

新安江(安徽段)及其支流丰水期浮游植物功能群

胡长玉 方建新 李伟 王亚坤 彭婷 王丽 钱丽萍*

(黄山学院生命与环境科学学院, 安徽黄山 245041)

摘要 于2016年、2017年丰水期对新安江(安徽段)及其支流进行水样采集,在分析浮游植物群落组成的基础上,进行了功能群划分。结果表明:调查断面的浮游植物隶属于6门55属,以硅藻门、蓝藻门和绿藻门为主要优势门类,其中硅藻门中舟形藻属、异极藻属、针杆藻属和小环藻属,绿藻门的新月藻属以及裸藻门的裸藻属具有较高的相对丰度;聚类分析表明,不同采样断面、不同年份间浮游植物群落结构存在一定差异;全部河流断面中,优势藻类共划分为27个功能群,其中MP、D、B、J、P、Tb和W1在所有采样断面均有分布,MP、D、B和Tb功能群不仅分布频率高,而且具有较高的相对丰度;整体上,调查断面水质介于I类与III类之间,个别断面水质低于III类,依据浮游植物优势功能群划分所对应的水质多为低或中等营养状态,与测定的水化学参数具有较好的对应关系;RDA分析表明,优势功能群与水体氨氮、总氮、总磷和 COD_{Mn} 相关;浮游植物功能群能很好地指示新安江及其支流的河流生境特征。从生物学与水环境化学的角度进行水质监测,可为准确掌握新安江流域水质变动以及水生态保护提供基础数据与理论依据。

关键词 新安江;浮游植物;功能群;水质

Phytoplankton functional groups of Xin'anjiang River Basin (Anhui section) and its tributaries in flood season. HU Chang-yu, FANG Jian-xin, LI Wei, WANG Ya-kun, PENG Ting, WANG Li, QIAN Li-ping* (College of Life and Environmental Sciences, Huangshan University, Huangshan 245041, Anhui, China).

Abstract: To understand the characteristics of phytoplankton community structure in Xin'anjiang River Basin (Anhui section) and its tributaries, water samples were collected from 15 stations in both main stream and tributaries in flood season of 2016 and 2017. The functional groups were classified based on the phytoplankton community composition. The results showed that phytoplankton belonged to six phyla and fifty-five genera. Species in Bacillariophyta, Cyanophyta and Chlorophyta were in dominant groups. Higher relative abundance was found in *Navicula*, *Gomphonema*, *Synedra* and *Cyclotella* in Bacillariophyta, as well as *Closterium* in Chlorophyta and *Euglena* in Euglenophyta. There were some differences in phytoplankton community structure between different sampling stations and different years. Across all river stations, the dominant species could be classified into 27 functional groups, among which MP, D, B, J, P, Tb and W1 were distributed in all sampling stations. The MP, D, B and Tb functional groups had both higher frequency of distribution and higher relative abundance. The low or mesotrophic status of nutrients reflected by dominant phytoplankton functional groups had well correspondence with the measured water chemical parameters. Water quality in studied stations fell between type I and type III, with a few stations falling to type III. Results of redundancy analysis (RDA) showed that $\text{NH}_3\text{-N}$, TN, TP, and COD_{Mn} were the key environmental drivers determining the dominant phytoplankton groups. Our results suggest that phytoplankton functional groups can indicate the habitat charac-

国家自然科学基金项目(31600317)、安徽省教育厅高校人文社科研究重点(非遗基地)(SK2016A0885)、安徽省教育厅自然科学一般项目(KJHS2018B08)、高校优秀青年骨干人才国外访学项目(gxfx2017109)和安徽省大学生创新创业项目(201610375058、201710375029和201710375016)资助。

收稿日期: 2018-06-27 接受日期: 2018-12-16

* 通讯作者 E-mail: lpq@hsu.edu.cn

teristics of Xin'anjiang River Basin and its tributaries. Combining phytoplankton functional groups and water chemical parameter measurement can provide sound data and basic theory for water quality monitoring and aquatic ecosystem protection in Xin'anjiang River Basin.

Key words: Xin'anjiang River; phytoplankton; functional group; water quality.

来自工业废水、生活污水和农田退水中的大量污染物质进入河流后会导致河流生态系统退化,其最为直接的表现就是河流水质恶化、生物多样性降低,某些敏感物种消失,而一些耐性物种数量增加。浮游植物作为河流生态系统中重要的组成部分,在维持河流生态系统物质循环和能量流动方面扮演重要角色,其群落结构的变化能够有效指示河流生态系统健康状况(田永强,2015;宋楠等,2016;谭巧等,2017)。

浮游植物作为一类体型较小的植物体,其群落结构受到诸多因素的影响,既有非生物因素如温度(吴芳仪等,2016;肖小雨等,2016;刘媛等,2017)、透明度(刘媛等,2017)、溶解氧(赵秀侠等,2017)、盐度(徐玉萍等,2014)、营养盐(欧腾等,2014;王博涵等,2015;Yang *et al.*, 2018)、pH(李伟等,2016;胡忠军等,2017)、光强与光质(Li *et al.*, 2017)、污染物(王丽等,2013)等,也有生物因素如大型维管植物(姚远等,2016)、浮游动物(张曼等,2015)等。较小的体型和较多的影响因素意味着浮游植物对生活区域各类生物和非生物要素的反应较为敏感,浮游植物群落结构特征(种类组成、丰度等)的变动通常被用做评估水体生态系统健康状况的重要指标。目前,国内关于淡水浮游植物研究多集中于浮游植物群落结构及其影响因素以及基于浮游植物多样性的水质评价等方面(潘鸿等,2016;熊莲等,2016;汪炎炎等,2017;彭凯等,2018)。为了进一步阐明浮游植物群落结构组成与环境因子之间的内在联系,Reynolds等(2002)提出了对淡水浮游植物进行功能群划分,将能够反映特定生境生态特征的种类(生活习性与生存策略相似)归纳为同一个功能群,Padisák等(2009)进一步对该方法的使用进行了总结,该方法在国内也得到一定的应用(蓝于倩等,2015;闵文武等,2015;刘乾甫等,2018),但涉及不同生境类型、不同水体特征的相关研究不多。

