

城镇水系统全流程水质监测技术专栏

李涛, 杨斌, 石亚东, 等. 太湖东部水域总硬度变化规律与影响因素[J]. 净水技术, 2025, 44(9): 186–195.

LI T, YANG B, SHI Y D, et al. Variation regularity and influencing factors of total hardness in eastern region of Taihu Lake[J]. Water Purification Technology, 2025, 44(9): 186–195.

太湖东部水域总硬度变化规律与影响因素

李 涛¹, 杨 斌^{2,*}, 石亚东^{1,*}, 顾 琳³, 陆 遥³, 范子武⁴

(1. 太湖流域水文水资源监测中心, 水利部太湖流域水治理重点实验室, 江苏无锡 214024; 2. 水利部太湖流域管理局, 上海 200434; 3. 无锡市水务集团有限公司, 江苏无锡 214031; 4. 南京水利科学研究院, 江苏南京 210024)

摘 要 【目的】 饮用水总硬度及“水垢”问题是近期社会公众关注的热点话题。摸清太湖东部水域原水总硬度含量水平及变化规律, 分析影响其波动变化的主要因素, 对于保障流域供水安全具有重要意义。【方法】 基于 2020 年 1 月—2023 年 12 月太湖东部水域 6 个代表站点的水质监测数据, 分析太湖东部水域总硬度变化规律和评价水质分析, 采用 Pearson 相关性分析、主成分分析等方法, 对太湖东部水域总硬度时空变化规律及其与降雨、太湖水位、入湖河道总硬度输入等因素的响应关系进行了研究。【结果】 太湖东部水域水源总硬度浓度在国内地表水源中总体处于中等偏下水平, 月均质量浓度为 78~164 mg/L, 平均质量浓度为 123 mg/L, 符合《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2022) 和苏州市水务局印发的《苏州市生活饮用水水质指标限值》限值要求。各站点总硬度无显著年际变化规律, 年内呈现呈先增高后降低的周期性变化规律, 最大值出现在 4 月前后, 最小值出现在 9 月前后。【结论】 湖西区入湖河道外源输入和降雨量是影响太湖东部水域总硬度变化的关键。2022 年下半年—2023 年上半年总硬度略高于往年同期, 可能与 2022 年流域极端高温干旱导致的降雨和入湖水量减少以及太湖草藻生境变化等因素有关。

关键词 太湖 原水 总硬度 电导率 时空变化

中图分类号: TU991 **文献标志码:** A **文章编号:** 1009-0177(2025)09-0186-10

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2025.09.023

Variation Regularity and Influencing Factors of Total Hardness in Eastern Region of Taihu Lake

LI Tao¹, YANG Bin^{2,*}, SHI Yadong^{1,*}, GU Lin³, LU Yao³, FAN Ziwu⁴

(1. Taihu Basin Monitoring Center of Hydrology and Water Resources, Key Laboratory of Taihu Basin Water Resources Management and Protection of the Ministry of Water Resources, Wuxi 214024, China;

2. Taihu Basin Authority of Ministry of Water Resources, Shanghai 200434, China;

3. Wuxi Water Group Co., Ltd., Wuxi 214031, China;

4. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210024, China)

Abstract [Objective] The total hardness of drinking water and "scale" of drinking water are becoming the most talked-about topic recently. Investigating the concentration levels and variation patterns of the total hardness in the water of the eastern Taihu Lake, as well as analyzing the main factors influencing its fluctuations is crucial for ensuring the safety of water supply in the basin. [Methods] To assess the water quality in the eastern region of Taihu lake, the total hardness data from January 2020 to December 2023 were collected

[收稿日期] 2023-11-23

[基金项目] 水利部重大科技项目(SKS-2022065, SKS-2022080)

[作者简介] 李涛(1986—), 男, 高级工程师, 研究方向为引江济太与水环境改善, E-mail: litao@tba.gov.cn。

[通信作者] 杨斌(1984—), 男, 高级工程师, E-mail: yangbin@tba.gov.cn。

石亚东(1972—), 男, 正高级工程师, E-mail: shiyadong@tba.gov.cn。

from six typical monitoring stations in Taihu lake. Using pearson correlation analysis and principal component analysis, the spatial-temporal variation characteristics of the total hardness and its response to the rainfall, lake levels and external source were explored in Taihu lake. [Results] Total hardness concentration of water sources in the eastern Taihu Lake area was generally at a medium to low level compared to other surface water sources in China. The monthly average mass concentration of total hardness ranged from 78 mg/L to 164 mg/L, with an average mass concentration of 123 mg/L. These values complied with the limits specified in the *Standards for Drinking Water Quality* (GB 5749—2022) and the *Limit Values for Drinking Water Quality Indicators in Suzhou* issued by the Suzhou Water Authority. No significant interannual variation in total hardness was observed across the sites, while intra-annual variations showed a periodic pattern of first increasing and then decreasing. The peak values generally occurred around April, and the lowest values around September. [Conclusion] External inputs from inflow rivers in the western Taihu Lake region and rainfall are key factors influencing the variation in total hardness in the eastern Taihu Lake area. The slightly higher total hardness observed from the second half of 2022 to the first half of 2023 compared to previous years may be attributed to reduced rainfall and inflow water volume due to extreme high temperatures and drought in the basin in 2022, as well as changes in the aquatic vegetation and algal habitat in Taihu Lake.

Keywords Taihu Lake raw water total hardness electric conductivity spatial-temporal variation

原水总硬度主要是指水中 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 的总称^[1], 根据水中阴离子种类组成可划分为碳酸盐硬度与非碳酸盐硬度 2 种类型^[2]。其中, 碳酸盐硬度以钙、镁的碳酸氢盐为主, 遇热后易形成碳酸盐沉淀, 即所谓的水垢; 非碳酸盐硬度主要包括 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 与硫酸根 (SO_4^{2-})、氯离子 (Cl^-) 和硝酸盐等阴离子结合形成的盐类, 性质相对较为稳定^[3]。自然环境中, 江河湖库水体中的总硬度浓度随着丰枯季节降雨量 and 水位变化、外源污染输入、水生植物类型和分布等影响在一定范围内波动变化, 部分时段水源原水总硬度升高时, 自来水烧水结垢或白色漂浮物略微增多, 可能引起居民的感官视觉误解, 一定程度上降低了居民对饮用水品质的满意度和接受度, 甚至出现合格水与居民日常生活饮水满意度不高的矛盾局面。近年来, 随着长三角区域经济社会的快速发展和居民生活水平的不断提高, 人们对高品质供水的需求与日俱增, 关于饮用水投诉事件时有发生, 其中水垢是居民投诉最多的饮用水问题之一, 大部分情况下多与水中总硬度有关。从营养学角度, 适宜的总硬度是健康水的重要部分, 可以补充人体日常所需的钙、镁等微量元素。舒为群等^[4]通过分析国民膳食结构和饮水途径, 提出了适合我国居民的饮用水总硬度最低可接受水平、适宜水平和上限水平的建议值(分别为 100、250 mg/L 和 450 mg/L)。尽管科研学者从饮食健康角度提出了总硬度的限值建议, 相关媒体对饮用水水垢的常识及其健康风险进行了详细阐述, 但是仍难以完全消除居民对水垢的质疑。

