

有机和常规农业管理方式下的浮游植物群落特征及其影响因素^{*}

杜少娟^{1,2}, 王吉毅³, 国超旋¹, Jonathan Miles Adams⁴, 任明磊¹, 李侃⁵, 郭亚平⁴, 杜宗军², 王建军^{1**}

(1: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)

(2:山东大学(威海)海洋学院,威海 264209)

(3:哈尔滨师范大学生命科学与技术学院,哈尔滨 150025)

(4:南京大学地理与海洋科学学院,南京 210023)

(5:南京大学宜兴环保研究院,宜兴 214200)

摘要:为了解不同农业施肥管理方式对水体浮游植物群落的影响,本研究以江苏句容戴庄有机示范村和常规农业管理区池塘浮游植物为对象,分析冬夏两季浮游植物群落特征及相关水环境因子。结果表明:冬季有机和常规农业区域的浮游植物分别检到7门95种和7门111种,夏季分别检到7门102种和6门112种,有机农业区浮游植物由冬季的隐藻—绿藻型向夏季的蓝藻—绿藻型变化,常规农业区从隐藻—绿藻型向蓝藻—硅藻型变化,蓝藻逐渐取代隐藻的优势地位。夏季各池塘浮游植物alpha多样性没有显著的区域差异,但冬季常规农业区浮游植物物种丰富度、蓝藻和裸藻的Shannon-Wiener多样性指数显著较高。指示物种分析显示,谷皮菱形藻(*Nitzschia palea*)和梅尼小环藻(*Cyclotella meneghiniana*)为有机农业区指示物种,而梭形裸藻(*Euglena acus*)、针形纤维藻(*Ankistrodesmus acicularis*)、肘状针杆藻(*Synedra ulna*)和狭形纤维藻(*Ankistrodesmus angustus*)为常规农业区指示物种,此6种藻为中、富营养化藻类,说明水体氮磷营养盐浓度较高,这与周围农田氮磷流失密切相关。Pearson相关性分析表明,有机农业区浮游植物alpha多样性与氮磷浓度的相关性不显著,但常规农业区浮游植物物种丰富度和Pielou均匀度与磷酸盐、总氮、氨氮和pH值显著相关。Mantel检验表明,有机农业区群落相似性仅在冬季受到总氮和氨氮的显著影响;而常规农业区在冬夏季受到氮磷两类营养盐的交替影响。本研究结果初步揭示了有机和常规农业区水体浮游植物群落结构特征及其影响因素,为区域水生生物多样性保护与稻田施肥管理的优化提供科学基础。

关键词:有机农业;常规农业;浮游植物;群落结构;多样性;环境因子

Phytoplankton community characteristics and the underlying drivers under organic and conventional agricultural management^{*}

Du Shaojuan^{1,2}, Wang Jiyi³, Guo Chaoxuan¹, Jonathan Miles Adams⁴, Ren Minglei¹, Li Kan⁵, Guo Yaping⁴, Du Zongjun² & Wang Jianjun^{1**}

(1: State Key Laboratory of Lake Science and Environment, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, P.R.China)

(2: Marine College, Shandon University (Weihai), Weihai 264209, P.R.China)

(3: College of Life Science and Technology, Harbin Normal University, Harbin 150025, P.R.China)

(4: School of Geography and Ocean Science, Nanjing University, Nanjing 210023, P.R.China)

(5: Yixing Environment Research Institute of Nanjing University, Yixing 214200, P.R.China)

Abstract: In order to explore the effects of different agricultural fertilization management on the phytoplankton community, the phytoplankton community characteristic and water environmental factors were investigated in winter and summer in Daizhuang or-

* 2021-12-21 收稿; 2022-03-05 收修改稿。

国家自然科学基金项目(91851117,42007159)资助。

** 通信作者;E-mail: jjwang@niglas.ac.cn.

ganic village and conventional farming area of Jurong, Jiangsu Province. Our results showed that the phytoplankton communities were composed of 95 and 111 species of 7 phyla in organic (OFR) and conventional farming regions (CFR) in winter, 102 species of 7 phyla and 112 species of 6 phyla in summer, respectively. The phytoplankton varied from Cryptophyta-Chlorophyta type in winter to Cyanophyta-Chlorophyta type in summer in OFR, and from Cryptophyta-Chlorophyta type to Cyanophyta-Bacillariophyta type in CFR, indicating that Cyanophyta gradually replaced the dominant position of Cryptophyta. There was no significant difference in phytoplankton alpha diversity between organic and conventional farming ponds in summer, but the phytoplankton species richness and Shannon-Wiener diversity of Cyanophyta and Euglenophyta in CFR was significantly higher than that in OFR in winter. The IndVal analysis further revealed that *Nitzschia palea* and *Cyclotella meneghiniana* were the indicative species in OFR, while *Euglena acus*, *Ankistrodesmus acicularis*, *Synedra ulna* and *Ankistrodesmus angustus* were the indicative species in CFR. These algae often occurred in meso-eutrophic waters, indicating that the concentration of nitrogen and phosphorus in water was higher. This may be closely related to the nitrogen and phosphorus runoff. Pearson correlation analysis showed that there was no significant relationship between phytoplankton alpha diversity and environmental factors in two regions, but species richness and Pielou's evenness in CFR were significantly correlated with phosphate, total nitrogen, ammonia nitrogen and pH. Mantel test showed that the community dissimilarity in OFR was only significantly affected by total nitrogen and ammonia nitrogen in winter. While in CFR, community dissimilarity was affected by the alternation of nitrogen and phosphorus nutrients in winter and summer. These findings should be useful for future efforts to recover biodiversity and optimize fertilization management.

Keywords: Organic farming; conventional farming; phytoplankton; community structure; diversity; environmental factors

在过去几十年中,化肥和农药的不合理使用导致土壤严重退化、氮磷养分流失,由此造成的农业面源污染问题日益突出^[1-3]。目前,常规农业仍是主导现代农业的生产模式,其长期施用的化肥虽可以短时间显著提高土壤养分含量,但农田残留的化肥和农药经地表径流及渗漏、淋溶等途径进入水生态系统,造成地下水、河流和湖泊等水域的严重污染^[4-5]。而有机农业强调不施用化肥、化学农药、饲料添加剂等物质,是实现农业生产和水生态保护的环境友好型农业模式^[6]。据席运官等^[7]对有机与常规稻田排水污染的比较研究发现,有机生产方式可降低排水中氮的排放量,在一定程度上也会降低排水中的磷素排放量;而陈静蕊等^[8]发现绿肥紫云英还田配合化肥减施能够显著减少总氮流失,但对总磷流失的削减效应不明显。刘红江等^[9]发现,随着有机肥替代化肥的比例增加,稻田地表径流水体总氮流失量逐渐下降。因此,科学有效管理农田氮磷输入并防止其向水体迁移对控制农业面源污染具有重要意义。

