

## 垂向归纳模型下鄱阳湖丰、枯水期初级生产力特征及与环境因子相关性分析\*

李艳红<sup>1,2,3</sup>, 葛 刚<sup>1</sup>, 王茂林<sup>1</sup>, 周晓岚<sup>1</sup>, 胡春华<sup>1\*\*</sup>

(1: 南昌大学鄱阳湖环境与资源利用教育部重点实验室, 南昌 330029)

(2: 江西省水利科学研究院, 南昌 330029)

(3: 江西省鄱阳湖水资源与环境重点实验室, 南昌 330029)

**摘 要:** 于 2014 年 1 月(枯水期)、7 月(丰水期)对鄱阳湖湖水进行采集,测定相应的理化参数、叶绿素 a 浓度和光合有效辐射,结合初级生产力垂向归纳模型估算浮游植物初级生产力,分析湖区初级生产力特征及与环境因子的相关性。结果表明,鄱阳湖枯水期浮游植物初级生产力波动范围为 83.50~355.43 mg C/(m<sup>3</sup>·d),平均值为 193.33 mg C/(m<sup>3</sup>·d),初级生产力空间分布特征主要受水体类型的影响,枯水期初级生产力与氮、磷营养盐浓度呈负相关,其中与铵态氮浓度呈显著负相关,枯水期不会出现营养盐限制现象;丰水期浮游植物初级生产力波动范围为 113.80~1134.06 mg C/(m<sup>3</sup>·d),平均值为 412.12 mg C/(m<sup>3</sup>·d),初级生产力空间分布主要受河流注入的影响,丰水期浮游植物初级生产力与总磷及悬浮物浓度呈显著正相关,由于悬浮物对浮游植物生长的促进作用大于抑制作用,鄱阳湖丰水期会出现磷营养盐的限制;鄱阳湖整体平均流速约为 0.28 m/s,易于浮游植物的生长,南鄱阳湖平均流速约为 0.21 m/s,而北鄱阳湖平均流速约为 0.35 m/s,所以南鄱阳湖比北鄱阳湖更容易发生水体富营养化并暴发水华。

**关键词:** 初级生产力;垂向归纳模型;丰枯水期;影响因子;相关分析;鄱阳湖

## Characteristics of primary productivity of Lake Poyang in wet and dry seasons and the correlations with environmental factors using the Vertically Generalized Production Model

LI Yanhong<sup>1,2,3</sup>, GE Gang<sup>1</sup>, WANG Maolin<sup>1</sup>, ZHOU Xiaolan<sup>1</sup> & HU Chunhua<sup>1\*\*</sup>

(1: *Key Lab of Lake Ecology and Bio-resource Utilization of Poyang Lake, Ministry of Education, Nanchang University, Nanchang 330029, P.R.China*)

(2: *Jiangxi Provincial Institute of Water Science, Nanchang 330029, P.R.China*)

(3: *Jiangxi Provincial Key Laboratory of Water Resources and Environment of Poyang Lake, Nanchang 330029, P.R.China*)

**Abstract:** The water samples from Lake Poyang were collected in January (dry season) and July (wet season) of 2014 in order to measure the corresponding physical factors, chlorophyll-a concentration and photosynthetically active radiation. Vertically Generalized Production Model was used to estimate the primary productivity of phytoplankton, characteristics and relationship with the lake environmental factors. Results show that the range of phytoplankton's primary productivity in Lake Poyang is fluctuated between 83.50 and 355.43 mg C/(m<sup>3</sup>·d), and the average is 193.33 mg C/(m<sup>3</sup>·d) during the dry season. The spatial distribution of primary productivity is mainly affected by different types of water quality in dry season. The primary productivity is negatively correlated with nutrients, of which NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N was highly significant due to the absences of nutrient limitation. In wet season the range of primary productivity of phytoplankton is between 113.80 and 1134.06 mg C/(m<sup>3</sup>·d), and the average is 412.12 mg C/(m<sup>3</sup>·d), which was affected by the river flow inputs. Primary productivity was significantly positively correlated with the total phosphorus and

\* 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2008ZX07526-008-03)、国际科技合作资助项目(2006DFB91920)、“十一五”国家科技支撑计划重点项目(2007BAB23C02)、国家自然科学基金项目(40672159)、中国经济改革实施技术援助项目(支援期 TCC5jxspyhzh09-03)和鄱阳湖环境与资源利用重点实验室支持项目(13005879, 13005870)联合资助。2015-06-10 收稿;2015-09-16 收修改稿。李艳红(1984~),女,博士研究生;E-mail:liyanhong012@126.com.

\*\* 通信作者;E-mail:nchuchunhua@163.com.

suspended solids concentrations. Because the positive effect caused by suspended solids was greater than the negative effect on phytoplankton, these effects caused that the restricted phosphorus nutrients occur frequently. The overall average velocity is about 0.28 m/s in the Lake Poyang which is beneficial to the growth of phytoplankton. However, the average speed in the south is approximately 0.21 m/s, while it is approximately 0.35 m/s in the north. Therefore, eutrophication, or even algal bloom are more often occurred in the southern Lake Poyang.

