

太湖叶绿素 a 浓度时空分异及其定量反演

乐成峰, 李云梅, 孙德勇, 王海君, 黄昌春

(南京师范大学 虚拟地理环境教育部重点实验室, 南京 210046)

摘要: 利用 2005 年实测叶绿素 a 浓度数据分析了太湖叶绿素 a 浓度的时空分布特征, 并利用同步光谱数据, 分季节对太湖叶绿素 a 浓度的反演模型进行研究, 从而分析叶绿素 a 的时空变化对反演模型的影响. 首先分析 1 a 内叶绿素 a 浓度随时间的变化规律, 然后利用反距离加权插值法绘制叶绿素 a 浓度不同季节空间分布图, 分析叶绿素 a 浓度在不同季节的空间分布规律, 在此基础上分春、夏、秋 3 个季节和中营养化、轻度富营养化、中度富营养化、重度富营养化 4 个营养状态进行叶绿素 a 浓度定量反演模型研究. 结果表明, 太湖叶绿素 a 浓度具有明显的时空分布特征. 夏季叶绿素 a 浓度最高, 冬季最低, 平均浓度分别为 56.29 $\mu\text{g/L}$ 、13.61 $\mu\text{g/L}$. 秋季由于受到夏季高浓度的影响, 叶绿素 a 浓度高于春季, 平均值分别为 26.43 $\mu\text{g/L}$ 、34.78 $\mu\text{g/L}$; 夏季叶绿素 a 浓度空间变化最大, 冬季全湖叶绿素 a 浓度含量较为均一, 空间变化不明显, 秋季空间差异要大于春季; 全年北部湖区空间差异较大, 而南部湖区相对较小. 不同季节叶绿素 a 反演算法模型不同, 春、秋季波段比值法反演效果较好; 而夏季微分法反演效果明显好于其它反演算法, 不同营养状态条件下反演算法差异相对较小.

关键词: 太湖; Chl-a 浓度; 时空分布; 反演模型

中图分类号: X524 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2008)03-0619-08

Spatio-temporal Distribution of Chlorophyll a Concentration and Its Estimation in Taihu Lake

LE Cheng-feng, LI Yun-mei, SUN De-yong, WANG Hai-jun, HUANG Chang-chun

(Key Laboratory of Virtual Geographic Environment, Ministry of Education, Nanjing Normal University, Nanjing 210046, China)

Abstract: The temporal and spatial distribution of chlorophyll a concentration in Taihu Lake was analyzed using the data measured from January to October in 2005. Otherwise, chlorophyll a retrieval model was built using the synchronous spectrum data obtained in different season to evaluate the effect of chlorophyll a concentration temporal and spatial variation on the retrieval model. Firstly, temporal distribution of chlorophyll a concentration was analyzed. Then, chlorophyll a concentration was induced by Inverse Distance Weight method. Lastly, the chlorophyll a concentration estimation models based on spring, summer, autumn and different trophic states were built. An obvious spatial-temporal distribution was found for chlorophyll a concentration in Taihu. Chlorophyll a concentration had the maximal value in summer and the minimal value in winter, and the average chlorophyll a concentration was 56.29 $\mu\text{g/L}$, 13.61 $\mu\text{g/L}$ respectively. Due to the effect of autumn, the average chlorophyll a concentration in autumn was higher than that in spring, and the average chlorophyll a concentration was 26.43 $\mu\text{g/L}$, 34.78 $\mu\text{g/L}$ respectively. Marked spatial difference for chlorophyll a concentration was found in summer, while in winter the spatial variation was ambiguous. The spatial variation in autumn was greater than that in spring as influenced by summer. Spatially, the variation in north area was greater than those in the other areas and the south area had less variation during the year. Because of the different chlorophyll a concentration, different season had different retrieval model. Band-ratio had better retrieval result in spring and autumn as there were lower concentration and less variation correspondingly. While in summer, because of the high chlorophyll a concentration and great spatial variation, among the arithmetic built in summer, the differential arithmetic was the optimal model, and the difference of Chl-a concentration retrieval model of different trophic state was minor.

Key words: Taihu Lake; chlorophyll a concentration; spatial-temporal distribution; retrieval model

叶绿素 a (Chl-a) 是浮游植物生物体的重要组成成分之一, Chl-a 含量的高低与该水体中藻类的种类、数量等密切相关, 是浮游植物现存量的重要指标^[1,2]. 湖泊水体中的 Chl-a 浓度与浮游植物生物量和初级生产力具有密切的关系, 张运林等^[3]在对太湖梅梁湾浮游植物 Chl-a 和初级生产力的研究中, 得出初级生产力与浮游植物生物量具有很好的正相关; 周伟华等^[4]在对东海赤潮高发区春季 Chl-a 和初级生产力分布特征研究中得出初级生产力与 Chl-a 具有相同的分布特征. Chl-a 是反映湖泊水体营养状

况的一个客观生物学指标, 是水体营养状态评价和富营养化评价的重要参数^[5-7], 其含量大小在一定程度上反映了水体富营养化的程度. 水体中 Chl-a 浓度的大小还影响到水体生态系统的类型转化^[8]和沉水植物的恢复^[9]. Chl-a 浓度及其时空变化反映了水体中浮游植物的丰度及其生物量的变化规律, 同时

收稿日期: 2007-04-05; 修订日期: 2007-07-06

基金项目: 国家自然科学基金项目 (40571110); 国家高技术研究发展计划 (863) 项目 (2003AA131060)

作者简介: 乐成峰 (1982 ~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为水质遥感, E-mail: lcf320@126.com

也反映了该水域初级生产力和水体生态环境的变化规律,对Chl-a浓度时空分布进行研究,能够更好地了解水体生态环境的时空变化特征,国内外已有众多研究者对不同水域的Chl-a浓度时空变化特征进行了研究.陈晓玲等^[10]利用实测数据分析了香港海域的Chl-a浓度时空变化规律,并分析了该规律的形成机制;胡好国等^[11]利用物理-生物耦合浮游生态系统动力学模式,研究南黄海浮游植物(以Chl-a为指标)的时空分布特征;Eun 等^[12]利用三维动力模式研究了 Paldang 湖的浮游植物的时空分布特征.