浮游植物是水生态系统中物质循环和能量流动的关键环节^[10],具有个体微小、分布广泛、对水体营养状态反应敏感等特点,对水生态系统健康状态具有重要指示意义^[11]。以莫力达瓦旗某水库为例,农业面源污染导致该区域浮游生物和底栖动物物种种类较为单一,优势种以耐污种类为主^[12]。沙河水库氮素主要来源于农业施肥,其藻类生物量与氮营养水平呈显著正相关^[13]。另有研究表明,运用农田生态拦截沟对巢湖流域污染修复,尽管具有削减农业氮、磷营养盐面源污染的作用,但不能有效地降低水体中蓝藻的生物量^[14]。以上研究聚焦于常规农业生产活动造成周边水体氮、磷的输入,从而对浮游植物群落产生深刻影响,但是对于比较有机和常规农业管理方式下水体浮游植物群落差异的研究仍鲜有报道。

戴庄村是我国发展生态有机农业的典范。该地区由“全国脱贫攻坚楷模”、“时代楷模”赵亚夫研究员的带领下和指导下,稻田连续16年不使用化肥农药,逐渐形成了多元化种植、养殖的有机农业新模式,这些举措不仅没有导致病虫危害的增加,而且还促进了田间生物群落和生态链的修复,有效地保护了当地农田生物多样性。目前人们对戴庄村稻田动物多样性^[15]、有机水稻土壤肥力评价^[16]等方面开展过一些研究和报道,但对区域内池塘浮游植物及环境因子的变化尚缺乏认识。针对上述问题,本文以稻田池塘为研究对象,调查了冬夏两季水环境因子及浮游植物群落特征,以期回答以下问题:1)有机和常规农业管理区域池塘水环境因子是否不同;2)两区域浮游植物多样性、群落结构、指示物种是否不同;3)若不同,则探究影响浮游植物群落特征差异的因素。研究结果将对今后优化施肥体系、控制农田面源污染具有一定的理论与指导意义。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

江苏句容市天王镇戴庄村地处江苏茅山山脉中部,属于亚热带湿润气候区,常年日照总时数1850 h,年

平均降水量为 1106 mm, 年均气温为 15.4℃^[15]. 迄今为止已有 16 年的有机耕作历史, 该地区严格遵守有机农业操作流程, 不使用化肥、农药、生长激素等, 采用天然绿肥紫云英替代化肥, 施醋糟肥田, 并用秸秆醋液、生物农药替代化学农药等措施, 直接向稻田土壤输送外源有机物, 有效改善土壤肥力、增加土壤活性^[17]. 同时, 为全面客观地展示常规农业对浮游植物造成的影响, 选择戴庄村附近的常规农业区袁巷村、斗门村作为对照, 此区域常年施用氮肥等化肥, 具有一定代表性(图 1).

本研究于 2020 年 11 月末和 2021 年 8 月末, 分别在有机(戴庄村)和常规农业区域(袁巷村、斗门村)各选取 12 个池塘, 共获得冬夏两季各 24 个样品, 考察浮游植物多样性、群落结构和水环境因子. 选择冬夏两个季节采样的依据为: 冬季农业是全年农业的重要组成部分, 是全年耕作制度的起点和基础. 戴庄村稻田冬作是其优良农作制度之一, 在稻田休闲期种植绿肥作物, 如紫云英等, 可为农田补充丰富的有机物质, 防止风蚀、水蚀和径流, 增加土壤有机质含量^[18]. 进入夏秋季, 农业生产活动活跃, 汛期增多, 农田营养盐流失概率加大, 浮游植物产生较强的新陈代谢活动. 因此, 本文选择冬夏两季采样, 有利于客观比较有机和常规农业管理方式对浮游植物的不同效应, 确保数据和结果的有效性和可靠性.

池塘的选择标准为:(1)池塘以灌溉稻田为主, 而非用于鱼类养殖等产业;(2)池塘所在区域尽可能远离人类活动密集区域;(3)池塘周围多为稻田、农田包围. 为了表述简洁, 后续文中有有机农业管理的戴庄村区域简称为 OFR (organic farming regions), 而常规农业区域(袁巷村、斗门村)称为 CFR (conventional farming regions). 采样点的位置如图 1 所示.

1.2 水样和浮游植物样品的采集

同步采集水样和浮游植物样品, 在每个池塘 0.5 m 深处采集表层水, 取 3 次水混合后分别装入 2 个 50 mL 和 1 个 1 L 的无菌塑料瓶中, 前者用于测量水体环境因子, 后者用于浮游植物鉴定. 浮游植物样品在现场采用鲁哥式剂固定, 在实验室沉淀 48 h 后, 浓缩至 30 mL. 在显微镜下进行种类鉴定和细胞计数, 浮游植物细胞密度以每升水体中的细胞数(cells/L)表示, 鉴定方法参照《中国淡水藻类——系统、分类及生态》^[19].

所测定的水环境因子包括总氮(TN)、总磷(TP)、氨氮(NH₃-N)、亚硝态氮(NO₂⁻-N)、硝态氮(NO₃⁻-N)、磷酸盐(PO₄³⁻-P)、pH 值、电导率(EC)、总有机碳(TOC)共 9 种环境因子. 碱性过硫酸钾消解-紫外分光光度法测定总氮浓度; 钼锑抗显色紫外分光光度法测定总磷浓度; 氨氮、硝态氮、亚硝态氮和磷酸盐浓度是取 GF/F 膜的滤后样采用流动分析仪(Skalar San Plus, Netherlands)测定; 总有机碳浓度用多波段总有机碳元素分析仪测定; 经纬度信息通过 GPS 全球定位系统获取. 由于采样空间尺度较小且早晚水温变异较大, 后续统计分析中将不考虑水温因素.

1.3 数据处理

本文选取物种丰富度(S)、Shannon-Wiener 多样性(H')、Pielou 均匀度指数(J)来表征浮游植物 alpha-多样性, 其计算公式分别如下:

$$S = n \quad (1)$$

$$H' = - \sum_{i=1}^s P_i \ln P_i \quad (2)$$

$$J = \frac{H}{\ln S} \quad (3)$$

式中, n 为总个体数, P_i 为物种 i 的相对丰度, S 为藻类的物种数.

采用非度量多维尺度(NMDS)^[20]方法分析两季节两区域浮游植物群落结构差异. Wilcoxon 非参数检验^[21]以确定有机和常规农业区之间水体环境因子和多样性指数的差异. 利用 R 语言 labdsv 包中的 indval 函数计算指示物种^[22], 根据每种浮游植物的相对丰度和组内相对发生频率, 即特异性和保真度的乘积, 从而计算出相应分类单元的指示值(indicator value)和显著性检验的 P 值, $P < 0.05$ 的物种即为指示物种^[23]. 采用 Pearson 相关性分析浮游植物多样性和门相对丰度与环境因子的关系. 用 Mantel 检验^[24]评估环境距离矩阵与群落相异矩阵的相关性, 用 vegan 包中的 vegdist 函数计算群落组成的 Bray-Curtis 相异度, 相关性采用 Spearman 相关系数来衡量, 对每个检验设置 9999 次随机置换以获得相关性 r 值的统计分布, 并计算模型的显著度^[25]. 在 R4.0.2^[26] 中进行上述所有统计分析与绘图.