**Keywords:** Primary productivity; Vertically Generalized Production Model; wet and dry seasons; impact factor; correlation analysis; Lake Poyang

湖泊初级生产力是指浮游植物、着生藻类、水生维管束植物和自养细菌通过光合作用把无机物转化成有机物的能力,一般浮游植物是主要的生产者<sup>[1]</sup>,特别是在深水水域,水草和底生藻类微不足道,浮游植物几乎是唯一的生产者<sup>[2]</sup>,是其生态系统食物网结构及功能的基础环节. 自 Nielsen<sup>[3]</sup> 利用同位素<sup>14</sup>C 示踪法测定浮游植物光合作用以来,世界范围内开展了大量关于浮游植物初级生产的研究,国外对于这方面的研究主要侧重于氧同位素技术测定浮游植物初级光合速率和呼吸速率<sup>[4]</sup>、集水区和鱼类的营养循环对水体初级生产力的影响<sup>[5]</sup>以及微量元素对浮游植物初级生产力的影响<sup>[6-7]</sup>. 国内研究侧重水体叶绿素 a、浮游植物与初级生产力的时空分布特征和影响因子<sup>[8-12]</sup>以及遥感技术及模型在初级生产力研究上的应用<sup>[13-15]</sup>. 海洋初级生产力遥感估算模型包括假设叶绿素垂向分布均匀和光照强度呈正弦函数变化前提下的 BMP (Bedford Productivity Model) 模型、在考虑光合器官对光的吸收过程前提下的 LPCM (Laboratoire de Physique et Chimie Marines) 模型以及 VGPM (Vertically Generalized Production Model) 模型等<sup>[16-18]</sup>. 初级生产力垂向归纳模型 (VGPM 模型) 是综合考虑水温、光照条件、叶绿素含量和真光层深度等影响初级生产力的因素,来估算浮游植物初级生产力的方法. VGPM 模型经历了长时期、大范围、不同水域上千个站点的上万个实测数据的验证,不仅计算精确,而且运用广泛. 虽然 VGPM 模型最初运用于海洋,但对内陆水体同样适用<sup>[13]</sup>. 国内学者已经运用 VGPM 模型分别对太湖、长江中下游湖区以及梅梁湾等内陆水体的浮游植物初级生产力进行了估算<sup>[13-14, 19]</sup>.

鄱阳湖位于长江中下游,是我国最大的淡水湖,也是我国淡水渔业主要基地之一,对长江中下游生态环境具有重要意义<sup>[20]</sup>. 鄱阳湖是一个吞吐性、过水性和季节性的湖泊,具有“高水是湖,低水似河,枯水似沟”、“洪水一片,枯水一线”的典型特征,其季节性变化显著,出入湖口的通量变化明显,导致水质变化频繁,对鄱阳湖初级生产力的估算产生较大的影响. 近年来,由于湖泊周围经济的发展,鄱阳湖水质不可避免遭到一定的影响,作者前期研究成果表明鄱阳湖已局部具备了发生富营养化的氮、磷条件,有逐步向富营养化发展的趋势. 对于鄱阳湖富营养化的研究相对较多,但主要都是从氮、磷营养盐单方面分析富营养化,本文运用 VGPM 模型估算浮游植物初级生产力并分析其分布特征及其与环境因子的相关性,为鄱阳湖富营养化研究及治理提供理论依据,同时也为鄱阳湖渔业发展提供依据.

## 1 材料与方法

### 1.1 样品采集与分析

分别于 2014 年 1、7 月对鄱阳湖湖水进行采样(图 1),采样点通过 GPS 定位. 现场测定水温(T)、pH 值、溶解氧(DO)等易变参数以及叶绿素 a (Chl.a) 浓度、光合有效辐射(PAR),并采用塞氏盘测定水体透明度(SD). 水样采集后装入聚乙烯瓶中并写好标签,加 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>酸化至 pH 值小于 2,置于 4℃ 冰箱保存,运回实验室后立即进行化学分析.

总磷(TP)浓度采用钼锑抗分光光度法测定(GB 11893—1989),铵态氮(NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N)浓度采用纳氏试剂分光光度法测定(GB 7479—1987),硝态氮(NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N)浓度采用酚二磺酸分光光度法测定(GB/T 7480—1987),总氮(TN)浓度采用过硫酸钾氧化紫外分光光度法测定(GB 11894—1989),悬浮物(SS)采用称量法测定. 水温、pH 值、DO 浓度采用便携式现场分析仪测定,Chl.a 浓度和 PAR 采用 HACH-HYDROLAB 多参数水质分析仪现场测定.