常规的Chl-a监测方法是通过采集水样实验室进行分析,得到采样点的Chl-a浓度,用采样点的Chl-a浓度代替附近水域Chl-a浓度或采用地统计学的方法分析其时空分布^[13,14].而对大面积的水域,采用该方法耗时费力.遥感技术由于其宏观、动态等特点在水质监测中具有重要的应用价值,Chl-a由于其特有的光学特性^[15~17]使得利用遥感反射率反演Chl-a浓度具有可行性.高光谱数据由于其高光谱分辨率使其在寻找Chl-a浓度敏感波段和反演Chl-a浓度中具有很好的优势^[18~20].但不同水域或同一水域不同时期,由于其营养盐组成、水动力环境和外界环境条件的差异导致藻类含量和种类存在一定的差异^[21~24].藻类浓度和组成成分的不同,导致其光学特性存在一定的差异,Bricaud 等^[25]的研究表明,叶绿素的吸收光谱曲线与叶绿素浓度和浮游植物细胞内色素组分有关;Koji 等^[26]在对藻类色素和叶绿素的吸收系数的研究中也得到类似的结论.这种差异使得利用遥感反射率反演Chl-a浓度在不同水域、同一水域不同时期所用的算法和参数不同. Pepe 等^[17]对阿尔卑斯山下 Iseo 湖浮游植物色素与遥感反射率的关系分析中,得出在不同时期,藻种和含量的不同导致叶绿素敏感波段的变化,且敏感波段与叶绿素浓度的相关性也随季节发生变化;Kallioa 等^[27]对芬兰南部地区的 11 个湖泊水质进行了不同季节的研究,研究结果表明不同季节反演模型的参数不同,随着季节的变化,反演模型的 R^2 在 0.84 ~ 0.95 之间变动.太湖是典型的大型富营养化浅水湖泊,影响Chl-a浓度的主要因素有光照、温度、营养盐和酸碱度等^[28,29],对其Chl-a浓度的时空分布进行研究可以更好地了解太湖水域生态环境的时空变化规律,为太湖水污染的治理和水体环境的改善提供基础资料;对Chl-a浓度分不同季节、不同营养状态条件下反演算法进行的研究,可以提高反演精度,从而更精确的进行水质监测和环境评价.本研究利用太湖

2005-01 ~ 2005-12 太湖Chl-a浓度实测数据分析太湖Chl-a浓度时空分布特征,并利用 4 ~ 10 月份同步实测光谱数据,分不同季节和不同营养状态对太湖Chl-a浓度进行反演,分析太湖不同季节和不同营养状态条件下反演算法和参数的差异,进而分析Chl-a浓度变化对反演模型的影响,以期太湖Chl-a浓度提供更为精确的反演模型,为太湖水质监测提供新的方法参考.

1 材料与方法

为了研究太湖Chl-a浓度的时空变化,利用 2005-01 ~ 2005-12 太湖 21 个常规监测点(图 1)Chl-a浓度数据进行分析.根据 2003 年国家环保总局发布实施的地表水和污染水监测技术规范采集、存储水样.在实验室内将样品进行抽滤、研磨、离心、定容后置于分光光度计上,用 1 cm 光程的比色皿分析Chl-a浓度.

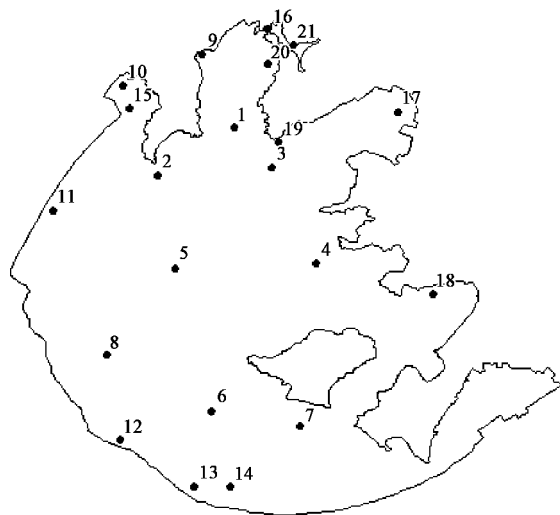


图 1 太湖常规监测点分布

Fig.1 Distribution of sampling stations

4 ~ 10 月份光谱数据的采样和水体取样分析同步进行.光谱测试使用由美国分析光谱仪器公司 (Analytical Spectral Devices) 制造的 ASD 野外光谱辐射计 (ASD Field Spec).光谱采集和处理的方法采用文献^[30]中提出的水面以上测量法.仪器观测平面与太阳入射平面的夹角 $90^\circ \leq \Phi_v \leq 135^\circ$ (背向太阳方向),仪器与法线方向的夹角 $30^\circ \leq \theta_v \leq 45^\circ$,以避免太阳直射反射和减少船舶阴影的影响.在仪器面向水体进行测量后,将仪器在观测平面内向上旋转 1 个角度,使得天空光辐亮度 L_{sky} 的观测方向的天顶角等于测量时的观测角 Φ_v .由光谱仪实测数据提取

遥感反射比,具体算法如下.

