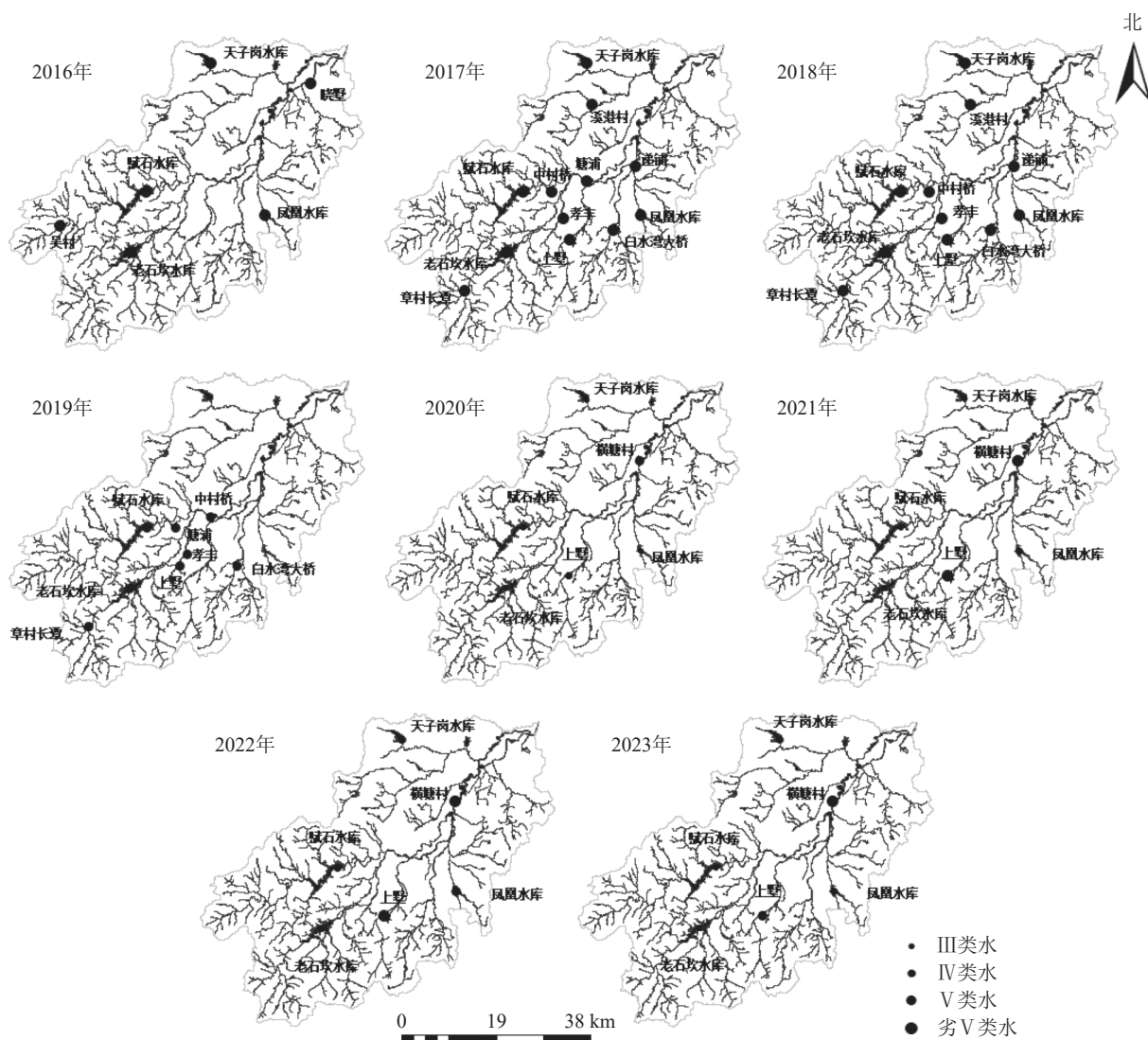
Figure 1 Interannual (A) and intermonthly (B) distribution characteristics of atmospheric rainfall from 1956 to 2023

