

## 基于 MERIS 数据的滇池叶绿素浓度时空变化(2003 – 2009 年)及趋势\*

朱晶晶<sup>1</sup>, 陈 晋<sup>1\*\*</sup>, 王胜强<sup>1</sup>, 杨 伟<sup>1,2</sup>, 松下文经<sup>2</sup>

(1: 地表过程与资源生态国家重点实验室, 北京师范大学, 北京 100875)

(2: 日本筑波大学地球科学系, 筑波 305 – 8572, 日本)

**摘 要:** 基于多时相 MERIS 数据, 本文对滇池叶绿素 a 浓度的时空变化趋势进行了研究. 以野外实测数据为基础, 对应用较好的三种叶绿素 a 浓度反演模型进行了验证比较, 通过精度评价和误差分析选择最优的三波段模型; 将其应用到经过几何纠正和大气纠正等预处理后的 MERIS 数据系列, 得到 2003 – 2009 年时间序列下的 57 幅滇池叶绿素 a 浓度分布图. 分析结果表明, 在 2003 – 2009 年间, 滇池叶绿素 a 浓度总体呈周期性波动缓慢上升趋势, 每年 2 – 3 月浓度最低, 4 – 11 月较快上升到峰值, 12 – 1 月开始回落; 空间分布上, 叶绿素 a 浓度高值区多出现在滇池北部、岸边带等靠近城镇的人口聚集区域, 且浓度越高的季节, 空间分布差异越显著.

**关键词:** 叶绿素 a; 时空变化; 滇池; MERIS 数据; 三波段模型

## Spatial-temporal variation of chlorophyll-a concentration in Lake Dianchi from 2003 to 2009 and trend analysis based on MERIS data

ZHU Jingjing<sup>1</sup>, CHEN Jin<sup>1</sup>, WANG Shengqiang<sup>1</sup>, YANG Wei<sup>1,2</sup> & MATSUSHITA Bunkei<sup>2</sup>

(1: *State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, Beijing Normal University, Beijing 100875, P. R. China*)

(2: *Department of Geography, Tsukuba University, Tsukuba 305-8572, Japan*)

**Abstract:** Spatial-temporal variation trends of Chlorophyll-a concentration in Lake Dianchi were analyzed based on MERIS data. First, three popular retrieval algorithms of Chlorophyll-a concentration were calibrated by field measurements. It was found that three-band model was the best one with higher estimation accuracy. Then, the optimized three-band model was applied to 57 MERIS images from 2003 to 2009 which were pre-processed through geometric correction, atmospheric correction, etc. At last, a series of maps about Chlorophyll-a concentration distribution of Lake Dianchi were produced. The result showed that Chlorophyll-a concentration was rising slowly with a periodic fluctuation in Lake Dianchi. During a year, Chlorophyll-a concentration showed a decreasing-increasing-decreasing pattern, where the minimum appeared in February and March, and the maximum occurred within September and November. Regarding to spatial distribution, Chlorophyll-a concentration was higher at the edge and the north of Lake Dianchi, which are close to the Kunming city and small towns. In addition, the higher Chlorophyll-a concentration was, the more obvious the spatial variation was.

**Keywords:** Chlorophyll-a; spatial-temporal variation; Lake Dianchi; MERIS data; three-band model

近年来随着各种污染物质的排放, 内陆湖泊水体富营养化现象日益严重, 直接影响到当地人民的生产和生活<sup>[1]</sup>. 富营养化水体的典型表现是藻类物质的大量繁殖, 而叶绿素 a 作为藻类的重要组成部分, 其浓度常被作为表征水体富营养化程度的重要指标. 传统水质监测通过采集水样、过滤、萃取以及分光光度计分析来测定叶绿素 a 浓度, 虽然技术成熟、相对精度较高, 但人力、物力消耗大, 难以实现大区域的实时监测<sup>[2]</sup>. 遥感技术作为一种区域性的调查手段, 具有监测范围广、频率高、成本低的优势, 为实时的大范围水质动态

\* 国家自然科学基金项目(40871162)资助. 2010 – 09 – 17 收稿; 2010 – 12 – 06 收修改稿. 朱晶晶, 女, 1986 年生, 硕士研究生; E-mail: jingjingzhu.3@gmail.com.