### 1.2 VGPM 模型概述

Behrfield 等<sup>[18]</sup>收集 1971—1994 年间北纬 80°至南纬 70°共 1698 个测站的 11283 个数据,数据集包含了

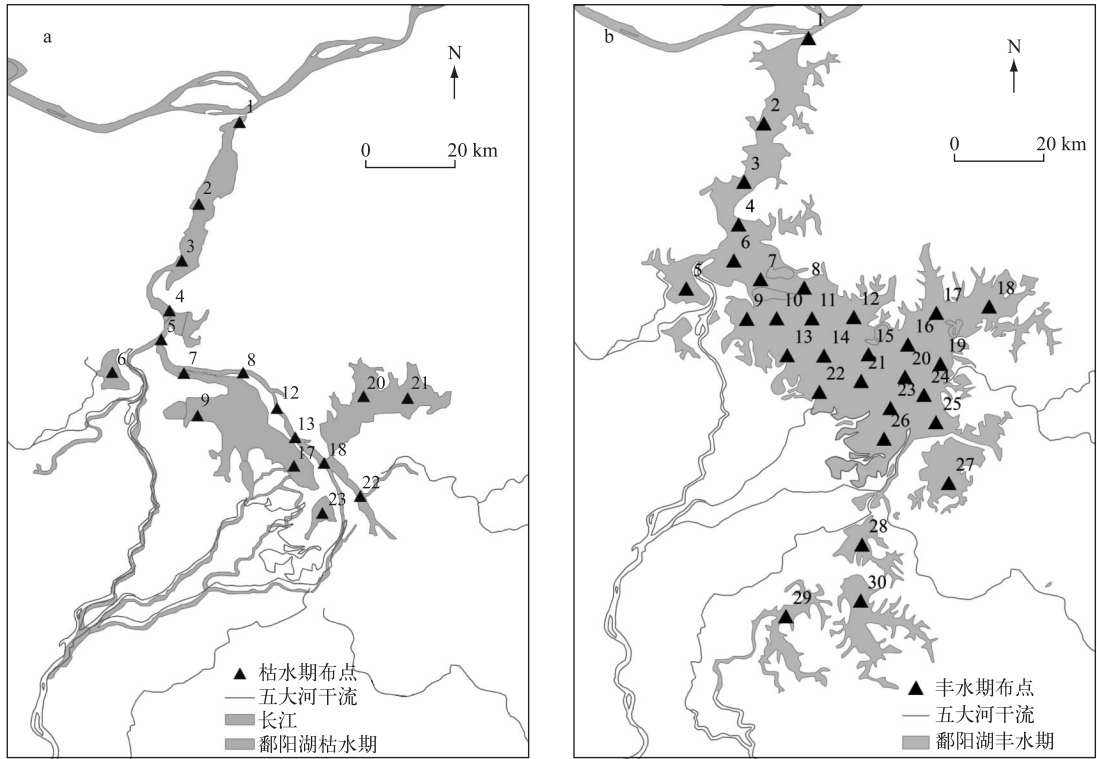


图 1 鄱阳湖枯水期(a)和丰水期(b)采样点分布

Fig.1 Distribution of sampling sites in dry season(a) and wet season(b) of Lake Poyang

I类和II类水体的寡营养环流海域到高度富营养水域的不同区域的实测资料,根据这些实测资料,Behreld等标准化叶绿素浓度、光照周期和真光层深度后,综合考虑水温、光照条件、叶绿素含量和真光层深度等影响水柱初级生产力的因素,建立了依据水温、叶绿素a浓度等参数来估算海洋初级生产力的VGPM模型<sup>[18]</sup>. VGPM模型经历了长时期大范围不同水域上千个站点的上万个实测数据的验证,不仅计算精确而且运用广泛<sup>[19]</sup>. 建立表达式后,又将其进行简化成如下形式:

$$PP_{eu} = 0.66125P_{opt}^B \cdot \frac{E_0}{E_0 + 4.1} \cdot Z_{eu} \cdot C_{opt} \cdot D_{irr} \quad (1)$$

式中, $PP_{eu}$ 为真光层初级生产力; $E_0$ 是湖表面日光合有效辐射强度,数据可根据HACH-HYDROLAB多参数水质分析仪测得; $C_{opt}$ 是最大光合速率所在深度的叶绿素a浓度,可以用由HACH-HYDROLAB多参数水质分析仪测定的表层叶绿素a浓度来替代; $D_{irr}$ 是光照周期,根据经纬度可以计算点位的日出日落时间,得到光照周期数据; $Z_{eu}$ 是真光层深度(当水深小于真光层深度就可以用水深代替); $P_{opt}^B$ 是水体最大光合作用速率,是温度的函数,其表达式为:

$$P_{opt}^B = \begin{cases} 1.13 & T \leq -1.0 \\ 4.00 & T \geq -28.5 \\ P_{opt}^{B'} & \text{其他} \end{cases} \quad (2)$$

另外,水表面温度为 $-1.0 < T \leq 28.5$ 时:

$$P_{opt}^{B'} = 1.2956 + 2.749 \times 10^{-1}T + 6.17 \times 10^{-2}T^2 - 2.05 \times 10^{-2}T^3 + 2.462 \times 10^{-3}T^4 - 1.348 \times 10^{-4}T^5 + 3.4132 \times 10^{-6}T^6 - 3.27 \times 10^{-8}T^7 \quad (3)$$

根据公式(1)计算得到浮游植物初级生产力.

