

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

环境DNA宏条形码监测湖泊真核浮游植物的精准性

张丽娟, 徐杉, 赵峥, 周小华, 冯庆, 杨江华, 李飞龙, 王志浩, 张效伟



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年2月

第42卷 第2期
Vol.42 No.2

目次

2013~2017年中国PM _{2.5} 污染防治的健康效益评估	张梦娇, 苏方成, 徐起翔, 张瑞芹, 魏煜, 谢刘震 (513)
区域气象条件和减排对空气质量改善的贡献评估	武文琪, 张凯山 (523)
2016年1月京津冀地区大气污染特征与多尺度传输量化评估	姚森, 张哈宇, 王晓琦, 杨书申 (534)
广州市2020年春节期间烟花爆竹燃放对空气质量的影响	裴成磊, 王宇骏, 毕燕茹, 廉秀峰, 周倩妮, 王在华, 马理, 李梅 (546)
长三角地区一次区域污染过程中细颗粒物的来源解析及其光学特性	夏丽, 朱彬, 王红磊, 康汉青 (556)
南京市不同天气过程下颗粒物中水溶性离子分布特征及其来源解析	张杨, 王红磊, 刘安康, 陈魁, 张艺馨, 刘思晗 (564)
天津市冬季气溶胶吸湿因子的粒径分布特征	丁净, 张裕芬, 郑乃源, 张会涛, 余卓君, 李立伟, 元洁, 唐森, 冯银厂 (574)
输送、滞留叠加海上回流的长时间沙尘天气影响判断及贡献分析	张哲, 乔利平, 周敏, 黄丹丹, 安静宇, 郭会琴, 王红丽, 黄成, 董赵鑫, 王书肖 (584)
洛阳市秋冬季PM _{2.5} 中多环芳烃的污染特征、来源解析及健康风险评价	齐静文, 张瑞芹, 姜楠, 李利萍, 苗青青 (595)
郑州市臭氧污染变化特征、气象影响及输送源分析	王旭东, 尹沙沙, 杨健, 袁明浩, 张瑞芹, 李亚松, 卢轩 (604)
基于正交试验的臭氧及其前体物的非线性响应及控制方案	李光耀, 陈强, 郭文凯, 张瑞欣, 夏佳琦 (616)
汽车工业区大气挥发性有机物(VOCs)变化特征及来源解析	叶露, 邵菁菁, 俞华明 (624)
兰州市高分辨率人为源排放清单建立及在WRF-Chem中应用评估	郭文凯, 李光耀, 陈冰, 夏佳琦, 张瑞欣, 刘晓, 朱玉凡, 陈强 (634)
2010~2017年四川省机动车污染物排放趋势分析	李媛, 石嘉诚, 陈军辉, 潘玉瑾, 周虹辉, 范武波, 叶宏, 钱骏, 刘政 (643)
珠江三角洲海陆交互沉积物中镉生物有效性及生态风险评价	王芳婷, 包科, 陈植华, 黄长生, 张彩香, 赵信文, 刘学浩 (653)
乌梁素海流域地表水中全氟化合物分布、来源及其生态风险	史锐, 毛若愚, 张梦, 吕永龙, 宋帅, 赵纪新 (663)
乌梁素海冰盖中微塑料的分布特征及其与盐度、叶绿素a的响应关系	王志超, 杨建林, 杨帆, 杨文焕, 李卫平, 李兴 (673)
张家口清水河拦沙坝对磷输移、滞留的影响	王维, 李叙勇 (681)
三峡水库典型支流磷素赋存形态特征及其成因	杨凡, 王丽婧, 纪道斌, 李虹, 李莹杰, 李鑫, 许杨, 田盼, 吴雅婷 (688)
巢湖沉积物氮磷分布及污染评价	王艳平, 徐伟伟, 韩超, 胡维平 (699)
巢湖南淝河河口底泥污染特征及疏浚决策	杨盼, 杨春晖, 马鑫雨, 尹洪斌 (712)
氧化强化对氢氧化钙原位固磷效果的影响	徐楚天, 李大鹏, 岳薇, 吴宇涵, 孙培荣, 汤尧禹, 黄勇 (723)
降雨径流事件对三峡水库香溪河库湾甲烷释放的影响	陈敏, 许浩震, 王雪竹, 肖尚斌 (732)
典型喀斯特河流-水-气界面二氧化碳交换特性及其营养调控因素	刘睿, 张静, 陈祖胜, 倪茂茂, 刘文胜 (740)
江苏省代表性水源地抗生素及抗性基因赋存现状	王龙飞, 程逸群, 胡晓东, 朱金鑫, 李轶 (749)
尾矿库水体环境抗生素抗性基因的分布特征	黄福义, 朱永官, 苏建强 (761)
涡河流域中部地区地下水化学特征及其成因分析	郑涛, 焦团理, 胡波, 龚建师, 侯香梦, 王赫生 (766)
天津七里海湿地水化学组成及主要离子来源分析	何明霞, 张兵, 夏文雪, 崔旭, 王中良 (776)
秸秆覆盖与氮减施对土壤氮分布及地下水氮污染影响	张万锋, 杨树青, 孙多强, 靳亚红, 姜帅, 刘鹏 (786)
环境DNA宏条形码监测湖泊真核浮游植物的精准性	张丽娟, 徐杉, 赵峰, 周小华, 冯庆, 杨江华, 李飞龙, 王志浩, 张效伟 (796)
浮游植物群落及粒径结构对光吸收特性的影响	黄新, 施坤, 张运林, 朱广伟, 周永强 (808)
松花江干流2014~2019年夏季着生藻类群落结构特征及其对环境因子的响应	于宗灵, 陈威, 赵然, 李中宇, 董英莉, 张蕊, 王业耀, 金小伟 (819)
汛期前后老鹳河干流人类干扰下浮游细菌多样性及功能预测	韩雪梅, 龚子乐, 杨晓明, 李玉英, 陈兆进, 朱会会, 王凡梅 (831)
两种典型PPCPs在潜流人工湿地中的季节性去除效果及降解产物	李超予, 杨怡潇, 张宁, 谢慧君, 胡振, 张建 (842)
人工生态系统对城市河流中抗生素和ARGs的去除	周海东, 黄丽萍, 陈晓萌, 李丹妍, 李昕, 崔锦裕 (850)
紫外氯胺组消毒供水系统中病毒微生物的分布特征	韩雪, 孙坚伟, 张力, 王哲明, 白晓慧 (860)
高炉水渣负载硫化纳米零价铁对水中土霉素的去除	孙秋楠, 张荣斌, 邓曼君, 李远, 王学江 (867)
胺硫改性生物炭对水溶液中不同重金属离子的吸附特性及吸附稳定性	汪存石, 何敏霞, 周峰, 陈靛, 祝建中 (874)
电凝聚氧化耦合工艺的有机物处理特性及去除机制解析	谢新月, 许建军, 张少华, 刘雨果, 金鑫, 金鹏康 (883)
微米零价铁对剩余活性污泥和餐厨垃圾厌氧联合消化的加强效果及机制	陈圣杰, 姚福兵, 皮洲洁, 侯坤杰, 何丽, 李小明, 王东波, 杨麒 (891)
河南省典型工业区周边农田土壤重金属分布特征及风险评价	孟晓飞, 郭俊梅, 杨俊兴, 杨军, 郑国砥, 乔鹏炜, 卞建林, 陈同斌 (900)
南京市绿地土壤重金属分布特征及其污染评价	陈佳林, 李仁英, 谢晓金, 王红, 徐静, 邵京, 简静, 阿克居里·乌尔曼, 沈嘉, 央宗 (909)
复合改良剂FZB对砷污染土壤的修复效果	丁萍, 贺玉龙, 何欢, 余江 (917)
石灰配施有机物料修复酸性Cd污染稻田	李光辉, 成晴, 陈宏 (925)
叶面喷施纳米MnO ₂ 对水稻富集镉的影响机制	周一敏, 黄雅媛, 刘晓月, 李冰玉, 刘羽翼, 李卓晴, 王薪琪, 雷鸣 (932)
典型喀斯特地区土壤-作物系统镉的富集特征与污染评价	王锐, 邓海, 贾中民, 严明书, 周蛟, 董金秀, 王佳彬, 余飞 (941)
辣椒果实高中低镉累积型对镉的富集、转运特性及在亚细胞分布特点比较	邵晓庆, 贺章味, 徐卫红 (952)
4种草本植物对镉的富集特征	陈迪, 李伯群, 杨永平, 和兆荣, 李雄 (960)
不同施肥条件下紫色土旱坡地可溶性有机碳流失特征	熊子怡, 郑杰炳, 王丹, 王富华, 王鑫燕, 王子芳, 高明 (967)
降雨变化对荒漠草原植物群落多样性与土壤C:N:P生态化学计量特征的影响	高江平, 赵锐锋, 张丽华, 王军锋, 谢忠奎 (977)
水分管理对水稻生长与根际激发效应的影响特征	林森, 肖谋良, 江家彬, 魏亮, 李科林, 刘守龙, 祝贞科, 葛体达, 吴金水 (988)
铜胁迫对小麦根系微域微生物群落的影响	葛艺, 徐民氏, 徐绍辉, 徐艳 (996)
臭氧污染、氮沉降和干旱胁迫交互作用对杨树叶和细根非结构性碳水化合物的影响	李品, 周慧敏, 冯兆忠 (1004)
颗粒物有机源示踪物的筛选与应用综述	李源遽, 吴爱华, 童梦雪, 栾胜基, 李鸷 (1013)
《环境科学》征订启事 (522)	
《环境科学》征稿简则 (722)	
信息 (748, 899, 924)	

浮游植物群落及粒径结构对光吸收特性的影响

黄新^{1,2}, 施坤^{2*}, 张运林², 朱广伟², 周永强²

(1. 兰州大学资源环境学院西部环境教育部重点实验室, 兰州 730000; 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)

摘要: 浮游植物吸收及比吸收等光学特性表征浮游植物对光的吸收能力, 很大程度上决定了其光合作用效率和碳固定量, 是浮游植物生态学、水体光学和水色遥感领域研究热点和前沿问题。本研究基于 2013 年天目湖 7 个固定采样点逐月观测数据, 分析了浮游植物生物量、群落结构、吸收以及比吸收系数等生物-光学参数的季节变化特征, 构建了浮游植物生物量、群落结构与吸收、比吸收的参数化关系, 提出等效粒径指数概念并探讨其对浮游植物吸收和比吸收系数的影响机制。结果表明, 天目湖浮游植物生物量和丰度秋季最高、冬季最低, 群落结构季节演替明显, 隐藻、针杆藻、小环藻为全年优势属, 冬春季优势属为硅藻-隐藻型, 夏季为硅藻-绿藻-甲藻型, 秋季为隐藻-硅藻-绿藻型; 浮游植物等效粒径季节变化明显, 表现为夏季 > 秋季 > 冬季 > 春季, 夏季平均值为 64.83 μm , 春季平均值为 29.54 μm 。浮游植物吸收系数表现为秋季 > 春季 > 冬季 > 夏季, 其中秋季浮游植物在 440 nm 和 675 nm 的吸收系数均值为 $(0.66 \pm 0.18) \text{m}^{-1}$ 和 $(0.33 \pm 0.10) \text{m}^{-1}$, 夏季均值为 $(0.17 \pm 0.02) \text{m}^{-1}$ 和 $(0.08 \pm 0.01) \text{m}^{-1}$ 。浮游植物比吸收系数为春季 > 冬季 > 秋季 > 夏季, 其中春季浮游植物在 440 nm 和 675 nm 的比吸收系数的均值为 $(0.07 \pm 0.02) \text{m}^2 \cdot \text{mg}^{-1}$ 和 $(0.04 \pm 0.01) \text{m}^2 \cdot \text{mg}^{-1}$, 夏季的均值为 $(0.03 \pm 0.004) \text{m}^2 \cdot \text{mg}^{-1}$ 和 $(0.01 \pm 0.002) \text{m}^2 \cdot \text{mg}^{-1}$ 。浮游植物吸收系数随生物量和丰度的增加而线性升高, 气温引起的硅藻、蓝藻丰度生物量的变化是引起浮游植物吸收系数季节变化的主要原因; 比吸收系数和等效粒径呈线性负相关, 浮游植物群落结构季节更替引起等效粒径的变化是影响浮游植物比吸收系数季节变化的重要因素。

