

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2016.05.022

# 洪泽湖浮游藻类变化动态及影响因素

舒卫先<sup>1</sup>, 张云舒<sup>2</sup>, 韦翠珍<sup>1</sup>

(1. 淮河流域水资源保护局, 安徽 蚌埠 233001; 2. 南京大学生命科学学院, 江苏 南京 210023)

**摘要:**针对 2011 年 7 月至 2013 年 10 月在洪泽湖 11 个采样点 20 次采样获得的湖水表层浮游藻类和水质理化指标数据,采用 Shannon-Wiener 指数  $H$  和优势度指数  $Y$  进行数据统计处理,分析洪泽湖浮游藻类时空分布动态及其影响要素。结果表明:洪泽湖浮游藻类共有 7 门 60 属 144 种,主要包括绿藻门 66 种、硅藻门 36 种、蓝藻门 23 种、裸藻门 13 种。浮游藻类群落具有明显的时空异质性,物种丰富度夏季最高,秋季中等,冬春季最低;西北部(成子湖区)和河流入湖口(溧河洼)高,湖心和河流出湖口(蒋坝)低;浮游藻类细胞密度全湖平均值变幅为 157 万~604 万个/L,夏秋高,冬春—低;成子湖区等静水区高,入湖和出湖口低。浮游藻类组成和细胞密度的时间动态与温度、水位及营养盐(TN、TP 等)的季节差异有关,而其空间动态与水动力因素和营养盐( $\text{NH}_3\text{-N}$ )的空间差异有关。建议限制洪泽湖营养盐陆地输入,合理调控洪泽湖水动力,以遏制洪泽湖蓝藻水华的发生。

**关键词:**浮游藻类;空间差异;季节动态;水质;洪泽湖

中图分类号:X173      文献标志码:A      文章编号:1004-6933(2016)05-0115-08

## Seasonal dynamics of and factors in phytoplankton in Hongze Lake

SHU Weixian<sup>1</sup>, ZHANG Yunshu<sup>2</sup>, WEI Cuizhen<sup>1</sup>

(1. Huaihe River Basin Water Resources Protection Bureau, Bengbu 233001, China;  
2. School of Life Sciences, Nanjing University, Nanjing 210023, China)

**Abstract:** In order to explore the temporal-spatial pattern of phytoplankton distribution in Hongze Lake and associated factors, we sampled surface water 20 times at 11 sites across the lake from July 2011 to October 2013, and obtained physical and chemical indices of phytoplankton and water quality. We processed the data using the Shannon-Wiener index  $H$  and dominance index  $Y$ . Then, we found 144 phytoplankton species belonging to 60 genera, and seven phyla (including 66 species of green algae, 36 species of diatoms, 23 species of cyanobacteria, and 13 species of euglena). The phytoplankton distribution presented an obvious spatial-temporal variability. The species richness was at a high level in the summer, at an intermediate level in the autumn, and at low levels in the winter and spring; it exhibited large values in the northwestern part (Chengzi Lake area) and the inflow area of the lake (site Lihewa), and small values in the central area and the outflow area of the lake. The average cell density of phytoplankton ranged from  $1.57 \times 10^6$  to  $6.04 \times 10^6$  cells/L. The cell density was higher in the summer and autumn, and lower in the winter and spring; it exhibited large values in the Chengzi Lake area and small values at the inflow and outflow areas of the lake. Data analysis shows that the temporal dynamics of the species composition and cell density were significantly associated with the seasonal variations of water temperature, water level, and nutrients (mainly total nitrogen and total phosphorus), while the spatial dynamics of the species composition and cell density were correlated with the spatial variations of hydrodynamic factors and nutrients (particularly ammonia nitrogen). We suggest restricting nutrient input and modulating the hydrological dynamics of Hongze Lake, in order to prevent algal blooms in the lake.

**Key words:** phytoplankton; spatial disparity; seasonal dynamics; water quality; Hongze Lake

基金项目:淮河流域重要河湖健康评估试点项目(1261320320004)  
作者简介:舒卫先(1973—),男,高级工程师,博士,主要从事水生态保护与修复管理工作。E-mail:weixians@163.com

洪泽湖(33°06' ~ 33°40'N, 118°10' ~ 118°52'E)是我国第4大淡水湖泊,是南水北调东线工程的过水通道,主要由江苏盱眙县至洪泽县淮河河段及其北岸的溧河洼、安河洼、成子湖3大湖湾组成。在正常蓄水位 13.0 m(蒋坝水位站)时,湖区水面面积为 2 151.9 km<sup>2</sup>;洪泽湖承泄淮河上中游 15.8 万 km<sup>2</sup> 的来水,上承支流河道主要在湖西,下泄河道都在湖东<sup>[1]</sup>。洪泽湖是典型的过水性、大型浅水湖泊,浮游生物、底栖动物和鱼类等资源丰富,具有很高的生物多样性保护价值<sup>[2]</sup>。20 世纪 80 年代以来,随着流域经济的迅速发展和人口的不断增加,该湖泊富营养化趋势日益明显,水华现象频繁出现,尤其是 90 年代初期至中期,水质急剧恶化<sup>[3]</sup>。洪泽湖不断加剧的水体富营养状况,使水生生物群落和物种多样性都发生了很大变化<sup>[4]</sup>,其中浮游藻类的变化尤为明显<sup>[5]</sup>。研究洪泽湖浮游藻类群落结构和物种多样性的时空变化动态,有利于了解洪泽湖生态系统现状,为湖泊水生生态恢复提供科学依据。

洪泽湖浮游藻类多样性研究最早始于 20 世纪 60 年代,后来又有多次的野外调查和分析<sup>[5-6]</sup>,但这些成果缺乏系统全面的时空格局研究。首先,以往的研究通常只选择在生长季节(4—9 月)调查取样,采样周期较短,取样持续时间也不够连贯<sup>[5]</sup>。其次,取样点分布不够广,范围较为局限,浮游藻类的空间变化特征不清楚<sup>[6]</sup>。更为重要的是,连续性的调查研究时间大都在 2000 年以前,而近十几年洪泽湖水质、浮游藻类多样性和密度都有较大改变<sup>[7]</sup>,因此有必要对洪泽湖浮游藻类开展新一轮的详细监测,以进一步了解湖泊的生态现状。基于此,笔者开展了为期两年多的详细监测,分析了浮游藻类群落结构和细胞密度的时空动态,并结合水体理化性质,探讨藻类动态与水位和水质特征的关系。研究结果有助于认识洪泽湖富营养化的格局和形成机制,以为洪泽湖的开发利用和生态保护提供理论依据。