### 1.3 真光层深度定义及计算

水体真光层深度定义为水柱中支持净初级生产力的水体部分,其底部临界深度,即水柱的日净初级生产力为0的深度<sup>[21]</sup>.对于以非色素颗粒物主导的浑浊Ⅱ类水体,真光层深度很大程度上受制于非色素颗粒物浓度,其次才是叶绿素浓度<sup>[19,22-23]</sup>.利用公式  $Z_{\text{cm}} = 1.7239 \text{SD} + 0.1865$  ( $R^2 = 0.8408$ ) 计算鄱阳湖真光层深度<sup>[24]</sup>,其中,SD为湖泊水体透明度.

### 1.4 数据处理及分析

湖泊采样点分布图及初级生产力的分布图的绘制采用 ArcGIS 软件,初级生产力与环境因子的相关性分析采用 SPSS 16.0 软件,数据处理采用 Excel 软件.

## 2 结果与讨论

### 2.1 鄱阳湖初级生产力特征

2.1.1 枯水期初级生产力特征 鄱阳湖枯水期浮游植物初级生产力较小,分布较为均匀,其中东部湖区最大,主航道区鄱阳湖北部湖区高于南部湖区.以都昌和吴城的松门山为界,把鄱阳湖分为南、北两湖,松门山西北为北湖,松门山东南为南湖.枯水期鄱阳湖初级生产力波动较大,范围为 83.50~355.43 mg C/(m<sup>3</sup>·d),平均值为 193.33 mg C/(m<sup>3</sup>·d).北鄱阳湖初级生产力波动范围为 176.18~206.68 mg C/(m<sup>3</sup>·d),平均值为 188.17 mg C/(m<sup>3</sup>·d);南鄱阳湖整体初级生产力波动较大,范围为 83.50~355.43 mg C/(m<sup>3</sup>·d),平均值为 194.91 mg C/(m<sup>3</sup>·d)(图 2a).

南、北鄱阳湖浮游植物初级生产力平均值相差不大,但是各自变化范围区别较大(图 2a).北鄱阳湖初级生产力比较平均,基本与湖泊整体初级生产力持平,波动较小,这主要是因为枯水期北鄱阳湖主要是河道型水体,水体以河流的形式快速交换,更新快,水体理化状态基本比较相似,而且可以接受来自边缘生活区的营养盐,对浮游植物生长比较有利,所以初级生产力基本与湖泊均衡,没有出现极大或极小值现象.南鄱阳湖初级生产力分布比较复杂,主要是因为南鄱阳湖水体类型比较复杂.其中,枯水期初级生产力较高值主要出现在边缘深水区,其在枯水期水体比较浅,水温相对较高,且水体几乎不流动使得悬浮物浓度比较低,有利于光合作用,而水体中营养盐水平较高,这些有利条件导致边缘深水区初级生产力较高.滞留水体区域水体初级生产力也比较高,这主要是因为上游水体主要都是来自灌区,且有大面积水产养殖,其中上游周溪镇是我国著名的珍珠之乡,这些人为因素导致有机物浓度较高,促进浮游植物生长,从而出现浮游植物初级生产力极大值<sup>[12]</sup>;南鄱阳湖过渡型水体中,浮游植物初级生产力由西向东呈降低趋势,是受水体流动性及河流水体注入等因素影响;主湖区和主航道湖水初级生产力均不高,并出现初级生产力极小值,主要是受河流水体注入的影响.

2.1.2 丰水期初级生产力特征 鄱阳湖丰水期浮游植物初级生产力波动较大,最大值出现在老爷庙附近,鄱阳湖北部高于南部.鄱阳湖丰水期浮游植物初级生产力高于枯水期,波动较大,范围为 113.80~1134.06 mg C/(m<sup>3</sup>·d),平均值为 412.12 mg C/(m<sup>3</sup>·d),最高值出现在老爷庙处,最低值出现在饶河入湖口.北鄱阳湖初级生产力波动范围为 309.68~1134.06 mg C/(m<sup>3</sup>·d),平均值为 537.64 mg C/(m<sup>3</sup>·d);南鄱阳湖整体初级生产力波动较大,范围为 113.80~736.26 mg C/(m<sup>3</sup>·d),平均值为 365.09 mg C/(m<sup>3</sup>·d)(图 2b).

鄱阳湖丰水期边缘湖区初级生产力分布较均匀,且相比北鄱阳湖,南鄱阳湖初级生产力分布更为均衡.北鄱阳湖初级生产力波动较大,老爷庙处最高,由老爷庙到蛤蟆石区域逐渐降低.采样期间,老爷庙附近有水产养殖,产生的有机污染物可能促进了浮游植物生物量的增加,导致初级生产力最高.老爷庙附近水动力比较复杂,水体是多种水体混合而成,这些因素对浮游植物影响比较大,从而影响老爷庙附近的初级生产力;从蛤蟆石向长江入湖口处初级生产力递增,在采样同时监测鄱阳湖湖口水体表面流速,流速基本上保持在 2.11 m/s,并且入湖口存在长江水体倒灌现象,导致浮游植物生产量出现增长趋势,初级生产力也随之增大.南鄱阳湖水体浮游植物初级生产力变化比较复杂(图 2b),浮游植物初级生产力较大程度上受河流水体影响,河流的入湖口处初级生产力会出现不同的变化趋势,如南矶山处初级生产力相对湖泊平均值来说偏大,监测时发现水体悬浮物浓度并不高,这为浮游植物光合作用提供了足够光照.由于受到赣江中支水体营养盐输入的影响浮游植物生物量增大,因此南矶山附近水体初级生产力相对于湖泊平均值偏大;另一方面

