

宋玉芝,王锦旗,郑建伟,等.太湖浮游植物初级生产力的生态模拟及时空分布[J].江苏农业科学,2016,44(11):419-422.

doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2016.11.121

# 太湖浮游植物初级生产力的生态模拟及时空分布

宋玉芝<sup>1,2</sup>,王锦旗<sup>1</sup>,郑建伟<sup>1</sup>,孔繁璠<sup>1</sup>

(1.南京信息工程大学应用气象学院,江苏南京 210044; 2.南京信息工程大学江苏省大气环境与装备技术协同创新中心,江苏南京 210044)

**摘要:**为了了解太湖浮游植物初级生产力的时空变化,利用3种常用模型[初级生产力(vertically generalized production model,简称VGPM)、Cadée模型、Talling模型]分别对江苏太湖梅梁湾浮游植物日光合生产力进行估算,并用实测值验证3种模型在该区域的适用性,从中选用模拟效果最佳的模型来估算2001—2011年太湖不同湖区的初级生产力,分析其时空变化规律。结果表明,VGPM模型、Cadée模型、Talling模型均适用于太湖梅梁湾浮游植物初级生产力的估算,VGPM模型的估算精度略高于其他2个模型,更接近真实值;VGPM模型估算结果表明,梅梁湾、湖心区及东太湖3个湖区的浮游植物初级生产力有明显的季节性变化,以夏季最高,春秋季节次之,冬季最低。从多年日均初级生产力的变化来看,3个湖区均表现为先提高后降低的趋势;从空间上看,太湖浮游植物初级生产力呈现出明显的空间异质性,太湖北部梅梁湾浮游植物初级生产力最高,湖心区次之,东太湖最低。

**关键词:**浮游植物;初级生产力;生态模拟;太湖;梅梁湾

**中图分类号:** Q178.1;S181.6 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2016)11-0419-04

随着经济的发展,进入水体氮、磷等营养盐增多,湖泊富营养化程度日益加剧。而进入湖泊的氮、磷等营养盐,通过浮游植物吸收同化作用进入食物链,在一定程度上决定了湖泊渔业产量<sup>[1]</sup>。事实上,湖泊富营养化的最终表现是水体浮游植物生长旺盛,初级生产力大幅度增加。因此,了解浮游植物初级生产力的变化规律,不仅有利于估算渔产潜力,而且可用于评价水体营养类型、指示湖泊环境特征<sup>[2-5]</sup>。目前,已有大量的关于湖泊等淡水水体初级生产特征和影响因素的报道。已有的研究表明,由于在不同区域的湖泊生态系统中,浮游植物初级生产力的大小既受生物量的影响,又与水环境中的光、营养盐、温度等多种因素密切相关<sup>[6-8]</sup>。以往用来估算浮游植物初级生产力的方法主要有黑白瓶测氧法、碳同位素示踪法等,这些估算结果虽然准确,但费时费力。因此,近年来国内外学者相继提出计算浮游植物初级生产力的一些经验、半经验半理论或者解析模式的计算模型<sup>[9-13]</sup>。其中 Behrenfeld 等的初级生产力(vertically generalized production model,简称VGPM)、Cadée的简化模型以及 Talling 的模型考虑水温、光合有效辐射、湖泊叶绿素浓度和真光层深度等因素,能较准确地模拟水柱初级生产力,应用最为广泛<sup>[12-14]</sup>。

太湖是我国第3大淡水湖泊,也是富营养化较为严重的湖泊<sup>[15-18]</sup>。近几十年来,越来越多的学者运用模型来模拟湖泊的浮游植物初级生产力<sup>[12,19]</sup>,然而关于太湖浮游植物初级生产力的时空变化还有待于进一步的研究。因此,本研究利用VGPM模型、Cadée模型及Talling模型3种常用的估算浮游植物初级生产力的模型,分别对太湖梅梁湾浮游植物日光

