

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

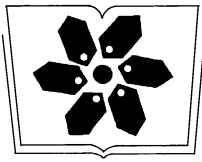
Acta Ecologica Sinica



第 32 卷 第 11 期 Vol.32 No.11 **2012**

中国生态学学会
中国科学院生态环境研究中心
科学出版社

主办
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

第 32 卷 第 11 期

2012 年 6 月 (半月刊)

目 次

黑龙江省大兴安岭林区火烧迹地森林更新及其影响因子·····	蔡文华, 杨 健, 刘志华, 等 (3303)
基于 B-IBI 指数的温榆河生态健康评价·····	杨 柳, 李泳慧, 王俊才, 等 (3313)
川西亚高山暗针叶林不同恢复阶段红桦、岷江冷杉土壤种子损耗特征·····	马姜明, 刘世荣, 史作民, 等 (3323)
老龄阔叶红松林下层木空间分布的生境关联分析·····	丁胜建, 张春雨, 夏富才, 等 (3334)
内蒙古高原荒漠区四种锦鸡儿属植物灌丛沙包形态和固沙能力比较·····	张媛媛, 马成仓, 韩 磊, 等 (3343)
角果藜的生长动态及其生殖配置·····	全杜娟, 魏 岩, 周晓青, 等 (3352)
基于 MODIS/NDVI 时间序列的森林灾害快速评估方法——以贵州省为例·····	侍 昊, 王 笑, 薛建辉, 等 (3359)
祁连山西水林区土壤阳离子交换量及盐基离子的剖面分布·····	姜 林, 耿增超, 李珊珊, 等 (3368)
水分和温度对春玉米出苗速度和出苗率的影响·····	马树庆, 王 琪, 吕厚荃, 等 (3378)
施氮对水稻土 N ₂ O 释放及反硝化功能基因 (<i>narG/nosZ</i>) 丰度的影响·····	郑 燕, 侯海军, 秦红灵, 等 (3386)
中国西北潜在蒸散时空演变特征及其定量化成因·····	曹 雯, 申双和, 段春峰 (3394)
基于植被降水利用效率和 NDVI 的黄河上游地区生态退化研究·····	杜加强, 舒俭民, 张林波 (3404)
异速生长法计算秋茄红树林生物量·····	金 川, 王金旺, 郑 坚, 等 (3414)
乌兰布和沙漠沙蒿与油蒿群落的物种组成与数量特征·····	马全林, 郑庆中, 贾举杰, 等 (3423)
不同光强下单叶蔓荆的光合蒸腾与离子累积的关系·····	张 萍, 刘林德, 柏新富, 等 (3432)
浑善达克沙地沙地榆种子雨的扩散规律·····	谷 伟, 岳永杰, 李钢铁, 等 (3440)
咸水灌溉对沙土土壤盐分和胡杨生理生长的影响·····	何新林, 陈书飞, 王振华, 等 (3449)
外源 NO 对 NaHCO ₃ 胁迫下黑麦草幼苗光合生理响应的调节·····	刘建新, 王金成, 王 鑫, 等 (3460)
呼伦贝尔草地植物群落与土壤化学计量学特征沿经度梯度变化·····	丁小慧, 罗淑政, 刘金巍, 等 (3467)
海南稻田土壤硒与重金属的含量、分布及其安全性·····	耿建梅, 王文斌, 温翠萍, 等 (3477)
江苏省典型区农田土壤及小麦中重金属含量与评价·····	陈京都, 戴其根, 许学宏, 等 (3487)
应用稳定同位素研究广西东方洞食物网结构和营养级关系·····	黎道洪, 苏晓梅 (3497)
利用细胞计数手段和 DGGE 技术分析松花江干流部分地区的细菌种群多样性·····	屠 腾, 李 蕾, 毛冠男, 等 (3505)
中国主要入海河流域河口集水区划分与分类·····	黄金良, 李青生, 黄 玲, 等 (3516)
基于 VGPM 模型和 MODIS 数据估算梅梁湾浮游植物初级生产力·····	殷 燕, 张运林, 时志强, 等 (3528)
低温胁迫下虎纹蛙的生存力及免疫和抗氧化能力·····	王 娜, 邵 晨, 颜志刚, 等 (3538)
转 Bt 水稻土壤跳虫群落组成及其数量变化·····	祝向钰, 李志毅, 常 亮, 等 (3546)
尼日利亚非洲蜂和安徽意大利蜜蜂及其杂交二代形态特征与微卫星 DNA 遗传多样性·····	余林生, 解文飞, 巫厚长, 等 (3555)
北京城市公园湿地休憩功能的利用及其社会人口学因素·····	李 芬, 孙然好, 陈利顶 (3565)
基于协整理论的经济增长与生态环境变化关系分析——以重庆市渝东南地区为例·····	肖 强, 胡 翀, 肖 洋, 等 (3577)
感潮河网区环境合作博弈模型及实证·····	刘红刚, 陈新庚, 彭晓春 (3586)
专论与综述	
国内外生态效率核算方法及其应用研究述评·····	尹 科, 王如松, 周传斌, 等 (3595)
全球变化背景下的现代生态学——第六届现代生态学讲座纪要·····	温 腾, 徐德琳, 徐 驰, 等 (3606)
问题讨论	
流域环境要素空间尺度特征及其与水生态分区尺度的关系——以辽河流域为例·····	刘星才, 徐宗学, 张淑荣, 等 (3613)
研究简报	
不同光照强度对兴安落叶松几种主要防御蛋白活力的影响·····	鲁艺芳, 石 蕾, 严善春 (3621)
木荷种源间光合作用参数分析·····	熊彩云, 曾 伟, 肖复明, 等 (3628)
基于能值分析的深圳市三个小型农业生态系统研究·····	杨卓翔, 高 阳, 赵志强, 等 (3635)

期刊基本参数: CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 342 * zh * P * ¥70.00 * 1510 * 37 * 2012-06



封面图说: 爬升樟木沟的暖湿气流——樟木沟是中国境内横切喜马拉雅山脉南坡的几条著名大沟之一,它位于我国西藏聂拉木县境内的希夏邦马峰东南侧,延绵 5400km 的 318 国道在此沟中到达其最西头。从聂拉木县城到樟木口岸短短的 30km 中,海拔从 4000m 急降至 2000m。在大气环流作用下,来自印度洋的暖湿气流沿樟木沟不断费力地往上爬升,给该沟谷留下了大量的降水。尤其是在雨季到来时,山间到处是流水及悬垂崖头的瀑布,翠峰直插云霄,森林茂密苍郁,溪流碧澄清澈,奇花异葩繁多,风景美如画卷,气势壮丽非凡。

彩图提供: 陈建伟教授 北京林业大学 E-mail: cites.chenjw@163.com

DOI: 10.5846/stxb201105070595

殷燕, 张运林, 时志强, 刘笑菡, 冯龙庆. 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.
Yin Y, Zhang Y L, Shi Z Q, Liu X B, Feng L Q. Estimation of spatial and seasonal changes in phytoplankton primary production in Meiliang Bay, Lake Taihu, based on the Vertically Generalized Production Model and MODIS data. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(11): 3528-3537.

