

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第7期

Vol.39 No.7

2018

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

近20年来中国典型区域PM _{2.5} 时空演变过程	罗毅,邓琼飞,杨昆,杨扬,商春雪,喻臻钰 (3003)
西安市PM _{2.5} 健康损害价值评估	魏国茹,史兴民 (3014)
河北香河亚微米气溶胶组分特性、来源及其演变规律分析	江琪,王飞,孙业乐 (3022)
南京北郊秋季PM _{2.5} 碳质组分污染特征及来源分析	徐足飞,曹芳,高嵩,鲍孟盈,石一凡,章炎麟,刘晓妍,范美益,张雯淇,卞航,刘寿东 (3033)
临安夏季霾和清洁天气PM _{2.5} 化学组成特征比较	梁林林,孙俊英,张养梅,刘畅,徐婉筠,张根,刘旭艳,马千里 (3042)
盘锦市秋冬季节PM _{2.5} 中碳组分特征及来源解析	张蕾,姬亚芹,张军,王士宝,李越洋,赵静琦,张伟 (3051)
南京冬季气溶胶光学特性及黑碳光吸收增强效应	黄聪聪,马嫣,郑军 (3057)
夏季青岛大气粗细粒子中微量元素的浓度、溶解度及干沉降通量	李鹏志,李茜,石金辉,高会旺,姚小红 (3067)
太原市夏季降水中溶解态重金属特征及来源	叶艾玲,程明超,张璐,何秋生,郭利利,王新明 (3075)
杭州地区大气CO ₂ 体积分数变化特征及影响因素	浦静姣,徐宏辉,姜瑜君,杜荣光,齐冰 (3082)
典型工业源VOCs治理现状及排放组成特征	景盛翱,王红丽,朱海林,杨强,卢滨,夏阳,余传冠,陶士康,李莉,楼晟荣,黄成,唐伟,井宝莉 (3090)
地级市域工业VOCs排放源产排特性及其控制技术应用现状:以秦皇岛市为例	胡旭睿,虎啸宇,王灿 (3096)
青霉素发酵尾气VOCs污染特征及健康风险评价	郭斌,么瑞静,张硕,马磊,康江,王姗姗 (3102)
轻型汽油车尾气OC和EC排放因子实测研究	黄成,胡馨遥,鲁君 (3110)
南京市大气降尘重金属污染水平及风险评价	田春晖,杨若杼,古丽扎尔·依力哈木,钱新,王金花,李慧明 (3118)
西安城区路面细颗粒灰尘重金属污染水平及来源分析	石栋奇,卢新卫 (3126)
三峡库区主要河流秋季pCO ₂ 及其影响因素	罗佳宸,毛蓉,李思悦 (3134)
泾河支流地表水地下水的水化学特征及其控制因素	寇永朝,华琨,李洲,李志 (3142)
生物滞留对城市地表径流磷的去除途径	李立青,刘雨倩,杨佳敏,王娟 (3150)
淀山湖浮游植物功能群演替特征及其与环境因子的关系	杨丽,张玮,尚光霞,张军毅,王丽卿,魏华 (3158)
抚仙湖硅藻群落的时空变化特征及其与水环境的关系	李蕊,陈光杰,康文刚,陈丽,王教元,陈小林,刘园园,冯钟,张涛 (3168)
蓝藻水华及其降解对沉积物-水微界面的影响	王永平,谢瑞,晁建颖,姬昌辉,于剑 (3179)
生物炭对人工湿地植物根系形态特征及净化能力的影响	徐德福,潘潜澄,李映雪,陈晓艺,王佳俊,周磊 (3187)
Mn-Co/蜂窝陶瓷催化剂制备及催化臭氧化对苯二酚效能	张兰河,高伟国,陈子成,张海丰,王旭明 (3194)
Fe/Cu双金属活化过一硫酸盐降解四环素的机制	李晶,鲍建国,杜江坤,冷一非,孔淑琼 (3203)
铈酸盐改性钛酸纳米片对水中Cd(II)的吸附行为及机制	康丽,刘文,刘晓娜,刘宏芳,李一菲 (3212)
铁锰原位氧化产物吸附微量磷的实验	蔡言安,毕学军,张嘉凝,董杨,刘文哲 (3222)
制备方法对铁钛复合氧化物磷吸附性能的影响:共沉淀法与机械物理混合法	仲艳,王建燕,陈静,张高生 (3230)
电导率对厌氧产酸、正渗透与微生物燃料电池耦合工艺运行性能的影响	陆宇琴,刘金梦,王新华,李秀芬,李晔 (3240)
不同磷浓度下生物除磷颗粒系统的COD需求	李冬,曹美忠,郭跃洲,梅宁,李帅,张杰 (3247)
基质浓度对ABR反应器SAD协同脱氮除碳效能影响	张敏,姜滢,汪瑶琪,韦佳敏,陈重军,沈耀良 (3254)
采用含硫铁化学污泥作为反硝化电子供体进行焦化废水中总氮深度去除	付炳炳,潘建新,马景德,王丰,吴海珍,韦朝海 (3262)
间歇曝气下短程硝化耦合污泥微膨胀稳定性	高春娣,孙大阳,安冉,赵楠,焦二龙,祝海兵 (3271)
基于高通量测序的SBR反应器丝状膨胀污泥菌群分析	洪颖,姚俊芹,马斌,徐双,张彦江 (3279)
纳米零价铁(NZVI)对厌氧产甲烷活性、污泥特性和微生物群落结构的影响	苏润华,丁丽雨,任洪强 (3286)
气水比对后置固相反硝化滤池工艺脱氮及微生物群落影响	张千,吉芳英,付旭芳,陈晴空 (3297)
活性污泥胞外多聚物提取方法的比较	孙秀玥,唐珠,杨新萍 (3306)
耐冷嗜碱蒙氏假单胞菌H97的鉴定及其好氧反硝化特性	蔡茜,何腾霞,冶青,李振轮 (3314)
PFOS前体物质(PreFOSs)降解菌的分离鉴定及其降解特性	赵淑艳,周涛,王博慧,梁田坤,柳丽芬 (3321)
采油井场土壤微生物群落结构分布	蔡萍萍,宁卓,何泽,张敏,石建省 (3329)
铜尾矿坝不同恢复年限土壤理化性质和酶活性的特征	王瑞宏,贾彤,曹苗文,柴宝峰 (3339)
广西某赤泥堆场周边土壤重金属污染风险	郭颖,李玉冰,薛生国,廖嘉欣,王琼丽,吴川 (3349)
邻苯二甲酸酯在重庆市城市土壤中的污染分布特征及来源分析	杨志豪,何明靖,杨婷,卢俊峰,魏世强 (3358)
成都平原区水稻土有机碳剖面分布特征及影响因素	李珊,李启权,王昌全,张浩,肖怡,唐嘉玲,代天飞,李一丁 (3365)
塔里木盆地北缘绿洲不同连作年限棉田土壤有机碳、无机碳含量与环境因子的相关性	赵晶晶,贡璐,安申群,李杨梅,陈新 (3373)
塔里木盆地北缘绿洲4种土地利用方式土壤有机碳组分分布特征及其与土壤环境因子的关系	安申群,贡璐,李杨梅,陈新,孙力 (3382)
高原喀斯特土壤有机碳短期稳定的温度作用机制	唐国勇,张春华,刘方炎,马艳 (3391)
施硼对水稻幼苗吸收和分泌砷的影响	朱毅,孙国新,陈正,胡莹,郑瑞伦 (3400)
不同改良剂对铅镉污染农田水稻重金属积累和产量影响的比较分析	胡雪芳,田志清,梁亮,陈俊德,张志民,朱祥民,王士奎 (3409)
南京大气臭氧浓度的季节变化及其对主要作物影响的评估	赵辉,郑有飞,魏莉,关清 (3418)
三峡库区涪陵和忠县两地居民发汞含量水平及影响因素分析	程楠,谢青,樊宇飞,王永敏,张成,王定勇 (3426)
人粪便好氧堆肥过程中典型抗生素的消减特性	时红蕾,王文昌,李倩 (3434)
COD/SO ₄ ²⁻ 对青霉素菌渣厌氧消化影响	强虹,李玉友,裴梦富 (3443)
果蔬类垃圾主发酵堆肥产物储放和利用的恶臭释放特征	何品晶,蒋宁玲,徐贤,韦顺艳,邵立明,吕凡 (3452)
曾用抗生素磺胺二甲嘧啶对稻田NH ₃ 挥发的影响	庞炳坤,张敬沙,吴杰,李志琳,蒋静艳 (3460)
《环境科学》征订启事(3141)	
《环境科学》征稿简则(3202)	
信息(3229, 3433, 3451)	

淀山湖浮游植物功能群演替特征及其与环境因子的关系

杨丽^{1,2}, 张玮^{1,2,3*}, 尚光霞^{1,2}, 张军毅⁴, 王丽卿^{1,2,3*}, 魏华¹

(1. 上海海洋大学农业部鱼类营养与环境生态研究中心, 上海 201306; 2. 上海海洋大学水产种质资源发掘与利用教育部重点实验室, 上海 201306; 3. 上海海洋大学水产科学国家级实验教学示范中心, 上海 201306; 4. 无锡市环境监测中心站, 无锡 214023)

摘要: 淀山湖属亚热带浅水湖泊, 是上海市重要的水源地之一。为了解该湖浮游植物功能群的特征及其与环境因子的关系, 于 2015 年 1 月至 2016 年 12 月逐月对浮游植物和环境因子进行调查分析。结果表明, 淀山湖浮游植物可划分为 26 个功能群, 其中 15 个功能群(B、C、D、F、G、H1、J、Lo、M、MP、P、W1、W2、X1 和 X2)为该湖的优势功能群。2015~2016 年淀山湖优势浮游植物功能群呈现明显的周年演替特征, 2015 年为 D/C→Lo/C/MP→MP/J/P/W1→P, 2016 年为 P→W2/Lo→W2/G/M/H1→P。利用典范对应分析(CCA)探讨淀山湖浮游植物功能群与环境因子间的相互关系, 结果表明水位波动(WLF)、溶解氧(DO)、水温(WT)、总磷(TP)、电导率(EC)、透明度(SD)和总氮(TN)是影响淀山湖浮游植物功能群的主要环境因子, 其中氮磷营养盐和水位波动对淀山湖浮游植物功能群的影响应该引起关注。