此外, 世界各国或地区针对原水总硬度的限值规定也存在较大差异^[1]。世界卫生组织出版的《饮

用水水质准则》(第四版) 和美国环境保护局印发的《饮用水水质标准》均未对总硬度进行限值规定, 其主要观点为饮用水中的 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 可作为人体微量元素的重要补充来源, 且饮用水中的总硬度浓度尚不足以对人体健康产生不利影响, 故未设置总硬度限值。鉴于各国饮食习惯和膳食模式等方面的差异, 其他国家结合自身实际情况, 因地制宜地对总硬度作出了限值规定, 总体可划分 2 个区间: 一个是总硬度限值为 400~500 mg/L, 例如东南亚的马来西亚、印度尼西亚等, 欧洲的捷克、德国等, 南美阿根廷、巴西及北美加拿大等; 另一个, 总硬度限值位于 200~350 mg/L, 主要是俄罗斯(350 mg/L) 和澳大利亚(200 mg/L) 等国。在借鉴国外饮用水水质标准的基础上, 我国根据国内水源水质处理工艺以及社会经济发展条件, 在《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2022) 中明确了总硬度的限值为 450 mg/L。近年来, 苏州市、上海市等城市结合地区高品质直饮水供水需要先后制定或出台了相应的地方水质标准, 例如上海市《生活饮用水卫生标准》(DB31/T 1091—2018)、苏州市《生活饮用水水质指标限值》《苏州市自来水厂出厂水水质指标限值》等明确了总硬度限值为 250 mg/L, 对总硬度提出了更为严格的限值规定, 相关标准的制定也为区域高品质供水水质管理提供了新的参考依据。

太湖作为流域的水资源调蓄中心与重要饮用水水源地, 开展总硬度变化特征研究对于全面认识太湖水生态环境状况、保障流域供水安全具有重要意义。目前对太湖总硬度变化特征的研究相对较少, 尤其是太湖东部水域总硬度变化规律的

研究未见报道。围绕推进流域高品质饮用水建设和支撑流域或区域高品质生活建设需要,本文收集整理 2020 年—2023 年太湖东部水域无锡市和苏州市不同湖区原水总硬度监测数据,通过统计分析太湖东部水域原水总硬度浓度水平及变化规律,结合水文、气象和环境因子等探讨总硬度变化的影响因素,以期对饮用水水源管理与保护提供基础支撑。

1 材料与方法

1.1 样品采集与预处理

根据太湖流域水系特点,共选取 13 个采样点

(图 1),其中太湖东部水域分为贡湖、东部沿岸区和东太湖 3 个湖区,分别设置了 3、2 个和 1 个监测站点(D1~D6);主要入湖河道中选择了 7 条典型入湖河道布设了监测站点。按照《水环境监测规范》(SL 219—2013)要求,使用有机玻璃采样器采集水下 0.5 m 处水样于聚乙烯塑料瓶中,4 ℃ 低温冷藏保存当日运回实验室待测。太湖湖区(D1~D6)采样时间为 2020 年 1 月—2023 年 12 月,其中湖区监测频次 1 月—4 月每月采集 1~2 次,5 月—9 月每周采集 1 次,10 月—12 月每月采集 2 次。7 条入湖河道监测时间为 2023 年 5 月。

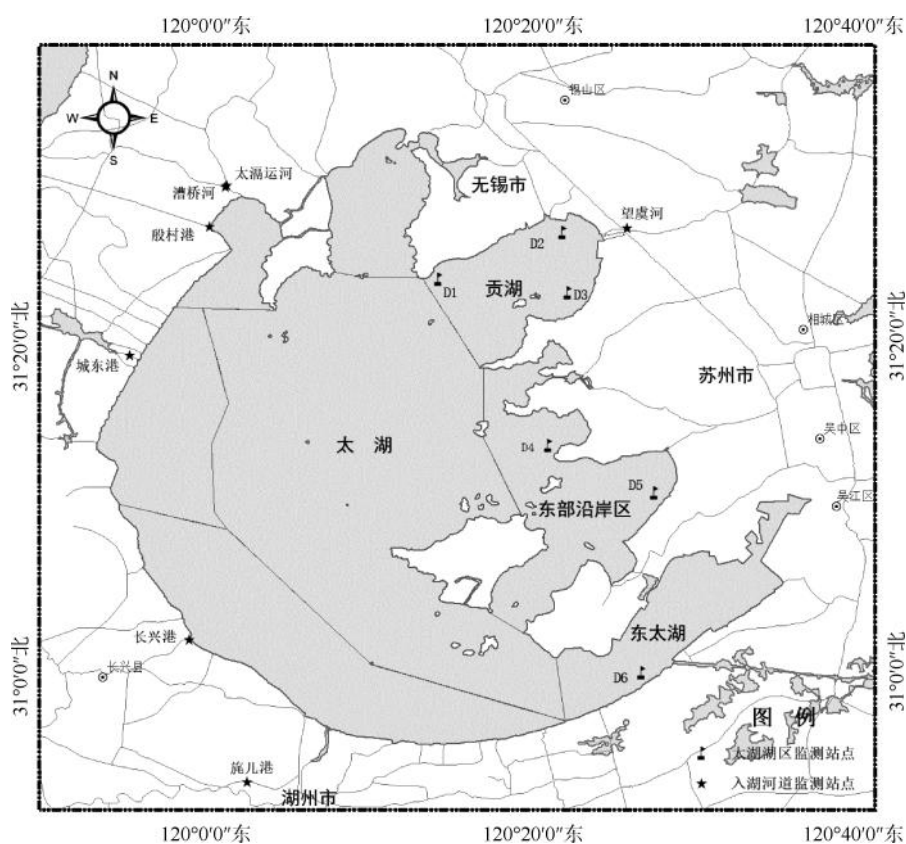


图 1 采样站点分布

Fig. 1 Distribution of Sampling Points

1.2 监测分析与数据收集

湖区 D1~D6 站点监测指标包括 pH、电导率、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、硝酸根(NO_3^-)、总磷(TP)和总氮(TN)等,其中,pH、电导率采用便携式水质分析仪监测, Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 采用离子色谱法进行分析,参照《水中 无机阴离子的测定 离子色谱法》(SL 86—1994)测定,检出限为 0.009~0.015 mg/L,回收率为 95.0%~110.0%。TP 和 TN 测定方法分别为《水质 总磷的