合生产力进行估算,从中选用模拟效果最佳的模型来估算2001—2011年太湖不同湖区的初级生产力,分析其变化规律,为深入了解太湖生态系统提供科学依据。

## 1 数据来源及研究方法

### 1.1 研究区域概况

太湖是一个大型浅水湖泊,湖湾、沿岸及湖心等区域受地形影响,湖流结构及水土界面水力要素均有显著差异。本研究选取太湖3个不同生态特征的湖区:蓝藻水华频繁暴发富营养化严重的梅梁湾(1#)、受外源影响较小但水动力扰动频繁的湖心区(2#)、水生植物覆盖度高且水质好的东太湖(3#)(图1),以此估算不同类型湖区的初级生产力。

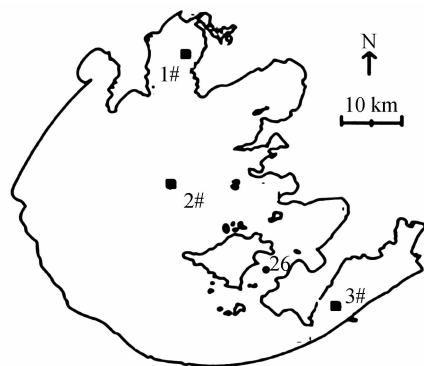


图1 太湖水质参数的采样点

### 1.2 数据资料

2001—2011年气象资料来自苏州市东山气象站;研究湖区各站点的水质资料主要来自《湖泊湿地海湾生态系统卷(江苏太湖站)》<sup>[20]</sup>。

### 1.3 模型简介

1.3.1 VGPM模型 Behrenfeld等收集了1971—1994年一类、二类水体共1698个站点的11283个实测数据,将叶绿素

收稿日期:2015-10-15

基金项目:国家自然科学基金面上项目(编号:41471446);南京信息工程大学大学生实践创新训练计划(编号:教发[2014])。

作者简介:宋玉芝(1970—),女,河南信阳人,博士,副教授,从事生态环境研究。E-mail: syz70@nuist.edu.cn。

含量、真光层深度、光照周期标准化后发现,水体初级生产力垂直分布均呈相同形式,在此基础上建立了初级生产力深度垂向归纳模型<sup>[9]</sup>,最初用于海洋,但是由于该模型是在长时间、大范围、不同水域上千万个站点和实测数据的基础上建立起来的,所以同样适用于内陆水域<sup>[9]</sup>,其表达式如下:

$$PP_{cu} = P_{opt}^B \cdot D_{irr} \cdot \int_{Z=0}^{Z_{cu}} \frac{(1 - e^{-\frac{E_z}{E_{max}}}) e^{(\beta_d, E_z)}}{(1 - e^{-\frac{E_{opt}}{E_{max}}}) e^{(\beta_d, E_{opt})}} \cdot C_z dz \circ$$

Behrefeld 等又将上述表达式化简为以下形式:

$$PP_{cu} = 0.661 \ 25 P_{opt}^B \cdot \frac{E_0}{E_0 + 4.1} \cdot Z_{cu} \cdot C_{opt} \cdot D_{irr} \circ$$