基于 VGPM 模型和 MODIS 数据估算梅梁湾 浮游植物初级生产力

殷 燕^{1,2}, 张运林^{1,*}, 时志强¹, 刘笑菡^{1,2}, 冯龙庆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太湖湖泊生态系统研究站, 南京 210008;

2. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要: 基于 MODIS 影像数据反演的 2009 年 2 月份至 12 月份太湖梅梁湾水域表面叶绿素 a、悬浮物浓度以及水温数据, 结合初级生产力垂向归纳模型 (Vertically Generalized Production Model; VGPM) 估算获得梅梁湾 2009 年逐月平均日初级生产力时空分布。结果表明, 梅梁湾 2009 年年平均日初级生产力及逐月平均日初级生产力空间分布差异显著, 呈现从湾内向湾口逐渐递减的趋势。时间序列分析显示, 梅梁湾初级生产力季节差异显著, 夏季 > 秋季 > 春季 > 冬季, 全年初级生产力主要集中在夏季, 占 47.4%。通过分析 VGPM 模型中几个输入参数对初级生产力的影响, 发现悬浮物浓度与标准化初级生产力存在显著负函数关系, 反映沉积物再悬浮引起的悬浮物浓度增加能降低水体初级生产力。温度对初级生产力也有一定的调控与制约, 与初级生产力呈现正相关趋势, 在低于 21℃ 的温度范围内与最大光合作用速率呈现正相关。

关键词: MODIS 数据; VGPM 模型; 初级生产力; 梅梁湾; 时空变化

Estimation of spatial and seasonal changes in phytoplankton primary production in Meiliang Bay, Lake Taihu, based on the Vertically Generalized Production Model and MODIS data

YIN Yan^{1,2}, ZHANG Yunlin^{1,*}, SHI Zhiqiang¹, LIU Xiaohan^{1,2}, FENG Longqing¹

1 Taihu Lake Laboratory Ecosystem Research Station, State Key Laboratory of Lake Science and Environment, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008

2 Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

Abstract: Phytoplankton is typically the most important primary producer in lake ecosystems, strongly influences nutrient concentrations, and supports higher trophic levels such as zooplankton and filter-feeders. Knowledge of primary production, and its spatial and temporal variations, is of special relevance for Meiliang Bay in the northern part of the Lake Taihu, China, which has three important inflowing rivers which carry domestic sewage and industrial waste water from the adjacent cities of Changzhou and Wuxi. Although primary production in oceans had frequently been estimated using the Vertically Generalized Production Model (VGPM), this approach has rarely been used in inland lakes. In our present study, phytoplankton primary production in Meiliang Bay, Lake Taihu, was estimated from February to December in 2009 based on VGPM using the MODIS-derived data for chlorophyll a, total suspended solid concentrations, and water surface temperature.

基金项目: 国家自然科学基金项目 (40730529, 40971252, 40825004); 江苏省自然科学基金项目 (BK2009336); 中国科学院知识创新工程项目 (KZCX2-YW-QN312); 国家水体污染控制与治理科技重大专项 (2009ZX07101-013)

收稿日期: 2011-05-07; 修订日期: 2011-11-10

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: ylzhang@niglas.ac.cn

There were significant spatial variations in the monthly mean daily primary production in 3 of the 4 seasons: spring (March, April, May), summer (June, July, August), and autumn (September, October, November), and primary production gradually decreased from inner Meiliang Bay to outer Meiliang Bay. In inner Meiliang Bay, suitable qualities and quantities of nutrients, photosynthetically available radiation, and water temperature, provided good conditions for algal growth in these three seasons. However, there was no significant spatial variation in the monthly mean daily primary production in winter (February, December) due to the death and degradation of algae in the whole of Meiliang Bay. There was however, significant spatial variation in the annual mean daily primary production in Meiliang Bay, Lake Taihu in 2009.

Time series analysis showed that the seasonal variation of primary production was: summer > autumn > spring > winter. The annual mean daily primary production was $1,291.61 \text{ mgC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$, with the highest primary production in August. The trend in temporal variations of the primary production in Meiliang Bay was consistent with that of the chlorophyll a concentration. Temporal variations in primary production were less closely linked to water temperatures which peaked in June and August, and to photosynthetic available radiation intensity which peaked in July.

To explore the effect caused by the sediment resuspension, the phytoplankton primary production estimated by the VGPM model in Meiliang Bay was normalized to per chlorophyll a concentration, water temperature, and photosynthetically available radiation intensity. A significant negative relationship was found between the total suspended solid concentration and the normalized primary production, and a power function relationship was also found between them with a determination coefficient value of 0.487 by non-linear curve fitting. Thus, it could be demonstrated that the increase of total suspended solid concentration from wind-driven sediment resuspension could cause primary production to decrease markedly. The mean maximum carbon fixation rate was $(6.48 \pm 0.17) \text{ mgC} \cdot \text{mgChla}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ when the water temperature ranged from 19°C to 21°C . Furthermore, water temperature was significantly and positively correlated to primary production in Meiliang Bay. A positive correlation was found between water temperature and the maximum carbon fixation rate when water temperature was less than 21°C .

Key Words: MODIS data; Vertically Generalized Production Model; primary production; Meiliang Bay; temporal and spatial variations

水体初级生产力是浮游植物进行光合作用把无机物转化成有机物的能力,是表征水体物质循环及能量流动的一个重要指标,一定程度上决定了湖泊渔业产量。湖泊富营养化的最终表现是水体浮游植物旺发,初级生产力大幅增加。随着海洋卫星遥感及传感器的发展,利用卫星遥感技术法来监测海洋初级生产力比传统的黑白瓶法或者同位素固碳法有着更大的优势^[1-2]。近年来国内外学者相继提出了计算反演初级生产力的一些经验的、半经验半理论或者解析模式的计算模型^[3-6]。以 Behrenfeld 等^[3]提出的垂向归纳模型(Vertically Generalized Production Model)为最佳估算海洋初级生产力的模型^[7-9],并逐渐对 VGPM 模型改进以适应不同水域环境的变化特征,同时利用 SeaWiFS、AVHRR、MODIS 等遥感资料进行了海洋初级生产力的估算^[10-16]。如 Li 等利用 VGPM 模型估算了中国东海海域初级生产力的时空分布,并且分析了其时空演化的机理^[15]; Ishizaka 等则表示用 VGPM 模型估算出的初级生产力与实测值相比较存在着高估的现象^[11]。但是借助遥感卫星的手段来估算湖泊初级生产力却鲜有报道^[17]。

梅梁湾位于太湖的北部水域,作为富营养化水体严重区域,其初级生产力的时空变化很受关注,许多研究采用传统的黑白瓶法或碳同位素法对其进行测定^[18-19],结果准确但费时费力。Zhang 等利用 1995 至 2003 年梅梁湾水文资料作为参数代入 VGPM 模型中计算初级生产力,并与经验模型得到的初级生产力相比较,发现基于 VGPM 模型得到的初级生产力更能反映年内变化,得到的值也相对的准确^[20]。由于人工布点现场的局限性,本研究尝试利用 VGPM 模型以及中国科学院重大交叉项目“湖泊富营养化过程监测与水华灾害预警技

术研究与系统集成”(http://210.72.65.63/lake/index.asp)获得的遥感资料计算得到梅梁湾叶绿素 a 浓度、真光层深度、水温和最大光合作用速率数据,进而估算梅梁湾 2009 年逐月平均初级生产力,并对其时空变化及其影响因素进行探讨分析,为梅梁湾水域富营养化研究及治理提供理论依据。

1 数据来源及处理方法

1.1 VGPM 模型的概述

Behrenfeld 等收集 1971 年至 1994 年间北纬 80°N 至 70°S 共 1698 个测站的 11283 个数据^[3]。数据集包含了一类和二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, Behrenfeld 等建立了依据温度、叶绿素 a 浓度等参数来估算海洋初级生产力的 VGPM 模型^[3]。其各项参数可以通过遥感监测的手段获得,简化后的表达式为:

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

式中, PP_{eu} 为真光层初级生产力 (mgC/m^2), P_{opt}^B 是水体最大光合作用速率 ($\text{mgC} \cdot \text{mgChla}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$), 是温度的一个函数, 其表达式为:

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

另外, 水表面温度 $T(^{\circ}\text{C})$ 为 $-1.0 < T < 28.5$ 时:

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

而式(1)又被 Behrenfeld 和 Falkowski 简化成如下形式^[3]:

$$PP_{eu} = 0.66125 P_{opt}^B \cdot \frac{E_0}{E_0 + 4.1} \cdot Z_{eu} \cdot C_{opt} \cdot D_{irr} \quad (3)$$