关键词: 浮游植物吸收; 群落结构; 等效粒径 (ESD); 丰度; 生物量; 天目湖

中图分类号: X122 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)02-0808-11 DOI: 10.13227/j.hjxx.202007316

Effect of Phytoplankton Community Composition and Size Structure on Light Absorption Properties

HUANG Xin^{1,2}, SHI Kun^{2*}, ZHANG Yun-lin², ZHU Guang-wei², ZHOU Yong-qiang²

(1. Key Laboratory of Western China's Environmental Systems (Ministry of Education), College of Earth and Environmental Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China; 2. State Key Laboratory of Lake Science and Environment, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

Abstract: In the fields of phytoplankton ecology, water optics, and water color remote sensing, phytoplankton absorption properties represent the light absorption capacity of phytoplankton, which affects photosynthesis efficiency and carbon fixation. Here, the biomass, community composition, and the absorption properties of phytoplankton were measured alongside other bio-optical parameters in Lake Tianmu are examined using data collected between January and November 2013 (except February). Based on the relationships between phytoplankton biomass, community composition, and absorption, the effects of abundance, biomass, and equivalent sphere diameter on phytoplankton absorption and specific absorption were revealed. The highest biomass and abundance of phytoplankton were recorded in the autumn and the lowest in the winter. *Cryptomonas*, *Synedra*, and *Cyclotella* were the dominant genera throughout the year. The dominant genera structure type was Bacillariophyta-Cryptophyta in the winter and spring, Bacillariophyta-Chlorophyta-Pyrroptata in the summer, and Cryptophyta-Bacillariophyta-Chlorophyta in the autumn. Phytoplankton diameter was ranked in the order summer > autumn > winter > spring, with mean values of 64.83 μm in summer and 29.54 μm in spring. Phytoplankton absorption coefficients of were ranked in the order autumn > spring > winter > summer, with mean values at 440 nm and 675 nm of $(0.66 \pm 0.18) \text{m}^{-1}$ and $(0.33 \pm 0.10) \text{m}^{-1}$ in autumn and $(0.17 \pm 0.02) \text{m}^{-1}$ and $(0.08 \pm 0.01) \text{m}^{-1}$ in summer, respectively. The specific absorption coefficients of the phytoplankton were ranked in the order spring > winter > autumn > summer, with mean values at 440 nm and 675 nm of $(0.07 \pm 0.02) \text{m}^2 \cdot \text{mg}^{-1}$ and $(0.04 \pm 0.01) \text{m}^2 \cdot \text{mg}^{-1}$ in spring and $(0.03 \pm 0.004) \text{m}^2 \cdot \text{mg}^{-1}$ and $(0.01 \pm 0.002) \text{m}^2 \cdot \text{mg}^{-1}$ in summer, respectively. Significant linear correlations were found between phytoplankton biomass, abundance, and absorption coefficients. Variations of Bacillariophyta and Cyanophyta biomass caused by temperature explained the seasonal variation in absorption coefficients. The specific absorption coefficient decreased with an increase in equivalent sphere diameter, and variations in phytoplankton community composition explained seasonal changes in the specific absorption coefficient.

Key words: phytoplankton absorption; community composition; equivalent sphere diameter (ESD); biomass; abundance; Lake Tianmu

收稿日期: 2020-07-31; 修订日期: 2020-08-17

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41922005, 41771472, 41621002); 中国科学院重点部署项目 (ZDRW-ZS-2017-3-4); 中国科学院青年创新促进会项目 (2017365)

作者简介: 黄新 (1996 ~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向水色遥感, E-mail: huangx2018@lzu.edu.cn

* 通信作者, E-mail: kshi@niglas.ac.cn

浮游植物是指在水体中浮游生活的光合自养生物,是水体初级生产者^[1],其粒径结构影响着湖泊初级生产光合作用效率和食物网功能,进而影响到整个湖泊生态系统的物质循环和能量传输,是定量评价湖泊生态系统状况的重要生态指标^[2~4]。浮游植物吸收是水体总吸收的重要组成部分,对于浮游植物光合作用和固碳、水质参数高精度遥感反演、水体初级生产力的估算以及全球碳循环等研究均具有重要的意义^[5~15]。浮游植物吸收与比吸收系数随着湖泊营养状况、季节更替和浮游植物群落结构而变化,因此不同湖泊浮游植物吸收特性及其控制因素存在较大差异。Riddick 等^[16]在对巴拉顿湖的研究中发现,浮游植物吸收系数与生物量存在明显的幂函数正相关,蓝藻是影响浮游植物吸收特性的优势物种。Zhang 等^[17]通过对斜生栅藻(绿藻门)和铜绿微囊藻(蓝藻门)的实验室培养以及对太湖春夏浮游植物吸收特性的研究,发现春季至夏季太湖浮游植物群落以大细胞绿藻为主演替为以小细胞蓝藻为主,浮游植物比吸收系数显著降低。但是目前国内外此类研究主要集中在大洋水体^[18~21],针对中富营养水平湖泊的研究较少,而湖泊水体浮游植物群落结构和粒径结构与大洋水体之间存在巨大差异,大洋水体的浮游植物吸收特性不能简单的用于湖泊。此外,多数相关研究主要以粒径指数(SI)来定量描述浮游植物粒径的变化^[22~23],或者进行藻类室内培养实验来独立研究细胞大小与吸收特性的关系^[20,24],而直接基于湖泊浮游植物群落结构演替的研究较少。因此,开展浮游植物群落结构及粒径对吸收和比吸收系数的影响研究,对于深入理解内陆湖泊浮游植物吸收特性,优化湖泊生物光学模型具有重要的科学意义。

本研究通过对天目湖 2013 年逐月(不包括 2 月和 12 月)浮游植物及其他相关因子的监测,分析了浮游植物群落结构和吸收特性的季节变化特征,阐明了浮游植物丰度、生物量以及粒径与吸收系数、比吸收系数之间的关系,一方面可以为水色遥感数据反演浮游植物群落及粒径结构提供理论支持,拓展水色遥感反演参数,同时还可为天目湖生态系统长期监测及水质管理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区与采样点分布

天目湖位于江苏省溧阳市,地处东经 119.40°~119.45°,北纬 31.23°~31.32°,水域面积 11.6 km²,集水面积 152 km²,平均水深 7 m^[25],呈东北-西南走向,南端有河流汇入,北部修筑大坝,为水库

型深水湖泊,气候属于亚热带季风气候,雨热同季,四季分明。自 1962 年建成以来,流域内渔业、农业和旅游业先后兴起发展,为地方带来经济效益的同时,湖泊面源污染日益严重,水质下降和藻类异常繁殖等富营养化问题严重^[26,27]。近年来,天目湖作为饮用水水源保护地,流域的环境保护和治理工作加强,地方采取封湖禁渔、生态补偿、区域限批、生态清淤和封山育林等措施,湖泊水质得到改善,现常年保持国家地表水 II 类标准,水体中浮游植物群落结构发生改变。

本研究在天目湖自北向南共布设 7 个采样点(图 1),于 2013 年 1 月和 3~11 月每月下旬使用有机玻璃采水器采集表层水样,于当日分别使用直径 47 mm 和 25 mm GF/F 膜对水样进行过滤,具体过滤体积视水样颗粒物浓度而定。滤后留膜低温保存,用于实验室后续测定叶绿素 a 浓度和浮游植物吸收系数。同时,每个点保留 1 L 水样,现场加入 10 mL 的鲁格试剂固定,用于实验室浮游植物群落结构的鉴定。

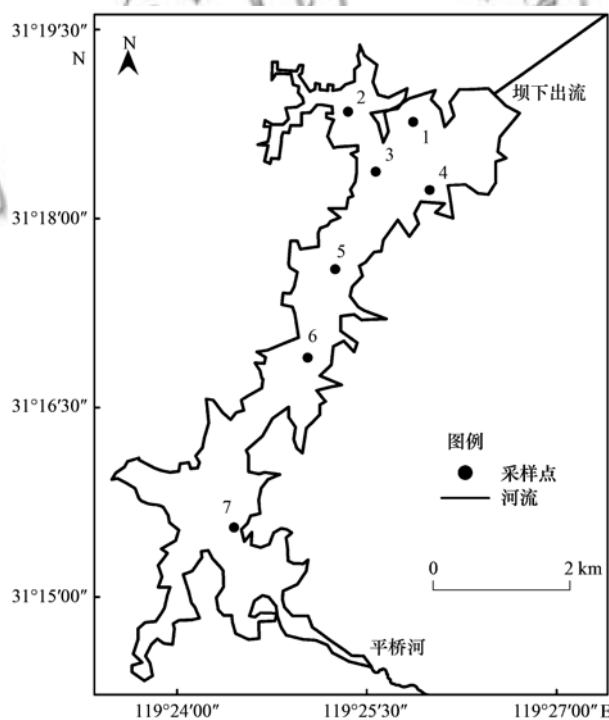


图 1 天目湖采样点分布示意

Fig. 1 Distribution of sampling stations in Lake Tianmu

1.2 浮游植物群落鉴定与优势度计算

水样静置沉淀 48 h 后,使用虹吸管吸除表层清液,然后定容到 30 mL。浮游植物鉴定计数时,应先将样品瓶摇匀,迅速吸取 0.1 mL 水样于 20 mm × 20 mm 计数框中,利用 40 倍显微镜鉴定、计数,所有样品重复观测计数两次,取其均值为该样点的浮游植物细胞密度^[28,29]。由于浮游植物的细胞密度接近于

水的密度, 1 mm^3 相当于 1 mg 生物量, 故生物量的测定采用体积转化法^[30,31]。

浮游植物的优势属依据优势度(Y_i)来确定^[32]:

$$Y_i = \frac{n_i}{N} \times f_i \quad (1)$$

式中, n_i 为第 i 个浮游植物属种的生物量, N 为总生物量, f_i 为第 i 个属种的出现频次。当优势度(Y_i)大于 0.02 时, 确定为优势属。

1.3 等效粒径计算

由于浮游植物群落组成、生物量和细胞粒径差别非常大, 要非常准确地测定和计算其粒径大小非常困难, 为反映每一次采样中浮游植物细胞的平均粒径, 笔者创新性地提出等效粒径(equivalent sphere diameter, ESD)概念, 其计算公式如下:

$$\text{ESD} = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{\text{Bio}_i}{\text{Bio}_{\text{Total}}} \times \text{Volume}_i}{n} \quad (2)$$