式中:  $PP_{cu}$  为表层到真光层的初级生产力(以单位面积碳质量计),  $mg/(m^2 \cdot d)$ ;  $P_{opt}^B$  为水体的最大光合速率(以单位时间、单位质量叶绿素 a 的最大固碳量计),  $mg/(mg \cdot h)$ , 是一个有关温度  $T$  ( $^{\circ}C$ ) 的函数, 当温度  $T \leq -1.0$   $^{\circ}C$  时,  $P_{opt}^B = 1.13$   $mg/(mg \cdot h)$ , 当温度  $T \geq 28.5$   $^{\circ}C$  时,  $P_{opt}^B = 4.00$   $mg/(mg \cdot h)$ , 当  $-1.0$   $^{\circ}C < T < 28.5$   $^{\circ}C$  时,  $P_{opt}^B = P_{opt}^{B'}$ , 而  $P_{opt}^{B'} = 1.295 \ 6 + 2.749 \times 10^{-1} T + 6.17 \times 10^{-2} T^2 - 2.05 \times 10^{-2} T^3 + 2.462 \times 10^{-3} T^4 - 1.348 \times 10^{-4} T^6 + 3.413 \ 2 \times 10^{-6} T^6 - 3.27 \times 10^{-8} T^7$ ;  $C_{opt}$  为最大光合速率所在处的叶绿素 a 含量,  $mg/m^3$ , 可由表层叶绿素含量代替;  $E_0$  为水体表面光合有效辐射,  $mol/m^2$  (以光量子计);  $D_{irr}$  为光照周期,  $h/d$ ;  $Z_{cu}$  为真光层深度,  $m$ , 可表示为  $Z_{cu} = 1.723 \ 9SD + 0.168 \ 5$ , 其中  $SD$  为水体透明度,  $m$ , 若水深低于真光层深度, 可用水深代替;  $E_z$  为深度为  $z$  的光合有效辐射强度,  $mol/m^2$  (以光量子计);  $E_{max}$  为  $P-I$  曲线(光合速率与光照度之间的对应关系)光限制态向与光饱和转折处的光合有效辐射强度,  $mol/m^2$  (以光量子计);  $E_{opt}$  为  $P_{opt}^B$  所在深度的光合有效辐射强度,  $mol/m^2$  (以光量子计);  $\beta_d$  为  $P-I$  曲线(光合速率与光照度之间的对应关系)的初始斜率<sup>[9,12]</sup>。

1.3.2 Cadée 模型 Cadée 在前人研究的基础上提出了简化模型进行估计浮游植物的初级生产力<sup>[10]</sup>, 其核心表达式如下:

$$PP_{cu} = P_s Z_{cu} D_{irr} / 2 \circ$$

式中:  $P_s$  为表层水体浮游植物潜在的生产力,  $P_s = C_a Q$ , 其中  $C_a$  为表层叶绿素 a 含量,  $mg/m^3$ ,  $Q$  为最大同化系数(以单位时间、单位叶绿素 a 质量的固碳量计),  $mg/(mg \cdot h)$ <sup>[10]</sup>。

1.3.3 Talling 公式 Talling 在英国许多湖泊试验中分析得出水体光饱和速率、垂直消光系数、叶绿素浓度等因子与浮游植物初级生产力关系密切, 并于 1957 年建立了它们的经验关系式<sup>[11]</sup>, 随后已广泛运用在众多湖泊水体中, 其核心公式如下:

$$P_D = B_e \times P_m [\ln(E_d(0)/0.5E_k)] N/K_d \circ$$

式中:  $P_D$  为初级生产力(以碳计),  $mg/(m^2 \cdot d)$ ;  $B_e$  为浮游植物叶绿素 a 浓度,  $mg/m^3$ ;  $P_m$  为最大光合速率(以单位时间、单位叶绿素 a 质量的含碳量计),  $mg/(mg \cdot h)$ ;  $E_k$  为浮游植物的光饱和点,  $W/m^2$ , 当  $0$   $^{\circ}C < T < 35$   $^{\circ}C$  时,  $E_k = 4T$ <sup>[13]</sup>;  $E_d(0)$  为入水光合有效辐射的日平均值, 与太阳辐射水平有关, 太湖各湖区  $E_d(0)$  可取  $69.79$   $W/m^2$ ;  $N$  为  $1$   $d$  的实际光照时间,  $h$ ;  $K_d$  为光合有效辐射在水下的垂直消光系数,  $m^{-1}$ , 是水中各

种溶解成分分子、无机悬浮微粒和浮游植物共同存在的结果。在太湖不同湖区,  $K_d$  应参照相关文献取不同值<sup>[11,13-14]</sup>。

#### 1.4 数据处理方法

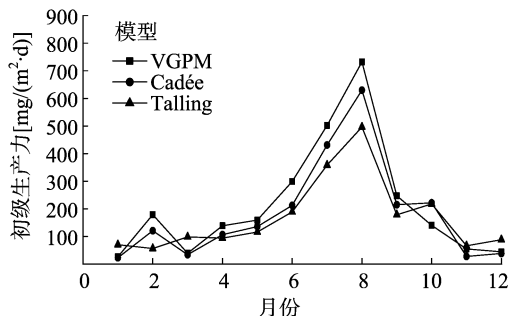
将所获的数据分类整理, 用 Excel 2003、SPSS 16.0 软件进行统计分析。