式中, E_0 是海表面日光合有效辐射强度 ($\text{mol 量子}/\text{m}^2$), 而 C_{opt} 是最大光合速率所在深度的叶绿素 a 浓度 (mgChla/m^3), 可以用表层叶绿素 a 浓度来代替。 D_{irr} 是光照周期 (h), Z_{eu} 是真光层深度 (m); E_z 是深度为 z 时的光合有效辐射强度 ($\text{mol 量子}/\text{m}^2$), 而 E_{max} 就是最大光合有效辐射强度 ($\text{mol 量子}/\text{m}^2$), E_{opt} 是最大光合速率所在深度的光合有效辐射强度 ($\text{mol 量子}/\text{m}^2$); β_d 为光强与光合作用对应关系曲线的初始斜率; C_z 是 z 深度的叶绿素 a 浓度 (mgChla/m^3)。本研究即采用公式(3)计算获得初级生产力。

1.2 研究区域及数据来源

选取了太湖梅梁湾水域作为研究区域, 此区域位于太湖的东北部, 不是封闭水域(图1)。梅梁湾有太湖的主要3条入湖河流, 分别为武进港、直湖港和梁溪河。这3条河流承载了无锡、常州等地的工业及生活污水^[21]。梅梁湾水质是太湖水质恶化较快的湖区, 2007年梅梁湾发生了大规模的蓝藻爆发, 至此以后在梅梁湾进行了一系列的生态工程以期望改善梅梁湾水源地的环境。

由式(3)可以得出, 基于 VGPM 模型来估算梅梁湾初级生产力所需要的数据有叶绿素 a 浓度 (C_{opt}), 曝光周期 (D_{irr}), 真光层深度 (Z_{eu}), 光合有效辐射强度 (E_0) 以及最大光合作用速率 P_{opt}^B 。叶绿素 a 浓度可以直接由中国科学院遥感应用研究所提供的 MODIS 影像图(数据空间分辨率是 $250\text{m} \times 250\text{m}$)提取, 其他各参数可以由以下方式得到。

(1) 真光层深度 Z_{eu} 真光层深度由中国科学院遥感应用研究所提供的悬浮物和叶绿素 a 浓度 MODIS 影像图通过公式计算得到^[22-23], 即:

$$Z_{eu}(\text{PAR}) = 4.605 / (0.062 C_{tripton} + 0.011 C_{Chla} + 1.430) \quad (r^2 = 0.954, n = 199, P < 0.0001)$$

式中, $C_{tripton}$ 非色素颗粒物浓度, 也即悬浮物浓度, 由遥感反演 其空间分辨率是 $500\text{m} \times 500\text{m}$, 在 Arcgis 软件

里面进行重采样转换成 $250\text{m} \times 250\text{m}$ 与叶绿素 a 浓度相同的空间分辨率后进行计算。

(2) $P_{\text{opt}}^{\text{B}}$ 由湖水表面温度计算得到 2009 年太湖水域表面温度仍是由 MODIS 影像图反演得到,数据的网格精度是 $1000\text{m} \times 1000\text{m}$,同样先插值成 $250\text{m} \times 250\text{m}$ 的精度,与叶绿素 a 浓度的空间分辨率保持一致,最后结合式(2)进行栅格数据的计算,得到最大光合作用速率 $P_{\text{opt}}^{\text{B}}$ 。

(3) 曝光周期 D_{irr} 与 E_0 的获取。光合有效辐射强度来自于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太湖湖泊生态系统研究所提供的自动观测气象数据。而曝光周期则通过日出日落时间计算器得到(<http://www.xdanger.com/vendors/sun-time/>)。

本文共选择了 29 期 MODIS 影像图,均来自于中国科学院遥感应用研究所所提供的 MODIS 的 2 级产品,

都是用 1B 级数据经过定标定位后的数据,能直接被 Arcgis、Envi 等遥感软件打开的,有着相同的时间分辨率,空间分辨率也通过上述方法转变成 $250\text{m} \times 250\text{m}$ 的分辨率。其中除 1 月份缺测之外,每个月均选择在天气晴朗、无云天气条件下 2 到 3 期的图像来提取所需要的数据。其中叶绿素 a 浓度通过 MODIS 数据中 250 nm 空间分辨率离水辐亮度数据在波段 1、2 的比值组合反演得到^[24],悬浮物浓度通过 MODIS 数据 500 m 空间分辨率离水辐亮度数据在波段 1、3 组合反演得到,模型精度可靠^[25]。本研究选取祝令亚等^[24-25]建立的叶绿素 a、悬浮物浓度反演算法得到叶绿素 a、悬浮物浓度空间分布图,精度上可行且已经经过验证。

2 结果与讨论

2.1 初级生产力的时空分布

2.1.1 初级生产力空间分布特征

图 2 给出的是由 VGPM 模型估算得到的梅梁湾 2009 年 2 月至 12 月每个月的平均初级生产力的空间分布图。由图 2 可知,春季(3、4、5 月)、夏季(6、7、8 月)和秋季(9、10、11 月)梅梁湾湾内至湾口初级生产力空间分布差异显著,大致呈现出湾内向湾口递减的趋势,靠近直湖港及梁溪河附近的河口区初级生产力最高,而后逐渐递减直至梅梁湾中心水域,初级生产力最小值出现在梅梁湾湾口通往湖心的区域。以 9 月份为例,梅梁湾内顶部初级生产力为 $2500 \text{ mgC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$,而中心水域在 $1200\text{—}1800 \text{ mgC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 之间,湾口区则下降至 $200\text{—}400 \text{ mgC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$,与之前基于实测叶绿素 a 浓度估算太湖初级生产力值较为一致^[20]。直湖港及梁溪河是太湖主要的入湖河流,春夏秋季节通过径流携带了大量的外源营养盐进入梅梁湾,湾内充足的营养物质为藻类提供了良好的生长条件。而又正当光合有效辐射强度及水表面温度处于高值时(图 3),浮游植物就开始大量在湾内生长繁殖,初级生产力达到高值。张运林等现场原位初级生产力实验测定获得相似的研究结果——春夏季节叶绿素 a 浓度和初级生产力湾内比湾口高^[18-19]。

冬季梅梁湾初级生产力空间分布差异不明显,以 12 月份为例,大部分水域初级生产力在 $200 \text{ mgC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 以下。冬季浮游植物开始腐烂降解,而由于枯水期导致外源营养盐输入减少,湾内的浮游植物也开始凋亡。但梅梁湾总变化趋势还是湾内逐渐向湾口递减,而且空间分布的差异非常明显。

2.1.2 初级生产力时间变化

从图 3、图 4 可以看出,2009 年太湖梅梁湾初级生产力呈现出明显的季节变化:夏季(6、7、8 月) > 秋季(9、10、11 月) > 春季(3、4、5 月) > 冬季(12、2 月)。夏季平均初级生产力为 $(2308.05 \pm 1036.355) \text{ mgC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$,分别为春季 $(974.42 \pm 944.29) \text{ mgC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 的 2.37 倍,秋季 $(1191.17 \pm 657.49) \text{ mgC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 的 1.94 倍以及冬