关键词: 浮游植物; 功能群; 淀山湖; 演替; 环境因子

中图分类号: X171 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)07-3158-10 DOI: 10.13227/j.hjks.201710030

Succession Characteristics of Phytoplankton Functional Groups and Their Relationships with Environmental Factors in Dianshan Lake, Shanghai

YANG Li^{1,2}, ZHANG Wei^{1,2,3*}, SHANG Guang-xia^{1,2}, ZHANG Jun-yi⁴, WANG Li-qing^{1,2,3*}, WEI Hua¹

(1. Centre for Research on Environmental Ecology and Fish Nutrient (CREEFN) of the Ministry of Agriculture, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 2. Key Laboratory of Exploration and Utilization of Aquatic Genetic Resources, Ministry of Education, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 3. National Demonstration Center for Experimental Fisheries Science Education, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 4. Wuxi Environmental Monitoring Centre Station, Wuxi 214023, China)

Abstract: Dianshan Lake, a subtropical shallow lake, is one of the main drinking water sources of Shanghai City. In order to explore the characteristics of phytoplankton functional groups (PFGs) and their relationships with environmental factors in Dianshan Lake, phytoplankton and water samples collected from January 2015 to December 2016 were characterized. Results suggested that there were 26 PFGs during our study period. The biomasses of 15 PFGs (B, C, D, F, G, H1, J, Lo, M, MP, P, W1, W2, X1, and X2) were dominant and had marked annual succession patterns: D/C → Lo/C/MP → MP/J/P/W1 → P in 2015 and P → W2/Lo → W2/G/M/H1 → P in 2016. To elucidate the relationships of PFGs with the environmental factors, canonical correspondence analysis (CCA) was conducted. Results showed that water level fluctuation (WLF), dissolved oxygen (DO), water temperature (WT), total phosphorus (TP), electrical conductivity (EC), transparency (SD), and total nitrogen (TN) were the main impact factors associated with the composition variations of PFGs in Dianshan Lake. From this study, it is proposed that the effects of nitrogen, phosphorus, and WLF on the PFGs in Dianshan Lake should be paid more attention.

Key words: phytoplankton; functional groups; Dianshan Lake; succession characteristics; environmental factor

浮游植物作为水体中主要的初级生产者, 其种类组成、群落结构和数量变化可以反映水环境的变化^[1], 因此在水域生态研究中此类生物常被用作评估水体健康状况的指示性生物类群^[2]。传统的浮游植物群落研究基于系统分类方法, 将种属作为研究的基本单元^[3], 该种分类方法难以体现浮游植物群体的环境生态特征, 在生态学的研究和应用上存在不足之处^[4]。Reynolds 等^[4]和 Padisák 等^[5]在 Grime^[6]提出 C-S-R 植物生态对策模型的基础上, 将

植物种类”进行功能分组, 归纳出了 39 个浮游植浮功能群。这种功能群分类方法的提出, 从生态功能的角度对浮游植物进行分类, 弥补了传统分类方法在生态学研究中的应用上的不足, 能更加准确地描述浮游植物的生境特征, 并与浮游植物群落演替过程

收稿日期: 2017-10-09; 修订日期: 2018-01-03

基金项目: 上海市水务局淀山湖健康评估项目; 上海市优秀技术带头人计划项目(15XD1522900)

作者简介: 杨丽(1992~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为藻类生态学, E-mail: aquayangl@163.com

* 通信作者, E-mail: weizhang@shou.edu.cn; lqwang@shou.edu.cn

有效结合,较好地预测特定生境下浮游植物的群落分布状况^[7,8]。

目前,游植物功能群理论在国外已被广泛应用于浮游植物生态学研究以及湖泊、水库、河流等各种类型水体的环境质量评价体系中^[9~12]。我国对浮游植物功能群的研究开展较晚,近年来,随着对水环境研究的不断深入和浮游植物分类方法的逐步改进和完善,我国学者也陆续将浮游植物功能群这一划分方法运用于各种类型水环境的研究中,主要包括对赣江^[13]、香溪河^[14]等河流水体,海南典型供水水库^[15]、黑龙江安邦河湿地^[16]、云南高原湖泊^[17]等不同类型的浮游植物功能群和水质评价的研究。目前为止,有关长江下游、太湖流域浅水湖泊浮游植物功能群的研究还鲜有报道。

淀山湖作为上海重要的饮用水源地,自 1959 年以来国内学者就对其浮游植物开展了大量研究,但一直沿用传统的群落分类方法,根据浮游植物的物种分类特征,研究浮游植物的种类组成、初级生产力、群落结构、季节动态以及优势种生态位^[18~20]等;对于浮游植物功能群及其影响因子的报道极少,仅有张琪等^[21]对淀山湖春夏季的浮游植物功能群与环境因子(主要是理化因子)做了初步研究和报道。本研究基于 2015~2016 年间淀山湖每月的水文、水质参数及浮游植物数据,结合浮游植物功能群分类方法,对其进行功能群划分,探究浮游植物功能群的周年演替特征及影响浮游植物优势功能群的主要环境因子,以期对淀山湖浮游植物生态研究和湖区水资源的保护和管理提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

淀山湖是上海市最大的天然淡水湖泊,地处江苏、上海交界处(31°01'~31°12'N, 120°54'~121°01'E),是上海市重要的水源地之一,进出支流众多。其水域面积为 62 km²,平均水深 2.1 m,最大水深 3.6 m^[22, 23]。年平均降雨量 1 037.7 mm,汛期降雨多集中在 6~9 月^[24]。该湖所处区域属亚热带季风气候,气候温暖湿润,四季分明(春季 3~5 月,夏季 6~9 月,秋季 10~11 月,冬季 12 月~次年 2 月)^[25]。

根据淀山湖的湖区情况,共设置 11 个采样点,采样点设置如图 1 所示。

1.2 样品的采集与分析

2015 年 1 月至 2016 年 12 月,逐月对淀山湖的

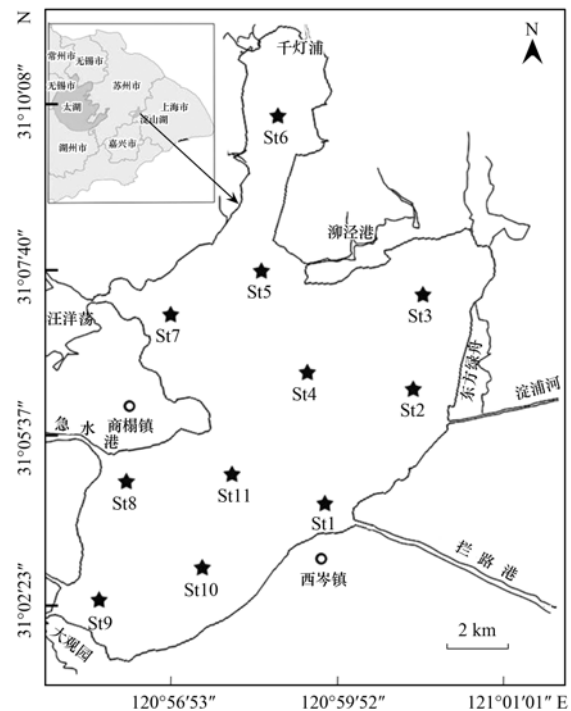


图 1 淀山湖采样点示意

Fig. 1 Sampling sites in Dianshan Lake

11 个采样点进行样品采集。浮游植物采集:使用 5 L 有机玻璃采水器采集 0.5 m 和 1.5 m 的混合水样,混匀后,取 1 L 加入福尔马林和鲁哥氏碘液进行固定,并于实验室静置 48 h 后,虹吸上清液浓缩至 50 mL,用移液器移取 0.1 mL 浓缩液匀样于帕默尔计数框中进行鉴定与计数;藻类鉴定参考文献^[26]。藻类生物量采用细胞体积法推算,通过形态相近的几何体积公式计算出各藻类的细胞体积,细胞体积的毫升数相当于细胞重量的克数,本文以 μm^3 作为量算细胞体积的单位,则 $10^9 \mu\text{m}^3 \approx 1 \text{ mg}$ 鲜藻重,由此可在藻类细胞密度的基础上,将藻类细胞体积换算为生物量($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)^[27]。

水质参数:透明度(SD)采用塞氏盘现场测定,水温(WT)、pH 值、电导率(EC)、溶解氧(DO)采用 YSI 多功能水质分析仪现场测定;取 500 mL 混合水样,4 h 内带回实验室,进行总氮(TN)、总磷(TP)、高锰酸盐指数等指标测定,具体测定方法参考文献^[28]。

水文参数:降雨量和水位数据由水利部太湖流域管理局太湖网发布的水情月报^[29]进行整理获得。

1.3 功能能群的划分

根据 Reynolds 等^[4]和 Padisák 等^[5]提出的功能群分类方法对淀山湖浮游植物进行功能分组。优势功能群:将划分后的功能群按生物量进行筛选和排

序,若功能群生物量至少在一个采样点占总生物量 5% 以上(即相对生物量 > 5%),即达到优势地位,确定为优势功能群^[8]。

1.4 数据统计与分析

功能群与环境因子的多元分析采用 CANOCO 4.5 软件包进行,将浮游植物功能群生物量与环境因子进行 $\lg(x+1)$ 转换和标准化处理,首先进行去趋势对应分析(DCA),选择合适的排序和分析方法,根据分析结果,本文选用了典范对应分析(CCA),并采用蒙特卡洛置换检验,以逐步迭代的方式筛选出有显