根据多年月平均降雨量 (图 1B) 可知：研究区 12 月的降雨量最少，仅 53.0 mm，且 1—2 月及 10—12 月的降雨量显著低于其他月份 ($P < 0.05$)，该时间段 (5 个月) 的降雨总量仅为 368.0 mm，仅占全年降雨量的 23.54%。而降雨量最大值一般出现在 6 月 (226.0 mm)，其次为 8 月 (208.0 mm) 和 7 月 (198.0

mm)。同时6、7、8月3个月的降雨量显著高于其他月份($P < 0.05$),说明研究区存在明显的雨季。基于研究区以上降雨特点,可将5—9月划分为雨季,虽然仅有5个月,但降雨量占全年降雨量的60.04%,其余时间段为非雨季。

2.2 西苕溪流域时间尺度上氮素动态分异

随着时间的变化,西苕溪流域水体氮素质量浓度在一定程度上呈下降趋势(图2)。对水体氮素研究发现:2016和2017年采样点水体均属于劣V类水。2016年平均水体氮素质量浓度最大值出现在流域东北部晓墅采样点($7.01 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$),而西南部赋石水库($2.19 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)和老石坎水库($2.12 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)年均水体氮素质量浓度虽然也属于劣V类水,但质量浓度远低于晓墅。2017年西苕溪流域年均水体氮素质量浓度为 $2.45 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,比2016年平均水体氮素质量浓度降低23.20%。其中氮素质量浓度最低值出现在流域西南部的章村长潭和中部的中村桥,分别为 2.08 和 $2.15 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。而同样位于流域中部的递铺却出现氮素质量浓度的最大值($3.02 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)。2018年的水体同样属于劣V类水。与2017年类似,2018年氮素质量浓度的最大值还是出现在流域中部的递铺,超过V类水标准的60%。而2019年的采样点水体则均为V类水,水体氮素质量浓度有所下降,平均水体氮素质量浓度为 $1.74 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,与2018年相比减少32.56%,流域整体水环境有所好转。其中位于流域西南部的老石坎水库和赋石水库平均氮素质量浓度分别为 1.55 和 $1.51 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,已非常接近IV类水标准($\leq 1.50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)。



基于自然资源部标准地图服务网站GS(2020)3189号的标准地图制作,底图边界无修改。

图2 西苕溪流域不同采样点的水质特征

Figure 2 Water quality characteristics of different sampling points in Xitiaoxi Watershed

随后在 2020 年水质进一步提升, 流域西南部的老石坎水库和赋石水库平均氮素质量浓度仅为 $1.01 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 仅比Ⅲ类水标准高 1.00%。2021 年流域水质虽有所下降, 但平均氮素质量浓度为 $1.63 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 与 2016 年相比仍减少了 48.90%。2022 年水质同样有所反弹, 在流域中下游人口聚集的横塘村, 平均氮素质量浓度超过 V 类水标准的 15.00%, 属于污染严重的劣 V 类水。而在 2023 年水质明显提升, 水体平均氮素质量浓度为 $1.32 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 总体属于Ⅳ类水标准。其中老石坎水库和赋石水库平均氮素质量浓度均低于 $1.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 符合Ⅲ类水标准(集中式生活饮用水地表水源地二级保护区)。

总体而言, 西苕溪流域水体污染物氮素平均质量浓度由 2016 年的 $3.19 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 降至 2023 年的 $1.32 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 流域水质优化趋势明显。

2.3 西苕溪流域空间尺度上氮素动态变化特征

该流域内河流的流向大多为自西南流向东北, 流域水体氮污染则呈现中部及东北部污染严重, 而西南部源头地区水质较好的情况。2016 年, 流域水体整体呈劣 V 类水(图 2), 但东北部的水体氮素质量浓度高于其他地区, 氮素质量浓度为 $5.75 \sim 9.09 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 超过 V 类水标准的 2.88~4.55 倍。西南部水体虽然同样为劣 V 类水, 但年均水体氮素质量浓度仅比 V 类水标准高 5.50%, 水质优于其他地区。

与 2016 年类似, 2017 和 2018 年流域水体整体为劣 V 类水, 但西南部地区年均水体氮素质量浓度较低, 同时该区约 1/4 至 1/3 的时间水质符合 V 类水标准。而中部地区水质相对较差, 氮素质量浓度超出 V 类水标准约 50.00%。