式中, n 是每个样本中浮游植物的种类数, Bio_i 是第 i 个物种的生物量, $\text{Bio}_{\text{Total}}$ 是样本总生物量, Volume_i 是第 i 物种显微镜下观测到的粒径大小。

1.4 浮游植物吸收系数测定与比吸收系数计算

悬浮颗粒物的吸收采用 Yentsch^[33] 提出的定量滤膜技术(quantitative filter technique, QFT)测定, 使用同样浸泡过的空白滤膜作参比, 在岛津 UV-2500 紫外分光光度计下采用光透射-光反射(T-R)方法测定颗粒物在 350 ~ 800 nm 间每 1 nm 的吸光度。采用 Tassan 等^[34] 提出的公式进行放大因子校正:

$$D_s(\lambda) = 0.423D_t(\lambda) + 0.479D_t^2(\lambda) \quad (3)$$

式中, $D_s(\lambda)$ 为校正后的滤膜上悬浮颗粒物吸光度; $D_t(\lambda)$ 为直接在仪器上测定的滤膜上悬浮颗粒物吸光度。

滤膜上悬浮颗粒物的光谱吸收系数 $a_p(\lambda)$ 按 Cleveland 提出的公式计算得出^[35]:

$$a_p(\lambda) = 2.303 \cdot \frac{S}{V} \cdot D_s(\lambda) \quad (4)$$

式中, S 为沉积在滤膜上的颗粒物有效面积, V 为过滤水样的体积。

用 0.1% 的次氯酸钠溶液萃取掉滤膜上的色素, 使用同样的方法测定得非藻类颗粒物的吸收系数。由于悬浮颗粒物的吸收是非藻类颗粒物和浮游

植物的简单线性相加, 因而浮游植物的光谱吸收系数 $a_{ph}(\lambda)$ 就等于总悬浮颗粒物吸收系数 $a_p(\lambda)$ 减去非藻类颗粒物的吸收系数 $a_d(\lambda)$, 即:

$$a_{ph}(\lambda) = a_p(\lambda) - a_d(\lambda) \quad (5)$$

浮游藻类的比吸收系数 $a_{ph}^*(\lambda)$ 由以下公式计算得:

$$a_{ph}^*(\lambda) = \frac{a_{ph}(\lambda)}{\text{Chla}} \quad (6)$$

式中, Chla 为叶绿素 a 浓度, 采用分光光度法测定^[36]。使用 90% 的热酒精萃取, 过滤得到的清液在岛津 UV-2500 紫外分光光度计上测定 665 nm 和 750 nm 处吸光度, 并滴入 1 滴稀盐酸酸化, 计算得叶绿素 a 浓度。

1.5 统计分析方法

使用 Excel 2010 和 IBM SPSS 23 进行统计分析, 包括平均值、标准差计算和线性拟合。使用回归分析法研究浮游植物丰度、生物量、等效粒径与吸收系数和比吸收系数之间的关系, 经 F 检验, 当 $P \leq 0.05$ 时为显著。

2 结果与讨论

2.1 浮游植物群落结构季节变化特征

采样期间共鉴定出浮游植物 7 门 11 纲 15 目 29 科 42 属, 其中蓝藻门 3 纲 5 目 6 科 10 属, 隐藻门 1 纲 1 目 1 科 2 属, 金藻门 1 纲 1 目 1 科 1 属, 甲藻门 1 纲 1 目 2 科 2 属, 裸藻门 1 纲 1 目 1 科 2 属, 硅藻门 2 纲 2 目 7 科 8 属, 绿藻门 2 纲 4 目 11 科 17 属。天目湖浮游植物丰度以蓝藻最多, 月平均丰度为 $922.93 \times 10^4 \text{ 个} \cdot \text{L}^{-1}$, 占浮游植物月平均总数的 73.29%; 其次为硅藻、绿藻和隐藻, 金藻、裸藻和甲藻的月平均丰度较低, 均小于 $10 \times 10^4 \text{ 个} \cdot \text{L}^{-1}$ 。浮游植物月平均生物量最大的是硅藻, 为 $1.04 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 占浮游植物月平均总数的 35.87%, 其次为隐藻, 生物量为 $0.88 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 占浮游植物月平均总数的 30.45%, 金藻的生物量最低, 为 $0.04 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 占浮游植物月平均总数的 1.49% (表 1)。

表 2 显示了每月的主要优势属, 包括隐藻门中蓝隐藻属和隐藻属、金藻门中钟罩藻属、裸藻门中裸藻属、硅藻门中小环藻属、针杆藻属和曲壳藻属以及绿藻门中卵胞属、衣藻属和丝藻属。3 ~ 6 月以小

表 1 浮游植物丰度、生物量及其所占百分比

Table 1 Percentages of abundance and biomass of phytoplankton

项目	蓝藻	隐藻	金藻	甲藻	裸藻	硅藻	绿藻	总计
月平均丰度 $\times 10^4 / \text{个} \cdot \text{L}^{-1}$	922.93	84.79	4.29	1.86	3.64	123.71	118.00	1259.21
所占百分比/%	73.29	6.73	0.34	0.15	0.29	9.83	9.37	100
月平均生物量 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	0.21	0.88	0.04	0.11	0.15	1.04	0.46	2.89
所占百分比/%	7.14	30.45	1.49	3.72	5.25	35.87	16.08	100

表 2 天目湖浮游植物优势属及其优势度¹⁾

Table 2 Dominant genera and dominance index of phytoplankton in Lake Tianmu

月份	蓝隐藻	隐藻	钟罩藻	多甲藻	裸藻	小环藻	针杆藻	曲壳藻	卵胞藻	衣藻	丝藻
1	0.103	0.290	0.049	—	—	0.067	0.079	0.037	—	0.047	—
3	0.031	0.006	0.093	—	—	0.365	0.161	0.067	—	0.000	—
4	0.054	0.143	0.003	—	—	0.524	0.071	0.070	0.008	0.012	—
5	0.019	0.198	0.006	0.014	0.029	0.422	0.121	0.035	0.000	0.029	—
6	0.008	0.205	0.009	0.034	0.004	0.528	0.051	0.011	0.003	0.039	—
7	0.019	0.365	—	0.087	0.048	0.077	0.011	0.006	0.100	0.082	—
8	0.015	0.486	—	0.036	0.003	0.041	0.079	0.004	0.026	0.079	—
9	0.017	0.334	—	—	0.033	0.037	0.106	—	0.005	0.045	0.004
10	0.014	0.299	—	0.016	0.056	0.070	0.130	0.001	0.005	0.054	0.110
11	0.017	0.341	0.002	—	0.035	0.053	0.083	0.002	0.001	0.028	0.008

1) “—”表示未在本月鉴定出此属浮游植物

环藻最具优势,其优势度范围是 0.365 ~ 0.528; 1 月和 7 ~ 10 月隐藻最具优势,其优势度范围是 0.290 ~ 0.486.

由图 2 可知,浮游植物生物量和丰度存在明显的季节变化. 全年中浮游植物生物量最大值为 4.49 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,出现在 10 月,最小值仅为 1.08 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,出现在 1 月. 温度是影响天目湖浮游植物群落结构变化的主要原因,当气温达到 16℃ 时,硅藻开始大量繁殖,气温达 26℃ 时,硅藻的生物量达到最大,而超过该温度时,硅藻生物量开始下降^[37]. 所以春季天目湖水温上升,硅藻生物量随之增加,夏季气温过高抑制硅藻生长,其生物量急剧下降,秋季气温降低,硅藻生物量缓慢增加. 但是小环藻的最佳生长温度更高,其生物量总体上随温度的增加而增加. 另外,隐藻与水温呈显著正相关且生态位较宽,对水体的适应性较强,因此夏秋两季隐藻生物量较大,冬春季节较小.

浮游植物丰度 11 月最大,为 $3\,422.86 \times 10^4$ 个 $\cdot\text{L}^{-1}$,1 月浮游植物丰度最小,为 402.86×10^4 个 $\cdot\text{L}^{-1}$. 秋季(9 ~ 11 月)浮游植物丰度较多,主要是因为蓝藻门中包括席藻和束丝藻的大量繁殖. 浮游植物的生物量和丰度变化趋势并不完全相同,这是由于生物量的大小除了与浮游植物数量相关外,还与其个体细胞大小密切相关. 硅藻的细胞体积较蓝藻大很多,5 月和 6 月硅藻丰度较多,因而浮游植物生物量在春末夏初形成一个次高峰.

2.2 浮游植物等效粒径变化特征

鉴定结果表明,天目湖浮游植物等效粒径的物种组成多样,分布跨度较大. 按照分类标准,微微型浮游植物包含 20 个属,其中蓝藻门 10 属,绿藻门 9 属,硅藻门 1 属; 微型浮游植物共 13 个属,其中隐藻门 1 属,硅藻门 6 属,绿藻门 6 属; 网采浮游植物共 9 属,其中隐藻门 1 属,金藻门 1 属,甲藻门 2 属,裸藻门 2 属,硅藻门 2 属,绿藻门 1 属. 总的来说,

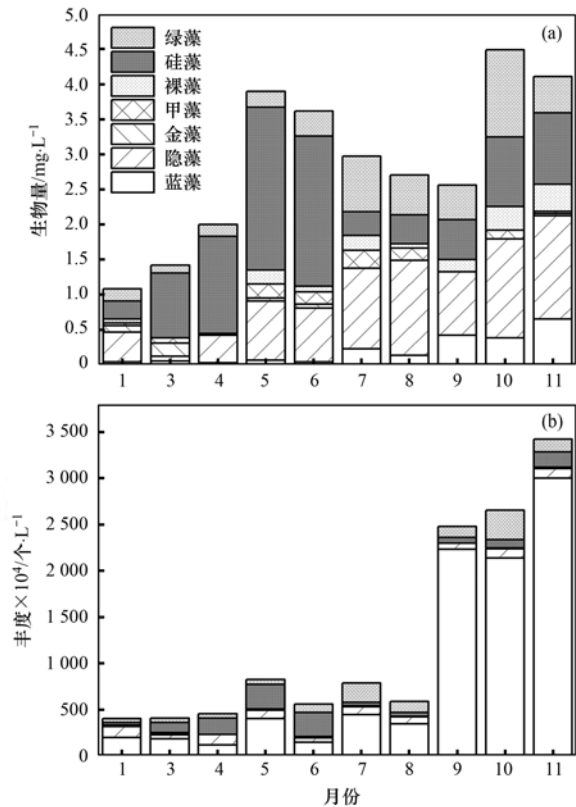


图 2 浮游植物生物量和丰度的逐月变化

Fig. 2 Monthly variations in phytoplankton biomass and abundance

微微型浮游植物的比例占 47.6%,微型浮游植物的比例为 31.0%,是天目湖大部分浮游植物等效粒径的主要分类.