\*\* 通讯作者; E-mail: chenjin@ires.cn.

监测提供了有力工具<sup>[3-4]</sup>.

遥感手段监测水质一般通过建立水体反射光谱与叶绿素 a 浓度之间的关系模型,从而反演叶绿素 a 浓度.就 II 类水体而言,水体反射光谱除与叶绿素 a 浓度相关外,还受到水中其他组分如黄质、非浮游藻类悬浮物等的影响,使得叶绿素 a 浓度的反演精度相比 I 类水体(海洋等)具有更大的不确定性<sup>[5]</sup>.许多学者对此作了大量研究,建立了各种模型来提高反演精度,如 Neville 和 Gower 提出的叶绿素荧光高度法模型<sup>[6]</sup>、形式简单的两波段模型<sup>[7]</sup>、Gitelson 等提出的三波段模型<sup>[8]</sup>等,但这些算法往往具有一定的区域依存性,其参数需要根据研究水域的区域特征进行修正.遥感手段监测水质的另一个问题是现有传感器的时空分辨率难以满足实际工作的要求,如: LandsatTM/ETM 等数据空间分辨率较高(30m),但时间分辨率偏低(16d);而 MODIS 虽然可以每日获得数据,但其空间分辨率(250-1000m)又不能精细地刻画水质的空间差异.为此,欧共体专门设计了面向水色遥感的传感器 MERIS(Medium Resolution Imaging Spectrometer,搭载于环境遥感卫星 ENVISAT 上),使其同时具有较高的重访周期(3d)和空间分辨率(300m),极大地提高了 II 类水体水质时空动态监测的能力<sup>[9]</sup>.但遗憾的是, MERIS 数据在我国内陆湖泊的应用仍十分缺乏.

滇池作为云南省昆明市的重要水资源之一,近年来富营养化程度日趋严重.受数据和经费条件的限制,其叶绿素 a 浓度的时空动态规律和发展趋势的掌握仍存在较大不确定性,直接影响到各种环境治理措施和政策的实施.因此,本文试图通过野外实测数据构建一种适合滇池区域精度较高的叶绿素 a 反演模型,在此基础上,利用多时相 MERIS 数据实现滇池多年多季相叶绿素 a 浓度分布制图,并分析叶绿素 a 浓度的时空变化规律和发展趋势.

## 1 研究区域与数据

滇池(24°50'N, 102°41'E)位于云南省昆明市南端,面积约 300km<sup>2</sup>,平均水深为 4.3m,最深处为 11.3m.近年来,该湖 4-11 月均出现全湖性蓝藻水华暴发,富营养化非常严重<sup>[10]</sup>.

为获取实地水体反射率光谱和叶绿素 a 浓度数据,我们在 2007 年 10 月 23 日、2009 年 3 月 12 日和 2009 年 8 月 1-7 日对滇池进行了三次野外观测,采样点数目分别是 3、3、47 个,共计 53 个.观测项目包括水体光谱(光谱仪采集)和叶绿素 a 浓度(水样实验室内测定).同时收集了 2003-2009 年间所有覆盖滇池且基本无云的 MERIS1B 影像(共 57 幅).其中对应于实地采样日期有两幅影像,分别是 2007 年 10 月 24 日(轨道 29531)和 2009 年 3 月 13 日(轨道 36774),但影像获取时间均晚一天.整体而言,受夏季云覆盖影响,5-8 月影像数据较少,而秋冬季数据(11-4 月)较完备,其中 2007 年数据最全.

## 2 数据预处理

### 2.1 实测数据预处理

水体光谱采集时间为当地时间 10:00-14:00 点,使用美国 ASD FieldSpec 手持式光谱仪,采样间隔 1nm,波谱范围 325-1075nm.测量参数包括波长为  $\lambda$  时的离水辐亮度  $L_u(\lambda)$ 、总的下行辐照度  $E_d(\lambda)$ 、天空光漫射辐亮度  $L_{sky}(\lambda)$ .恰好处于水面以上的离水遥感反射率  $R_{rs}(\lambda)$ (sr<sup>-1</sup>),按照下式计算<sup>[11-12]</sup>:

$$R_{rs}(\lambda) = \left( \frac{L_u(\lambda)}{E_d(\lambda)} - \frac{F(\theta) \cdot L_{sky}(\lambda)}{E_d(\lambda)} \right) \times Cal(\lambda) \times 100 \quad (1)$$