测定 钼酸铵分光光度法》(GB 11893—1989)和《水质 总氮的测定 连续流动-盐酸萘乙二胺分光光度法》(HJ 667—2013)。

入湖河道监测指标包括电导率和总硬度,其中,总硬度监测方法依据《生活饮用水标准检验方法 第 4 部分:感官性状和物理指标方法》(GB/T 5750.4—2023),采用乙二胺四乙酸二钠滴定法进行测定,结果以 CaCO_3 计,单位为 mg/L。

此外,从无锡和苏州相关部门收集 2020 年 1 月—2023 年 12 月总硬度数据月均数据、太湖湖区降雨量、入湖水量数据,太湖水位数据由太湖流域管理局水文遥测系统获取。

1.3 数据统计分析

采用单样本 Kolmogorov-Smirnov 方法进行正态分布检验,若显著性水平 $>5\%$ 表示符合正态分布。因总硬度、阴离子等均不服从正态分布,统计描述两样本比较采用 Mann-Whitney U 检验,相关性分析采用 Spearman 方法, $P<0.05$ 表示差异具有统计学意义。绝对主成分-多元线性回归分析前,对所有样本数据进行极差标准化处理。Bartlett 球形检验,当 KMO 检验值大于 0.50、显著性水平 Sig 小于 0.01 时方可使用。数据统计分析和图表绘图使用 Excel、ArcGIS 10.2、SPSS 23.0、Origin 2024 等软件完成。

2 总硬度时空变化特征

2.1 总硬度浓度评价

根据 2020 年 1 月—2023 年 12 月太湖东部水域原水总硬度统计结果,总硬度月均质量浓度为 78 ~

164 mg/L,年均值为 123 mg/L,符合《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2022)和《苏州市生活饮用水水质指标限值》限值要求。

根据文献^[5-7]报道关于总硬度的监测结果,太湖东部水域原水总硬度浓度明显低于西北干旱地区、西藏青藏高原地区及华北等地区,这可能与北方地下岩石层和土壤中含钙、镁元素的矿物溶解和溶蚀作用导致地下水源总硬度浓度普遍偏高有关;也低于太湖上游洮滹水系总硬度(均值为 166 mg/L)^[8]、京杭大运河^[9](无锡和苏州段)、黄河三角洲区域^[10]、太湖望虞河及太浦河地下水总硬度(190~305 mg/L)^[11];与长江干流^[12]、西江和珠江总硬度基本相当;高于广西山溪水源总硬度,可能是广西山溪来水组成源于大气降水、冰山融水以及少量的浅层地下水的流出,与含钙、镁元素的矿物岩层或土壤接触程度相对偏低所致^[1]。

综合国内其他地区水源总硬度,太湖东部水域原水总硬度在国内水源中处于中等偏下水平,如表 1 所示。

表 1 国内水源总硬度比较
Tab. 1 Comparison of Total Hardness of Water Sources at Home

地区	地点	水源类型	监测时间	总硬度/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)
西北	新疆和田地区	地下水	2017 年	>650
西南	西藏茶卡盆地	地下水	2015 年—2022 年	207~2 127
华北	北京市怀柔区	地下水		270(中位数)
	黄河(三角洲地区)	地表水	2015 年	319
华中	安徽省阜阳市	地下水	2013 年—2017 年	>200
华南	广东省广州市	地表水(西江)	2008 年—2018 年	113 ± 17.8
		地表水(珠江)	2008 年—2018 年	115 ± 34.6
	广西壮族自治区梧州市	地表水	2015 年—2019 年	30
华东	长江干流	地表水	2007 年	129(中位数)
	京杭大运河(无锡和苏州段)	地表水	2019 年—2020 年	185~198
	太湖上游洮滹水系	地表水	2018 年—2021 年	128~224
	望虞河及太浦河	地下水	2018 年	190~305
	太湖(本次调查)	地表水	2020 年—2022 年	78~164

2.2 时空变化特征分析

太湖东部水域总硬度变化趋势如图 2 所示,根据非参数秩和检验,2020 年 1 月—2023 年 12 月原水总硬度时间差异无统计学意义($P>0.05$)。从年际变化规律来看,2020 年—2022 年 D1~D6 站点总硬度平均值总体相当,无显著年际差异,年均值约为 121 mg/L。2023 年太湖总硬度略高于往年,涨幅比

例约为 5%。从年内变化规律来看,总体呈先增高后降低的周期性变化规律,年内最大值出现在 4 月前后,2020 年—2023 年最大值为 130~150 mg/L;年内最小值出现在 8 月—10 月,最小值为 107~120 mg/L。

根据太湖东部水域 D1~D6 站点总硬度统计数据(图 3),2020 年—2023 年总硬度为 78~164 mg/L,

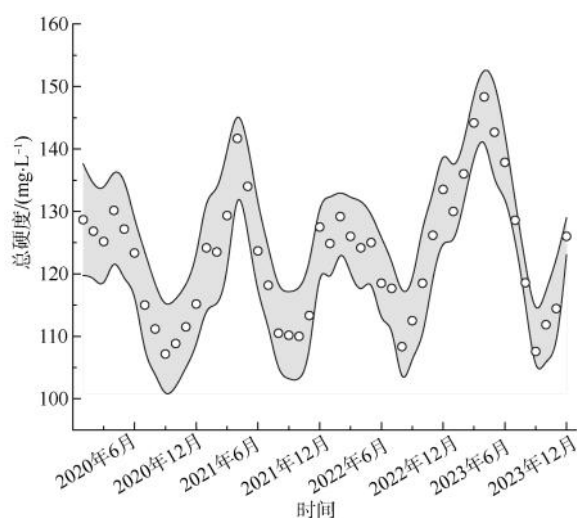


图2 太湖东部水域总硬度变化趋势

Fig. 2 Variations of Total Hardness in Eastern Region of Taihu Lake

6个站点算术平均值为107~148 mg/L,总硬度最大值出现在D3点,最小值为D5点。从空间变化规律来看,根据非参数秩和检验,D1~D6个站点总硬度有显著性差异[检验统计值(F)=28.9, $P<0.001$]。其中D5站点总硬度水平最低,D3站点总硬度水平最高。从各站点所处湖区地理位置来看,东太湖总硬度均值最大,贡湖次之,东部沿岸

