

DOI: 10.5846/stxb201909292048

李兆喜, 高扬, 陆瑶, 贾琚杰, 王朔月, 马明真, 温学发. 鄱阳湖流域多尺度碳、硅输送特征及其对浮游植物分布的影响. 生态学报, 2020, 40(19): 7073-7083.

Li Z X, Gao Y, Lu Y, Jia J J, Wang S Y, Ma M Z, Wen X F. Characteristics of carbon and silicon transport at multiscale in the Poyang Lake watershed and its impacts on the distribution of phytoplankton. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(19): 7073-7083.

鄱阳湖流域多尺度碳、硅输送特征及其对浮游植物分布的影响

李兆喜^{1,2}, 高扬^{1,2,*}, 陆瑶^{1,2}, 贾琚杰^{1,2}, 王朔月^{1,2}, 马明真^{1,2}, 温学发^{1,2}

1 中国科学院地理科学与资源研究所, 生态网络观测与模拟重点实验室, 北京 100101

2 中国科学院大学资源与环境学院, 北京 100049

摘要: 选取鄱阳湖流域内从初级支流到最大干流再到湖区(香溪→架竹河→赣江→鄱阳湖)这一联通水系线路为研究对象, 通过对该流域多尺度碳、硅输送进行监测, 并对其浮游植物群落分布进行研究, 揭示鄱阳湖流域多尺度碳、硅输送对浮游植物分布的影响。结果表明: (1) 鄱阳湖通江流域的碳、硅浓度与碳硅比呈明显空间变化。香溪流域和鄱阳湖湖区溶解态硅(DSi)浓度显著低于架竹河流域和赣江流域, 而溶解性总碳(DTC)和溶解性有机碳(DOC)浓度变化则与之相反; 碳硅比随流域尺度的扩大呈现先下降后上升的趋势, 西鄱湖高于东鄱湖, 冬季高于其他季节。(2) 碳、硅对浮游植物分布特征的影响随着流域尺度的变化而变化。架竹河流域浮游植物主要受碳影响, 且硅藻对溶解性无机碳(DIC)浓度变化最敏感, 赣江流域, 硅成为影响浮游植物分布的主要因子, 进入鄱阳湖湖区后, 硅对浮游植物分布的影响减弱; DIC虽然不是鄱阳湖流域浮游植物生长的限制性因子, 但可通过影响水体pH值间接影响浮游植物群落结构。(3) 浮游植物密度随着流域面积的扩大而成倍增加, 鄱阳湖湖区浮游植物密度约为架竹河流域的11倍, 湖区生态环境及水体污染问题不容忽视。

关键词: 鄱阳湖流域; 通江湖泊; 浮游植物; 碳、硅输送; 碳硅比

Characteristics of carbon and silicon transport at multiscale in the Poyang Lake watershed and its impacts on the distribution of phytoplankton

LI Zhaoxi^{1,2}, GAO Yang^{1,2,*}, LU Yao^{1,2}, JIA Junjie^{1,2}, WANG Shuoyue^{1,2}, MA Mingzhen^{1,2}, WEN Xuefa^{1,2}

1 Key Laboratory of Ecosystem Network Observation and Modeling, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

2 College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: The multiscale waterflow watershed system which were from the primary tributary to the mainstream in the Poyang Lake, and then entering into the lake area (Xiangxi River→Jiazhu River→Gangjiang River→Pangyang Lake), was selected as the study site. By monitoring the carbon and silicon transportation at multiscale in the Poyang Lake watershed, we aim to understand the relationship between the distribution of phytoplankton community and the carbon and silicon transport at multiscale in Poyang Lake. The results showed that C, Si, and C/Si ratio of the Poyang Lake watershed exhibited spatial changes. The concentrations of dissolved silicon (DSi) in the Xiangxi River and Poyang Lake basins were significantly lower than those in the Jiazhu River and the Ganjiang River, while the dissolved total carbon (DTC) and dissolved organic carbon (DOC) concentrations showed opposite results. The trend of C/Si ratio with seasonal change

基金项目: 国家自然科学基金项目(41871080, 41922003)

收稿日期: 2019-09-29; 网络出版日期: 2020-07-31

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: gaoyang@igsrr.ac.cn

showed the decreasing and then increasing, wherein the west Poyang Lake were higher than the east. The DTC and DOC concentrations in winter were higher than those in other seasons. The effects of C and Si on the distribution characteristics of phytoplankton depended on watershed scale. The phytoplankton in the Jiazhu River was mainly affected by C, and the diatoms were most sensitive to the change of dissolved inorganic carbon (DIC) concentration. While in the Ganjiang River basin, Si was the main factor affecting the distribution of phytoplankton. After flowing into the Poyang Lake, the influence of Si on the distribution of phytoplankton became small. Overall, the DIC was not the limiting factor for phytoplankton growth in Poyang Lake watershed, but it could indirectly affect phytoplankton community structure by influencing the pH of water. The density of phytoplankton increased exponentially with the increase of the watershed scale. The density of phytoplankton in the Poyang Lake was about 11 times than that of the Jiazhu River, so the ecological environment and water pollution problems for the lake cannot be ignored.

Key Words: Poyang Lake watershed; lakes that linking to the river; phytoplankton; C, Si transport; C/Si ratio

浮游植物作为水体中主要的初级生产者之一,在驱动水生生态系统物质循环和能量流动的过程中起着关键作用,同时在维持水域生态系统平衡扮演重要角色^[1],其群落结构主要受环境条件直接或间接的影响^[2]。碳和硅作为自然水域中重要的生源要素,对浮游植物的生长具有不可代替的作用^[3],浮游植物的群落结构在生长发育的过程中,既需要固定碳合成自身有机质,又要吸收 DSi 来构建硅质外壳^[4]。

在研究 C 对浮游植物生长的影响时,由于淡水生态系统中 C 浓度往往高于浮游植物的生长阈值,关于其对浮游植物生长的限制作用尚未被充分关注^[5]。然而,Hitchcock^[6]等通过研究河口流域浮游植物对 DOC 添加的响应,发现 DOC 环境浓度会对浮游植物群落产生限制作用;Singh^[7]的研究表明,大气二氧化碳浓度上升对水体 DIC 的影响将显著提高大多数蓝绿藻的生物量,其中双星藻属生物量实验组比对照组提高了 1.9—38 倍。浮游植物在海洋与淡水中受 DSi 的限制作用不同,如渤海、黄海海域中浮游植物受 DSi 浓度限制是区域性的^[8],其中黄海胶州湾地区 DSi 浓度就是浮游植物生长的主要限制因子,其阈值为 1.42—0.36 $\mu\text{mol/L}$ ^[9];而在淡水湖泊中,DSi 对浮游植物生长的限制作用并不明显,如太湖地区 DSi 浓度约为 0.5 mg/L 左右,高于浮游植物生长的 DSi 浓度阈值 0.12 mg/L^[10]。