新安江发源于安徽省黄山市休宁县六股尖,地跨皖浙两省,主源率水与支流横江于屯溪汇合始称新安江,后经千岛湖(新安江水库)、富春江、钱塘江在杭州湾入东海。新安江水系为安徽省第三大水

系,新安江水质状况不仅事关黄山市的生态文明建设成效,更是直接影响到杭州市民的饮水安全。作为中国为数不多的水质状况较好的淡水水系,在当前中国生态文明建设大力推进以及新安江生态补偿机制建立(国内首个跨省流域生态补偿试点区)这一背景下,监测与保护新安江水体环境与生态安全意义重大。然而,与安徽省境内的长江水系和淮河水系相比,目前关于新安江水系湿地生物多样性研究相对薄弱。本研究以新安江干流(安徽段)及其支流为对象,调查丰水期河流不同断面浮游植物群落结构组成,并通过对不同断面浮游植物功能群分析,揭示新安江干流(安徽段)及其支流水环境特征,为流域内生态系统的安全及保护提供基础数据和理论支撑。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

新安江流域总面积 11674 km²,安徽省境内的面积为 6261 km²,跨黄山和宣城市,在黄山市流域面积占总面积的 53.6%。新安江流域干流总长为 359 km,其中黄山市境内 242.3 km,占 67.5%。新安江水系发达,支流众多,一级支流有率水、横江、练江等,安徽省和浙江省省界断面(街口)多年平均出境水量约为 65.66×10⁸ m³,整体上水质长期可达地表水河流Ⅲ类或以上标准。本研究选择主要干流、支流进行样本采集。

1.2 样本采集与分析

1.2.1 采样断面布设位置 为使所采浮游植物样本具有代表性,在河流源头交汇处、入水口等典型区域设置采样点,非典型区域按适当间距设点,每个采样点平行采样 3 个。采样点的具体设置如下:新安江流域主干河道及其支流共计设置采样点 15 个(图 1)。其中横江河段采样点分别为漳水渔亭(1 号点)、齐云山漫水简易桥(2 号点)、张村拦河坝(3 号点)、典口简易桥(4 号点);率水河段采样点分别为三汉水(龙湾大桥,5 号点)、高枧(6 号点)、文峰桥(7 号点);练江(11 号点)及其支流富资河(8 号点)、布射水(9 号点)、杨之河(10 号点);新安江干

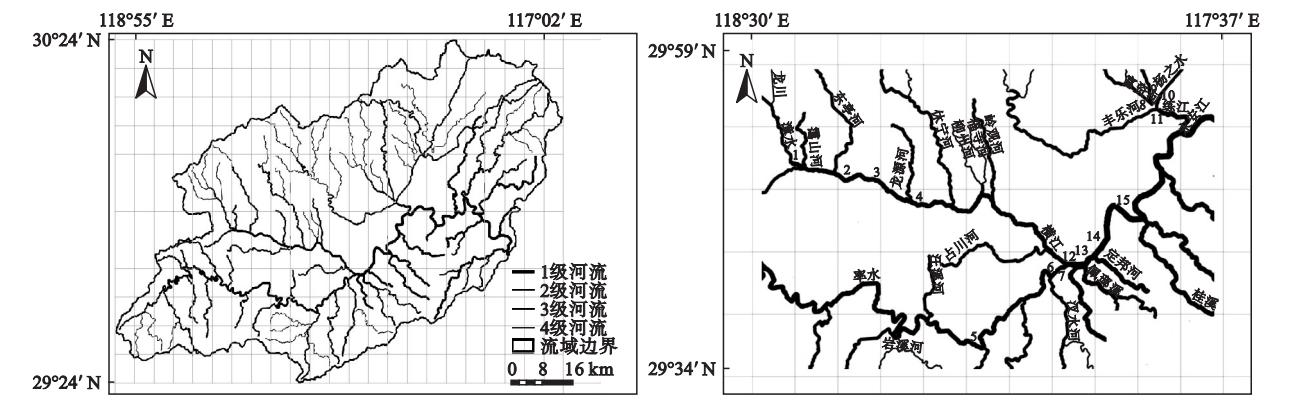


图 1 新安江(安徽段)及其支流采样断面分布
Fig.1 Hydrograph of Xin'anjiang River Basin (Anhui section) and its tributaries and the distribution of sampling sections

流段采样点分别为新安人家(12 号点)、照壁(13 号点)、锚泊区(14 号点)、花山(15 号点)。

1.2.2 水样采集与测定方法 于 2016 年 6 月和 2017 年 9 月丰水期进行采样。化学需氧量(COD_{Mn})、氨氮(NH₃-N)、总氮(TN)及总磷(TP)的测定,参照《水和废水监测(第四版)》进行。溶解氧(DO)及 pH 使用便携式溶氧、pH 测定仪(SG9-FK2, METTLER TOLEDO)进行测定。

1.2.3 浮游植物样本采集与鉴定 采样过程均严格按照 2010 版农业部《淡水浮游生物调查技术规范》进行,使用 25 号浮游生物网对表层水体浮游植物进行采集,5%的甲醛进行固定后带回实验室进行沉降、观察。依据《中国淡水藻类:系统、分类及生态》(胡鸿钧等,2006)和《藻类学》(福迪,1980)对所采集浮游植物进行鉴定(鉴定到属水平),并对样本中各门不同属的藻出现频率进行统计。