区相对最小。

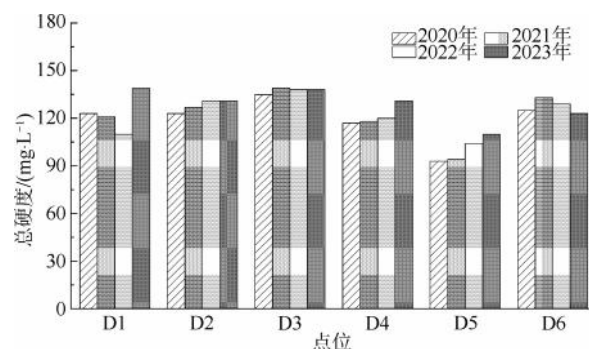


图3 不同点位水体总硬度年际变化

Fig. 3 Interannual Variations of Total Hardness of Different Sampling Points in Taihu Lake

2.3 变化原因分析

2.3.1 相关性分析

相关关系可以通过分析地下水水化学组分间的相似性,判断水化学组分中的离子是否为同一来源或具有相近的迁移转化途径^[12]。据此,结合太湖东部水域原水总硬度、pH、电导率、 SO_4^{2-} 、 Cl^- 、硝酸盐氮、藻类密度、叶绿素a、TP、TN、透明度(SD)、悬浮颗粒物(SS)、太湖水位、入湖水量等进行相关性统计分析(图4)。

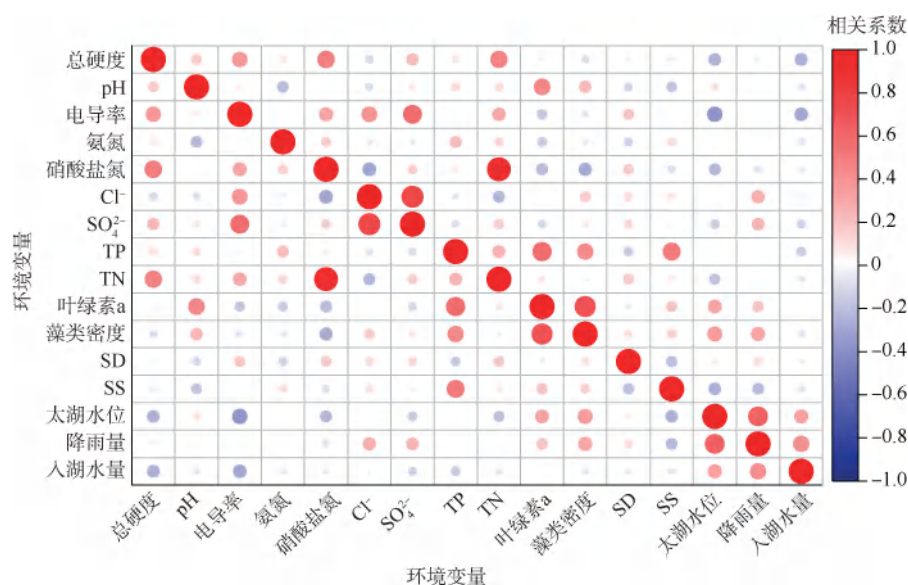


图4 总硬度与环境变量之间的相关性统计

Fig. 4 Correlation statistics between Total Hardness and Environment Variables

根据相关性统计结果(图4),总硬度与硝酸盐氮、TN、电导率等呈正相关($R_{\text{NO}_3^-}=0.49$, $P<0.01$; $R_{\text{TN}}=0.48$, $P<0.01$; $R_{\text{电导率}}=0.37$, $P<0.01$),说明

太湖总硬度与硝酸盐氮、TN、电导率等水质指标浓度变化规律总体相近,一定程度上说明总硬度受外源污染输入影响较大。此外,总硬度与太湖水位和

入湖水量呈负相关 ($R_{\text{太湖水位}} = -0.25$, $P < 0.01$; $R_{\text{入湖水量}} = -0.26$, $P < 0.01$), 这表明 2020 年—2023 年太湖湖区入湖水量、太湖水位变化对太湖总硬度浓度有一定影响。降雨量较大时段, 同期总硬度浓度呈下降趋势; 反之, 降雨量偏少, 总硬度升高。根据相关性分析结果, 总体说明总硬度浓度变化与环太湖河道外源污染输入和降雨、入湖水量等有一定关联。

2.3.2 因子分析

经 KMO 度量及 Bartlett 球形度检验, KMO 测度为 0.610, 大于临界值 0.60, Bartlett 球形度检验近似卡方为 2 325, 自由度 (df) 为 105, 显著性水平 Sig 小于 0.01, 表明变量之间有较强的相关关系, 适合开展因子分析。根据特征值大于 1 的计算结果 (表 2), 共提取 6 个主成分, 累积方差贡献率为 79.4% (表 3), 可以较好地反映太湖水质状况。

表 2 主成分旋转因子载荷矩阵

指标	PCA1	PCA2	PCA3	PCA4	PCA5	PCA6
总硬度	0.707	-0.037	0.202	-0.090	0.161	-0.258
pH	0.154	0.102	-0.004	0.075	0.826	-0.207
电导率	0.367	-0.037	0.707	-0.247	0.050	0.083
氨氮	0.240	0.105	-0.045	0.137	-0.629	-0.393
硝酸盐氮	0.928	-0.101	-0.037	-0.100	-0.111	0.124
Cl ⁻	-0.316	0.051	0.871	0.113	-0.072	0.080
SO ₄ ²⁻	0.141	-0.069	0.912	0.071	0.037	0.008
TP	0.193	0.858	-0.088	0.015	-0.053	-0.165
TN	0.911	0.187	-0.010	-0.054	-0.019	0.154
叶绿素 a	-0.037	0.735	-0.104	0.297	0.477	-0.006
藻类密度	-0.122	0.664	0.109	0.454	0.275	0.128
SD	0.110	-0.099	0.107	0.082	-0.035	0.891
SS	-0.095	0.708	0.048	-0.367	-0.315	-0.077
水位	-0.175	0.014	-0.191	0.869	0.051	0.001
入湖水量	-0.036	0.070	0.177	0.846	-0.049	0.051