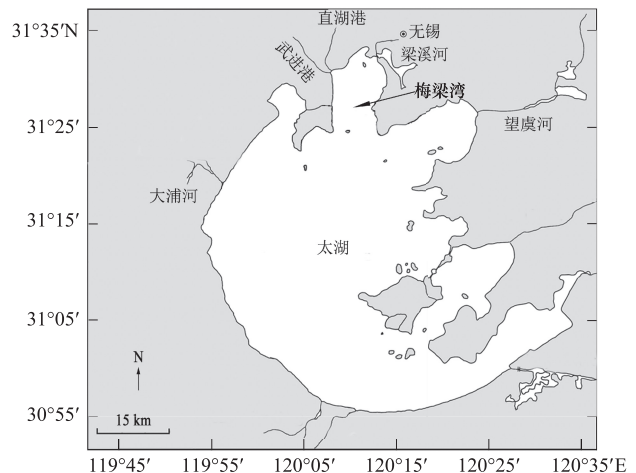


图 1 梅梁湾水域

Fig. 1 Meiliang Bay area in Taihu Lake

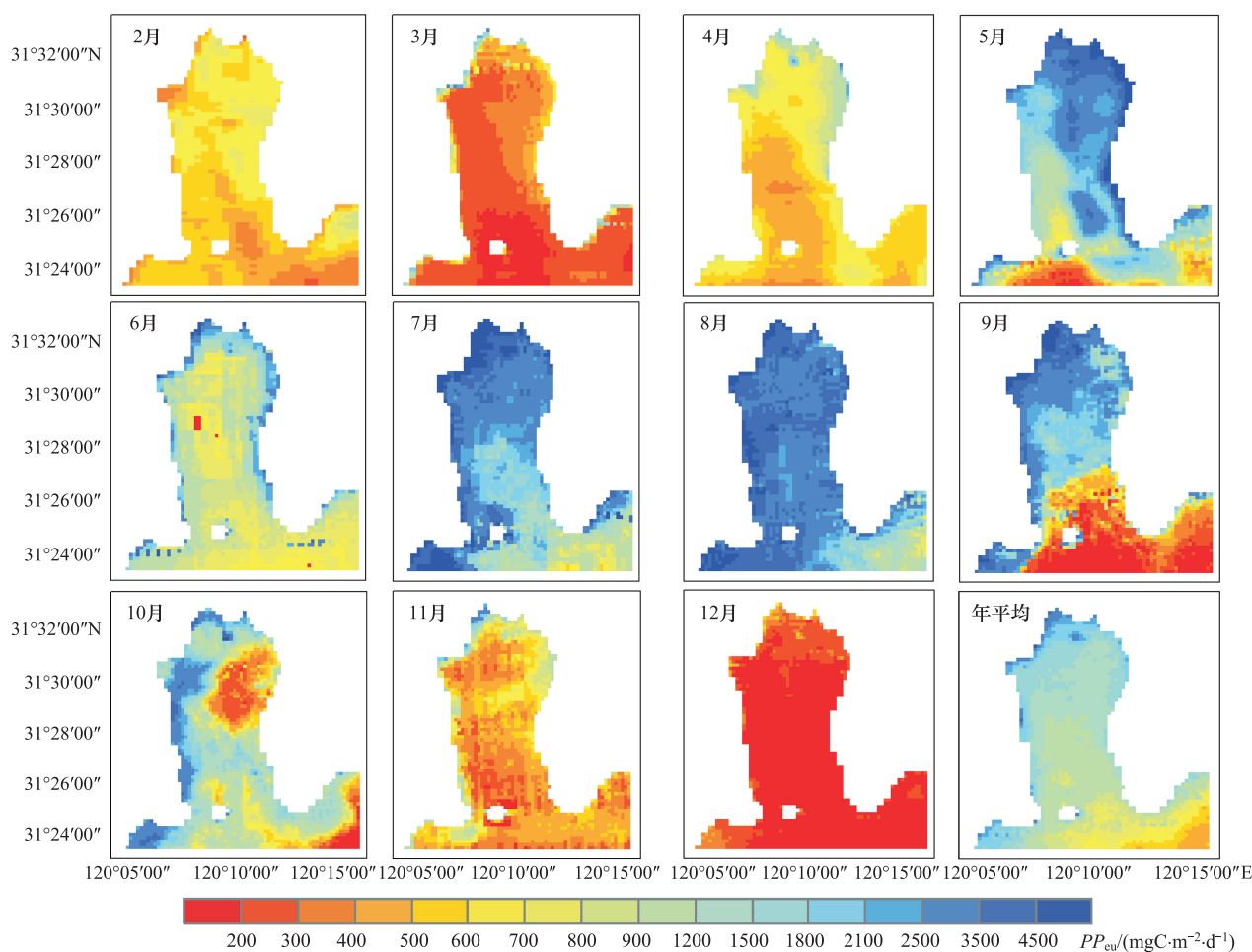


图2 梅梁湾 2009 年 2 月至 12 月逐月平均初级生产力及全年平均初级生产力空间分布图

Fig. 2 Spatial distributions of monthly averaged primary production and annual averaged primary production from February to December in 2009 in Meiliang Bay

季(393.41 ± 257.80) $\text{mgC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 的 5.87 倍。年平均初级生产力达到 $1291.61 \text{ mgC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$, 约为贫营养的坦噶尼喀湖的 2 倍^[17]。年内最高初级生产力出现在 8 月(图 3), 高达 $3131.34 \text{ mgC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$, 全年主要初级生产力集中在夏季, 其中夏季初级生产力占全年初级生产力的 47.4%, 这与蔡后建等在 1991 年至 1993 年对梅梁湾进行黑白瓶溶氧法测初级生产力得出的结论以及 Zhang 等利用 1995 年至 2003 年在梅梁湾实测叶绿素数据、真光层深度及 VGPM 模型估算得到的初级生产力的结论相一致^[20, 26]。但在有些海域, 不管是现场实测还是利用 VGPM 模型反演海域初级生产力, 得到的结论却是夏季初级生产力降到最低, 而在冬季回升至高峰^[14, 27]。其最主要原因是浮游植物繁殖的季节差异。太湖梅梁湾浮游植物春季开始大量生长繁殖, 在夏季(8 月份)叶绿素 a 浓度达到最大值(图 3), 与初级生产力出现峰值的时间一致。整个 2009 年梅梁湾初级生产力时间变化趋势与湖表面叶绿素 a 浓度时间变化趋势趋于一致(图 3), 而光合有效辐射强度呈现出单峰值(图 3), 在 4 月至 7 月达到最高值, 而在秋冬季值比较低; 湖表面水温出现双峰值分布(图 3), 在 6 月和 8 月份都出现了极大值。

2.2 影响梅梁湾初级生产力时空分布的主要因素

水体初级生产力受到多种因素的制约, 比如氮、磷营养盐浓度^[14, 28], 浮游植物粒径组分^[29-30], 水温及光合有效辐射强度^[26]等因素。而太湖梅梁湾是一个富营养水域, 氮、磷营养元素丰富, 不成为初级生产力的限制因子。本研究利用 VGPM 模型输入的参数主要有叶绿素 a 浓度, 光合有效辐射强度, 真光层深度及最大光合

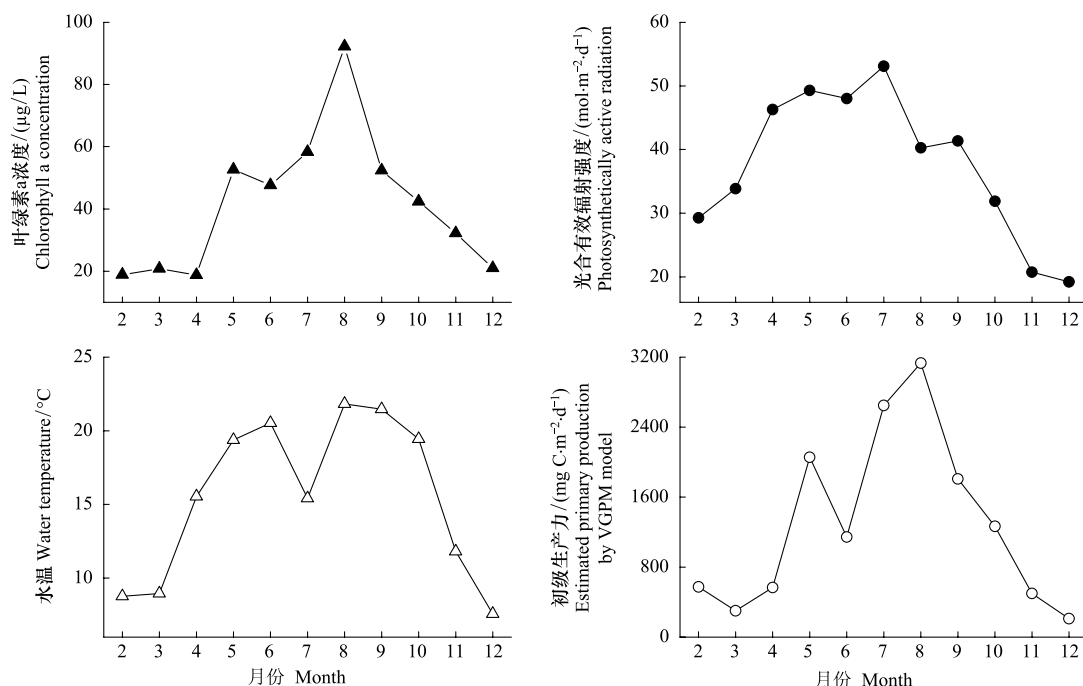


图3 2009年2月至12月太湖梅梁湾各月叶绿素a浓度、光合有效辐射强度、湖表面温度以及初级生产力时间序列图

Fig. 3 Time series of monthly mean chlorophyll a concentration, photosynthetically active radiation, water temperature and primary production of Meiliang Bay from February to December in 2009