离水辐亮度的计算:

$$L_w = L_{sw} - rL_{sky}$$
 (1)

式中, L_w 为离水辐亮度, L_{sw} 为水体总信息, L_{sky} 为天空漫反射光, r 为气-水界面反射比.

水体表面入射总辐照度 $E_d(0^+)$ 为:

$$E_d(0^+) = L_p \times \pi / \rho_p$$
 (2)

式中, L_p 为标准灰板测量值; ρ_p 为标准灰板的反射比.

遥感反射比 R_{rs} 的计算公式为:

$$R_{rs} = L_w / E_d(0^+)$$
 (3)

在计算遥感反射比时,根据测量时的天气状况,气-水界面对天空光的反射比 r 取 0.025;选用经过严格定标的 30% 的灰板. π 取 3.141 592 6.

每个采样点测量 10 次光谱.进行遥感反射比计算时,先对测得的光谱数据进行异常数据剔除,去除数值较高的光谱曲线,保留数值较低的光谱曲线进行平均.然后将平均处理后的数据代入以上公式,得到水体的离水辐亮度和遥感反射比.

2 结果与分析

2.1 Chl-a含量时间分布及变化规律

为了分析Chl-a浓度的时间分布规律,对 2005-01 ~ 2005-12 各个站点Chl-a浓度数据进行平均,得到太湖全湖每个月的平均浓度(图 2),并根据太湖所处地理位置的气候特点,将 10 个月的数据分 4 个季节进行分析,即 12 月 ~ 次年 2 月份为冬季,3 ~ 5 月份为春季,6 ~ 8 月份为夏季,9 ~ 11 月份为秋季.对各站点数据进行平均,得到各站点 4 个季节 Chl-a 浓度平均值(图 3).

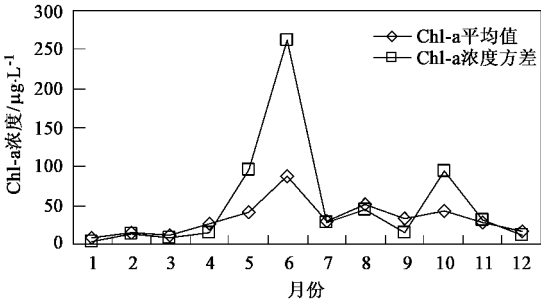


图 2 不同月份Chl-a浓度

Fig. 2 Chl-a concentration of different month

从图 2 可以看出, Chl-a 浓度随着时间的变化具有一定的规律, 在 1 ~ 3 月份, Chl-a 浓度较低, 其主要原因是 1、2 月份处于冬季, 水温较低, 且光照不强,

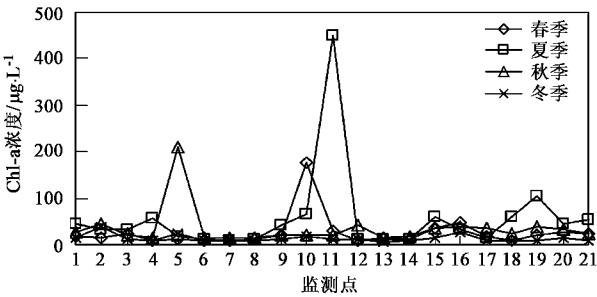


图 3 不同季节各监测点Chl-a浓度

Fig. 3 Chl-a concentration of each station in different season

由于水温和光照是影响太湖Chl-a生长的主要环境因子^[29], 从而导致Chl-a浓度含量较低. 3 月份虽然光照和温度都有所上升, 但是数据采集为每个月初进行, 而藻类生长具有一定的周期, 使得 3 月份Chl-a浓度含量与 1、2 月份浓度没有明显上升, 甚至稍低. 从 4 月份开始, 由于水温上升和光照强度的增强, Chl-a 浓度含量开始上升, 到 6 月份达到最大值, 平均Chl-a 浓度为 87.57 $\mu\text{g/L}$, 部分监测点所在湖区有藻类暴发现象. 7 月份由于江淮地区的梅雨季节, 降水量增加使得Chl-a浓度大幅度下降, 平均浓度值为 30.24 $\mu\text{g/L}$, 8 月份随着梅雨季节的结束, 而水温和光照强度仍较高, Chl-a 浓度开始上升, 浓度值达到 51.05 $\mu\text{g/L}$. 9 月份开始进入秋季, Chl-a 浓度有所下降, 但是下降幅度不大, 9、10 月份Chl-a 浓度平均值分别为 33.33 $\mu\text{g/L}$ 、42.76 $\mu\text{g/L}$. 10 月份以后, 由于水温和光照都开始下降, Chl-a 浓度开始不断下降, 11、12 月份 Chl-a 平均浓度分别为 28.24 $\mu\text{g/L}$ 、17.27 $\mu\text{g/L}$. 其中 5、6、10 月份各监测点之间浓度差异较大, 均方差分别为 95.18 $\mu\text{g/L}$ 、262.59 $\mu\text{g/L}$ 、94.16 $\mu\text{g/L}$.

从Chl-a浓度季节分布来看(图 3), Chl-a 浓度具有明显的季节变化特征, 夏季大部分监测点Chl-a 浓度较高, 平均值为 56.29 $\mu\text{g/L}$, 且各点之间的差异较大, 均方差达到 93.6 $\mu\text{g/L}$; 冬季Chl-a 浓度含量最低, Chl-a 浓度平均值为 13.61 $\mu\text{g/L}$, 且各监测点之间变化不大, 均方差为 7.44 $\mu\text{g/L}$; 秋季由于夏季的影响, Chl-a 浓度高于春季, 平均值分别为 26.43 $\mu\text{g/L}$ 、34.78 $\mu\text{g/L}$, 且秋季各监测点之间的变化大于春季, 春、秋季节Chl-a 浓度均方差分别为 36.2 $\mu\text{g/L}$ 、41.21 $\mu\text{g/L}$.