在 2019 年, 流域内各采样点水体氮素质量浓度均符合 V 类水标准, 且各采样点之间水体氮素质量浓度不存在显著差异。但总体而言依然呈现中部水质污染严重, 西南部水质较好的特征。位于中部地区的孝丰采样点平均水体氮素质量浓度最高, 为 $1.97 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 且该采样点水质在本年度内有一半时间属于劣 V 类水。中部地区的塘浦采样点, 年内水体氮素质量浓度最大值出现在 2 月, 为 $4.17 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 是 V 类水标准的 2.09 倍。而在流域西南部的老石坎采样点年均水体氮素质量浓度为 $1.51 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 仅超过Ⅳ类水标准的 0.67%, 且个别时期水质符合Ⅲ类水标准, 水质状况相对较好。

在 2020 年, 位于流域东北部出口处的水体氮素质量浓度依然为 V 类水, 氮污染依然严重。而位于西南部的赋石水库和老石坎水库采样点氮素质量浓度分别为 1.01 、 $1.02 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 非常接近Ⅲ类水标准, 甚至个别时间点老石坎水库采样点氮素质量浓度 ($0.48 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 达Ⅱ类标准 ($\leq 0.50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)。

2021 和 2022 年流域氮素空间分布相近。虽然流域 50% 的采样点符合Ⅳ类水要求, 但东北部地区水体出现水质恶化情况, 水体氮素质量浓度由 V 类水上升至劣 V 类水, 水污染更加严重。与 2020 年类似, 位于流域西南部地区的赋石水库采样点和老石坎水库水质状况相对较好。而在 2023 年流域水质明显好转, 除位于流域中下游仍属劣 V 类水外, 其他区域水质明显提升, 特别是上游西南部, 水质已符合Ⅲ类水标准。

可见, 流域水体氮素质量浓度年际间存在一定变化, 流域西南部上游地区水质较好, 中部及东北部下游地区水质较差。

2.4 基于流域尺度分析的水库型水源地氮素动态变化

2.4.1 水库型水源地水体氮素时间变化特征 研究区存在多处典型的水库型水源地, 其中浙北地区最大的赋石水库型水源地也位于研究区内, 并且流域水质总体上呈优化趋势。基于这些情况, 本研究选取研究期开始的 2016 年与研究期结束的 2023 年, 进一步探究水库型水源地水体氮素的动态变化特征。

与流域整体水质类似, 水库型水源地水体氮素质量浓度在 2016 年总体偏高(图 3), 4 座水库型水源地水体氮素质量浓度均超过 $2.00 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 属于劣 V 类水。其中, 凤凰水库水质最差, 年均水体氮素质量浓度为 $2.96 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。非雨季 10 月的水体氮素质量浓度最高, 为 $3.76 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 其次为非雨季 1 月 ($3.39 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)。而在雨季 8、9 月的水体氮素质量浓度最低, 分别为 2.32 和 $2.35 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。流域内水体氮素质量浓度最低为老石坎水库, 年均水体氮素质量浓度仅为 $2.12 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 其次为赋石水库 ($2.19 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)。流域内水体氮素质量浓度最低值出现在赋石水库雨季的 8 月, 仅为 $1.54 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 其次为老石坎水库雨季的 8 月 ($1.58 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)。此外在雨季的 3 和 9 月, 赋石水库和老石坎水库的水体氮素质量浓度均低于 $2.00 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。可见, 2016 年流域内整体水体氮素质量浓度较高。但水体氮素质量浓度雨季较低, 非雨季较