1.3 数据处理

相对丰度的计算为样本中隶属于某一属藻体出现频次占样本总藻体统计频次的百分比,将某一河流断面样本中相对丰度≥5%的列为优势属。使用优势属数据对藻类群落结构进行聚类分析(R 语言 V3.2.3, pheatmap 软件包),获得不同样点、年份间群落结构的差异。浮游植物功能群划分参考 Padisák 等(Reynolds *et al.*, 2002; Padisák *et al.*, 2006, 2009)的方法进行。

选取在所有样点都出现的功能群作为优势功能群,对优势功能群与环境因子间的关系进行分析,使用 Canoco 4.5 软件进行。首先对优势功能群相对丰度数据进行 DCA(去趋势对应分析),若梯度长度大于 2 则进行典范对应分析(Canonical Correspondence Analysis, CCA),反之则进行冗余分析(Redundancy

Analysis, RDA)。分析时使用蒙特卡洛置换检验(Monte Carlo Permutation test)对环境变量进行自动筛选,依据上述方法获得浮游植物优势功能群与环境因子的排序图。

2 结果与分析

2.1 水质状况

表 1 显示,整体上 15 个采样断面中除较为典型的布射水、富资河主要水化学参数(布射水: NH₃-N、TN、TP、COD_{Mn};富资河: TN、TP)以及部分样点的 TN 略高于 III 类水外,其余断面水质基本保持在 I-III 类水之间。总体而言,新安江流域(安徽段)及其支流水质处于良好状态。2017 年水质与 2016 年相比除少数断面有所变化,两年间调查期间总体水质状况基本一致。

2.2 浮游植物群落结构

丰水期新安江(安徽段)及其支流共鉴定出 6 门 55 属,其中绿藻门 18 属、蓝藻门 13 属、硅藻门 21 属、裸藻门 1 属、金藻门 1 属、隐藻门 1 属。全部调查断面中,硅藻、蓝藻和绿藻是构成新安江丰水期藻类植物群落的优势门;金藻门、隐藻门虽在不同河段中有所出现,但整体上处于非优势地位;裸藻门在部分河段仍有较多数量。2016 年和 2017 年所调查的河流断面中浮游植物的相对丰度统计表明(表 2),舟形藻属(*Navicula* sp.)出现在所有断面,异极藻属(*Gomphonema* sp.)、针杆藻属(*Synedra* sp.)和小环藻属(*Cyclotella* sp.)也出现在较多的断面,且具有较高的相对丰度,表明硅藻类在所调查的河段占优势;绿藻门的新月藻属和裸藻门的裸藻属分别在 5 个和 6 个河段具有较高的相对丰度。尽管蓝藻门浮游植物广泛分布于所调查的各个河段,但仅有颤藻属

表 1 2016 年 6 月及 2017 年 9 月新安江(安徽段)及其支流各采样点主要水化学参数
Table 1 Water chemical parameters of the sampling sections of Xin'anjiang River Basin (Anhui section) and its tributaries in June 2016 and September 2017

站点编号	站点名称	年份	COD _{Mn} (mg · L ⁻¹)	TP (mg · L ⁻¹)	NH ₃ -N (mg · L ⁻¹)	TN (mg · L ⁻¹)	pH	DO (mg · L ⁻¹)
1	漳水渔亭	2016	1.70	0.03	0.776	1.04	6.58	8.96
		2017	1.75	0.03	0.786	1.06	7.66	9.98
2	齐云山	2016	2.10	0.06	0.138	1.20	7.76	8.34
		2017	2.40	0.05	0.141	1.23	7.90	9.45
3	张村	2016	1.70	0.05	0.116	1.35	7.61	8.10
		2017	1.70	0.05	0.119	1.38	7.90	9.92
4	典口	2016	2.20	0.04	0.114	1.42	7.87	9.03
		2017	2.00	0.04	0.118	1.46	7.98	10.32
5	三汊水	2016	1.30	0.02	0.046	0.58	8.00	8.87
		2017	1.40	0.02	0.047	0.59	8.20	8.67
6	高枬	2016	1.20	0.04	0.124	0.89	8.00	8.60
		2017	1.20	0.04	0.128	0.91	8.10	8.80
7	文峰桥	2016	1.40	0.04	0.187	0.94	7.68	8.85
		2017	1.68	0.04	0.188	0.95	7.96	10.59
8	富资河	2016	4.50	0.31	0.92	1.69	8.00	8.98
		2017	4.87	0.29	0.94	1.71	8.98	13.61
9	布射水	2016	7.50	0.60	1.73	7.63	8.40	8.68
		2017	7.80	0.69	1.75	7.71	8.41	11.92
10	杨之河	2016	3.10	0.16	0.417	2.14	8.30	6.64
		2017	3.55	0.16	0.419	2.15	7.92	9.71
11	练江	2016	3.50	0.14	0.554	1.43	7.40	5.92
		2017	3.41	0.15	0.551	1.42	8.01	10.18
12	新安人家	2016	2.00	0.04	0.114	0.95	7.29	9.12
		2017	2.20	0.04	0.113	0.94	7.73	8.86
13	照壁	2016	1.90	0.07	0.200	0.91	7.29	9.95
		2017	2.00	0.06	0.210	0.91	7.70	10.2
14	锚泊区	2016	1.60	0.04	0.083	0.88	7.25	5.53
		2017	1.67	0.04	0.084	0.89	7.59	4.13
15	花山	2016	1.60	0.07	0.106	0.67	7.52	10.2
		2017	1.61	0.05	0.107	0.72	7.18	10.28

(*Oscillatoria* sp.)、微囊藻属(*Microcystis* sp.)、鞘丝藻属(*Lyngbya* sp.)、隐球藻属(*Aphanocapsa* sp.)以及伪鱼腥藻属(*Pseudanabaena* sp.)等在少数河段具有较高相对丰度。相较于硅藻门,所有河段中隶属于蓝藻门、绿藻门和裸藻门的藻体仍处于较低的相对丰度。