2.2 Chl-a含量空间分布规律

用 ArcGIS 软件绘制各个季节Chl-a浓度的等值线分布图, 以研究其空间分布规律. 先用反距离加权插值(inverse distance weight, IDW)方法对 21 个监测点在全湖范围内进行插值计算(为了反映全湖的变

化分布特征,在插值时,西山岛作为湖面参与插值分析).从图 3 可以看出,春、夏、秋、冬 4 个季节都出现 Chl-a 浓度明显高于其他监测点的点位(分别为 10 号点、11 号点、5 号点、2 号点),这些点所在湖区都有

藻类暴发现象.在进行插值计算时,将这些点作为异常点剔除.由于夏季空间变化较大,等值线的间隔设为 5 $\mu\text{g/L}$,春、秋、冬季节等值线间隔为 3 $\mu\text{g/L}$,得到 Chl-a 浓度不同季节的空间分布图(图 4).

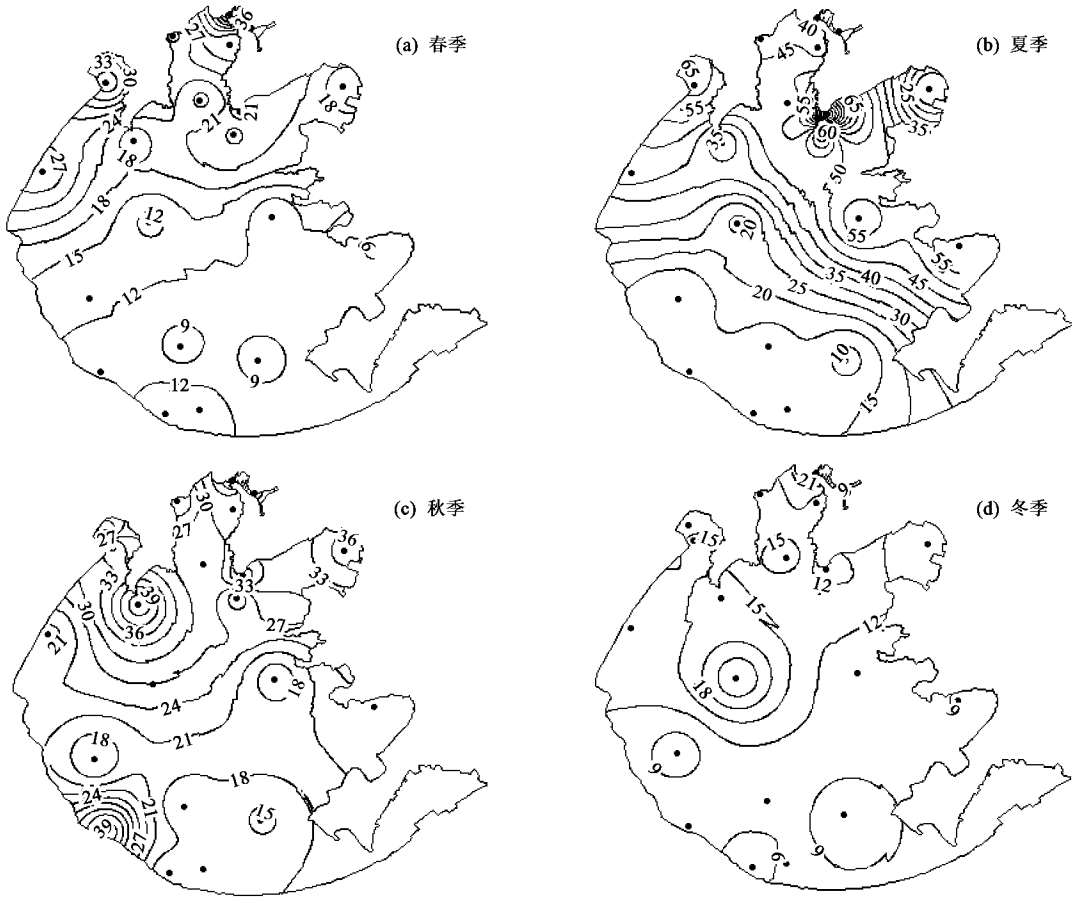


图 4 不同季节 Chl-a 浓度空间分布
Fig.4 Chl-a distribution of different season

从图 4 可以看出,不同季节,Chl-a 浓度具有不同的空间分布和变化特征.春季北部湖区,特别是梅梁湾附近 Chl-a 浓度含量较高,向湖心区逐渐减小,这主要是由于北部湖区,特别是梅梁湾湖区,有众多的入湖河流分布在该湖区,水体富营养化严重导致 Chl-a 浓度含量比湖心区和南部湖区高;等值线在北部湖区密集分布,空间变化较大,而南部湖区 Chl-a 浓度含量相对稳定;夏季较春季而言,Chl-a 浓度明显上升,东南湖区 Chl-a 浓度含量较大,最大值出现在梅梁湾口和贡湖湾口交汇处,空间变化也明显增强,从梅梁湾到湖心区范围内等值线分布都较为密集,13 号点附近湖区空间变化相对较小.出现这种空间分布特征,除了由于春季该湖区 Chl-a 浓度较高,藻类在光照充足和温度较高条件下大量繁殖外,

还与盛行风引起的湖流水动力有关.夏季盛行西南风^[31],由此引起的表面湖流将南部湖区藻类富集到湖心区和北部湖区,从而导致东北部湖区 Chl-a 含量较高,空间变化较大;秋季 Chl-a 浓度空间分布西部湖区 Chl-a 含量高于东部湖区,最大出现在新港口附近,北部湖区的湖湾及湾口附近 Chl-a 含量也相对较高,等值线在西南岸附近和北部湖区分别较为密集,东部湖区 Chl-a 浓度和空间变化都不大;冬季全湖 Chl-a 含量相对较低,最大值出现在 2 号点位置,浓度为 0.038 mg/L,空间变化不大,没有明显的空间分布和变化特征.