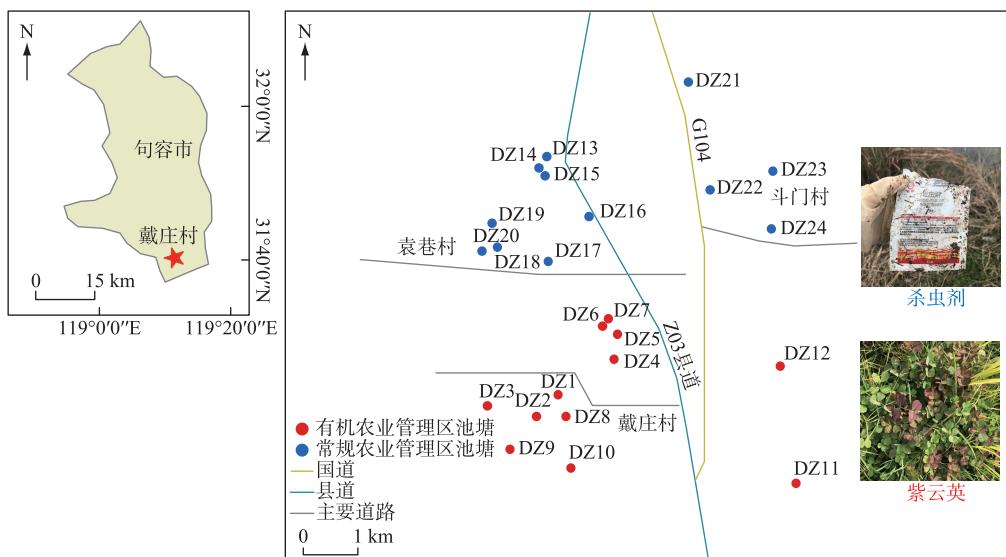


图 1 采样点分布

(如现场实拍所示,有机农业管理区域种植了紫云英,常规农业管理区域使用了杀虫剂等化学药物)

Fig.1 The distribution of sampling sites (The organic farming regions were planted with Chinese milk vetch, while the conventional farming regions used chemicals, such as pesticides)

2 结果与分析

2.1 有机和常规农业区水体环境因子

冬季两区域环境因子未表现出显著差异。在夏季,常规农业区总磷、磷酸盐、总有机碳浓度显著高于有机区域(Wilcoxon 检验, $P<0.05$,表 1),两区域总氮、氨氮、硝态氮、亚硝态氮、pH 值无显著差异。常规农业区电导率比有机农业区显著高出 $57.83 \mu\text{S}/\text{cm}$;且夏季总磷和磷酸盐浓度分别达 0.12 、 0.04 mg/L ,呈现较高水平,说明该区域池塘水体在夏季转变为高磷状态。

表 1 有机和常规农业区域池塘水体环境因子^{*}

Tab.1 Water environmental factors in ponds of organic and conventional farming regions

季节	农业区	TN/(mg/L)	TP/(mg/L)	PO ₄ ³⁻ -P/(mg/L)	NH ₃ -N/(mg/L)	NO ₃ ⁻ -N/(mg/L)	NO ₂ ⁻ -N/(mg/L)	TOC/(mg/L)	EC/(\mu\text{S}/\text{cm})	pH
冬季	有机	2.07±2.08	0.06±0.02	0.0033±0.002	0.52±1.17	0.83±1.74	0.036±0.026	8.28±2.40	248.04±59.43	7.42±0.302
	常规	1.58±0.83	0.06±0.03	0.0029±0.0019	0.403±0.41	0.48±0.403	0.042±0.029	7.54±1.14	273.14±72.28	7.64±0.18
	P 值	0.89	1	0.51	0.443	0.242	0.453	0.41	0.44	0.0704
夏季	有机	1.29±0.73	0.08±0.03	0.02±0.01	0.056±0.27	0.304±0.509	0.01±0.014	4±1.63	154.5±38.59	7.48±0.43
	常规	1.25±0.5	0.12±0.07	0.04±0.02	0.08±0.098	0.084±0.149	0.013±0.019	9.39±1.75	212.33±67.7	7.71±0.503
	P 值	0.63	0.024	0.0193	0.799	0.166	0.603	0	0.045	0.258

* 表中数据为平均值±标准差,因子间显著差异用加粗的 P 值表示,下同($P<0.05$, Wilcoxon 检验)。

2.2 有机和常规农业区池塘水体浮游植物群落特征

冬季有机和常规农业区池塘浮游植物平均密度分别为($6.52\times10^5\pm4.06\times10^4$)和($9.89\times10^5\pm4.38\times10^4$)cells/L,夏季分别为($6.06\times10^5\pm3.32\times10^4$)和($2.06\times10^6\pm1.76\times10^5$)cells/L,说明常规农业区细胞密度均较有机农业区高。夏季两区域各池塘浮游植物物种丰富度、Shannon-Wiener 多样性、Pielou 均匀度均较为相似

($P > 0.05$, 表 2). 冬季常规农业区各池塘浮游植物物种丰富度显著高于有机农业区, 且该区域蓝藻门、裸藻门 Shannon-Wiener 多样性指数也显著高于有机农业区水体($P < 0.05$, 表 2).

表 2 有机和常规农业区域各池塘浮游植物 alpha 多样性

Tab.2 Alpha diversity of phytoplankton in ponds of organic and conventional farming regions

季节	农业区	alpha 多样性			Shannon-Wiener 多样性指数					
		物种丰富度	Shannon-Wiener 多样性指数	Pielou 均匀度	蓝藻	硅藻	隐藻	裸藻	绿藻	甲藻
冬季	有机	24.67±5	2.17±0.47	0.68±0.12	0.32±0.36	1.78±0.25	0.48±0.30	0.37±0.44	1.34±0.74	未检出
	常规	29.42±7.53	2.24±0.46	0.67±0.1	0.71±0.36	1.45±0.36	0.44±0.31	0.85±0.57	1.68±0.61	未检出
	<i>P</i> 值	0.028	0.630	0.800	0.0362	0.101	0.622	0.0342	0.319	—
夏季	有机	20.33±7.74	2.10±0.59	0.71±0.16	0.55±0.55	1.34±0.54	0.22±0.36	0.82±0.61	1.30±0.8	0.01±0.04
	常规	21±6.88	1.99±0.28	0.67±0.1	0.43±0.49	1.31±0.63	0.31±0.42	0.61±0.62	1.21±0.76	0.16±0.25
	<i>P</i> 值	0.93	0.16	0.29	0.576	0.908	0.54	0.364	0.685	0.113

有机农业区浮游植物由冬季隐藻—绿藻型向夏季蓝藻—绿藻型转变; 常规管理区浮游植物由冬季隐藻—绿藻型向夏季蓝藻—硅藻型变化, 两区域均呈现出夏季隐藻门优势地位丧失, 蓝藻门优势地位升高的现象。具体而言, 在冬季, 有机农业管理区水体浮游植物共有 7 门 95 种, 其中绿藻门、隐藻门、硅藻门相对丰度较高, 分别为 30.7%、27.5% 和 26.1% (图 2a). 常规农业区水体浮游植物共有 7 门 111 种, 其中隐藻门、绿藻门、蓝藻门占优, 分别占 29.4%、24.9%、20.9% (图 2a), 其中蓝藻相对丰度为 20.9%, 较有机农业区域水体高出 8.1%. 在夏季, 有机和常规农业区水体浮游植物分别为 7 门 102 种、6 门 112 种, 两区域蓝藻门均是第一优势门 (图 2a), 平裂藻 (*Merismopedia*)、假鱼腥藻 (*Pseudoanabaena*)、颤藻 (*Oscillatoria*)、微囊藻 (*Microcystis*) 等属占优势地位。常规农业区裸藻、隐藻和硅藻相对丰度均比有机农业管理区高 (图 2a). 非度量多维尺度分析