图 2 表明,2016 年和 2017 年不同河流断面之间在浮游植物群落结构上存在一定差异。2016 年,15 个采样断面根据优势属数据可以划分为 2 大类,其中漳水渔亭、典口、三汊水、文峰桥、锚泊区、照壁、新安人家和高枬聚为一类,其余 7 个断面聚为一类。前一类断面中颤藻属、栅藻属、新月藻属、卵形藻属、曲壳藻属、桥弯藻属、双菱藻属、脆杆藻属等的相对丰度较低,而后一类中则相对较高;张村、花山、齐云山、富资河等 7 个断面聚成一类,直链藻属、针杆藻

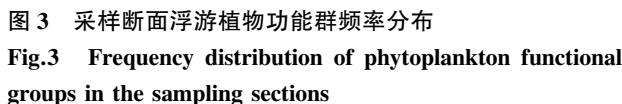
属、小环藻属、短缝藻属等相对丰度明显高于漳水渔亭、典口、三汊水等河流断面。不同于 2016 年,2017 年除张村断面与其他断面存在较大差异外,其他各断面优势藻类差异较小。尽管 2016 年张村断面与其他 6 个断面聚为一类,但该断面仍显示出其特殊性,只是没有 2017 年的差异突出,说明张村断面在所调查的 15 个断面中是较为特殊的。无论是 2016 年还是 2017 年,处于同一小流域的不同采样断面之间优势浮游植物间也存在差异(表 2、图 2)。

2.3 浮游植物功能群特征

2016—2017 年度调查结果表明,所调查断面浮游植物功能群主要隶属于 27 类(图 3),其中功能群 B、D、J、MP、P、Tb 和 W1 在所有采样断面均有分布,N 和 W0 在 73.7%的河流断面出现。其他功能群出现的频率相对较低,其中 C、K、Ws 和 E 仅在 10%~



新安江及其支流浮游植物功能群 MP、D、B、J、P、Tb、W1 在空间分布上占优势,相对丰度分析表明,这 7 个功能群 2016 年和 2017 年相对丰度的总和分别达到 56.7%~92.2%和 62.9%~95.3%(图 4)。在 2016 和 2017 年所调查的各河流断面中,功能



DCA 分析结果排序轴长度小于 2,表明浮游植物优势功能群分布可使用线性模型,故对浮游植物功能群与环境因子进行冗余分析(RDA)。蒙特卡洛置换检验表明 TN ($P=0.025$, $F=3.11$)、TP ($P=0.029$, $F=2.59$)、 $\text{NH}_3\text{-N}$ ($P=0.044$, $F=2.34$) 是主要影响因子。RDA 分析结果表明,轴一与轴二共解释了优势功能群数据累积变化率 27.9% (表 4),优势功能群与环境因子的相关性分别为 0.773 和 0.742,前两轴累计方差为 76.2%,表明前两轴可反映排序的绝大多数信息。优势功能群受 DO 影响较小,其中 P、D 及 J

表 2 新安江(安徽段)及其支流各采样断面浮游植物优势属
Table 2 Dominant phytoplankton genera in the sampling sections of Xin' anjiang River Basin (Anhui section) and its tributaries

流域	河流断面	优势属
横江流域	漳水渔亭	舟形藻属(<i>Navicula</i> sp.)、针杆藻属(<i>Synedra</i> sp.)、直链藻属(<i>Melosira</i> sp.)、圆筛藻属(<i>Coscinodiscus</i> sp.)、菱形藻属(<i>Nitzschia</i> sp.)、新月藻属(<i>Closterium</i> sp.)
	齐云山	舟形藻属、针杆藻属、小环藻属(<i>Cyclotella</i> sp.)、卵形藻属(<i>Cocconeis</i> sp.)、曲壳藻属(<i>Achnanthes</i> sp.)
	张村	舟形藻属、针杆藻属、异极藻属(<i>Gomphonema</i> sp.)、小环藻属、卵形藻属、曲壳藻属、短缝藻属(<i>Eunotia</i> sp.)、栅藻属(<i>Scenedesmus</i> sp.)、卵囊藻属(<i>Oocystis</i> sp.)、新月藻属(<i>Closterium</i> sp.)、裸藻属(<i>Euglena</i> sp.)
	典口	舟形藻属、针杆藻属、异极藻属、小环藻属、卵形藻属、桥弯藻属(<i>Cymbella</i> sp.)
率水流域	三汊水	舟形藻属、异极藻属、直链藻属、短缝藻属
	高枞	舟形藻属、小环藻属、异极藻属、短缝藻属
	文峰桥	舟形藻属、异极藻属、短缝藻属
练江流域	富资河	舟形藻属、异极藻属、卵形藻属、裸藻属
	布射水	舟形藻属、针杆藻属、异极藻属、菱形藻属、新月藻属、衣藻属(<i>Chlamydomonas</i> sp.)、裸藻属、鱼腥藻属(<i>Anabeana</i> sp.)、颤藻属(<i>Oscillatoria</i> sp.)、隐藻属(<i>Cryptomonas</i> sp.)
新安江干流	杨之河	舟形藻属、针杆藻属、异极藻属、小环藻属、脆杆藻属(<i>Fragilaria</i> sp.)、辐节藻属(<i>Stauroneis</i> sp.)、羽纹藻属(<i>Pinnularia</i> sp.)、鼓藻属(<i>Cosmarium</i> sp.)、新月藻属(<i>Closterium</i> sp.)、颤藻属、鞘丝藻属(<i>Lyngbya</i> sp.)、裸藻属
	练江	舟形藻属、直链藻属、针杆藻属、异极藻属、小环藻属、裸藻属
	新安人家	舟形藻属、针杆藻属、异极藻属、小环藻属、直链藻属、短缝藻属、桥弯藻属、集星藻属(<i>Actinastrium</i> sp.)、十字藻属(<i>Crucigenia</i> sp.)
	照壁	舟形藻属、针杆藻属、异极藻属、短缝藻属、隐球藻属(<i>Cryptomonas</i> sp.)、裸藻属、新月藻属
	花山	舟形藻属、异极藻属、小环藻属、裸藻属、隐藻属
	锚泊区	舟形藻属、卵形藻属、异极藻属、集星藻属、微囊藻属(<i>Microcystis</i> sp.)