从以上分析可以看出,太湖 Chl-a 浓度在 1 a 中具有明显的空间分布规律,即 Chl-a 浓度北部湖区全年都较高,高 Chl-a 浓度湖区随着季节变化从北部湖

区逐渐向南部湖区延伸,秋季达到新港口附近,冬季由于其水温和光照强度都较低,Chl-a浓度普遍不高.夏季空间变化最大,主要在北部湖区和湖心区范围变化,南部湖区变化较小,春、秋季节空间变化相对较小,但是由于夏季的影响,秋季的空间变化比春季大,冬季没有明显的空间变化特征.

2.3 Chl-a浓度反演模型

2.3.1 Chl-a浓度季节分异反演模型

为了分析Chl-a浓度的季节差异对其反演模型

的影响,在对Chl-a浓度反演模型进行研究时,对 4 ~ 10 月份光谱数据分春(4、5 月)、夏(6 ~ 8 月)、秋(9、10 月)3 个季节进行分析(冬季Chl-a浓度较低,对水体光学特性影响较小^[32]).选取晴天少云光照条件较好、测量时间在 10:00 ~ 16:00 的数据,去除由水面气泡、浅水区被船体搅浑、水面完全被藻类覆盖的异常点位数据.最终得到春季(20 个监测点)、夏季(25 个采样点)、秋季(22 个采样点)的水体反射光谱曲线(图 5).

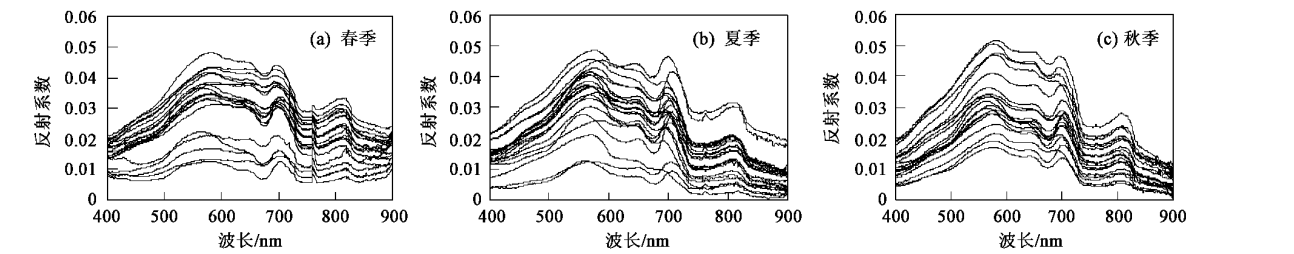


图 5 春、夏、秋季水体反射光谱曲线
Fig.5 Water reflectance spectral curve in spring, summer and autumn

从图 5 可以看出,3 个季节光谱反射曲线都具有典型的内陆二类水体的光谱特征^[16],而不同的季节,水体中藻类组成和Chl-a浓度不同,吸收峰和反射峰将会发生变化,Chl-a浓度变化的敏感波段也随之变化.在敏感波段选取时,本研究先对反射系数进行预处理,即对 450 ~ 760 nm 可见光波段反射系数进行均值归一化处理,再将各季节归一化反射系数和Chl-a浓度进行相关性分析,寻找遥感反射比与Chl-a浓度之间的最大相关波段.分析结果表明,春季和秋季在 520 ~ 600 nm 波段范围内反射率与Chl-a浓度呈正相关,2 个季节最大正相关波长和最大负相关波段相近.春季最大正相关波长为 705 nm,相关系数为 0.81;最大负相关波长为 668 nm,相关系数为 -0.72;秋季最大正相关波长为 703 nm,最大负相关波长为 667 nm,两者的相关系数绝对值均达到 0.81 以上.而夏季最大负相关系数为 -0.73,波长为 674 nm;最大正相关系数仅为 0.64,波长为 722 nm.夏季与春、秋 2 个季节相比,最大正相关系数有所降低,敏感波段出现明显的“红移”现象.这主要是夏季Chl-a含量较高且差异较大引起的.

从经过筛选的 3 个季节遥感反射率数据中分别随机选取一定点用来进行回归模型分析,其中春季选取 14 个点,夏季选取 15 个点,秋季选取 14 个点,剩下的点用来对选用的模型进行验证.

根据上面分析得到的敏感波段分别对 3 个季节

进行反射峰位置法、波段比值法和一阶微分法的不同模型比较,模型的构建均选用一阶线形函数、幂函数、对数函数、指数函数、二次函数.在进行模型分析时,反射峰位置法 3 个季节分别选用 705 nm、722 nm、703 nm 作为自变量;波段比值法 3 个季节的自变量分别为 $R_{705\text{ nm}}/R_{668\text{ nm}}$ 、 $R_{722\text{ nm}}/R_{674\text{ nm}}$ 、 $R_{703\text{ nm}}/R_{667\text{ nm}}$.利用文献[13]中的光谱微分公式对反射系数进行一阶微分处理,得到 3 个季节的微分最大的波长分别为 687 nm、693 nm、691 nm,并将它们的微分值作为一阶微分算法的自变量.模型的拟合与分析均在 SPSS13.0 软件中进行.

利用剩下的点对各季节算法模型进行验证,检验结果表明,不同季节具有不同的适宜模型,其中春季的适应性模型为波段比值算法中的对数模型、夏季应选用波段微分算法中的二次方程模型、秋季则应该选用波段比值算法中的线性模型.其模型表达式如表 1 所示.

