

目次

气候变化对中国夏季臭氧影响	胡安琪, 谢晓栋, 龚康佳, 侯宇晖, 胡建林 (1801)
基于 EOF 分解和 KZ 滤波的 2019~2021 年中国臭氧时空变化及驱动因素分析	王浩琪, 张裕芬, 罗忠伟, 王艳阳, 戴启立, 毕晓辉, 吴建会, 冯银厂 (1811)
华北工业城市夏季大气臭氧生成机制及减排策略	郑镇森, 窦建平, 张国涛, 李丽明, 徐勃, 杨文, 白志鹏 (1821)
2015~2020 年中国城市 PM _{2.5} -O ₃ 复合污染时空演变特征	牛笑笑, 钟艳梅, 杨璐, 易嘉慧, 慕航, 吴倩, 洪松, 何超 (1830)
2015~2021 年京津冀及周边地区 PM _{2.5} 和臭氧复合污染时空特征分析	宋小涵, 燕丽, 刘伟, 贺晋瑜, 王亚晨, 黄同林, 李园园, 陈敏, 孟静静, 侯战方 (1841)
2000~2020 年中国典型经济区 PM _{2.5} 时空变化及其与植被景观格局的关系	徐勇, 李欣怡, 黄雯婷, 郭振东, 盘钰春, 郑志威, 戴强玉 (1852)
北京市核心区冬春季大气离子沉降量特征及来源解析	赵宇, 李贝贝, 黄玉虎, 梁静, 杨洪玲, 秦建平, 朱玲 (1865)
南京近郊农田大气颗粒物及金属干沉降输入特征	刘翠英, 靳浩, 樊建凌 (1873)
西安冬季 PM _{2.5} 中不同极性水溶性有机物的污染特征及氧化潜势	罗玉, 黄沙沙, 张甜, 孙健, 沈振兴 (1882)
机动车源和民用燃料源颗粒物中有机碳和元素碳的排放特征	王红磊, 刘思略, 孙杰娟, 刘煥武, 赵天良, 裴宇僊, 可玥, 武自豪, 刘诗云 (1890)
伊犁河谷核心区春季 PM _{2.5} 组分特征及来源解析	谷超, 徐涛, 马超, 伊布提哈尔·加帕尔, 郭丽瑶, 李新琪, 杨文 (1899)
基于高分辨率网格的郑州市城镇居民 PM _{2.5} 暴露浓度与健康风险变化评估	李媛, 徐艺斐, 袁明浩, 苏方成, 王申博, 王克, 张瑞芹 (1911)
基于多源数据融合的河南省建材行业排放清单	刘晓, 胡京南, 王红梅, 杨丽, 张皓 (1924)
开封市城区冬季大气挥发性有机物污染特征及来源解析	施雨其, 郑凯允, 丁玮婷, 刘金平, 陈洪光, 高光, 王玲玲, 王楠, 马双良, 郑瑶, 谢绍东 (1933)
2020 年和 2021 年南京城区臭氧生成敏感性和 VOCs 来源变化分析	陆晓波, 王鸣, 丁峰, 喻义勇, 张哲海, 胡崑 (1943)
北京市城区夏季大气 VOCs 变化特征及臭氧生成潜势	张蕊, 孙雪松, 王裕, 王飞, 罗志云 (1954)
青岛市臭氧污染与非污染期间 VOCs 化学特征及来源解析	贾智海, 顾瑶, 孔翠丽, 宋江邦, 孟赫, 石来元, 吴建会, 刘保双 (1962)
基于总过氧自由基观测研究合肥市西郊夏季 O ₃ 生成特征	俞辉, 韦娜娜, 徐学哲, 刘芊芊, 姚易辰, 赵卫雄, 张为俊 (1974)
“大气十条”政策的节能降碳效果评估与创新中介效应	李少林, 王齐齐 (1985)
北京市减污降碳协同控制情景模拟和效应评估	俞珊, 张双, 张增杰, 翟艳芝, 刘桐坤 (1998)
基于不同排放清单的长三角人为 CO ₂ 排放模拟	马心怡, 黄文晶, 胡凝, 肖薇, 胡诚, 张弥, 曹畅, 赵佳玉 (2009)
武汉汉江水源水质变化趋势及风险分析	卓海华, 姜保峰, 徐杰, 陈洁, 陈杰, 兰秀薇, 范文重, 欧阳雪姣, 兰静 (2022)
长江武汉段水源地典型抗生素及抗性基因污染特征与生态风险评价	李柏林, 张贺, 王俊, 沙雪妮, 陈晓飞, 卓海华 (2032)
陕北矿区典型河流多环芳烃的赋存特征、来源及毒性风险分析	吴喜军, 董颖, 赵健, 刘静, 张亚宁 (2040)
典型湖泊有机聚集体时空特征及驱动因子	谢贵娟, 龚伊, 朱富成, 刘昌利, 卢宝伟, 邓辉, 汤祥明 (2052)
桂林市不同功能型公园水体微塑料的分布特征及风险评估	李沛钊, 吴莉, 黄菲菲, 林才霞, 舒小华, 张倩 (2062)
长江流域浮游植物群落的环境驱动及生态评价	张静, 胡愈圻, 胡圣, 黄杰 (2072)
环境异质性对三峡库区支流香溪河附石硅藻群落的影响及驱动作用	纪璐璐, 赵璐, 欧阳添, 杨宋琪, 郑保海, 杜雨欣, 李玉鑫, 李佳欣, 施军琼, 吴忠兴 (2083)
武汉市 3 种类型湖泊浮游植物群落特点及关键影响因素	张浩坤, 闵奋力, 崔慧荣, 彭雪, 张心怡, 张淑烟, 李竹栖, 葛芳杰, 张璐, 吴振斌, 刘碧云 (2093)
重金属污染对不同生境中微生物群落结构的影响	何一凡, 肖新宗, 王佳文 (2103)
毫清河水体细菌群落的结构和分布特征	王森, 陈建文, 张红, 李君剑 (2113)
微塑料暴露对小棒指软珊瑚 (<i>Sinularia microclavata</i>) 共生细菌群落结构和功能的影响	刘敏, 车文学, 曾映旭, 边伟杰, 吕淑果, 穆军 (2122)
上海市从源头到龙头的饮用水新型污染物分布特征及健康风险评价	严棋 (2136)
铝改性生物炭对水体低浓度氟的吸附特性	刘艳芳, 高玮, 刘蕊, 尹思婕, 张妙雨, 刘晓帅, 李再兴 (2147)
典型雌激素在微塑料上的吸附特征及位点能量分布	刘姜艳, 郑密密, 胡嘉梧, 柳玉荣, 贺德春, 潘杰 (2158)
面向工业园区废水臭氧氧化深度处理性能评价的模型污染物选择与评估	辛勃, 单超, 吕路 (2168)
基于地理探测器和多源数据的耕地土壤重金属来源驱动因子及其交互作用识别	张宏泽, 崔文刚, 刘绥华, 崔瀚文, 黄月美 (2177)
基于 APCS-MLR 和 PMF 模型的煤矸山周边耕地土壤重金属污染特征及源解析	马杰, 沈智杰, 张萍萍, 刘萍, 刘今朝, 孙静, 王玲灵 (2192)
基于蒙特卡罗模拟的铅锌冶炼厂周边农田土壤重金属健康风险评估	黄剑波, 姜登登, 温冰, 王磊, 石佳奇, 周艳 (2204)
基于 BP 神经网络预测北京市加油站周边土壤多环芳烃含量	马赛炎, 魏海英, 马瑾, 刘奇缘, 吴颐杭, 屈雅静, 田雨欣, 赵文浩 (2215)
石家庄市土壤中喹诺酮类抗生素时空分布及其风险评估	赵鑫宇, 陈慧, 赵波, 宋圆梦, 卢梦淇, 崔建升, 张璐璐, 李双江 (2223)
典型黑色岩系地质高背景区土壤和农产品重金属富集特征与污染风险	邓帅, 段佳辉, 宁墨兔, 谭林, 蒲刚, 陈际行, 齐小兵, 蒋尚智, 谢桃园, 刘意章 (2234)
岩溶区不同母质土壤 Cd 地球化学特征及玉米籽实 Cd 含量预测	戴亮亮, 徐宏根, 巩浩, 彭志刚, 肖凯琦, 吴欢欢, 许青阳, 郭军, 汤媛媛, 张俊 (2243)
龙岩市不同利用类型土壤及农作物 Pb、Cd 和 As 污染风险与贡献分析	王蕊, 陈楠, 张二喜 (2252)
小麦籽粒镉含量影响因素 Meta 分析和决策树分析	刘娜, 张少斌, 郭欣宇, 宁瑞艳 (2265)
黄土高原次生林演替过程土壤有机碳库及其化学组成响应特征	刘涵宇, 刘颖异, 张琦, 封伦, 高起乾, 任成杰, 韩新辉 (2275)
短期氮磷添加对祁连山亚高山草地土壤呼吸组分的影响	江原, 甘小玲, 曹丰丰, 赵传燕, 李伟斌 (2283)
黄河源区斑块退化高寒草甸土壤微生物多样性对长期封育的响应	杨鹏年, 李希来, 李成一, 段成伟 (2293)
不同海拔箭筈锦鸡儿根际和非根际土壤细菌群落多样性及 PICRUSt 功能预测	李媛媛, 徐婷婷, 艾喆, 魏庐璐, 马飞 (2304)
模拟酸雨及氮沉降对马尾松林土壤细菌群落结构及其多样性的影响	王楠, 钱少郁, 潘小承, 陈一磊, 白尚斌, 徐飞 (2315)
磷石膏和碱蓬对盐渍化土壤水盐及细菌群落结构的影响	刘月, 杨树青, 张万峰, 姜帅 (2325)
菌渣与化肥配施对稻田土壤微生物群落组成及多样性的影响	耿和田, 王旭东, 石思博, 叶正钱, 周文晶 (2338)
增氧对不同秸秆还田稻田田面水养分动态及温室气体排放的影响	胡锦涛, 薛利红, 钱聪, 魏利祥, 曹帅 (2348)
外源褪黑素对胁迫下水稻幼苗生长和抗氧化系统的影响	储玉檀, 李颜, 黄益宗, 保琼莉, 孙红羽, 黄永春 (2356)
面向 2035 的节能与新能源汽车全生命周期碳排放预测评价	付佩, 兰利波, 陈颖, 郝卓, 邢云翔, 蔡旭, 张春梅, 陈轶嵩 (2365)
农田土壤微塑料分布、来源和行为特征	薄录吉, 李冰, 张凯, 马荣辉, 李彦, 王艳芹, 孙斌, 刘月岩 (2375)
农田土壤除草剂污染的修复技术研究进展	胡芳雨, 安婧, 王宝玉, 徐明恺, 张惠文, 魏树和 (2384)
我国黑土地农田土壤除草剂残留特征研究及展望	李睿, 吴秋梅, 赵归梅, 胡文友, 田康, 黄标, 吴祥为, 刘峰, 赵玉国, 赵永存 (2395)
《环境科学》征订启事(1910)	《环境科学》征稿简则(1984)
信息	(2167, 2191, 2324)