著解释性的环境因子,进行分析作图,以揭示显著环境因子对优势浮游植物功能群的影响。

本文其他分析和作图在 Origin 2017 和 Excel 中完成。

2 结果与分析

2.1 淀山湖水环境因子特征

淀山湖 2015 ~ 2016 年环境因子月变化情况见图 2,从各月的数值可见,环境因子呈现出明显的季节变化。TN 质量浓度范围 $0.62 \sim 3.16 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,在

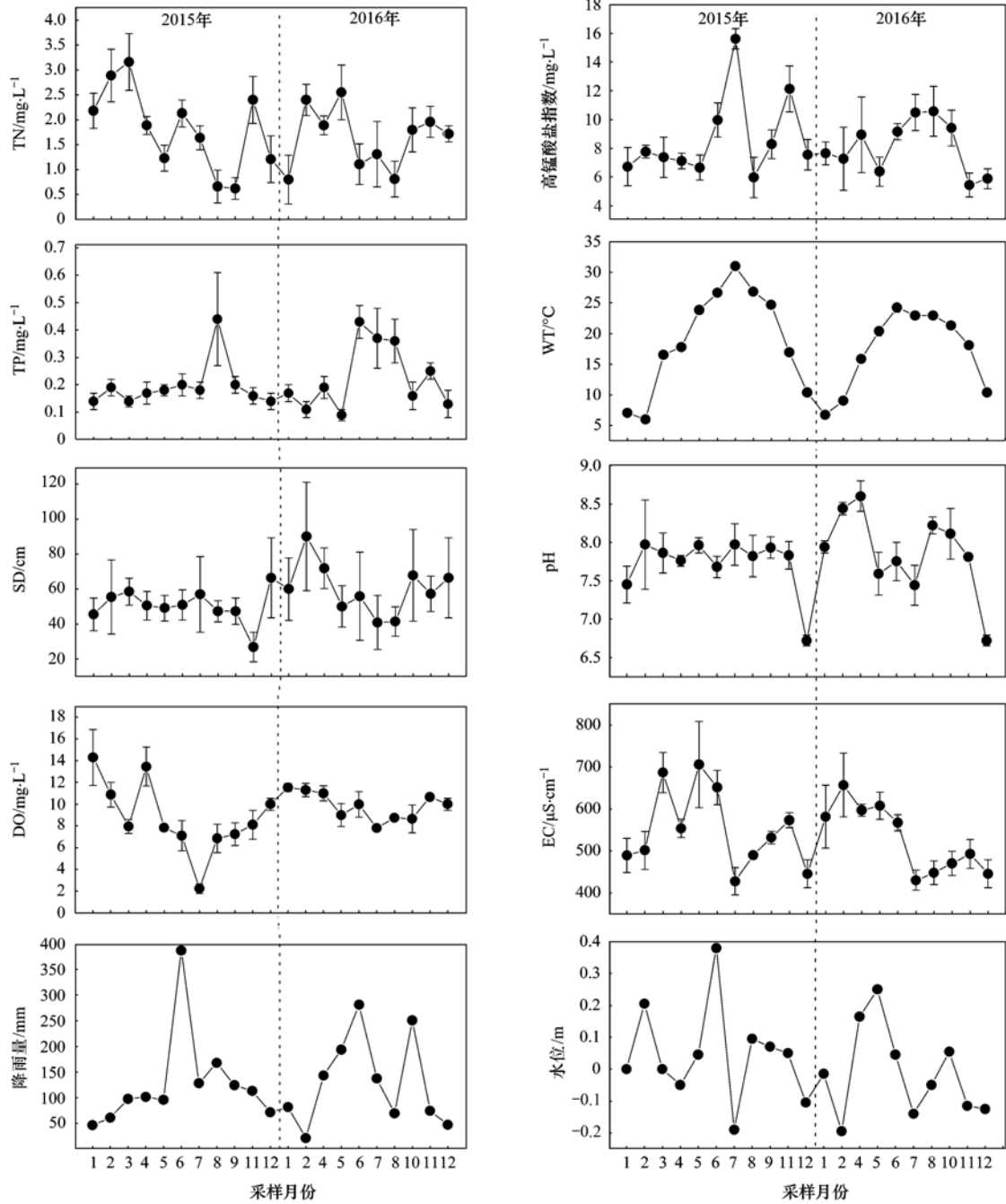


图 2 淀山湖环境因子的月变化情况

Fig. 2 Monthly variation in environmental factors of Dianshan Lake

春季最高,夏季最低; TP 质量浓度范围 $0.09 \sim 0.44 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、高锰酸盐指数质量浓度范围 $5.44 \sim 15.61 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、WT 变化范围为 $5.99 \sim 31.04^\circ\text{C}$,三者均是夏季最高,秋季次之,冬季最低; SD 范围为 $26.82 \sim 90.00 \text{ cm}$, DO 质量浓度范围 $2.24 \sim 14.28 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 两者均呈现冬季最高,春季次之,夏季和冬季较低; pH 值范围 $6.72 \sim 8.60$,在冬季最低,其它季节接近; EC 范围 $427.84 \sim 705.79 \mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$,在春季最高,夏季较低; 降雨量为 $21.95 \sim 385.80 \text{ mm}$,水位变幅为 $-0.2 \sim 0.38 \text{ m}$,两者在春、夏、秋较高,其中 2015 年降雨量在夏季 6 月出现峰值,为 385.8 mm ,2016 年 6 月、11 月也出现峰值,分别为 280.75 mm 和 250.55 mm 。

2.2 浮游植物组成及功能群的划分

2.2.1 淀山湖浮游植物组成

在 2015 年 1 月至 2016 年 12 月逐月对淀山湖的浮游植物进行调查, 11 个采样点共鉴定出浮游植物 8 门 274 种(包括变种、变型),其中绿藻门 133 种,占总种类数的 48.54%; 硅藻门 59 种,占总种类数的 21.53%; 蓝藻门 47 种,占总种类数的 17.15%; 裸藻门 20 种,占总种类数的 7.3%; 隐藻门 6 种,占总种类数的 2.19%; 甲藻门 4 种,占总种类数的 1.46%; 金藻门 3 种,占总种类数的 1.09%; 黄藻门 2 种,占总种类数的 0.73%。浮游植物细胞丰度以蓝藻门占最大百分比,其次是硅藻门和绿藻门(图 3)。其中蓝藻门在高温的夏、秋季占优,硅藻门在低温的冬季占优,而绿藻门总体上除秋季不占优势外,在春、夏、冬这 3 个季节均占一定的优势。

2.2.2 淀山湖浮游植物功能群的划分

2015~2016 年,淀山湖浮游植物可分为 26 个

功能群: J、P、X1、D、MP、F、S1、C、X2、Lo、W2、E、W1、B、M、K、G、H1、Y、T、TB、WS、A、S2、SN、TC(表 1)。功能群出现频率(图 4)分析发现,在淀山湖中,功能群 J、P、X1、D、MP、F、S1、C、X2、Lo、W2、E、W1、B、M、K 的出现频率均在 50% 以上,出现频率较高,为淀山湖常见的功能群。功能群 G、H1、Y、T、TB 的出现频率在 25%~50% 之间,仅在条件适宜的水期和水层中出现。功能群 WS、A、S2、SN、TC 的出现频率低于 20%,出现频率较低,为淀山湖的偶见或罕见类群。

2.3 淀山湖优势浮游植物功能群的周年演替

淀山湖浮游植物共鉴定出 274 种,划分为 26 个功能群,划分后的功能群按生物量进行筛选和排序,若功能群生物量至少在一个采样点占总生物量 5% 以上(即相对生物量 $> 5\%$),即达到优势地位,确定为优势功能群。通过对淀山湖浮游植物功能群生物量的排序,筛选出 15 个优势功能群,分别是: B、C、D、F、G、H1、J、Lo、M、MP、P、W1、W2、X1、X2。

从 2015 年 1 月至 2016 年 12 月共 21 个月的优势功能群分布特征可以看出(图 5), 2015 年浮游植物生物量为 $0.12 \sim 4.89 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,在 1 月和 4 月出现两个峰值,其中 4 月份浮游植物生物量最高,为 $4.89 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,其次是 1 月,为 $3.80 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。生物量最低出现在 12 月为 $0.12 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。浮游植物功能群的分布,1 月、2 月和 4 月功能群 C 所占比例最大,达 36.03%~62.24%; 3 月份功能群 Lo 大量出现,所占比例高达 58.45%,超出当月总生物量的一半; 5~7 月功能群 MP 所占比例最大,为 30.77%~47.05%,此外 7 月功能群 X1 也占了较大的比例,为