注: 载荷绝对值>0.7 表示限值相关。

表 3 主成分旋转因子矩阵特征值

项目	PCA1	PCA2	PCA3	PCA4	PCA5	PCA6
特征值	3.051	2.521	2.276	1.691	1.331	1.033
方差贡献率	20.3%	16.8%	15.2%	11.3%	8.9%	6.9%
累计方差贡献率	20.3%	37.2%	52.3%	63.6%	72.5%	79.4%

PCA1 方差贡献率为 20.3%, 贡献比例最高, 与其关系密切的指标为总硬度、TN 和硝酸盐氮, 载荷绝对值为 0.707~0.928, 表征氮素营养盐指标; PCA2 方差贡献率为 16.8%, 与其关系密切的指标是 TP、叶绿素 a 和 SS, 载荷绝对值为 0.708~0.858, 进一步反映太湖磷和富营养化的影响; PCA3 方差贡献率为 15.2%, 与其关系密切的指标为 Cl⁻、SO₄²⁻, 该指标表征了外源入湖河道输入情况; PCA4 方差贡献率为 11.3%, 主要关联因子有太湖水位和入湖水量, 表征水文状况对太湖的影响; PCA5 和 PCA6 方差贡献率分别为 8.9% 和 6.9%, 对应的主要因子有 pH 和 SD, 总体反映了太湖湖体酸碱条件和湖泊富营养化的影响。综合主成分分析结果来看, 影响太湖水环境状况的指标主要有 TN、硝酸盐氮、TP、透明度等指标, 与已有研究结论总体一致^[13]。

2.3.3 总硬度变化原因分析

湖泊总硬度变化的影响因素较为复杂, 外部因素主要包括大气降水、入湖河道径流汇入及人类活动排污影响等; 内部因素主要包括湖面蒸发导致湖水 Ca²⁺、Mg²⁺ 浓度升高、水生生物吸收利用、发生沉淀反应进入底泥及底泥中 Ca²⁺、Mg²⁺ 释放进入水体等^[14]。太湖东部水域原水总硬度的季节变化规律与入湖河道外源输入、沉水植物类型与分布范围、藻类空间变化等有关。结合相关性和因子分析结果, 从外源河道输入、降雨和太湖生境变化等方面进行综合分析讨论太湖总硬度变化的影响。

(1) 湖西区入湖河道是太湖东部水域原水总硬度的主要输入来源

环太湖入湖河道入湖水质是影响太湖水环境状况的关键^[15]。受人为活动、地质状况等影响, 不同河道水化学离子特征存在一定的空间差异。根据 2023 年 5 月入湖河道总硬度监测结果 (图 5), 湖西区入湖河道浓度明显高于其他区域入湖河道, 其中湖西区太溇运河、漕桥河、殷村港和城东港总硬度均值为 151 mg/L; 浙西区长兴港和旌儿港次之, 均值为 142 mg/L; 望虞河浓度最小, 引江济太期间入太湖均值为 123 mg/L。同期入湖河道总硬度相比, 湖西区入湖河道总硬度最大, 明显高于其他区域入湖河道。此外, Ma 等^[13]对太湖上游地区 60 年长序列水化学数据进行分析, 也发现湖西区入湖河道 Ca²⁺ 和 Mg²⁺ 等主要离子浓度明显高于浙西区入湖河道和太湖湖区。虽然本研究仅在汛期 5 月开展了 1 次

监测环太湖河道总硬度,但是环太湖河道总硬度的空间差异特征与 Ma 等^[13]的研究成果总体一致。略显遗憾,本研究未开展非汛期时段环太湖河道总硬度监测,结合 Ma 等^[13]针对环太湖河道长期全面的研究成果作为补充,一定程度上也说明湖西区入湖河道是太湖东部水域原水总硬度的主要输入来源。

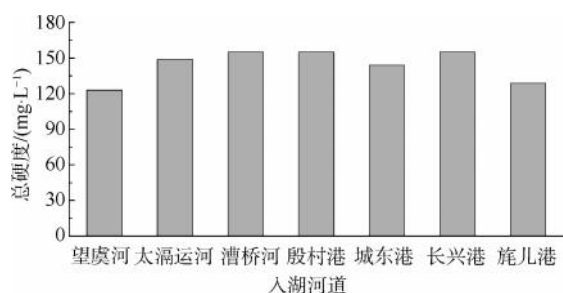


图 5 入湖河道总硬度比较

Fig. 5 Comparison of Total Hardness of Main Rivers

相关性分析结果表明,总硬度与 TN 和硝酸盐氮呈显著正相关($R_{\text{硝酸盐氮}} = 0.48$, $P < 0.01$; $R_{\text{TN}} = 0.48$, $P < 0.01$),彼此之间呈现相似的年内变化规律,总体表现为冬春季较高,夏秋季降低的变化趋势。此外,太湖总硬度与电导率呈现显著正相关关系(图 4)。电导率主要反映流域岩石风化和人为活动导致的次生盐渍化程度,是表征水质状况的一项重要指标。而 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 等离子是电导率的重要组成部分,通常情况下,总硬度升高, Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 等离子浓度增大,电导率也会随之升高。综合总硬度、TN、电导率等分析结果,几项指标来源具有一定相似性,而氮磷营养盐和主要阴阳离子主要来自于环太湖河道外源性输入,再次说明太湖原水总硬度与外源污染输入密切相关。

此外,太湖东湖水域贡湖区域主要出入湖河道为望虞河,本次对 2023 年上半年望虞河入湖总硬度进行调查分析。D2 站点距离望虞河入太湖湖口约 3 km,与 D3 和 D1 站点相比,贡湖 D2 站点水质受引江济太望虞河引水入湖的影响更快速、程度更高。根据数据统计,随着引江济太调引长江优质水入贡湖,引江入湖一周后 D2 站点总硬度、电导率和 Cl^- 浓度较引江入湖前浓度明显降低,下降比例分别为 17.7%、17.8%和 19.9%,2 周后 D2 站点总硬度、电导率和 Cl^- 浓度下降比例分别为 24.1%、23.0%、25.7%,此时,D2 站点总硬度、电导率和 Cl^- 浓度与

望虞河引江长江来水总体相近,维持相对较低水平。从监测数据分析,望虞河引江济太并未引起贡湖总硬度升高,但太湖东部水域总硬度较高的时段与望虞河引江济太时段出现部分重合,引江济太主要集中在流域降雨量少、太湖水位低、水资源不足的非汛期时段实施,此时也正是太湖水源地总硬度易偏高的时段。通过上述多组实测数据对比分析,2023 年望虞河引江济太明显降低了贡湖总硬度。可见,望虞河引江济太并未引起太湖东部水域总硬度升高。