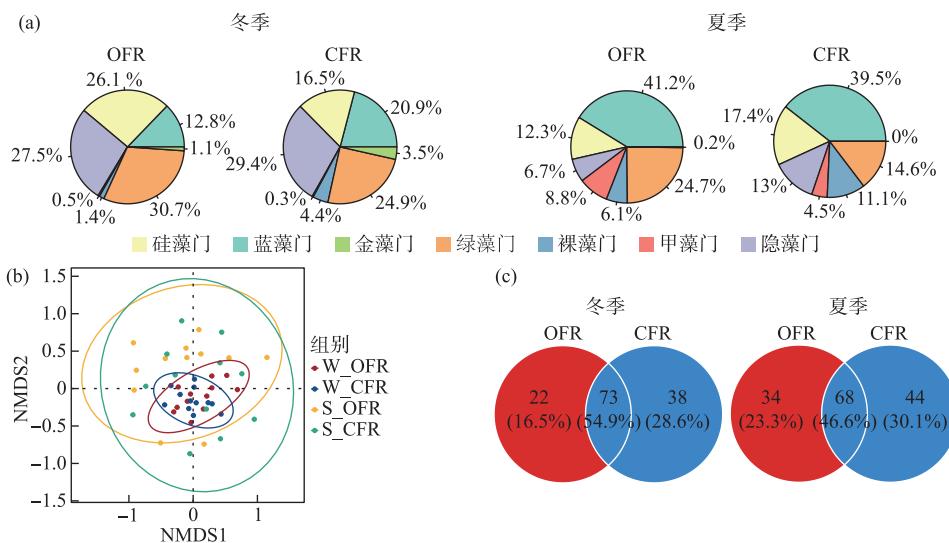


图 2 有机农业区域(OFR)和常规农业区域(CFR)水体浮游植物的群落结构比较:

(a) 浮游植物门类组成; (b) 非度量多维尺度分析结果(按照季节和区域分为 4 组, 其中 W 表示冬季, S 表示夏季); (c) 浮游植物物种组成差异

Fig.2 Phytoplankton community structure in organic farming regions (OFR) and conventional farming regions (CFR): (a) The relative abundance of phytoplankton at the phylum level;

(b) Non-metric multidimensional scaling (NMDS) in OFR and CFR in winter (W) and summer (S); (c) Differences of phytoplankton species composition in OFR and CFR

发现,同一季节两区域的群落结构没有明显差异,但冬夏两季群落结构差异明显,说明季节更迭强烈影响浮游植物群落结构(图 2b). 韦恩图(图 2c)结果显示,冬季有机和常规农业区浮游植物特有的种类分别为 22 个和 38 个;夏季有机农业区特有的种类有 34 个,多属于硅藻门和绿藻门,如双尖菱板藻 (*Hantzschia amphioxys*)、长刺根管藻 (*Rhizosolenia longiseta*)、角状新月藻 (*Closterium ceratium*)、芒状叉星鼓藻 (*Staurodesmus aristiferus*) 等;而拉式拟浮丝藻 (*Planktonthricoides raciborskii*)、放射性舟形藻 (*Navicula radiosa*) 等 44 个种类仅出现在常规农业区域水体,说明 2 种施肥方式造成了浮游植物的种类组成差异.

指示种分析(图 3)结果显示,共有 6 种藻能够显著区分有机和常规农业区浮游植物群落,其中谷皮菱形藻 (*Nitzschia palea*) 和梅尼小环藻 (*Cyclotella meneghiniana*) 的指示值在有机农业区较高,说明这两种藻在有机农业区水体适应性较高,有着高发生频率和高的相对丰度;而梭形裸藻 (*Euglena acus*)、针形纤维藻 (*Ankistrodesmus acicularis*)、肘状针杆藻 (*Synedra ulna*) 和狭形纤维藻 (*Ankistrodesmus angustus*) 的指示值在常规农业区较高,为常规农业区指示物种.

2.3 有机和常规农业区水体浮游植物群落与环境因子的相关性

Pearson 相关性分析表明,两季节环境因子对有机农业区浮游植物 alpha 多样性均无显著影响;但在常规农业区,冬季磷酸盐与浮游植物丰富度呈显著正相关,总氮和氨氮与物种均匀度呈显著正相关;夏季磷酸盐与浮游植物物种丰富度呈显著正相关,pH 值与物种均匀度呈显著负相关($P<0.05$,图 4).

冬季有机农业区蓝藻门相对丰度与氨氮浓度呈显著正相关,硅藻门相对丰度与总氮、硝态氮及亚硝态氮浓度呈显著正相关;而常规农业区硅藻门和金藻门相对丰度分别与总磷、总有机碳浓度呈显著正相关($P<0.05$,图 4a). 夏季有机农业区蓝藻门和硅藻门相对丰度分别与 pH 值呈显著正、负相关;而常规农业区域水体甲藻门相对丰度与硝态氮浓度呈显著正相关,裸藻门相对丰度分别与总氮和总磷浓度呈显著正相关($P<0.05$,图 4b).

Mantel 检验表明,有机农业区群落结构仅在冬季受到总氮和氨氮的显著影响. 常规农业区则在冬夏季受氮磷两类营养盐的交替影响,表现为冬季浮游植物群落相异性与总磷浓度呈显著正相关,而夏季与总氮和氨氮浓度呈显著正相关($P<0.05$, Mantel 检验,图 5).

3 讨论

本研究分别观测了冬夏季有机与常规农业区浮游植物多样性,发现冬季常规农业区浮游植物物种丰富度、蓝藻及裸藻门 Shannon-Wiener 多样性指数均显著高于有机农业区域,而夏季 2 个池塘 alpha 多样性未表现出显著的区域差异. 夏季池塘蓝藻暴发,蓝藻占据其他藻类的生态位,通过种间竞争抑制其他藻类^[27],形成绝对单一的优势种,使水体浮游植物物种多样性和均匀度降低^[28-29],从而削弱了不同农业管理对浮游植物多样性的影响. 本研究还发现常规农业管理显著提高了蓝藻、裸藻多样性,这可能是由于化肥、农药过渡施用,导致淋溶进水体的氮磷营养物质增多,创造了利于蓝藻、裸藻类群生长的水体环境. 虽然有机农业管理的积极效应已经被广泛报道^[30-33],但农业系统对生物多样性的影响是复杂的,且尚存在争议^[34-35]. 比如,有研究发现有机农业系统的土壤细菌数量明显高于常规农业,而物种丰富度和辛普森多样性指数却无明显差异^[36]. 有学者评估鱼塘浮游生物对有机肥料和无机肥料添加的反应,发现无机肥料池塘的叶绿素 a、叶黄素、岩藻黄素明显高于有机肥池塘,但藻类种群在组间没有差异^[37]. 因此,仍需开展更多关于有机和常规农业对生物多样性的比较研究,通过多时间多空间尺度的季节性群落动态特征的深入调查和监测,全面地揭示浮游植物多样性对不同施肥管理的响应.