隐藻的等效粒径变化最大,变化范围是 28.43 ~ 1 024.78 μm ,平均等效粒径为 531.73 μm ; 其余按粒径大小排序依次是裸藻、甲藻、硅藻、金藻、绿藻和蓝藻,其中硅藻、裸藻和甲藻的变化较小,绿藻和金藻的季节差异不明显; 蓝藻的等效粒径变化幅度最小,变化范围是 0.05 ~ 0.62 μm ,平均等效粒径为 0.28 μm [图 3(a)]. 图 3(b)展示了天目湖 7 个采样点浮游植物等效粒径及其平均值的季节变化,结

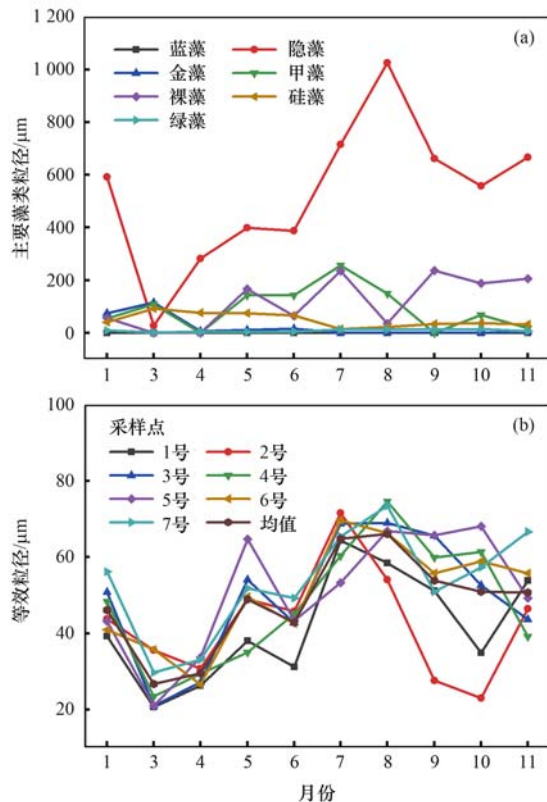


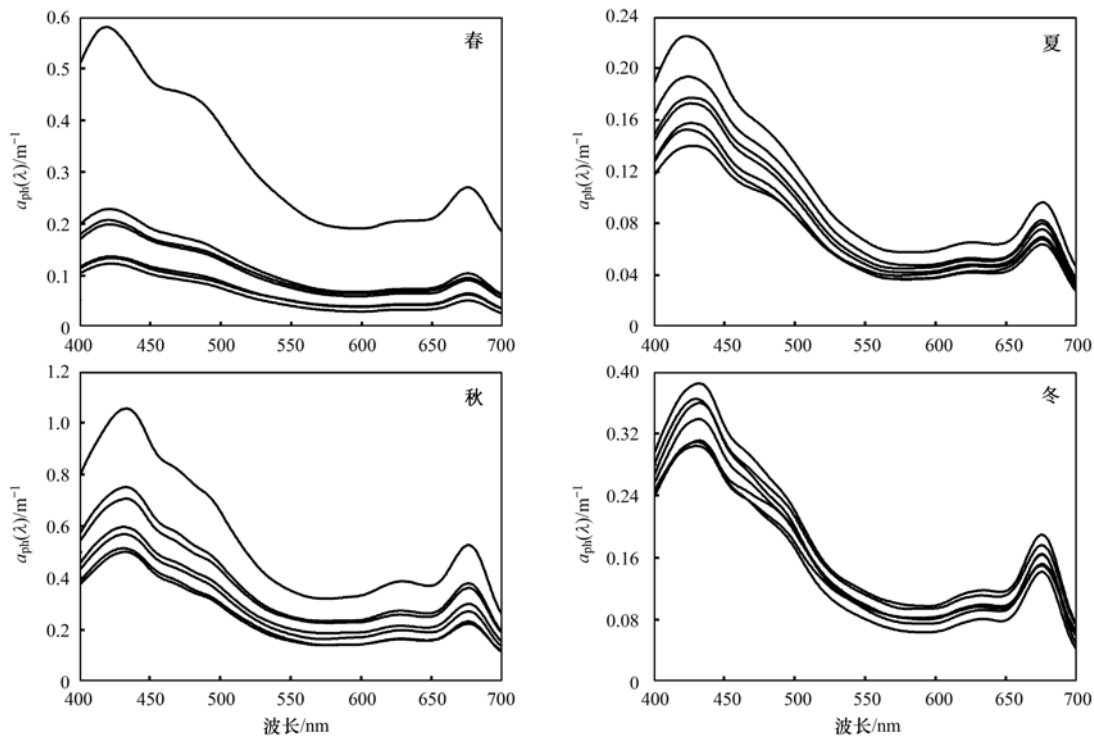
图3 主要浮游植物粒径组成及等效粒径逐月变化
Fig. 3 Monthly variations in the size composition of the main phytoplankton and equivalent sphere diameter

果表明所有采样点呈现出较统一的变化趋势, 3~8月, 天目湖浮游植物等效粒径波动上升, 8~11月开

始波动下降; 其中夏季(7月)平均等效粒径最大, 为 $64.83 \mu\text{m}$, 秋季(10月)平均等效粒径较小, 为 $50.92 \mu\text{m}$, 其次为冬季(1月), 为 $46.09 \mu\text{m}$, 春季(4月)平均等效粒径最小, 为 $29.54 \mu\text{m}$, 存在明显的季节变化。

2.3 浮游植物吸收与比吸收系数变化特征

图4为天目湖7个采样点浮游植物吸收系数曲线, 不同采样时间的浮游植物光谱吸收系数存在较大差异, 具有明显的季节变化。整体而言, 秋季(10月)浮游植物吸收系数最大, $a_{\text{ph}}(440)$ 和 $a_{\text{ph}}(675)$ 的变化范围分别是 $0.49 \sim 1.03 \text{ m}^{-1}$ 和 $0.22 \sim 0.53 \text{ m}^{-1}$, 均值分别为 $(0.66 \pm 0.18) \text{ m}^{-1}$ 和 $(0.33 \pm 0.10) \text{ m}^{-1}$ 。其次为冬季(1月), $a_{\text{ph}}(440)$ 和 $a_{\text{ph}}(675)$ 的变化范围分别是 $0.29 \sim 0.37 \text{ m}^{-1}$ 和 $0.14 \sim 0.19 \text{ m}^{-1}$, 均值分别为 $(0.33 \pm 0.03) \text{ m}^{-1}$ 和 $(0.16 \pm 0.02) \text{ m}^{-1}$; 春季(4月)和夏季(7月)浮游植物吸收系数偏小, 春季 $a_{\text{ph}}(440)$ 和 $a_{\text{ph}}(675)$ 的变化范围分别是 $0.11 \sim 0.52 \text{ m}^{-1}$ 和 $0.05 \sim 0.27 \text{ m}^{-1}$, 均值分别为 $(0.21 \pm 0.13) \text{ m}^{-1}$ 和 $(0.11 \pm 0.07) \text{ m}^{-1}$; 夏季 $a_{\text{ph}}(440)$ 和 $a_{\text{ph}}(675)$ 的变化范围分别是 $0.14 \sim 0.21 \text{ m}^{-1}$ 和 $0.06 \sim 0.10 \text{ m}^{-1}$, 均值分别为 $(0.17 \pm 0.02) \text{ m}^{-1}$ 和 $(0.08 \pm 0.01) \text{ m}^{-1}$ 。不同季节的浮游植物光谱吸收曲线具有相似特征, 所有采样点在 440 nm 和 675 nm 附近存在两个吸收峰, 440



图中曲线表示7个采样点的吸收系数

图4 不同季节天目湖浮游植物吸收光谱

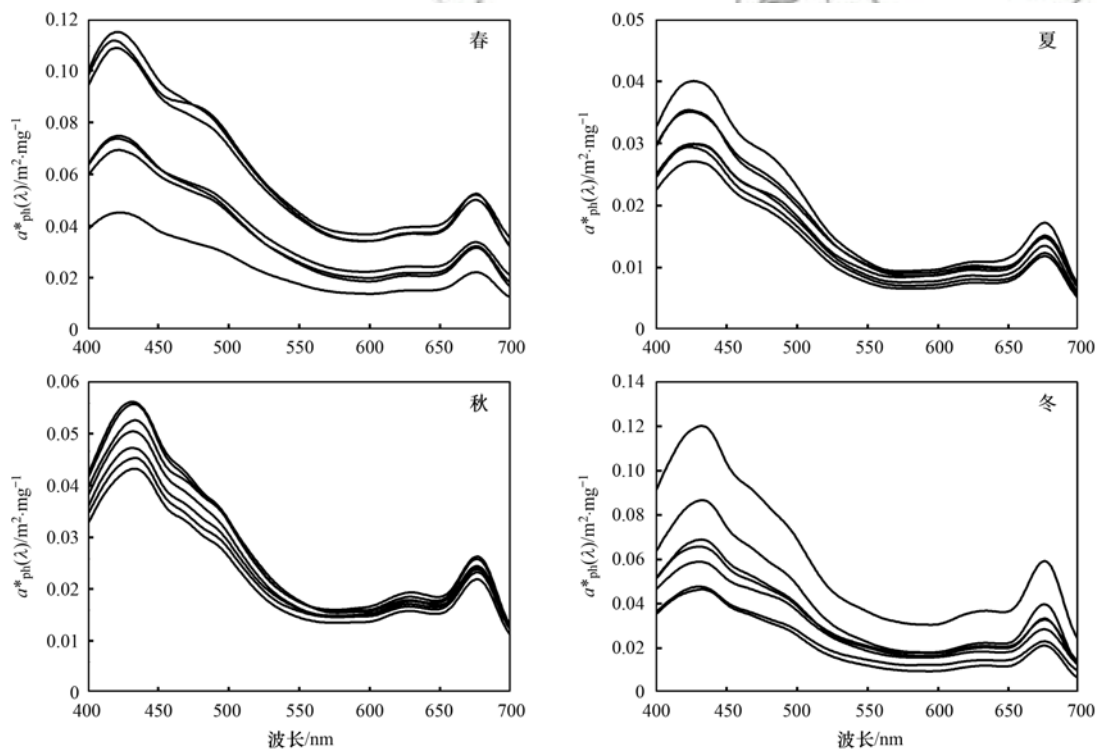
Fig. 4 Absorption spectra of phytoplankton during different seasons in Lake Tianmu

nm 的吸收峰是叶绿素 a 和其他辅助色素共同作用的结果, 675 nm 的吸收峰是叶绿素 a 作用的结果^[38].

天目湖浮游植物比吸收系数季节变化较小(图 5), 冬春季节浮游植物比吸收系数最大, 春季 a_{ph}^* (440) 和 a_{ph}^* (675) 的变化范围分别是 $0.04 \sim 0.10 \text{ m}^2 \cdot \text{mg}^{-1}$ 和 $0.02 \sim 0.05 \text{ m}^2 \cdot \text{mg}^{-1}$, 均值分别为 $(0.07 \pm 0.02) \text{ m}^2 \cdot \text{mg}^{-1}$ 和 $(0.04 \pm 0.01) \text{ m}^2 \cdot \text{mg}^{-1}$, 其对应的叶绿素 a 浓度范围是 $1.65 \sim 5.20 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$; 冬季 a_{ph}^* (440) 和 a_{ph}^* (675) 的变化范围分别是 $0.05 \sim 0.12 \text{ m}^2 \cdot \text{mg}^{-1}$ 和 $0.02 \sim 0.04 \text{ m}^2 \cdot \text{mg}^{-1}$, 均值分别为 $(0.07 \pm 0.02) \text{ m}^2 \cdot \text{mg}^{-1}$ 和 $(0.03 \pm 0.01) \text{ m}^2 \cdot \text{mg}^{-1}$, 其对应的叶绿素 a 浓度范围是 $4.14 \sim 7.63 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$. 其次为秋季, a_{ph}^* (440) 和 a_{ph}^* (675) 的变化范围分别是 $0.04 \sim 0.05 \text{ m}^2 \cdot \text{mg}^{-1}$ 和 $0.02 \sim 0.03 \text{ m}^2 \cdot \text{mg}^{-1}$, 均值分别为 $(0.05 \pm 0.004) \text{ m}^2 \cdot \text{mg}^{-1}$ 和 (0.02 ± 0.001)

$\text{m}^2 \cdot \text{mg}^{-1}$, 其对应的叶绿素 a 浓度范围是 $9.00 \sim 20.07 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$. 夏季浮游植物比吸收系数最小, a_{ph}^* (440) 和 a_{ph}^* (675) 的变化范围分别是 $0.03 \sim 0.04 \text{ m}^2 \cdot \text{mg}^{-1}$ 和 $0.01 \sim 0.02 \text{ m}^2 \cdot \text{mg}^{-1}$, 均值分别为 $(0.03 \pm 0.004) \text{ m}^2 \cdot \text{mg}^{-1}$ 和 $(0.01 \pm 0.002) \text{ m}^2 \cdot \text{mg}^{-1}$, 其对应的叶绿素 a 浓度范围是 $3.93 \sim 6.37 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$.