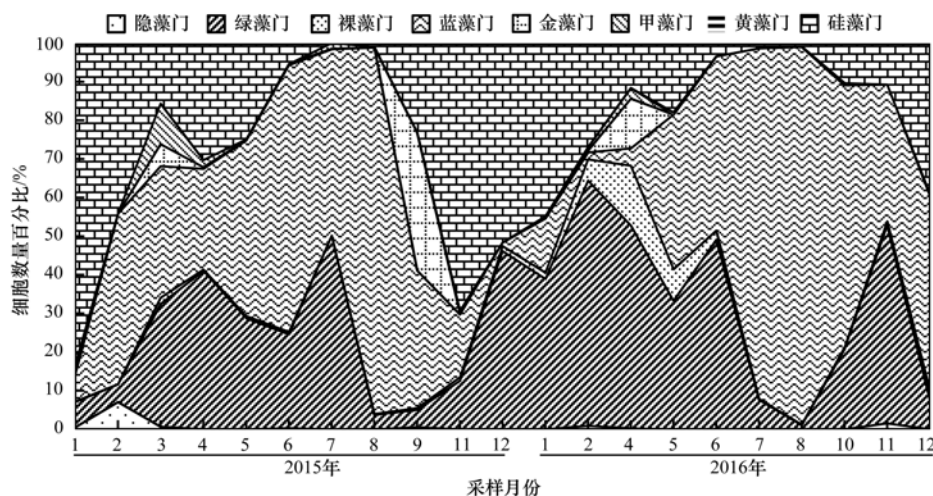


图3 每月浮游植物相对丰度

Fig. 3 Monthly relative abundance of phytoplankton

表 1 淀山湖浮游植物功能群组成

Table 1 Composition of functional groups in Dianshan Lake

功能群	代表性藻种(属)	功能群	代表性藻种(属)
A	根管藻 (<i>Rhizosolenia</i> sp.)	P	脆杆藻属 (<i>Fragilaria</i> spp.)、纤细新月藻 (<i>Closterium gracile</i>)、拟新月藻 (<i>Cloteriopsis</i> sp.)、颗粒直链藻 (<i>Melosira granulata</i>)、变异直链藻 (<i>Melosira varians</i>)
B	小环藻 (<i>Cyclotella</i> sp.)	S1	蓝纤维藻属 (<i>Dactylococcopsis</i> spp.)、浮丝藻 (<i>Planktothrix</i> sp.)、伪鱼腥藻 (<i>Pseudanabaena</i> sp.)
C	华丽星杆藻 (<i>Asterionella foemosa</i>)、梅尼小环藻 (<i>Cyclotella meneghiniana</i>)、冠盘藻 (<i>Stephanodiscus</i> sp.)	S2	钝顶节旋藻 (<i>Arthrospira platensis</i>)、节旋藻 (<i>Arthrospira</i> sp.)
D	尖针杆藻 (<i>Synedra acus</i>)、肘状针杆藻 (<i>Synedra ulna</i>)、针杆藻 (<i>Synedra</i> sp.)、菱形藻属 (<i>Nitzschia</i> spp.)	SN	尖头藻 (<i>Raphidiopsis</i> sp.)
E	锥囊藻属 (<i>Dinobryon</i> spp.)、鱼鳞藻属 (<i>Mallomonas</i> spp.)	T	游丝藻 (<i>Planctonema lauterbornii</i>)、黄丝藻属 (<i>Tribonema</i> spp.)
F	卵囊藻属 (<i>Oocystis</i>)、蹄形藻 (<i>Kirchneriella</i> sp.)、美丽网球藻 (<i>Dictyosphaerium pulchellum</i>)、葡萄藻 (<i>Botryococcus braunii</i>)、纺锤藻 (<i>Elakatothrix</i> spp.)、微芒藻 (<i>Micractinium pusillum</i>)、四棘藻 (<i>Treubaria triappendiculata</i>)	TB	异极藻属 (<i>Gomphonema</i> spp.)
G	空球藻 (<i>Eudorina elegans</i>)、实球藻 (<i>Pandorina morum</i>)、四鞭藻 (<i>Carteria</i> sp.)	TC	鞘丝藻属 (<i>Lyngbya</i> spp.)、席藻属 (<i>Phormidium</i> spp.)
H1	鱼腥藻属 (<i>Anabaena</i> spp.)、束丝藻属 (<i>Aphanizomenon</i> spp.)	W1	裸藻属 (<i>Euglena</i> spp.)、扁裸藻属 (<i>Phacus</i> spp.)、鳞片藻属 (<i>Lepocinclis</i> spp.)、尖尾卡克藻 (<i>Khawkinia acuteaudata</i>)
J	月牙藻 (<i>Selenastrum</i> sp.)、栅藻属 (<i>Scenedesmus</i> spp.)、四角藻属 (<i>Tetraedron</i> spp.)、四星藻属 (<i>Tetrastrum</i>)、十字藻属 (<i>Coelastrum</i> spp.)、空星藻属 (<i>Coelastrum</i> spp.)、盘星藻属 (<i>Pediastrum</i> spp.)、集星藻属 (<i>Actinastrum</i> spp.)、多芒藻属 (<i>Golenkinia</i> spp.)	W2	囊裸藻属 (<i>Trachelomonas</i> spp.)、陀螺藻属 (<i>Strombomonas</i> spp.)
K	隐球藻属 (<i>Aphanocapsa</i> spp.)、隐杆藻属 (<i>Aphanothece</i> spp.)	Ws	黄群藻属 (<i>Synura</i> spp.)
Lo	平裂裂属 (<i>Merismopedia</i> spp.)、湖泊色球藻 (<i>Chroococcus limneticus</i>)、微小色球藻 (<i>Chroococcus minutus</i>)、多甲藻 (<i>Peridinium</i> sp.)、裸甲藻 (<i>Gymnodinium</i> sp.)、水生集胞藻 (<i>Synechocystis aquatilis</i>)	X1	小球藻 (<i>Chlorella vulgaris</i>)、螺旋弓形藻 (<i>Schroederia spiralis</i>)、纤维藻属 (<i>Ankistrodesmus</i> spp.)、旋转单针藻 (<i>Monoraphidium contortum</i>)、弓形单针藻 (<i>Monoraphidium arcuatum</i>)、透明针形藻 (<i>Hyaloraphidium</i> sp.)
M	微囊藻属 (<i>Microcystis</i> spp.)	X2	衣藻属 (<i>Chlamydomonas</i> spp.)、尖尾蓝隐藻 (<i>Chroomonas acuta</i>)、具尾蓝隐藻 (<i>Chroomonas caudata</i>)、翼膜藻 (<i>Pteromonas variabilis</i>)
MP	舟形藻属 (<i>Navicula</i> spp.)、颤藻属 (<i>Oscillatoria</i> spp.)、羽纹藻 (<i>Pinnularia</i> sp.)、丝藻 (<i>Ulothrix</i>)、曲壳藻 (<i>Achnanthes</i> sp.)	Y	隐藻属 (<i>Cryptomonas</i> spp.)、卵形隐藻 (<i>Cryptomonas ovata</i>)

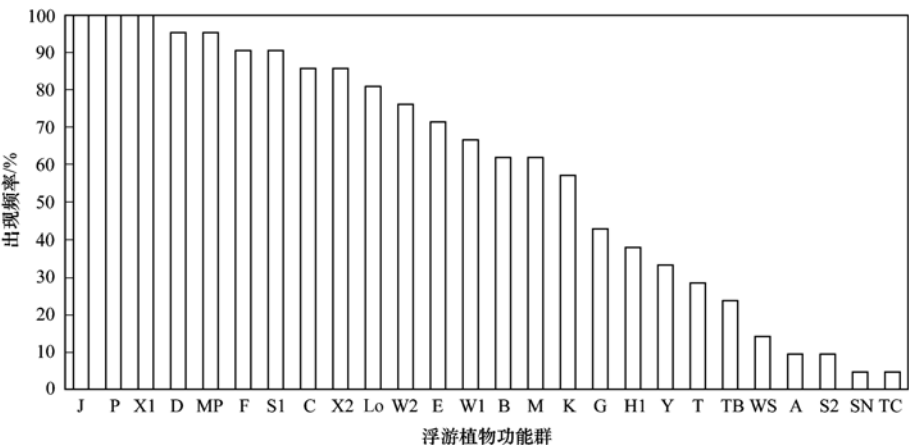


图 4 淀山湖浮游植物功能群频率分布

Fig. 4 Frequency distribution of functional groups in Dianshan Lake

24.32% ; 8 月份以功能群 J 为主, 占 54.45%, 超出当月总生物量的一半; 9 月份功能群 P 和 W1 占优

势, 分别占 41.57%、31.43%; 11 月和 12 月分别以功能群 P 和功能群 D 为主, 分别占 20.62% 和

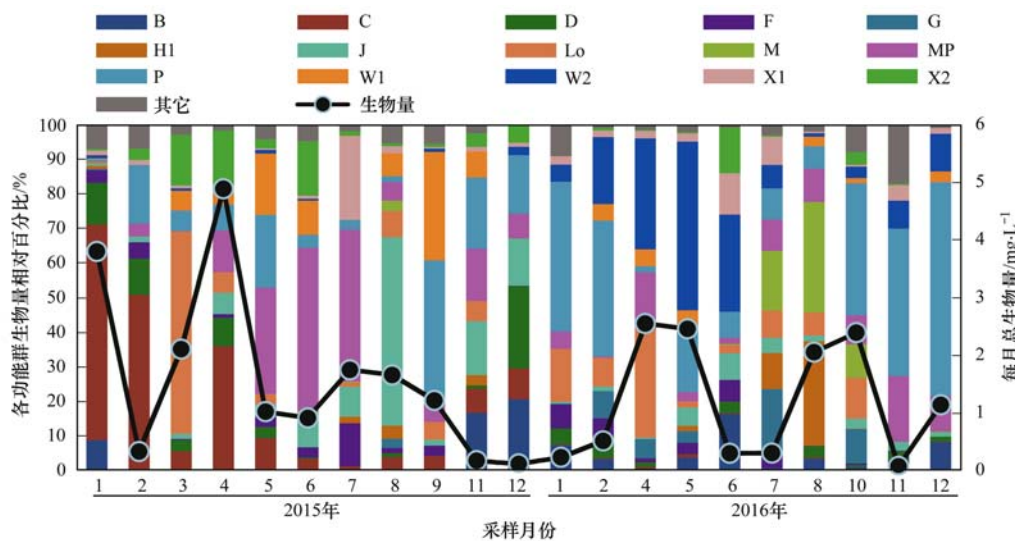


图5 每月浮游植物生物量及优势功能群组成

Fig. 5 Monthly biomass and composition of dominant functional groups of phytoplankton

23.82%, 但其他各功能群也占有一定比例. 2016 年浮游植物生物量在 $0.07 \sim 2.56 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 在 2016 年, 浮游植物的生物量同样出现两个峰, 第一个峰在 4 月和 5 月, 生物量分别为 $2.56 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $2.46 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 其中 4 月功能群主要以 W2 和 Lo 为主, 所占比例分别为 32.12% 和 31.51%, 5 月功能群主要以 W2 为主, 所占比例达 48.7%. 第二个峰出现在 8 月和 10 月, 生物量分别为 $2.06 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $2.40 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 其中, 8 月主要以功能群 M 和 H1 为主, 所占比例分别为 31.88% 和 30.28%; 10 月主要以功能群 P 为主, 所占比例达 38.13%. 浮游植物生物量最小出现在 11 月, 为 $0.07 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 该月以功能群 P 所占比例最大, 达到 42.57%; 此外 1 月、2 月和 12 月等也均以功能群 P 为主, 所占比例分别为 43.22%、39.20% 和 61.76%, 其中, 12 月功能群 P 的生物量占当月总生物量的一半以上.