(2)降雨变化和入湖水量减少可能是引起 2023 年上半年太湖东部水域原水总硬度略高于往年的一方面原因

根据统计,环湖出入湖水量影响因素众多,其中降水量是决定入太湖水量的关键^[16]。监测数据表明,太湖周边大气降水 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 质量浓度分别为 0.02~0.18 mg/L 和 0.02~0.11 mg/L,大气降水总硬度浓度远低于地表水,降雨量增加,对太湖水体 Ca^{2+} 与 Mg^{2+} 等水化学离子有一定稀释作用。综合降雨量、入湖水量、太湖水位与太湖东部水域总硬度对比分析,降雨量和入湖水量较大时段,太湖水位升高,总硬度浓度往往较低,如 2020 年 7 月,降雨量、环太湖河道入湖水量分别为 415.8 mm 和 31.6 亿 m^3 ,太湖维持较高水位(>4 m),同期 D1~D6 总硬度处于较低水平,均值为 101 mg/L。反之,降雨量和入湖水量大幅减少时,太湖水位降低,总硬度浓度相对较高。2022 年下半年,受大气环流异常等因素影响,流域出现“汛期反枯”的异常现象,干旱现象持续至 2023 年初^[17]。2022 年下半年—2023 年上半年,太湖湖区降雨量和环太湖河道入湖水量明显少于往年同期,太湖水位总体偏低,降雨量、环太湖河道入湖水量较上年同期相比,分别降低了 28.1%、16.5%,这可能是 2023 年上半年太湖东部水域总硬度略微高于往年的主要原因之一,与广西防城港市总硬度与降雨量变化规律的研究结论总体一致^[18]。综上,降雨量和入湖水量减少可能是引起 2023 年 1 月—2023 年 6 月太湖东部水域总硬度略微抬升的一方面原因。

除降雨量外,降雨的水质状况也会对太湖总硬度产生一定影响。Yu 等^[19]对太湖流域 60 年水化学特征进行分析研究,发现人口增长和人类活动是造成太湖水化学指标剧烈变化的主要驱动因素,而太湖 Ca^{2+} 与 Mg^{2+} 浓度的增加与大气酸沉降密切相

关。太湖流域碳酸盐岩(石灰岩和碎屑岩)较为丰富,酸性降雨可加速碳酸盐岩矿物的溶蚀速率,促进土壤或沉积物中 Ca^{2+} 与 Mg^{2+} 等阳离子浸出^[20]。据流域省市生态环境公报统计,2023 年上半年太湖周边城市无锡、常州、苏州等酸雨发生率介于 2.7%~27.3%,略高于 2022 年上半年。酸雨频率增加,一定程度上加速 Ca^{2+} 与 Mg^{2+} 等离子向太湖水体迁移,引起同时段太湖湖体总硬度升高。因此,2023 年上半年大气酸雨频率增加,也可能引起太湖水体 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 等离子升高。

(3)太湖草藻变化可能是引起太湖东部水域原水总硬度年内波动变化的内部因素

水生生物通过光合作用和呼吸作用影响着湖体水—沉积物界面的物质传输以及水中溶解无机碳的稳定性,进而引起水化学离子的动态变化,在 Ca^{2+} 与 Mg^{2+} 的循环、运输和转化中起着重要作用^[13]。研究^[14]表明,蓝藻是水环境中控制碳酸盐沉淀沉积的重要生物体。藻类胞体可为碳酸盐岩沉淀提供成核位点,藻体及其分泌的胞外聚合物(EPS)能够为 CaCO_3 晶体生长提供大量成核位点和生长模板,进而促进水体 CaCO_3 岩矿物的沉积。太湖东部水域总硬度呈现周期性的年内变化规律,除了环太湖河道外源污染输入影响外,太湖总硬度年内变化还与水生生物分布及其生长状况有一定关系。蓝藻水华期间,太湖水体较高的 pH 满足了 CaCO_3 (pH 值 > 8.1) 沉淀条件,在更高的 pH 下,满足 MgCO_3 (pH 值 > 9.0) 的沉淀条件,蓝藻的生物矿化作用促进了 Ca^{2+} 与 Mg^{2+} 等离子沉淀,使得湖体中 Ca^{2+} 与 Mg^{2+} 等离子由水相向沉积物相迁移。本次相关性统计结果,总硬度与藻类密度之间并未呈现显著相关性,这也可能与藻类生长阶段或者其他因素等有关。夏秋季节藻类密度大、生长速率快,加速了湖体总硬度的沉积迁移速率,适度降低了水体中总硬度浓度;冬春季藻类密度较低,生长速率慢, Ca^{2+} 与 Mg^{2+} 等离子迁移速率也随之降低。一定程度上也解释了太湖湖体总硬度与藻类密度年内总体呈现错峰反向变化规律。近年来,太湖蓝藻密度大幅降低,尤其是 2023 年,较 2022 年降幅近 70%,太湖藻类密度的大幅下降减缓了太湖湖体水相与沉积相之间 Ca^{2+} 与 Mg^{2+} 的迁移速率,这也可能是引起 2023 年上半年太湖总硬度略微升高的又一原因。此外,不同类型水生植

物的碳源利用方式有所差异,沉水植物通常以水中 HCO_3^- 为碳源,而挺水植物则以大气中 CO_2 为碳源,不同类型水生植物对水化学性质的影响也略不同^[21]。研究^[22]表明,苦草、黑叶轮藻等沉水植物可以利用水中 HCO_3^- 进行光合作用,通过同化作用有效降低水中溶解性无机碳,促进钙沉积产生 CaCO_3 沉淀,进而降低 Ca^{2+} 与 Mg^{2+} 等离子浓度。D5 站点总硬度明显低于其他湖区,可能与该区域沉水植物覆盖营造的相对稳定的水动力和沉积环境有关,使得该区域总硬度明显低于其他区域。较 2020 年—2022 年相比,2023 年 D5 站点所在的胥口湾沉水植物单一化趋势愈发明显,苦草、黑藻、金鱼藻等沉水植物优势度逐步降低,分布范围和生物量下降,可能是造成 D5 站点总硬度略高于往年的一方面因素。综合上述分析,太湖草藻变化可能是引起太湖东部水域原水总硬度年内波动变化的内部因素。

3 结论

(1)综合国内其他地区水源总硬度,太湖东部水域原水总硬度在国内水源中处于中等偏下水平。2023 年上半年太湖东部水域原水总硬度有所升高,但总硬度明显低于《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2022)和苏州市自来水水质标准。