式中,  $Cal(\lambda)$  是波长为  $\lambda$  时的标准白板的反射比;  $F(\theta)$  是太阳天顶角为  $\theta$  时的天空漫射光反射比,可通过气-水界面的菲涅尔反射系数公式计算得到<sup>[13]</sup>.计算结果如图 1 所示.为方便与 MERIS 数据对比,需将离水遥感反射率  $R_{rs}(\lambda)$  转换为水体反射率  $R(\lambda)$ ,可根据水面 BRDF 特征对  $R_{rs}(\lambda)$  进行半球空间积分得到<sup>[13]</sup>.

叶绿素 a 浓度在实验室内用分光光度计方法测量<sup>[14]</sup>.首先用 100% 甲醇萃取叶绿素 a(置于 4℃ 黑暗环境下 24h);将萃取后的叶绿素 a 置于 UV-1700 分光光度计上测量 750、663、645、630nm 的吸光度,则叶绿素 a 浓度 [Chl. a]( $\mu\text{g/L}$ ) 可通过下式计算得到:

$$[Chl. a] = \frac{V_{\text{甲醇}} \times [11.64 \times (OD_{663} - OD_{750}) - 2.16 \times (OD_{654} - OD_{750}) + 0.1 \times (OD_{630} - OD_{750})]}{V_{\text{水样}} / 1000} \quad (2)$$

式中,  $V_{\text{甲醇}}$  是萃取叶绿素 a 的甲醇体积(ml);  $OD_{\lambda}$  是 UV 测得的波长为  $\lambda$  (nm) 时的吸光度;  $V_{\text{水样}}$  是水样体积 (ml). 滇池 53 个样点的叶绿素 a 浓度统计结果是: 平均值  $80.72 \mu\text{g/L}$ , 最小值  $22.98 \mu\text{g/L}$ , 最大值  $318.60 \mu\text{g/L}$ , 标准偏差  $46.34 \mu\text{g/L}$ , 变异系数约为  $57.41\%$ .

## 2.2 MERIS 数据预处理

MERIS 传感器 1B 产品包含几何纠正后的大气层顶幅亮度和辅助数据(经纬度, 太阳天顶角、方位角, 观测天顶角、方位角, DEM 高程, 风速, 臭氧浓度, 相对湿度等)<sup>[9]</sup>. 首先, 利用 MERIS 数据处理软件 BEAM 将大气层顶幅亮度转换为大气顶层反射率, 并进行投影转换; 然后, 选择一幅影像作为基准, 对其他影像进行 Image to Image 的几何配准.

一般而言, 水色遥感器接收到的总辐射中反映水体生物光学特征的信号仅占  $5\% - 15\%$ , 必须通过大气纠正得到较准确的水体反射率影像<sup>[15]</sup>. 我们采用暗水体法对滇池进行大气纠正, 该方法由 Wang 和 Gordon 于 1994 年提出, 主要针对 I 类水体<sup>[16]</sup>. 它假设近红外波段 ( $>700\text{nm}$ ) 水体辐亮度近似为 0, 卫星所接收到该波段范围的辐射全部来自大气效应; 由此可推算出当地的大气参数和气溶胶纠正因子, 进而对可见光波段的辐射值进行校正. 滇池作为 II 类水体, 该假设无法成立; 但滇池附近的抚仙湖为清洁的 I 类水体, 其大气参数可通过上述方法求得. 因而在假设大气状况在一定区域内稳定的前提下, 先按照暗水体法求得抚仙湖的气溶胶纠正因子, 并外推至滇池区域, 从而实现对滇池的大气纠正. 暗水体法基本原理如下:

到达卫星传感器的总辐射能量, 即波长为  $\lambda$  的大气层顶辐射值  $L_t(\lambda)$  可描述为:

$$L_t(\lambda) = L_r(\lambda) + L_a(\lambda) + L_{ra}(\lambda) + tL_w(\lambda) + L_g(\lambda) + L_b(\lambda) \quad (3)$$