表 1 不同季节Chl-a浓度反演模型			
Table 1 Chl-a concentration estimation models for different season			
季节	拟合模型	R^2	F
春季	$y = 0.008 + 0.116 \ln(x)$	0.901	49.462
夏季	$y = 41\,232.286x^2 - 2.979x + 0.015$	0.918	61.578
秋季	$y = 0.087x - 0.073$	0.883	90.775

2.3.2 不同营养状态Chl-a浓度反演模型

对Chl-a浓度进行分湖区反演,其依据是不同湖

区由于水动力条件和营养盐来源的差异,导致其Chl-a浓度具有其湖区分异性,而对于太湖这种典型的大型浅水湖泊,其水动力环境和营养盐来源十分复杂,不同湖区之间的差异没有明显的界限,很难划分出不同湖区,对不同湖区的划分多以营养状态指数作为依据. Chl-a的分湖区反演其实质为对不同营养状态下Chl-a浓度的反演,故本研究参考文献[33]的营养状态划分指标作为标准,将所有采样点的

Chl-a浓度分成4个等级分别进行反演,分析不同营养状态下Chl-a浓度反演模型的差异.

将所有采样点的Chl-a浓度分成中营养、轻度富营养化、中度富营养化和重度富营养化4个等级,得出大部分采样点处于轻度富营养化(21个点)和中度富营养化(22个点),处于中营养化和重度富营养化均为12个点.图6为不同营养状态下的水体光谱曲线.

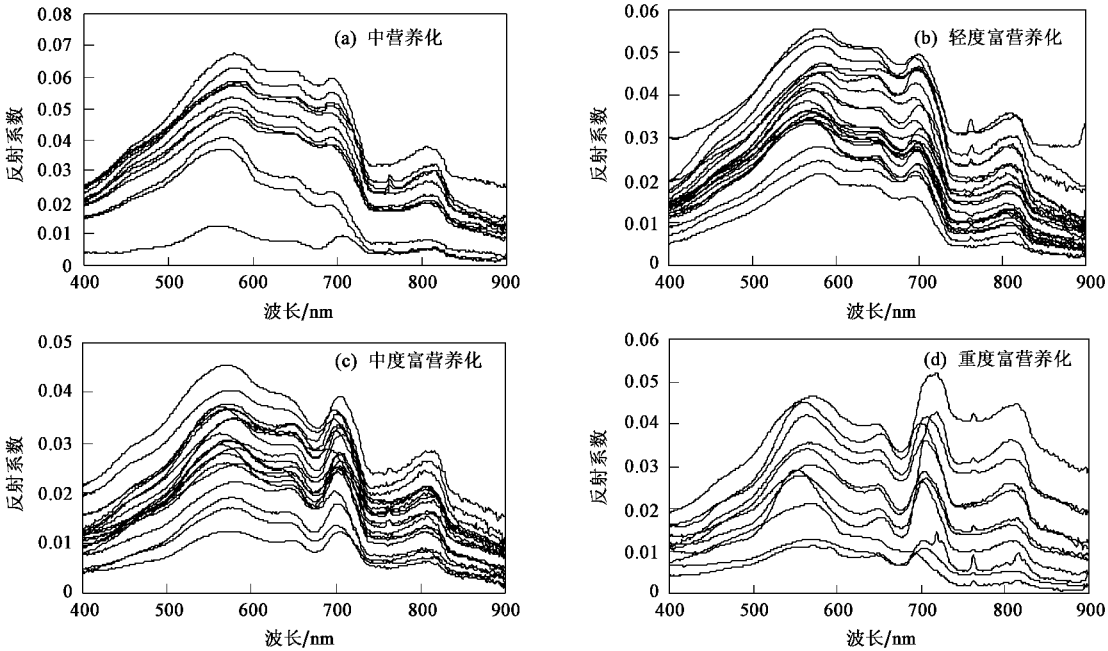


图6 不同营养状态水体光谱曲线

Fig.6 Water reflectance spectral curve of different trophic state

从图6可以看出,不同营养状态下的光谱反射系数曲线具有不同的光谱特征,随着营养状态指数的增加,在550 nm附近的反射峰和700 nm附近的反射峰变得更加明显,反射曲线在700 nm附近的峰值与675 nm附近的谷值差异不断增大,且700 nm附近的反射峰位置具有明显的“红移”现象,这主要是由于Chl-a浓度不断增加引起的.利用前面的分析方法,分析Chl-a浓度与反射率之间的关系,寻找相关性最好的敏感波段,得出4种营养状态下最大正相关敏感波段分别为683、695、699和741 nm,相关系数均在0.9以上,最大负相关敏感波段分别为502、549、508和504 nm,相关性的绝对值均在0.8以上.最大负相关出现在500 nm附近主要是由于其在蓝光波段的强烈吸收引起的.故选用所得敏感波段及比值 $R_{683\text{ nm}}/R_{502\text{ nm}}$ 、 $R_{695\text{ nm}}/R_{549\text{ nm}}$ 、 $R_{699\text{ nm}}/R_{508\text{ nm}}$ 、 $R_{741\text{ nm}}/R_{505\text{ nm}}$ 作为自变量进行反演模型拟合,最终得出4种营养状态下,对数模型的拟合效果均好于其

它模型,其中中营养化和中度营养化状态下单波段算法好于其它算法,轻度富营养化和重度富营养化状态下的波段比值算法要好于其它算法.模型表达式如表2所示.