## 1 研究方法

### 1.1 采样点

根据洪泽湖湖盆特点,结合支流位置、植被和水质状况,选定了 11 个采样点,采样点涵盖成子湖湾、溧河湖湾、淮河湖湾以及湖中心区等水域,且反映了洪泽湖不同的水动力特征(图 1)。其中龙集北、龙集北偏北、成河北和成河东位于成子湖区,属静水区;溧河洼、临淮、成河西位于溧河湖湾;高良涧位于二河闸,靠近苏北灌溉总渠的出湖口;老子山处于淮河湖湾,靠近淮河入河口;蒋坝位于入江水道出湖口区,靠近三河闸;成河中位于洪泽湖中心区域。

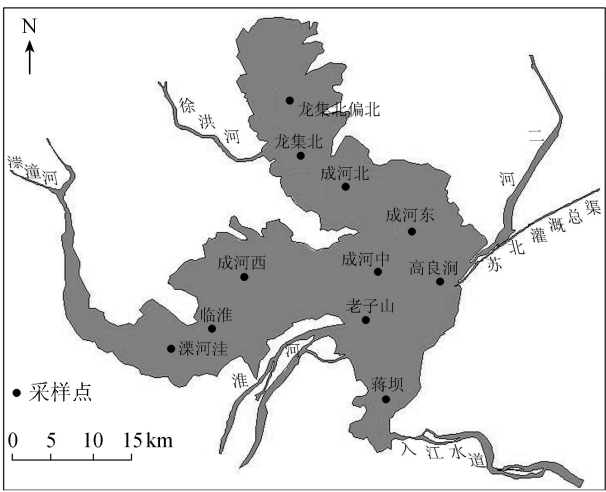


图 1 洪泽湖采样点分布

### 1.2 样品采集与处理

分别于 2011 年 7 月到 2012 年 6 月、2013 年 3—10 月采集洪泽湖 11 个采样点的浮游藻类。其中,浮游藻类定性标本用 25 号浮游生物网在表层水中捞取,加甲醛溶液(含 37% ~ 40% 甲醛溶液,用量为水样体积的 4%)固定,带回室内鉴定种类;种类鉴定根据光学显微镜下形态学特征参考相关文献和书籍进行鉴定<sup>[8-9]</sup>。对于定量样品,用 8L 的采水器在水深 0.5 m 处采集水样,经 P32(20 μm)号微型浮游生物网过滤后倒入标本瓶中,加鲁哥氏液固定(同上),带回实验室后直接镜检,每个采样点重复 5 次<sup>[10]</sup>。浮游藻类计数方法为目镜行格法,用 0.1 mL 浮游藻类计数框在倒置显微镜 100 或 400 倍下进行测定。每次观察 100 个视野,每个样品计数 2 片,取其平均值作为该样品的最终结果。另外,在每次采样检测过程中,对每一种藻随机选取 10 个以上的个体,直接计数组成体的细胞数量,将平均值作为该种藻的细胞数。

### 1.3 环境因子测定

水温和 pH 值采用 YSI-85 水质分析仪(美国)现场原位监测;TN、NH<sub>3</sub>-N、TP 和 COD 通过采集表层下 0.5 m 处水样 2.5 L 带回实验室进行测定,样品测定重复 3 次,测定方法分别采用碱性过硫酸钾消解分光光度法(HG 636—2012)、纳氏试剂光度法(GB7479—1987《水质 氨的测定 纳氏试剂比色法》)、钼酸铵分光光度法(GB11893—1989《水质 总磷的测定 钼酸铵分光光度法》)和标准重铬酸钾法(GB11914—1989《水质 化学需氧量的测定 重铬酸盐法》)测定;水体 DO 采用便携式 DO 测定仪进行测定(Hach HQ40d oxygen probe,美国哈希公司);水位数据来自淮安市水文信息网(<http://www.haswj.com>,蒋坝水位站数据)。但 2013 年度 TN 含量测定因为仪器问题,未能获取数据。

1.4 数据分析方法

浮游藻类群落指数采用 Shannon-Wiener 指数  $H^{[11]}$  和优势度指数  $Y$ :

$$H = - \sum_{i=1}^s (n_i/N) \log_2(n_i/N) \tag{1}$$

$$Y = (n_i/N) f_i \tag{2}$$

式中: $s$  为种数; $n_i$  为第  $i$  种的个体数; $N$  为全部样品中的总个体数; $f_i$  为第  $i$  种在各样品中出现的频率。

多重比较采用 Duncan 检验,显著度水平为 0.05。因子间相关分析采用双变量相关分析,选择 Pearson 相关系数。并用线性回归的方法探讨水温对浮游藻类总密度的影响。数据处理采用统计软件 SPSS19.0。

2 结果与分析

2.1 环境参数

2.1.1 水温与水位

洪泽湖水温季节波动明显,夏季水温高,冬季水温低,春季和秋季中等。2011—2012 年度 2 月水温最低(3.51℃),8 月最高(29.08℃),2013 年度 3 月最低(9.14℃),8 月最高(31.48℃)。

2011—2012 年度,平均水位为 12.89 m,2011 年 7 月较低,8 月随雨季来临水位开始上升,9 月达到最高值为 13.43 m,此后水位逐渐下降至次年 6 月为止(11.92 m)。2013 年度(4—11 月),平均水位为 12.48 m,3 月水位最高达 12.97 m,9 月初水位达到最低值,为 11.6 m。

2.1.2 化学性质

2011—2012 年度监测表明,洪泽湖水水质偏碱性(pH 值为 7.81~8.43),不同月份不同样点间变化不明显。全湖 DO 质量浓度变化为 4.0~14.3 mg/L,夏秋低,冬春高;空间上,静水区成子湖区域相对较低,成河西、老子山、溧河洼及临淮中等,而河流出湖区成河中、蒋坝及高良涧区域最高。7 月水体  $\text{NH}_3\text{-N}$  质量浓度最高,达 0.70 mg/L,其他月份变幅较小;在空间上,静水水域龙集北偏北监测点最高为 0.59 mg/L,河流入湖口老子山、溧河洼两地适中,分别为 0.41

mg/L 和 0.43 mg/L,而其他监测位点  $\text{NH}_3\text{-N}$  质量浓度相对较低(变幅 0.16~0.36 mg/L)。TP 平均质量浓度变化范围为 0.04~0.11 mg/L,4 月最低,11 月最高;空间上,溧河洼较高为 0.22 mg/L,其他监测位点 TP 质量浓度较低,不同位点间差异较小。全湖 TN 质量浓度的变化范围为 0.90~3.37 mg/L,夏秋低(2011 年 7—10 月),冬春高(2011 年 11 月至 2012 年 1 月);空间上,淮河入湖口老子山水域含量最高,蒋坝其次,临淮、龙集北和成河西最低。