2.4 浮游植物功能群与环境因子的关系

通过对浮游植物功能群生物量数据进行去趋势对应分析(DCA)后,发现排序轴梯度长度最大值为 3.879, 介于 3~4 之间, 则选择单峰模型和线性模型均适合. 这里对浮游植物功能群和环境因子数据进行典范对应分析(CCA). 采用蒙特卡洛置换检验, 筛选出 TN、TP、DO、SD、WT、EC 和 WLF 等 7 个有显著解释性的环境因子($P < 0.05$).

从浮游植物功能群与环境因子的 CCA 分析结果可见(表 2), 轴 1、轴 2 的特征值分别是 0.379 和 0.220, 物种与环境相关系数是 0.888 和 0.685, 前两轴共解释了物种数据累计变化率的 24.8% 和物种-环境相关性累计变化率的 99.9%, 说明排序能较好

地反映淀山湖浮游植物功能群与环境因子的关系.

表 2 浮游植物功能群与环境因子的 CCA 分析结果

Table 2 Canonical correspondence analysis of phytoplankton functional groups and environmental factors

轴	特征值	物种-环境相关性	累计百分比变化率/%	
			物种	物种-环境相关性
1	0.379	0.888	9.6	38.7
2	0.220	0.685	15.2	61.2
3	0.170	0.702	19.5	78.6
4	0.101	0.521	22.1	88.9

由功能群与环境因子的 CCA 排序可见(图 6, 环境因子用实线表示, 各功能群用实心圆点表示), 与轴 1 相关性较强的环境因子主要有水位波动(WLF)、溶解氧(DO)和水温(WT), 相关系数分别

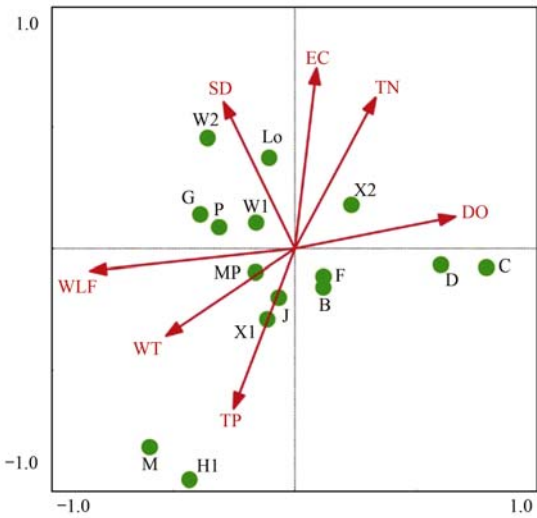


图6 优势功能群生物量与环境因子的 CCA 分析

Fig. 6 Canonical correspondence analysis of the dominant functional groups related to environmental factors

为-0.7469、0.5489和-0.4690,而与轴2相关性较强的环境因子主要有总磷(TP)、电导率(EC)、透明度(SD)和总氮(TN),相关系数分别为-0.4507、0.5097、0.4135和0.4268。功能群M/H1与TP、WT和WLF呈显著正相关,与DO、SD、EC和TN呈显著负相关;功能群W2/L_o与SD和EC呈明显的正相关;功能群C/D与TN、DO呈正相关,与WT、WLF呈负相关;功能群G/P与SD、WLF呈正相关;功能群X2与TN、DO呈正相关,功能群X1与TP、WT呈正相关。

3 讨论

3.1 淀山湖浮游植物功能群的周年演替特征

淀山湖属于感潮型浅水湖泊,与众多河流相连,地处亚热带季风气候区,夏、冬两季温差变幅较大,加之承担着上海市水源供给,农业灌溉、交通运输、水产养殖和水上娱乐等项目^[30],导致其水域环境条件复杂,浮游植物种类组成繁多且更新演替较快。从淀山湖浮游植物功能群的组成(图5)来看,2015年冬季(1月、2月和12月)浮游植物功能群主要为D/C等适宜生活在中小型富营养化水体,耐受弱光和低温条件的硅藻类群^[5]。初春(3、4月)浮游植物功能群主要以L_o/C为主,L_o功能群具有广适性,其代表种类是具有鞭毛的运动型藻类多甲藻,能在营养物质隔离的水层中生长^[4]且适应低磷的水体环境^[31],而这一时期淀山湖的磷含量较低(图2),有利于功能群L_o在竞争中取得优势。此外,功能群C在初春和冬季占主要优势,这是由于冬季和初春淀山湖的水温较低且光照强度较弱,有利于以小环藻、冠盘藻为代表的C功能群的生长繁殖,尤其是在1月和4月,冠盘藻大量出现形成水华,使得这一时期浮游植物的生物量达到两个高峰。春季末到夏季初(5~7月),浮游植物功能群以MP占优势,该功能群适应受扰动的浑浊浅水水体^[5],受降雨和周边河流的影响,这一时期淀山湖水位变幅较大,水体受扰动程度随之加大,继而使耐受扰动的MP功能群占据主要优势地位。夏季(8~9月)功能群主要是J/P/W1等适宜生活在混合高营养水体的类群,这一时期淀山湖营养盐浓度较高,有利于这些功能群的生长和繁殖。秋季(11月)主要以直链藻为优势种的功能群P为主,该功能群适宜生活在营养丰富的浅水环境,且耐受低光^[4],而这一时期淀山湖的透明度很低(图2),水体透光性较差,导致耐受弱光的P功能群在竞争中取得优势。总体而言,

淀山湖2015年浮游植物功能群呈现出D/C→L_o/C/MP→MP/J/P/W1→P的演替特征。

2016年淀山湖浮游植物功能群也呈现出明显的演替特征,冬季(12月、1月、2月)和秋季(10~11月)主要以直链藻为代表种类的功能群P占主要地位,该功能群适应低温和水体扰动的环境^[32],冬季淀山湖的水温较低,而秋季受降雨的影响,水体受扰动程度增加,耐受低温和扰动的P功能群更在竞争中取得优势。春季(4~5月)功能群主要为适宜中富营养环境的W2/L_o^[5],受这一时期淀山湖较高水平营养盐的驱动,资源竞争能力较强的功能群W2和L_o在藻类生长中占据优势。夏季(6~8月)功能群主要为W2/G/M/H1等喜好较高水温的类群(图5),尤其是以微囊藻为代表的功能群M和以鱼腥藻为代表的功能群H1,这两个功能群代表种类均属于蓝藻门,在高温的夏季更容易成为优势种,而这一时期淀山湖的水温普遍较高(图2),有利于功能群M、H1大量繁殖甚至产生水华。总体而言,淀山湖2016年浮游植物功能群呈现出P→W2/L_o→W2/G/M/H1→P的演替特征。

3.2 影响淀山湖浮游植物功能群的主要环境因子

水温、光照、营养盐状况、水动力学特征、浮游动物牧食和水文动态等是特定生境中影响浮游植物出现或消失的重要因素,都能对浮游植物功能群的组成产生影响^[4,32]。本研究环境中环境因子与优势功能群的典范对应分析(CCA)表明,WLF、DO、WT、TP、EC、TN和SD是影响淀山湖浮游植物功能群组成及演替的主要环境因子(图6)。

近年来随着淀山湖周边经济和工业生产的快速发展,大量营养物质输入使淀山湖水体面临富营养化的问题,对浮游植物生长和群落结构演替产生了巨大的影响^[33]。氮磷营养盐是影响淀山湖浮游植物功能群的重要环境因子,典范对应分析(CCA)得出,功能群C/D/X2/L_o/W2与总氮呈正相关关系,功能群M/H1/X1/J与总磷呈正相关关系,其中C、D、M、H1功能群与氮磷营养盐具有明显的相关关系。2015年冬季和早春,主要以冠盘藻为优势藻种的功能群C为主(图5),冠盘藻的大量繁殖,使淀山湖局部出现水华现象。水质监测结果表明这一时期水体中总氮含量最高达到了2.8 mg·L⁻¹以上(图2),充足的营养盐尤其是氮营养盐为功能群C的生长提供了良好的条件,有利于其成为这一时期的优势群组。2016年夏季,以微囊藻和鱼腥藻等蓝藻种类为代表的功能群M和H1在淀山湖中占绝对优势

(图 5)并形成水华。据报道, M 和 H1 等蓝藻类群均适应富营养水体, 较高的营养盐有利于其生长^[5], 尤其是磷盐, 是藻类生长的限制性营养元素, 也是水华暴发的重要影响因素^[34]。水质监测结果显示这一时期水体中的总磷含量最高达到了 $0.3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以上(图 2), 为藻类尤其是蓝藻的生长提供了充足的磷元素, 使其能够大量繁殖, 成为这一时期的优势类群。由此可知, 淀山湖虽然面临富营养的问题, 但水体中的氮磷营养盐仍是影响其浮游植物组成的重要因素, 因此, 控制水体中氮磷的含量及外源输入, 对预防淀山湖春季冠盘藻水华和夏季蓝藻水华有重要的作用。