鄱阳湖位于长江中下游,是中国第一大淡水湖,在调洪蓄水、改善气候、维持生态平衡等方面都有重要作用^[11]。但近年来,由于受人类活动的影响,鄱阳湖流域营养盐浓度升高^[12],水体富营养化状态加重,必将引起浮游植物群落结构的改变。目前,鄱阳湖地区关于营养元素对浮游植物群落结构的影响研究主要集中于 N、P 营养盐,陈格君^[13]、胡春华^[14]认为鄱阳湖地区氮磷质量比高于 Redfield 值 16:1 转化而来的质量比 7.2:1,说明该地区 P 才是藻类生长的限制因子;而程新等^[15]通过对鄱阳湖水体中藻类丰度与环境因子之间的关系进行研究,发现 NH_4^+-N 与藻类丰度的相关系数高达 -0.730 ($P < 0.01$),说明 N 才是调节鄱阳湖水体中藻类丰度季节性变化的最主要营养盐因子。而碳和硅作为浮游生物生长发育所必需的营养元素,其对浮游植物分布影响的研究尚不多见,在水体无机碳浓度升高的背景下,水华磷限制的作用有所减弱,藻类之间的竞争不再局限于传统的氮磷资源型竞争^[5]。C 和 Si 对浮游植物群落结构的影响应得到重视,二者作为传统浮游植物生长要素,反映在不同种类的浮游植物上效应并不相同,这种差异性将会改变浮游植物的竞争优势进而影响浮游植物的群落结构。在鄱阳湖流域富营养化日趋严峻的大背景下,研究浮游植物群落结构对流域碳硅浓度变化的响应有着重要意义。

本研究选取鄱阳湖流域内从初级支流到最大干流再到湖区这一水系路线为研究对象,通过监测多尺度流域 DSi、DTC、DIC 以及 DOC 的浓度,探讨流域水体 C、Si 元素浓度变化特征,结合浮游植物密度,探究 C、Si 元素浓度变化对浮游植物分布特征的影响,进而揭示 C、Si 元素对湖泊富营养化的贡献,以为鄱阳湖水体富营养化的防治提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

鄱阳湖流域位于长江中下游,流域面积 16.2 万 km²[16]。占长江流域面积的 9%,其中江西省境内面积为 157086 hm²,占江西全省面积的 94%。该流域由丘陵山地、河流水系和大型湖泊三大要素构成独立完整的流域自然地理单元,流域系统由赣、抚、信、饶、修五河流域与鄱阳湖所组成。气候类型属于亚热带季风气候,年均气温为 17.5℃,多年平均降水量为 1635.90 mm,年内降雨分布不均,流域内大多数地区 4—6 月降雨量占全年的 45%—50% [17]。

本研究选取鄱阳湖湖区(图 1a)、鄱阳湖最大支流赣江的中下游(图 1b)、赣江的二级支流架竹河(图 1c)以及初级支流香溪(图 1d)共四个不同尺度的区域。其中,鄱阳湖是长江中游通江季节性湖泊[18],水位变化显著[19],整体上,鄱阳湖遵循枯(12 月—次年 3 月)、涨(4—5 月)、丰(6—9 月)、退(10—11 月)的水文节律[20]。赣江是鄱阳湖流域第一大河,流域范围涉及赣州、吉安、宜春等多个市县,面积为 83500 km²,年径流量占鄱阳湖水系的 45.87% [21]。架竹河为赣江的二级支流,位于吉安市泰和县境内,全长 20.98 km,流域面积为 121.61 km²。香溪为架竹河流域的初级支流,位于泰和县中国科学院千烟州红壤丘陵综合开发试验区区域内(115°04'13"E,26°44'48"N),河流全长 2.08 km,流域面积为 0.98 km²。

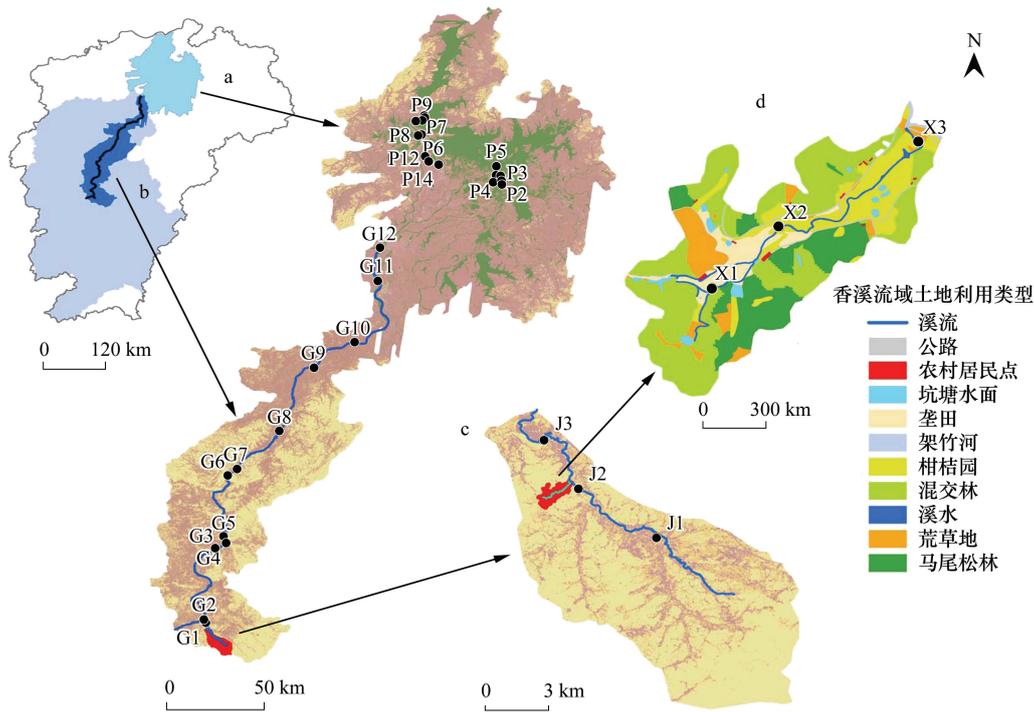


图 1 流域采样点(香溪:X1—X3;架竹河:J1—J3;赣江:G1—G12;鄱阳湖湖区:P1—P15)分布示意图

Fig.1 Distribution of sampling points (Xiangxi River: X1—X3; Jiashu River: J1—J3; Gan River: G1—G12; Poyang Lake: P1—P15)

1.2 采样方法

根据各级流域的地理位置、水文特征、土地利用及采样条件等因素在 4 个研究区域内共布设 33 个采样点。其中,鄱阳湖的东鄱湖和西鄱湖分别布设 6 个采样点和 9 个采样点,沿赣江中下游布设 12 个采样点,在架竹河以及香溪按上、中、下游分别沿河布设 3 个采样点。于 2018 年 5 月、2018 年 7 月、2018 年 9 月和 2018 年 12 月共进行 4 次采样活动。4 次采样共采集到 120 个样品,其中水样的采样方法为人工采取河流及湖水表层 0—40 cm 的水样 100 mL 于聚乙烯塑料瓶中,样品采集后放置于 4℃ 培养箱中冷藏保存,并送至中国科学院