作用速率,现探讨分析各项参数与初级生产力的相关关系。

2.2.1 沉积悬浮物对初级生产力的影响

水体真光层是浮游植物进行光合作用的主要场所,而初级生产力能表征浮游植物光合作用的强度。在太湖,真光层深度主要受到悬浮物浓度的影响,其次是叶绿素a浓度,溶解性物质对其影响比较小^[22]。已有文献表明,风浪扰动造成大量悬浮物底泥发生再悬浮,释放出营养盐,会部分增加水体的初级生产力^[31];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,从而制约了水体的初级生产力^[22, 32-35]。朱伟等认为泥沙的悬浮改变了水体的环境条件从而抑制藻类生长^[34]。何文珊等在长江河口区的研究也表明浑浊的悬浮物的消光作用大于营养盐的释放作用从而抑制了长江口的初级生产力^[33]。由此沉积悬浮物浓度的改变对水体初级生产力的影响是一个矛盾的过程。

为探讨沉积物再悬浮引起悬浮物浓度增加对水体初级生产力的影响,事先将计算的初级生产力标准化到单位叶绿素a浓度、单位温度、单位光照强度下,即用初级生产力除以叶绿素a浓度、水温、光照强度得到标准化后初级生产力,消除其它因素对初级生产力的影响。表1是悬浮物浓度梯度的分级,按照浓度大小分为4大类。分析结果表明,沉积悬浮物与标准化后初级生产力存在着一定的幂函数关系,沉积悬浮物对初级生产力有明显抑制作用。从图5看出,当悬浮物浓度分别增加66.1%、137.1%及312.2%时,标准化后的初级生产力分别降低了28.8%、41.3%及52.0%。而对悬浮物浓度与初级生产力以及标准化初级生产力分别进行相关性分析发现,悬浮物浓度与初级生产力及标准化后的初级生产力都存在着显著的负相关性(图6),而后

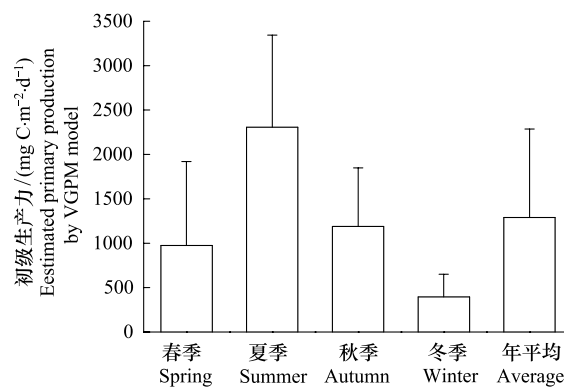


图4 2009年太湖梅梁湾不同季节初级生产力变化趋势

Fig. 4 Seasonal variations of primary production in Meiliang Bay, 2009

者更显著。另外,通过非线性拟合,得到悬浮物浓度与标准化初级生产力的幂函数经验模式,标准化 $PP_{Nor} = 0.662SS^{-0.613}$ ($r^2 = 0.487, n = 29, P < 0.001$)。

梅梁湾冬、春季悬浮物平均浓度为 86.13 mg/L,水体初级生产力为 683.91 $\text{mgC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$,标准化后的初级生产力为 0.062;夏、秋季节悬浮物平均浓度为 84.03 mg/L,水体初级生产力为 1749.61 $\text{mgC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$,标准化后的初级生产力为 0.046。光洁等^[36]通过 Landsat TM/ETM 图像和准同步的水质采样数据同样得出太湖地区冬春季节悬浮物浓度大于夏秋季节。夏秋季节太湖地区风速较小,持续的时间又比较短,因此悬浮物浓度要比冬春季低,夏秋季节浮游植物的大量生长以及温度,光照强度等因素的影响,使得夏秋季节梅梁湾初级生产力高于冬春季节,但是当标准化叶绿素 a 浓度,温度,光照强度后,单纯的看悬浮物浓度对初级生产力的影响时,仍可以得出,当悬浮物浓度增大时,标准化初级生产力是降低的。由此可推测出沉积悬浮物对水体初级生产力的抑制作用要大于由于营养盐释放对初级生产力的促进作用。

表 1 悬浮物浓度梯度分类
Table 1 Level of suspended solid concentration

类别 Category	I	II	III	IV
悬浮物浓度范围 Range of suspended solid concentration (mg/L)	<50	50—69	70—99	>100
样本数 Number of sample	7	7	8	7

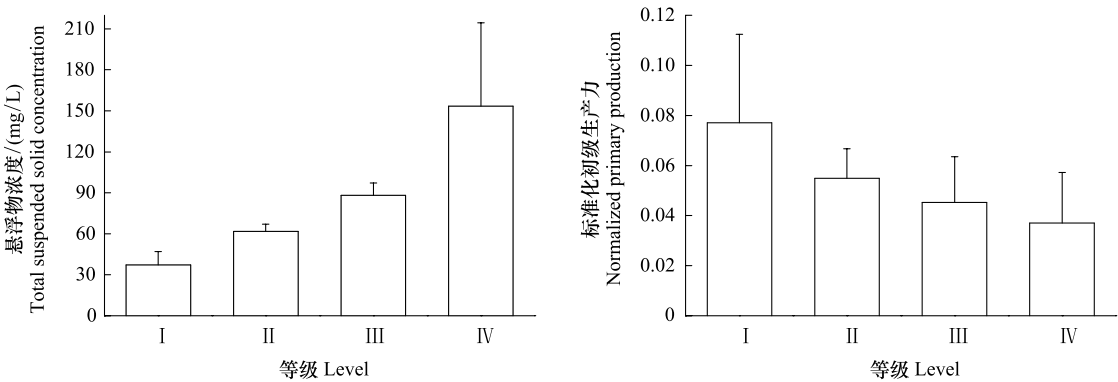


图 5 梅梁湾悬浮物 4 个梯度平均值及标准化叶绿素 a 浓度、温度及光强后的初级生产力

Fig. 5 Mean values of four levels for suspended solid concentration and the primary production normalized by chlorophyll a concentration, water temperature and photosynthetically active radiation

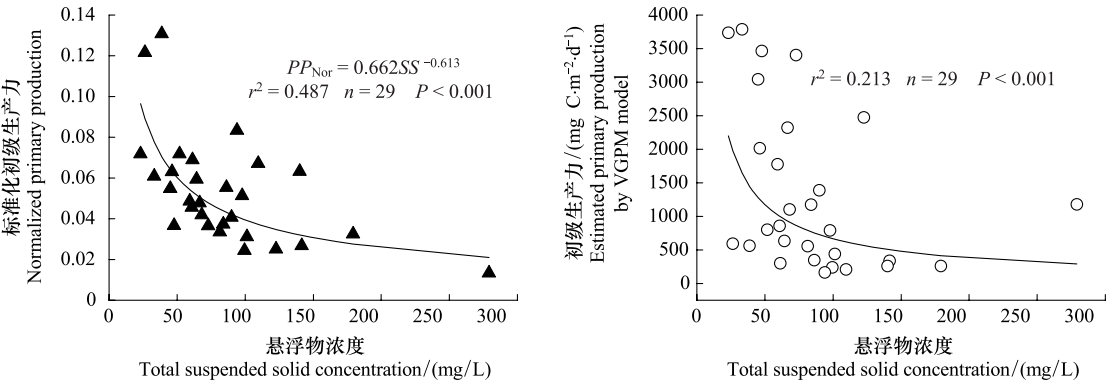


图 6 悬浮物浓度与标准化初级生产力以及初级生产力之间的相互关系

Fig. 6 Correlations between suspended solid concentration and normalized primary production, primary production estimated by VGPM model