也表明赣江水体相对鄱阳湖湖区污染更严重,而赣江上支出现低值,这主要是因为修水与赣江水体混合,缓解了赣江水质对湖泊的影响.受鄱阳湖信江、昌江河水注入的影响,南鄱阳湖浮游植物初级生产力相对湖泊过渡区来说较低;湖泊过渡型水体浮游植物初级生产力比较平均,这说明过渡性水体水质特征比较相似.丰水期边缘型湖泊初级生产力并没有偏离平均值较多(图 2b),主要是因为丰水期湖泊水体可以大量接受河流水,得到比较好的交换,同时水体自净能力也较强,水体理化性质与整体湖区相差不大.

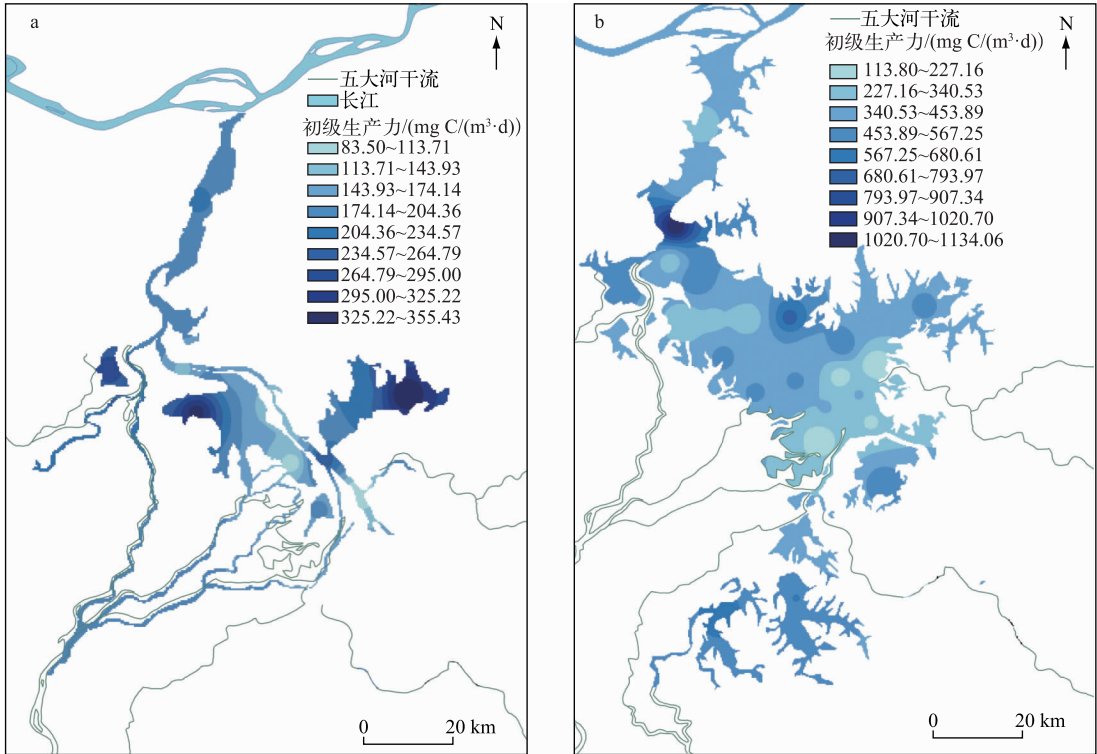


图 2 鄱阳湖枯水期(a)和丰水期(b)浮游植物初级生产力空间分布

Fig.2 Spatial distribution of phytoplankton primary productivity in dry season(a) and wet season(b) of Lake Poyang

## 2.2 初级生产力影响因素及与环境因子的相关分析

受水温、光照、水量等的影响,鄱阳湖枯水期浮游植物初级生产力与氮、磷营养盐浓度呈负相关,其中与  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  浓度的负相关程度最显著(表 1).在枯水期,水体温度较低,光照强度也比较弱,浮游植物基本处于休眠期,对营养盐的利用相对其它时间来说较少,营养盐浓度这段时间也较高,这种情况下藻类繁殖不会受营养盐的限制<sup>[25]</sup>.枯水期氮、磷主要来源是生活污水和工业废水,水体中的有害物质也会导致浮游植物生物量下降,最终导致氮、磷浓度与初级生产力呈负相关;而浮游植物初级生产力与  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  浓度呈显著负相关主要是因为  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  是浮游植物生产、繁殖所吸收的首选氮营养盐,鄱阳湖在枯水期 DO 浓度较高,并且在相关性分析中 DO 浓度与  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  浓度呈显著负相关性,枯水期 DO 浓度高、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$  浓度低,浮游植物生长利用氮营养盐少,不利于水体中浮游植物的生长;由于枯水期水温低、光照强度弱,导致枯水期浮游植物初级生产力低.