典型湖泊有机聚集体时空特征及驱动因子

谢贵娟^{1,2,3}, 龚伊², 朱富成¹, 刘昌利¹, 卢宝伟¹, 邓辉¹, 汤祥明^{2,3,*}

(1. 皖西学院生物与制药工程学院, 六安 237012; 2. 中国科学院南京地理与湖泊研究所湖泊与环境国家重点实验室, 南京 210008; 3. 中国科学院大学资源与环境学院, 北京 100049)

摘要: 有机聚集体(OA)是水体中物质循环和能量流通的重要枢纽,但在不同营养水平湖泊中的比较研究仍相当匮乏. 于2019~2021年间,采集了不同季节贫营养抚仙湖、中营养天目湖、中度富营养太湖和重度富营养星云湖表层水样,利用扫描电镜、表面荧光显微镜和流式细胞仪等研究了4个典型湖泊中OA及其附着细菌的时空变化特征. 结果表明:①抚仙湖、天目湖、太湖和星云湖中,OA丰度的年均值分别为 1.4×10^4 、 7.0×10^4 、 27.7×10^4 和 16.0×10^4 ind·mL⁻¹; OA附着细菌丰度的年均值分别为 0.3×10^6 、 1.9×10^6 、 4.9×10^6 和 6.2×10^6 cells·mL⁻¹; 附着细菌占总细菌的比值分别为30%、31%、50%和38%. ②夏季OA丰度显著高于秋冬季;但夏季附着细菌占总细菌的比值为26%,显著低于其它3个季节. ③湖泊营养状态是影响OA及其附着细菌丰度的最重要环境因子,可单独解释OA及其附着细菌丰度时空变化的50%和68%. ④OA上富含营养盐和有机质,尤其是星云湖,其OA中颗粒态磷和氮占比高达69%和59%,有机质占比达79%. 未来气候变化和湖泊藻类水华扩张背景下,藻源性OA在有机质矿化降解及营养盐循环中的作用可能会进一步加大.

关键词: 有机聚集体(OA); 附着细菌; 湖泊营养状态; 藻类水华; 沉积物再悬浮; 营养盐循环; 驱动因子

中图分类号: X524 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2023)04-2052-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.202206018

Spatio-temporal Characteristics of Organic Aggregates and the Driving Factors in Typical Lakes

XIE Gui-juan^{1,2,3}, GONG Yi², ZHU Fu-cheng¹, LIU Chang-li¹, LU Bao-wei¹, DENG Hui¹, TANG Xiang-ming^{2,3,*}

(1. College of Biology and Pharmaceutical Engineering, West Anhui University, Lu'an 237012, China; 2. State Key Laboratory of Lake Science and Environment, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 3. College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Organic aggregates (OA) are the important circulation hub of matter and energy in aquatic ecosystems. However, the comparison studies on OA in lakes with different nutrient levels are limited. In this study, spatio-temporal abundances of OA and OA-attached bacteria (OAB) in oligotrophic Lake Fuxian, mesotrophic Lake Tianmu, middle-eutrophic Lake Taihu, and hyper-eutrophic Lake Xingyun were investigated in different seasons during 2019-2021 using a scanning electron microscope, epifluorescence microscope, and flow cytometry. The results showed that: ① the annual average abundances of OA in Lake Fuxian, Lake Tianmu, Lake Taihu, and Lake Xingyun were 1.4×10^4 , 7.0×10^4 , 27.7×10^4 , and 16.0×10^4 ind·mL⁻¹, whereas the annual average abundances of OAB in the four lakes were 0.3×10^6 , 1.9×10^6 , 4.9×10^6 , and 6.2×10^6 cells·mL⁻¹. The ratios of OAB:total bacteria (TB) in the four lakes were 30%, 31%, 50%, and 38%, respectively. ② OA abundance in summer was significantly higher than that in autumn and winter; however, the ratio of OAB:TB in summer was approximately 26%, which was significantly lower than that in the other three seasons. ③ Lake nutrient status was the most important environmental factor that affected the abundance variations of OA and OAB, accounting for 50% and 68% of the spatio-temporal variations in OA and OAB abundances. ④ Nutrient and organic matters were enriched in OA, especially in Lake Xingyun; the proportions of particle phosphorous, particle nitrogen, and organic matters in this lake were as high as 69%, 59%, and 79%, respectively. Under the circumstance of future climate change and the expansion of lake algal blooms, the effects of algal-originated OA in the degradation of organic matters and nutrient recycling would be increased.

Key words: organic aggregates(OA); particle-attached bacteria; lake nutrient status; algal blooms; sediment resuspension; nutrient recycling; driving factor

有机聚集体(organic aggregates, OA)是水生态系统中的重要组分之一^[1,2]. 它主要由浮游生物残体及其代谢产物、各种有机碎屑、无机颗粒、自养和异养微生物等,通过物理、化学或生物过程而粘附在一起的不规则多孔颗粒物^[3]. OA及其周际会形成一个营养丰富的微环境,吸引大量细菌定殖其中. 水体中细菌可分为浮游细菌和颗粒附着细菌,浮游细菌营自由生活,而附着细菌一般在颗粒物表面营附着生活^[4]. 有研究表明,OA附着细菌的数量比同体积水体中浮游细菌的数量高2~3个数量级^[2,5],其代谢活性和生长速率也比浮游细菌高数倍^[6-8]. OA形成以后,仍和周围水体的微生物、溶

解性物质和其他颗粒物进行相互作用^[9,10]. 在大量高活性附着微生物的作用下,OA上的颗粒有机物(POM)能够被快速分解并释放溶解性有机物(DOM)至水体中,供应浮游细菌生长^[11,12]. OA也会被部分小型食碎屑动物或原生动物牧食,从而将有机质向更高一级的食物链传递. 由于其在有机质降解和食物网中的重要作用,OA被视为水体中营养盐矿化、能量流通、元素生物地球化学循环的热

收稿日期: 2022-06-01; 修订日期: 2022-07-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(41971062)

作者简介: 谢贵娟(1974~),女,博士,主要研究方向为水环境微生物, E-mail: xieguijuan@126.com

* 通信作者, E-mail: xmtang@niglas.ac.cn

点^[13~18],和微生物相互作用的枢纽^[19,20]。

作为自然水体中最具生物活性的微型“岛屿”^[20],OA 形状类似不规则多孔性的雪花团,有“海洋雪花”^[15,21]、“湖泊雪花”^[2]和“河流雪花”^[22]之称。目前,有关 OA 的研究主要集中在海洋和深水湖泊,因为在这些环境中,由于沉降距离长,容易形成大型 OA(粒径 > 500 μm),便于收集观测。而水动力扰动强烈的浅水湖泊中主要以小型 OA(粒径范围为 5 ~ 500 μm)为主,相关研究主要集中在太湖^[23,24]。由于浮游藻类是 OA 的主要来源之一^[25],影响藻类丰度的因子,如水体营养盐水平和季节变化等,均直接或间接影响水体中 OA 的来源、组成、理化特征及其附着微生物的群落演替^[26,27]。当前在气候变化背景下,水体富营养化对水生态系统的影响加剧,全球尺度上湖泊藻类水华呈扩张趋势^[28,29],深刻影响着湖泊生态系统的结构和功能。随着营养水平的增高,这种源自藻类的有机聚集体“微岛”的丰度,预期也将增高,其生态学作用和环境效应不容忽视。然而,在湖泊生态系统中,目前仍缺乏不同营养水平和不同水深湖泊中 OA 及其附着微生物时空差异的对比研究。鉴于此,本文选择 4 个典型湖泊为研究对象,即贫营养深水湖(云南抚仙湖)、中营养人工水库型湖泊(江苏天目湖)、富营养大型浅水湖泊(江苏太湖)和重度富营养中等水深湖泊(云南星云湖),通过对典型湖泊中 OA 及其附着细菌 4 个季节的调查分析,探讨营养盐水平和季节变化对 OA 及其附着细菌时空特征的影响,旨在为未来气候变化背景下,以有机聚集体为核心载体的湖泊营养盐循环及其生态环境效应研究提供基础数据和新的视角。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

太湖是我国第三大淡水湖泊,水面面积约 2 338 km²,蓄水量约 44.3 亿 m³,平均水深 1.9 m,最大水深 3 m。太湖水动力扰动强烈,入湖河流多,其中位于湖西的大浦河为入湖水量最大的河流[图 1(a)]。由于地处经济发达的江苏平原河网地区,外源污染负荷长期通过西北部的河流输入,导致太湖富营养化和蓝藻水华问题十分突出^[30~32]。

天目湖(沙河水库)水面面积 12 km²[图 1(b)],蓄水量约 1.1 亿 m³,平均水深 7 m,最大水深 14 m^[33]。天目湖自 1961 年建成蓄水以来,一直是周边溧阳市的饮用水水源地,水体处于中营养水平^[34,35]。

抚仙湖是我国最大的高原深水湖,水面面积约

216.6 km²[图 1(c)],在水位为 1 721 m 时,最大水深 155 m,平均水深 89.6 m^[36]。它是我国蓄水量最大的淡水湖,常年蓄水量为 189 亿 m³。2011 ~ 2020 年间,抚仙湖水质整体为 I 类,处于贫营养状态^[37]。

星云湖是云南省九大高原湖泊之一,和抚仙湖同属珠江流域南盘江水系,水面面积约 34.7 km²[图 1(c)],蓄水量约 1.84 亿 m³,平均水深 5.3 m,最大水深 11 m^[36]。有研究显示星云湖目前水污染严重,水质为劣 V 类,是重度富营养湖泊,常年有蓝藻水华暴发^[38,39]。为减小对抚仙湖水质的影响,当地政府已于 2002 年在连接星云湖和抚仙湖的隔河建立闸控,因此目前这两个湖已不连通。

1.2 样点布设和采样

在上述 4 个湖泊中各设置一个断面,进行样点布设。在太湖,从最大入湖河流大浦河的入口处,至湖东部漫山岛一线设置了 12 个采样点,在其它 3 个湖泊各设置 10 个采样点(图 1)。分别于 2019 年 11 月(秋季)、2020 年 4 月(春季)、2020 年 7 月(夏季)和 2021 年 1 月(冬季)进行采样。在每个采样点表层约 50 cm 处,用采水器采集 5 ~ 20 L 水样,置预先清洗过的塑料桶中,运至实验室,进行水体理化参数的分析。现场取 47.5 mL 原水,置于灭过菌的 50 mL 离心管中(管中事先加入 40% 的无颗粒甲醛 2.5 mL,使甲醛终浓度为 2%),放入含有冰袋的保温箱中,带回实验室 4℃ 保存,用于 OA 和细菌的检测;藻类计数的原水(40 mL)带回实验室后保存在 -20℃。后续分析在一周内完成。