## 2 结果与分析

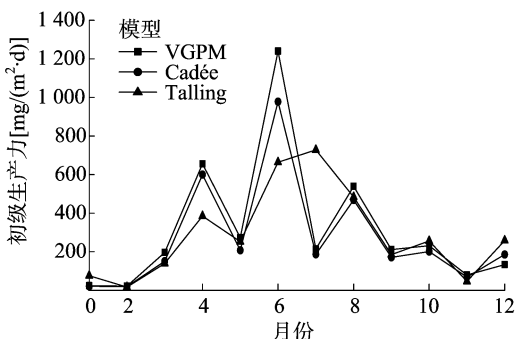
### 2.1 3 种模型对梅梁湾浮游植物初级生产力的模拟及其适用性分析

根据太湖梅梁湾 2004—2005 年的水质数据及东山气象观测站的气象数据, 用 VGPM、Cadée、Talling 模型对太湖梅梁湾浮游植物初级生产力进行模拟, 将模拟结果与太湖梅梁湾浮游植物初级生产力的实测值进行对比。

由图 2 可以看出, 3 种模型所模拟的梅梁湾 2004、2005 年浮游植物初级生产力随时间变化的趋势基本相同, 即随时间的变化呈先增加后下降的趋势。在不同年份, 浮游植物初级生产力的变化较大。2004 年浮游植物初级生产力最大值出现在 8 月份, 最小值出现在 1—2 月份。2005 年, 用 VGPM、Cadée 模型模拟的浮游植物初级生产力最大值出现在 6 月份, Talling 模型所获得浮游植物初级生产力最大值出现在 7 月份, 3 种模型模拟的最低值均出现 2 月份(图 2-b)。



a. 2004 年梅梁湾浮游植物初级生产力变化



b. 2005 年梅梁湾浮游植物初级生产力变化

图2 3 种模型估算 2004、2005 年梅梁湾浮游植物初级生产力变化结果

对比分析发现, 3 种模型模拟的梅梁湾浮游植物初级生产力与实测值均呈显著或极显著的线性相关(表 1), 这说明 3 种模型均可用来预测太湖梅梁湾浮游植物初级生产力。相比较而言, VGPM 模型的模拟值与实测值相关性更好。进一步分析模拟值和实测值发现, VGPM 模型的模拟值大于 Cadée 模型的估算值, Cadée 模型的估算值大于 Talling 模型的估算值, 但总体都小于实测值。由 VGPM 模型模拟的浮游植物初级生产力与实测值比较接近, 而 Cadée、Talling 模型所获得的

表 1 3 种模型模拟的梅梁湾浮游植物初级生产力的值  
与实测值的相关关系

模型种类	方程	$r^2$	$P$ 值
VGPM	$y = 0.925x + 20.745$	0.886	<0.01
Cadée	$y = 1.187x + 15.61$	0.861	<0.01
Talling	$y = 1.217x + 5.475$	0.617	<0.05

注:  $x$  为实测值,  $y$  为模拟值。

浮游植物初级生产力的模拟值相对来说略差(表 2)。

## 2.2 太湖浮游植物初级生产力的时空分布特性

浮游植物初级生产力受光照周期、真光层深度、叶绿素浓度等因素的影响,而这些因素又受水文、水质、气象等因素的

综合作用,因此浮游植物初级生产力是一个不断变化的复杂过程。太湖水域面积约 2 338 km<sup>2</sup>,不同区域水质状况、水生动植物群落组成差异很大,因此用 VGPM 模型对梅梁湾、东太湖、湖心区 2001—2011 年浮游植物的初级生产力进行估算,以了解太湖浮游植物初级生产力的时空分布规律。