鄱阳湖丰水期浮游植物初级生产力与各项环境因子指标均呈正相关,其中与悬浮物浓度和 TP 浓度的相关性显著(表 2),说明丰水期浮游植物初级生产力受 TP 浓度与悬浮物浓度影响比较严重.相关性分析中,丰水期浮游植物生产力与氮、磷营养盐浓度呈正相关,主要是因为丰水期适宜的光照时间、光照强度和温度,都有利于浮游植物繁殖.而丰水期水量丰富,对营养盐有一定的稀释作用,相对来说会存在营养盐限

表1 鄱阳湖枯水期浮游植物初级生产力与环境因子的相关系数  
Tab.1 The correlations between phytoplankton primary productivity and environment factors in dry season of Lake Poyang

|                                 | pH 值   | DO       | SS     | T      | TN       | TP       | NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N | NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N | PP <sub>eu</sub> |
|---------------------------------|--------|----------|--------|--------|----------|----------|---------------------------------|---------------------------------|------------------|
| pH 值                            | 1      |          |        |        |          |          |                                 |                                 |                  |
| DO                              | -0.406 | 1        |        |        |          |          |                                 |                                 |                  |
| SS                              | 0.218  | -0.289   | 1      |        |          |          |                                 |                                 |                  |
| T                               | 0.105  | -0.046   | -0.103 | 1      |          |          |                                 |                                 |                  |
| TN                              | 0.026  | -0.365   | -0.210 | 0.068  | 1        |          |                                 |                                 |                  |
| TP                              | 0.234  | -0.555 * | 0.301  | -0.151 | 0.656 ** | 1        |                                 |                                 |                  |
| NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N | 0.057  | -0.555 * | -0.200 | -0.244 | 0.707 ** | 0.708 ** | 1                               |                                 |                  |
| NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N | -0.423 | -0.364   | -0.134 | -0.056 | 0.255    | 0.084    | 0.124                           | 1                               |                  |
| PP <sub>eu</sub>                | 0.358  | 0.145    | 0.145  | 0.311  | -0.340   | -0.380   | -0.633 **                       | -0.160                          | 1                |

\*\* 表示 0.01 显著水平; \* 表示 0.05 显著水平; PP<sub>eu</sub> 表示浮游植物初级生产力,下同.

制现象,出现正相关性.关于悬浮物对浮游植物初级生产力的影响,有研究表明:一方面,风浪扰动造成大量底泥发生再悬浮,释放出营养盐,会部分提高水体初级生产力<sup>[26]</sup>;另一方面,悬浮物浓度的增加引起水体透明度和真光层深度的下降,从而降低水体的初级生产力<sup>[27-29]</sup>,因此,悬浮物对浮游植物初级生产力既有促进作用,也存在抑制作用.在本研究中,浮游植物初级生产力与悬浮物浓度呈显著正相关,说明悬浮物对浮游植物初级生产力起到促进作用,沉积物的再悬浮作用导致营养盐释放.虽然河流营养盐浓度比湖区高,但由于河流入湖口处复杂的水动力现象,可能出现悬浮物对初级生产力引起的抑制作用大于促进作用.磷营养盐主要来源之一是沉积物再悬浮作用,鄱阳湖为磷限制,浮游植物吸收磷营养盐,得到比较好的繁殖,初级生产力也因浮游植物生物量的增加而增大,因此浮游植物初级生产力与 TP 浓度呈现正相关性.

表2 鄱阳湖丰水期浮游植物初级生产力与环境因子的相关系数  
Tab.2 The correlations between phytoplankton primary productivity and environment factors in wet season of Lake Poyang

|                                 | pH 值     | DO     | SS       | T      | TN       | TP      | NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N | NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N | PP <sub>eu</sub> |
|---------------------------------|----------|--------|----------|--------|----------|---------|---------------------------------|---------------------------------|------------------|
| pH 值                            | 1        |        |          |        |          |         |                                 |                                 |                  |
| DO                              | 0.436 *  | 1      |          |        |          |         |                                 |                                 |                  |
| SS                              | 0.052    | -0.131 | 1        |        |          |         |                                 |                                 |                  |
| T                               | 0.539 ** | 0.317  | -0.132   | 1      |          |         |                                 |                                 |                  |
| TN                              | -0.288   | -0.058 | 0.083    | -0.304 | 1        |         |                                 |                                 |                  |
| TP                              | -0.156   | -0.093 | 0.496 ** | -0.160 | 0.464 ** | 1       |                                 |                                 |                  |
| NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N | 0.043    | 0.306  | -0.342   | -0.019 | 0.310    | -0.084  | 1                               |                                 |                  |
| NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N | -0.209   | -0.185 | 0.018    | -0.116 | 0.726 ** | 0.356   | -0.090                          | 1                               |                  |
| PP <sub>eu</sub>                | 0.306    | 0.330  | 0.444 *  | 0.120  | 0.263    | 0.456 * | 0.142                           | 0.123                           | 1                |