2013 年监测结果与上一年度相似。水体 pH 值范围在 7.86~8.25 间,偏碱性;DO 质量浓度变化范围为 5.30~11.12 mg/L,3 月最高,此后逐渐降低,至 8 月为最低(6.88 mg/L),不同位点之间 DO 质量浓度差异较小。 $\text{NH}_3\text{-N}$  质量浓度变化范围为 0.20~0.48 mg/L,9 月最高,4 月最低;空间上,成子湖区域相对较高,范围在 0.31~0.82 mg/L,高良涧、蒋坝、成河中等出湖口区域  $\text{NH}_3\text{-N}$  质量浓度较低;TP 质量浓度变化范围为 0.05~0.12 mg/L,6 月最低,10 月最高;不同监测位点间空间差异较小。

2.2 浮游藻类物种组成

2011—2013 年调查期间,共检测到绿藻、硅藻、蓝藻、裸藻、甲藻等浮游藻类,隶属 7 门 60 属 144 种(表 1),其中,弱细颤藻(优势度指数 0.24)、不定微囊藻(优势度指数 0.17)和水华微囊藻(优势度指数 0.07)为全湖优势物种。

2011 年 7 月至 2012 年 6 月间,观测到的绿藻门种类最多,达 66 种,占全部浮游藻类种类的 50.4%,是最重要的群落组成者;硅藻门其次(36 种),占总数的 27.5%;蓝藻门 16 种,裸藻门 8 种,黄藻门 3 种,甲藻门 2 种,分别占总数的 12.2%、6.1%、2.3% 和 1.5%。具体看,颤藻(*Oscillatoria*)为绝对优势属种,其相对密度为 60.9%,其次依次有:微囊藻(*Microcystis*) 21.3%、链丝藻(*Ulothrix*) 14.4%、鱼腥藻(*Anabaena*) 1.2%。

2013 年 3—10 月间,主要为绿藻、硅藻和蓝藻 3 个类群。其中绿藻门 49 种,硅藻门 29 种,蓝藻门

表 1 2011—2013 年洪泽湖浮游藻类种类组成种

| 物种  | 2011 年 |     |     |      |      |      | 2012 年 |     |     |     |     |     | 2013 年 |     |     |     |     |     |     |      |
|-----|--------|-----|-----|------|------|------|--------|-----|-----|-----|-----|-----|--------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|
|     | 7 月    | 8 月 | 9 月 | 10 月 | 11 月 | 12 月 | 1 月    | 2 月 | 3 月 | 4 月 | 5 月 | 6 月 | 3 月    | 4 月 | 5 月 | 6 月 | 7 月 | 8 月 | 9 月 | 10 月 |
| 绿藻门 | 47     | 31  | 33  | 36   | 25   | 33   | 23     | 13  | 11  | 17  | 22  | 21  | 11     | 8   | 10  | 49  | 29  | 23  | 38  | 22   |
| 硅藻门 | 34     | 19  | 19  | 19   | 12   | 15   | 13     | 10  | 12  | 10  | 8   | 9   | 11     | 10  | 11  | 30  | 13  | 13  | 23  | 14   |
| 蓝藻门 | 14     | 9   | 9   | 8    | 17   | 8    | 5      | 4   | 1   | 1   | 2   | 3   | 4      | 5   | 4   | 23  | 7   | 11  | 15  | 11   |
| 裸藻门 | 7      | 3   | 5   | 6    | 3    | 3    | 3      | 1   | 0   | 2   | 1   | 2   | 2      | 2   | 2   | 12  | 4   | 5   | 8   | 7    |
| 甲藻门 | 2      | 2   | 3   | 1    | 1    | 2    | 1      | 1   | 1   | 1   | 1   | 3   | 2      | 2   | 0   | 3   | 2   | 1   | 2   | 2    |
| 黄藻门 | 3      | 0   | 0   | 0    | 0    | 0    | 0      | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0      | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0    |
| 金藻门 | 1      | 0   | 1   | 1    | 0    | 0    | 0      | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0      | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0    |
| 合计  | 108    | 64  | 70  | 71   | 58   | 61   | 45     | 29  | 25  | 31  | 34  | 38  | 30     | 27  | 27  | 117 | 55  | 53  | 86  | 56   |

23 种,分别占总数的 41.5%、24.6% 和 19.5%。此外还有少量裸藻和甲藻,其中裸藻门 13 种,甲藻门 3 种,分别占总数的 11.0% 和 2.5%。

浮游藻类群落物种组成,在季节变化上,表现为夏秋种类多,冬春少。第 1 个监测周期内,除 3 月外,各月浮游藻类种类中均以绿藻门为主,占浮游藻类总种数的 43.10%~64.71%;硅藻门和蓝藻门次之。第 2 个监测周期内,3—5 月绿藻门和硅藻门种类数基本相同,其次为蓝藻门;6—10 月浮游藻类基本都以绿藻门为主,其次为硅藻门和蓝藻门。

在空间上,成子湖区(含龙集北、龙集北偏北、成河北和成河东等采样点)及溧河洼(为入湖口)藻种类较多,而蒋坝、老子山、高良涧(为出湖口)及湖区中心(成河中)较低(表 2),各个监测位点均以绿藻门的浮游藻类最多。第 1 个监测周期内,成子湖区藻类较多,种类最少的样点为成河中和高良涧;各样点中,绿藻门占浮游藻类总种数的 30.2%~54.1%,硅藻门、蓝藻门次之。第 2 个监测年度内,溧河洼藻种类最多,成子湖水域次之,老子山最少(49 种),各样点中绿藻门占浮游藻类总种数的 38.2%~44.1%;硅藻门和蓝藻门分别占浮游藻类总种数的 2.8%~30.3% 和 18.8%~30.6%。