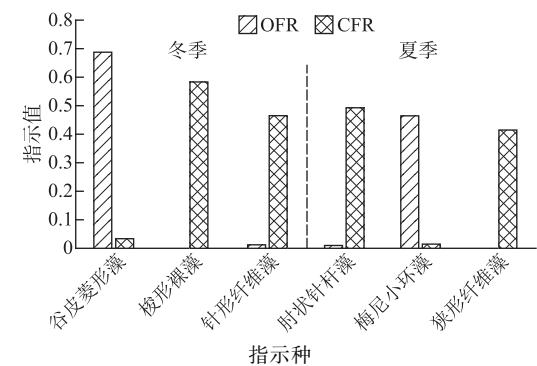


图 3 主要的指示种及其指示值(指示值, $P<0.05$)

Fig.3 The analysis of main indicator species and its indicator value (Indicator value, $P<0.05$)

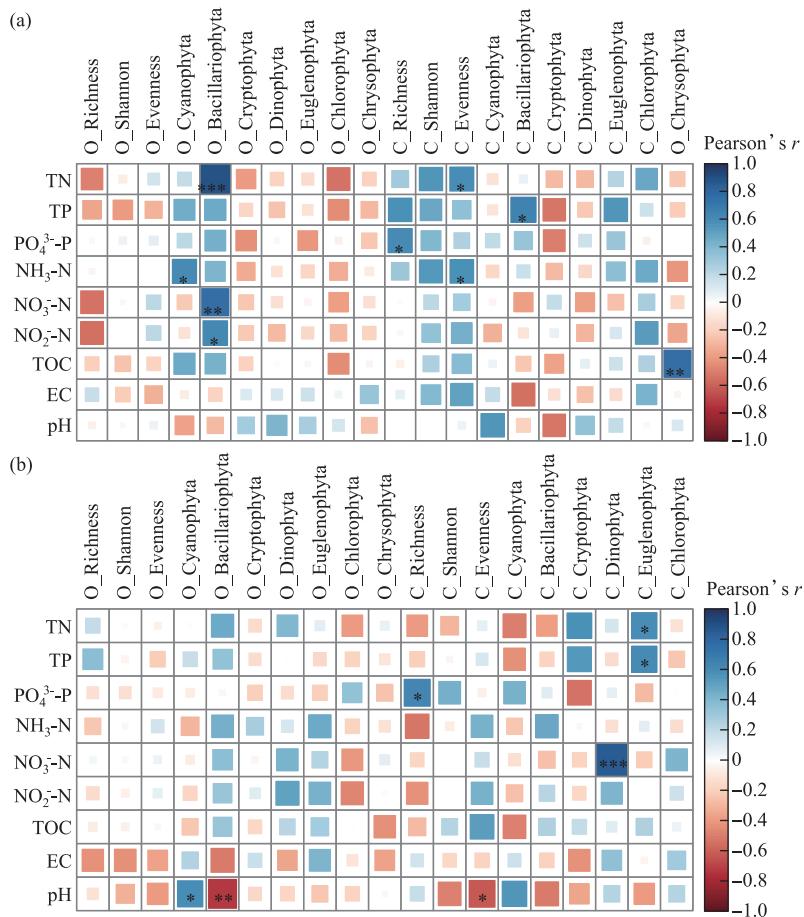


图4 冬(a)、夏(b)两季有机和常规农业区环境因子与浮游植物物种丰富度、Shannon-Wiener多样性、Pielou均匀度及藻类各门类相对丰度的Pearson相关性
(前缀O和C分别表示有机农业区域(OFR)和常规农业区域(CFR))

Fig.4 Pearson's correlation between environmental factors and species richness, Shannon-Wiener diversity, Pielou's evenness, and phylum relative abundance in organic farming regions (OFR) and conventional farming regions (CFR) in winter (a) and summer (b) (The prefix O and C denotes OFR and CFR, respectively)

本次调查中,两区域浮游植物群落整体上均呈现出冬季隐藻向夏季蓝藻变化的趋势。这主要是由于以嗜蚀隐藻(*Cryptomonas erosa* Ehr)和卵形隐藻(*Cryptomonas ovata*)为代表的隐藻门适应于冬季低温、低光照条件,从而成为该季节的优势种类。而夏季降雨增多,营养物质淋溶进入水体,有机和常规农业水体的总磷浓度整体升高,分别达0.08和0.12 mg/L,较高水平的磷浓度和高温促进蓝藻生长,蓝藻固然成为夏季优势门类^[38]。所观察到的蓝藻主要以颤藻、细小平裂藻(*Merismopedia tenuissima*)、假鱼腥藻、微小色球藻(*Chroococcus minutus*)、蓝纤维藻(*Dactylococcopsis*)等所组成。根据Reynolds和Padisák等对富营养化浅水湖泊浮游植物功能群的研究,夏季优势蓝藻种类通常来自颤藻目;平裂藻属在贫到中营养、分层、上层水体环境下适宜其生长繁殖;假鱼腥藻易在均匀浑浊水体、较高营养盐、受光限制的暗环境条件下获得优势^[39-40]。此外,裸藻通常发生于从农田或污水中获得有机质的池塘或临时形成的水体^[41],农药化肥的过度使用,是裸藻水华暴发的物质基础。本研究发现两季节常规农业水体裸藻门相对丰度均较有机农业区高,其中以囊裸

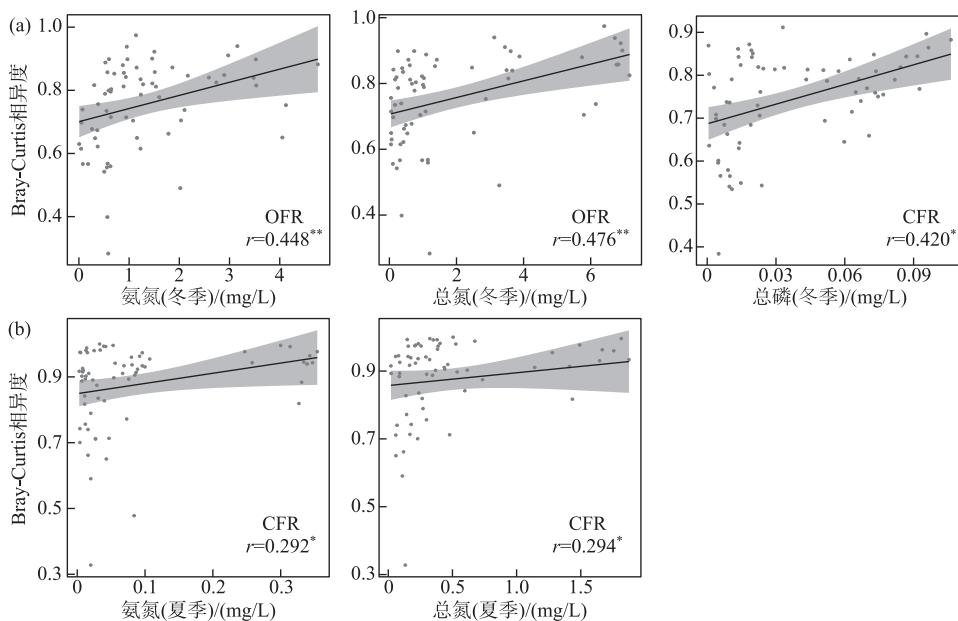


图 5 冬季(a)和夏季(b)浮游植物群落结构变化与环境因子的 Mantel 检验

Fig.5 Mantel test between phytoplankton community dissimilarity and environmental factors in winter (a) and summer(b)