不同的研究学者发现, 无论是远海一类水体还是湖泊、河流等二类水体^[39,40], a_{ph} (440) 和 a_{ph} (675) 与叶绿素 a 浓度存在很好地线性或非线性关系, 且 675 nm 处的相关性要好于 440 nm. 图 6 为天目湖 10 个月 70 个采样点在 440 和 675 nm 处浮游植物吸收系数和比吸收系数与叶绿素 a 浓度的关系, a_{ph} (440) 和 a_{ph} (675) 与叶绿素 a 浓度存在显著幂函数正相关关系, a_{ph}^* (440) 和 a_{ph}^* (675) 与叶绿素 a 浓度相关性较弱, 但存在负相关关系.



图中曲线表示 7 个采样点的吸收系数
图 5 不同季节天目湖浮游植物比吸收光谱

Fig. 5 Specific absorption spectra of phytoplankton during different seasons in Lake Tianmu

2.4 吸收系数、比吸收系数与浮游植物生物量、丰度、粒径的参数化关系

如上所述, 天目湖浮游植物群落结构存在明显的季节变化特征. 图 7 展示了浮游植物在 440 nm 和 675 nm 处的吸收系数随生物量和丰度的变化, 二者存在显著线性正相关. 米氏理论可解释这两组参量间的关系, 多分散性的颗粒群吸收光谱可表示为^[41]:

$$a(\lambda) = \frac{\pi}{4} Q_a(\lambda) \int_{D_{\min}}^{D_{\max}} D^2 F(D) dD \quad (7)$$

式中, $Q_a(\lambda)$ 为平均吸收效率因子, D 为颗粒直径, $F(D) dD$ 表示 D 到 $D + dD$ 粒径范围内的粒子数. 又因细胞密度即丰度 $ND = \int_{D_{\min}}^{D_{\max}} F(D) d(D)$ ^[42], 故 $D^2 \times ND$ 是影响吸收系数的重要因素.

天目湖浮游植物吸收系数春、秋高而冬、夏低,

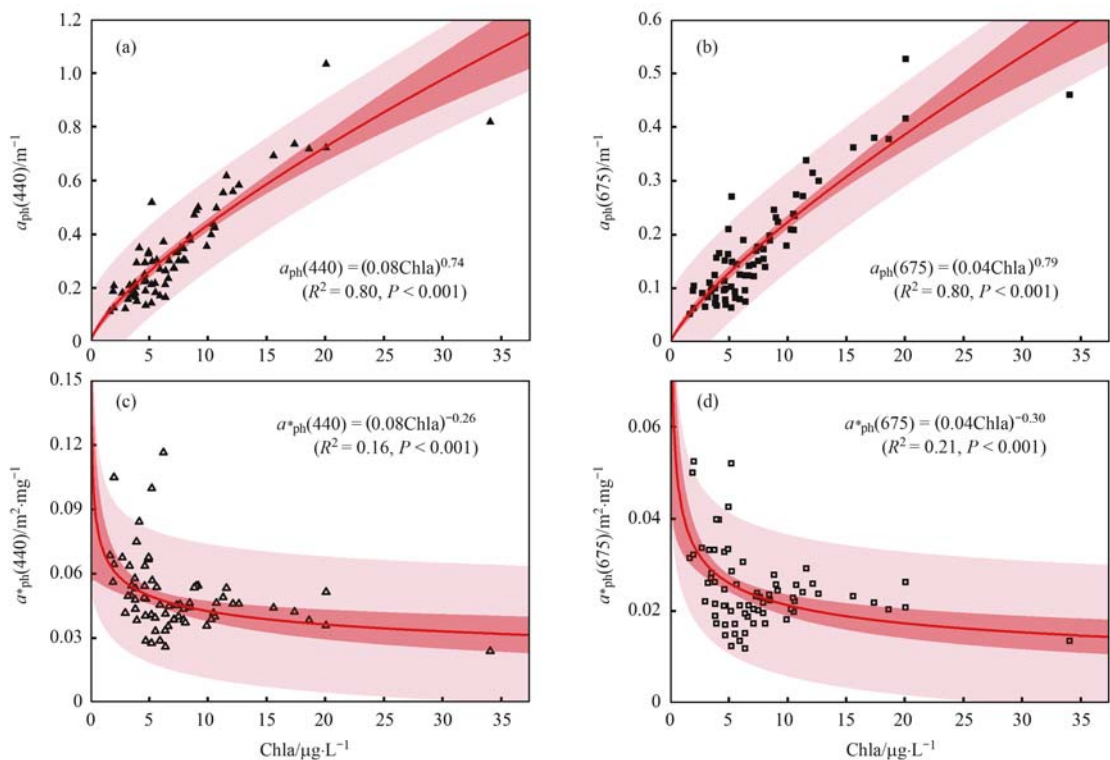


图 6 浮游植物吸收系数、比吸收系数和叶绿素 a 浓度的关系

Fig. 6 Relationships between phytoplankton absorption, specific absorption coefficients, and chlorophyll a concentrations

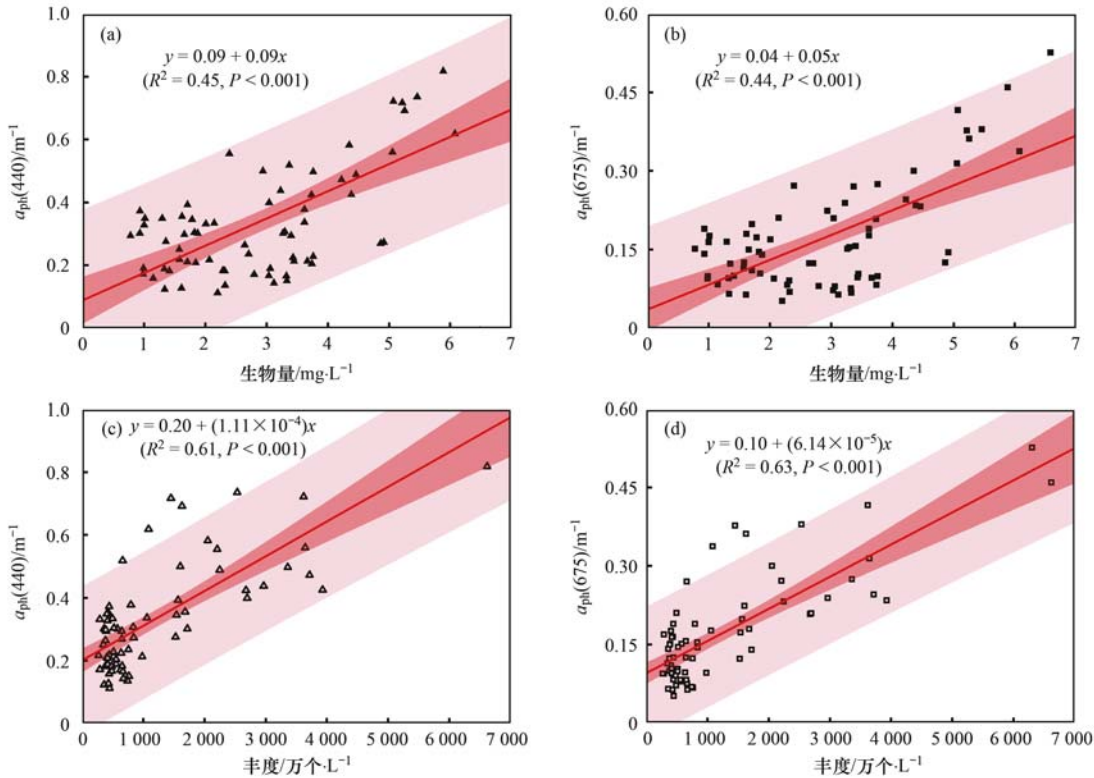


图 7 浮游植物的生物量和丰度与吸收系数的关系

Fig. 7 Relationships between phytoplankton biomass, abundance, and absorption coefficients

这与浮游植物生物量与丰度的季节变化特征一致。从冬末到春季随着天目湖湖水的升温,硅藻开始大量繁殖,丰度占比由 6.7% 升至 38.2%,总丰度比冬季增加了 105.3%,因此浮游植物吸收系数在春季形

成一个次高峰。夏季的高温抑制了硅藻的生长,其丰度占比降至 5.0%,而高温适宜蓝藻的生长,其丰度由 48.6% 升至 56.9%,但总丰度减少了 4.8%,因而夏季与冬季的浮游植物吸收系数相对较低。秋季

蓝藻迅速繁殖,丰度占比升至 80.6%,总丰度增加了 237.0%,所以秋季的浮游植物吸收系数远大于其他季节. 气温不同而引起的硅藻、蓝藻丰度的变化是造成天目湖浮游植物吸收系数季节变化的主要原因.

图 8 表明 440 nm 和 675 nm 处浮游植物比吸收系数与等效粒径之间呈线性负相关,随着等效粒径的增加,浮游植物比吸收系数减小. 研究表明,大型浮游植物叶绿体体积较大,自蔽效应 (self-shading) 较强,对光能的利用率较低,浮游植物包裹效应是造成比吸收系数空间和时间差异的主要原因,以包裹因子来表示^[43,44],公式为:

$$Q_a(\lambda) = \frac{3}{2\rho'(\lambda)} \left[1 + \frac{2e^{-\rho'(\lambda)}}{\rho'(\lambda)} + 2 \frac{2e^{-\rho'(\lambda)} - 1}{\rho'^2(\lambda)} \right] \quad (8)$$

式中, $\rho'(\lambda) = a_{\text{sol}}^* c_{\text{cell}} d$, a_{sol}^* 为悬浮状态下的比吸收系数; c_{cell} 为细胞内叶绿素 a 的浓度; d 为细胞的直径. 由以上公式可见,细胞内叶绿素 a 浓度和浮游植物粒径是影响比吸收系数的共同因素,这也解释了 440 nm 处由于辅助色素的影响,包裹效应的体现不如 675 nm.