2.2.2 温度对初级生产力的影响

Behrenfeld 等认为温度通过影响浮游植物光合作用酶的活性来影响水体初级生产力^[3],由此浮游植物最大光合作用速率 P_{opt}^B 在一定的温度范围之内被定义为是温度的一个函数(公式 2)。由图 7 可以看出,当温度在 19—21℃ 之间时,最大光合作用速率达到最大,平均值在 $(6.48 \pm 0.17) \text{ mgC} \cdot \text{mgChla}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$,而在此温度范围内得到的初级生产力的值也比较高(图 7)。温度过高或过低对初级生产力都有着一定的制约。Nguyen 等和 Siswanto 等在不同水体中发现与温度存在着显著的正相关关系^[7-8]。

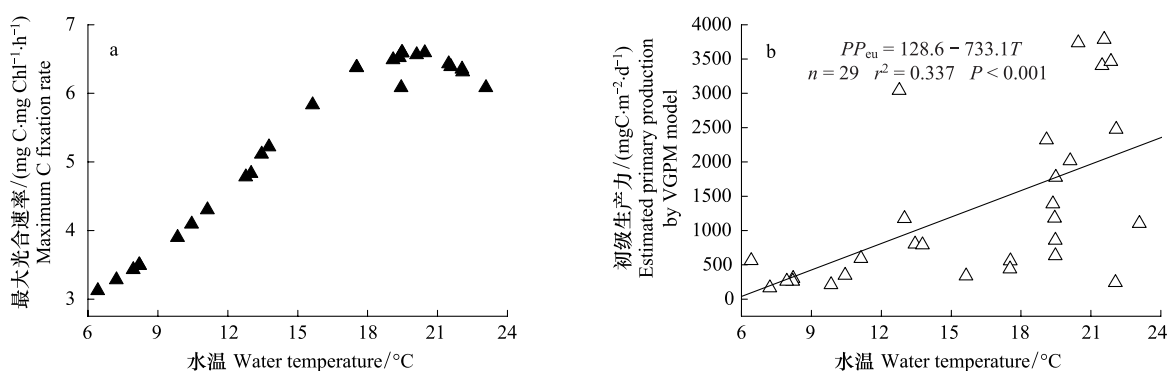


图 7 温度 T 与最大光合速率 P_{opt}^B 及初级生产力 PP_{eu} 之间的关系

Fig. 7 Correlations between temperature and the maximum C fixation rate P_{opt}^B , primary production (PP_{eu})

3 结论

利用 VGPM 模型以及 MODIS 影像估算太湖梅梁湾 2009 年初级生产力。从初级生产力的时空分布图来看,梅梁湾初级生产力呈现出湾内向湾口逐渐递减的趋势,尤其在 4 月至 9 月份,其空间差异更显著。而且季节性变化十分明显,呈现出夏季>秋季>春季>冬季,全年初级生产力主要集中在夏季,占 47.4%。

沉积悬浮物对初级生产力具有一定的影响,与标准化叶绿素 a 浓度、温度及光强后的初级生产力有显著的负相关性,而且存在着幂函数的关系,说明风浪引起的沉积物再悬浮对初级生产力起到抑制作用而不是促进作用。较高初级生产力大多出现在温度 19—21℃ 之间,说明过高或者过低的水温制约初级生产力。

致谢:太湖湖泊生态系统研究站提供光合有效辐射等监测数据,中国科学院遥感应用研究所提供悬浮物、叶绿素 a 及水温 MODIS 影像数据,特此致谢。

References:

- [1] Pan D L, Guan W J, Bai Y, Huang H Q. Ocean primary productivity estimation of China Sea by remote sensing. *Progress in Natural Science*, 2005, 15(7): 627-632.
- [2] Tang S L, Chen C Q, Zhan H G. Retrieval progress of ocean primary production by remote sensing. *Journal of Oceanography in Taiwan Strait*, 2006, 25(4): 591-598.
- [3] Behrenfeld M J, Falkowski P G. Photosynthetic rates derived from satellite-based chlorophyll concentration. *Limnology and Oceanography*, 1997, 42(1): 1-20.
- [4] Pérez V, Fernández E, Marañón E, Serret P, García-Soto C. Seasonal and interannual variability of chlorophyll a and primary production in the Equatorial Atlantic: in situ and remote sensing observations. *Journal of Plankton Research*, 2005, 27(2): 189-197.
- [5] Platt T. Primary production of the ocean water column as a function of surface light intensity: algorithms for remote sensing. *Deep Sea Research Part A: Oceanographic Research Papers*, 1986, 33(2): 149-163.
- [6] Zou Y R, Ma C F, Shao Y. Research progress of ocean primary productivity by remote sensing. *Remote Sensing Information*, 2005, (2): 58-61.
- [7] Siswanto E, Ishizaka J, Yokouchi K. Optimal primary production model and parameterization in the eastern east China Sea. *Journal of Oceanography*, 2006, 62(3): 361-372.
- [8] Nguyen T A, Vo D S. Primary production models and the problem of estimation of their parameters in various conditions of the water column. *Russian Journal of Marine Biology*, 2010, 36(2): 139-146.