1.3 环境参数分析

在每个取样点水下约 50 cm 处,用多参数水质分析仪(YSI EXO2, Yellow Springs Instruments Inc., USA)测量水温(WT,℃);用 Secchi 盘测量水体透明度(SD)。总氮(TN)、总溶解氮(TDN)、总磷(TP)、总溶解磷(TDP)、叶绿素 a(Chla)、化学需氧量(COD)、溶解性有机碳(DOC)、总悬浮固体(SS)和烧失量(LOI)的测量,参照标准方法进行^[40]。用 TN 和 TDN 的差值计算颗粒态氮(PN);用 TP 和 TDP 的差值计算颗粒态磷(PP)。用以下公式计算 SS 中有机物(OM)的质量分数(C_{OM}):

$$C_{OM} = \frac{SS - LOI}{SS} \times 100\%$$

根据文献^[41],采用 SD、TN、TP、Chla 和 COD 这 5 个参数计算综合营养状态指数(TLI),以表征各湖泊营养状态的时空变化。TLI ≤ 30,为贫营养;30 < TLI ≤ 50,为中营养;TLI > 50,为富营养。其中,50 < TLI ≤ 60,为轻度富营养;60 < TLI ≤ 70,为中度富营养;TLI > 70,为重度富营养。

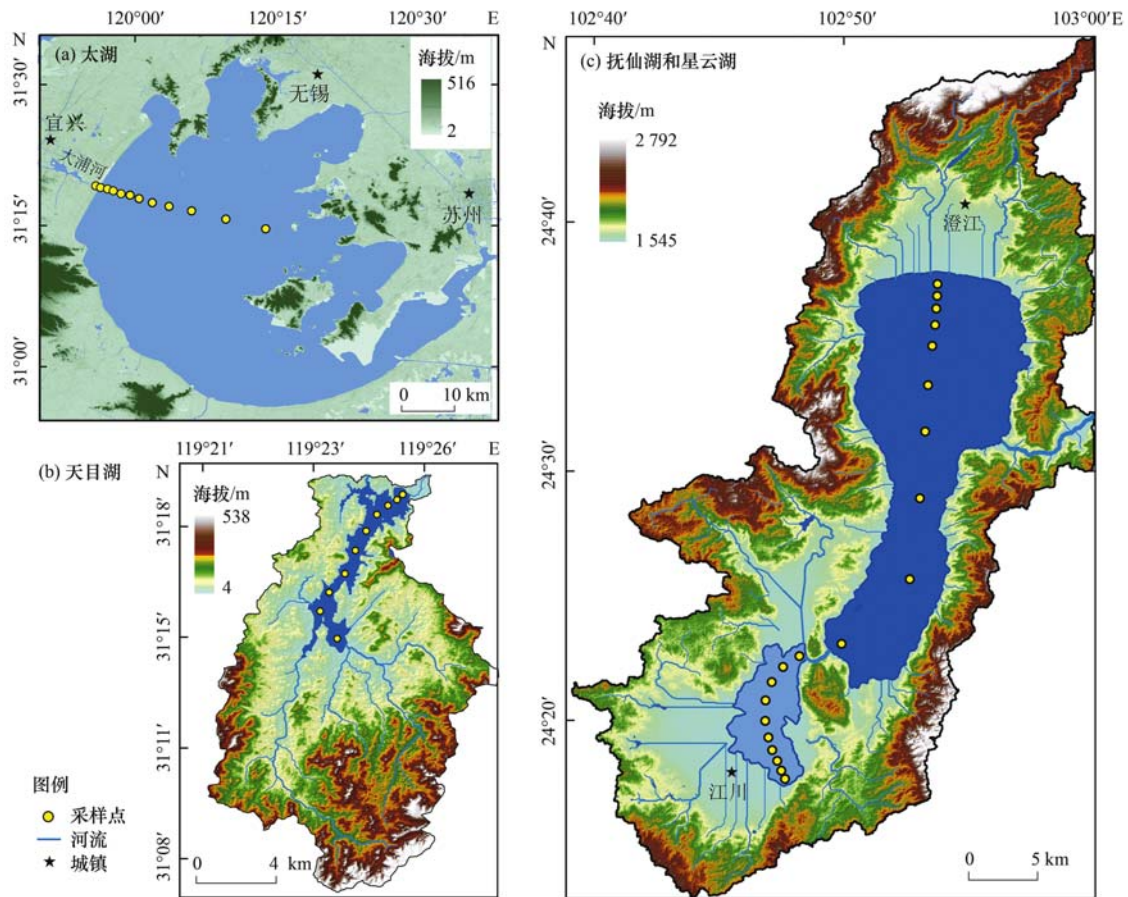


图1 4个不同营养水平湖泊的采样位点示意

Fig. 1 Sampling sites of the four typical lakes with different trophic levels

1.4 有机聚集体、细菌和藻类的检测

有机聚集体丰度的检测和扫描电镜形态学观测参照文献[23,42].除抚仙湖水样用原水外,其他湖水样进行适当稀释后,取出5 mL加100 μL 的DAPI(4',6-二脒基-2-苯基吡啶,100 $\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$),染色10 min;用手持真空泵在较低压力下抽滤至0.2 μm 黑色滤膜(PoreticsTM)上,加无荧光浸镜油(Immersion[®] 518F, ZEISS)制片后,用表面荧光显微镜(Axio Imager. A2, Zeiss)观察拍照,每个样品至少随机拍摄20张照片,包含至少100个OA.用Image J 1.52软件计算各个OA的表面积,本研究中将表面积大于5 μm^2 ,且有明显细菌附着的颗粒归为OA. OA丰度的计算公式如下:

$$A_{\text{OA}} = (W_A / F_A) \times N \times F \times V$$

式中, A_{OA} 为有机聚集体丰度, $\text{ind}\cdot\text{mL}^{-1}$; W_A 为滤膜的有效过滤面积, μm^2 ; F_A 为在所用的放大倍数下照片的实际面积, μm^2 ; N 为在所用的放大倍数下照片中的有机聚集体个数; F 为水样的稀释系数; V 为所过滤的水样的体积, mL.

用流式细胞仪(Becton Dickinson)进行藻类丰度(A_{algae})和细菌丰度的计数,具体步骤见文献

[43].总细菌(total bacteria, TB)丰度(A_{TB})和浮游细菌(free-living bacteria, FLB)丰度(A_{FLB})分别用原水和5 μm 滤膜过滤后的滤液进行检测[44].OA附着细菌(OA-attached bacteria, OAB)丰度: (A_{OAB}) = $A_{\text{TB}} - A_{\text{FLB}}$.

1.5 统计分析和绘图

本研究中除采样点位图用ArcMap 10.5绘制外,其他统计分析和可视化在R 3.5.3 (<https://www.r-project.org>)平台和RStudio 1.1.463交互界面完成.由于所测得的数据部分不符合正态分布,因此,利用“boxplerk.R”脚本[45],通过非参数Kruskal-Wallis检验来比较不同样品间差异的显著性;参照文献[46,47],利用mgcv 1.8-26包[48],通过广义可加模型(GAM)分析影响 A_{OA} 和 A_{OAB} 的最优环境因子组合,利用hier. part 1.0-6包采用层次分割理论来分解每个环境因子的相对贡献率[49].

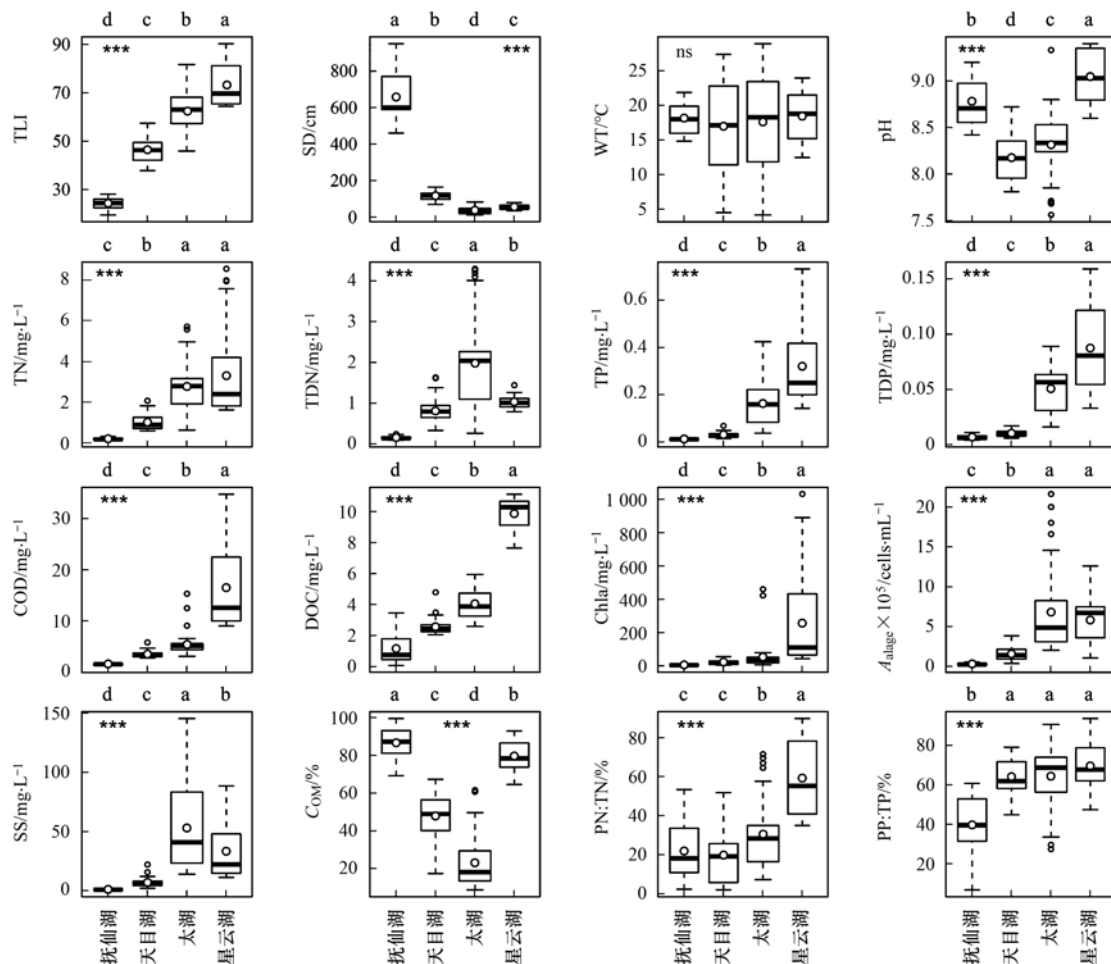
2 结果与分析

2.1 不同湖泊主要环境参数比较

抚仙湖、天目湖、太湖和星云湖TLI的均值分别为24、46、62和73,分别符合贫营养、中营养、中度富营养和重度富营养的标准,非参数统计检

验表明各个湖泊间 TLI 差异显著(图 2). 除 WT 外, 所测得其它参数在 4 个湖泊间差异均显著 ($P < 0.001$). 星云湖 pH 最高, 均值达 9.0, 显著高于抚仙湖(8.8)、太湖(8.3)和天目湖(8.2). 水体中 TN、TP、TDP、COD、DOC 和 Chla 在 4 个湖泊

间变化趋势相似, 从贫营养的抚仙湖至重度富营养的星云湖, 其均值依次增高. TDN、 A_{algae} 和 SS 从抚仙湖到太湖均值依次增高, 但星云湖低于太湖且高于其它两个湖泊, 随着营养程度的提高总体呈左偏单峰曲线.