2.2.1 太湖不同湖区浮游植物初级生产力年际变化及季节变化 从图 3 可见,2001—2004 年梅梁湾与湖心区的浮游植物年平均初级生产力较为稳定,变化不大,其中东太湖水质资料缺失;从 2004 年开始,梅梁湾与湖心区的初级生产力先逐年增加后逐年下降,而东太湖的浮游植物初级生产力没有明显的年际变化。

表 2 2004—2005 年太湖梅梁湾浮游植物初级生产力的模拟值与实测值对比分析

来源数据	方程斜率 $k$	$r^2$	$P$ 值	2004 年生产力				2005 年生产力			
				变化范围	平均值	最大值	最小值	变化范围	平均值	最大值	最小值
				[mg/(m <sup>2</sup> ·d)]	[mg/(m <sup>2</sup> ·d)]	出现月份	出现月份	[mg/(m <sup>2</sup> ·d)]	[mg/(m <sup>2</sup> ·d)]	出现月份	出现月份
VGPM 模型	0.925	0.886	<0.01	26.49 ~ 732.36	219.83	8	1	21.80 ~ 1 240.41	326.68	6	2
Cadée 模型	1.187	0.861	<0.01	23.02 ~ 629.98	183.16	8	1	18.75 ~ 978.08	271.43	7	2
Talling 公式	1.217	0.617	<0.05	56.35 ~ 496.55	169.18	8	2	16.60 ~ 664.04	290.9	7	2
实测值	1.000	1.000		49.60 ~ 850.36	232.12	8	12	34.20 ~ 1 322.86	338.68	6	1

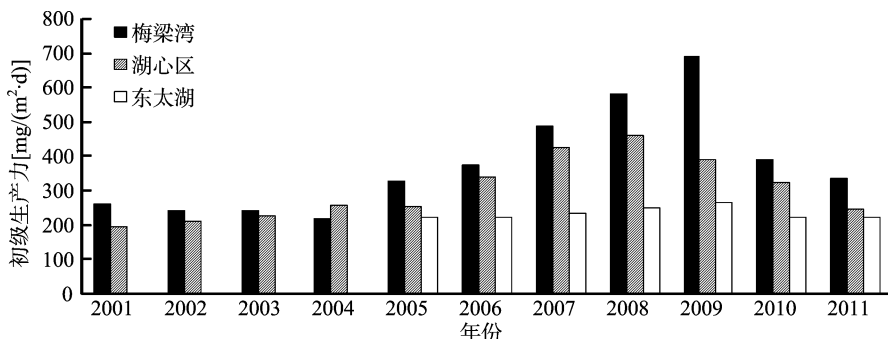


图3 3个湖区浮游植物初级生产力的年际变化

从季节变化来看,3个湖区初级生产力有明显的季节变化,夏季最高,冬季最低,春秋季节次之;还可以看出,梅梁湾的初级生产力在春季及秋季相当,而湖心区与东太湖秋季初级生产力却高于春季(图4)。

大;在夏季及春季,梅梁湾初级生产力明显高于湖心区,湖心区高于东太湖;在秋季,梅梁湾与湖心区相差不大,而东太湖却明显低于梅梁湾及湖心区(图4)。

## 3 讨论

VGPM、Cadée 及 Talling 模型均考虑了水温、光照等因子对水柱初级生产力的影响,在实际运用中比较广泛。通过 3 种模型对梅梁湾初级生产力模拟结果与实测值的对比分析发现,3 种模型的模拟值与实测值均呈较高的线性相关关系,都可以反映浮游植物初级生产力的变化情况,但是 VGPM 模型估算的浮游植物初级生产力最接近实测值,Cadée、Talling 模型略差。曾台衡等利用模型对长江中下游湖区浮游植物初级生产力进行估算时也得出相似的结果<sup>[13]</sup>。这可能是 Cadée 模型实际考虑的要素有所精简,而太湖水环境比较复杂,可能是导致 Cadée 模型估算值略差的原因之一;而 Talling 公式中缺少真光层深度这一重要因子,并且式中垂直消光系数取的是经验值<sup>[13-14]</sup>,可能存在误差,从而影响其模拟的准确性。