功能群与 TN、TP、NH₃-N 及 COD_{Mn} 呈正相关, W1、B、MP 功能群与 TN、TP、NH₃-N 及 COD_{Mn} 呈负相关, Tb 功能群与所有理化因子呈负相关(图 5)。环境因子与排序轴的关系也表明, 优势浮游植物功能群主要受 TN、TP、NH₃-N、COD_{Mn} 的影响, 且与第一排序轴呈正相关(表 5)。

3 讨论

相对于传统分类方法, 浮游植物功能群将具有相同或相似生境适应性特征的类群进行归类, 能够更好地反映浮游植物与环境特征的关系。对浮游植物功能群进行归类用于环境监测已经在国内外较多的研究中得到体现(Abonyi *et al.*, 2012; 闵文武等, 2015; da Costa *et al.*, 2016; 易齐涛等, 2016; Rodrigues

et al., 2018)。通过新安江(安徽段)及其支流浮游植物优势功能群的划分能够较好地反映丰水期流域水环境特征(低、中营养, 搅动、激流环境), 优势功能群主要受水体氨氮、总磷、总氮以及 COD_{Mn} 的影

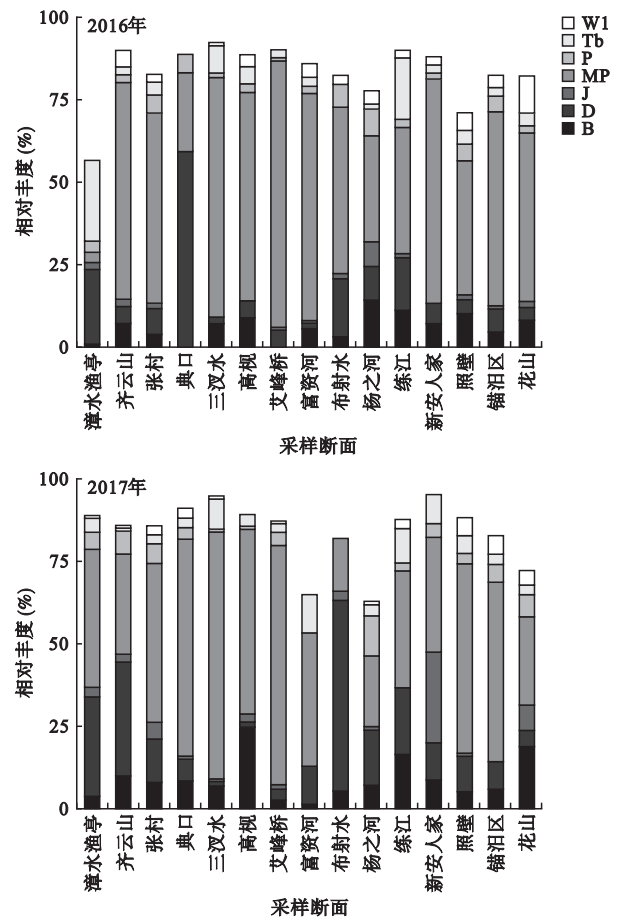


图 4 优势功能群相对丰度
Fig.4 Relative abundance of dominant functional groups

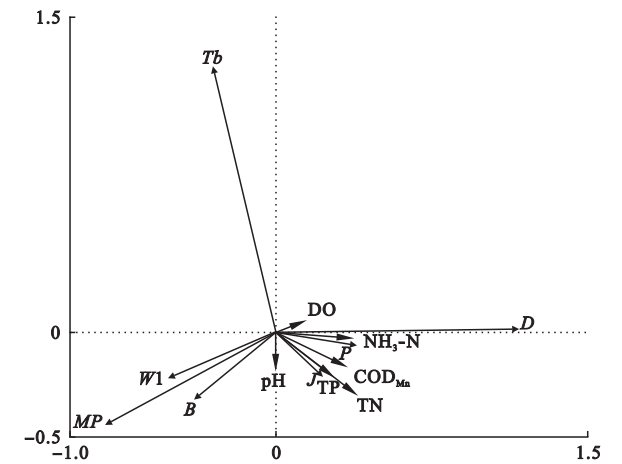


图 5 优势功能群与环境因子的 RDA 分析
Fig.5 RDA analysis between phytoplankton dominant functional groups and environmental variables

表 3 采样断面浮游植物功能群及其生境特征
Table 3 The dominant phytoplankton functional groups and their main representative habitats in the sampling sections