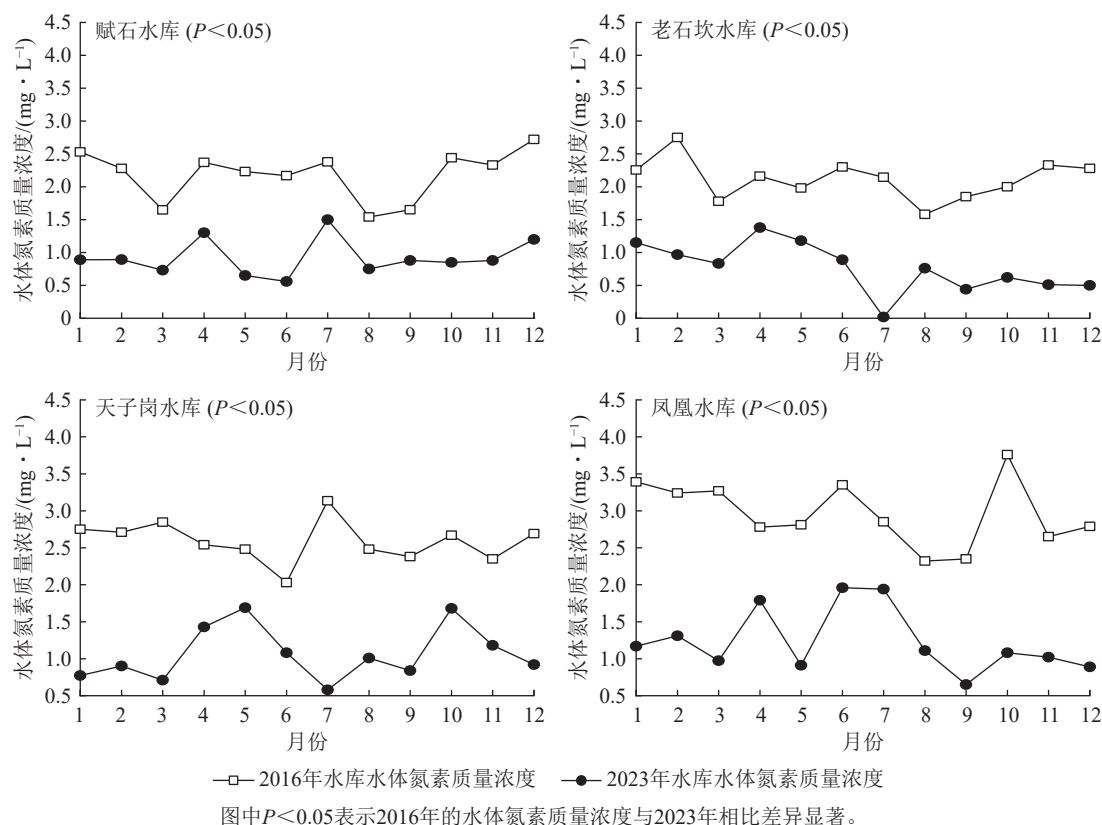


图3 2016和2023年西苕溪流域水库型水源地水体氮素动态变化

Figure 3 Dynamic changes of water nitrogen in reservoir type water source in Xitiaoxi Watershed in 2016 and 2023

高。这可能是由于雨季降雨量大,产流较多,在一定程度上稀释了氮素。

与2016年相比,2023年水库型水源地平均水体氮素质量浓度显著下降($P<0.05$)。2023年赋石水库、老石坎水库、天子岗水库以及凤凰水库的水体平均氮素质量浓度分别为 0.93 、 0.77 、 1.07 以及 $1.29 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,水质均优于2016年。然而不同于2016年,2023年赋石水库氮素质量浓度最大值出现在雨季的7月($1.50 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)。而在非雨季,如1、2、3月,水体氮素质量浓度分别为 0.89 、 0.89 及 $0.73 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,均小于 $1.00 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。2023年老石坎水库水体氮素质量浓度最大值出现在非雨季的4月($1.38 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$),氮素质量浓度最低值出现在雨季的7月,仅为 $0.02 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,已达Ⅰ类水标准,与4月相比氮素质量浓度降低。这可能是因为雨季降雨增多,产流增大,从而稀释了水体的氮素。

2.4.2 降雨对水库型水源地水体氮素的影响 由图4可以看出:不论是雨季还是非雨季,水库水体氮素质量浓度均与降雨量呈正相关。雨季赋石水库、老石坎水库、天子岗水库以及凤凰水库氮素质量浓度与降雨量的相关系数分别为 0.83 、 0.43 、 0.48 以及 0.45 ,均高于非雨季各水库与降雨量的相关系数。

在季节尺度上(雨季和非雨季)水库氮素质量浓度均与降雨量呈正相关,但在全年尺度上水库氮素质量浓度却与降雨量呈负相关,其中老石坎水库、天子岗水库以及凤凰水库与降雨量的相关系数分别为 -0.30 、 -0.13 、 -0.18 。

3 讨论

本研究中,无论雨季还是非雨季,水库型水源地水体氮素质量浓度与降雨量呈正相关,但在全年尺度上水体氮素质量浓度却与降雨量呈负相关。这可能是因为,在季节尺度上,随着降雨量的增加,雨水对地表冲刷增强,导致更多的土壤氮素等面源污染物随径流迁移进入水体,使水体氮素质量浓度上升。同时,雨季降雨量大,导致雨季水体氮素质量浓度与降雨量具有更高的相关这一结果也验证了这一猜想。在研究区周边,连心桥等^[19]研究发现:当经历由台风导致的高强降雨后,太湖流域西岸水体中营养盐质量浓度显著上升。曾杰等^[20]则指出:持续性的多日降雨能够导致更加严重的水体氮污染。薛鹏程等^[21]在洱海地区通过人工模拟降雨发现:在 $20 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 雨强条件下,降雨量由0增加至20 mm这一过程中,