太湖梅梁湾、湖心区以及东太湖 3 个湖区的浮游植物初级生产力均存在明显的季节性差异,夏季最高,春秋季节次之,冬季最低。但不同湖区,秋季、春季浮游植物初级生产力状况有所不同,湖心区及东太湖,秋季浮游植物初级生产力高于春

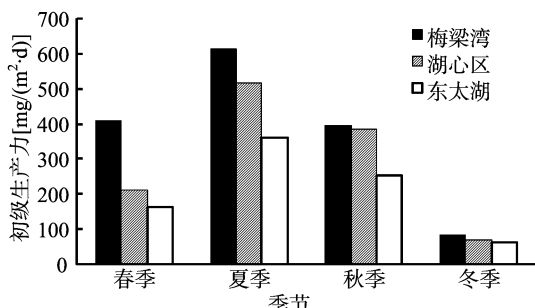


图4 3个湖区浮游植物初级生产力的季节变化

2.2.2 太湖浮游植物初级生产力空间变化 进一步比较梅梁湾、湖心区、东太湖 3 个湖区浮游植物初级生产力的状况可知,2001—2004 年,梅梁湾与湖心区的初级生产力相差不大,而 2005—2011 年间,3 个湖区浮游植物初级生产力间具有明显差异,梅梁湾的初级生产力最大,湖心区次之,东太湖最小(图 3、图 4)。从季节上看,在冬季,梅梁湾初级生产力虽高于湖心区及东太湖,但 3 个湖区浮游植物初级生产力差异不

季,而梅梁湾秋季与春季差别不大。这是由于浮游植物初级生产力的影响因素较为复杂,不同季节最直观的差异即温度不同,夏季、秋季气温较高,是浮游植物活动及生长繁殖较为旺盛的季节,初级生产力也达全年的最高值;而冬季蓝藻等喜温浮游植物还处于休眠状态,初级生产力比较低,对于春季浮游植物处于复苏的阶段,生产力也相对较低。然而,梅梁湾春季与秋季初级生产力相当,一方面可能是梅梁湾藻种源基数比较高,另一方面也可能是夏季藻类发生水华后,这部分藻类大量死亡,水质急剧下降,也会影响秋季浮游植物的初级生产<sup>[21]</sup>。再加上不同水域浮游植物群落结构不同,优势种不同,它们对环境因子的响应程度也不相同,从而影响到湖泊水体的初级生产力。从3个湖区的浮游植物年平均初级生产力来看,梅梁湾和湖心区在2001—2011年总体表现为先增长后下降的趋势,在2007—2009年达到最高值,随后逐步降低。这可能是由于人为对太湖周边进行治理整顿,减少氮磷等污染物的输入<sup>[15,21]</sup>,使得水体叶绿素a含量发生变化,进而影响浮游植物的初级生产力。

太湖浮游植物初级生产力存在空间变化规律,总的表现为北部高,湖心次之,南北低。具体而言,梅梁湾浮游植物初级生产力明显高于其他湖区,湖心区次之,东太湖的浮游植物初级生产力相对而言最低。这是由于梅梁湾位于太湖北端,氮磷浓度高,水体叶绿素浓度高<sup>[19]</sup>,当气象、水文、水质达到最佳条件时浮游植物便开始迅速生长繁殖致使水体初级生产力不断增长。夏季开始出现蓝藻水华现象,草型湖区已向藻型湖区转变,浮游植物初级生产力也随即增长;东太湖属草型湖区,沉水植物占优势,真光层深度相对较高,风浪等作用相对较弱,浮游植物种类和数量较少<sup>[12]</sup>,其初级生产力与其他湖区相比也稍低些;而在湖心区,营养盐浓度相对较高,由于受风浪的扰动,水下光衰减迅速,进而影响浮游植物初级生产<sup>[12,20-21]</sup>。总之,浮游植物初级生产力的变化是一个复杂的过程,不仅受浮游植物群落结构、藻的种类和数量的影响,同时受气温、氮的供给、浮游动物选择性牧食等多种因素的影响。