地理科学与资源研究所进行试验分析。在香溪流域和架竹河流域出水口处均设置有 ISOC6710 水沙自动采样装置实时监测获取水位及径流量数据,赣江流域径流量数据来自外洲水文控制站点的观测资料。浮游植物的采样方法为人工采取河流及湖水表层 0—50 cm 的水样 1 L 于聚乙烯塑料瓶中,加入 15 mL 鲁哥试剂固定。静置 48 h 后,用虹吸法吸去上层清液,将样品浓缩至 100 mL 并加入 1 mL 甲醛保存^[22]。

1.3 样品分析

取适量水样分别过直径 0.45 μm 有机微孔滤膜(经过 80 $^{\circ}\text{C}$ 水浴 12 h 处理),以及通过国家标准碱性过硫酸钾的消解方法处理 4 $^{\circ}\text{C}$ 冷藏保存,其中 DSi 利用全自动化分析仪(Smartchem 200)测定,DTC、DOC 和 DIC 通过总有机碳分析仪(德国 Vario TOC 型号)测定^[23]。浮游植物密度测定按照 SL733—2016《内陆水域浮游植物检测技术规程》,将浓缩水样摇匀后吸取 0.1 mL 样品,注入 0.1 mL 计数框内,在 10 \times 40 倍显微镜下计数,每瓶标本计数两片并取其平均值计算浮游植物的种类及密度。

1.4 数据分析

利用 Excel 进行前期数据处理,采用 SPSS 20.0 统计学软件进行 Pearson 相关分析,用 ArcMap 10.2、Origin 2018 进行绘图。

2 结果分析

2.1 C、Si 浓度的变化特征

如图 2 及表 1 所示,香溪流域和鄱阳湖湖区 DSi 浓度显著低于架竹河流域和赣江流域($P<0.05$),其中架竹河流域 DSi 浓度沿流域呈先下降后上升的趋势,中游 J2 点处 DSi 平均浓度仅为 10.84 mg/L;赣江流域 DSi 浓度全年均处于较高水平,其平均值达(13.97 \pm 1.37) mg/L;西鄱湖昌邑乡地区(P12、P13、P14)DSi 平均浓度仅为 8.39 mg/L,明显低于鄱阳湖地区平均 DSi 浓度(11.11 \pm 2.79) mg/L。

由图 2 可知随着流域尺度的扩大,DTC 浓度呈现从香溪流域到架竹河流域降低,架竹河流域到鄱阳湖湖区升高的趋势。香溪流域 DTC 浓度沿流域呈上升趋势,下游 X3 点处 DTC 平均浓度为 16.90 mg/L 是上游 DTC 浓度的 1.6 倍;秋季鄱阳湖流域修河赣江交汇处 P6 点的 DTC 浓度仅为 5.52 mg/L,明显低于同时期其他各点浓度。从时间分布特征来看,冬季 DTC 浓度显著高于其余 3 个季节($P<0.05$),其中在香溪下游 X3 点处达到最大值为 22.18 mg/L。从空间分布特征来看,DIC 浓度在各尺度流域间无显著差异,但在香溪和鄱阳湖湖区内不同采样点间变化较大,尤其是秋季,香溪流域 DIC 浓度极差达到 10.23 mg/L,鄱阳湖湖区 DIC 浓度极差为 9.11 mg/L(图 2)。通过图 2 及表 1 可知,香溪流域的 DOC 浓度值处于较高水平,尤其是下游地区,显著高于架竹河和赣江流域($P<0.05$),说明香溪流域下游可能存在 DOC 释放源。架竹河和赣江流域春夏秋三季 DOC 浓度波动相对较小,基本维持在 3.71 mg/L 和 3.85 mg/L 左右且均低于全流域平均浓度。与 DTC 一致,DOC 浓度在秋季 P6 点处存在一个明显低谷,其浓度仅为 1.95 mg/L。整体而言,除秋季 X1 点外,其余采样点 DIC 浓度均高于 DOC 浓度,说明研究区域内 DTC 主要以 DIC 的形式存在。

表 1 各流域不同形态 C、Si 平均浓度变化

Table 1 Changes of average concentration of C and Si in different watersheds

参数 Parameter	流域 Watershed/(mg/L)				全流域 All watersheds/ (mg/L)
	香溪 Xiangxi River	架竹河 Jiazhu River	赣江 Gan River	鄱阳湖 Poyang Lake	
DSi	10.57 \pm 2.12b	15.01 \pm 3.09a	13.97 \pm 1.37a	11.11 \pm 2.79b	12.50 \pm 2.78
DTC	13.92 \pm 4.46a	12.12 \pm 2.77a	12.61 \pm 2.67a	13.39 \pm 3.02a	13.03 \pm 3.05
DIC	7.80 \pm 3.26a	7.50 \pm 2.00a	8.07 \pm 1.73a	7.69 \pm 1.77a	7.83 \pm 1.95
DOC	6.12 \pm 1.57a	4.62 \pm 1.59bc	4.54 \pm 1.41c	5.70 \pm 1.94ab	5.20 \pm 1.78

* 同行数据后相同字母表示差异不显著($P>0.05$),不同字母表示差异显著($P<0.05$);DSi:溶解性硅 Dissolved Silicon;DTC:溶解性总碳 Dissolved Total Carbon;DIC:溶解性无机碳 Dissolved Inorganic Carbon;DOC:溶解性有机碳 Dissolved Organic Carbon