2.3 浮游藻类细胞密度

浮游藻类细胞密度夏秋多,冬春少(图 2)。第

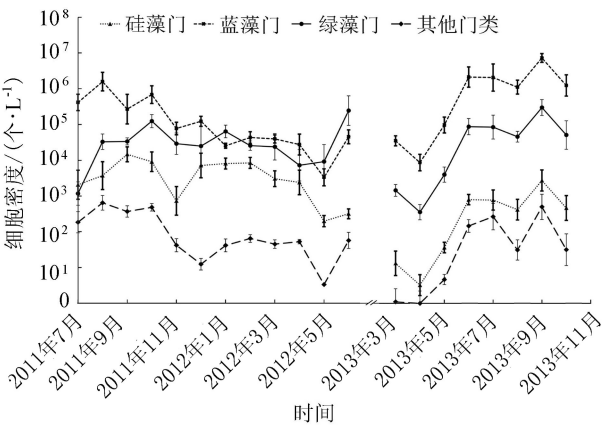


图 2 2011—2013 年洪泽湖浮游藻类细胞密度时间动态

1 个监测周期内,平均细胞密度为 157 万个/L,各月间差异很大,其中 2011 年 8 月细胞密度最大,主要由微囊藻和弱细颤藻的快速生长繁殖引起;10 月后细胞密度逐渐下降,至第 2 年春天温度升高,链丝藻开始快速生长繁殖,引起了 2012 年 6 月细胞密度的迅速增长。第 2 个监测周期内,浮游藻类细胞密度平均值约为 604 万个/L,其中,4 月前细胞密度较低;5 月开始增加,6—7 月浮游藻类细胞密度达到较高水平,其增长主要由弱细颤藻的大量繁殖引成,9 月出现当年峰值(1 090 万个/L),此时微囊藻取代弱细颤藻成为全湖优势物种。

不同位点间浮游藻类细胞密度差异非常明显(表 3),在水流相对较缓的成子湖区(包括龙集北、

表 2 洪泽湖浮游藻类群落物种组成空间动态种

| 物种  | 时间段         | 成河北 | 成河东 | 成河西 | 成河中 | 高良涧 | 蒋坝 | 老子山 | 临淮 | 龙集北 | 龙集北偏北 | 溧河洼 |
|-----|-------------|-----|-----|-----|-----|-----|----|-----|----|-----|-------|-----|
| 绿藻门 | 2011—2012 年 | 39  | 33  | 30  | 13  | 19  | 20 | 13  | 34 | 28  | 19    | 30  |
|     | 2013 年      | 29  | 33  | 23  | 23  | 23  | 26 | 19  | 31 | 36  | 37    | 41  |
| 硅藻门 | 2011—2012 年 | 18  | 15  | 16  | 8   | 10  | 14 | 19  | 15 | 13  | 12    | 20  |
|     | 2013 年      | 23  | 21  | 13  | 14  | 13  | 19 | 12  | 18 | 19  | 24    | 22  |
| 蓝藻门 | 2011—2012 年 | 9   | 6   | 10  | 7   | 6   | 4  | 5   | 9  | 8   | 5     | 6   |
|     | 2013 年      | 16  | 15  | 12  | 13  | 17  | 15 | 15  | 16 | 18  | 17    | 19  |
| 裸藻门 | 2011—2012 年 | 6   | 5   | 4   | 1   | 1   | 3  | 4   | 5  | 3   | 4     | 3   |
|     | 2013 年      | 5   | 8   | 6   | 3   | 3   | 4  | 2   | 7  | 9   | 9     | 8   |
| 甲藻门 | 2011—2012 年 | 2   | 2   | 3   | 2   | 1   | 2  | 2   | 2  | 2   | 2     | 2   |
|     | 2013 年      | 3   | 3   | 2   | 2   | 1   | 1  | 1   | 1  | 2   | 3     | 3   |

表 3 2011—2013 年度洪泽湖浮游藻类细胞密度空间动态万个/L

| 采样点   | 春季          |        | 夏季          |          | 秋季          |          | 冬季          |
|-------|-------------|--------|-------------|----------|-------------|----------|-------------|
|       | 2011—2012 年 | 2013 年 | 2011—2012 年 | 2013 年   | 2011—2012 年 | 2013 年   | 2011—2012 年 |
| 成河北   | 30.94       | 25.74  | 723.47      | 3 296.38 | 523.70      | 698.09   | 21.95       |
| 成河东   | 36.24       | 24.71  | 807.17      | 2 917.95 | 435.41      | 1 980.18 | 21.09       |
| 成河西   | 3.28        | 1.08   | 335.33      | 11.58    | 22.48       | 868.48   | 37.11       |
| 成河中   | 13.64       | 13.77  | 19.34       | 194.39   | 11.95       | 563.20   | 17.67       |
| 高良涧   | 14.26       | 6.25   | 21.20       | 332.38   | 139.43      | 166.22   | 13.69       |
| 蒋坝    | 45.08       | 14.70  | 74.28       | 130.51   | 3.70        | 301.91   | 21.42       |
| 老子山   | 15.04       | 3.57   | 22.30       | 78.60    | 10.96       | 149.52   | 17.36       |
| 临淮    | 2.61        | 2.19   | 185.69      | 15.88    | 21.13       | 1 931.28 | 49.76       |
| 龙集北   | 22.57       | 11.10  | 536.82      | 1 692.05 | 419.64      | 828.28   | 41.53       |
| 龙集北偏北 | 27.22       | 21.50  | 1 352.37    | 2 442.87 | 880.23      | 809.21   | 45.86       |
| 溧河洼   | 20.25       | 3.70   | 160.17      | 409.47   | 31.37       | 598.13   | 49.41       |

龙集北偏北、成河北和成河东)最高,溧河洼、成河西和临淮次之,而强水动力区(主要为湖泊入湖和出湖口等,包括蒋坝、老子山、高良涧)最低。具体而言,第1个监测周期内龙集北偏北最高,湖心采样点成河中最低;第2个周期内成河北和成河东最高,临淮、溧河洼、成河西浮游藻类中等,老子山、蒋坝和高良涧最低。