#### 4 结论

(1) VGPM、Cadée、Talling模型均可以反映太湖梅梁湾浮游植物初级生产力的变化情况,但VGPM模型的估算精度略高于其他2个模型,更接近实测值。

(2) 太湖梅梁湾、湖心区及东太湖浮游植物初级生产力存在明显的季节性差异,夏季最高,冬季最低,春秋季次之;年平均初级生产力在2001—2011年总体表现为先增长后下降的趋势。

(3) 太湖北部梅梁湾浮游植物初级生产力最高,湖心区次之,太湖南部东太湖浮游植物初级生产力最低。

#### 参考文献:

[1] 王 骥,梁彦龄.用浮游植物的生产量估算武昌东湖鲢鳙生产潜力与鱼种放养量的探讨[J].水产学报,1981,5(4):343-350.

[2] 韩德举,吴生桂,邹 清,等. 陆水水库的浮游生物及营养类型[J]. 湖泊科学,1996,8(4):351-358.

[3] 王信海,姜爱兰,丁辰龙,等. 龙虎泡秋季浮游生物组成与水质理化特征分析[J]. 江苏农业科学,2009(3):363-366.

[4] 朱爱民,刘家寿,胡传林,等. 湖北浮桥水库浮游植物初级生产力及其管理[J]. 湖泊科学,2007,19(3):340-344.

[5] 苏洁琼,王烜,杨志峰. 考虑气候因子变化的湖泊富营养化模型研究进展[J]. 应用生态学报,2012,23(11):3197-3206.

[6] Chen Y W, Qin B Q, Teubner K, et al. Long-term dynamics of phytoplankton assemblages: microcystis - domination in Lake Taihu, a large shallow lake in China[J]. Journal of Plankton Research, 2003, 25(4):445-453.

[7] Vaillancourt R D, Sambrotto R N, Green S, et al. Phytoplankton biomass and photosynthetic competency in the summer time Mertz Glacier Region of East Antarctica[J]. Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography, 2003, 50(8/9):1415-1440.

[8] 汪益娣,张维砚,徐春燕,等. 淀山湖浮游植物初级生产力及其影响因素[J]. 环境科学,2011,32(5):1249-1256.

[9] Behrenfeld M J, Falkowski P G. Photosynthetic rates derived from satellite - based chlorophyll concentration [J]. Limnology and Oceanography, 1997, 42(1):1-20.

[10] Cadée G C. Primary production off the Guyana coast [J]. Netherlands Journal of Sea Research, 1975, 9(1):128-143.

[11] Talling J F. The phytoplankton population as a compound photosynthetic system[J]. New Phytologist, 1957, 56(2):133-149.

[12] 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[J]. 湖泊科学,2008,20(3):380-388.

[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[J]. 长江流域资源与环境,2011,20(6):717-722.

[14] 易齐涛,徐 鑫,曲喜杰,等. 两淮采煤沉陷积水区水体初级生产特征[J]. 中国环境科学,2014,34(8):2101-2110.

[15] 朱广伟. 太湖富营养化现状及原因分析[J]. 湖泊科学,2008,20(1):21-26.

[16] Song Y Z, Wang J Q, Gao Y X, et al. The physiological responses of *Vallisneria natans*, to epiphytic algae with the increase of N and P concentrations in water bodies [J]. Environmental Science & Pollution Research International, 2015, 22(11):8480-8487.

[17] 席运官,田 伟,李 妍,等. 太湖地区稻麦轮作系统氮、磷径流排放规律及流失系数[J]. 江苏农业学报,2014,30(3):534-540.

[18] 亢志华,刘华周. 基于成本-收益分析法的太湖氮磷污染物去除生态补偿[J]. 江苏农业学报,2015,31(4):942-945.

[19] 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[J]. 生态学报,2012,32(11):3528-3537.

[20] 秦伯强,胡春华. 湖泊湿地海湾生态系统卷:江苏太湖站(1991—2006) [M]. 北京:中国农业出版社,2010.

[21] 蔡琳琳,朱广伟,李向阳. 太湖湖岸带浮游植物初级生产力特征及影响因素[J]. 生态学报,2013,33(22):7250-7258.