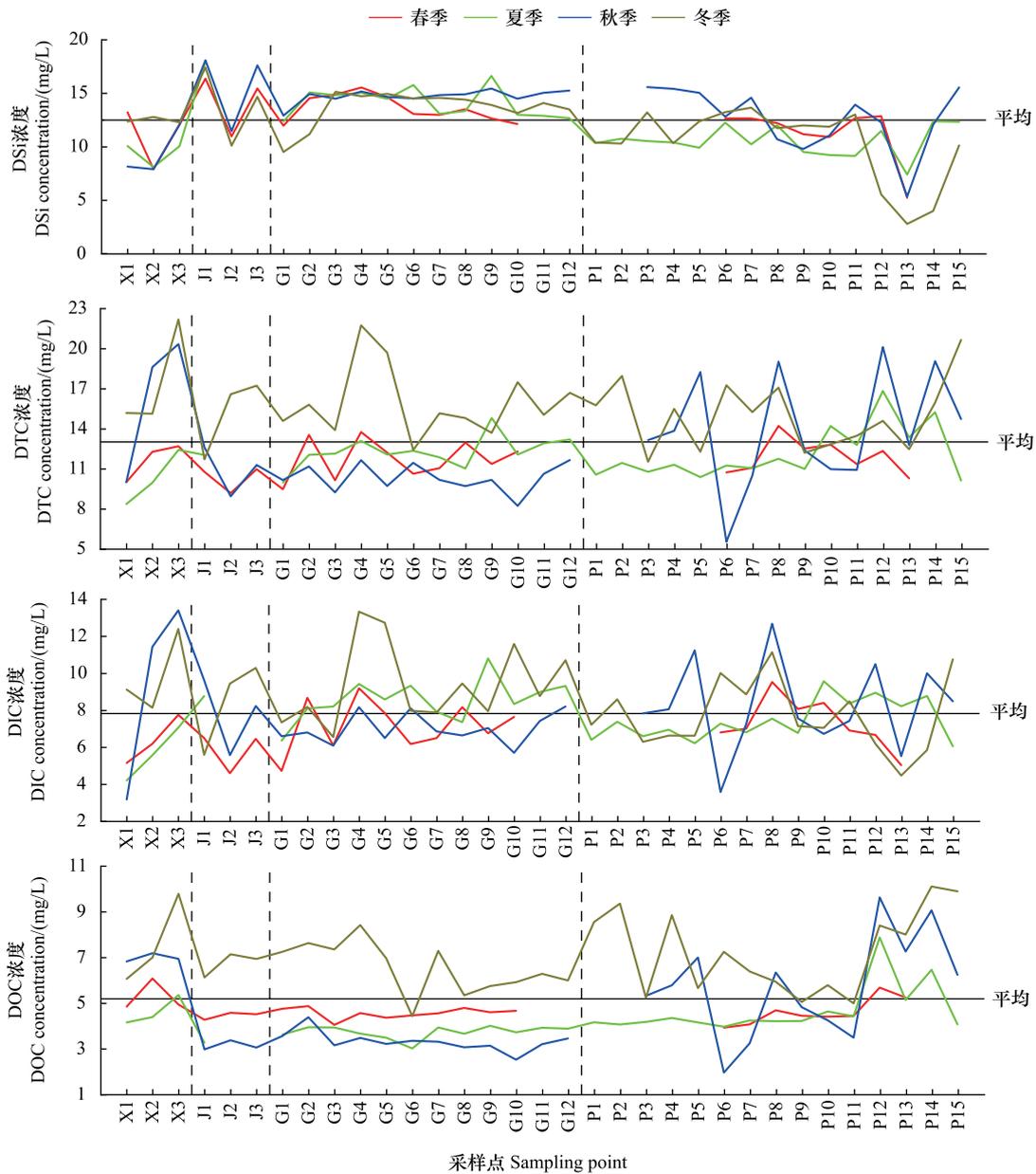


图 2 不同形态 C、Si 在各流域的浓度变化

Fig.2 Concentration change of each form C and Si in each watershed

2.2 碳硅比动态变化特征

以硅藻为主的浮游植物通过吸收 DSi 用以合成自身结构,使得河流中的 DSi 浓度急剧降低,同时河流中浮游植物的光合作用是 DOC 的主要来源之一。通过分析研究区域内的碳硅比(DOC:DSi)变化情况,可以帮助揭示河流中浮游植物群落结构特征。鄱阳湖各尺度流域碳硅比输出变化见图 3,从空间分布特征来看,碳硅比总体呈现先下降后上升的趋势,赣江流域碳硅比相对稳定基本维持在 0.33 左右,显著低于鄱阳湖湖区碳硅比($P<0.05$)。在鄱阳湖湖区,东西鄱湖间碳硅比差异相对较大,西鄱湖碳硅比(0.67)明显高于东鄱湖(0.53),冬季西鄱湖 P13 点处碳硅比达到最大值,高达 2.89。

从时间尺度来看,研究区域内冬季平均碳硅比为 0.71,显著高于其余三季($P<0.05$)。Saxton 等^[24]研究表明,冬季硅藻种群处于活跃状态,在本研究中,冬季硅藻门占比高达 23.94%(图 4),是一年中占比最高的时期,说明冬季水域中硅藻种群积极进行生物化学反应,通过吸收 DSi 及释放 DOC 使得冬季碳硅比维持在较高

水平。

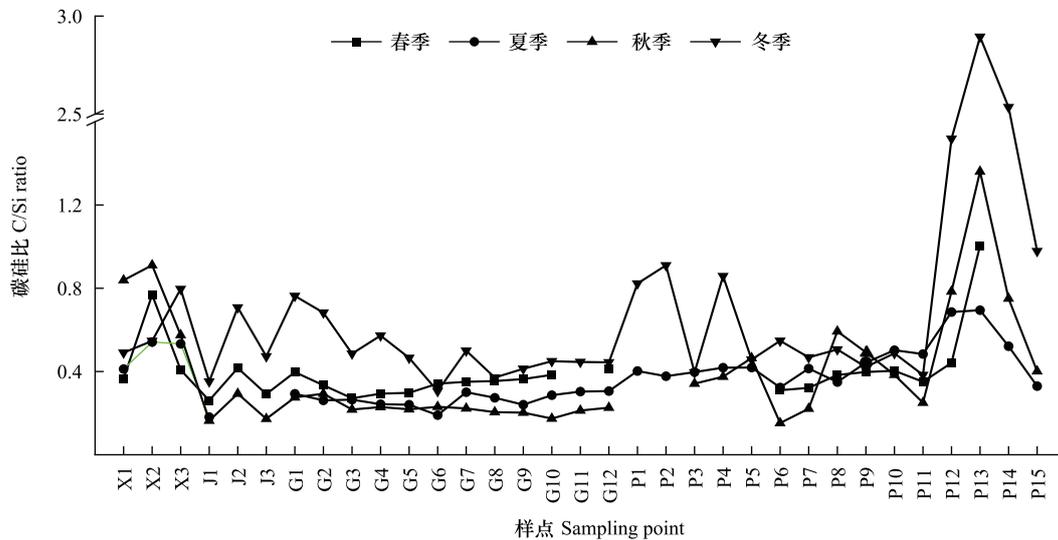


图3 不同尺度流域碳硅比输出变化

Fig.3 C/Si ratio changes in different scale basins

2.3 浮游植物群落分布特征

浮游植物作为生态系统重要的初级生产者,能够有效的表征水体营养状态^[25]。如图4所示,本研究共采集鉴定到浮游植物8门87属,蓝藻门为18年春季、夏季、秋季鄱阳湖流域浮游植物优势种,其占藻类密度的54.36%—71.93%,其次为绿藻门和硅藻门,而黄藻门和裸藻门在水域中密度占比均低于1%。冬季浮游植物鉴定出7门46属,未检出黄藻门。相较于秋季,绿藻门占藻类密度上升至29.45%,成为冬季鄱阳湖流域浮游植物优势种,而蓝藻门占比下降48.80%,低于硅藻门和隐藻门。总体而言,研究区域浮游植物密度季节变化明显,最大值出现在夏季,高达938.00万个/L,是冬季最低值的7.5倍,呈现先上升后下降趋势。