2.4 物种多样性

洪泽湖浮游藻类多样性指数存在明显的时空动态,时间上表现为秋季多样性指数较高,冬春季较低其中,2011—2012年间,整个湖区各月浮游藻类多样性指数在0.77~1.84之间波动(图3),平均值为1.31,9月最高为1.84,6月最低为0.77,而2013年各月多样性指数变化范围为0.91~2.16,平均值为1.32,同样为9月最高为2.16,6月最低为0.91。空

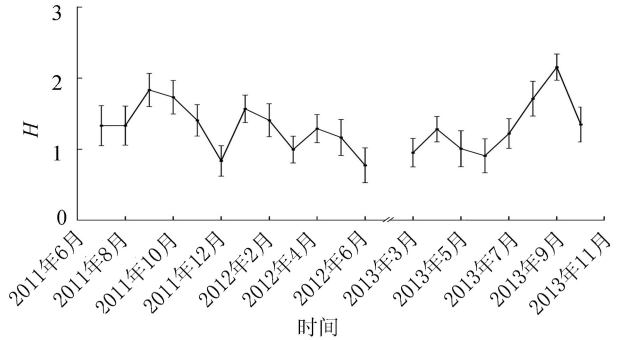


图3 2011—2013年洪泽湖浮游藻类物种多样性的时间动态

间上,成子湖区域多样性指数较低(表4),溧河洼水域(成河西、临淮、溧河洼)较高。

2.5 细胞密度与环境因子关系

由表5可见,pH值与生物学指标间没有显著关系,蓝藻细胞密度、其他门类细胞密度及总细胞密度与水温度呈正相关,总细胞密度与蓝藻细胞密度变化显著正相关。具体而言,第1个监测周期内水温 and 蓝藻门及总细胞密度正相关,DO和蓝藻门细胞密度及总细胞密度负相关;第2个监测周期内NH<sub>3</sub>-N和硅藻门、绿藻门正相关。

3 讨论

上述分析结果表明,洪泽湖在两个监测周期中浮游藻类年平均细胞密度分别达到157万个/L和604万个/L,与2008年相比(小于85万个/L),2011年细胞密度增长近1倍,2013年度也明显超过湖泊水华阈值(大于100万个/L)<sup>[17]</sup>,说明洪泽湖的部分水域在一定时间范围内处于水华发生状态。这与洪泽湖含较高的氮、磷结果是一致的。2011—2013年洪泽湖NH<sub>3</sub>-N、TN和TP平均质量浓度分别为0.29mg/L、2.19mg/L和0.08mg/L,超出了Taheriyoun等<sup>[12]</sup>提出的湖泊富营养化阈值ρ(NH<sub>3</sub>-N):0.02mg/L;ρ(TN):0.65~1.2mg/L;ρ(TP):0.03~0.1mg/L)。N、P是与藻类生长密切相关的营养元素,过高的N、P含量往往导致水华出现<sup>[13]</sup>。另外,虽然洪泽湖绿藻、硅藻种类在全年都较多,但蓝藻门

表4 2011—2013年洪泽湖浮游藻类物种多样性的空间动态

| 地点    | 时间段        | H         |           |           |           |           |
|-------|------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
|       |            | 春季        | 夏季        | 秋季        | 冬季        | 平均        |
| 成河北   | 2011—2012年 | 0.73±0.33 | 0.83±0.58 | 1.36±0.38 | 1.04±0.37 | 0.99±0.33 |
|       | 2013年      | 0.45±0.60 | 1.20±0.75 | 1.43±0.33 |           | 0.97±0.33 |
| 成河东   | 2011—2012年 | 0.68±0.35 | 0.71±0.56 | 1.77±0.28 | 1.00±0.35 | 1.04±0.33 |
|       | 2013年      | 0.76±0.60 | 1.16±0.78 | 1.53±0.33 |           | 1.10±0.33 |
| 成河西   | 2011—2012年 | 1.39±0.36 | 1.00±0.39 | 1.82±0.41 | 1.22±0.3  | 1.36±0.24 |
|       | 2013年      | 1.37±0.51 | 1.22±0.34 | 1.07±0.24 |           | 1.24±0.24 |
| 成河中   | 2011—2012年 | 1.26±0.40 | 1.03±0.53 | 1.48±0.51 | 1.25±0.55 | 1.26±0.24 |
|       | 2013年      | 1.09±0.29 | 1.34±0.64 | 1.39±0.24 |           | 1.26±0.24 |
| 高良涧   | 2011—2012年 | 1.37±0.47 | 1.11±0.41 | 0.96±0.31 | 1.63±0.59 | 1.27±0.26 |
|       | 2013年      | 1.15±0.44 | 0.92±0.68 | 1.34±0.26 |           | 1.11±0.26 |
| 蒋坝    | 2011—2012年 | 1.22±0.53 | 0.94±0.46 | 2.22±0.32 | 1.54±0.58 | 1.48±0.27 |
|       | 2013年      | 1.24±0.39 | 1.44±0.34 | 2.34±0.27 |           | 1.59±0.27 |
| 老子山   | 2011—2012年 | 1.39±0.44 | 0.76±0.4  | 1.37±0.52 | 1.46±0.57 | 1.24±0.25 |
|       | 2013年      | 1.31±0.23 | 0.94±0.38 | 1.93±0.25 |           | 1.33±0.25 |
| 临淮    | 2011—2012  | 1.39±0.45 | 2.17±0.43 | 2.30±0.39 | 1.35±0.3  | 1.84±0.23 |
|       | 2013年      | 1.24±0.28 | 1.58±0.11 | 1.88±0.23 |           | 1.53±0.23 |
| 龙集北   | 2011—2012年 | 1.15±0.47 | 1.54±0.65 | 1.37±0.34 | 1.10±0.39 | 1.29±0.33 |
|       | 2013年      | 0.82±0.57 | 1.19±0.47 | 2.22±0.33 |           | 1.31±0.33 |
| 龙集北偏北 | 2011—2012年 | 0.95±0.39 | 0.23±0.27 | 1.30±0.41 | 1.03±0.38 | 0.94±0.32 |
|       | 2013年      | 0.91±0.58 | 1.13±0.67 | 1.77±0.32 |           | 1.20±0.32 |
| 溧河洼   | 2011—2012年 | 1.14±0.44 | 1.93±0.41 | 2.30±0.35 | 1.28±0.14 | 1.66±0.26 |
|       | 2013年      | 1.55±0.4  | 1.97±0.16 | 2.39±0.26 |           | 1.92±0.26 |