- [9] Kahru M, Kudela R, Manzano-Sarabia M, Mitchell B G. Trends in primary production in the California Current detected with satellite data. *Journal of Geophysical Research*, 2009, 114: C02004, doi:10.1029/2008JC004979.
- [10] Moore J K, Abbott M R. Phytoplankton chlorophyll distributions and primary production in the Southern Ocean. *Journal of Geophysical Research*, 2000, 105(12): 28709-28722.
- [11] Ishizaka J, Siswanto E, Itoh T, Murakami H, Yamaguchi Y, Horimoto N, Ishimaru T, Hashimoto S, Saino T. Verification of vertically generalized production model and estimation of primary production in Sagami Bay, Japan. *Journal of Oceanography*, 2007, 63(3): 517-524.
- [12] Kameda T, Ishizaka J. Size-fractionated primary production estimated by a two-phytoplankton community model applicable to ocean color remote sensing. *Journal of Oceanography*, 2005, 61(4): 663-672.
- [13] Tilstone G, Smyth T, Poulton A, Hutson R. Measured and remotely sensed estimated of primary production in the Atlantic Ocean from 1998 to 2005. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 2009, 56(15): 918-930.
- [14] Li X B, Chen C Q, Shi P, Zhan H G, He Q J. Estimation of primary production of South China Sea from 1998 to 2002 by remote sensing and its spatio-temporal variation mechanism. *Journal of Tropical Oceanography*, 2006, 25(3): 57-62.
- [15] Li G S, Gao P, Wang F, Liang Q. Estimation of ocean primary productivity and its spatio-temporal variation mechanism for East China Sea based on VGPM model. *Journal of Geographical Sciences*, 2004, 14(1): 32-40.
- [16] Tan S C, Shi G Y. Remote sensing for ocean primary productivity and its spatio-temporal variability in the China Seas. *Acta Geographica Sinica*, 2006, 61(11): 1189-1199.
- [17] Bergamino N, Horion S, Stenuite S, Cornet Y, Loisele S, Plisnier P D, Descy J P. Spatio-temporal dynamics of phytoplankton and primary production in Lake Tanganyika using a MODIS based bio-optical time series. *Remote Sensing of Environment*, 2010, 114(4): 772-780.
- [18] Zhang Y L, Qin B Q, Chen W M, Gao G, Chen Y W. Chlorophyll a content and primary productivity of phytoplankton in Meiliang Bay of Taihu Lake. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15(11): 2127-2131.
- [19] Zhang Y L, Qin B Q, Chen W M, Chen Y W, Gao G. Phytoplankton primary production in spring Meiliang Bay, Lake Taihu. *Journal of Lake Sciences*, 2005, 17(1): 81-86.
- [20] Zhang Y L, Qin B Q, Liu M L. Temporal-spatial variations of chlorophyll *a* and primary production in Meiliang Bay, Lake Taihu, China from 1995 to 2003. *Journal of Plankton Research*, 2007, 29(8): 707-709.
- [21] Qin B Q, Xu H, Dong B L. *The Principle and Practice of Eutrophic Lake Pestoration and Management*. Beijing: Higher Education Press, 2011: 293-303.
- [22] Zhang Y L, Qin B Q, Hu W P, Wang S M, Chen Y W, Chen W M. Temporal-spatial variations of euphotic depth of typical lake regions in Lake Taihu and its ecological environmental significance. *Science in China. Series D Earth Sciences*, 2006, 49(4): 431-442.
- [23] Li Y L, Zhang Y L, Liu M L. Calculation and retrieval of euphotic depth of Lake Taihu by remote sensing. *Journal of Lake Science*, 2009, 21(2): 165-172.
- [24] Zhu L Y, Wang S X, Zhou Y, Yan F L, Yang L Y. Determination of Chlorophyll-*a* concentration in Taihu Lake using MODIS image data. *Remote Sensing Information*, 2006, (2): 25-28.
- [25] Zhu L Y, Wang S X, Zhou Y, Yan F L, Yang L Y. Estimation of suspended sediment concentration in Taihu Lake using MODIS image data. *Advances in Water Science*, 2007, 18(3): 444-450.
- [26] Cai H J, Chen Y W, Cai Q M, Gao X Y. Relations between primary production of phytoplankton and relative factors at mouth of Meiliang Bay in Taihu Lake. *Journal of Lake Sciences*, 1994, 6(4): 340-347.
- [27] Lee Chen Y L. Spatial and seasonal variations of nitrate-based new production and primary in the South China Sea. *Deep-Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 2005, 52(2): 319-340.
- [28] Lee Chen Y L, Chen H Y, Karal D M, Takahashi M. Nitrogen modulates phytoplankton growth in spring in the South China Sea. *Continental Shelf Research*. 2004, 24(4/5): 527-541.
- [29] Le F F, Ning X R, Liu C G, Hao Q, Cai Y M. Standing stock and production of phytoplankton in the northern South China Sea during winter of 2006. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(11): 5775-5784.
- [30] Ho A Y T, Xu J, Yin K D, Jiang Y L, Yuan X C, He L, Anderson D M, Lee J H W, Harrison P J. Phytoplankton biomass and production in subtropical Hong Kong waters; influence of the pearl river outflow. *Estuaries and Coasts*, 2010, 33(1): 170-181.
- [31] Schallenberg M, Burns C W. Effects of sediment resuspension on phytoplankton production; teasing apart the influences of light, nutrients and algal entrainment. *Freshwater Biology*, 2004, 49(2): 143-159.
- [32] Zhang Y L, Qin B Q, Chen W M, Luo L C. A study on total suspended matter in Lake Taihu. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2004, 13(3): 266-271.
- [33] He W S, Lu J J. Effects of high-density suspended sediments on primary production at the Yangtze Estuary. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*

Research, 2001, 9(4): 24-27.

- [34] Zhu W, Jiang M Y, Zhao L F, Tian T. Field survey and analysis of influence of suspended sediment on algae growth. *Advances in Water Science*, 2010, 21(2): 241-247.
- [35] Zhang Y L, Qin B Q, Chen W M, Chen Y W, Wu S C. Biological and optical properties of Meiliang Bay in Lake Taihu. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(3): 454-460.
- [36] Guang J, Wei Y C, Huang J Z, Li Y M, Wen J G, Guo J P. Seasonal suspended sediment estimating models in Lake Taihu using remote sensing data. *Journal of Lake Sciences*, 2007, 19(3): 241-249.

参考文献:

- [2] 唐世林, 陈楚群, 詹海刚. 海洋初级生产力的遥感研究进展. *台湾海峡*, 2006, 25(4): 591-598.
- [6] 邹亚荣, 马超飞, 邵岩. 遥感海洋初级生产力的研究进展. *遥感信息*, 2005, (2): 58-61.
- [14] 李小斌, 陈楚群, 施平, 詹海刚, 何全军. 南海 1998—2002 年初级生产力的遥感估算及其时空演化机制. *热带海洋学报*, 2006, 25(3): 57-62.
- [16] 檀赛春, 石广玉. 中国近海初级生产力的遥感研究及其时空演化. *地理学报*, 2006, 61(11): 1189-1199.
- [18] 张运林, 秦伯强, 陈伟民, 高光, 陈宇炜. 太湖梅梁湾浮游植物叶绿素 a 和初级生产力. *应用生态学报*, 2004, 15(11): 2127-2131.
- [19] 张运林, 秦伯强, 陈伟民, 陈宇炜, 高光. 太湖梅梁湾春季浮游植物初级生产力. *湖泊科学*, 2005, 17(1): 81-86.
- [21] 秦伯强, 许海, 董百丽. 富营养化湖泊治理的理论与实践. 北京: 高等教育出版社, 2011: 293-303.
- [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.
- [24] 祝令亚, 王世新, 周艺, 阎福礼, 杨龙元. 应用 MODIS 监测太湖水体叶绿素 a 浓度的研究. *遥感信息*, 2006, 2: 25-28.
- [25] 祝令亚, 王世新, 周艺, 阎福礼, 杨龙元. 应用 MODIS 影像估测太湖水体悬浮物浓度. *水科学进展*, 2007, 18(3): 444-450.
- [26] 蔡后建, 陈宇伟, 蔡启铭, 高锡芸. 太湖梅梁湾口浮游植物初级生产力及其相关因素关系的研究. *湖泊科学*, 1994, 6(4): 340-347.
- [29] 乐凤凤, 宁修仁, 刘诚刚, 郝镔, 蔡昱明. 2006 年冬季南海北部浮游植物生物量和初级生产力及其环境调控. *生态学报*, 2008, 28(11): 5775-5784.
- [32] 张运林, 秦伯强, 陈伟民, 罗淑葱. 太湖水体中悬浮物研究. *长江流域资源与环境*, 2004, 13(3): 266-271.
- [33] 何文珊, 陆健健. 高浓度悬沙对长江河口水域初级生产力的影响. *中国生态农业学报*, 2001, 9(4): 24-27.
- [34] 朱伟, 姜谋余, 赵联芳, 田涛. 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.
- [35] 张运林, 秦伯强, 陈伟民, 陈宇炜, 吴生才. 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.
- [36] 光洁, 韦玉春, 黄家柱, 李云梅, 闻建光, 郭建平. 分季节的太湖悬浮物遥感估测模型研究. *湖泊科学*, 2007, 19(3): 241-249.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 32, No. 11 June, 2012 (Semimonthly)