功能群	代表性藻种	生境特征
B	小环藻属(<i>Cyclotella</i> sp.)	中营养型,无分层现象
D	菱形藻属(<i>Nitzschia</i> sp.)、针杆藻属(<i>Synedra</i> sp.)	河流在内浅的浑浊的水体、混合良好、营养盐充足
J	栅藻属(<i>Scenedesmus</i> sp.)、月牙藻属(<i>Selenastrum</i> sp.)、十字藻属(<i>Crucigenia</i> sp.)、集星藻属(<i>Actinastrum</i> sp.)	混合营养型,高纯度的浅水水体(包括一些落差较低的河流)
MP	曲壳藻属(<i>Achnanthes</i> sp.)、卵形藻属(<i>Cocconeis</i> sp.)、桥弯藻属(<i>Cymbella</i> sp.)、短缝藻属(<i>Eunotia</i> sp.)、异极藻属(<i>Gomphonema</i> sp.)、舟形藻属(<i>Navicula</i> sp.)、颤藻属(<i>Oscillatoria</i> sp.)、双菱藻属(<i>Surirella</i> sp.)	经常性搅动、浑浊、浅水水体
P	新月藻属(<i>Closterium</i> sp.)、脆杆藻属(<i>Fragilaria</i> sp.)	混合程度较高的中富营养浅水水体
Tb	直链藻属(<i>Melosira</i> sp.)	激流环境
W1	裸藻属(<i>Euglena</i> sp.)、鳞孔藻属(<i>Lepocinclis</i> sp.)	富含有机质的农业废水和生活污水水体
N	鼓藻属(<i>Cosmarium</i> sp.)、平板藻属(<i>Tabellaria</i> sp.)	持续或半持续的混合水层
W0	衣藻属(<i>Chlamydomonas</i> sp.)	有机物含量极高端高的河流和池塘
R	伪鱼腥藻属(<i>Pseudanabaena</i> sp.)	寡中营养型深水湖泊的温越层或均温层的上方
Tc	鞘丝藻属(<i>Lyngbya</i> sp.)、席藻属(<i>Phormidium</i> sp.)	富营养化静止水体,或水流速度慢、大型挺水植物
G	空球藻属(<i>Eudorina</i> sp.)、实球藻属(<i>Pandorina</i> sp.)	密集的河流高营养,停滞,水深,透明度较高
M	微囊藻属(<i>Microcystis</i> sp.)	稳定的中富营养水体,高透明度
F	卵囊藻属(<i>Oocystis</i> sp.)、四棘藻属(<i>Treubaria</i> sp.)	中或富营养型,均匀、清澈的深水
H1	鱼腥藻属(<i>Anabaena</i> sp.)、项圈藻属(<i>Anabaenopsis</i> sp.)、束丝藻属(<i>Aphanizomenon</i> sp.)	富营养浅水水体,分层

响,浮游植物功能群特征反映的水质状况与水化学参数具有较好的一致性。

丰水期新安江(安徽段)主要优势藻类以硅藻门、绿藻门及蓝藻门为主要优势门类,这与以往研究

表 4 基于 2016 年及 2017 年浮游植物优势功能群与环境因子间冗余分析(RDA)的统计参数
Table 4 Statistical parameters of RDA analysis between the phytoplankton dominant functional groups and environmental variables based on 2016 and 2017 data

RDA 统计量	典范轴				
	1	2	3	4	合计
特征值	0.188	0.091	0.051	0.022	1
物种-环境相关性	0.773	0.742	0.542	0.692	
物种累积方差%	18.8	27.9	33.0	35.2	
物种-环境关系累积方差%	51.2	76.2	90.2	96.1	
所有特征值之和					1
所有典范特征值之和					0.366

表 5 环境因子与排序轴 1、排序轴 2 的相关系数
Table 5 Correlations of environmental variables with first and second axes

环境因子	相关系数	
	排序轴 1	排序轴 2
COD _{Mn}	0.4012	-0.2232
TP	0.3249	-0.29
NH ₃ -N	0.4416	-0.0405
TN	0.4506	-0.3996
pH	-0.0084	-0.25
DO	0.1661	0.0736

新安江流域下游的千岛湖浮游植物优势类群较为一致(胡忠军等,2017),表明新安江流域上游与下游水体主要浮游植物群落结构组成较为接近。对与本次调查同属于亚热带的长江干流藻类调查也表明,隶属于硅藻门的藻类最多、其次是绿藻门和蓝藻门的藻类(刘明典等,2017;张馨月等,2017)。然而,位于同一气候区域的升金湖和太平湖中,隶属于绿藻门的藻类在数量上超过硅藻(吴芳仪等,2016;熊莲等,2016),这一差异主要与湖泊生态系统和河流生态系统的生境特征不同有关(水体流动性、营养状态等)。本调查中,硅藻门类占优势可能主要与该门藻类适宜高流速的特性有关(张馨月等,2017)。

聚类分析结果表明,不同河流断面、不同年份浮游植物群落结构组成存在一定差异。浮游植物群落结构组成的时空变化除可受大气候的影响外,区域性的小环境上的差异(营养盐水平、水体流动性、大型水生植被等)可能是其主要的影响因素。例如,刘明典等对长江干流安庆段浮游植物群落结构调查发现,在空间分布上浮游植物密度和生物量无显著差异,但不同季节之间却有着显著差异,这可能与水温以及水体营养盐的变动有关(刘明典等,2017)。周宇建等(2016)在研究淮河中上游浮游植物时空分布特征时发现,浮游植物的群落结构无论在时间上还是空间上均存在一定的变化,其中总磷、总氮、

氮及电导率是主要影响因子。本研究中,营养盐状况在采样断面间存在一定的差异,例如,调查期间练江流域及其支流总体水质劣于横江及率水,因练江流域源头及其支流水体(布射水、富资河等)相对于横江、率水较小,且居住人口多、生活污水直排现象较为明显,这可能是导致该流域水质营养盐较高的主要原因。不同断面大型水生植被组成、水体流速、河床类型等方面也存在一定差异,例如张村断面优势浮游植物聚类较为特殊,这可能与其特殊的生境特征有关(采样断面介于直线距离1.5 km的两个拦河坝之间,水体总体流速慢、大型水生植被较为密集),这些可能是影响浮游植物群落时空分布特征的主要因素。