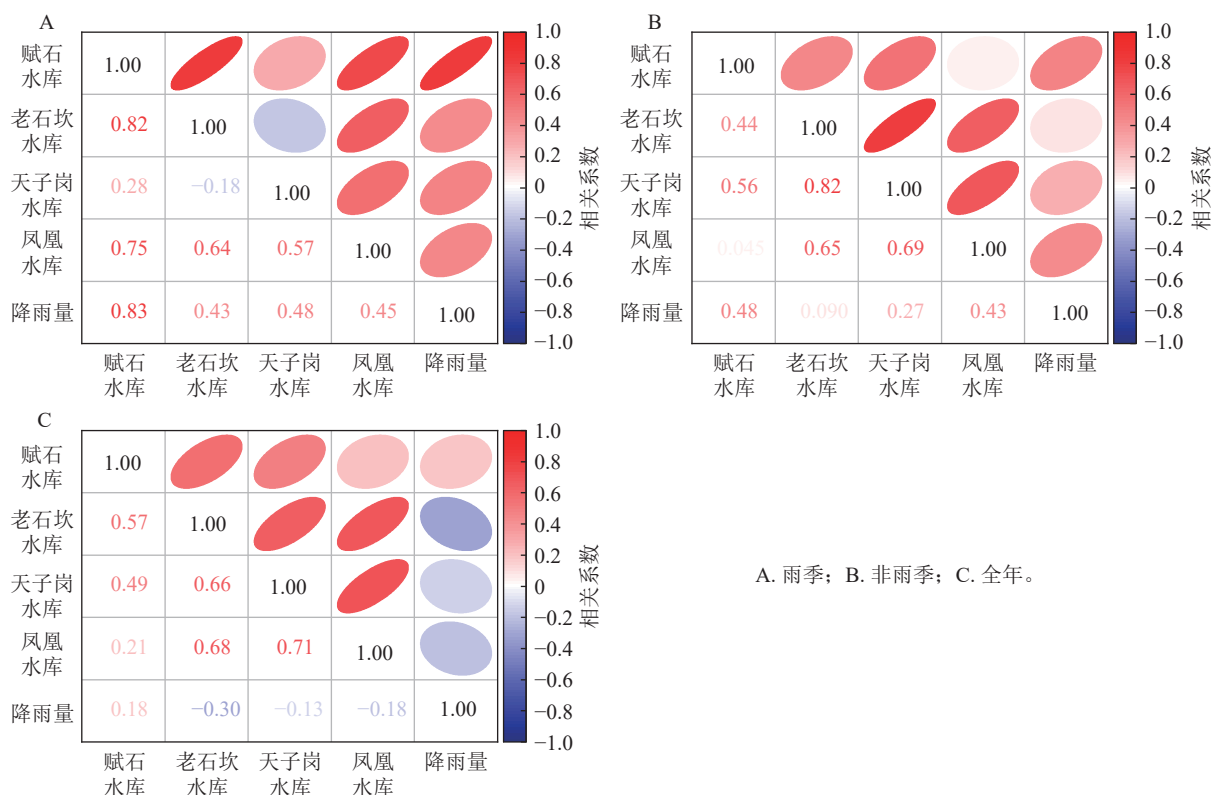


图 4 降雨与不同水库型水源地水体氮素的相关性

Figure 4 Correlation between rainfall and water nitrogen in different reservoir-type water sources