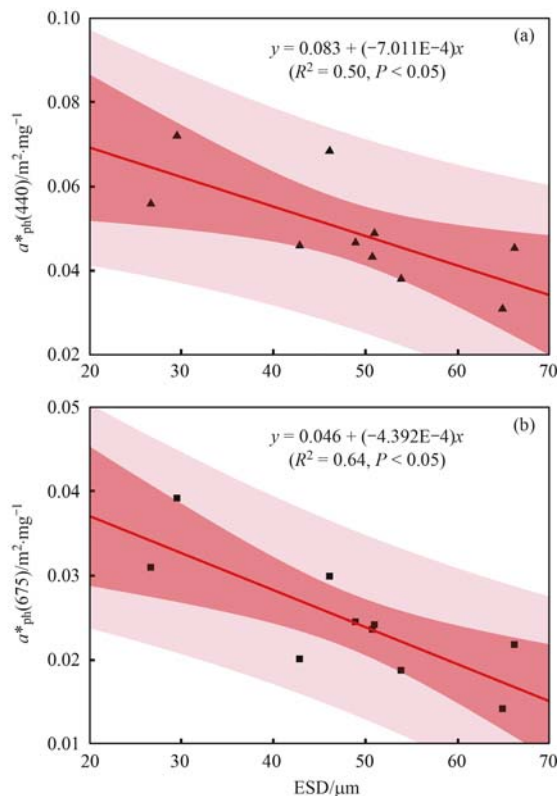


图 8 浮游植物比吸收系数和等效粒径的关系

Fig. 8 Relationships between specific absorption coefficients and equivalent sphere diameter

天目湖浮游植物比吸收系数具有冬春较大,夏秋偏小的特点,与浮游植物等效粒径冬春较小,夏秋

较大的变化趋势正好相反. 隐藻、小环藻和针杆藻等浮游植物全年占优势且等效粒径变化不大,因而对比吸收系数的季节变化影响较小. 春季硅藻大量繁殖,曲壳藻成为优势属之一,其等效粒径为 46.32 μm ,此外蓝隐藻也是优势属之一,其等效粒径仅为 5.68 μm ,因而春季的浮游植物比吸收系数偏大. 夏季,卵胞藻和多甲藻成为优势属,其等效粒径分别为 49.50 μm 和 365.89 μm ,导致与春季相比,夏季浮游植物比吸收系数较小. 秋季,天目湖优势属为丝藻和裸藻,其等效粒径分别为 16.08 μm 和 373.35 μm ,所以秋季浮游植物比吸收系数较夏季有所上升但仍旧偏小. 冬季以适宜低温生长的蓝隐藻和钟罩藻为优势属,其等效粒径分别为 10.95 μm 和 74.47 μm ,粒径较小,所以浮游植物比吸收系数受其影响继续增加直至与春季相当. 浮游植物群落季节演替,尤其是优势属的组成变化,其粒径大小是引起包裹效应的主要因素,进而影响天目湖浮游植物比吸收系数的变化.

上述分析表明,浮游植物群落组成的不同以及细胞大小的分布对浮游植物的吸收特性有着显著的影响. 表 3 整理了国内外典型湖泊的浮游植物吸收系数与比吸收系数,明显地,天目湖浮游植物吸收系数要远低于表中所列的 6 个湖泊,而浮游植物比吸收系数较高;与以往的研究一致,浮游植物吸收系数与叶绿素浓度存在较好的相关性,但是天目湖浮游植物比吸收系数与叶绿素 a 浓度相关性较弱,这与 Riddick 等^[16]在巴拉顿湖和 Yoshimura 等^[47]在卡西高罗湖的研究结果相似. 已有研究表明^[48~50],湖泊营养水平影响叶绿素 a 浓度和浮游植物比吸收系数进而改变二者之间的相关性,但巴拉顿湖、卡西高罗湖、太湖和滇池同为重富营养湖泊,而太湖、滇池其浮游植物比吸收系数与叶绿素 a 浓度却具有较好的相关性. Tomioka 等^[51]的研究发现光利用率是决定辅助色素和包裹效应的重要因素之一, Fujiki 等^[52]通过研究 6 种浮游植物在不同辐照度下比吸收和细胞大小的关系,发现弱光条件下,细胞大小对浮游植物比吸收的影响更稳健. 由于光照条件的影响因素复杂多样,如地理位置、天气状况、采样时间等,所以浮游植物比吸收系数与叶绿素 a 浓度之间的关系在不同湖泊中表现出巨大的差异性. 另外, Yentsch 等^[39]在查斯科姆湖的研究中发现,浮游植物群落与生物量没有明显的季节变化,与浮游植物吸收光谱的变化保持一致. Riddick 等^[16]的研究发现,浮游植物吸收系数 $a_{\text{ph}}(675)$ 与总生物量之间相关性较好 ($R^2 = 0.882$),并进一步地发现了蓝藻和隐藻的生物量之和与浮游吸收系

数同样呈指数正相关. 与天目湖相比,巴拉顿湖浮游植物生物量高且东西部湖区差距明显,差值大于 $4.5 \times 10^2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,浮游植物吸收系数随生物量的增加急剧增大,表明富营养湖泊浮游植物吸收系数受生物量影响更加明显. Zhang 等^[17]的研究结果表明,浮游植物吸收系数 $[a_{\text{ph}}(675)]$ 、比吸收

系数 $a_{\text{ph}}^*(675)$ 与细胞大小和叶绿素 a 浓度具有显著的相关性($R^2 = 0.99$, $R^2 = 0.99$). 浮游植物群落中个体藻类对吸收信号的贡献各不相同,因而不同浮游植物其吸收特性与细胞大小、叶绿素 a 浓度之间的拟合效果不同,这也是本研究中相关系数较低的原因.

表 3 6 个湖泊的生物光学参数¹⁾

Table 3 Bio-optical parameters of six different lakes

研究区	<i>n</i>	参数	平均值	范围	文献
太湖(中国)	192	$a_{\text{ph}}(440)/\text{m}^{-1}$	1.29 ± 1.03	0.12 ~ 4.78	[17]
		$a_{\text{ph}}(675)/\text{m}^{-1}$	0.77 ± 0.59	0.07 ~ 2.41	
		$a_{\text{ph}}^*(440)/\text{m}^2 \cdot \text{mg}^{-1}$	0.0266 ± 0.0158	0.010 ~ 0.090	
		$a_{\text{ph}}^*(675)/\text{m}^2 \cdot \text{mg}^{-1}$	0.0153 ± 0.0092	0.010 ~ 0.050	
滇池(中国)	25	$a_{\text{ph}}(440)/\text{m}^{-1}$	3.75 ± 1.12	1.67 ~ 5.57	[45]
		$a_{\text{ph}}(675)/\text{m}^{-1}$	2.01 ± 0.58	0.74 ~ 2.99	
		$a_{\text{ph}}^*(440)/\text{m}^2 \cdot \text{mg}^{-1}$	—	—	
		$a_{\text{ph}}^*(675)/\text{m}^2 \cdot \text{mg}^{-1}$	0.022 ± 0.006	0.012 ~ 0.035	
巴拉顿湖 (匈牙利)	38	$a_{\text{ph}}(440)/\text{m}^{-1}$	0.536	0.11 ~ 4.39	[16]
		$a_{\text{ph}}(675)/\text{m}^{-1}$	0.214	0.048 ~ 2.52	
		$a_{\text{ph}}^*(440)/\text{m}^2 \cdot \text{mg}^{-1}$	0.022	0.010 ~ 0.032	
		$a_{\text{ph}}^*(675)/\text{m}^2 \cdot \text{mg}^{-1}$	0.0099	0.0055 ~ 0.010	
查斯科姆湖 (阿根廷)	22	$a_{\text{ph}}(440)/\text{m}^{-1}$	5.44 ± 0.89	—	[46]
		$a_{\text{ph}}(675)/\text{m}^{-1}$	3.57 ± 0.85	—	
		$a_{\text{ph}}^*(440)/\text{m}^2 \cdot \text{mg}^{-1}$	0.036 ± 0.012	0.021 ~ 0.056	
		$a_{\text{ph}}^*(675)/\text{m}^2 \cdot \text{mg}^{-1}$	0.023 ± 0.005	0.16 ~ 0.032	
卡西高罗湖 (日本)	164	$a_{\text{ph}}(440)/\text{m}^{-1}$	1.97 ± 0.82	0.58 ~ 4.8	[47]
		$a_{\text{ph}}(675)/\text{m}^{-1}$	1.34 ± 0.60	0.41 ~ 3.39	
		$a_{\text{ph}}^*(440)/\text{m}^2 \cdot \text{mg}^{-1}$	0.026 ± 0.008	0.012 ~ 0.051	
		$a_{\text{ph}}^*(675)/\text{m}^2 \cdot \text{mg}^{-1}$	0.018 ± 0.005	0.006 ~ 0.029	

1) “—”表示文献中未说明该参数

3 结论

本研究基于浮游植物群落结构和吸收系数的鉴定和测定,探讨了群落结构演替对浮游植物比吸收系数的影响机制,创新性地提出了表征全部浮游植物的平均粒径大小的等效粒径概念. 本研究发现天目湖浮游植物生物量、丰度及优势属存在明显季节变化,春季优势属以小环藻、隐藻、针杆藻和曲壳藻为主,夏季优势属以隐藻、卵胞藻、多甲藻和衣藻为主,秋季优势属以隐藻、针杆藻、丝藻和小环藻为主,冬季优势属以隐藻、蓝隐藻、针杆藻和小环藻为主;随着群落结构发生变化,浮游植物等效粒径季节变化明显,呈现夏季 > 秋季 > 冬季 > 春季;吸收系数与叶绿素 a 浓度呈幂函数正相关关系,但比吸收系数与叶绿素 a 浓度具有较弱的显著负相关,表明随着藻类生物量增加,色素包裹效应增加,比吸收系数下降;浮游植物比吸收系数与等效粒径存在显著线性负相关,随等效粒径的增大而减小. 隐藻、小环藻和针杆藻等全年优势属对比吸收系数的影响较小,

曲壳藻、卵胞藻、多甲藻、丝藻、裸藻和钟罩藻等优势属的季节更替引起的等效粒径的变化,是影响浮游植物比吸收系数变化的重要因素.

致谢:周万平帮助鉴定浮游植物群落,邓建明帮助计算等效粒径,在此一并表示感谢.

参考文献:

[1] 胡韧, 蓝于倩, 肖利娟, 等. 淡水浮游植物功能群的概念、划分方法和应用[J]. 湖泊科学, 2015, 27(1): 11-23.
Hu R, Lan Y Q, Xiao L J, et al. The concepts, classification and application of freshwater phytoplankton functional groups [J]. Journal of Lake Sciences, 2015, 27(1): 11-23.

[2] Guidi L, Stemann L, Jackson G A, et al. Effects of phytoplankton community on production, size, and export of large aggregates: a world-ocean analysis [J]. Limnology and Oceanography, 2009, 54(6): 1951-1963.

[3] Maraón E, Holligan P M, Barciela P, et al. Patterns of phytoplankton size structure and productivity in contrasting open-ocean environments[J]. Marine Ecology Progress Series, 2001, 216: 43-56.

[4] Mouw C B, Yoder J A, Doney S C. Impact of phytoplankton community size on a linked global ocean optical and ecosystem model[J]. Journal of Marine Systems, 2012, 89(1): 61-75.