箱线图内标识 Kruskal-Wallis 秩和检验总体结果: *** 表示 $P < 0.001$, ns 表示差异不显著, $P > 0.05$; 小写字母表示组间差异的显著性, 相同字母表示差异不显著 ($P > 0.05$), 不同字母表示差异显著 ($P < 0.05$); 箱体内部圆表示平均值, 横线表示中位数, 箱体外部圆表示异常值

图 2 4 个湖泊主要环境参数比较

Fig. 2 Comparisons of main environmental parameters among the four lakes

颗粒物上, 贫营养抚仙湖的 C_{OM} 最高, 均值达 86%; 太湖最低, 均值为 23%; 星云湖 C_{OM} 也较高, 均值为 79% (图 2). PN 占比在不同湖泊间差异显著. 星云湖最高, 均值为 59%; 其次是太湖, 均值为 30%; 抚仙湖和天目湖的均值较低, 分别为 22% 和 20%. 星云湖、太湖和天目湖中 PP 占比依次为 69%、64% 和 64%, 三者差异不显著, 但均显著高于抚仙湖的 40%.

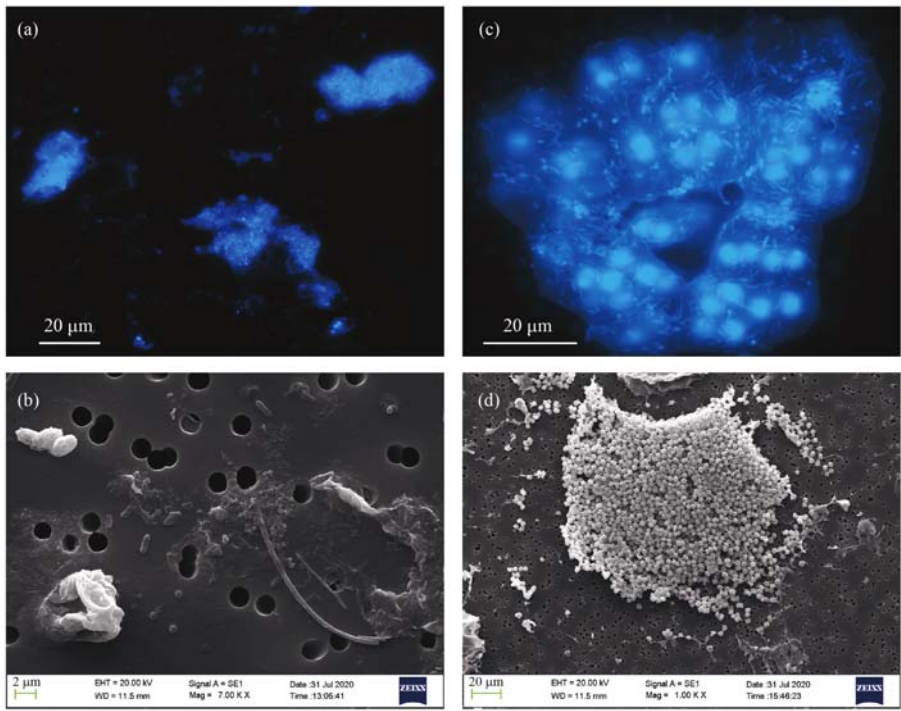
2.2 典型有机聚集体形态特征

表面荧光显微镜和扫描电镜观测结果显示, 有机聚集体形态组成主要分为两大类, 一类是絮状的源自有机碎屑和透明胞外物质聚合而成的聚集体; 另一类主要由衰亡藻类及其表面附着细菌构成的藻源性有机聚集体 (图 3). 需要说明的是, 处于旺盛生

长阶段的健康藻类颗粒, 其表面很少能观测到细菌的附着. 在本研究中, 这种表面无细菌附着的藻类颗粒不被计数为 OA.

2.3 不同湖泊有机聚集体基本特征的差异

不同营养水平的湖泊之间, A_{OA} 差异极显著 [图 4(a1)]. 抚仙湖中 A_{OA} 最低, 均值为 1.4×10^4 ind·mL⁻¹; 天目湖 A_{OA} 的均值为 7.0×10^4 ind·mL⁻¹; 太湖 A_{OA} 最高, 均值为 27.7×10^4 ind·mL⁻¹, 其变化范围也最大, 为 $(4.5 \sim 73.8) \times 10^4$ ind·mL⁻¹; 星云湖 A_{OA} 的均值为 16.0×10^4 ind·mL⁻¹, 略低于太湖. 星云湖 OA 表面积均值为 $178 \mu\text{m}^2$, 显著高于其它 3 个湖泊 [图 4(a2)]. 抚仙湖、天目湖和太湖 OA 的平均表面积分别为 74、67



(a) 和 (b) 为絮状碎屑有机聚集体的表面荧光显微镜和扫描电镜图, (c) 和 (d) 为藻源性有机聚集体的表面荧光显微镜和扫描电镜图, (a) 和 (c) 中白色杆状或球状亮点均为附着在有机聚集体上的大量细菌

图 3 典型絮状碎屑有机聚集体和藻源性有机聚集体表面荧光显微镜和扫描电镜图

Fig. 3 Epifluorescence and scanning electron micrographs showing the typical flocculent debris and algal-originated organic aggregates

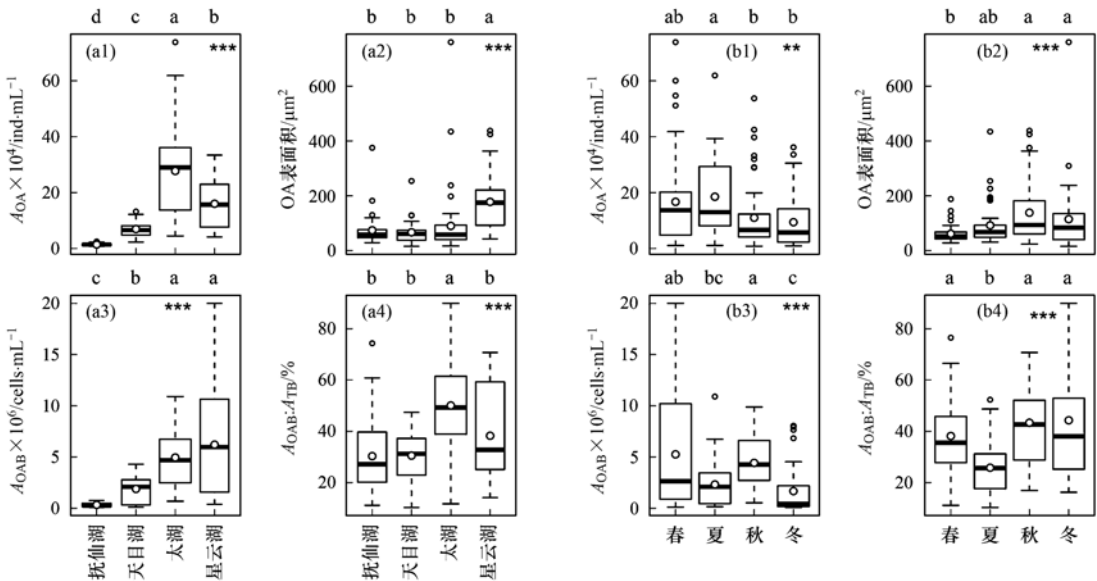
和 $90 \mu\text{m}^2$, 三者差异不显著 ($P > 0.05$).

星云湖 A_{OAB} 最高, 均值为 $6.2 \times 10^6 \text{ cells} \cdot \text{mL}^{-1}$; 太湖次之, 均值为 $4.9 \times 10^6 \text{ cells} \cdot \text{mL}^{-1}$ [图 4(a3)]. 两个湖泊之间附着细菌丰度差异不显著, 但均显著高于天目湖和抚仙湖. 附着细菌占总细菌的比例以太湖最高, 均值为 50%, 显著高于其它 3 个湖泊 [图

4(a4)]. 星云湖、天目湖和抚仙湖附着细菌占比分别为 38%、31% 和 30%.

2.4 不同季节有机聚集体基本特征的差异

将 4 个湖泊数据汇总分析, OA 丰度、表面积、 OA 附着细菌丰度和占比在不同季节间差异显著. 夏季和春季 A_{OA} 最高, 均值分别为 17.8×10^4 和



箱线图内标识 Kruskal-Wallis 秩和检验总体结果: *** 表示 $P < 0.001$, ** 表示 $P < 0.01$; 小写字母表示组间差异的显著性, 相同字母表示差异不显著 ($P > 0.05$), 不同字母表示差异显著 ($P < 0.05$); 箱体内部表示平均值, 横线表示中位数, 箱体外部表示异常值; (a1) ~ (a4) 为不同湖泊间差异, (b1) ~ (b4) 不同季节间差异

图 4 有机聚集体丰度、表面积、附着细菌丰度和占比在不同湖泊和不同季节间差异的箱线图

Fig. 4 Boxplots showing the differences in A_{OA} , surface area, A_{OAB} , and the ratio of $A_{\text{OAB}}:A_{\text{TB}}$ among the four lakes and four seasons

$16.7 \times 10^4 \text{ ind} \cdot \text{mL}^{-1}$, 两者差异不显著; 夏季显著高于秋季 ($11.0 \times 10^4 \text{ ind} \cdot \text{mL}^{-1}$) 和冬季 ($9.4 \times 10^4 \text{ ind} \cdot \text{mL}^{-1}$) [图 4(b1)]. 秋季 OA 平均表面积最大, 为 $138 \mu\text{m}^2$; 冬季次之, 均值为 $115 \mu\text{m}^2$; 夏季均值为 $92 \mu\text{m}^2$; 3 个季节间差异不显著; 秋冬季显著高于春季的均值 $61 \mu\text{m}^2$ [图 4(b2)].

A_{OAB} 秋季均值为 $4.4 \times 10^6 \text{ cells} \cdot \text{mL}^{-1}$, 显著高于夏季 ($2.3 \times 10^6 \text{ cells} \cdot \text{mL}^{-1}$) 和冬季 ($1.7 \times 10^6 \text{ cells} \cdot \text{mL}^{-1}$), 但与春季 ($5.3 \times 10^6 \text{ cells} \cdot \text{mL}^{-1}$) 差异不显著 [图 4(b3)]. 附着细菌占总细菌的比例夏季最低, 均值为 26%, 显著低于冬季 (44%)、秋季 (43%) 和春季 (38%) [图 4(b4)].