除营养盐外, 水温和溶解氧对淀山湖浮游植物功能群的组成也有重要的影响。温度能通过控制光合作用的酶促反应或呼吸作用的强度直接影响藻类的生长^[35], 不同种类的浮游植物适合在不同的温度条件下生长和繁殖。一般而言, 蓝藻、绿藻适宜在较高的水温条件下生长, 硅藻则适宜生活在较低的水温环境中^[2]。优势功能群组成(图 5)和 CCA 排序(图 6)显示, 夏季代表性功能群 M/H1/G/X1 与水温呈正相关, 这些功能群的代表种类基本属于蓝藻门和绿藻门, 它们在水温较高的夏季生长较为旺盛, 尤其是功能群 M 和 H1, 均为喜好高温的蓝藻类群^[36,37], 更容易在高温的夏季占优势。而功能群 C/D 则与水温呈负相关, 这两个功能群均为适应低温、富营养水体的硅藻类群^[4], 冬季和初春季节, 淀山湖水温较低(图 2), 耐受低温的功能群 C 和 D 生长较为活跃, 更容易在资源竞争中取得优势。溶解氧对维系水体生态环境健康具有重要的作用, 丰富多样的水生植物可以使水体保持较高的溶解氧, 而藻类生物量的过量增加也会对水体产生负影响, 成为溶解氧降低的“助推器”^[38]。在高温的夏季, 功能群 M 和 H1 在淀山湖中大量繁殖, 形成水华, 使得这一时期藻类生物量大大增加, 对水体产生负影响, 继而加速了水体溶解氧含量的降低, CCA 排序图也表明(图 6), 功能群 M 和 H1 与溶解氧呈显著的负相关关系。此外, 功能群 C/D 与溶解氧呈明显的正相关。有研究表明, 水体中的溶解氧与水温存在负相关关系^[39], 水温越低, 水体中的溶解氧反而越高。冬季淀山湖的水温低, 水体溶解氧升高, 使功能群 C、D 成为了这一时期的优势群组。

电导率和透明度也是影响淀山湖浮游植物功能群分布的主要环境因子。其中, 电导率是反映水体富营养化程度的重要水质指标, 其大小与水体中氮

磷营养盐的含量有关, 两者呈正比^[40]。典范对应分析(CCA)表明, 功能群 W2/L0/X2 与电导率呈明显的正相关关系。春季到夏季初, 受降雨的影响, 淀山湖周边地区的氮磷营养盐随地表径流进入湖中, 使营养盐浓度增加, 电导率也随之上升(图 2), 具有广范适应性的功能群 L0 和适应中富营养水体的功能群 W2/X2^[5], 成为这一时期的主要的群组。透明度作为湖泊常规调查的一项基本观测指标, 能直观反映湖水的清澈和浑浊程度^[41], 对浮游植物的生长也存在一定的影响。多元分析显示功能群 W2/L0/G 与透明度呈正相关(图 6), 说明这些功能群在透明度高的水体中生长较好。

水位波动对浅水湖泊的结构和功能有重要的影响, 而水生生物也能反映水位的变化情况^[42]。有研究表明水位波动会对浮游植物的大小、丰度、生物量、种类组成和群落结构产生影响^[43,44]。M、H1 功能群的代表种类微囊藻和鱼腥藻均为易形成水华的蓝藻类群, 研究发现, 蓝藻的生物量与水位波动有关, 当水位上升时, 可直接对水体营养盐产生稀释效应, 或通过间接的复杂途径改变湖泊条件, 最终导致蓝藻生物量减少。相反, 水位下降时, 蓝藻则成为主体^[45]。2016 年 8 月淀山湖浮游植物功能群以 M 和 H1 占主导地位(图 5), 并暴发蓝藻水华。这一时期湖区降雨量较小(图 2), 径流补给也减少, 致使水位下降, 加之夏季较高的水温条件, 为蓝藻的生长提供有利的条件, 因而能大量繁殖形成水华。此外, 典范对应分析(CCA)表明, 功能群 C、D 与水位波动也存在较明显的相关关系。2015 年春季, 淀山湖降雨量小, 水位波动不大($-0.05 \sim 0.045 \text{ m}$), 加之水温偏低, 因此对水体分层敏感且耐受低温的功能群 C^[4]在这一时期占据第一优势地位。功能群 D 的代表种类为尖针杆藻、菱形藻等硅藻种类, 该功能群适宜生活在透明度较低的浅水水体^[5], 冬季降雨量小, 淀山湖处于枯水期, 水位下降, 而水体透明度偏低(图 2), 因此功能群 D 能在生长中占据一定的优势。由此可知, 水位波动也是影响淀山湖浮游植物功能群变化的重要因素, 因此, 在湖区水生态管理中, 考虑水位波动这一重要参数, 对藻类水华防控具有重要意义。

4 结论

(1) 共鉴定出 2015 ~ 2016 年淀山湖浮游植物共鉴定出 8 门 274 种(包括变种、变型)。根据功能群划分原则, 对淀山湖浮游植物进行功能分组, 可分

为 26 个功能群,其中 B、C、D、F、G、H1、J、Lo、M、MP、P、W1、W2、X1、X2 等 15 个功能群为优势功能群。

(2)受环境因素的影响,淀山湖浮游植物功能群呈现出周年演替特征,2015 年表现为 D/C→Lo/C/MP→MP/J/P/W1→P 的演替规律,2016 年表现为 P→W2/Lo→W2/G/M/H1→P 的演替规律,其中 2015 年冬季和初春功能群 C 占绝对优势,而 2016 年夏季功能群 M 和 H1 占绝对优势。

(3)氮磷营养盐、水温、溶解氧、透明度、电导率和水位波动是影响淀山湖浮游植物功能群的主要因子;控制湖区营养盐的输入,进行水位监测和调控可能是预防淀山湖藻华的重要途径。

参考文献:

- [1] Reynolds C S. The ecology of freshwater phytoplankton [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1984.
- [2] 沈韞芬,章宗涉,龚循矩. 微型生物监测新技术[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1990. 119.
- [3] Bonilla S, Conde D, Aubriot L, *et al.* Influence of hydrology on phytoplankton species composition and life strategies in a subtropical coastal lagoon periodically connected with the Atlantic Ocean[J]. *Estuaries*, 2005, **28**(6): 884-895.
- [4] Reynolds C S, Huszar V, Kruk C, *et al.* Towards a functional classification of the freshwater phytoplankton[J]. *Journal of Plankton Research*, 2002, **24**(5): 417-428.
- [5] Padisák J, Crossetti L O, Naselli-Flores L. Use and misuse in the application of the phytoplankton functional classification: a critical review with updates[J]. *Hydrobiologia*, 2009, **621**(1): 1-19.
- [6] Grime J P. Plant strategies and vegetation processes [M]. Chichester, UK: Wiley & Sons, 1979.
- [7] 董静,李艳晖,李根保,等. 东江水系浮游植物功能群季节动态特征及影响因子[J]. *水生生物学报*, 2013, **37**(5): 836-843.
Dong J, Li Y H, Li G B, *et al.* Seasonal dynamics characteristics and affecting physical factors of phytoplankton functional groups in Dongjiang River[J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2013, **37**(5): 836-843.
- [8] 黄享辉,胡韧,雷腊梅,等. 南亚热带典型中小型水库浮游植物功能类群季节演替特征[J]. *生态环境学报*, 2013, **22**(2): 311-318.
Huang X H, Hu R, Lei L M, *et al.* Seasonal succession of phytoplankton functional groups in typical small and medium-sized reservoirs in southern China [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2013, **22**(2): 311-318.
- [9] Becker V, Caputo L, Ordóñez J, *et al.* Driving factors of the phytoplankton functional groups in a deep Mediterranean reservoir [J]. *Water Research*, 2010, **44**(11): 3345-3354.
- [10] Sarmiento H, Isumbisho M, Descy J P. Phytoplankton ecology of Lake Kivu (eastern Africa)[J]. *Journal of Plankton Research*, 2006, **28**(9): 815-829.
- [11] Costa L S, Huszar V L M, Ovalle A R. Phytoplankton functional groups in a tropical estuary: hydrological control and nutrient limitation[J]. *Estuaries and Coasts*, 2009, **32**(3): 508-521.
- [12] Stanković I, Vlahović T, Udovič M G, *et al.* Phytoplankton functional and morpho-functional approach in large floodplain rivers[J]. *Hydrobiologia*, 2012, **698**(1): 217-231.
- [13] 刘足根,张柱,张萌,等. 赣江流域浮游植物群落结构与功能类群划分[J]. *长江流域资源与环境*, 2012, **21**(3): 375-384.
Liu Z G, Zhang Z, Zhang M, *et al.* Classification of functional groups and community structure of phytoplankton in the Ganjiang River[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2012, **21**(3): 375-384.
- [14] 田泽斌,刘德富,姚绪姣,等. 水温分层对香溪河库湾浮游植物功能群季节演替的影响[J]. *长江流域资源与环境*, 2014, **23**(5): 700-707.
Tian Z B, Liu D F, Yao X J, *et al.* Effect of water temperature stratification on the seasonal succession of phytoplankton function grouping in Xiangxi Bay[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2014, **23**(5): 700-707.
- [15] 高国敬,肖利娟,林秋奇,等. 海南省典型水库浮游植物功能类群的结构特征与水质评价[J]. *生态科学*, 2013, **32**(2): 144-150.
Gao G J, Xiao L J, Lin Q Q, *et al.* Structure of phytoplankton functional groups and water quality assessment of main reservoirs in Hainan Province[J]. *Ecological Science*, 2013, **32**(2): 144-150.
- [16] 尹子龙,程李芳,于洪贤,等. 扎龙湿地夏季浮游植物功能群特征及水质评价[J]. *北方农业学报*, 2016, **44**(4): 56-62.
Yin Z L, Cheng L F, Yu H X, *et al.* Characteristics of functional group and evaluation of water quality of summer phytoplankton in Zhalong wetland [J]. *Journal of Northern Agriculture*, 2016, **44**(4): 56-62.
- [17] 董静,李根保,宋立荣. 抚仙湖、洱海、滇池浮游藻类功能群 1960s 以来演变特征[J]. *湖泊科学*, 2014, **26**(5): 735-742.
Dong J, Li G B, Song L R. Historical changes of phytoplankton functional groups in Lake Fuxian, Lake Erhai and Lake Dianchi since 1960s[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2014, **26**(5): 735-742.
- [18] 由文辉. 淀山湖的浮游植物及其能量生产[J]. *海洋湖沼通报*, 1995, (1): 47-53.
You W H. A study on phytoplankton and its energy production in Dianshan Lake[J]. *Transactions of Oceanology and Limnology*, 1995, (1): 47-53.
- [19] 杨虹,由文辉,汪益斌,等. 淀山湖浮游植物群落对生态修复试验工程的响应研究[J]. *长江流域资源与环境*, 2010, **19**(S2): 122-129.
Yang H, You W H, Wang Y P, *et al.* Effect of ecological restoration project on phytoplankton community in Lake Dianshan [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2010, **19**(S2): 122-129.
- [20] 徐春燕,俞秋佳,徐凤洁,等. 淀山湖浮游植物优势种生态位[J]. *应用生态学报*, 2012, **23**(9): 2550-2558.
Xu C Y, Yu Q J, Xu F J, *et al.* Niche analysis of phytoplankton's dominant species in Dianshan Lake of East China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2012, **23**(9): 2550-2558.