水体氮素质量浓度逐渐升高，这都与本研究结果类似。可见，随着降雨量的增加，降雨对地表冲刷增强，使更多土壤颗粒携带氮磷等污染物进入水体，从而导致氮素质量浓度升高。

在全年尺度上，雨季降雨量大，但由于稀释作用使水体氮素质量浓度较低，出现了雨季降雨量大氮素质量浓度低，而非雨季降雨量少，氮素质量浓度高这一现象，使得全年尺度上水体氮素质量浓度与降雨量呈负相关。本研究中，水库型水源地雨季水体氮素质量浓度一般低于非雨季的现象也证实了这一观点。在研究区西苕溪流域周边的东苕溪流域，相关研究人员同样发现水体氮素质量浓度存在雨季低，非雨季高的特点^[22]。同样是在太湖流域，连慧妹等^[23]研究发现：在降雨较为集中的夏秋季节，水体氮素质量浓度较低，如 2011 年 7 月降雨量最大，水体氮素质量浓度最小；而降雨较少的秋冬季，水体氮素质量浓度较高。在 ZHANG 等^[24]和 SHI 等^[25]研究中也得到了类似的结果。这进一步验证了本研究的推测，即雨季降雨量大，导致径流量增大，稀释了水体中的氮素。

综上，降雨对水体氮素质量浓度的影响主要体现在 2 个方面：①雨季能够通过增加径流量稀释水体中的氮素，而非雨季降雨量少，氮素质量浓度高，使得在全年尺度上水体氮素质量浓度与降雨量呈负相关；②降雨量增加导致对地表的持续冲刷，易产生更加严重的水土流失，进而增加水体中污染物含量，使得季节尺度上水体氮素质量浓度与降雨量呈正相关。可见，在不同的时间尺度下，水体氮素质量浓度对降雨有不同的响应特征。

当前对于水体氮磷调控的研究主要分为 3 个部分：①源头控制，如优化耕作措施，减少施肥量^[26]；②过程拦截，如修建生态渠在径流迁移过程中减少氮磷污染物^[27]；③末端处理，如通过水生植物吸收氮磷物质，从而缓解水体氮磷污染^[28-29]。本研究仅对研究区内水体氮素质量浓度进行监测，尚未开展流域水体氮磷污染调控的研究。因而下一步将从源头、过程以及末端 3 个方面出发，多管齐下改善流域水环境。

4 结论

本研究表明：2016—2023 年西苕溪流域水质总体转好，且水体氮素时空分异明显。雨季降雨量大，水体氮素质量浓度较低，而非雨季氮素质量浓度较高，水质较差。从空间分布来看，流域西南部上游水质较好，而东北部下游由于人类活动扰动水质较差。因此，在掌握水体氮污染时空分异的基础上，应进