2.5 有机聚集体及其附着细菌丰度与环境因子的关系

利用 GAM 模型分析了影响 OA 和 OAB 丰度的最优环境因子组合, 以及各环境因子对 OA 和 OAB 丰度变化的相对解释率. 通过剔除共线性参数和不显著的参数, OA 丰度最优环境因子 GAM 模型为:

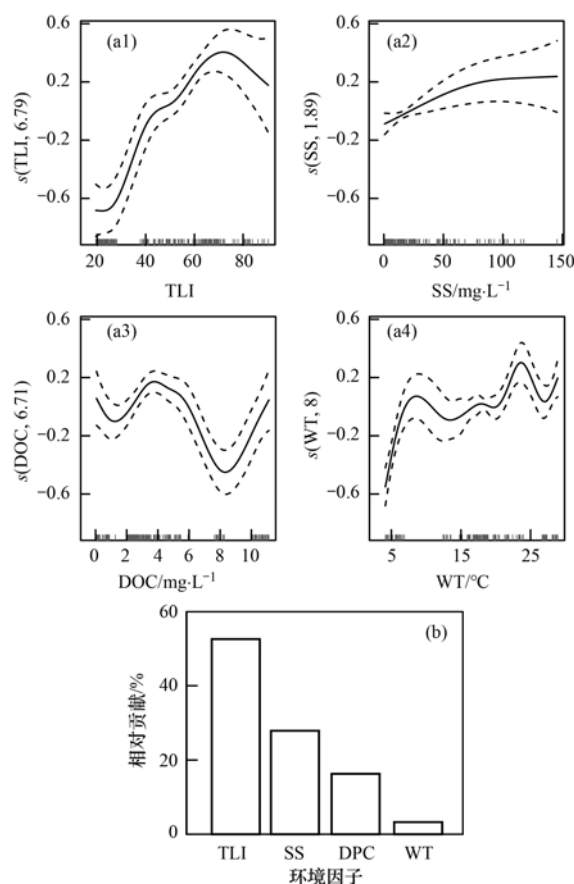
$$\lg A_{\text{OA}} \sim s(\text{TLI}) + s(\text{SS}) + s(\text{DOC}) + s(\text{WT})$$

附着细菌丰度最优环境因子 GAM 模型为:

$$\lg A_{\text{OAB}} \sim s(\text{TLI}) + s(\text{DOC}) + s(\text{WT})$$

最优模型中各个变量的平滑曲线, 显示环境因子与 OA 和 OAB 丰度的关系基本上都是非线性的 [图 5(a) 和图 6(a)]. GAM 结果显示, TLI、SS、DOC 和 WT 这 4 个因子合了解释了 $\lg A_{\text{OA}}$ 变化的 94.8%, 其中前 3 个变量的相对贡献分别为 53%、28% 和 16% [图 5(b)]; TLI、DOC 和 WT 这 3 个因子合了解释了 $\lg A_{\text{OAB}}$ 变化的 92.9%, 其中前两个因子的相对贡献分别为 73% 和 23% [图 6(b)]. 4 个

湖 TLI、SS、DOC 和 WT 这 4 个因子的季节变化显著, 特别是 WT, 季节差异大 (图 7).



(a) A_{OA} 与环境因子的 GAM 结果, (b) 各因子对模型的相对贡献; 实线表示响应变量方程的拟合曲线, 虚线表示 95% 的置信区间; 横坐标上的短黑线为边际地毯, 表示实测样本值的分布情况, 下同

图 5 有机聚集体丰度和环境因子的 GAM 平滑函数拟合结果

Fig. 5 Results of GAM analysis between A_{OA} and the environmental parameters

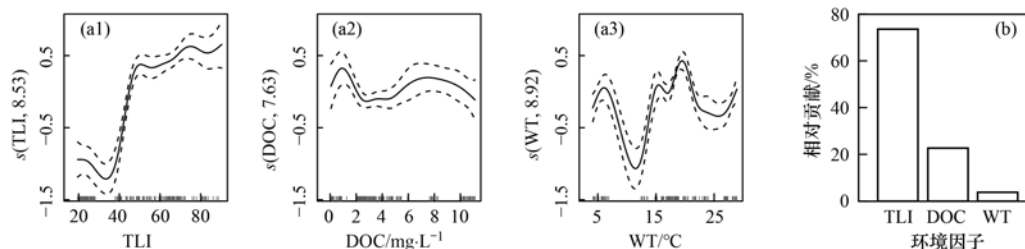


图 6 有机聚集体附着细菌丰度和环境因子的 GAM 平滑函数拟合结果

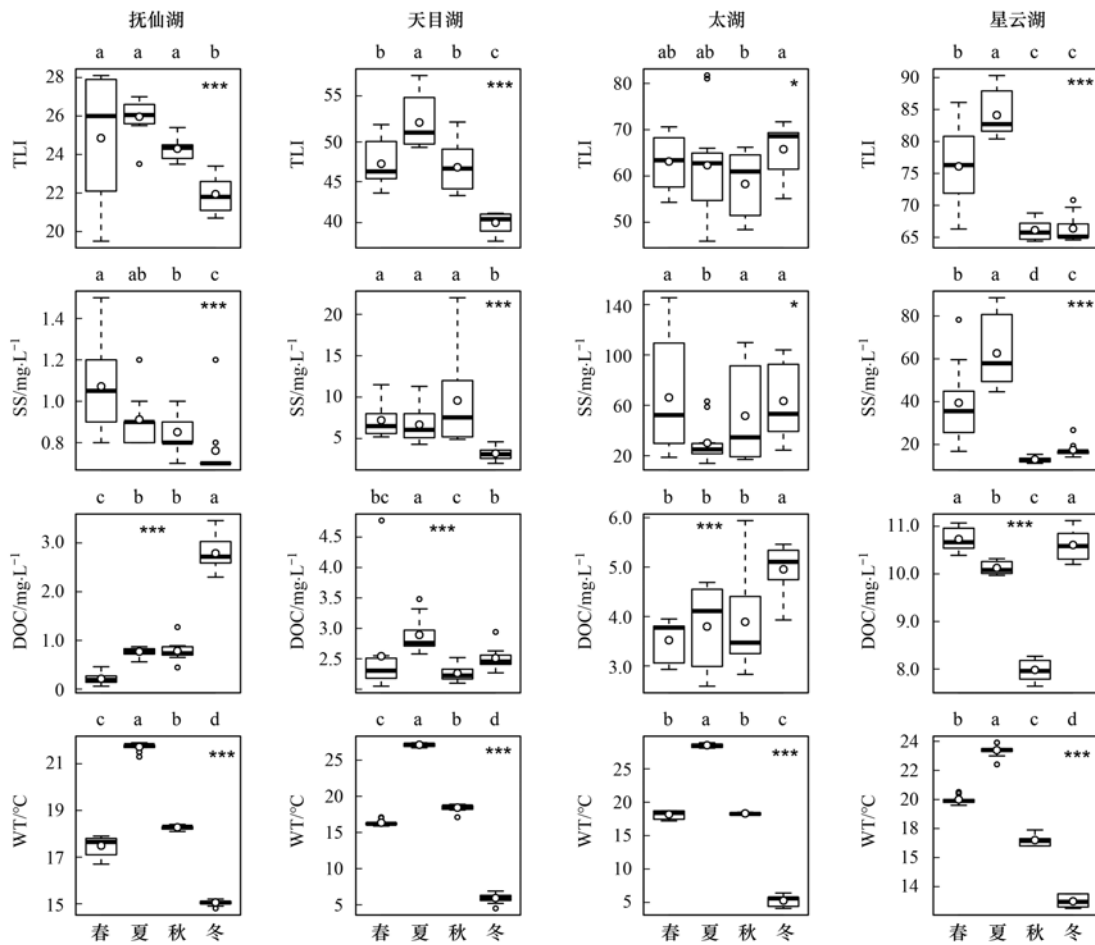
Fig. 6 Results of GAM analysis between A_{OAB} and the environmental parameters

3 讨论

3.1 影响有机聚集体丰度的主要环境因子

本研究发现: 影响 OA 丰度变化的主要环境因子之一是湖泊的营养水平, 可单独解释 A_{OA} 时空变化的 50% [$94.8\% \times 53\%$; 图 5(b)]. 从贫营养抚仙湖至富营养太湖, 随着营养水平的升高, OA 丰度有

明显增高趋势. 这和晁建颖等^[24]在太湖不同营养水平湖区中 OA 丰度的研究结果类似. 随着营养水平的增加, OA 表面积也有增长的趋势, 且重富营养星云湖 OA 平均表面积显著高于其它 3 个湖 [图 4(a2)]. 造成星云湖的 OA 平均面积较大的原因, 可能与其湖水中存在更多的藻源性 OA 有关. 这和星云湖水体中 Chla 含量显著高于其它湖泊是一致的



箱线图内标识 Kruskal-Wallis 秩和检验结果: *** 表示 $P < 0.001$, ** 表示 $P < 0.01$, * 表示 $P < 0.05$; 小写字母表示组间差异的显著性, 相同字母表示差异不显著 ($P > 0.05$), 不同字母表示差异显著 ($P < 0.05$); 箱体内部表示平均值, 横线表示中位数, 箱体外部圆表示异常值

图 7 4 个湖泊 TLI、SS、DOC 和 WT 不同季节间差异的箱线图

Fig. 7 Boxplots showing the differences in TLI, SS, DOC, and WT among the four seasons in the studied lakes

(图 2). 有模拟实验显示, 营养盐显著促进了 OA 数量和面积的增长^[26].

虽然重富营养星云湖 OA 平均表面积最高, 但其 OA 丰度却低于中富营养太湖, 说明除营养盐外, 还有其它环境因子影响 OA 丰度的变化. GAM 结果显示 SS 也是影响 OA 丰度变化的主要因子之一, 对 OA 丰度变化的相对贡献为 28% [图 5(b)]. SS 主要来源于水体中的藻类和表层沉积物再悬浮颗粒. 太湖 OA 丰度显著高于星云湖, 可能主要和表层沉积物再悬浮有关^[42,50]. 太湖是大型浅水湖泊, 平均水深只有 1.9 m, 水体扰动频繁, 沉积物发生再悬浮的概率和频度都要远大于平均水深为 5.3 m 的星云湖, 致使大量小型 OA 悬浮在水体中. 这也符合本研究的观测结果, 即太湖 SS 浓度显著高于其它 3 个湖泊(图 2).

DOC 和 WT 也显著影响 OA 丰度变化. OA 上的颗粒有机物在微生物降解过程中向水体释放大量 DOC, 吸引有趋化能力的细菌利用 DOC, 进行碳代谢和能量流通^[51]. DOC 对 OA 丰度变化的影响可能

是 OA 上颗粒有机碳(POC)代谢的结果, 而非原因^[52]. 在藻源性 OA 丰富的星云湖中, 其水体中 DOC 的含量也显著高于其它 3 个湖泊(图 2). 水温的作用可能更多地影响 OA 丰度的季节变化. 夏季水温高, 藻类生长旺盛, 藻源性 OA 的丰度高^[53]. 这可能是夏季 OA 丰度显著高于秋冬两季的原因之一[图 4(b1)].

3.2 影响有机聚集体附着细菌丰度的主要环境因子

本研究中, 湖泊营养水平也是影响 OA 附着细菌丰度的主导因子, 可单独解释 A_{OAB} 时空变化的 68% [$92.9\% \times 73\%$; 图 6(b)]. 从贫营养抚仙湖至重富营养星云湖, 附着细菌平均丰度从 $0.3 \times 10^6 \text{ cells} \cdot \text{mL}^{-1}$ 增加到 $6.2 \times 10^6 \text{ cells} \cdot \text{mL}^{-1}$, 增加了约 19 倍[图 4(a3)]. 在营养盐缺乏的海洋环境中, OA 附着细菌的丰度在 $(0.1 \sim 2.9) \times 10^6 \text{ cells} \cdot \text{mL}^{-1}$ 之间^[54,55]; 贫营养深水湖中, 其丰度范围在 $(0.1 \sim 0.5) \times 10^6 \text{ cells} \cdot \text{mL}^{-1}$ 之间^[56]; 而在生产力较高营养丰富的河口生态系统中, 其丰度可高达 250×10^6

cells·mL⁻¹ [22].