其中,  $L_r(\lambda)$  为大气瑞利散射,  $L_a(\lambda)$  为气溶胶散射,  $L_{ra}(\lambda)$  为气溶胶与大气分子之间的多次散射,  $L_g(\lambda)$  为直射太阳光的镜面反射,  $L_b(\lambda)$  为来自水体底部的反射,  $L_w(\lambda)$  为来自水体的辐射,  $t$  为水面到卫星传感器之间的大气衰减系数. 由于传感器在设计时一般都会避开镜面反射角度, 因此  $L_g(\lambda)$  项可以忽略; 滇池的水深状况可保证可见光不会到达水体底部, 则  $L_b(\lambda)$  项可以忽略; 若只考虑气溶胶的多次散射效应, 则可将  $L_a(\lambda)$  和  $L_{ra}(\lambda)$  合写成  $L_{as}(\lambda)$ . 因而(3)式可简化为:

$$L_t(\lambda) = L_r(\lambda) + L_{as}(\lambda) + tL_w(\lambda) \quad (4)$$

将幅亮度  $L$  转换成反射率  $\rho$  后, 上式转变为:

$$\rho_t(\lambda) = \rho_r(\lambda) + \rho_{as}(\lambda) + t\rho_w(\lambda) \quad (5)$$

式中, 瑞利散射反射率  $\rho_r(\lambda)$  和大气衰减系数  $t$  可参照文献的方法计算得到<sup>[17-18]</sup>; 气溶胶反射率的计算步骤进行, 首先引进波长  $\lambda_i, \lambda_j$  的气溶胶纠正因子  $\varepsilon(\lambda_i, \lambda_j)$ :

$$\varepsilon(\lambda_i, \lambda_j) = \frac{\rho_{as}(\lambda_i)}{\rho_{as}(\lambda_j)} = \frac{\omega_a(\lambda_i)\tau_a(\lambda_i)p_a(\theta, \theta_0, \lambda_i)}{\omega_a(\lambda_j)\tau_a(\lambda_j)p_a(\theta, \theta_0, \lambda_j)} \quad (6)$$

式中,  $\omega_a$  是气溶胶单次散射反照度,  $\tau_a$  是气溶胶光学厚度,  $p_a$  是气溶胶散射相函数,  $i, j$  表示波长  $\lambda$  的波段序号,  $\theta_0, \theta$  分别是太阳、卫星天顶角. 一般情况下, 气溶胶散射相函数与波长无关, 气溶胶单次散射反照度是波长的弱函数, 而气溶胶光学厚度随波长而变<sup>[19]</sup>:

$$\tau_a(\lambda) = \alpha\lambda^{-\beta} \quad (7)$$

式中,  $\alpha$  为混浊度因子;  $\beta$  是埃斯屈朗指数. 由此(6)式可简化为:

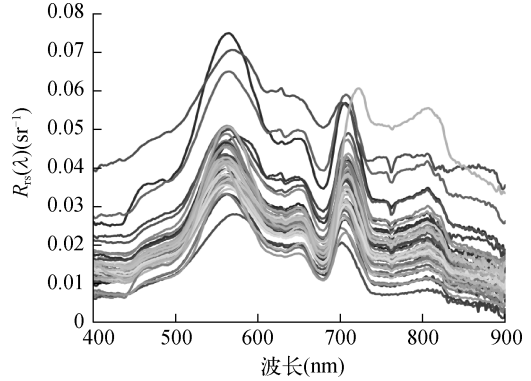


图 1 实测水体遥感反射率光谱

Fig. 1 Measurements of remote-sensing reflectance just above the water surface

$$\varepsilon(\lambda_i, \lambda_j) = \left( \frac{\lambda_j}{\lambda_i} \right)^n \quad (8)$$

式中,  $n$  为待定常数, 表示气溶胶散射对波长的依赖性, 可通过实际数据计算得到。

实际操作中, 针对抚仙湖这一清洁水体, 在假设近红外波段水体辐亮度近似为 0 的前提下, 选择 MERIS 12、13 波段 (778.75、865nm), 利用式 (5)、(8) 计算这两个波段下的气溶胶纠正因子  $\varepsilon(778.75, 865)$ , 进而求得待定常数  $n$ . 然后以较长的 13 波段作为参考, 计算出波长为  $\lambda$  时的气溶胶纠正因子  $\varepsilon(\lambda, 865)$ , 并将  $\varepsilon(\lambda, 865)$  外推应用到滇池水域, 依照式 (6) 计算出滇池的气溶胶反射率. 然后利用式 (5) 从卫星信号中分离出滇池的水体反射率。