表 5 洪泽湖浮游藻类细胞密度和多样性与水体物化特征关系的半矩阵

| 项目                 | 硅藻门     | 蓝藻门       | 绿藻门    | 其他门类      | 总密度      | 水温         | pH     | DO      | NH <sub>3</sub> -N | TP     | TN     | 蒋坝水位  |
|--------------------|---------|-----------|--------|-----------|----------|------------|--------|---------|--------------------|--------|--------|-------|
| 蓝藻门                | 0.030   |           |        |           |          |            |        |         |                    |        |        |       |
| 绿藻门                | -0.180  | 0.043     |        |           |          |            |        |         |                    |        |        |       |
| 其他门类               | 0.380   | 0.774 *** | 0.116  |           |          |            |        |         |                    |        |        |       |
| 总密度                | 0.000   | 0.984 *** | 0.221  | 0.778 *** |          |            |        |         |                    |        |        |       |
| 水温                 | 0.045   | 0.524 *   | 0.229  | 0.506 *   | 0.553 *  |            |        |         |                    |        |        |       |
| pH                 | -0.056  | -0.267    | 0.406  | -0.155    | -0.188   | 0.088      |        |         |                    |        |        |       |
| DO                 | -0.104  | -0.428    | -0.139 | -0.478 *  | -0.443   | -0.968 *** | -0.065 |         |                    |        |        |       |
| NH <sub>3</sub> -N | -0.023  | 0.161     | -0.135 | 0.349     | 0.133    | 0.382      | -0.120 | -0.404  |                    |        |        |       |
| TP                 | 0.096   | -0.068    | -0.141 | 0.117     | -0.092   | 0.057      | -0.149 | -0.146  | 0.141              |        |        |       |
| TN                 | -0.311  | -0.579 *  | -0.271 | -0.535    | -0.704 * | -0.597 *   | -0.544 | 0.587 * | 0.269              | -0.327 |        |       |
| 蒋坝水位               | 0.574 * | -0.248    | -0.338 | -0.025    | -0.302   | -0.545     | -0.113 | 0.420   | -0.512             | 0.258  | -0.084 |       |
| 多样性                | 0.441   | 0.198     | -0.229 | 0.555 *   | 0.153    | 0.220      | -0.133 | -0.238  | 0.225              | 0.250  | -0.318 | 0.264 |

注：\* 表示  $P<0.05$ ；\*\* 表示  $P<0.01$ ；\*\*\* 表示  $P<0.001$ 。

细胞密度与全年总细胞密度相关性最高,说明蓝藻在全年浮游藻类细胞密度中具有较大贡献。进一步分析发现,颤藻和微囊藻是洪泽湖的绝对优势物种,两者占总密度的 80% 以上。颤藻和微囊藻是浅水湖泊中两种最典型的蓝藻<sup>[13]</sup>。比如在太湖,微囊藻和颤藻水华都有发生,其中微囊藻全年发生,而颤藻一般在夏秋两季暴发<sup>[14]</sup>。可见,洪泽湖富营养化状态与多数浅水湖泊一致,水华的优势物种都是蓝藻<sup>[15-16]</sup>。虽然如此,与滇池(细胞密度为 520 万~12 亿个/L<sup>[17]</sup>;  $\rho(N)=2.0\text{ mg/L}$ ,  $\rho(P)=0.21\text{ mg/L}$ <sup>[18]</sup>)和太湖五里湖(细胞密度 386 万~558 万个/L<sup>[19]</sup>;  $\rho(N)=7.2\text{ g/L}$ 和  $\rho(P)=0.15\text{ mg/L}$ <sup>[20]</sup>)相比,洪泽湖的藻细胞密度和营养盐浓度相对较低。但是,如果不及早重视洪泽湖的生态恢复和治理,其富营养化趋势将难以得到遏制。

洪泽湖浮游藻类物种组成和细胞密度存在明显的季节变化,这与温度的季节性差异有关。温度是藻类生长的重要限制因素,藻类在低温季节难以生长。洪泽湖湖区属北亚热带季风气候,季节变化十分明显。因此,在水温较高的夏季 6—8 月,2011—2013 年藻细胞密度超过水华阈值的 1.4~20.3 倍;而在水温较低的 3—5 月,细胞密度不足水华阈值的 1/3。相关分析表明,水温和全湖各月细胞密度之间存在很好的线性正相关关系,说明水温是导致洪泽湖细胞密度季节变化的重要环境因素。水温的变化同样会改变浮游藻类的群落组成。与其他浮游藻类相比,蓝藻生长需要更高的温度(其最适生长温度为 25~35℃<sup>[5]</sup>)。在较高温度下蓝藻相比其他藻类更易取得竞争优势<sup>[21]</sup>。一方面,高温条件下蓝藻分泌的次生代谢物(藻毒素)含量的增加抑制了浮游动物和其他浮游藻类的生长<sup>[10]</sup>;另一方面,蓝藻的快速生长,造成水体透明度下降,遮蔽光线而进一步抑制其他水生植物的生长(如沉水植物等),甚至导致其他水生植物死亡,死亡释放的养分又提供了蓝

藻生长所需要的养分。因此,夏秋季节水温高时,蓝藻相对密度最高,随着冬季和春季水温降低,蓝藻竞争抑制作用减弱,其他藻类(主要为绿藻和硅藻)的相对密度得到提高。

除了温度,水位可能也是细胞密度季节变化的重要调节因子。水位变化说明水体容积发生了变化,从而直接通过“浓缩”或“稀释”作用影响藻密度。例如,2012 年 6 月、2013 年 7 月和 9 月细胞密度骤然提升,可能与这个几个月出湖流量增加、水位下降有关。此外,N、P 等养分浓度的波动也引起藻类细胞密度变化。P 含量相对较高的夏季和秋季蓝藻细胞密度及总浮游藻类细胞密度相对较高,随着冬季和春季 P 浓度降低,蓝藻生长受到限制,绿藻逐渐取得竞争优势,相对密度不断增加。可见,洪泽湖浮游藻类的季节变化可能是温度、水位和养分等要素共同作用的结果。