DOC 和 WT 也是影响 A_{OAB} 时空变化的主要环境因子. 细菌的生长代谢除了要利用氮磷营养外, 还需要利用碳源作为合成菌体所必需的原料, 同时也作为细菌代谢的主要能量来源. DOC 主要来自 POM 的降解释放, 可以间接反映颗粒物上碳源的多少. 因此, 水体中 DOC 和氮磷含量高时, 总细菌和 OAB 丰度也相应增加. 水温可能在 OAB 丰度的季节变化中起作用. 冬季水温低时, OAB 的平均丰度也最低[图 4(b3)]. 需要指出的是, 当夏季水温最高时, OAB 的丰度及其占比均较低, 这可能与湖泊中藻类的生理特性有关. 夏季藻类生长旺盛, 活性高, 竞争排斥作用导致健康的藻类颗粒上附着细菌数量少[图 3(d)]. 而秋季, 随着水温的降低, 衰亡藻类的相对比例升高, 附着细菌可能受到化学信号诱导^[57], 从而吸附至藻类表面并大量增殖, 以分解有机质^[18]. 因此, 秋季 OAB 的丰度显著高于冬季和夏季[图 4(b3)].

3.3 营养水平对有机聚集体潜在生态环境效应的影响

本研究表明, 颗粒态营养盐和有机质是湖泊中重要组分(图 2). PP: TP 随着湖泊营养水平的提高呈上升趋势, 在重富营养星云湖中比值高达 69%. PN: TN 从中营养天目湖至重富营养星云湖也显著升高, 在星云湖中比值高达 59%. C_{OM} 的值在深水贫营养抚仙湖中最高, 但在重富营养星云湖中也高达 79%. OA 是水体中颗粒态营养盐和有机质的主要贮存库. 在 Maggiore 湖中, 作为小型 OA 的透明胞外聚合颗粒物, 其碳的相对含量可占总有机碳的 54%^[58]. 水体中营养水平的提高可导致藻类的大量生长, 严重时形成大规模的藻类水华. 而内源性藻类残体作为水体中 OA 的重要组成部分, 因含有大量易被微生物利用的有机质^[59], 可吸附大量附着细菌并在短时间内大量增殖, 使营养盐得以快速矿化^[24,60], 以正反馈形式维持藻类水华的再次暴发, 从而形成营养盐在“藻源性 OA-矿化释放-藻类再快速利用-形成水华-衰亡形成藻源性 OA”之间的快速流通通路. 附着细菌是 OA 上最重要的活性组分之一, 本研究观测到随着营养水平的提高, OAB 的丰度也呈显著上升的趋势, 这与上述营养盐在 OA 和藻类水华间快速流通的假设是可以相互印证的. 需要说明的是, 湖泊营养水平的提高促进 OA 上有机质矿化的同时, 也会释放大量 DOC 和氮磷至水体中, 支撑水体中浮游细菌的增殖, 从而提高湖泊整体营养盐内源释放的速率, 使得富营养化湖泊的治理更加艰难. 此外, 有研究指出, 相比水体中浮游态, 有

机颗粒物上栖息的病原菌种类更丰富, 耐药基因更多, 对人类健康的负面影响也更大^[20,61]. 在全球气候变化导致湖泊藻类水华扩张的背景下^[28,29], 富营养化湖泊中藻源性 OA 在有机质矿化中的核心作用及其生态环境效应需要进一步研究.

4 结论

(1) 湖泊 OA 主要来源于藻类残体和沉积物再悬浮. OA 上富含营养盐和有机质, 其中重富营养星云湖中颗粒态磷和氮占比高达 69% 和 59%, 有机质占比达 79%.

(2) 贫营养抚仙湖、中营养天目湖、中度富营养太湖和重度富营养星云湖中 OA 丰度的年均值分别为 1.4×10^4 、 7.0×10^4 、 27.7×10^4 和 16.0×10^4 ind·mL⁻¹. 星云湖 OA 表面积均值为 $178 \mu\text{m}^2$, 显著高于其它 3 个湖泊. 季节上, 夏季 OA 丰度显著高于秋冬季; 但秋季 OA 的平均表面积最大. 湖泊营养状态、悬浮物浓度、DOC 浓度和水温是影响 OA 丰度时空变化的主要环境因子.

(3) 有机聚集体上附着细菌的丰度随着湖泊营养水平的提高呈显著上升趋势. 从贫营养至重度富营养, 四个湖泊中附着细菌丰度的年均值分别为 0.3×10^6 、 1.9×10^6 、 4.9×10^6 和 6.2×10^6 cells·mL⁻¹. 大型浅水富营养化太湖中, 附着细菌占总细菌的比值最高, 均值达 50%. 季节上, 春季和秋季 OA 上附着细菌丰度显著大于冬季; 夏季附着细菌占总细菌的比值为 26%, 显著低于其它 3 个季节. 湖泊营养状态、DOC 浓度和水温是影响附着细菌丰度时空变化的主导因子.

致谢: 感谢田伟、瞿猛、李冬、薛静琛和张雨晴等在采样和理化数据测试分析中的帮助.

参考文献:

- [1] Alldredge A L, Cole J J, Caron D A. Production of heterotrophic bacteria inhabiting macroscopic organic aggregates (marine snow) from surface waters[J]. *Limnology and Oceanography*, 1986, **31**(1): 68-78.
- [2] Grossart H P, Simon M. Limnetic macroscopic organic aggregates (lake snow): occurrence, characteristics, and microbial dynamics in Lake Constance[J]. *Limnology and Oceanography*, 1993, **38**(3): 532-546.
- [3] Simon M, Grossart HP, Schweitzer B, et al. Microbial ecology of organic aggregates in aquatic ecosystems[J]. *Aquatic Microbial Ecology*, 2002, **28**(2): 175-211.
- [4] Grossart H P. Ecological consequences of bacterioplankton lifestyles: changes in concepts are needed[J]. *Environmental Microbiology Reports*, 2010, **2**(6): 706-714.
- [5] Grossart H P, Hietanen S, Ploug H. Microbial dynamics on diatom aggregates in Øresund, Denmark[J]. *Marine Ecology Progress Series*, 2003, **249**: 69-78.
- [6] Grossart HP, Ploug H. Bacterial production and growth

- efficiencies: direct measurements on riverine aggregates [J]. *Limnology and Oceanography*, 2000, **45**(2): 436-445.
- [7] Smith D C, Simon M, Alldredge A L, *et al.* Intense hydrolytic enzyme-activity on marine aggregates and implications for rapid particle dissolution[J]. *Nature*, 1992, **359**(6391): 139-142.
- [8] Worm J, S ndergaard M. Dynamics of heterotrophic bacteria attached to *Microcystis* spp. (Cyanobacteria) [J]. *Aquatic Microbial Ecology*, 1998, **14**(1): 19-28.
- [9] Baumas C M J, Le Moigne F A C, Garel M, *et al.* Mesopelagic microbial carbon production correlates with diversity across different marine particle fractions[J]. *The ISME Journal*, 2021, **15**(6): 1695-1708.
- [10] Enke T N, Leventhal G E, Metzger M, *et al.* Microscale ecology regulates particulate organic matter turnover in model marine microbial communities [J]. *Nature Communications*, 2018, **9**(1), doi: 10.1038/s41467-018-05159-8.
- [11] Cho B C, Azam F. Major role of bacteria in biogeochemical fluxes in the ocean's interior[J]. *Nature*, 1988, **332**(6163): 441-443.
- [12] Zhang Y, Xiao W, Jiao N Z. Linking biochemical properties of particles to particle-attached and free-living bacterial community structure along the particle density gradient from freshwater to open ocean [J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2016, **121**(8): 2261-2274.
- [13] Azam F, Long R A. Sea snow microcosms[J]. *Nature*, 2001, **414**(6863): 495-498.
- [14] Azam F, Smith D C, Steward G F, *et al.* Bacteria-organic matter coupling and its significance for oceanic carbon cycling [J]. *Microbial Ecology*, 1994, **28**(2): 167-179.
- [15] Alldredge A L, Silver M W. Characteristics, dynamics and significance of marine snow [J]. *Progress in Oceanography*, 1988, **20**(1): 41-82.
- [16] Grossart H P, Simon M. Bacterial colonization and microbial decomposition of limnetic organic aggregates (lake snow) [J]. *Aquatic Microbial Ecology*, 1998, **15**(2): 127-140.
- [17] Stocker R, Seymour J R, Samadani A, *et al.* Rapid chemotactic response enables marine bacteria to exploit ephemeral microscale nutrient patches[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2008, **105**(11): 4209-4214.
- [18] Mori J F, Ueberschaar N, Lu S P, *et al.* Sticking together: inter-species aggregation of bacteria isolated from iron snow is controlled by chemical signaling[J]. *The ISME Journal*, 2017, **11**(5): 1075-1086.
- [19] Bi zi -Ionescu M, Ionescu D, Grossart H P. Organic particles: heterogeneous hubs for microbial interactions in aquatic ecosystems[J]. *Frontiers in Microbiology*, 2018, **9**, doi: 10.3389/fmicb.2018.02569.
- [20] Lyons M M, Ward J E, Gaff H, *et al.* Theory of island biogeography on a microscopic scale: organic aggregates as islands for aquatic pathogens [J]. *Aquatic Microbial Ecology*, 2010, **60**(1): 1-13.
- [21] Thiele S, Fuchs B M, Amann R, *et al.* Colonization in the photic zone and subsequent changes during sinking determine bacterial community composition in marine snow [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2015, **81**(4): 1463-1471.
- [22] B ckelmann U, Manz W, Neu T R, *et al.* Characterization of the microbial community of lotic organic aggregates ('river snow') in the Elbe River of Germany by cultivation and molecular methods[J]. *FEMS Microbiology Ecology*, 2000, **33**(2): 157-170.
- [23] Tang X M, Gao G, Qin B Q, *et al.* Characterization of bacterial communities associated with organic aggregates in a large, shallow, eutrophic freshwater lake (Lake Taihu, China) [J]. *Microbial Ecology*, 2009, **58**(2): 307-322.
- [24] 晁建颖, 高光, 汤祥明, 等. 生态系统结构对太湖有机聚集体理化性质的影响[J]. *环境科学*, 2009, **30**(11): 3196-3202.
- Chao J Y, Gao G, Tang X M, *et al.* Effects of ecosystem structure on the organic aggregates physical and chemical parameters of Lake Taihu[J]. *Environmental Science*, 2009, **30**(11): 3196-3202.
- [25] Lundgreen R B C, Jaspers C, Traving S J, *et al.* Eukaryotic and cyanobacterial communities associated with marine snow particles in the oligotrophic Sargasso Sea [J]. *Scientific Reports*, 2019, **9**, doi: 10.1038/s41598-019-45146-7.
- [26] Grossart H P, Berman T, Simon M, *et al.* Occurrence and microbial dynamics of macroscopic organic aggregates (lake snow) in Lake Kinneret, Israel, in fall [J]. *Aquatic Microbial Ecology*, 1998, **14**(1): 59-67.
- [27] Allgaier M, Grossart H P. Seasonal dynamics and phylogenetic diversity of free-living and particle-associated bacterial communities in four lakes in northeastern Germany [J]. *Aquatic Microbial Ecology*, 2006, **45**(2): 115-128.
- [28] Ho J C, Michalak A M, Pahlevan N. Widespread global increase in intense lake phytoplankton blooms since the 1980s [J]. *Nature*, 2019, **574**(7780): 667-670.
- [29] Hou X J, Feng L, Dai Y H, *et al.* Global mapping reveals increase in lacustrine algal blooms over the past decade [J]. *Nature Geoscience*, 2022, **15**(2): 130-134.
- [30] 朱广伟, 秦伯强, 张运林, 等. 2005-2017 年北部太湖水体叶绿素 a 和营养盐变化及影响因素 [J]. *湖泊科学*, 2018, **30**(2): 279-295.
- Zhu G W, Qin B Q, Zhang Y L, *et al.* Variation and driving factors of nutrients and chlorophyll-a concentrations in northern region of Lake Taihu, China, 2005-2017 [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2018, **30**(2): 279-295.
- [31] 秦伯强, 王小冬, 汤祥明, 等. 太湖富营养化与蓝藻水华引起的饮用水危机——原因与对策 [J]. *地球科学进展*, 2007, **22**(9): 896-906.
- Qin B Q, Wang X D, Tang X M, *et al.* Drinking water crisis caused by eutrophication and cyanobacterial bloom in Lake Taihu: cause and measurement [J]. *Advances in Earth Science*, 2007, **22**(9): 896-906.
- [32] Xu H, McCarthy M J, Paerl H W, *et al.* Contributions of external nutrient loading and internal cycling to cyanobacterial bloom dynamics in Lake Taihu, China: implications for nutrient management [J]. *Limnology and Oceanography*, 2021, **66**(4): 1492-1509.
- [33] Xie G J, Tang X M, Shao K Q, *et al.* Bacterial diversity, community composition and metabolic function in Lake Tianmuhu and its dammed river: effects of domestic wastewater and damming [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2021, **213**, doi: 10.1016/j.ecoenv.2021.112069.
- [34] 祁红娟, 龙麟, 周俊. 天目湖水生态环境变化趋势及影响因素研究 [J]. *环境保护与循环经济*, 2017, **37**(11): 44-47.
- [35] 杨文斌, 段文秀, 崔扬, 等. 天目湖沙河水库水生生态安全状况长期变化及影响因素 [J]. *环境科学*, 2021, **42**(10): 4739-4752.
- Yang W B, Duan W X, Cui Y, *et al.* Long-term changes and drivers of ecological security in Shahe Reservoir, China [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(10): 4739-4752.