从空间分布特征来看,随着流域尺度的扩大,浮游植物密度也逐渐增大(表2)。绿藻门为架竹河流域藻类优势种,为30.01万个/L,其次为硅藻和蓝藻。而鄱阳湖湖区藻类优势种为蓝藻,高达452.03万个/L,其次为绿藻和硅藻,相较于架竹河流域,鄱阳湖湖区蓝藻门密度增加了52倍。蓝藻门作为耐污性比较强的藻类,其生物量激增并成为鄱阳湖湖区的优势类群说明鄱阳湖湖区富营养化严重^[26]。

表2 不同尺度流域间浮游植物平均密度表

Table 2 Phytoplankton average density table between different scales

流域 Watershed	浮游植物 Phytoplankton/(万个/L)								总密度 Total density/(万个/L)
	蓝藻门	隐藻门	硅藻门	绿藻门	甲藻门	金藻门	裸藻门	黄藻门	
架竹河	8.65	5.30	11.18	30.01	0.23	2.18	0.42	0.06	58.03
赣江	209.47	18.99	30.21	88.75	3.17	4.07	0.93	0.11	355.69
鄱阳湖	452.03	33.81	57.53	109.58	4.51	6.45	2.82	0.21	666.91

3 讨论

3.1 C、Si上下游变化原因分析

陆地侵蚀来源的有机物相比于其他来源的向河口、近岸带水域排放的有机物而言,数量巨大,种类繁多^[27],沿岸土地利用方式显著影响河流C^[28]、Si^[29]浓度。香溪流域和鄱阳湖湖区DSi浓度显著低于架竹河和赣江流域,其原因可能是香溪流域植被覆盖率相对较高,植物在生长过程中吸收大量DSi^[29],起到滞留DSi的

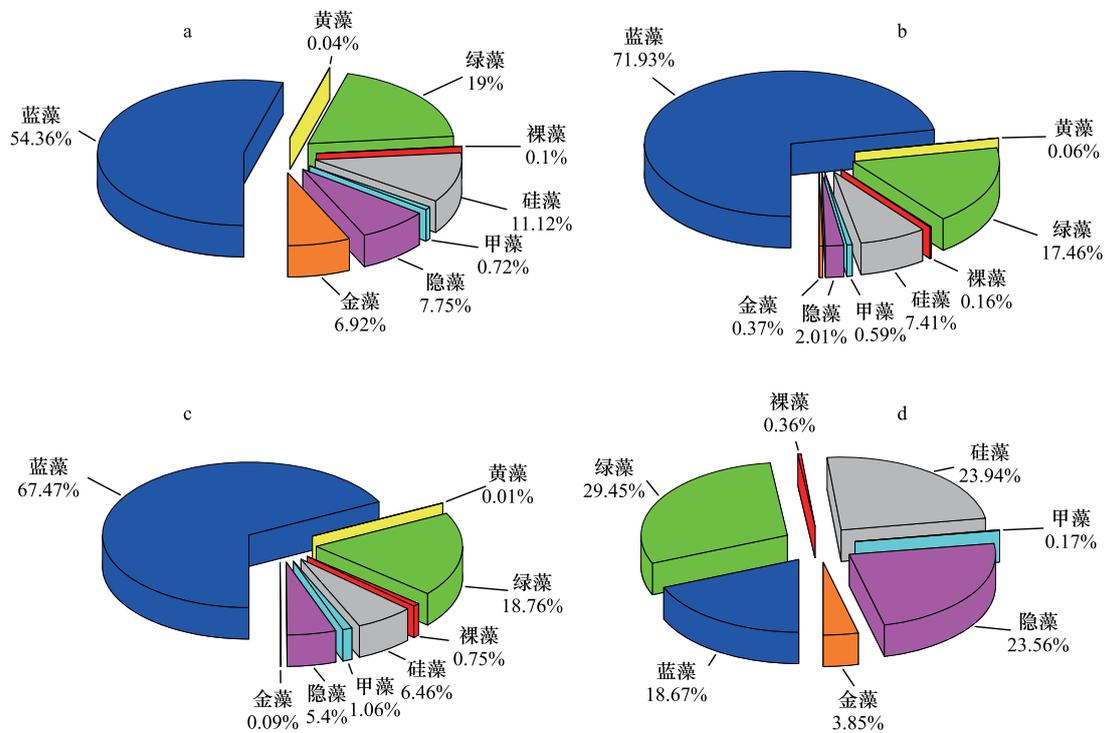


图 4 浮游植物群落组成

Fig.4 Phytoplankton community composition

a 春季浮游植物密度 242.44 万个/L; b 夏季浮游植物密度 938.00 万个/L; c 秋季浮游植物密度 655.34 万个/L; d 冬季浮游植物密度 124.64 万个/L

作用;而冬季植物正处于休眠期,对 DSi 的滞留作用减弱,这就导致了冬季香河流域 DSi 浓度较高。架竹河流域流经大量农田、道路,植被破坏严重,其对 DSi 的滞留作用大幅削弱,大量 DSi 进入水中,致使架竹河流域 DSi 浓度偏高。同样鄱阳湖湖区位于保护区内,陆地植被及水生植被保存完好,可以滞留大量 DSi ,而赣江沿岸开发程度高,土地植被覆盖率低,故赣江流域 DSi 浓度偏高而鄱阳湖地区 DSi 浓度偏低。

研究区域内 DTC 主要以 DIC 形式存在, DIC 的含量通常与流域内的碳酸盐露出情况有关^[30],研究表明丰水期是碳酸盐的溶解速率会加快,且进入河流的碳酸盐的溶解物会变多^[31]。但鄱阳湖地区丰水期(夏、秋季) DIC 浓度却低于枯水期(冬季),这可能说明①鄱阳湖流域碳酸盐矿物风化作用相对较弱;②夏、秋季气温较高, CO_2 从河流中脱气加快 ($HCO_3^- \xrightarrow{高温} CO_2 + H_2O$),致使水中溶解性碳酸盐含量降低;③夏、秋季降雨增加,水位上涨,稀释了河水中的 DIC 浓度(见表 3);④冬季水流速度慢,河水与底泥、土壤等充分反应,增加了水中的 DIC 浓度。

香河流域 DOC 浓度显著高于其他流域,且下游浓度要高于中上游,造成这种现象的原因可能在于香河流域的土地利用方式。该流域的土地利用方式主要为垄田和柑橘林,农民会施加大量农家肥,进而通过降雨冲刷使大量有机碳进入河流中。在香溪下游水流相对平缓的地区,营养物质较多,利于水中浮游植物的生长,进而产生大量 DOC,使得该区域 DOC 浓度高于中上游。鄱阳湖流域修河赣江交汇处(P6) DOC 浓度显著低于该流域平均值,可能是由于在河口区,由于河水径流和河口沿岸排污,水体携带大量有机物的同时也伴随着大量的微生物,河口的水环境和丰富的有机质适合微生物的滋生繁殖,加速有机质的降解,进而使得水域中的 DOC 含量明显减少^[32]。一般而言,湿地因较高的生产力而存储了大量有机碳,通过对鄱阳湖湖区进行分区比较,发现南矶乡湿地区域(P1—P5、P15)平均 DOC 浓度为 6.10 mg/L,高于鄱阳湖湖区平均水平 5.81 mg/L,这与前人研究一致^[33],同时鄱阳湖湖区水体中 DOC 含有较高的腐殖酸类(HA)^[34],这均体现了鄱阳湖湖区丰