藻(*Trachelomonas*)和扁裸藻(*Phacus*)占优势,该2种藻常出现于中或富营养及有机物污染的水体^[40],因此该常规农业区化肥的使用可能提供了裸藻藻华发生的潜在环境条件。

指示物种通常是指对某一地区的环境特征具有某种指示特性的物种,根据该物种的生存状况来判断环境污染状况^[42]。与上述定性描述不同,本文通过IndVal分析计算各物种的指示值确定了不同区域的指示物种,其特点在于通过指示值的计算更符合统计学意义,并综合每个物种在两种生境下的发生率和相对丰度,兼顾生境间高丰度物种和低丰度物种,在此基础上比较相应的指示值,以凸显同一物种在适应两种生境的差异,从而找到衡量两区域群落差异的具体物种^[43-45]。本研究发现有机农业区谷皮菱形藻、梅尼小环藻的指示值显著高于常规农业区,显示出高的相对丰度和高发生率,是该区域优势种类。这2种藻是我国淡水生境广布种,通常高氮有利于维持此类藻的持续生长^[46],提示有机农业水体可能有较高的氮浓度。常规农业区梭形裸藻、针形纤维藻、肘状针杆藻、狭形纤维藻的指示值均显著高于有机农业区,说明其在常规农业区占有优势地位,但这4种藻为富营养型种类,对高氮磷环境有较强适应性^[40],提示该区域水体可能有较高的氮磷浓度。综合浮游植物指示作用及氮磷营养盐指标,常规农业区水体的外源营养盐输入可能更强,内源释放潜力大,从而加剧水体富营养化进程。

浮游植物群落分布特征与水体环境因子及其自身生存策略密切相关^[47]。就浮游植物多样性而言,本研究发现有机农业区多样性与环境因子的相关性不显著,而在常规农业区多样性则与营养盐具有显著关联。这表现为,常规农业区两季节物种丰富度与磷酸盐浓度均呈显著正相关,这可能是由于常规农业区常年氮肥施用,加剧面源污染,淋溶进水体的氮元素增多^[48],磷元素成为限制性元素,从而成为浮游生物多样性的重要影响因素。其次,常规农业区Pielou均匀度在冬季与总氮、氨氮浓度呈显著正相关,而夏季却与pH值呈显著负相关,这归因于夏季水体蓝藻暴发,光合作用消耗大量的二氧化碳,使水体中的pH值升高,从而影响浮游植物物种种类分布^[49]。就浮游植物群落结构而言,Mantel检验表明有机农业区群落结构仅在冬季受到营养盐总氮和氨氮浓度的显著影响;而常规农业区在冬夏季受氮磷两类营养盐的交替影响,即冬季浮游植物群落相异性与总磷浓度呈显著正相关,而夏季与总氮和氨氮浓度呈显著正相关。这一现象可能与冬夏季营养盐限制有关,根据Redfield定律^[50],当氮磷比大于16:1时,表现为磷限制,反之,为氮限制。冬季常规农

业区氮磷比达 26.3, 属于磷限制, 浮游植物群落结构受磷影响较大; 夏季氮磷比明显降低, 为 10.4, 磷外源输入及内源释放导致磷增加, 此时转变为氮限制, 浮游植物群落结构受氮影响较大。综上所述, 浮游植物对氮磷等营养元素的响应十分敏感, 因此在控制农业面源污染时, 应该受到更多的关注。

最后, 根据本文研究结果, 针对农田氮磷流失和管理, 作以下建议:

1) 利用浮游植物对农业水体进行环境评价, 可与其他水质评价方法互相印证和补充, 有助于布局建设农业面源污染重点监测体系, 为防控农田氮磷流失提供理论基础。

2) 需要进一步揭示施肥方式氮磷流失的动态特征及变化机理, 长期定位研究不同施肥管理对水生态系统的影响。

3) 进一步优化施肥方式, 科学设置施肥时间、次数和施肥量等, 以有效减少养分损失、提高肥料利用率。

4 结论

冬季水体环境因子区域差异不明显, 但夏季常规农业区总磷、磷酸盐、电导率显著高于有机农业区, 水体转变为高磷状态。常规农业区的蓝藻、裸藻相对丰度及多样性均处于较高水平, 表明该区域营养盐和有机物浓度较高。该推论进一步被指示物种分析所证实, 即常规农业区的梭形裸藻等富营养型藻类的指示值显著高于有机农业区。此外, 氮磷营养盐仅显著影响常规农业区浮游植物 alpha 多样性, 但不显著影响有机农业区。氮磷元素也是影响两个区域浮游植物丰度及群落结构变化的主要因素。综上, 根据指示物种及氮磷营养盐等综合分析, 本文结果表明常规农业区水体富营养化程度较有机农业区严重, 应予以重视。

致谢: 感谢江苏句容市戴庄村村委会、句容市天王镇戴庄有机农业专业合作社赵亚夫研究员在采样和研究过程中提供的支持与帮助, 感谢李纪文、韩磊等在样品采集和环境数据获取中提供的帮助。

5 参考文献

- [1] Zhang KN, Yu QG, Ye J et al. Effect of substituting chemical fertilizer with organic fertilizer on soil fertility status, soil N and P loss of farmland. *Journal of Zhejiang Agricultural Sciences*, 2019, **60**(7): 1154-1158. [张康宁, 俞巧钢, 叶静等. 有机替代对农田土壤肥力及氮磷流失的影响. *浙江农业科学*, 2019, **60**(7): 1154-1158.]
- [2] Zhang SJ, Wang L, Ma F et al. Reducing nitrogen runoff from paddy fields with arbuscular mycorrhizal fungi under different fertilizer regimes. *Journal of Environmental Sciences*, 2016, **46**: 92-100. DOI: 10.1016/j.jes.2015.12.024.
- [3] Sun C, Zhou HZ, Chen L et al. The pollution risk assessment of nitrogen and phosphorus loss in surface runoff from farmland fertilizer. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, **36**(7): 1266-1273. DOI: 10.11654/jaes.2017-0800. [孙铖, 周华真, 陈磊等. 农田化肥氮磷地表径流污染风险评估. *农业环境科学学报*, 2017, **36**(7): 1266-1273.]
- [4] Peng C, Zhu P, Niu HH et al. Nitrogen and phosphorus loss of farmland agricultural non-point source pollution and its prevention. *Chinese Journal of Soil Science*, 2010, **41**(2): 508-512. [彭畅, 朱平, 牛红红等. 农田氮磷流失与农业非点源污染及其防治. *土壤通报*, 2010, **41**(2): 508-512.]
- [5] Wang S, Zhu CX, Geng B. Research advancement in loss pathways of nitrogen and phosphorus in soils. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2013, **29**(33): 22-25. [王森, 朱昌雄, 耿兵. 土壤氮磷流失途径的研究进展. *中国农学通报*, 2013, **29**(33): 22-25.]
- [6] Wang L, Li WX. Thoughts on the development of organic agriculture in Yangtze River Basin to control agriculture non-point source pollution. *Technology and Economy of Changjiang*, 2020, **4**(2): 31-34. [王磊, 李维新. 长江流域发展环水有机农业控制农业面源污染的思考. *长江技术经济*, 2020, **4**(2): 31-34.]
- [7] Xi YG, Chen RB, Xu X et al. Study on comparative runoff pollution of organic and conventional rice fields. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2010, **38**(29): 16412-16414, 16443. [席运官, 陈瑞冰, 徐欣等. 有机与常规稻田排水污染比较研究. *安徽农业科学*, 2010, **38**(29): 16412-16414, 16443.]
- [8] Chen JR, Chen XF, Qin WJ et al. The effect of Chinese milk vetch application on dynamic changes of nitrogen and phosphorus concentrations in paddy field surface water. *Ecology and Environmental Sciences*, 2020, **29**(7): 1352-1358. [陈静蕊, 陈晓芬, 秦文婧等. 紫云英还田对江西早稻季田面水氮磷动态的影响. *生态环境学报*, 2020, **29**(7): 1352-1358.]
- [9] Liu HJ, Chen YW, Sun GF et al. Effects of different organic-inorganic fertilizer combination ratios on rice yield and nutri-