- [36] 王苏民, 窦鸿身. 中国湖泊志[M]. 北京: 科学出版社, 1998.
- [37] 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 measures for Fuxian Lake in past decade[J]. Yangtze River, 2021, **52**(11): 47-55.
- [38] 郑田甜, 赵祖军, 赵筱青, 等. 云南星云湖水水质变化及其人文因素驱动力分析[J]. 湖泊科学, 2018, **30**(1): 79-90.
Zheng T T, Zhao Z J, Zhao X Q, *et al.* Water quality change and humanities driving force in Lake Xingyun, Yunnan Province [J]. Journal of Lake Sciences, 2018, **30**(1): 79-90.
- [39] 刘绍俊, 施艳峰, 翟竞余, 等. 星云湖微囊藻密度周年变化及其与水质指标的关系[J]. 环境化学, 2021, **40**(7): 2064-2072.
Liu S J, Shi Y F, Zhai J Y, *et al.* Annual variations of *Microcystis* density and their relationships with water quality indices in Xingyun Lake[J]. Environmental Chemistry, 2021, **40**(7): 2064-2072.
- [40] 金相灿, 屠清瑛. 湖泊富营养化调查规范[M]. (第二版). 北京: 中国环境科学出版社, 1990.
- [41] 王明翠, 刘雪芹, 张建辉. 湖泊富营养化评价方法及分级标准[J]. 中国环境监测, 2002, **18**(5): 47-49.
Wang M C, Liu X Q, Zhang J H. Evaluate method and classification standard on lake eutrophication[J]. Environmental Monitoring in China, 2002, **18**(5): 47-49.
- [42] Tang X M, Gao G, Chao J Y, *et al.* Dynamics of organic-aggregate-associated bacterial communities and related environmental factors in Lake Taihu, a large Eutrophic shallow lake in China[J]. Limnology and Oceanography, 2010, **55**(2): 469-480.
- [43] Gong Y, Tang X M, Shao K Q, *et al.* Dynamics of bacterial abundance and the related environmental factors in large shallow Eutrophic Lake Taihu[J]. Journal of Freshwater Ecology, 2017, **32**(1): 133-145.
- [44] Xie G J, Tang X M, Gong Y, *et al.* How do planktonic particle collection methods affect bacterial diversity estimates and community composition in Oligo-, Meso- and Eutrophic lakes? [J]. Frontiers in Microbiology, 2020, **11**, doi: 10.3389/fmicb.2020.593589.
- [45] Borcard D, Gillet F, Legendre P. Numerical ecology with R (2nd ed.) [M]. Cham: Springer, 2018.
- [46] 邓建明, 秦伯强, 王博雯. 广义可加模型在 R 中的快捷实现及蓝藻水华预测分析中的应用[J]. 生态学杂志, 2015, **34**(3): 835-842.
Deng J M, Qin B Q, Wang B W. Quick implementing of generalized additive models using R and its application in blue-green algal bloom forecasting[J]. Chinese Journal of Ecology, 2015, **34**(3): 835-842.
- [47] Xie G J, Tang X M, Shao K Q, *et al.* Spatiotemporal patterns and environmental drivers of total and active bacterial abundances in Lake Taihu, China[J]. Ecological Indicators, 2020, **114**, doi: 10.1016/j.ecolind.2020.106335.
- [48] Wood S N. Generalized additive models: an introduction with R (2nd ed.) [M]. Boca Raton: CRC Press, 2017.
- [49] Walsh C, Nally R M. hier. part; hierarchical partitioning. version 1.0-6 [EB/OL]. <https://CRAN.R-project.org/package=hier.part>, 2020-03-03.
- [50] Kjørboe T, Jackson G A. Marine snow, organic solute plumes, and optimal chemosensory behavior of bacteria[J]. Limnology and Oceanography, 2001, **46**(6): 1309-1318.
- [51] Zhou L, Zhou Y Q, Tang X M, *et al.* Resource aromaticity affects bacterial community successions in response to different sources of dissolved organic matter[J]. Water Research, 2021, **190**, doi: 10.1016/j.watres.2020.116776.
- [52] Cai J, Bai C R, Tang X M, *et al.* Spatiotemporal variations in seston C:N:P stoichiometry in a large eutrophic floodplain lake (Lake Taihu): do the sources of seston explain stoichiometric flexibility? [J]. Water, 2020, **12**(1), doi: 10.3390/w12010036.
- [53] Grossart H P, Simon M, Logan B E. Formation of macroscopic organic aggregates (lake snow) in a large lake: the significance of transparent exopolymer particles, plankton, and zooplankton [J]. Limnology and Oceanography, 1997, **42**(8): 1651-1659.
- [54] Ghiglione J F, Conan P, Pujo-Pay M. Diversity of total and active free-living vs. particle-attached bacteria in the euphotic zone of the NW Mediterranean Sea [J]. FEMS Microbiology Letters, 2009, **299**(1): 9-21.
- [55] Rink B, Martens T, Fischer D, *et al.* Short-term dynamics of bacterial communities in a tidally affected coastal ecosystem[J]. FEMS Microbiology Ecology, 2008, **66**(2): 306-319.
- [56] Lemarchand C, Jardillier L, Carrias J F, *et al.* Community composition and activity of prokaryotes associated to detrital particles in two contrasting lake ecosystems [J]. FEMS Microbiology Ecology, 2006, **57**(3): 442-451.
- [57] Urvoy M, Labry C, L'Helguen S, *et al.* Quorum sensing regulates bacterial processes that play a major role in marine biogeochemical cycles[J]. Frontiers in Marine Science, 2022, **9**, doi: 10.3389/fmars.2022.834337.
- [58] Callieri C, Hernández-Avilés J S, Eckert E M, *et al.* Transparent exopolymer particles (TEP), phytoplankton and picocyanobacteria along a littoral-to-pelagic depth-gradient in a large subalpine lake[J]. Journal of Limnology, 2021, **80**(3), doi: 10.4081/jlimnol.2021.2021.
- [59] Keskitalo K H, Bröder L, Jong D, *et al.* Seasonal variability in particulate organic carbon degradation in the Kolyma River, Siberia[J]. Environmental Research Letters, 2022, **17**(3), doi: 10.1088/1748-9326/ac4f8d.
- [60] Tang X M, Chao J Y, Chen D, *et al.* Organic-aggregate-attached bacteria in aquatic ecosystems: abundance, diversity, community dynamics and function [A]. In: Marcelli M (Ed.). Oceanography [M]. Rijeka: InTech-Open Access Company, 2012.
- [61] He Y K, Bai M H, He Y D, *et al.* Suspended particles are hotspots for pathogen-related bacteria and ARGs in coastal beach waters of northern China[J]. Science of the Total Environment, 2022, **817**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.153004.