富的湿地资源对水体 DOC 的影响。

表 3 不同时期各尺度流域径流量

Table 3 Runoff in various scales in different periods

流域 Watershed	时期 Time	径流量 Runoff/m ³	占比 Percentage/%	流域 Watershed	时期 Time	径流量 Runoff/m ³	占比 Percentage/%
香溪	夏季	5.0×10 ⁴	49.3	赣江	夏季	2.7×10 ¹⁰	34.9
	秋季	1.5×10 ²	0.1*		秋季	1.1×10 ¹⁰	14.9
架竹河	夏季	2.3×10 ⁷	44.7				
	秋季	1.7×10 ⁷	32.4				

* 香溪流域取样时正在施工,故对径流量影响较大

3.2 C、Si 对浮游植物分布特征的影响

对浮游植物密度及 C、Si 参数间进行 Pearson 相关分析结果见表 4,由表 4 可知,架竹河流域 DSi、DTC、DOC 及碳硅比均与浮游植物无显著相关关系,只有硅藻与 DIC 存在显著正相关关系($P < 0.05$)。藻类的光合作用会降低 CO₂ 在水中的浓度,同时推动水体对大气 CO₂ 的吸收。但由于气体在水体中的扩散速率很慢,如果水体中 N、P 营养相对充足,DIC 的迅速消耗会导致碳限制现象的发生^[35],同一生境中的不同藻类,对无机碳源的利用程度并不相同^[36]。架竹河流域只有硅藻与 DIC 浓度显著相关,说明无机碳可能是该流域硅藻种群的主要限制因子,且硅藻对 DIC 浓度变化较敏感。赣江流域隐藻、硅藻和金藻均与 DSi 呈极显著负相关($P < 0.01$),但在鄱阳湖湖区,三者与 DSi 的相关性大幅降低甚至消失。这可能说明赣江流域 DSi 对浮游植物群落结构起着至关重要的作用,但随着流域尺度的扩大,到了鄱阳湖湖区 DSi 对浮游植物的限制作用降低,N、P 等营养盐对浮游植物的影响开始显现^[37]。赣江流域和鄱阳湖湖区中硅藻、隐藻和金藻均与碳硅比呈正相关,说明三者 在生长发育过程中消耗水中 DSi 合成自身结构,同时释放 DOC,且随着流域尺度的扩大,三者与碳硅比的相关性降低,同时蓝藻与 DOC 的相关性提高,这就从侧面说明蓝藻在鄱阳湖湖区浮游植物群落中占据优势地位。在鄱阳湖流域,蓝藻与甲藻均与 DOC 呈显著负相关($P < 0.05$),说明 DOC 对蓝藻的生长具有一定的抑制作用,Crab 等^[38]认为向水体添加有机碳可以通过促进水体中异养细菌的生长来达到降低水体氮浓度的目的;王小东等^[39]在太湖流域利用碳营养盐添加实验证明了向水体添加有机碳能够控制浮游植物的生长。DOC 浓度的升高,促进了异养细菌的生长,进而与蓝藻等藻类竞争水体中的氮磷营养盐,抑制了水体中蓝藻的生物量,这就为解决鄱阳湖流域水体富营养化提供了一个思路。

在水体富营养化的研究中,碳常常和 pH 联系在一起作为讨论的对象,从浮游植物群落中选取密度最大的三个门(蓝藻门、绿藻门、硅藻门)与 C、Si 各参数及水体 pH 进行相关性分析(表 5),发现鄱阳湖流域 pH 与 DIC 呈极显著正相关($P < 0.01$),pH 与总密度、蓝藻、绿藻和硅藻均呈极显著负相关($P < 0.01$),而 DIC 与浮游植物群落之间无显著相关性。当水体中的 DIC 浓度发生变化时,会使碳酸盐组成发生变化进而影响水体的 pH。水中 DIC 的平衡关系为: $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{H}_2\text{CO}_3 \leftrightarrow \text{HCO}_3^- + \text{H}^+ \leftrightarrow \text{CO}_3^{2-} + 2\text{H}^+$,pH 值和 HCO_3^- 、 CO_3^{2-} 间的关系表示为: $\text{pH} = 10.33 - \lg[\text{HCO}_3^-]/[\text{CO}_3^{2-}]$ 。大气中的 CO₂ 通过大气体系内传输进入水体,使得水体能够溶解更多的 CO₂,DIC 浓度总体上升,平衡向右移动,碳酸盐组成发生变化,CO₃²⁻ 浓度降低,HCO₃⁻ 浓度增加^[40],但随着藻类的光合作用的进行,HCO₃⁻ 和 CO₂ 被消耗,CO₃²⁻ 在 DIC 中所占比例上升^[41],使 pH 与 DIC 浓度同步上升。水体的 pH 主要从两方面对浮游植物产生影响,一方面是改变环境的酸碱度,过酸或者过碱均会对浮游植物产生影响;另一方面是影响碳酸盐平衡系统及不同形态无机碳分配关系来影响藻类生长^[42]。在本文中,水体 pH 与浮游植物生长呈极显著负相关($P < 0.01$),与王艺兵等^[43]在鄱阳湖的研究结果正好相反,其原因一方面可能是不同藻类对 pH 的适应范围不同,如浮游颤藻在 pH 为 6.0—7.0 时生长最快^[42],拟柱胞藻的最佳生长 pH 为 8.2 左右^[44],不同的藻类在达到其最适 pH 之前,均会受到环境 pH 的限制。另一方面,pH 升高使得水体中藻类易于吸收的 CO₂ 含量降低,pH 达到 9.0 时,水体中的 CO₂ 几乎为零,而根据藻类的 CO₂ 浓缩机制,藻

类更倾向于吸收水中的溶解 CO₂^[45],因此,能够在高 pH 下正常生长的藻类是对 HCO₃⁻ 吸收利用的结果,一般认为,蓝藻对 CO₂的吸收能力往往比真核藻类更高,因此,高 pH 容易引发蓝藻优势^[46]。鄱阳湖流域 DIC 平均浓度为(7.83±1.95) mg/L,高于浮游植物光合作用 K_m值 3.38 mg/L^[47],说明在鄱阳湖流域 DIC 浓度对浮游植物生长不构成限制作用,但是却可能通过影响水体 pH 值间接影响浮游植物群落结构。

应当通过控截污工程、污水脱氮除磷等技术,严格控制对流域水体的营养物质输入,从而减少鄱阳湖营养负荷的输入量,从根本上改善水体的富营养化趋势。在 N、P 营养盐相对充足的条件下,C、Si 可能是调控水体富营养化至关重要的一环。

表 4 浮游植物密度与 C、Si 参数间的 Pearson 相关系数

Table 4 Pearson correlation coefficient between phytoplankton density and C and Si parameters