洪泽湖浮游藻类物种组成和细胞密度在空间上的差异也很明显。浮游藻类物种数量在不同区域明显不同,对比分析发现,湖区西部(如临淮、成河西,以及溧河洼)离入湖口区域较近的样点浮游藻类物种较多,主要是受入湖水流带来的上游河流的浮游藻类物种的影响,而在出湖口一侧(如蒋坝等)的东部湖区浮游藻类种类较少,原因可能跟出湖区水流速度较快不利于藻类的生长繁殖有关<sup>[22]</sup>。浮游藻类种类组成在区域上差异较小,均以绿藻为主,蓝藻、硅藻次之。

同样,细胞密度的空间差异也跟水动力要素有关。浮游藻类细胞密度最高的监测位点在成子湖水域,其中 2011—2012 年龙集北偏北夏季和秋季藻细胞密度分别超过湖泊水华阈值 13.5 和 8.8 倍,2013 年成河北、成河东、龙集北偏北均超过湖泊水华阈值 10 倍以上;而细胞密度较低的监测点位是成河中和老子山,其藻类细胞密度水平通常低于水华阈值,甚至处于贫营养状态(阈值小于 30 万个/L)<sup>[9]</sup>。老子

山处在淮河的入湖口,蒋坝处在三河区出湖口,高良涧位于二河闸,靠近苏北灌溉总渠的出湖口,这些位点过水性都很强。因此,不同采样点藻细胞密度的差异可能与洪泽湖独特的水动力特征有关,即过水性越强、水流速度越大,越不容易发生水华<sup>[22]</sup>。此外,从整体上看,洪泽湖为一个典型的过水性湖泊,年换水在10次以上,正因为其径流量大,流速较快,降低了蓝藻细胞密度的增加速度,所以相比滇池和太湖五里湖等过水性相对较弱的富营养化湖泊,其藻类细胞密度要低。

水体营养盐浓度也是影响浮游藻类细胞密度时空分布的重要因素。虽然整合数据的分析表明,营养盐浓度与植物细胞密度没有显著相关关系,而且TN与总细胞密度呈显著负相关。这可能与养分和水温等其他要素的相互作用有关。洪泽湖处在温带地区,夏秋季节温度高,藻类分裂快,细胞密度高,但同时因为夏秋季节降水量较大、进出湖泊的河流净流量大,营养盐浓度反而降低。相反,冬春季节温度低,不适宜藻类生长,细胞密度低,但冬春降水量小、水位低,水体营养盐浓度高。类似负相关的结果在杭州西湖等其他水体中也有报道<sup>[23]</sup>。但是营养盐浓度仍可能是影响藻类细胞密度分布的重要因素。例如,在成子湖等浮游藻类细胞密度最高的区域,NH<sub>3</sub>-N质量浓度都相对较高(0.42 mg/L),而在细胞密度相对较低的成河中、高良涧、蒋坝、老子山等监测点NH<sub>3</sub>-N质量浓度较低(0.22 mg/L)。NH<sub>3</sub>-N作为浮游藻类生长可直接利用的营养盐,其空间差异可能是导致浮游藻类细胞密度空间现状的重要因素。

#### 4 结 语

调查结果显示,洪泽湖夏秋季节局部水域有明显的富营养化特征,在水动力较弱的成子湖区域蓝藻水华现象尤为明显。洪泽湖蓝藻水华的发生是营养盐、水温和水动力特征共同作用的结果。夏秋季节的炎热高温、丰富的营养盐含量以及较低的水流速度导致了成子湖等区域蓝藻水华的大量爆发。需要指出的是,本次定量实验采用的是网筛过滤法,虽然该方法可能会低估水体当中小于20 μm的浮游藻类的细胞密度,但即使如此,洪泽湖浮游藻类群落组成和细胞密度仍然存在明显的时空动态,表现出富营养化加剧的趋势,因此,洪泽湖富营养化问题更应该引起人们的重视。

南水北调东线工程通水后,水位抬高,水动力条件改变,可能会影响洪泽湖,特别是成子湖湾区域,浮游藻类时空格局的变化,因此需要开展持续的观测研究。进一步加大洪泽湖入湖河流污染治理和湖

区退耕还湖力度,逐步减少污染物输入,从而降低洪泽湖营养盐含量,是遏制洪泽湖富营养化加剧的根本措施。

#### 参考文献:

[1] 《中国河湖大典》编纂委员会. 中国河湖大典 淮河卷 [M]. 北京:中国水利水电出版社,2010.

[2] 杨士建. 洪泽湖湿地资源保护与可持续利用研究[J]. 重庆环境科学, 2003, 25(2): 15-17. (YANG Shijian. Study on protection and sustainable use of wetland around Hongze Lake [J]. Chongqing Environmental Sciences, 2003, 25(2): 15-17. (in Chinese))

[3] 李波,濮培民. 淮河流域及洪泽湖水质的演变趋势分析[J]. 长江流域资源与环境, 2003, 12(1): 68-73. (LI Bo, PU Peimin. Study on the evolution tendency of water quality in Huai River Basin and Hongze Lake [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2003, 12(1): 68-73. (in Chinese))

[4] 葛绪广,王国祥. 洪泽湖面临的生态环境问题及其成因[J]. 人民长江, 2008, 39(1): 28-30. (GE Xuguang, WANG Guoxiang. Eco-environmental problems in Hongze lake and their causes of formation [J]. Yangtze River, 2008, 39(1): 28-30. (in Chinese))

[5] 王兆群,张宁红,张咏. 洪泽湖藻类与环境因子逐步回归统计和蓝藻水华初步预测[J]. 中国环境监测, 2012, 28(4): 17-20. (WANG Zhaoqun, ZHANG Ninghong, ZHANG Yong. Prediction of blue-green algae bloom using stepwise multiple regression between algae & related environmental factors in Hongze Lake [J]. Environmental Monitoring in China, 2012, 28(4): 17-20. (in Chinese))

[6] 陈翔,禹继华,刘杰,等. 洪泽湖蓝藻暴发的气象条件分析[J]. 安徽农业科学, 2010, 38(15): 8141-8142, 8177. (CHEN Xiang, YU Jihua, LIU Jie, et al. Analysis on the meteorological condition of blue-green algae fast growth in Hongze Lake [J]. Journal of Anhui Agricultural Science, 2010, 38(15): 8141-8142, 8177. (in Chinese))

[7] 王兆群,张宁红,张咏,等. 洪泽湖水水质富营养化评价[J]. 环境监控与预警, 2010, 2(6): 31-35. (WANG Zhaoqun, ZHANG Ninghong, ZHANG Yong, et al. Eutrophication assessment of water quality in Hongze Lake [J]. Environmental Monitoring and Forewarning, 2010, 2(6): 31-35. (in Chinese))

[8] 周凤霞,陈剑虹. 淡水微型生物图谱[M]. 北京:化学工业出版社,2005.