(2)湖西区入湖河道总硬度明显高于浙西区入湖河道和太湖湖区,是太湖东部水域原水总硬度的主要外源输入来源。2023 年上半年望虞河引江济太入湖总硬度低于贡湖,望虞河引江济太并非引起太湖东部水域总硬度升高的原因。

(3)太湖东部水域总硬度受降雨和入湖水量影响总体呈现夏秋低、冬春高的特点。2022 年秋季以来太湖水源地总硬度升高,主要原因是 2022 年夏秋连旱、2023 年 1 月—2023 年 6 月降水偏少,流域河网总硬度升高导致太湖湖体总硬度有所上升。建议加强入湖河道综合治理,削减入湖污染物总量,加强太湖重点湖湾生态保护修复,扩大沉水植物覆盖范围,进一步改善太湖生态服务功能。本次研究仅收集了太湖东部水域总硬度数据,为进一步探索太湖水化学性质的影响因素,还需持续开展入湖河道和太湖湖区总硬度和水化学离子指标等相关研究,同时也建议加强开展大气降水、酸雨沉降等方面的研究分析,更为全面系统地分析太湖水环境状况变化特征,以便更好地支撑流域河湖保护与治理工作。

参考文献

- [1] 刘成, 徐文蕙, 邴颜, 等. 饮用水总硬度去除需求分析及控制目标探讨[J]. 净水技术, 2022, 41(2): 1-8, 80.
LIU C, XU W H, BING Y, et al. Discussion on the removal demand and control goal of total hardness in drinking water[J]. Water Purification Technology, 2022, 41(2): 1-8, 80.
- [2] 曲仪, 聂风华. 天然水的总硬度的测定[J]. 环境保护科学, 1998, 24(2): 3-5.
QU Y, NIE F H. Estimating total hardness in nature water[J]. Environmental Protection Science, 1998, 24(2): 3-5.
- [3] 陈庆典, 李海斌, 任鹏, 等. 不同水源中钙镁元素的含量及pH测定的对比分析[J]. 安徽建筑大学学报, 2019, 27(6): 95-98, 113.
CHEN Q D, LI H B, REN P, et al. Comparison of calcium and magnesium contents and pH determination in different water sources[J]. Journal of Anhui Jianzhu University, 2019, 27(6): 95-98, 113.
- [4] 舒为群, 黄玉晶, 曾惠, 等. 中国居民饮用水中钙镁及其相关指标适宜保留水平的探讨[J]. 给水排水, 2017, 53(10): 13-18.
SHU W Q, HUANG Y J, ZENG H, et al. Discussion on appropriate retention levels of calcium and magnesium and its related indexes in drinking water of Chinese residents [J]. Water & Wastewater Engineering, 2017, 53(10): 13-18.
- [5] 杨锐. 新疆和田地区平原区地下水硬度时空分布规律及影响因素分析[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2022.
YANG R. Spatial and temporal distribution of groundwater hardness and influencing factors in the plain area of Hotian Prefecture, Xinjiang [D]. Urumqi: Xinjiang Agricultural University, 2022.
- [6] LUO Y F, XIAO Y, HAO Q C, et al. Groundwater geochemical signatures and implication for sustainable development in a typical endorheic watershed on Tibetan Plateau [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2021, 28(35): 48312-48329.
- [7] 郑育林, 刘成, 雷声杨, 等. 我国部分地区高硬度地下水的水质特征及其处理需求分析[J]. 中国给水排水, 2018, 34(18): 12-17.
ZHENG Y L, LIU C, LEI S Y, et al. Water quality characteristics of groundwater with high hardness in China and its treatment requirement[J]. China water & Wastewater, 2018, 34(18): 12-17.
- [8] 程中华. 太湖流域洮涪水系天然水化学变化特征及成因研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2022.
CHENG Z H. Studies on characteristics and causes of natural water chemical changes in the Taoge water system in the Taihu Lake Basin [D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2022.
- [9] 程中华, 邓义祥, 卓小可, 等. 京杭大运河中下游段天然水化学变化特征及驱动因素[J]. 环境科学, 2021, 42(5): 2251-2259.
CHENG Z H, DENG Y X, ZHUO X K, et al. Changes in water chemistry and driving factors in the middle and lower reaches of the Beijing-Hangzhou Grand Canal [J]. Environmental Science, 2021, 42(5): 2251-2259.
- [10] 于一雷, 宋献方, 郭嘉, 等. 黄河三角洲地区地表水化学特征及其主要影响因素[J]. 干旱区资源与环境, 2017, 31(10): 58-64.
YU Y L, SONG X F, GUO J, et al. Characteristics and controlling factors of water chemistry in surface waters in the Yellow River Delta [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2017, 31(10): 58-64.
- [11] NING M, LI G, ZHENG K G, et al. Hydrochemical characteristics of groundwater in a plain river network region: Establishing linkages between source and water quality variables [J]. Chemosphere, 2023, 331: 138809. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2023.138809.
- [12] 涂春霖, 杨润柏, 马一奇, 等. 黔西拖长江流域水化学演化特征及驱动因素[J]. 环境科学, 2023, 44(2): 740-751.
TU C L, YANG R B, MA Y Q, et al. Characteristics and driving factors of hydrochemical evolution in Tuochangjiang River Basin, Western Guizhou Province [J]. Environmental Science, 2023, 44(2): 740-751.
- [13] MA J B, DENG Y X, XU G Y, et al. Long-term changes in major ion chemistry—similarities and differences between inflow rivers and the lake in Taihu watershed, China [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2023, 30: 100731-100742. DOI: 10.1007/s11356-023-29433-5.
- [14] WANG S, CHEN J, ZHANG S X, et al. Hydrochemical evolution characteristics, controlling factors, and high nitrate hazards of shallow groundwater in a typical agricultural area of Nansi Lake Basin, north China [J]. Environmental Research, 2023, 223: 115430. DOI: 10.1016/j.envres.2023.115430.
- [15] 朱伟, 胡思远, 冯甘雨, 等. 特大洪水对浅水湖泊磷的影响: 以2016年太湖为例[J]. 湖泊科学, 2020, 32(2): 325-336.
ZHU W, HU S Y, FENG G Y, et al. Effects of great floods on phosphorus in shallow lakes: A case study of Lake Taihu in 2016 [J]. Lake Science, 2020, 32(2): 325-336.
- [16] 章杭惠, 刘曙光, 季同德. 太湖流域降雨与太湖水位关系分析[J]. 水文, 2021, 41(1): 85-89.
ZHANG H H, LIU S G, JI T D. Analysis on the relationship between rainfall of Taihu Basin and water level of Taihu Lake [J]. Hydrology, 2021, 41(1): 85-89.
- [17] 周军, 任宏昌, 王蒙, 等. 2022年夏季长江流域干旱特征及成因分析[J]. 人民长江, 2023, 54(2): 29-35.
ZHOU J, REN H C, WANG M, et al. Characteristics and causes of drought event over Yangtze River Basin in summer [J]. Yangtze River, 2023, 54(2): 29-35.
- [18] 韦日荣, 唐振柱, 黄江平, 等. 2017—2019年广西城市供水