[5] Bissett W P, Schofield O, Glenn S, et al. Resolving the impacts

- and feedback of ocean optics on upper ocean ecology [J]. *Oceanography*, 2001, **14**(3): 30-53.
- [6] Morel A, Antoine D. Heating rate within the upper ocean in relation to its bio-optical state [J]. *Journal of Physical Oceanography*, 1994, **24**(7): 1652-1665.
- [7] Nakamoto S, Kumar S P, Oberhuber J M, *et al.* Chlorophyll modulation of sea surface temperature in the Arabian Sea in a mixed-layer isopycnal general circulation model[J]. *Geophysical Research Letters*, 2000, **27**(6): 747-750.
- [8] Bidigare R R, Prézelin B B, Smith R C. Bio-optical models and the problems of scaling[A]. In: Falkowski P G, Woodhead A D, Vivotto K (Eds.). *Primary Productivity and Biogeochemical Cycles in the Sea*[M]. Boston: Springer, 1992. 175-212.
- [9] Morel A, Antoine D, Babin M, *et al.* Measured and modeled primary production in the northeast Atlantic (EUMELI JGOFS program): The impact of natural variations in photosynthetic parameters on model predictive skill[J]. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 1996, **43**(8): 1273-1304.
- [10] O'Reilly J E, Maritorena S, Mitchell B G, *et al.* Ocean color chlorophyll algorithms for SeaWiFS[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1998, **103**(C11): 24937-24953.
- [11] Hirata T, Aiken J, Hardman-Mountford N, *et al.* An absorption model to determine phytoplankton size classes from satellite ocean colour[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2008, **112**(6): 3153-3159.
- [12] Wu G F, Cui L J, He J J, *et al.* Comparison of MODIS-based models for retrieving suspended particulate matter concentrations in Poyang Lake, China [J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2013, **24**: 63-67.
- [13] 王桂芬, 曹文熙, 周雯, 等. 基于南海北部海区浮游植物吸收光谱斜率变化的粒径结构反演[J]. *热带海洋学报*, 2010, **29**(2): 25-32.
- Wang G F, Cao W X, Zhou W, *et al.* Retrieval of phytoplankton size structure based on the spectral slope of phytoplankton absorption in the northern South China Sea [J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2010, **29**(2): 25-32.
- [14] Li L H, Li L, Song K S, *et al.* An inversion model for deriving inherent optical properties of inland waters: establishment, validation and application[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2013, **135**: 150-166.
- [15] Naik P, D'Sa E J, Gomes H D R, *et al.* Light absorption properties of southeastern Bering Sea waters: analysis, parameterization and implications for remote sensing[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2013, **134**: 120-134.
- [16] Riddick C A L, Hunter P D, Tyler A N, *et al.* Spatial variability of absorption coefficients over a biogeochemical gradient in a large and optically complex shallow lake[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2015, **120**(10): 7040-7066.
- [17] Zhang Y L, Yin Y, Wang M Z, *et al.* Effect of phytoplankton community composition and cell size on absorption properties in eutrophic shallow lakes: field and experimental evidence[J]. *Optics Express*, 2012, **20**(11): 11882-11898.
- [18] Lohrenz S E, Weidemann A D, Tuel M. Phytoplankton spectral absorption as influenced by community size structure and pigment composition[J]. *Journal of Plankton Research*, 2003, **25**(1): 35-61.
- [19] Ciotti A M, Lewis M R, Cullen J J. Assessment of the relationships between dominant cell size in natural phytoplankton communities and the spectral shape of the absorption coefficient [J]. *Limnology and Oceanography*, 2002, **47**(2): 404-417.
- [20] Stuart V, Sathyendranath S, Platt T, *et al.* Pigments and species composition of natural phytoplankton populations: effect on the absorption spectra[J]. *Journal of Plankton Research*, 1998, **20**(2): 187-217.
- [21] Bricaud A, Claustre H, Ras J, *et al.* Natural variability of phytoplanktonic absorption in oceanic waters: influence of the size structure of algal populations[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2004, **109**(C11), doi: 10.1029/2004JC002419.
- [22] 王桂芬, 曹文熙, 许大志, 等. 南海北部藻类粒径结构及色素成分对浮游植物吸收系数的影响[J]. *海洋学报*, 2007, **29**(1): 38-48.
- Wang G F, Cao W X, Xu D Z, *et al.* Effects of size structure and pigment composition of algal population on phytoplankton absorption coefficients in the South China Sea [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2007, **29**(1): 38-48.
- [23] 刘洋洋, 沈芳, 李秀珍. 长江口邻近海域赤潮水体浮游植物光吸收特性分析[J]. *环境科学*, 2015, **36**(6): 2019-2027.
- Liu Y Y, Shen F, Li X Z. Phytoplankton Light absorption properties during the blooms in adjacent waters of the Changjiang estuary[J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(6): 2019-2027.
- [24] Agustí S. Light environment within dense algal populations: cell size influences on self-shading [J]. *Journal of Plankton Research*, 1991, **13**(4): 863-871.
- [25] 孙祥, 朱广伟, 杨文斌, 等. 天目湖沙水库浮游植物群落结构的时空异质性[J]. *环境科学*, 2017, **38**(10): 4160-4168.
- Sun X, Zhu G W, Yang W B, *et al.* Spatio-temporal variations in phytoplankton community in Shahe Reservoir, Tianmuhu, China[J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(10): 4160-4168.
- [26] 伊平, 张磊, 包健. 天目湖流域农业面源污染控制研究[J]. *污染防治技术*, 2008, **21**(6): 38-40, 43.
- Yi P, Zhang L, Bao J. Study on controlling of the agricultural non-point source pollution in the Tianmu Lake Valley [J]. *Pollution Control Technology*, 2008, **21**(6): 38-40, 43.
- [27] 朱广伟, 陈伟民, 李恒鹏, 等. 天目湖沙水库水质对流域开发与保护的响应[J]. *湖泊科学*, 2013, **25**(6): 809-817.
- Zhu G W, Chen W M, Li H P, *et al.* Response of water quality to the catchment development and protection in Tianmuhu Reservoir, China[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2013, **25**(6): 809-817.
- [28] 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.
- [29] 胡鸿钧. 水华蓝藻生物学[M]. 北京: 科学出版社, 2011.
- Hu H J. *The biology of water-blooms blue-green algae* [M]. Beijing: Science Press, 2011.
- [30] 孙军, 刘东艳, 钱树本. 浮游植物生物量研究 I. 浮游植物生物量细胞体积转化法[J]. *海洋学报*, 1999, **21**(2): 75-85.
- [31] 章宗涉, 黄祥飞. 淡水浮游生物研究方法[M]. 北京: 科学出版社, 1991.
- [32] Austin M P. Relationships among functional properties of Californian grassland[J]. *Nature*, 1968, **217**(5134), doi: 10.1038/216168b0.
- [33] Yentsch C S. Measurement of visible light absorption by particulate matter in the ocean [J]. *Limnology and Oceanography*, 1962, **7**(2): 207-217.
- [34] Tassan S, Ferrari G M. An alternative approach to absorption measurements of aquatic particles retained on filters [J]. *Limnology and Oceanography*, 1995, **40**(8): 1358-1368.
- [35] Cleveland J S, Weidemann A D. Quantifying absorption by

- aquatic particles: A multiple scattering correction for glass-fiber filters[J]. *Limnology and Oceanography*, 1993, **38**(6): 1321-1327.
- [36] Parsons T R, Maita Y, Lalli C M. A manual of chemical and biological methods for seawater analysis[M]. Oxford: Pergamon Press, 1984.
- [37] 朱广伟, 金颖薇, 任杰, 等. 太湖流域水库型水源地硅藻水华发生特征及对策分析[J]. *湖泊科学*, 2016, **28**(1): 9-21. Zhu G W, Jin Y W, Ren J, *et al.* Characteristics of diatom blooms in a reservoir-water supply area and the countermeasures in Taihu Basin, China[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2016, **28**(1): 9-21.
- [38] 周百成, 郑舜琴, 曾呈奎. 几种绿藻、褐藻和红藻的吸收光谱的比较研究[J]. *植物学报*, 1974, **16**(2): 146-155.
- [39] Yentsch C S, Phinney D A. A bridge between ocean optics and microbial ecology[J]. *Limnology and Oceanography*, 1989, **34**(8): 1694-1705.
- [40] 张运林, 秦伯强, 杨龙元. 太湖梅梁湾水体悬浮颗粒物 and CDOM 的吸收特性[J]. *生态学报*, 2006, **26**(12): 3969-3979. Zhang Y L, Qin B Q, Yang L Y. Spectral absorption coefficients of particulate matter and chromophoric dissolved organic matter in Meiliang Bay of Lake Taihu[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, **26**(12): 3969-3979.
- [41] 周雯, 曹文熙, 李彩, 等. 由吸收系数和粒度分布计算浮游植物的散射光谱特征[J]. *光学学报*, 2008, **28**(8): 1429-1433. Zhou W, Cao W X, Li C, *et al.* Spectral scattering property of phytoplankton calculated by absorption coefficient and size distribution[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(8): 1429-1433.
- [42] 周雯, 孙兆华, 曹文熙, 等. 浮游植物的吸收-衰减特性及其与粒径间的关系[J]. *光谱学与光谱分析*, 2012, **32**(12): 3347-3352. Zhou W, Sun Z H, Cao W X, *et al.* Variations in the optical absorption and attenuation properties of cultured phytoplankton and their relationships with cell size[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2012, **32**(12): 3347-3352.
- [43] Duyens L N M. The flattening of the absorption spectrum of suspensions, as compared to that of solutions[J]. *Biochimica et Biophysica Acta*, 1956, **19**: 1-12.
- [44] Morel A, Bricaud A. Theoretical results concerning light absorption in a discrete medium, and application to specific absorption of phytoplankton[J]. *Deep Sea Research Part A. Oceanographic Research Papers*, 1981, **28**(11): 1375-1393.
- [45] Shi K, Li Y M, Li L, *et al.* Absorption characteristics of optically complex inland waters: Implications for water optical classification [J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2013, **118**(2): 860-874.
- [46] Pérez G L, Llamas M E, Lagomarsino L, *et al.* Seasonal variability of optical properties in a highly turbid lake (Laguna Chascomús, Argentina) [J]. *Photochemistry and Photobiology*, 2011, **87**(3): 659-670.
- [47] Yoshimura K, Zaitzu N, Sekimura Y, *et al.* Parameterization of chlorophyll *a*-specific absorption coefficients and effects of their variations in a highly eutrophic lake: a case study at Lake Kasumigaura, Japan[J]. *Hydrobiologia*, 2012, **691**(1): 157-159.
- [48] Agawin N S-R, Duarte C M, Agustí S. Nutrient and temperature control of the contribution of picoplankton to phytoplankton biomass and production [J]. *Limnology and Oceanography*, 2000, **45**(3): 591-600.
- [49] Raven J A. Physiological consequences of extremely small size for autotrophic organisms in the sea [J]. *Canadian Bulletin of Fisheries and Aquatic Sciences*, 1986, **214**: 1-70.
- [50] Cao W X, Yang Y Z, Xu X Q, *et al.* Regional patterns of particulate spectral absorption in the Pearl River estuary [J]. *Science Bulletin*, 2003, **48**(21): 2344-2351.
- [51] Tomioka N, Imai A, Komatsu K. Effect of light availability on *Microcystis aeruginosa* blooms in shallow hypereutrophic Lake Kasumigaura[J]. *Journal of Plankton Research*, 2011, **33**(8): 1263-1273.
- [52] Fujiki T, Taguchi S. Variability in chlorophyll *a* specific absorption coefficient in marine phytoplankton as a function of cell size and irradiance [J]. *Journal of Plankton Research*, 2002, **24**(9): 859-874.