- [21] 张琪, 蒋跃, 靳士科, 等. 上海市淀山湖春夏季浮游植物功能群组研究[J]. 华东师范大学学报(自然科学版), 2016, (6): 54-64.
Zhang Q, Jiang Y, Qin S K, *et al.* Phytoplankton functional cohort study of Shanghai Dianshan Lake in spring and summer [J]. Journal of East China Normal University (Natural Science), 2016, (6): 54-64.
- [22] 王铭玮, 徐启新, 车越, 等. 淀山湖蓝藻水华暴发的气象水文因素探讨[J]. 华东师范大学学报(自然科学版), 2011, (1): 21-31.
Wang M W, Xu Q X, Che Y, *et al.* Research on the meteorological and hydrological factors of cyanobacteria bloom in Lake Dianshan [J]. Journal of East China Normal University (Natural Science), 2011, (1): 21-31.
- [23] 由文辉. 淀山湖水生态系统的物质循环[J]. 中国环境科学, 1997, 17(4): 293-296.
You W H. Studies on the nutrients cycle of Dianshan Lake [J]. China Environmental Science, 1997, 17(4): 293-296.
- [24] 由文辉. 淀山湖湿地及其生态功能与利用[J]. 农村生态环境, 1997, 13(3): 20-24.
You W H. Ecological functions and the utilization of Dianshan Lake Wetland [J]. Rural Eco-Environment, 1997, 13(3): 20-24.
- [25] 张琪. 淀山湖浮游植物生态种组季节动态及其影响因素[D]. 上海: 华东师范大学, 2016.
Zhang Q. The seasonal dynamics of phytoplankton ecological groups and its influencing factors in Dianshan Lake, China [D]. Shanghai: East China Normal University, 2016.
- [26] 胡鸿钧, 魏印心. 中国淡水藻类——系统、分类及生态[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
Hu H J, Wei Y X. The freshwater algae of China: systematics, taxonomy and ecology [M]. Beijing: Science Press, 2006.
- [27] 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. 241-244.
- [28] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. (第四版). 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [29] 石亚东, 姜桂花, 林荷娟, 等. 太湖利于太湖流域管理局水文局(信息中心报)水情月报[EB/OL]. <http://www.tba.gov.cn//tba/content/TBA/lygb/sqyb/index.html>, 2017-01-17.
- [30] 金鼎馨, 高伟生. 淀山湖的保护与开发[J]. 自然杂志, 1983, 6(7): 527-531, 560.
- [31] Xiao L J, Wang T, Hu R, *et al.* Succession of phytoplankton functional groups regulated by monsoonal hydrology in a large canyon-shaped reservoir [J]. Water Research, 2011, 45(16): 5099-5109.
- [32] 黄国佳, 李秋华, 陈椽, 等. 贵州高原三板溪水库浮游植物功能群时空分布特征[J]. 环境科学学报, 2015, 35(2): 418-428.
Huang G J, Li Q H, Chen C, *et al.* Phytoplankton functional groups and their spatial and temporal distribution characteristics in Sanbanxi Reservoir, Guizhou Province [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2015, 35(2): 418-428.
- [33] 王丽卿, 施荣, 季高华, 等. 淀山湖浮游植物群落特征及其演替规律[J]. 生物多样性, 2011, 19(1): 48-56.
Wang L Q, Shi R, Ji G H, *et al.* Phytoplankton community structure and its succession in Dianshan Lake [J]. Biodiversity Science, 2011, 19(1): 48-56.
- [34] 曾娟, 刘德富. 磷营养盐对库湾暴发蓝藻水华的实验研究[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2008, 30(5): 22-24.
Zeng J, Liu D F. Experimental study of reservoir bay happening blue-green algal bloom due to phosphorus nutrient salt [J]. Journal of China Three Gorges University (Natural Science), 2008, 30(5): 22-24.
- [35] Blinn D W. Diatom community structure along physicochemical gradients in saline lakes [J]. Ecology, 1993, 74(4): 1246-1263.
- [36] 安睿, 王凤友, 于洪贤, 等. 小兴凯湖浮游植物功能群特征及其影响因子[J]. 环境科学研究, 2016, 29(7): 985-994.
An R, Wang F Y, Yu H X, *et al.* Characteristics and physical factors of phytoplankton functional groups in Small Xingkai Lake [J]. Research of Environmental Sciences, 2016, 29(7): 985-994.
- [37] Nalewajko C, Murphy T P. Effects of temperature, and availability of nitrogen and phosphorus on the abundance of *Anabaena* and *Microcystis* in Lake Biwa, Japan: an experimental approach [J]. Limnology, 2001, 2(1): 45-48.
- [38] 赵海超, 王圣瑞, 赵明, 等. 洱海水体溶解氧及其与环境因子的关系[J]. 环境科学, 2011, 32(7): 1952-1959.
Zhao H C, Wang S R, Zhao M, *et al.* Relationship between the DO and the environmental factors of the water body in Lake Erhai [J]. Environmental Science, 2011, 32(7): 1952-1959.
- [39] 陈海生, 严力蛟. 浙江省长潭水库溶解氧变化特性及其与水温相关性[J]. 科技通报, 2015, 31(3): 249-253.
Chen H S, Yan L J. Study on changing characteristics of dissolved oxygen and its relationship to water temperature in Changtan Reservoir in Zhejiang Province [J]. Bulletin of Science and Technology, 2015, 31(3): 249-253.
- [40] 胡胜华, 高云霓, 张世羊, 等. 武汉月湖水体营养物质的分布与硅藻的生态指示[J]. 生态环境学报, 2009, 18(3): 856-864.
Hu S H, Gao Y N, Zhang S Y, *et al.* Distribution of nutrients and ecological indexes of diatom about Moon Lake in Wuhan [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2009, 18(3): 856-864.
- [41] 张运林, 秦伯强, 陈伟民, 等. 太湖水透明度分析、变化及相关分析[J]. 海洋湖沼通报, 2003, (2): 30-36.
Zhang Y L, Qin B Q, Chen W M, *et al.* Distribution, seasonal variation and correlation analysis of the transparency in Taihu Lake [J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 2003, (2): 30-36.
- [42] Coops H, Beklioglu M, Crisman T L. The role of water-level fluctuations in shallow lake ecosystems-workshop conclusions [J]. Hydrobiologia, 2003, 506(1-3): 23-27.
- [43] Leira M, Cantonati M. Effects of water-level fluctuations on lakes: an annotated bibliography [J]. Hydrobiologia, 2008, 613(1): 171-184.
- [44] De Domitrovic Y Z. Effect of fluctuations in water level on phytoplankton development in three lakes of the Paraná river floodplain (Argentina) [J]. Hydrobiologia, 2003, 510(1-3): 175-193.
- [45] Yang J, Lv H, Liu L, *et al.* Decline in water level boosts cyanobacteria dominance in subtropical reservoirs [J]. Science of the Total Environment, 2016, 557-558: 445-452.