流域 Watershed	浮游植物 Phytoplankton	DSi	DTC	DIC	DOC	碳硅比 C/Si
架竹河	蓝藻	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
	隐藻	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
	硅藻	n.s.	n.s.	0.762 *	n.s.	n.s.
	绿藻	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
	甲藻	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
	金藻	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
	裸藻	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
	黄藻	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
	赣江	蓝藻	n.s.	n.s.	n.s.	-0.352 *
	隐藻	-0.586 **	n.s.	-0.371 *	n.s.	0.584 **
	硅藻	-0.433 **	n.s.	n.s.	n.s.	0.474 **
	绿藻	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
	甲藻	n.s.	-0.336 *	n.s.	-0.456 **	n.s.
	金藻	-0.487 **	n.s.	-0.349 *	n.s.	0.443 **
	裸藻	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
	黄藻	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
鄱阳湖	蓝藻	n.s.	n.s.	n.s.	-0.363 *	n.s.
	隐藻	-0.313 *	n.s.	n.s.	n.s.	0.411 **
	硅藻	-0.300 *	n.s.	n.s.	n.s.	0.295 *
	绿藻	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
	甲藻	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
	金藻	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	0.337 *
	裸藻	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
	黄藻	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.

** P<0.01, * P<0.05;“n.s.”,无显著相关性

表 5 pH 与各 C、Si 参数及部分浮游植物间的 Pearson 相关系数

Table 5 Pearson correlation coefficient between pH and C、Si parameters and some phytoplankton

指标 Index	pH	DSi	DTC	DIC	DOC	碳硅比 C/Si	总密度 The total density	蓝藻 Cyanophyta	绿藻 Chlorophyta	硅藻 Bacillariophyta
pH	1.000									
DSi	n.s.	1.000								
DTC	0.215 *	n.s.	1.000							
DIC	0.238 **	0.265 **	0.834 **	1.000						
DOC	n.s.	-0.408 **	0.789 **	0.334 **	1.000					
碳硅比	0.193 *	-0.670 **	0.641 **	0.446 **	0.608 **	1.000				
总密度	-0.368 **	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	1.000			
蓝藻	-0.336 **	n.s.	n.s.	n.s.	-0.238 *	n.s.	0.971 **	1.000		
绿藻	-0.324 **	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	0.633 **	0.456 **	1.000	
硅藻	-0.256 *	-0.358 **	n.s.	n.s.	n.s.	0.343 **	0.681 **	0.575 **	0.601 **	1.000

** P<0.01, * P<0.05;“n.s.”,无显著相关性

4 结论

鄱阳湖流域 C、Si 浓度与碳硅比呈明显空间变化。香溪流域和鄱阳湖湖区 DSi 浓度显著低于架竹河流域和赣江流域,而 DTC 和 DOC 浓度恰好相反。碳硅比随流域尺度的扩大总体呈现先下降后上升的趋势,其中在鄱阳湖湖区,东西鄱湖间碳硅比差异相对较大,西鄱湖碳硅比明显高于东鄱湖。浮游植物密度随着流域面积的扩大而成倍增加,其中鄱阳湖湖区浮游植物密度是架竹河流域的 11 倍,高达 666.91 万个/L,根据湖泊营养类型评价的藻类生物学标准^[48],鄱阳湖区已呈现贫中营养化态势,湖区生态环境及水体污染问题不容忽视。C、Si 对浮游植物分布特征的影响随着流域尺度的变化而变化,架竹河流域浮游植物分布主要受碳影响,且硅藻对 DIC 浓度变化最敏感;进入赣江流域,硅成为影响浮游植物分布的主要因子;而进入鄱阳湖后,硅对浮游植物分布的影响减弱,此时的主要影响因子可能转变为 N、P 等其他营养元素;鄱阳湖流域 DOC 可通过促进异养细菌的生长抑制水华的发生,DIC 不是浮游植物生长的限制性因子,但可通过影响水体 pH 值间接影响浮游植物群落结构。

参考文献 (References):

- [1] Rousseaux C S, Gregg W W. Interannual variation in phytoplankton primary production at a global scale. *Remote Sensing*, 2014, 6(1): 1-19.
- [2] 陶敏,王永明,谢碧文,覃川杰,齐泽民,岳兴建,邹远超,王涓,李斌. 沱江浮游生物群落时空分布及相关环境因子分析. *水生生物学报*, 2016, 40(2): 301-312.
- [3] Capellacci S, Battocchi C, Casabianca S, Giovine M, Bavestrello G, Penna A. Bioavailability of different chemical forms of dissolved silica can affect marine diatom growth. *Marine Ecology*, 2013, 34(1): 103-111.
- [4] Garnier J, Beusen A, Thieu V, Billen G, Bouwman L. N:P:Si nutrient export ratios and ecological consequences in coastal seas evaluated by the ICEP approach. *Global Biogeochemical Cycles*, 2010, 24(4): GBOA05.
- [5] 张君枝,王齐,马文林,陈汉,赵远玲,张艳娜. 水体无机碳升高对蓝绿藻生长和种群竞争的影响研究进展. *生态环境学报*, 2015, 24(7): 1245-1252.
- [6] Hitchcock J N, Mitrovic S M, Kobayashi T, Westhorpe D P. Responses of estuarine bacterioplankton, phytoplankton and zooplankton to Dissolved Organic Carbon (DOC) and inorganic nutrient additions. *Estuaries and Coasts*, 2010, 33(1): 78-91.
- [7] Singh S P, Singh P. Effect of CO₂ concentration on algal growth: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2014, 38: 172-179.
- [8] 冷晓云. 中国北方近海营养盐分布与浮游植物生物量[D]. 天津: 天津科技大学, 2016.
- [9] 杨东方,高振会,王培刚,于子江,石强. 营养盐 Si 和水温影响浮游植物的机制. *海洋环境科学*, 2006, 25(1): 1-6.
- [10] 李军,刘丛强,王仕禄,周志华,朱兆洲,肖化云. 太湖水体溶解营养盐(N、P、Si)的冬、夏二季变化特征及其与富营养化的关系. *地球与环境*, 2005, 33(1): 63-67.
- [11] 杨巧言. 江西省自然地理志. 北京: 方志出版社, 2003.
- [12] 戴国飞,张萌,冯明雷,钟家有,刘志刚. 鄱阳湖南矶湿地自然保护区蓝藻水华状况与成因分析. *生态科学*, 2015, 34(4): 26-30.
- [13] 陈格君,周文斌,李美婷,童乐,胡春华. 鄱阳湖氮磷营养盐对浮游植物群落影响研究. *中国农村水利水电*, 2013, (3): 48-52, 61-61.
- [14] 胡春华,周文斌,王毛兰,魏志巍. 鄱阳湖氮磷营养盐变化特征及潜在性富营养化评价. *湖泊科学*, 2010, 22(5): 723-728.
- [15] 程新,黄林,李昆太. 鄱阳湖区藻类丰度分布及其与环境因子的关联分析. *湖北农业科学*, 2017, 56(15): 2865-2869.
- [16] 金腊华,李明玉,黄报远. 鄱阳湖洪灾特征与圩区还湖减灾运用方式研究. *自然灾害学报*, 2002, 11(4): 74-77.
- [17] 刘剑宇,张强,邓晓宇,慈晖,陈晓宏. 气候变化和人类活动对鄱阳湖流域径流过程影响的定量分析. *湖泊科学*, 2016, 28(2): 432-443.
- [18] 万荣荣,杨桂山,王晓龙,秦年秀,戴雪. 长江中游通江湖泊江湖关系研究进展. *湖泊科学*, 2014, 26(1): 1-8.
- [19] 刘剑宇,张强,孙鹏,顾西辉,方朝阳. 鄱阳湖最小生态需水研究. *中山大学学报: 自然科学版*, 2014, 53(4): 149-153.
- [20] Hu Q, Feng S, Guo H, Chen G Y, Jiang T. Interactions of the Yangtze river flow and hydrologic processes of the Poyang Lake, China. *Journal of Hydrology*, 2007, 347(1/2): 90-100.
- [21] 杜彦良,周怀东,彭文启,刘晓波,王世岩,殷淑华. 近 10 年流域江湖关系变化作用下鄱阳湖水动力及水质特征模拟. *环境科学学报*, 2015, 35(5): 1274-1284.
- [22] 胡鸿钧,魏印心. 中国淡水藻类——系统、分类及生态. 北京: 科学出版社, 2006.
- [23] 鄂馨卉,汪亚峰,高扬,陈利顶,陈世博,陈维梁. 黄土高原降雨驱动下流域碳输移特征及其碳流失评估: 以羊圈沟坝系流域为例. *环境科学*, 2017, 38(8): 3264-3272.