- ent loss with surface runoff. *Chinese Journal of Ecology*, 2017, **36**(2): 405-412. DOI: 10.13292/j.1000-4890.201702.003. [刘红江, 陈虞雯, 孙国峰等. 有机肥-无机肥不同配施比例对水稻产量和农田养分流失的影响. 生态学杂志, 2017, **36**(2): 405-412.]
- [10] Kazamia E, Helliwell KE, Purton S et al. How mutualisms arise in phytoplankton communities: Building eco-evolutionary principles for aquatic microbes. *Ecology Letters*, 2016, **19**(7): 810-822. DOI: 10.1111/ele.12615.
- [11] Zhao SQ, Fan YC, Dai YR et al. Responses of phytoplankton community to abiotic environmental variables with the mitigation of eutrophication: A case study of Donghu Lake, Wuhan City. *J Lake Sci*, 2019, **31**(5): 1310-1319. DOI: 10.18307/2019.0520. [赵思琪, 范垚城, 代嫣然等. 水体富营养化改善过程中浮游植物群落对非生物环境因子的响应: 以武汉东湖为例. 湖泊科学, 2019, **31**(5): 1310-1319.]
- [12] Wang HB, Huang XL, Wu JS et al. Effect of agricultural non-point source pollution on plankton and zoobenthos communities in a reservoir in morin Dawa daur autonomous banner. *Chinese Journal of Fisheries*, 2019, **32**(4): 55-62. [王慧博, 黄晓丽, 吴计生等. 农业面源污染对莫力达瓦旗某水库浮游生物和底栖动物群落结构的影响. 水产学杂志, 2019, **32**(4): 55-62.]
- [13] Han XX. The main source of nitrogen in Shahe Reservoir and its influence on phytoplankton [Dissertation]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2015. [韩晓霞. 沙河水库氮素主要来源及其对浮游植物的影响分析[学位论文]. 南京: 南京农业大学, 2015.]
- [14] Guo NC, Ma YH, Li K et al. Phytoplankton community in the ecological interception ditch approach to the eastern Lake Chaohu. *J Lake Sci*, 2014, **26**(2): 277-287. DOI: 10.18307/2014.0215. [郭匿春, 马友华, 李堃等. 东巢湖湖滨农田生态拦截沟中浮游植物群落结构. 湖泊科学, 2014, **26**(2): 277-287.]
- [15] Wang L, Li G, Xi YG et al. Investigation on animal diversity in different paddy fields with organic farming: A case study in Daizhuang of Jurong County, Jiangsu Province, China. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2018, **34**(7): 614-621. [王磊, 李刚, 席运官等. 有机种植方式对稻田动物多样性的影响: 以句容戴庄为例. 生态与农村环境学报, 2018, **34**(7): 614-621.]
- [16] Liu YB, Liu ZT, Liu WZ et al. Overall evaluation of organic paddy soil fertility. *Jiangsu Journal of Agricultural Sciences*, 2013, **29**(6): 1517-1519. [刘亚柏, 刘照亭, 刘伟忠等. 有机水稻田土壤肥力综合评价. 江苏农业学报, 2013, **29**(6): 1517-1519.]
- [17] Ma YQ, Huang GQ. Effects of combined application of Chinese milk vetch(*Astragalus sinicus* L.) and nitrogen fertilizer on paddy soil carbon pool. *Chinese Journal of Ecology*, 2019, **38**(1): 129-135. DOI: 10.13292/j.1000-4890.201901.016. [马艳芹, 黄国勤. 紫云英还田配施氮肥对稻田土壤碳库的影响. 生态学杂志, 2019, **38**(1): 129-135.]
- [18] Zhang F. Nitrogen and phosphorus surplus of double-rice cropping system under incorporation of Chinese milk vetch and rice straws. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2021, **27**(8): 1376-1387. DOI: 10.11674/zwyf.2021060. [张帆. 紫云英与水稻秸秆联合还田下双季稻田土壤氮磷平衡状况及化肥减施策略. 植物营养与肥料学报, 2021, **27**(8): 1376-1387.]
- [19] Hu HJ, Wei YX eds. The freshwater algae of China: Systematics, taxonomy and ecology. Beijing: Science Press, 2006. [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.]
- [20] Dixon P. VEGAN, a package of R functions for community ecology. *Journal of Vegetation Science*, 2003, **14**(6): 927-930. DOI: 10.1111/j.1654-1103.2003.tb02228.x.
- [21] Kassambara A. rstatix: Pipe-friendly framework for basic statistical tests. R package version 0.6.0, 2020. <https://CRAN.R-project.org/package=rstatix>.
- [22] Roberts DW. labdsv: Ordination and multivariate analysis for ecology. 2019. <https://CRAN.R-project.org/package=labdsv>.
- [23] de Cáceres M, Legendre P. Associations between species and groups of sites: Indices and statistical inference. *Ecology*, 2009, **90**(12): 3566-3574. DOI: 10.1890/08-1823.1.
- [24] Smouse PE, Long JC, Sokal RR. Multiple regression and correlation extensions of the mantel test of matrix correspondence. *Systematic Biology*, 1986, **35**(4): 627-632. DOI: 10.2307/2413122.
- [25] Oksanen J, Blanchet FG, Kindt R et al. Community ecology package. R package version, 2013, 2. <https://cran.r-project.org/web/packages/vegan/index.html>.
- [26] Team RC. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna. 2020.