[9] DAVIS T W, BERRY D L, BOYER D L, et al. The effects of temperature and nutrients on the growth and dynamics of toxic and non-toxic strains of Microcystis during cyanobacteria blooms [J]. Harmful Algae, 2009, 8: 715-725.

- [10] 张婷,李林,宋立荣.熊河水库浮游藻类群落结构的周年变化[J].生态学报,2009,29(6):2971-2979. (ZHANG Ting,LI Lin,SONG Lirong. Annual dynamics of phytoplankton abundance and community structure in the Xionghe Reservoir[J]. Acta Ecologica Sinica,2009,29(6):2971-2979. (in Chinese))
- [11] SHANNON C E,WIENER W. The mathematical theory of communication[M]. Urbana: University Illinois Press, 1963.
- [12] TAHERIYOUN M, KARAMOUZ M, BAGHVAND A. Development of an entropy-based fuzzy eutrophication index for reservoir water quality evaluation[J]. Iranian Journal of Environmental Health Science & Engineering, 2010(7):1-14.
- [13] CHU Z S, JIN X C, IWAMI N, et al. Eutrophication of Shallow Lakes with Special Reference to Lake Taihu, China[M]. Berlin:Springer,2007.
- [14] 张军毅,朱冰川.太湖五里湖蓝藻水华种类及其演替规律研究[C]//中国环境科学学会.2012 中国环境科学学会学术年会论文集(第2卷).北京:中国农业大学出版社,2012:621-625.
- [15] 秦伯强.太湖水环境面临的主要问题、研究动态与初步进展[J].湖泊科学,1998,10(4):1-9. (QIN Boqiang. A review and prospect about the aquatic environment studies in Taihu Lake[J]. Journal of Lake Sciences, 1998, 10(4):1-9. (in Chinese))
- [16] 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[J].湖泊科学,2002,14(3):193-202. (QIN Boqiang. Approaches to mechanisms and control of eutrophication of shallow lakes in the Middle and Lower Reaches of the Yangze River[J]. Journal of Lake Sciences,2002,14(3):193-202;1-9. (in Chinese))
- [17] 李原,张梅,王若南.滇池的水华蓝藻的时空变化[J].云南大学学报(自然科学版),2005,27(3):272-276. (LI Yuan,ZHANG Mei,WANG Ruonan. The temporal and spation variation of the cyanobacteria which caused the water bloom in the Dianchi Lake, Kunming, China [J]. Journal of Yunnan University (Natural Sciences), 2005,27(3):272-276. (in Chinese))
- [18] 张治中.滇池氮与富营养化研究[J].环境科学导刊,2007,26(6):34-36. (ZHANG Zhizhong. Study on nitrogen and eutrophication of Dianchi Lake [J]. Environmental Science Survey,2007,26(6):34-36. (in Chinese))
- [19] 孟顺龙,陈家长,范立民,等.2007年太湖五里湖浮游藻类生态学特征[J].湖泊科学,2009,21(6):845-854. (MENG Shunlong, CHEN Jiazhang, FAN Limin, et al. Eco-characteristics of phytoplankton in Lake Wuli, Lake Taihu in 2007 [J]. Journal of Lake Sciences, 2009, 21(6):845-854. (in Chinese))
- [20] 宋晓兰,刘正文,潘宏凯,等.太湖梅梁湾与五里湖浮游藻类群落的比较[J].湖泊科学,2007,19(6):643-651. (SONG Xiaolan, LIU Zhengwen, PANG Hongkai, et al. Phytoplankton community structure in Meiliang Bay and Lake Wuli of Lake Taihu [J]. Journal of Lake Sciences, 2007,19(6):643-651. (in Chinese))
- [21] NALEWAJKO C, MURPHY T P. Effects of temperature, and availability of nitrogen and phosphorus on the abundance of anabaena and microcystis in Lake Biwa, Japan: an experimental approach [J]. Limnology, 2001(2):45-48.
- [22] 林秋奇,胡韧,韩博平.流溪河水库水动力学对营养盐和浮游藻类分布的影响[J].生态学报,2003,23(11):2278-2284. (LIN Qiuqi, HU Ren, HAN Boping. Effect of hydrodynamics on nutrient and phytoplankton distribution in Liuxihe Reservoir [J]. Acta Ecologica Sinica,2003,23(11):2278-2284. (in Chinese))
- [23] 毛成贵,余雪芳,邵晓阳.杭州西湖总氮、总磷周年变化与水体富营养化研究[J].水生生态学杂志,2010,3(4):1-6. (MAO Chengze, YU Xuefang, SHAO Xiaoyang. Study on the annual variations of TN and TP and the eutrophication in Hangzhou West Lake [J]. Journal of Hydroecology,2010,3(4):1-6. (in Chinese))

(收稿日期:2015-11-29 编辑:徐娟)

(上接第114页)

- [14] 陈义飞,孙琴,丁士明,等.强化混凝技术处理南淝河污染水的效果[J].水资源保护,2015,31(4):103-110. (CHEN Yifei, SUN Qin, DING Shiming, et al. Effect of enhanced coagulation technology for treatment of polluted water from Nanfei River [J]. Water resources Protection, 2015, 31(4):103-110. (in Chinese))
- [15] 杨慧,宁海丽,裴亮.凹凸棒土的氨氮吸附性能研究[J].环境工程学报,2011,5(2):343-346. (YANG Hui, NING Haili, PEI Liang. Properties study on ammonia nitrogrn adsorption of attapulgite [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2011, 5(2):343-346. (in Chinese))
- [16] 建霜.沸石对生活污水氨氮处理的研究[D].重庆:重庆交通大学,2014.
- [17] 陈泽恩,王郑,缪伟,等.凹凸棒复合滤料对氨氮的静态吸附研究[J].广东化工,2009,36(8):19-20. (CHEN Zeen, WANG Zheng, MIAO Wei, et al. Study on adsorption of ammonia nitrogen by attapulgite composite filter material [J]. Guangdong Chemical Industry, 2009, 36(8):19-20. (in Chinese))

(收稿日期:2015-11-29 编辑:王芳)