表2 不同营养状态下Chl-a浓度反演模型				
Table 2 Chl-a concentration estimation models for different trophic state				
营养状态	拟合模型	R^2	F	
中营养化	$y = -0.301 \ln(x) + 1.621\ 2$	0.896	98.047	
轻度富营养化	$y = 0.505 \ln(x) - 0.433\ 2$	0.900	101.574	
中度富营养化	$y = 0.414\ 2 \ln(x) - 0.385\ 2$	0.932	89.377	
重度富营养化	$y = 0.492\ 4 \ln(x) - 1.472\ 9$	0.920	78.461	

3 讨论

从以上分析结果可以看出,Chl-a的时空分布影响了其反演模型,其影响主要表现为敏感波段的变动和算法的差异.春季和秋季Chl-a浓度差异不大,使得2个季节的敏感波段相近,最大正相关波段出现在705 nm附近,最大负相关波段出现在667 nm

附近,且由于空间差异不大使得敏感波段与Chl-a浓度的相关性均较高,而夏季最大正相关波段出现在722 nm,最大负相关波段为674 nm,与春、秋季节相比,有明显的“红移”现象,这主要是由于夏季Chl-a浓度含量较高引起的.夏季由于高浓度的Chl-a,使得其反演算法与春、秋季存在较大差异,从分析结果可以看出,春、秋季节反演算法中波段比值算法的 R^2 均较高,而夏季模型中,微分法模型的 R^2 要明显大于其它模型,该结论与其他的 research 结果相一致. Louheng 等^[34, 35]通过大量的现场数据研究证明690 nm附近反射率的一阶微分值与Chl-a浓度相关系数大,而与浑浊度变化相关系数小,能够较好地反映Chl-a浓度,当Chl-a浓度较高时,反射率微分估算Chl-a浓度效果最佳;Pepe 等^[17]的研究表明,在Chl-a浓度较高的情况下,676 nm波段的一阶微分值与叶绿素浓度具有很好地相关性,相关性在0.89~0.98之间变化.夏季太湖水体光学特性是浮游植物、黄色物质和悬浮物共同作用的结果,光谱一阶微分处理可以去除部分线性或接近线性的背景、噪声光谱对目标光谱的影响,使得一阶微分算法反演效果较好.

对不同营养状态条件下Chl-a浓度反演模型进行研究可以更好地了解Chl-a浓度对其反演模型的影响,为分湖区进行Chl-a遥感监测提供理论依据.在不同营养状态反演模型中,模型的差别主要表现为敏感波段和算法的差异上,在中营养状态和中度富营养化状态下,由于采样点Chl-a浓度变化范围较小,波段特征较为明显,反射峰和吸收峰位置相对较为稳定,使得单波段算法反演要好于其它算法,而轻度富营养化和重度富营养化状态下,Chl-a浓度变化范围较大,反射峰和吸收峰位置有一定波动,单波段算法反演效果相对较差,而波段比值法具有较好的反演效果.在4种不同营养状态条件下,对数模型都能很好地反演出Chl-a的浓度.由于采样点有限,且各季节、各营养状态分布不均匀,对于不同季节、不同营养状态Chl-a浓度反演模型的可靠性和普适性还需要进一步的研究证实,且文中对反演模型的研究是基于半经验模型,要更好地了解Chl-a浓度对水体反射光谱和反演模型的影响,需要对藻类的固有光学特性进行进一步的研究,从机理上理解藻类与光谱反射率的关系,建立基于半分析的反演模型,从而更好地反演Chl-a浓度.

4 结论

(1)Chl-a浓度具有明显的时空分布规律,夏季

Chl-a浓度最高,平均含量为56.29 $\mu\text{g/L}$,冬季最低,平均值为13.61 $\mu\text{g/L}$,秋季Chl-a浓度高于春季,Chl-a浓度平均值分别为26.43 $\mu\text{g/L}$ 、34.78 $\mu\text{g/L}$.在空间分布上,北部湖区Chl-a全年要高于南部湖区.

(2)在时空变化特征上,夏季Chl-a的空间变化最为明显,冬季变化较小,由于夏季的影响,秋季的空间变化要大于春季;全年北部湖区的空间变化较之南部湖区要大,其中秋季西南部湖区也有较大变化.

(3)由于Chl-a浓度和藻类色素组成的差异,导致不同季节、不同营养状态,Chl-a反演算法模型存在一定差异,春、秋季节波段比值法具有很好的反演效果,而夏季波段微分法反演效果要好于其它算法;不同营养状态反演模型差异相对较小,主要表现为敏感波段的波动,在4种营养状态下,对数模型反演效果均好于其它模型.

参考文献:

- [1] Reynolds C S. The ecology of fresh water phytoplankton[M]. London: Cambridge Univ Press, 1984.
- [2] 纪焕红,叶属峰,刘星,等.南麂列岛海洋自然保护区浮游动物丰度和生物量的时空分布[J].海洋通报,2007,26(1):55-60.
- [3] 张运林,秦伯强,陈伟民,等.太湖梅梁湾浮游植物叶绿素a和初级生产力[J].应用生态学报,2004,15(11):2127-2131.
- [4] 周伟华,霍文毅,袁翔城,等.东海赤潮高发区春季叶绿素a和初级生产力的分布特征[J].应用生态学报,2003,14(7):1055-1059.
- [5] 李祚泳,张辉军.我国若干湖泊水库的营养状态指数TSIc及其与各参数的关系[J].环境科学学报,1993,13(4):391-397.
- [6] 李云梅,黄家柱,韦玉春,等.湖泊富营养化状态的地面高光谱遥感评价[J].环境科学,2006,27(9):1770-1775.
- [7] 王明翠,刘雪芹,张建辉.湖泊富营养化评价方法及分级标准[J].中国环境监测,2002,18(5):47-49.
- [8] 秦伯强,宋玉芝,高光.附着生物在浅水富营养化湖泊藻-草型生态系统转化过程中的应用[J].中国科学C辑:生命科学,2006,36(3):283-288.
- [9] 张圣照,王国祥,濮培民.太湖藻型富营养化对水生高等植物的影响及植被的恢复[J].植物资源与环境,1998,7(4):52-57.
- [10] 陈晓玲,李毓湘,李志林.香港海域叶绿素浓度时空变化规律[J].地理学报,2002,57(4):422-428.
- [11] 胡好国,万振文,袁业立.南黄海浮游植物季节性变化的数值模拟与影响因子分析[J].海洋学报,2004,26(6):74-88.
- [12] Eun H N, Seok S P. A hydrodynamic and water quality modeling study of spatial and temporal patterns of phytoplankton growth in a stratified lake with buoyant incoming flow[J]. Ecological Modeling, 2006, 199: 298-314.
- [13] 赵辉,唐丹玲,王素芬.南海西北部夏季叶绿素a浓度的分