- https://www.R-project.org/.
- [27] Qin BQ. Approaches to mechanisms and control of eutrophication of shallow lakes in the middle and lower reaches of the yangze river. *J Lake Sci*, 2002, **14**(3) : 193-202. DOI: 10.18307/2002.0301. [秦伯强. 长江中下游浅水湖泊富营养化发生机制与控制途径初探. 湖泊科学, 2002, 14(3) : 193-202.]
 - [28] Zhang Y, Ma XF, Guo FF et al. Community structures of phytoplankton and their relationships with environmental factors in the Jinshahe Reservoir, Hubei Province. *J Lake Sci*, 2015, **27**(5) : 902-910. DOI: 10.18307/2015.0517. [张云, 马徐发, 郭飞飞等. 湖北金沙河水库浮游植物群落结构及其与水环境因子的关系. 湖泊科学, 2015, 27(5) : 902-910.]
 - [29] Liu SJ, Ji ZY, Pu FG et al. On phytoplankton community composition structure and biological assessment of water trophic state in Xingyun Lake. *Journal of Safety and Environment*, 2019, **19**(4) : 1439-1447. [刘绍俊, 吉正元, 普发贵等. 星云湖浮游植物群落结构及水体营养状态生物评价. 安全与环境学报, 2019, 19(4) : 1439-1447.]
 - [30] Hartmann M, Frey B, Mayer J et al. Distinct soil microbial diversity under long-term organic and conventional farming. *The ISME Journal*, 2015, **9**(5) : 1177-1194. DOI: 10.1038/ismej.2014.210.
 - [31] Sun RB, Zhang XX, Guo XS et al. Bacterial diversity in soils subjected to long-term chemical fertilization can be more stably maintained with the addition of livestock manure than wheat straw. *Soil Biology and Biochemistry*, 2015, **88** : 9-18. DOI: 10.1016/j.soilbio.2015.05.007.
 - [32] Li F, Chen L, Zhang JB et al. Bacterial community structure after long-term organic and inorganic fertilization reveals important associations between soil nutrients and specific taxa involved in nutrient transformations. *Frontiers in Microbiology*, 2017, **8** : 187. DOI: 10.3389/fmicb.2017.00187.
 - [33] Francioli D, Schulz E, Lentendu G et al. Mineral vs. organic amendments: Microbial community structure, activity and abundance of agriculturally relevant microbes are driven by long-term fertilization strategies. *Frontiers in Microbiology*, 2016, **7** : 1446. DOI: 10.3389/fmicb.2016.01446.
 - [34] Kleijn D, Berendse F, Smit R et al. Agri-environment schemes do not effectively protect biodiversity in Dutch agricultural landscapes. *Nature*, 2001, **413**(6857) : 723-725. DOI: 10.1038/35099540.
 - [35] Lupatini M, Korthals GW, de Hollander M et al. Soil microbiome is more heterogeneous in organic than in conventional farming system. *Frontiers in Microbiology*, 2017, **7** : 2064. DOI: 10.3389/fmicb.2016.02064.
 - [36] Pershina E, Valkonen J, Kurki P et al. Comparative analysis of prokaryotic communities associated with organic and conventional farming systems. *PLoS One*, 2015, **10**(12) : e0145072. DOI: 10.1371/journal.pone.0145072.
 - [37] Mischke CC, Zimba PV. Plankton community responses in earthen channel catfish nursery ponds under various fertilization regimes. *Aquaculture*, 2004, **233**(1/2/3/4) : 219-235. DOI: 10.1016/j.aquaculture.2003.09.044.
 - [38] Li J, An SQ, Cheng XL et al. Advances in assessment of ecosystem health. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2001, **25**(6) : 641-647. [李瑾, 安树青, 程小莉等. 生态系统健康评价的研究进展. 植物生态学报, 2001, 25(6) : 641-647.]
 - [39] Antonelli L, Foata J, Quilichini Y et al. Influence of season and site location on European cultured sea bass parasites in Corsican fish farms using indicator species analysis (IndVal). *Parasitology Research*, 2016, **115**(2) : 561-568. DOI: 10.1007/s00436-015-4772-9.
 - [40] Mouillet D, Culoli JM, Chi TD. Indicator species analysis as a test of non-random distribution of species in the context of marine protected areas. *Environmental Conservation*, 2002, **29**(3) : 385-390. DOI: 10.1017/s0376892902000267.
 - [41] Dufrêne M, Legendre P. Species assemblages and indicator species: The need for a flexible asymmetrical approach. *Eco-logical Monographs*, 1997, **67**(3) : 345-366. DOI: 10.1890/0012-9615(1997)067[0345:SAAIST]2.0.CO;2.
 - [42] Ma Y, Lu XX, Fan YW. Correlation between phytoplankton community patterns and environmental factors in Harbin section of the Songhua River. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, **41**(1) : 224-234. [马煜, 陆欣鑫, 范亚文. 松花江哈尔滨段浮游植物群落格局及其与环境因子的相关性. 生态学报, 2021, 41(1) : 224-234. DOI: 10.5846/stxb201909262022.]
 - [43] Padisák J, Crossetti LO, Naselli-Flores L. Use and misuse in the application of the phytoplankton functional classification: A critical review with updates. *Hydrobiologia*, 2009, **621**(1) : 1-19. DOI: 10.1007/s10750-008-9645-0.
 - [44] Ren J, Zhou T, Zhu GW et al. Community structure characteristics of diatom in reservoirs located in the south of Jiangsu Province, China and its control factors. *Environmental Science*, 2016, **37**(5) : 1742-1753. DOI: 10.13227/j.hjkx.2016.05.019. [任杰, 周涛, 朱广伟等. 苏南水库硅藻群落结构特征及其控制因素. 环境科学, 2016, 37(5) : 1742-1753.]

- 1742-1753.]
- [45] Reynolds CS, Huszar V, Kruk C et al. Towards a functional classification of the freshwater phytoplankton. *Journal of Plankton Research*, 2002, **24**(5) : 417-428. DOI: 10.1093/plankt/24.5.417.
 - [46] Yang W, Zhu JY, Lu KH et al. The establishment, development and application of classification approach of freshwater phytoplankton based on the functional group: A review. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2014, **25**(6) : 1833-1840. DOI: 10.13287/j.1001-9332.20140409.010. [杨文, 朱津永, 陆开宏等. 淡水浮游植物功能类群分类法的提出、发展及应用. 应用生态学报, 2014, **25**(6) : 1833-1840.]
 - [47] Reynolds CS, Padisák J, Sommer U. Intermediate disturbance in the ecology of phytoplankton and the maintenance of species diversity: A synthesis. *Hydrobiologia*, 1993, **249**(1/2/3) : 183-188. DOI: 10.1007/BF00008853.
 - [48] Zhu GW. Spatio-temporal distribution pattern of water quality in Lake Taihu and its relation with cyanobacterial blooms. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2009, **18**(5) : 439-445. [朱广伟. 太湖水质的时空分异特征及其与水华的关系. 长江流域资源与环境, 2009, **18**(5) : 439-445.]
 - [49] Lin YQ, Jiao CC, Shi HH et al. Effects of algae blooms on nutrients in the water and sediments of Mochou Lake. *Environmental Science & Technology*, 2019, **42**(2) : 1-11. [林玉清, 焦聪聪, 施鸿昊等. 蓝藻暴发对莫愁湖水体和沉积物营养盐的影响. 环境科学与技术, 2019, **42**(2) : 1-11.]
 - [50] Redfield AC. The biological control of chemical factors in the environment. *Science Progress*, 1960, **11** : 150-170.