鄱阳湖与太湖初级生产力的特征表现为时间的相似性和空间边缘的类比性以及整体差异性.时间分布特征都是丰水期高于枯水期,丰水期径流携带大量的外源营养盐进入湖泊,加之高温下 PAR 处于高值,浮游植物大量繁殖<sup>[29]</sup>;空间分布同时具有边缘效应,其高值区大都集中在边缘湖泊和过渡型水体,鄱阳湖以“五河”尾间最为显著,而太湖则体现在梅梁湾等港湾,说明两者都受到人为活动的显著影响;鄱阳湖丰水期大部分区域初级生产力基本在平均值附近,这说明湖泊在丰水期水体有较好的循环,且受到汛期长江倒灌等因素的影响,湖口等地水体反复变换,湖泊流域整体难以出现浮游植物大面积暴发水华的现象,而太湖初级生产力高于鄱阳湖,并且边缘湖泊显著高于平均值,没有大江大河的相贯联通,外源河流也极少,水体流通闭塞,水体更新慢,这也是梅梁湾等河段频繁暴发蓝藻的原因.

### 2.3 流速对浮游初级生产力的影响

鄱阳湖是一个流动的水体,特别是枯水期,流速较快,水流流场和流速对浮游植物的影响很大. 水体流速在 0.3 m/s 时,浮游植物生长最佳,当流速低于 0.3 m/s 时,氮、磷营养盐容易不断积累,其负荷的增殖速率随流速的增大而增加;流速超过 0.3 m/s 时,浮游植物数量的增殖速率随流速的增大而减小,且当流速大于 0.5 m/s 时,浮游植物的增殖速率明显降低,几乎没有增长,说明流速过大对浮游植物生长有一定抑制作用<sup>[30]</sup>. 鄱阳湖整体平均流速约为 0.28 m/s,处于低水流状态,易于藻类的生长,南鄱阳湖流速约为 0.21 m/s,而北鄱阳湖流速约为 0.35 m/s,所以南鄱阳湖比北鄱阳湖更容易发生水体富营养化,并暴发水华. 其中根据鄱阳湖水资源动态监测通报显示鄱阳湖的鄱阳一带在汛期时出现磷营养盐重度污染<sup>[31]</sup>,达到 V 类水质,该流域流速很小,约 0.18 m/s,浮游植物对营养盐吸收显著增加,繁殖较快,易发生水华现象. 北鄱阳湖吴城流域以及星子到湖口这段流域流速较大,不利于藻类的生长. 这是因为流速过大时由于水流的冲刷作用,浮游植物的生长、繁殖环境受到破坏,难以聚集生长. 所以有必要对鄱阳湖流速较小有出现水华趋势的流域加强污染防治及环境保护.

## 3 结论

1) 枯水期鄱阳湖北湖区浮游植物初级生产力与湖泊整体初级生产力持平,主要是因为枯水期为河道型水体,水体更新快,交换能力强;枯水期南湖区初级生产力分布较复杂,边缘深水区 and 靠近灌溉区,受到高 pH 值和 DO 浓度的作用出现初级生产力高值区,在过渡性区域内受到水流的影响初级生产力由西向东逐渐递减.

2) 丰水期鄱阳湖初级生产力分布较均衡,由于河水大量注入,自净能力较强,湖区整体理化性质相差较小,南北湖区局部有差异. 北湖区从老爷庙到入湖口呈现先递减后增加的趋势,在养殖渔业区出现极大值而在倒灌性的湖口则出现极小值;在南湖区偏离平均值的区域主要为受污染的水体和悬浮物较少的区域.

3) 枯水期鄱阳湖浮游植物初级生产力与  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  浓度呈显著负相关,枯水期氮、磷营养盐浓度较高,不会出现营养盐限制现象,营养盐与浮游植物初级生产力呈负相关,氮、磷的消耗主要是通过浮游植物;丰水期浮游植物初级生产力与悬浮物浓度及 TP 浓度呈显著正相关,对于湖泊整体,沉积物再悬浮对浮游植物生长的促进作用大于抑制作用,在河流入湖口处,沉积物再悬浮的抑制作用大于促进作用.