CONTENTS

Controls of post-fire tree recruitment in Great Xing'an Mountains in Heilongjiang Province	CAI Wenhua, YANG Jian, LIU Zhihua, et al (3303)
The assessment of river health using Benthic-Index of biotic integrity for Wenyu River	YANG Liu, LI Yonghui, WANG Juncai, et al (3313)
Consume of soil seeds of <i>Betula albo-sinensis</i> and <i>Abies faxoniana</i> in different natural successional stages of subalpine dark coniferous forest in western Sichuan, China	MA Jiangming, LIU Shirong, SHI Zuomin, et al (3323)
Habitat associations of understorey species spatial distribution in old growth broad-leaved Korean pine (<i>Pinus koraiensis</i>) forest	DING Shengjian, ZHANG Chunyu, XIA Fucui, et al (3334)
Nabkha morphology and sand-fixing capability of four dominant <i>Caragana</i> species in the desert region of the Inner Mongolia Plateau	ZHANG Yuanyuan, MA Chengchang, HAN Lei, et al (3343)
Growth dynamics, biomass allocation and ecological adaptation in <i>Ceratocarpus arenarius</i> L.	QUAN Dujuan, WEI Yan, ZHOU Xiaoqing, et al (3352)
A rapid assessment method for forest disaster based on MODIS/NDVI time series; a case study from Guizhou Province	SHI Hao, WANG Xiao, XUE Jianhui, et al (3359)
Soil cation exchange capacity and exchangeable base cation content in the profiles of four typical soils in the Xi-Shui Forest Zone of the Qilian Mountains	JIANG Lin, GENG Zengchao, LI Shanshan, et al (3368)
Impact of water and temperature on spring maize emergence speed and emergence rate	MA Shuqing, WANG Qi, LÜ Houquan, et al (3378)
Effect of N application on the abundance of denitrifying genes (<i>narG/nosZ</i>) and N ₂ O emission in paddy soil	ZHENG Yan, HOU Haijun, QIN Hongling, et al (3386)
Temporal-spatial variations of potential evapotranspiration and quantification of the causes in Northwest China	CAO Wen, SHEN Shuanghe, DUAN Chunfeng (3394)
Analysis of ecosystem degradation and recovery using precipitation use efficiency and NDVI in the headwater catchment of the Yellow River basin	DU Jiaqiang, SHU Jianmin, ZHANG Linbo (3404)
An assessment method of <i>Kandelia obovata</i> population biomass	JIN Chuan, WANG Jinwang, ZHENG Jian, et al (3414)
Quantitative characteristics and species composition of <i>Artemisia sphaerocephala</i> and <i>A. ordosica</i> communities in the Ulanbuh Desert ...	MA Quanlin, ZHENG Qingzhong, JIA Jujie, et al (3423)
Photosynthesis and transpiration in relation to ion accumulation in <i>Vitex trifolia</i> under varied light intensity	ZHANG Ping, LIU Linde, BAI Xinfu, et al (3432)
Diffusion of elm seed rain in Otindag Sand Land	GU Wei, YUE Yongjie, LI Gangtie, et al (3440)
Effect of saline water irrigation on sand soil salt and the physiology and growth of <i>Populus euphratica</i> Oliv.	HE Xinlin, CHEN Shufei, WANG Zhenhua, et al (3449)
Regulation of exogenous nitric oxide on photosynthetic physiological response of <i>Lolium perenne</i> seedlings under NaHCO ₃ Stress	LIU Jianxin, WANG Jincheng, WANG Xin, et al (3460)
Longitude gradient changes on plant community and soil stoichiometry characteristics of grassland in Hulunbeir	DING Xiaohui, LUO Shuzheng, LIU Jinwei, et al (3467)
Concentrations and distributions of selenium and heavy metals in Hainan paddy soil and assessment of ecological security	GENG Jianmei, WANG Wenbin, WEN Cuiping, et al (3477)
Heavy metal contents and evaluation of farmland soil and wheat in typical area of Jiangsu Province	CHEN Jingdu, DAI Qigen, XU Xuehong, et al (3487)
The studies on the food web structures and trophic relationships in Guangxi Dongfang Cave by means of stable carbon and nitro- gen isotopes	LI Daohong, SU Xiaomei (3497)
Analysis of bacterial diversity in the Songhua River based on nested PCR and DGGE	TU Teng, LI Lei, MAO Guannan, et al (3505)

Preliminary delineation and classification of estuarine drainage areas for major coastal rivers in China	HUANG Jinliang, LI Qingsheng, HUANG Ling, et al (3516)
Estimation of spatial and seasonal changes in phytoplankton primary production in Meiliang Bay, Lake Taihu, based on the Vertically Generalized Production Model and MODIS data	YIN Yan, ZHANG Yunlin, SHI Zhiqiang, et al (3528)
Viability and changes of physiological functions in the tiger frog (<i>Hoplobatrachus rugulosus</i>) exposed to cold stress	WANG Na, SHAO Chen, XIE Zhigang, et al (3538)
Community structure and abundance dynamics of soil collembolans in transgenic Bt rice paddyfields	ZHU Xiangyu, LI Zhiyi, CHANG Liang, et al (3546)
Morphological characteristics and microsatellite DNA genetic diversity of Nigeria African honey bee, Anhui <i>Apis mellifera</i> and theirs hybrid generation II	YU Linsheng, XIE Wenfei, WU Houchang, et al (3555)
Effects of social-demographic factors on the recreational service of park wetlands in Beijing	LI Fen, SUN Ranhao, CHEN Liding (3565)
Co-integration theory-based analysis on relationships between economic growth and eco-environmental changes: taking the south-east district in Chongqing city as an example	XIAO Qiang, HU Dan, XIAO Yang, et al (3577)
The cooperative environmental game model in the Tidal River Network Regions and its empirical research	LIU Honggang, CHEN Xingeng, PENG Xiaochun (3586)

Review and Monograph

Review of eco-efficiency accounting method and its applications	YIN Ke, WANG Rusong, ZHOU Chuanbin, et al (3595)
Overview on the 6th international symposium on modern ecology series of 2011	WEN Teng, XU Delin, XU Chi, et al (3606)

Discussion

Scale analysis of environmental factors and their relationship with the size of hierarchical aquatic ecoregion: a case study in the Liao River basin	LIU Xingcai, XU Zongxue, ZHANG Shurong, et al (3613)
--	--

Scientific Note

Effects of different light intensities on activities of the primary defense proteins in needles of <i>Larix gmelinii</i>	LU Yifang, SHI Lei, YAN Shanchun (3621)
An analysis of photosynthetic parameters among <i>Schima superba</i> provenances	XIONG Caiyun, ZENG Wei, XIAO Fuming, et al (3628)
Research on three small-scale agricultural ecological-economic systems in Shenzhen City based on emergy analysis	YANG Zhuoxiang, GAO Yang, ZHAO Zhiqiang, et al (3635)

《生态学报》2012 年征订启事

《生态学报》是中国生态学学会主办的自然科学高级学术期刊,创刊于 1981 年。主要报道生态学研究原始创新性科研成果,特别欢迎能反映现代生态学发展方向的优秀综述性文章;研究简报;生态学新理论、新方法、新技术介绍;新书评介和学术、科研动态及开放实验室介绍等。

《生态学报》为半月刊,大 16 开本,280 页,国内定价 70 元/册,全年定价 1680 元。

国内邮发代号:82-7 国外邮发代号:M670 标准刊号:ISSN 1000-0933 CN 11-2031/Q

全国各地邮局均可订阅,也可直接与编辑部联系购买。欢迎广大科技工作者、科研单位、高等院校、图书馆等订阅。

通讯地址:100085 北京海淀区双清路 18 号 电 话:(010)62941099; 62843362

E-mail: shengtaixuebao@rcees.ac.cn 网 址: www.ecologica.cn

编辑部主任 孔红梅 执行编辑 刘天星 段 靖

生 态 学 报

(SHENGTAI XUEBAO)

(半月刊 1981 年 3 月创刊)

第 32 卷 第 11 期 (2012 年 6 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 32 No. 11 (June, 2012)

编 辑	《生态学报》编辑部 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085 电话:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn	Edited by	Editorial board of ACTA ECOLOGICA SINICA Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China Tel:(010)62941099 www.ecologica.cn Shengtaixuebao@rcees.ac.cn
主 编	冯宗炜	Editor-in-chief	FENG Zong-Wei
主 管	中国科学技术协会	Supervised by	China Association for Science and Technology
主 办	中国生态学学会 中国科学院生态环境研究中心 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085	Sponsored by	Ecological Society of China Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
出 版	科 学 出 版 社 地址:北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:100071	Published by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷	北京北林印刷厂	Printed by	Beijing Bei Lin Printing House, Beijing 100083, China
发 行	科 学 出 版 社 地址:东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717 电话:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net	Distributed by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net
订 购	全国各地邮局	Domestic	All Local Post Offices in China
国外发行	中国国际图书贸易总公司 地址:北京 399 信箱 邮政编码:100044	Foreign	China International Book Trading Corporation Add:P. O. Box 399 Beijing 100044, China
广告经营 许 可 证	京海工商广字第 8013 号		



ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 70.00 元