CONTENTS

Health Impact Attributable to the Control of PM _{2.5} Pollution in China During 2013-2017	ZHANG Meng-jiao, SU Fang-cheng, XU Qi-xiang, <i>et al.</i> (513)
Contributions of Emissions Reduction and Regional Meteorological Conditions to Air Quality Improvement	WU Wen-qi, ZHANG Kai-shan (523)
Air Pollution Characteristics and Quantitative Evaluation of Multi-scale Transport in the Beijing-Tianjin-Hebei Region in January, 2016	YAO Sen, ZHANG Han-yu, WANG Xiao-qi, <i>et al.</i> (534)
Influence of Burning Fireworks on the Atmosphere During the Spring Festival in Guangzhou in 2020	PEI Cheng-lei, WANG Yu-jun, BI Yan-ru, <i>et al.</i> (546)
Source Apportionment and Optical Properties of Fine Particles Associated with Regional Pollution in the Yangtze River Delta	XIA Li, ZHU Bin, WANG Hong-lei, <i>et al.</i> (556)
Distribution Characteristics and Source Analysis of Water-soluble Ions in Particulate Matter Under Different Weather Processes in Nanjing	ZHANG Yang, WANG Hong-lei, LIU An-kang, <i>et al.</i> (564)
Size Distribution of Aerosol Hygroscopic Growth Factors in Winter in Tianjin	DING Jing, ZHANG Yu-fen, ZHENG Nai-yuan, <i>et al.</i> (574)
Time-Determination and Contribution Analysis of Transport, Retention, and Offshore Backflow to Long-Term Sand-Dust Coupling	ZHANG Zhe, QIAO Li-ping, ZHOU Min, <i>et al.</i> (584)
Characterization, Sources, and Health Risks of PM _{2.5} -bound PAHs During Autumn and Winter in Luoyang City	QI Jing-wen, ZHANG Rui-qin, JIANG Nan, <i>et al.</i> (595)
Characteristics, Meteorological Influences, and Transport Source of Ozone Pollution in Zhengzhou City	WANG Xu-dong, YIN Sha-sha, YANG Jian, <i>et al.</i> (604)
Nonlinear Response Characteristics and Control Scheme for Ozone and Its Precursors Based on Orthogonal Experimental Methods	LI Guang-yao, CHEN Qiang, GUO Wen-kai, <i>et al.</i> (616)
Characteristics and Source Apportionment of Volatile Organic Compounds (VOCs) in the Automobile Industrial Park of Shanghai	YE Lu, TAI Qing-qing, YU Hua-ming (624)
Establishment of a High-resolution Anthropogenic Emission Inventory and Its Evaluation Using the WRF-Chem Model for Lanzhou	GUO Wen-kai, LI Guang-yao, CHEN Bing, <i>et al.</i> (634)
Trends in Vehicle Emissions in Sichuan Province, 2010-2017	LI Yuan, SHI Jia-cheng, CHEN Jun-hui, <i>et al.</i> (643)
Bioavailability and Ecological Risk Assessment of Cadmium in the Sea-Land Interaction Sediments of the Pearl River Delta	WANG Fang-ting, BAO Ke, CHEN Zhi-hua, <i>et al.</i> (653)
Distribution, Sources, and Ecological Risks of Polyfluoroalkyl Substances in the Surface Water of the Wuliangsuhai Watershed	SHI Rui, MAO Ruo-yu, ZHANG Meng, <i>et al.</i> (663)
Distribution Characteristics of Microplastics in Ice Sheets and Its Response to Salinity and Chlorophyll a in the Lake Wuliangsuhai	WANG Zhi-chao, YANG Jian-lin, YANG Fan, <i>et al.</i> (673)
Effect of Check Dam on Phosphorus Transport and Retention in the Qingshui River, in Zhangjiakou City	WANG Wei, LI Xu-yong (681)
Characteristics of Phosphorus Speciation and Genesis in Typical Tributaries of the Three Gorges Reservoir	YANG Fan, WANG Li-jing, JI Dao-bin, <i>et al.</i> (688)
Distribution of Nitrogen and Phosphorus in Lake Chaohu Sediments and Pollution Evaluation	WANG Yan-ping, XU Wei-wei, HAN Chao, <i>et al.</i> (699)
Sediment Pollution Characteristics and Dredging in the Nanfei River Estuary, Chaohu Lake	YANG Pan, YANG Chun-hui, MA Xin-yu, <i>et al.</i> (712)
Effect of Oxidation Strengthening on In-situ Phosphorus Immobilization of Calcium Hydroxide	XU Chu-tian, LI Da-peng, YUE Wei, <i>et al.</i> (723)
Impact of Rainfall-Runoff Events on Methane Emission from Xiangxi Bay of the Three Gorges Reservoir	CHEN Min, XU Hao-ting, WANG Xue-zhu, <i>et al.</i> (732)
Water-air Carbon Dioxide Exchange and Nutritional Controls in a Typical Karst River	LIU Rui, ZHANG Jin, CHEN Zu-sheng, <i>et al.</i> (740)
Occurrence of Antibiotics and Antibiotic Resistance Genes in Representative Drinking Water Resources in Jiangsu Province	WANG Long-fei, CHENG Yi-qun, HU Xiao-dong, <i>et al.</i> (749)
Diversity and Abundance of Antibiotic Resistance Genes in Tailings Ponds	HUANG Fu-yi, ZHU Yong-guan, SU Jian-qiang (761)
Hydrochemical Characteristics and Origin of Groundwater in the Central Guohe River Basin	ZHENG Tao, JIAO Tuan-li, HU Bo, <i>et al.</i> (766)
Hydrochemical Characteristics and Analysis of the Qilihai Wetland, Tianjin	HE Ming-xia, ZHANG Bing, XIA Wen-xue, <i>et al.</i> (776)
Effects of Straw Mulching and Nitrogen Reduction on the Distribution of Soil Nitrogen and Groundwater Nitrogen Pollution	ZHANG Wan-feng, YANG Shu-qing, SUN Duo-qiang, <i>et al.</i> (786)
Precision of eDNA Metabarcoding Technology for Biodiversity Monitoring of Eukaryotic Phytoplankton in Lakes	ZHANG Li-juan, XU Shan, ZHAO Zheng, <i>et al.</i> (796)
Effect of Phytoplankton Community Composition and Size Structure on Light Absorption Properties	HUANG Xin, SHI Kun, ZHANG Yun-lin, <i>et al.</i> (808)
Periphytic Algae Community Structure and Its Relation to Environment Factors in the Main Stream of the Songhua River from 2014 to 2019	YU Zong-ling, CHEN Wei, ZHAO Ran, <i>et al.</i> (819)
Diversity and Function Prediction of Bacterioplankton Under Human Disturbance in the Main Stream of the Laoguan River Before and After the Flood Season	HAN Xue-mei, GONG Zi-le, YANG Xiao-ming, <i>et al.</i> (831)
Seasonal Removal Efficiency and Degradation Products of Two Typical PPCPs in Subsurface Flow Constructed Wetlands	LI Chao-yu, YANG Yi-xiao, ZHANG Ning, <i>et al.</i> (842)
Removal of Antibiotics and Antibiotic Resistance Genes from Urban Rivers Using Artificial Ecosystems	ZHOU Hai-dong, HUANG Li-ping, CHEN Xiao-meng, <i>et al.</i> (850)
Distribution Characteristics of Viruses Microorganisms in a Water Supply System with Combined Ultraviolet Chloramine Disinfection	HAN Xue, SUN Jian-wei, ZHANG Li, <i>et al.</i> (860)
Removal of Oxytetracycline from Water Using Blast Furnace Slag Loaded Sulfide Nanoscale Zero-valent Iron	SUN Qiu-nan, ZHANG Rong-bin, DENG Man-jun, <i>et al.</i> (867)
Heavy Metal Ion Adsorption Properties and Stability of Amine-sulfur Modified Biochar in Aqueous Solution	WANG Cun-shi, HE Min-xia, ZHOU Feng, <i>et al.</i> (874)
Characteristics and Removal Mechanism of an Electro-Hybrid Ozonation-Coagulation System in the Treatment of Organic Matters	XIE Xin-yue, XU Jian-jun, ZHANG Shao-hua, <i>et al.</i> (883)
Enhancement Effects and Mechanisms of Microscale Zero Valent Iron on the Performance of Anaerobic Co-digestion of Waste Activated Sludge and Food Waste	CHEN Sheng-jie, YAO Fu-bing, PI Zhou-jie, <i>et al.</i> (891)
Spatial Distribution and Risk Assessment of Heavy Metal Pollution in Farmland Soils Surrounding a Typical Industrial Area of Henan Province	MENG Xiao-fei, GUO Jun-mei, YANG Jun-xing, <i>et al.</i> (900)
Distribution Characteristics and Pollution Evaluation of Heavy Metals in Greenbelt Soils of Nanjing City	CHEN Jia-lin, LI Ren-ying, XIE Xiao-jin, <i>et al.</i> (909)
Remediation Effect of Compound Modifier FZB on Arsenic and Cadmium Contaminated Soil	DING Ping, HE Yu-long, HE Huan, <i>et al.</i> (917)
Remediation of Cd Contaminated Acidic Rice Fields Using the Combined Application of Lime and Organic Matter	LI Guang-hui, CHENG Qing, CHEN Hong (925)
Effect and Mechanism of Foliar Application Nano-MnO ₂ on Cadmium Enrichment of Rice	ZHOU Yi-min, HUANG Ya-yuan, LIU Xiao-yue, <i>et al.</i> (932)
Characteristics of Cadmium Enrichment and Pollution Evaluation of a Soil-Crop System in a Typical Karst Area	WANG Rui, DENG Hai, JIA Zhong-min, <i>et al.</i> (941)
Comparison of Enrichment and Transport of Cadmium in the Fruit of High and Low Enrichment Pepper Varieties and Its Distribution in Subcells	SHAO Xiao-qing, HE Zhang-mi, XU Wei-hong (952)
Cadmium Accumulation Characteristics of Four Herbs	CHEN Di, LI Bo-qun, YANG Yong-ping, <i>et al.</i> (960)
Characteristics of Dissolved Organic Carbon Loss in Purple Soil Sloping Fields with Different Fertilization Treatments	XIONG Zi-yi, ZHENG Jie-bing, WANG Dan, <i>et al.</i> (967)
Effects of Precipitation Changes on Plant Community Diversity and Soil C:N:P Ecological Stoichiometric Characteristics in a Desert Steppe of China	GAO Jiang-ping, ZHAO Rui-feng, ZHANG Li-hua, <i>et al.</i> (977)
Effect of Water Management on Rice Growth and Rhizosphere Priming Effect in Paddy Soils	LIN Sen, XIAO Mou-liang, JIANG Jia-bin, <i>et al.</i> (988)
Effects of Copper Pollution on Microbial Communities in Wheat Root Systems	GE Yi, XU Min-min, XU Shao-hui, <i>et al.</i> (996)
Ozone Pollution, Nitrogen Addition, and Drought Stress Interact to Affect Non-structural Carbohydrates in the Leaves and Fine Roots of Poplar	LI Pin, ZHOU Hui-min, FENG Zhao-zhong (1004)
Review of Screening and Applications of Organic Tracers in Fine Particulate Matter	LI Yuan-ju, WU Ai-hua, TONG Meng-xue, <i>et al.</i> (1013)