CONTENTS

Impact of Climate Change on Summer Ozone in China	HU An-qi, XIE Xiao-dong, GONG Kang-jia, <i>et al.</i> (1801)
Spatial-temporal Variation and Driving Factors of Ozone in China from 2019 to 2021 Based on EOF Technique and KZ Filter	WANG Hao-qì, ZHANG Yu-fen, LUO Zhong-wei, <i>et al.</i> (1811)
Photochemical Mechanism and Control Strategy Optimization for Summertime Ozone Pollution in an Industrial City in the North China Plain	ZHENG Zhen-sen, DOU Jian-ping, ZHANG Guo-tao, <i>et al.</i> (1821)
Spatiotemporal Evolution Characteristics of PM _{2.5} -O ₃ Compound Pollution in Chinese Cities from 2015 to 2020	NIU Xiao-xiao, ZHONG Yan-mei, YANG Lu, <i>et al.</i> (1830)
Spatiotemporal Distribution Characteristics of Co-pollution of PM _{2.5} and Ozone over BTH with Surrounding Area from 2015 to 2021	SONG Xiao-han, YAN Li, LIU Wei, <i>et al.</i> (1841)
Spatio-temporal Variation in PM _{2.5} Concentration and Its Relationship with Vegetation Landscape Patterns in Typical Economic Zones in China from 2000 to 2020	XU Yong, LI Xin-yi, HUANG Wen-ting, <i>et al.</i> (1852)
Characteristics and Source Apportionment of Atmospheric Ion Deposition During Winter and Spring in the Core Area of Beijing	ZHAO Yu, LI Bei-bei, HUANG Yu-hu, <i>et al.</i> (1865)
Input Characteristics of Dry Deposition of Atmospheric Particulates and Metals in Farmland in the Suburb of Nanjing	LIU Cui-ying, JIN Hao, FAN Jian-ling (1873)
Pollution Characterizations and Oxidative Potentials of Water-Soluble Organic Matters at Different Polarity Levels in Winter PM _{2.5} Over Xi'an	LUO Yu, HUANG Sha-sha, ZHANG Tian, <i>et al.</i> (1882)
Emission Characteristics of Organic Carbon and Elemental Carbon in PM ₁₀ and PM _{2.5} from Vehicle Exhaust and Civil Combustion Fuels	WANG Hong-lei, LIU Si-han, SUN Jie-juan, <i>et al.</i> (1890)
Characteristics and Source Apportionment of PM _{2.5} in the Core Area of Ili River Valley in Spring	GU Chao, XU Tao, MA Chao, <i>et al.</i> (1899)
Evaluation of Changes in PM _{2.5} Exposure Concentration and Health Risk for Urban Resident in Zhengzhou Based on High Spatial Resolution Grids	LI Yuan, XU Yi-fei, YUAN Ming-hao, <i>et al.</i> (1911)
Emission Inventory of Building Material Industry in Henan Province Based on Multi-source Data Integration	LIU Xiao, HU Jing-nan, WANG Hong-mei, <i>et al.</i> (1924)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of Atmospheric Volatile Organic Compounds in Winter in Kaifeng City	SHI Yu-qi, ZHENG Kai-yun, DING Wei-ting, <i>et al.</i> (1933)
Changes in O ₃ -VOCs-NO _x Sensitivity and VOCs Sources at an Urban Site of Nanjing Between 2020 and 2021	LU Xiao-bo, WANG Ming, DING Feng, <i>et al.</i> (1943)
Variation Characteristics and Ozone Formation Potential of Ambient VOCs in Urban Beijing in Summer	ZHANG Rui, SUN Xue-song, WANG Yu, <i>et al.</i> (1954)
Chemical Characteristics and Source Apportionment for VOCs During the Ozone Pollution Episodes and Non-ozone Pollution Periods in Qingdao	JIA Zhi-hai, GU Yao, KONG Cui-li, <i>et al.</i> (1962)
Characteristics of O ₃ Production in the Western Suburb of Hefei in Summer Based on the Observation of Total Peroxy Radical	YU Hui, WEI Na-na, XU Xue-zhe, <i>et al.</i> (1974)
Evaluation of Energy Saving and Carbon Reduction Effect of Air Pollution Prevention and Control Action Plan and Innovation Intermediary Effect	LI Shao-lin, WANG Qi-qi (1985)
Scenario Simulation and Effects Assessment of Co-control on Pollution and Carbon Emission Reduction in Beijing	YU Shan, ZHANG Shuang, ZHANG Zeng-jie, <i>et al.</i> (1998)
Simulation of Anthropogenic CO ₂ Emissions in the Yangtze River Delta Based on Different Emission Inventories	MA Xin-yi, HUANG Wen-jing, HU Ning, <i>et al.</i> (2009)
Water Quality Change Trend and Risk Analysis of Wuhan Hanjiang River Water Source	ZHUO Hai-hua, LOU Bao-feng, XU Jie, <i>et al.</i> (2022)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Antibiotics and Resistance Genes in Different Water Sources in the Wuhan Section of the Yangtze River	LI Bo-lin, ZHANG He, WANG Jun, <i>et al.</i> (2032)
Occurrence Characteristics, Sources, and Toxicity Risk Analysis of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Typical Rivers of Northern Shaanxi Mining Area, China	WU Xi-jun, DONG Ying, ZHAO Jian, <i>et al.</i> (2040)
Spatio-temporal Characteristics of Organic Aggregates and the Driving Factors in Typical Lakes	XIE Gui-juan, GONG Yi, ZHU Fu-cheng, <i>et al.</i> (2052)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Microplastics in Water of Different Functional Parks in Guilin	LI Pei-zhao, WU Li, HUANG Fei-fei, <i>et al.</i> (2062)
Environmental Driving Factors and Assessment on the Aquatic Ecosystem of Periphytic Algae of Six Inflow Rivers in Yangtze River Basin	ZHANG Jing, HU Yu-xin, HU Sheng, <i>et al.</i> (2072)
Influence and Driving of Environmental Heterogeneity on the Epilithic Diatom Community in Xiangxi River, a Tributary of the Three Gorges Reservoir Area	JI Lu-lu, ZHAO Lu, OUYANG Tian, <i>et al.</i> (2083)
Characteristics of Phytoplankton Communities and Key Impact Factors in Three Types of Lakes in Wuhan	ZHANG Hao-kun, MIN Fen-li, CUI Hui-rong, <i>et al.</i> (2093)
Effects of Heavy Metal Pollution on the Structure of Microbial Communities in Different Habitats	HE Yi-fan, XIAO Xin-zong, WANG Jia-wen (2103)
Structure and Distribution Characteristics of Bacterial Community in Boqing River Water	WANG Sen, CHEN Jian-wen, ZHANG Hong, <i>et al.</i> (2113)
Effects of Microplastic Exposure on the Community Structure and Function of Symbiotic Bacteria in <i>Sinularia microclavata</i>	LIU Min, CHE Wen-xue, ZENG Ying-xu, <i>et al.</i> (2122)
Distribution Characteristics and Health Risk Assessment of Emerging Contaminants from Raw Water to Drinking Water in Shanghai	YAN Qi (2136)
Adsorption Characteristics of Fluoride in Low-Concentration Water by Aluminum and Zirconium-Modified Biochar	LIU Yan-fang, GAO Wei, LIU Rui, <i>et al.</i> (2147)
Sorption Characteristics and Site Energy Distribution Theory of Typical Estrogens on Microplastics	LIU Jiang-yan, ZHENG Mi-mi, HU Jia-wu, <i>et al.</i> (2158)
Selection and Evaluation of Model Pollutants for Performance Assessment of Advanced Treatment of Industrial Park Wastewater by Ozonation	XIN Bo, SHAN Chao, LÜ Lu (2168)
Identifying Driving Factors and Their Interacting Effects on Sources of Heavy Metal in Farmland Soils with Geodetector and Multi-source Data	ZHANG Hong-ze, CUI Wen-gang, LIU Sui-hua, <i>et al.</i> (2177)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of Heavy Metals in Farmland Soils Around the Gangue Heap of Coal Mine Based on APCS-MLR and PMF Receptor Model	MA Jie, SHEN Zhi-jie, ZHANG Ping-ping, <i>et al.</i> (2192)
Contamination and Probabilistic Health Risk Assessment of Heavy Metals in Agricultural Soils Around a Lead-Zinc Smelter	HUANG Jian-bo, JIANG Deng-deng, WEN Bing, <i>et al.</i> (2204)
Prediction of PAHs Content in Soil Around Gas Stations in Beijing Based on BP Neural Network	MA Sai-yan, WEI Hai-ying, MA Jin, <i>et al.</i> (2215)
Spatial-temporal Distribution and Risk Assessment of Quinolones Antibiotics in Soil of Shijiazhuang City	ZHAO Xin-yu, CHEN Hui, ZHAO Bo, <i>et al.</i> (2223)
Accumulation and Pollution Risks of Heavy Metals in Soils and Agricultural Products from a Typical Black Shale Region with High Geological Background	DENG Shuai, DUAN Jia-hui, NING Mo-huan, <i>et al.</i> (2234)
Geochemical Characteristics of Cd in Different Parent Soils in Karst Area and Prediction of Cd Content in Maize	DAI Liang-liang, XU Hong-gen, GONG Hao, <i>et al.</i> (2243)
Pollution Risk and Contribution Analysis of Pb, Cd, and As in Soils and Crops Under Different Land Use Types in Longyan City	WANG Rui, CHEN Nan, ZHANG Er-xi (2252)
Influencing Factors of Cadmium Content in Wheat Grain: A Meta-analysis and Decision Tree Analysis	LIU Na, ZHANG Shao-bin, GUO Xin-yu, <i>et al.</i> (2265)
Response Characteristics of Soil Organic Carbon Pool and Its Chemical Composition During Secondary Forest Succession in the Loess Plateau	LIU Han-yu, LIU Ying-yi, ZHANG Qi, <i>et al.</i> (2275)
Effects of Short-Term Nitrogen and Phosphorus Addition on Soil Respiration Components in a Subalpine Grassland of Qilian Mountains	JIANG Yuan, GAN Xiao-ling, CAO Feng-feng, <i>et al.</i> (2283)
Response of Soil Microbial Diversity to Long-term Enclosure in Degraded Patches of Alpine Meadow in the Source Zone of the Yellow River	YANG Peng-nian, LI Xi-lai, LI Cheng-yi, <i>et al.</i> (2293)
Diversity and Predictive Functional of <i>Caragana jubata</i> Bacterial Community in Rhizosphere and Non-rhizosphere Soil at Different Altitudes	LI Yuan-yuan, XU Ting-ting, AI Zhe, <i>et al.</i> (2304)
Effects of Simulated Acid Rain and Nitrogen Deposition on Soil Bacterial Community Structure and Diversity in the Masson Pine Forest	WANG Nan, QIAN Shao-yu, PAN Xiao-cheng, <i>et al.</i> (2315)
Effects of Phosphogypsum and <i>Suaeda salsa</i> on the Soil Moisture, Salt, and Bacterial Community Structure of Salinized Soil	LIU Yue, YANG Shu-qing, ZHANG Wan-feng, <i>et al.</i> (2325)
Effects of Combined Application of Fungal Residue and Chemical Fertilizer on Soil Microbial Community Composition and Diversity in Paddy Soil	GENG He-tian, WANG Xu-dong, SHI Si-bo, <i>et al.</i> (2338)
Effects of Aeration on Surface Water Nutrient Dynamics and Greenhouse Gas Emission in Different Straw Returning Paddy Fields	HU Jin-hui, XUE Li-hong, QIAN Cong, <i>et al.</i> (2348)
Effects of Exogenous Melatonin Treatment on the Growth and Antioxidant System of Rice Seedlings Under Antimony Stress	CHU Yu-tan, LI Yan, HUANG Yi-zong, <i>et al.</i> (2356)
Life Cycle Prediction Assessment of Energy Saving and New Energy Vehicles for 2035	FU Pei, LAN Li-bo, CHEN Ying, <i>et al.</i> (2365)
Distribution, Sources, and Behavioral Characteristics of Microplastics in Farmland Soil	BO Lu-ji, LI Bing, ZHANG Kai, <i>et al.</i> (2375)
Research Progress on the Remediation Technology of Herbicide Contamination in Agricultural Soils	HU Fang-yu, AN Jing, WANG Bao-yu, <i>et al.</i> (2384)
Research Progress and Prospect of Herbicide Residue Characteristics in Black Soil Region of China	LI Rui, WU Qiu-mei, ZHAO Gui-mei, <i>et al.</i> (2395)