- [24] Saxton M A, D'souza N A, Bourbonniere R A, McKay R M L, Wilhelm S W. Seasonal Si:C ratios in Lake Erie diatoms — Evidence of an active winter diatom community. *Journal of Great Lakes Research*, 2012, 38(2): 206-211.
- [25] 梁伟林. 湖泊富营养化评价方法研究及其系统设计[D]. 北京: 电子科技大学, 2017.
- [26] 王朝晖, 林秋奇, 胡韧, 范春雷, 韩博平. 广东省水库的蓝藻污染状况与水质评价. *热带亚热带植物学报*, 2004, 12(2): 117-123.
- [27] 高全洲, 陶贞. 河流有机碳的输出通量及性质研究进展. *应用生态学报*, 2003, 14(6): 1000-1002.
- [28] 高常军. 流域土地利用对若溪水体 C、N、P 输出的影响[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2013.
- [29] Carey J C, Fulweiler R W. Human activities directly alter watershed dissolved silica fluxes. *Biogeochemistry*, 2012, 111(1/3): 125-138.
- [30] 孙平安, 于爽, 莫付珍, 何师意, 陆菊芳, 原雅琼. 不同地质背景下河流水化学特征及影响因素研究: 以广西大溶江、灵渠流域为例. *环境科学*, 2016, 37(1): 123-131.
- [31] Tipper E T, Bickle M J, Galy A, West A J, Pomiès C, Chapman H J. The short term climatic sensitivity of carbonate and silicate weathering fluxes: insight from seasonal variations in river chemistry. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2006, 70(11): 2737-2754.
- [32] 张龙军, 宫萍, 张向上. 河口有机碳研究综述. *中国海洋大学学报*, 2005, 35(5): 737-744, 842-842.
- [33] 刘丽贞, 黄琪, 吴永明, 吴代赦, 游海林, 邓冕. 鄱阳湖枯水期 CDOM 光吸收特性与 DOC 浓度的定量关系研究. *生态与农村环境学报*, 2017, 33(8): 762-768.
- [34] 吕书丛, 焦茹媛, 王芳, 余其彪, 李新艳, 张路, 晏维金. 长江下游河-湖系统溶解性有机碳化学组成、变化特征及其与二氧化碳分压的关系. *环境科学学报*, 2018, 38(5): 2034-2044.
- [35] 孙凌, 阚元卿, 张冬梅, 庄源益. 无机碳对浮游藻类生长和群落结构的影响. *环境污染与防治*, 2007, 29(5): 352-356.
- [36] 岳国峰, 王金霞, 朱明远, 周百成. 藻类无机碳营养的研究进展(II)——藻类利用无机碳的机理及其调节. *海洋科学*, 2003, 27(6): 31-34.
- [37] 陈泽恺. 鄱阳湖着生藻类分布格局及其与环境相关性的研究[D]. 上海: 上海师范大学, 2019.
- [38] Crab R, Avnimelech Y, Defoirdt T, Bossier P, Verstraete W. Nitrogen removal techniques in aquaculture for a sustainable production. *Aquaculture*, 2007, 270(1/4): 1-14.
- [39] 王小冬, 刘兴国, 顾兆俊, 时旭, 朱浩, 刘翀. 葡萄糖添加对太湖水体浮游植物生长的影响. *渔业现代化*, 2016, 43(5): 6-11, 41-41.
- [40] Raven J A, Beardall J. CO₂ concentrating mechanisms and environmental change. *Aquatic Botany*, 2014, 118: 24-37.
- [41] 杨威. 水体中无机碳对浮游植物生长的影响研究[D]. 天津: 南开大学, 2007.
- [42] 许海, 刘兆普, 袁兰, 杨林章. pH 对几种淡水藻类生长的影响. *环境科学与技术*, 2009, 32(1): 27-30.
- [43] 王艺兵, 侯泽英, 叶碧碧, 曹晶, 储昭升, 曾清如. 鄱阳湖浮游植物时空变化特征及影响因素分析. *环境科学学报*, 2015, 35(5): 1310-1317.
- [44] 聂利华, 李训仕, 刘亚群, 朱兴彪, 余俊, 查广才. 温度、光照、盐度与 pH 对淡水蓝藻拟柱胞藻生长的影响. *生态科学*, 2016, 35(4): 102-108.
- [45] 赵旭辉, 孔繁翔, 谢薇薇, 史小丽. 全球 CO₂ 水平升高对浮游植物生理和生态影响的研究进展. *生态学报*, 2012, 32(21): 6880-6891.
- [46] Hörnström E. Phytoplankton in 63 limed lakes in comparison with the distribution in 500 untreated lakes with varying pH. *Hydrobiologia*, 2002, 470(1/3): 115-126.
- [47] Qiu B S, Gao K S. Effects of CO₂ enrichment on the bloom-forming cyanobacterium *Microcystis aeruginosa* (Cyanophyceae): physiological responses and relationships with the availability of dissolved inorganic carbon. *Journal of Phycology*, 2002, 38(4): 721-729.
- [48] 况琪军, 马沛明, 胡征宇, 周广杰. 湖泊富营养化的藻类生物学评价与治理研究进展. *安全与环境学报*, 2005, 5(2): 87-91. *学报*, 2005(02): 87-91.