一步探究水体氮磷的最佳调控措施,从源头上降低水体氮磷污染。

5 参考文献

- [1] KANTER D R, BARTOLINI F, KUGELBERG S, *et al.* Nitrogen pollution policy beyond the farm [J]. *Nature Food*, 2019, 1(1): 27–32.
- [2] CHEN Wenjun, HE Bin, NOVER D, *et al.* Spatiotemporal patterns and source attribution of nitrogen pollution in a typical headwater agricultural watershed in southeastern China [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2018, 25(3): 2756–2773.
- [3] BERGER M, CANTY S W J, TUHOLSKE C, *et al.* Sources and discharge of nitrogen pollution from agriculture and wastewater in the Mesoamerican Reef region[J/OL]. *Ocean & Coastal Management*, 2022, 227: 106269[2024-06-01]. DOI: 10.1016/j.ocecoaman.2022.106269.
- [4] SCHULTE-UEBBING L F, BEUSEN A W, BOUWMAN A F, *et al.* From planetary to regional boundaries for agricultural nitrogen pollution [J]. *Nature*, 2022, 610(7932): 507–512.
- [5] KANTER D R, SEARCHINGER T D. A technology-forcing approach to reduce nitrogen pollution [J]. *Nature Sustainability*, 2018, 1(10): 544–552.
- [6] 周佳林, 段婧婧, 王宁, 等. 陆生蔬菜浮床对富营养化水体氮磷的去除以及水体、根系细菌群落分析[J]. 生态与农村环境学报, 2024, 40(1): 107–118.
ZHOU Jialin, DUAN Jingjing, WANG Ning, *et al.* The removal of N and P by terrestrial vegetable floating beds in eutrophic waters and the microbiological analysis of water and root system [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2024, 40(1): 107–118.
- [7] 王诗绘, 马玉坤, 沈珍瑶. 氮氧稳定同位素技术用于水体中硝酸盐污染来源解析方面的研究进展[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2021, 57(1): 36–42.
WANG Shihui, MA Yukun, SHEN Zhenyao. Identification of nitrate source in receiving water with dual NO_3 -isotopes [$\delta(^{15}\text{N})$ and $\delta(^{18}\text{O})$] [J]. *Journal of Beijing Normal University (Natural Science)*, 2021, 57(1): 36–42.
- [8] 田寒梅, 盛欣, 王冰, 等. 2014—2019年某市农村地区自备井水中硝酸盐含量及影响因素分析[J]. 环境卫生学杂志, 2021, 11(5): 415–419.
TIAN Hanmei, SHENG Xin, WANG Bing, *et al.* Content of nitrates and its influencing factors in well water in rural areas of a city, 2014–2019 [J]. *Journal of Environmental Hygiene*, 2021, 11(5): 415–419.
- [9] 何锦, 马雪梅, 邓启军, 等. 河北新生代玄武岩地下水中硝酸盐成因及健康风险评估[J/OL]. 中国地质, 2023-05-10[2024-06-01]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1167.P.20230510.1250.002.html>.
HE Jin, MA Xuemei, DENG Qijun, *et al.* Spatial distribution, origin, and health risk assessment of nitrate in groundwater of Cenozoic basalts in Zhangbei County, Hebei Province[J/OL]. *Geology in China*, 2023-05-10[2024-06-01]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1167.P.20230510.1250.002.html>.
- [10] 杨丽, 何腾霞, 张漫漫, 等. 好氧反硝化细菌碳氮代谢特点及途径的研究进展[J]. 微生物学报, 2022, 62(12): 4781–4797.
YANG Li, HE Tengxia, ZHANG Manman, *et al.* Research progress in the characteristics and pathways of carbon and nitrogen metabolism of aerobic denitrifying bacteria [J]. *Acta Microbiologica Sinica*, 2022, 62(12): 4781–4797.
- [11] ZOU Lilin, LIU Yansui, WANG Yongsheng, *et al.* Assessment and analysis of agricultural non-point source pollution loads in China: 1978–2017[J/OL]. *Journal of Environmental Management*, 2020, 263: 110400[2024-06-01]. DOI: 10.1016/j.jenvman.2020.110400.
- [12] WANG Rongjia, WANG Qingbing, DONG Linshui, *et al.* Cleaner agricultural production in drinking-water source areas for the control of non-point source pollution in China[J/OL]. *Journal of Environmental Management*, 2021, 285: 112096[2024-06-01]. DOI: 10.1016/j.jenvman.2021.112096.
- [13] 戴秀丽, 钱佩琪, 叶凉, 等. 太湖水体氮、磷浓度演变趋势(1985—2015年)[J]. 湖泊科学, 2016, 28(5): 935–943.
DAI Xiuli, QIAN Peiqi, YE Liang, *et al.* Changes in nitrogen and phosphorus concentrations in Lake Taihu, 1985–2015 [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2016, 28(5): 935–943.
- [14] 杨佳磊, 张瑞, 张银意, 等. 1980—2018年太湖流域非点源氮磷负荷变化研究[J]. 环境保护科学, 2022, 48(6): 93–101.
YANG Jialei, ZHANG Rui, ZHANG Yinyi, *et al.* Study on change of non-point source nitrogen and phosphorus load in Taihu Lake Basin from 1980 to 2018 [J]. *Environmental Protection Science*, 2022, 48(6): 93–101.
- [15] WANG Rongjia, ZHANG Jianfeng, CAI Chunju, *et al.* How to control nitrogen and phosphorus loss during runoff process? –