CONTENTS

Spatial-Temporal Change Evolution of PM _{2.5} in Typical Regions of China in Recent 20 Years	LUO Yi, DENG Qiong-fei, YANG Kun, <i>et al.</i>	(3003)
Evaluation the Extent of Health Damage Caused by PM _{2.5} Particulate in Xi'an City	WEI Guo-ru, SHI Xing-min	(3014)
Analysis of Chemical Composition, Source and Evolution of Submicron Particles in Xianghe, Hebei Province	JIANG Qi, WANG Fei, SUN Ye-le	(3022)
Characteristics and Source Analysis of Carbonaceous Components of PM _{2.5} During Autumn in the Northern Suburb of Nanjing	XU Zu-fei, CAO Fang, GAO Song, <i>et al.</i>	(3033)
Comparison of Chemical Components Characteristics of PM _{2.5} Between Haze and Clean Periods During Summertime in Lin'an	LIANG Lin-lin, SUN Jun-ying, ZHANG Yang-mei, <i>et al.</i>	(3042)
Characteristics and Sources of Carbon Components in PM _{2.5} During Autumn and Winter in Panjin City	ZHANG Lei, JI Ya-qin, ZHANG Jun, <i>et al.</i>	(3051)
Aerosol Optical Properties and Light Absorption Enhancement of EC During Wintertime in Nanjing	HUANG Cong-cong, MA Yan, ZHENG Jun	(3057)
Concentration, Solubility, and Dry Deposition Flux of Trace Elements in Fine and Coarse Particles in Qingdao During Summer	LI Peng-zhi, LI Qian, SHI Jin-hui, <i>et al.</i>	(3067)
Characteristics and Sources of Dissolved Heavy Metals in Summer Precipitation of Taiyuan City, China	YE Ai-ling, CHENG Ming-chao, ZHANG Lu, <i>et al.</i>	(3075)
Characteristics of and Factors Affecting Atmospheric CO ₂ Concentration in Hangzhou	PU Jing-jiao, XU Hong-hui, JIANG Yu-jun, <i>et al.</i>	(3082)
Treatment Status and Emission Characteristics of Volatile Organic Compounds from Typical Industrial Sources	JING Sheng-ao, WANG Hong-li, ZHU Hai-lin, <i>et al.</i>	(3090)
Characteristics of Industrial VOCs Emission Sources and Control Technology Application in a Prefecture-level City Region-Based on Qinhuangdao City	HU Xu-rui, HU Xiao-yu, WANG Can	(3096)
Pollution Condition and Health Risk Assessment of VOCs in Fermentation Exhaust from Penicillin Production	GUO Bin, YAO Rui-jing, ZHANG Shuo, <i>et al.</i>	(3102)
Measurements of OC and EC Emission Factors for Light-duty Gasoline Vehicles	HUANG Cheng, HU Qing-yao, LU Jun	(3110)
Pollution Levels and Risk Assessment of Heavy Metals from Atmospheric Deposition in Nanjing	TIAN Chun-hui, YANG Ruo-zhu, Gulizhaer Yilihamu, <i>et al.</i>	(3118)
Contamination Levels and Source Analysis of Heavy Metals in the Finer Particles of Urban Road Dust from Xi'an, China	SHI Dong-qi, LU Xin-wei	(3126)
pCO ₂ in the Main Rivers of the Three Gorges Reservoir and Its Influencing Factors	LUO Jia-chen, MAO Rong, LI Si-yue	(3134)
Major Ionic Features and Their Possible Controls in the Surface Water and Groundwater of the Jinghe River	KOU Yong-chao, KUA Kun, LI Zhou, <i>et al.</i>	(3142)
Urban Runoff Phosphorus Removal Pathways in Bioretention Systems	LI Li-qing, LIU Yu-qing, YANG Jia-min, <i>et al.</i>	(3150)
Succession Characteristics of Phytoplankton Functional Groups and Their Relationships with Environmental Factors in Dianshan Lake, Shanghai	YANG Li, ZHANG Wei, SHANG Guang-xia, <i>et al.</i>	(3158)
Spatio-temporal Variations of Diatom Community and Their Relationship with Water Environment in Fuxian Lake	LI Rui, CHEN Guang-jie, KANG Wen-gang, <i>et al.</i>	(3168)
Effects of Algal Blooms and Their Degradation on the Sediment-water Micro-interface	WANG Yong-ping, XIE Rui, CHAO Jian-ying, <i>et al.</i>	(3179)
Effect of Biochar on Root Morphological Characteristics of Wetland Plants and Purification Capacity of Constructed Wetland	XU De-fu, PAN Qian-cheng, LI Ying-xue, <i>et al.</i>	(3187)
Preparation of Mn-Co/Ceramic Honeycomb Catalyst and Its Performance on Catalytic Ozonation of Hydroquinone	ZHANG Lan-he, GAO Wei-wei, CHEN Zi-cheng, <i>et al.</i>	(3194)
Degradation Mechanism of Tetracycline Using Fe/Cu Oxides as Heterogeneous Activators of Peroxymonosulfate	LI Jing, BAO Jian-guo, DU Jiang-kun, <i>et al.</i>	(3203)
Behavior and Mechanisms of Cd(II) Adsorption from Water by Niobate-Modified Titanate Nanosheets	KANG Li, LIU Wen, LIU Xiao-na, <i>et al.</i>	(3212)
Trace Amounts of Phosphorus Removal Based on the in-suit Oxidation Products of Iron or Manganese in a Biofilter	CAI Yan-an, BI Xue-jun, ZHANG Jia-ning, <i>et al.</i>	(3222)
Effect of Preparation Methods on Phosphate Adsorption by Iron-Titanium Binary Oxide: Coprecipitation and Physical Mixing	ZHONG Yan, WANG Jiang-yan, CHEN Jing, <i>et al.</i>	(3230)
Effects of Conductivity on Performance of a Combined System of Anaerobic Acidification, Forward Osmosis, and a Microbial Fuel Cell	LU Yu-qin, LIU Jin-meng, WANG Xin-hua, <i>et al.</i>	(3240)
COD Requirement for Biological Phosphorus Removal Granule System Under Different Phosphorus Concentrations	LI Dong, CAO Mei-zhong, GUO Yue-zhou, <i>et al.</i>	(3247)
Effect of Substrate Concentration on SAD Collaborative Nitrogen and Carbon Removal Efficiency in an ABR Reactor	ZHANG Min, JIANG Ying, WANG Yao-qi, <i>et al.</i>	(3254)
Evaluation of Advanced Nitrogen Removal from Coking Wastewater Using Sulfide Iron-containing Sludge as a Denitrification Electron Donor	FU Bing-bing, PAN Jian-xin, MA Jing-de, <i>et al.</i>	(3262)
Stability of Nitrification Combined with Limited Filamentous Bulking Under Intermittent Aeration	GAO Chun-di, SUN Da-yang, AN Ran, <i>et al.</i>	(3271)
Filamentous Sludge Microbial Community of a SBR Reactor Based on High-throughput Sequencing	HONG Ying, YAO Jun-qin, MA Bin, <i>et al.</i>	(3279)
Impact of Nano Zero-Valent Iron (NZVI) on Methanogenic Activity, Physiological Traits, and Microbial Community Structure in Anaerobic Digestion	SU Run-hua, DING Li-li, REN Hong-qiang	(3286)
Effects of Gas/Water Ratio on the Characteristics of Nitrogen Removal and the Microbial Community in Post Solid-Phase Denitrification Biofilter Process	ZHANG Qian, JI Fang-ying, FU Xu-fang, <i>et al.</i>	(3297)
Comparison of Extraction Methods of Extracellular Polymeric Substances from Activated Sludge	SUN Xiu-yue, TANG Zhu, YANG Xin-ping	(3306)
Identification and Characterization of a Hypothermic Alkaliphilic Aerobic Denitrifying Bacterium <i>Pseudomonas monteilii</i> Strain H97	CAI Xi, HE Teng-xia, YE Qing, <i>et al.</i>	(3314)
Isolation, Identification, and Biodegradation Behaviors of a Perfluorooctane Sulfonic Acid Precursor (PreFOSs) Degrading Bacterium from Contaminated Soil	ZHAO Shu-yan, ZHOU Tao, WANG Bo-hui, <i>et al.</i>	(3321)
Microbial Community Distributions in Soils of an Oil Exploitation Site	CAI Ping-ping, NING Zhuo, HE Ze, <i>et al.</i>	(3329)
Characteristics of Soil Physicochemical Properties and Enzyme Activities over Different Reclaimed Years in a Copper Tailings Dam	WANG Rui-hong, JIA Tong, CAO Miao-wen, <i>et al.</i>	(3339)
Risk Analysis of Heavy Metal Contamination in Farmland Soil Around a Bauxite Residue Disposal Area in Guangxi	GUO Ying, LI Yu-bing, XUE Sheng-guo, <i>et al.</i>	(3349)
Occurrence and Distribution of Phthalate Esters in Urban Soils of Chongqing City	YANG Zhi-hao, HE Ming-jing, YANG Ting, <i>et al.</i>	(3358)
Profile Distribution of Paddy Soil Organic Carbon and Its Influencing Factors in Chengdu Plain	LI Shan, LI Qi-quan, WANG Chang-quan, <i>et al.</i>	(3365)
Correlation Between Soil Organic and Inorganic Carbon and Environmental Factors in Cotton Fields in Different Continuous Cropping Years in the Oasis of the Northern Tarim Basin	ZHAO Jing-jing, GONG Lu, AN Shen-qun, <i>et al.</i>	(3373)
Soil Organic Carbon Components and Their Correlation with Soil Physicochemical Factors in Four Different Land Use Types of the Northern Tarim Basin	AN Shen-qun, GONG Lu, LI Yang-mei, <i>et al.</i>	(3382)
Short-term Mechanism of Warming-induced Stability for Organic Carbon in the Karst Plateau Soil	TANG Guo-yong, ZHANG Chun-hua, LIU Fang-yan, <i>et al.</i>	(3391)
Effects of Boron Treatment on Arsenic Uptake and Efflux in Rice Seedlings	ZHU Yi, SUN Guo-xin, CHEN Zheng, <i>et al.</i>	(3400)
Comparative Analysis of Different Soil Amendment Treatments on Rice Heavy Metal Accumulation and Yield Effect in Pb and Cd Contaminated Farmland	HU Xue-fang, TIAN Zhi-qing, LIANG liang, <i>et al.</i>	(3409)
Seasonal Variation in Surface Ozone and Its Effect on the Winter Wheat and Rice in Nanjing, China	ZHAO Hui, ZHENG You-fei, WEI Li, <i>et al.</i>	(3418)
Hair Mercury Concentrations in Residents of Fuling and Zhongxian in the Three Gorges Reservoir Region and Their Influence Factors	CHENG Nan, XIE Qing, FAN Yu-fei, <i>et al.</i>	(3426)
Removal of Typical Antibiotics During Aerobic Composting of Human Feces	SHI Hong-lei, WANG Xiao-chang, LI Qian	(3434)
Effect of COD/SO ₄ ²⁻ Ratio on Anaerobic Digestion of Penicillin Bacterial Residues	QIANG Hong, LI Yu-you, PEI Meng-fu	(3443)
Characteristics of Odor Emissions from Fresh Compost During Storage and Application	HE Pin-jing, JIANG Ning-ling, XU Xian, <i>et al.</i>	(3452)
Effects of the Veterinary Antibiotic Sulfamethazine on Ammonia Volatilization from a Paddy Field Treated with Conventional Synthetic Fertilizer and Manure	PANG Bing-kun, ZHANG Jing-sha, WU Jie, <i>et al.</i>	(3460)