- 水质总硬度监测结果分析[J]. 实用预防医学, 2021, 28(2): 185-189.
- WEI R R, TANG Z Z, HUANG J P, et al. Surveillance results of total hardness of municipal water supply in Guangxi, 2017-2019 [J]. Practical Preventive Medicine, 2021, 28(2): 185-189.
- [19] YU T, ZHANG Y A, WU F C, et al. The six-decade change in water chemistry of large freshwater Lake Taihu, China [J]. Environmental Science & Technology, 2013, 47(16): 9093-9101.
- [20] 冯泽波, 史正涛, 苏斌, 等. 滇池主要入湖河流化学特征及其环境意义[J]. 水生态学杂志, 2019, 40(3): 18-24.
- FENG Z B, SHI Z T, SU B, et al. Water chemistry in the primary tributaries of Dianchi Lake and effect on the water environment of Dianchi Lake [J]. Journal of Hydroecology, 2019, 40(3): 18-24.
- [21] 赵瑞一, 张乾柱, 李玉秀, 等. 不同类型水生植物对水化学性质影响差异研究[J]. 人民长江, 2019, 50(11): 64-68.
- ZHAO R Y, ZHANG Q Z, LI Y X, et al. Different effects of diverse aquatic plants on hydrochemistry [J]. Yangtze River, 2019, 50(11): 64-68.
- [22] 王奇岗, 肖琼, 赵海娟, 等. 水生植物对岩溶区河水地球化学昼夜变化的影响——以漓江为例[J]. 中国岩溶, 2018, 37(4): 501-514.
- WANG Q G, XIAO Q, ZHAO H J, et al. Influence of aquatic photosynthesis on diel variations of hydrochemistry in karst river: A case study of the Lijiang River [J]. Carsologica Sinica, 2018, 37(4): 501-514.
-
- (上接第 147 页)
- [9] 王丽, 刘霞, 张光灿, 等. 鲁中山区采取不同生态修复措施时的土壤粒径分形与孔隙结构特征[J]. 中国水土保持科学, 2007, 5(2): 73-80.
- WANG L, LIU X, ZHANG G C, et al. Fractal features of soil particles size distribution and physical property under different measures of ecological restoration on rocky mountainous area in the middle of Shandong Province [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2007, 5(2): 73-80.
- [10] 师晓阳, 刘淑坡, 李飞, 等. 海绵城市不同用地类型土壤渗透能力——以厦门市海沧马銮湾试点区为例[J]. 福州大学学报(自然科学版), 2019, 47(6): 836-841.
- SHI X Y, LIU S P, LI F, et al. Study on soil properties and permeability of different land types in sponge city: Take Maluan Bay of Haicang pilot zone in Xiamen City as an example [J]. Journal of Fuzhou University (Natural Science Edition), 2019, 47(6): 836-841.
- [11] 周韩, 罗璟, 杨沛璋, 等. 基于土壤质地分类的土壤渗透性影响因素研究[J]. 人民长江, 2023, 54(8): 153-159.
- ZHOU H, LUO J, YANG P Z, et al. Influence factors of soil permeability based on soil texture classification [J]. Yangtze River, 2023, 54(8): 153-159.
- [12] 孟晨, 牛健植, 骆紫藤, 等. 华北土石山区森林土壤大孔隙对土壤理化性质及根系的响应[J]. 水土保持学报, 2019, 33(3): 94-100.
- MENG C, NIU J Z, LUO Z T, et al. Response of soil macropore to soil phychemical properties and root in forest in rocky mountain area of north China [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2019, 33(3): 94-100.
- [13] 刘威, 赵园园, 陈小龙, 等. 土壤含水率对豫中植烟土壤微生物群落多样性及氮循环功能基因丰度的影响[J]. 中国农业科技导报, 2024, 26(1): 214-225.
- LIU W, ZHAO Y Y, CHEN X L, et al. Effects of soil moisture content on microbial community diversity and abundance of nitrogen cycling genes in central Henan tobacco-growing soil [J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2024, 26(1): 214-225.
- [14] 孙丹焱, 郑涛, 徐竟成, 等. 城市绿地土壤渗透性改良对雨水径流污染的削减效果及去除规律[J]. 环境工程学报, 2019, 13(2): 372-380.
- SUN D Y, ZHENG T, XU J C, et al. Effect of soil permeability improvement of urban green space on the reduction effect and removal rule of stormwater runoff pollution [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2019, 13(2): 372-380.
- [15] 唐心, 李国平, 胡家朋, 等. 福建省南平市不同土地利用类型土壤渗透系数及影响因素[J]. 武夷学院学报, 2023, 42(6): 31-36.
- TANG X, LI G P, HU J P, et al. Soil permeability coefficient and influencing factors under different land use types in Nanping City, Fujian Province [J]. Journal of Wuyi University, 2023, 42(6): 31-36.
- [16] 范非凡, 李晓勤, 程远盛. 土壤固有频率与孔隙度、含水率的关系研究[J]. 农机化研究, 2021, 43(1): 169-175.
- FAN F F, LI X Q, CHENG Y S. Effects of soil porosity and water content on natural frequency of cultivated soil [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2021, 43(1): 169-175.
- [17] 王思思, 王榕, 苏毅, 等. 北京城区绿地土壤渗透性能及其对降雨产流的影响分析[J]. 环境工程, 2020, 38(4): 83-88.
- WANG S S, WANG R, SU Y, et al. Analysis of Beijing green space soil permeability model and its impact on rainfall-runoff [J]. Environmental Engineering, 2020, 38(4): 83-88.
- [18] 任利东, 黄明斌, 樊军. 不同类型层状土壤持水能力的研究[J]. 农业工程学报, 2013(19): 105-111.
- REN L D, HUANG M B, FAN J. Study on water retention capacity for drained soils with different textural layering [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013(19): 105-111.