- a case study at Fushi Reservoir in Anji County (China)[J/OL]. *Ecological Indicators*, 2023, **155**: 111007[2024-06-01]. DOI: [10.1016/j.ecolind.2023.111007](https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2023.111007).
- [16] 秦伯强. 水域生态系统过程与变化[M]. 北京: 高等教育出版社, 2019.
QIN Boqiang. *Aquatic Ecosystem Processes and Changes* [M]. Beijing: Higher Education Press, 2019.
- [17] WANG Rongjia, ZHANG Jianfeng, CAI Chunju, *et al.* Mechanism of nitrogen loss driven by soil and water erosion in water source areas [J]. *Journal of Forestry Research*, 2023, **34**(6): 1985–1995.
- [18] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1999: 28–35.
LU Rukun. *Methods for Agricultural Chemical Analysis of Soil* [M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 1999: 28–35.
- [19] 连心桥, 朱广伟, 杨文斌, 等. 强降雨对平原河网区入湖河道氮、磷影响[J]. 环境科学, 2020, **41**(11): 4970–4980.
LIAN Xinqiao, ZHU Guangwei, YANG Wenbin, *et al.* Effect of heavy rainfall on nitrogen and phosphorus concentrations in rivers at river-net plain [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(11): 4970–4980.
- [20] 曾杰, 吴起鑫, 李思亮, 等. 雨季喀斯特小流域氮输出特征及其受降雨的影响[J]. 水土保持学报, 2017, **31**(3): 73–78.
ZENG Jie, WU Qixin, LI Siliang, *et al.* Characteristics of nitrogen export and the effects of rainfall during the rainy season in a karst small catchment [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2017, **31**(3): 73–78.
- [21] 薛鹏程, 庞燕, 项颂, 等. 模拟降雨条件下农田氮素径流流失特征研究[J]. 农业环境科学学报, 2017, **36**(7): 1362–1368.
XUE Pengcheng, PANG Yan, XIANG Song, *et al.* Nitrogen loss characteristics of farmland runoff under simulated precipitation conditions [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, **36**(7): 1362–1368.
- [22] 范雅双, 于婉晴, 张婧, 等. 太湖上游水源区河流水质对景观格局变化的响应关系——以东苕溪上游为例[J]. 湖泊科学, 2021, **33**(5): 1478–1489.
FAN Yashuang, YU Wanqing, ZHANG Jing, *et al.* Response of water quality to landscape pattern change in the water source area of upper reaches of Lake Taihu: a case study in the upper reaches of Dongtiaoxi River [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2021, **33**(5): 1478–1489.
- [23] 连慧妹, 刘宏斌, 李旭东, 等. 典型入湖河流水体氮素变化特征及其对降雨的响应: 以太湖乌溪港为例[J]. 环境科学, 2017, **38**(12): 5047–5055.
LIAN Huishu, LIU Hongbin, LI Xudong, *et al.* Characteristics of nitrogen variation and its response to rainfall: a case study in Wuxi Port at Taihu Lake basin [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(12): 5047–5055.
- [24] ZHANG Jing, LI Siyue, JIANG Changsheng. Effects of land use on water quality in a River Basin (Daning) of the Three Gorges Reservoir Area, China: watershed versus riparian zone[J/OL]. *Ecological Indicators*, 2020, **113**: 106226[2024-06-01]. DOI: [10.1016/j.ecolind.2020.106226](https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106226).
- [25] SHI Peng, ZHANG Yan, LI Zhanbin, *et al.* Influence of land use and land cover patterns on seasonal water quality at multi-spatial scales [J]. *CATENA*, 2017, **151**: 182–190.
- [26] 张崑, 徐坚, 鲁长根, 等. 不同施肥对稻-菜种植模式氮磷吸收及径流流失的影响[J]. 浙江农林大学学报, 2021, **38**(4): 784–791.
ZHANG Kun, XU Jian, LU Changgen, *et al.* Effects of different fertilizer types on nitrogen and phosphorus nutrient absorption and runoff loss in rice-vegetable rotation system [J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2021, **38**(4): 784–791.
- [27] 杨旭斌, 邵建均, 应珊珊, 等. 浙江省生态沟渠对农业面源污染物的去除效果[J]. 浙江农林大学学报, 2024, **41**(6): 1233–1241.
YANG Xubin, SHAO Jianjun, YING Shanshan, *et al.* Removal effect of ecological ditches on agricultural non-point source pollutants in Zhejiang Province [J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2024, **41**(6): 1233–1241.
- [28] 刘伸伸, 张震, 何金铃, 等. 水生植物对氮磷及重金属污染水体的净化作用[J]. 浙江农林大学学报, 2016, **33**(5): 910–919.
LIU Shenshen, ZHANG Zhen, HE Jinling, *et al.* Purification effect of aquatic plants on nitrogen, phosphorus and heavy metal polluted water [J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2016, **33**(5): 910–919.
- [29] 龚苗苗, 蔡飞翔, 姜培坤, 等. 沉水植物型生态净化系统处理农田退水的总磷去除动力学研究[J]. 浙江农林大学学报, 2022, **39**(1): 136–145.
GONG Miaomiao, CAI Feixiang, JIANG Peikun, *et al.* Kinetic modeling of total phosphorus removal from farmland drainage with submerged macrophyte-type ecological purification system [J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2022, **39**(1): 136–145.