- 布特征及其对海洋环境的响应[J]. 热带海洋学报, 2005, **24** (6):31-37.
- [14] 刘瑞民, 王学军, 王翠红, 等. 应用地统计学方法研究湖泊中叶绿素 a 的空间分布[J]. 农业环境保护, 2001, **20**(5): 308-310.
- [15] 张运林, 秦伯强. 基于水体固有光学特性的太湖浮游植物色素的定量反演[J]. 环境科学, 2006, **27**(12):2439-2444.
- [16] 丘仲锋, 席红艳, 何宜军, 等. 东海赤潮高发区半分析算法色素浓度反演[J]. 环境科学, 2006, **27**(8):1516-1521.
- [17] Pepe M, Giardino C, Borsani G, *et al.* Relationship between apparent optical properties and photosynthetic pigments in the sub-alpine Lake Iseo[J]. Science of the Total Environment, 2001, **268**: 31-45.
- [18] 刘堂友, 匡定波, 尹球. 湖泊藻类叶绿素 a 和悬浮物浓度的高光谱定量遥感模型研究[J]. 红外与毫米波学报, 2004, **23** (1):11-15.
- [19] 李云梅, 黄家柱, 韦玉春, 等. 用分析模型方法反演水体叶绿素的浓度[J]. 遥感学报, 2006, **10**(2):169-175.
- [20] Cannizzaro J P, Carder K L. Estimating chlorophyll a concentrations from remote-sensing reflectance in optically shallow waters [J]. Remote Sensing of Environment, 2006, **111**:13-24.
- [21] 陈宇炜, 高锡云, 秦伯强. 西太湖北部夏季藻类种间关系的初步研究[J]. 湖泊科学, 1998, **10**(4):35-40.
- [22] 万蕾, 朱伟, 赵联芳. 氮磷对微囊藻和栅藻生长及竞争的影响[J]. 环境科学, 2007, **28**(6):1230-1235.
- [23] 刘春光, 金相灿, 孙凌, 等. pH 值对淡水藻类生长和种类变化的影响[J]. 农业环境科学学报, 2005, **24**(2):294-298.
- [24] Lamperta L, Queguinerc B, Labasque T, *et al.* Spatial variability of phytoplankton composition and biomass on the eastern continental shelf of the Bay of Biscay (north-east Atlantic Ocean). Evidence for a bloom of *Emiliania huxleyi* (Prymnesiophyceae) in spring 1998[J]. Continental Shelf Research, 2002, **22**:1225-1247.
- [25] Bricauda A, Roesler C S, Parslow J S, *et al.* Bio-optical studies during the JGOFS-equatorial Pacific program: a contribution to the knowledge of the equatorial system[J]. Deep-Sea Research II, 2002, **49**:2583-2599.
- [26] Suzuki K, Kishino M, Sasoka K, *et al.* Chlorophyll-Specific Absorption Coefficients and Pigments of Phytoplankton off Sanriku, Northwestern North Pacific[J]. Journal of Oceanography, 1998, **54**: 517-526.
- [27] Kallio K, Kutserb T, Hannonena T, *et al.* Retrieval of water quality from airborne imaging spectrometry of various lake types in different seasons[J]. Science of the Total Environment, 2001, **268**: 59-77.
- [28] 李军, 刘丛强, 王仕禄, 等. 太湖水体溶解营养盐(N、P、Si)的冬、夏二季变化特征及其与富营养化的关系[J]. 地球与环境, 2005, **33**(1):63-67.
- [29] 陈宇炜, 秦伯强, 高锡云. 太湖梅梁湾藻类及相关环境因子逐步回归统计和蓝藻水华的初步预测[J]. 湖泊科学, 2001, **13**(1):63-71.
- [30] 唐军武, 田国良, 汪小勇, 等. 水体光谱测量与分析 I: 水面以上测量法[J]. 遥感学报, 2004, **8**(1):37-44.
- [31] 秦伯强, 胡维平, 陈伟民, 等. 太湖水环境演化过程与机理[M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- [32] 俞宏, 蔡启铭, 吴敬禄. 太湖水体吸收系数与散射系数的特征研究[J]. 水科学进展, 2003, **14**(1):46-49.
- [33] 王明翠, 刘雪芹, 张建辉. 湖泊富营养化评价方法及分级标准[J]. 中国环境监测, 2002, **18**(5):47-49.
- [34] Luoheng H, Donald C, Rundquist D C. Comparison of NIR/RED ratio and first Derivative of reflectance in estimating algal-chlorophyll concentration: a case study in a turbid reservoir[J]. Remote Sensing Environment, 1997, **62**:253-261.
- [35] Rundquist D C, Han L, Schalles J F, *et al.* Remote measurement of algal chlorophyll in surface waters: the case for the first derivative of reflectance near 690nm[J]. Photogramm, Eng Remote Sens, 1996, **62**:195-200.