## 4 参考文献

- [1] Everett JD, Doblin MA. Characterizing primary productivity measurements across a dynamic western boundary current region. *Oceanographic Research Papers*, 2015, **100**: 105-116.
- [2] 朱津永, 张克鑫, 万莉等. 一小型藻华池塘浮游植物群落动态及其影响因子研究. *环境科学*, 2015, **4**(4): 1310-1314.
- [3] Nielsen ES. The use of radio-active carbon( $\text{C}^{14}$ ) for measuring organic production in the sea. *ICES Journal of Marine Science*, 1952, **18**(2): 117-140.
- [4] Ostrom NE, Russ ME, Field A *et al.* Ratios of community respiration to photosynthesis and rates of primary production in Lake Erie via oxygen isotope techniques. *Chemical Geology*, 2009, **269**(1/2): 3-11.
- [5] Vanni MJ, Bowling AM, Dickman EM *et al.* Nutrient cycling by fish supports relatively more primary production as lake productivity increased. *Ecology*, 2006, **87**(7): 1696-1709.
- [6] Alderkamp AC, Mills MM, Dijken GLV *et al.* Iron from melting glaciers fuels phytoplankton blooms in the Amundsen Sea (Southern Ocean); Phytoplankton characteristics and productivity. *Deep-Sea Research II*, 2012, **71-76**: 32-48.
- [7] Thuróczy CE, Alderkamp AC, Laan P *et al.* Key role of organic complexation of iron in sustaining phytoplankton blooms in the Pine Isl and Amundsen Polynyas (Southern Ocean). *Deep-Sea Research II*, 2012, **71-76**(10): 49-60.
- [8] 郭劲松, 李伟, 李哲等. 三峡水库小江回水区春季初级生产力. *湖泊科学*, 2011, **23**(4): 591-596. DOI 10.18307/2011.0415.
- [9] 蒋万祥, 赖于尼, 庞世勋等. 珠江口叶绿素 a 时空分布及初级生产力. *生态与农村环境学报*, 2010, **26**(2): 132-136.
- [10] 万蕾, 朱伟. 重污染河道中浮游植物初级生产力特征. *生态环境学报*, 2010, **19**(1): 34-39.

- [11] 王生福, 宋星宇, 黄良民等. 南海北部夏季浮游细菌生长效率初步研究. 热带海洋学报, 2013, **32**(6): 73-79.
- [12] 汪益滨, 张维砚, 徐春燕等. 淀山湖浮游植物初级生产力及其影响因子. 环境科学, 2011, **32**(5): 1249-1256.
- [13] 曾台衡, 刘国祥, 胡征宇. 长江中下游湖区浮游植物初级生产力估算. 长江流域资源与环境, 2011, **20**(6): 717-722.
- [14] 殷燕, 张运林, 时志强等. 基于 VGPM 模型和 MODIS 数据估算梅梁湾浮游植物初级生产力. 生态学报, 2012, **32**(11): 3528-3537.
- [15] Robin J, Wezel A, Bornette G *et al.* Biodiversity in eutrophicated shallow lakes: determination of tipping points and tools for monitoring. *Hydrobiologia*, 2014, **723**(1): 63-75.
- [16] Longhurst A, Sathyendranath S, Platt T *et al.* An estimate of global primary production in the ocean from satellite radiometer data. *Journal of Plankton Research*, 1995, **17**(6): 1245-1271.
- [17] Antoine D, Andrt JM, Morel A. Oceanic primary production 2. Estimation at global scale from satellite (coastal zone color scanner) chlorophyll. *Global Biogeochemical Cycles*, 1996, **10**(1): 57-69.
- [18] Behrenfeld MJ, Falkowski PG. Photosynthetic rates derived from satellite-based chlorophyll concentration. *Limnology and Oceanography*, 1997, **42**(1): 1-20.
- [19] 张运林, 冯胜, 马荣华等. 太湖秋季真光层深度空间分布及浮游植物初级生产力的估算. 湖泊科学, 2008, **20**(3): 380-388. DOI 10.18307/2008.0319.
- [20] 傅敏宁, 郑有飞, 樊建勇等. 鄱阳湖地区生态环境与气象灾害监测系统. 自然灾害学报, 2008, **17**(1): 134-138.
- [21] 韩博平, 韩志国, 付翔. 藻类光合作用机理与模型. 北京: 科学出版社, 2003: 180-181.
- [22] 张运林, 秦伯强, 胡维平等. 太湖典型湖区真光层深度时空变化及生态意义. 中国科学: D 辑: 地球科学, 2006, **36**(3): 287-296.
- [23] 李云亮, 张运林, 刘明亮. 太湖真光层深度的计算及遥感反演. 湖泊科学, 2009, **21**(2): 165-172. DOI 10.18307/2009.0203.
- [24] 范成新, 王春霞. 长江中下游湖泊环境地球化学与富营养化. 北京: 科学出版社, 2007: 434-438.
- [25] 齐玉春, 彭琴, 董云社等. 不同退化程度羊草草原碳收支对模拟氮沉降变化的响应. 环境科学, 2015, **36**(2): 626-630.
- [26] Schallenberg M, Burns CW. Effects of sediment resuspension on phytoplankton production: teasing apart the influence of light, nutrients and algal entrainment. *Freshwater Biology*, 2004, **49**(2): 143-159.
- [27] 张运林, 秦伯强, 陈伟民等. 太湖水体中悬浮物研究. 长江流域资源与环境, 2004, **13**(3): 266-271.
- [28] 朱伟, 姜谋余, 赵联芳等. 悬浮泥沙对藻类生长影响的实测与分析. 水科学进展, 2010, **21**(2): 241-247.
- [29] 张运林, 秦伯强, 陈伟民等. 太湖梅梁湾沿岸带水体生物学与光学特性. 生态学报, 2005, **25**(3): 454-460.
- [30] 高月香, 张毅敏, 张永春. 流速对太湖铜绿微囊藻生长的影响. 生态与农村环境学报, 2007, **23**(2): 57-60.
- [31] 江西省水环境监测中心. 鄱阳湖水资源动态监测通报.