丰水期新安江(安徽段)共调查、鉴定的浮游植物功能群27个(55属),相较于其他研究,功能群高于渭河流域(23类)(闵文武等,2015)和济南地区河流(丰水期17类,枯水期12类)(王博涵等,2015),而与珠江三角洲地区精养淡水鱼塘相当(28类)(刘乾甫等,2018)。研究表明,环境因子、生境类型的差异是导致不同水体浮游植物功能群差异的主要因素(闵文武等,2015;王博涵等,2015;刘乾甫等,2018)。调查期间,新安江(安徽段)及其支流功能群MP、D、B和Tb不仅分布频率高,而且具有较高的相对丰度。此类浮游植物功能群生境多以经常性搅动的低、中营养水体或激流环境为主,表明依据浮游植物优势功能群划分所对应的水质多为低营养或中等营养状态,这也与丰水期新安江及其支流的生境特征较为一致。新安江(安徽段)及其支流地处皖南山区,降雨季节水流速度快、扰动性强,且在降水集中阶段河流中含有一定量的泥沙,导致水体相对浑浊。某些生活于富营养水体的浮游植物功能群(如J、W1、Tc、G、H1等),虽然在所调查的河流断面也具有较高的分布频率(图3),但是它们的相对丰度较低,表明所调查的新安江干流及其支流总体而言水体营养盐含量较低。本研究(表1)以及以往的研究中的水化学参数也表明,新安江及其支流的水质长期保持在地表水I-III类(李伟等,2016;吴效东,2017)。RDA分析表明,相对丰度最高的MP功能群与水体营养盐水平呈负相关,而其他相对丰度低的功能群(eg. P、J)与水体营养盐水平呈正相关,表明浮游植物功能群反映的水质状况与测定的水体化学参数具有较好的一致性。

对比其他研究,济南地区丰水期河流以及渭河

流域的调查结果也发现MP和D功能群在河流生态系统中占据优势地位(闵文武等,2015;王博涵等,2015),但养鱼池塘中的优势功能群则与这些河流生态系统存在显著差异,MP功能群只在处于养殖前期的乌鳢养殖池塘中占优势,而D功能群在养鱼池塘中基本不占优势(刘乾甫等,2018)。MP和D功能群占优势的河流与J功能群占优势的养鱼池塘,优势功能群的差异主要与两类水体之间生境差异有关。D功能群主要生活于包括河流在内浅的浑浊的水体、混合良好、中等营养盐生境(表2),而渔业养殖池塘往往含有较高的营养盐,这种生境更加适合于J功能群生活(刘乾甫等,2018)。本研究中,水体营养盐含量远低于养殖池塘,因此适应中富营养生境的J、W1、Tc、G、H1等功能群的藻体相对丰度远低于养殖池塘。蒙特卡洛置换检验也表明,优势浮游植物功能群主要受水体营养盐水平(TN、TP、NH₃-N)的影响。因此,水体营养状况是决定浮游植物功能群分布的主要影响因素。

浮游植物功能群能够较好地表征新安江流域(安徽段)及其支流水环境特征以及水质状况。本研究中,浮游植物功能群的划分是基于丰水期浮游植物群落结构调查。研究表明,季节差异以及由此产生的环境因子改变也会影响浮游植物功能群的变动(Nabout *et al.*, 2006)。因此,未来的研究将进一步通过构建浮游植物优势功能群长期、季节性或月度变动与水质状况的关系,从生物学与水环境化学的角度对新安江流域水生态环境进行监测,从而为准确掌握新安江流域水质变动状况以及水环境保护提供数据与理论支撑。

4 结 论

丰水期新安江(安徽段)及其支流以硅藻门、蓝藻门和绿藻门为优势门类,藻类群落结构在不同采样断面和不同年份存在一定差异。

丰水期优势浮游植物主要包括27个功能群,MP、D、B和Tb功能群在整个新安江(安徽段)及其支流为优势类群。

浮游植物功能群特征能够很好地指示新安江(安徽段)及其支流的生境特征,与水化学参数反映的水质状况有较好的一致性。

参考文献

方云英, 杨肖娥, 常会庆, 等. 2008. 利用水生植物原位修复

- 污染水体. 应用生态学报, **19**(2): 407-412.
- 傅玲. 2014. 水生植物群落对水体中氮磷净化效果研究(硕士学位论文). 南京: 南京师范大学.
- 胡鸿钧, 魏印心. 2006. 中国淡水藻类: 系统、分类及生态. 北京: 科学出版社.
- 胡忠军, 莫丹玫, 周小玉, 等. 2017. 千岛湖浮游植物群落结构时空分布及其与环境因子的关系. 水生态学杂志, **38**(5): 46-54.
- 蓝于倩, 袁一文, 彭亮, 等. 2015. 江谷水库鱼类网箱养殖富营养化及浮游植物功能群的指示作用. 生态环境学报, **24**(6): 1028-1036.
- 李伟, 杨雨玲, 董丽丽, 等. 2016. 短期酸化对新安江流域屯溪段水体浮游植物群落结构及多样性的影响. 生态毒理学报, **11**(6): 313-322.
- 刘乾甫, 赖子尼, 高原, 等. 2018. 珠江三角洲地区精养淡水鱼塘浮游植物功能群特征. 中国水产科学, **25**(1): 124-136.
- 刘明典, 李鹏飞, 曾泽国, 等. 2017. 长江干流安庆段浮游植物群落结构特征. 淡水渔业, **47**(4): 29-36.
- 刘媛, 张旭, 王静. 2017. 云南省红河流域浮游植物多样性及水质季节动态研究. 甘肃农业大学学报, **52**(5): 103-111.
- 闵文武, 王培培, 李丽娟, 等. 2015. 渭河流域浮游植物功能群与环境因子的关系. 环境科学研究, **28**(9): 1397-1406.
- 欧腾, 李秋华, 王安平, 等. 2014. 贵州高原三板溪水库浮游植物群落动态与环境因子的关系. 生态学杂志, **33**(12): 3432-3439.
- 潘鸿, 唐宇宏. 2016. 威宁草海浮游植物污染指示种及水质评价. 湿地科学, **14**(2): 230-234.
- 彭凯, 李太民, 刘利, 等. 2018. 苏北骆马湖浮游植物群落结构及其水质生物评价. 湖泊科学, **30**(1): 183-191.
- 宋楠, 李慧, 赵然, 等. 2016. 基于浮游植物评价水体质量的方法比对. 黑龙江环境通报, **40**(2): 30-32.
- 谭巧, 马芊芊, 李斌斌, 等. 2017. 应用浮游植物生物完整性指数评价长江上游河流健康. 淡水渔业, **47**(3): 97-104.
- 田永强. 2015. 淡水浮游植物功能类群划分方法及其生态学应用研究进展(综述). 亚热带植物科学, **44**(4): 349-354.
- 汪炎炎, 潘华, 周先华. 2017. 神农架林区大九湖浮游植物调查及水质评价. 中国水利, **828**(18): 17-19.
- 王博涵, 李文香, 项珍龙, 等. 2015. 济南地区河流浮游植物功能群与环境因子的关系. 大连海洋大学学报, **30**(5): 524-530.
- 王丽, 魏伟, 周平, 等. 2013. 铜陵市河流冬季浮游植物群落结构及其与环境因子的关系. 应用生态学报, **24**(1): 243-250.
- 吴芳仪, 王兰, 徐梅, 等. 2016. 升金湖浮游植物群落动态及其影响因素研究. 生物学杂志, **33**(5): 34-39.
- 吴效东. 2017. 黄山市新安江流域水环境保护及河流水质排名. 中国资源综合利用, **35**(6): 79-81.
- 熊莲, 刘冬燕, 王俊莉, 等. 2016. 安徽太平湖浮游植物群落结构. 湖泊科学, **28**(5): 1066-1077.
- 肖小雨, 龙婉婉, 柳正威, 等. 2016. 吉安地区典型景观湖泊浮游植物群落特征及其与水环境因子的关系. 生态学杂志, **35**(4): 934-941.
- 徐玉萍, 刘彩虹, 张垚垚, 等. 2014. 新开挖景观河道浮游植物群落结构特征及与环境因子的关系. 生态学杂志, **33**(3): 637-645.
- 姚远, 贺锋, 胡胜华, 等. 2016. 沉水植物化感作用对西湖湿地浮游植物群落的影响. 生态学报, **36**(4): 971-978.
- 易齐涛, 陈求稳, 赵德慧, 等. 2016. 淮南采煤塌陷湖泊浮游植物功能群的季节演替及其驱动因子. 生态学报, **36**(15): 4843-4854.
- 张曼, 张河长, 宋东莹, 等. 2015. 富营养水体大型溞(*Daphnia magna*)的种群数量对浮游植物的控制效应. 生态科学, **34**(2): 76-81.
- 张馨月, 钱宝, 樊云, 等. 2017. 长江干流宜昌段浮游植物群落结构初步研究. 人民长江, **48**(3): 28-32.
- 赵秀侠, 侯冠军, 李静, 等. 2017. 2015年淮河干流安徽段浮游植物群落结构特征. 湿地科学, **15**(4): 497-504.
- 周宇建, 张永勇, 花瑞祥, 等. 2016. 淮河中上游浮游植物时空分布特征及关键环境影响因子识别. 地理研究, **35**(9): 1626-1636.
- B. 福迪(罗迪安译). 1980. 藻类学. 上海: 上海科学技术出版社.
- Abonyi A, Leitao M, Lançon AM, et al. 2012. Phytoplankton functional groups as indicators of human impacts along the River Loire (France). *Hydrobiologia*, **698**: 233-249.
- da Costa MRA, Attayde JL, Becker V. 2016. Effects of water level reduction on the dynamics of phytoplankton functional groups in tropical semi-arid shallow lakes. *Hydrobiologia*, **778**: 75-89.
- Li W, Yang Y, Li Z, et al. 2017. Effects of seawater acidification on the growth rates of the diatom *Thalassiosira (Conticribra) weissflogii* under different nutrient, light, and UV radiation regimes. *Journal of Applied Phycology*, **29**: 133-142.
- Nabout J, Nogueira IdS, Oliveira L. 2006. Phytoplankton community of floodplain lakes of the Araguaia River, Brazil, in the rainy and dry seasons. *Journal of Plankton Research*, **28**: 181-193.
- Padisák J, Borics G, Grigorszky I, et al. 2006. Use of phytoplankton assemblages for monitoring ecological status of lakes within the water framework directive: The assemblage index. *Hydrobiologia*, **553**: 1-14.
- Padisák J, Crossetti LO, Naselli-Flores L. 2009. Use and misuse in the application of the phytoplankton functional classification: a critical review with updates. *Hydrobiologia*, **621**: 1-19.
- Reynolds CS, Huszar V, Kruk C, et al. 2002. Towards a functional classification of the freshwater phytoplankton. *Journal of Plankton Research*, **24**: 417-428.
- Rodrigues LC, Pivato BM, Vieira LCG, et al. 2018. Use of phytoplankton functional groups as a model of spatial and temporal patterns in reservoirs: A case study in a reservoir of central Brazil. *Hydrobiologia*, **805**: 147-161.
- Yang Y, Li W, Li Z, et al. 2018. Combined effects of ocean acidification and nutrient levels on the photosynthetic performance of *Thalassiosira (Conticribra) weissflogii* (Bacillariophyta). *Phycologia*, **57**: 121-129.

作者简介 胡长玉,男,1965年生,硕士,副教授,从事植物生理及微生物生理生化研究。E-mail: hcy@hsu.edu.cn
责任编辑 李凤芹