2007 年 10 月 24 日和 2009 年 3 月 13 日滇池实测光谱数据中有 6 个样点的采样时间与 MERIS 卫星过境时刻基本一致 (日期相隔一天). 对所对应的 MERIS 数据进行大气纠正得到水体反射率, 并与实测光谱相比较 (图 2). 大气纠正后的水体反射率光谱在形状和数值上均与实测值很接近, 各样点的平均相对误差 (MRE) 均小于 30%, 6 个样点的总体 MRE 为 19.67%, 在可以接受的精度范围内。

### 3 叶绿素 a 浓度反演模型建立与验证

#### 3.1 模型构建

叶绿素 a 浓度的反演模型通过实测光谱数据和叶绿素 a 浓度建立回归关系实现. 首先将实测光谱采样到 MERIS 波段; 然后选择三种常用且精度较高的叶绿素 a 浓度反演模型 (叶绿素荧光高度法模型、两波段模型和三波段模型), 分别建立其模型指数与叶绿素 a 浓度的回归关系, 选择精度较高的模型作为本研究区叶绿素 a 浓度的反演模型. 现地采样点共计 53 个, 随机选取 27 个用于模型构建, 剩余 26 个进行模型验证. 本文所用 3 种模型的一般表达式如下:

(1) 荧光高度法模型:  $Index_1 = FLH(\lambda_2)_{\lambda_1-\lambda_3}$ , 其中  $\lambda_2$  是荧光峰位置,  $\lambda_1$ 、 $\lambda_3$  是其两边肩部位置, 三者分别对应 MERIS 的 9、8、10 波段 (708.75、681.25、753.75nm).

(2) 两波段模型:  $Index_2 = R(\lambda_1)/R(\lambda_2)$ , 其中  $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$  对应 MERIS 的 9、7 波段 (708.75、665nm).

(3) 三波段模型:  $Index_3 = [R^{-1}(\lambda_1) - R^{-1}(\lambda_2)] \times R(\lambda_3)$ , 其中  $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$ 、 $\lambda_3$  对应 MERIS 的 7、9、10 波段 (665、708.75、753.75nm).

3 种模型的回归关系式、决定系数  $R^2$  和均方根误差 (RMSE) 见表 1. 三波段模型精度相对于其他两个模型更高, 因此将其选作滇池叶绿素 a 浓度的反演模型, 以 [Chl. a] 表示叶绿素 a 浓度 ( $\mu\text{g/L}$ ),  $R(\lambda)$  表示波长为  $\lambda$  时的水体反射率, 则该模型可表示为:

$$[Chl. a] = 187.82[R^{-1}(665) - R^{-1}(708.75)]R(753.75) + 18.34 \quad (9)$$

该模型的  $R^2$  为 0.86, RMSE 为 10.73  $\mu\text{g/L}$ ,  $n$  为 53.

表 1 荧光高度法、两波段和三波段模型在滇池区域的比较\*

Tab. 1 Comparison of FLH, Two-band and Three-band model in Lake Dianchi

模型	回归关系式	$R^2$	RMSE ( $\mu\text{g/L}$ )
FLH	$y = 5419x - 79.13$	0.50	22.54
两波段模型	$y = 103.91x - 88.65$	0.77	13.42
三波段模型	$y = 187.82x + 18.34$	0.86	10.73

\*  $x$  为 FLH、两波段或三波段指数;  $y$  为叶绿素 a 浓度。

#### 3.2 模型验证

利用滇池 26 个验证样点的实测数据对滇池三波段模型 (式 9) 进行检验, 结果表明总体 RMSE 为 13.86  $\mu\text{g/L}$  (图 3a), 但在叶绿素 a 浓度高值区, 模型有低估的趋势. 此外, 我们也利用 MERIS 遥感数据对模型进行了验证, 以保证模型在遥感数据上应用的有效性. 图 4 对比了 2007 年 10 月 24 日和 2009 年 3 月 13 日 6 个样点的叶绿素 a 浓度实测数据和 MERIS 数据反演结果, 反演结果与实测浓度基本趋势一致, 总体

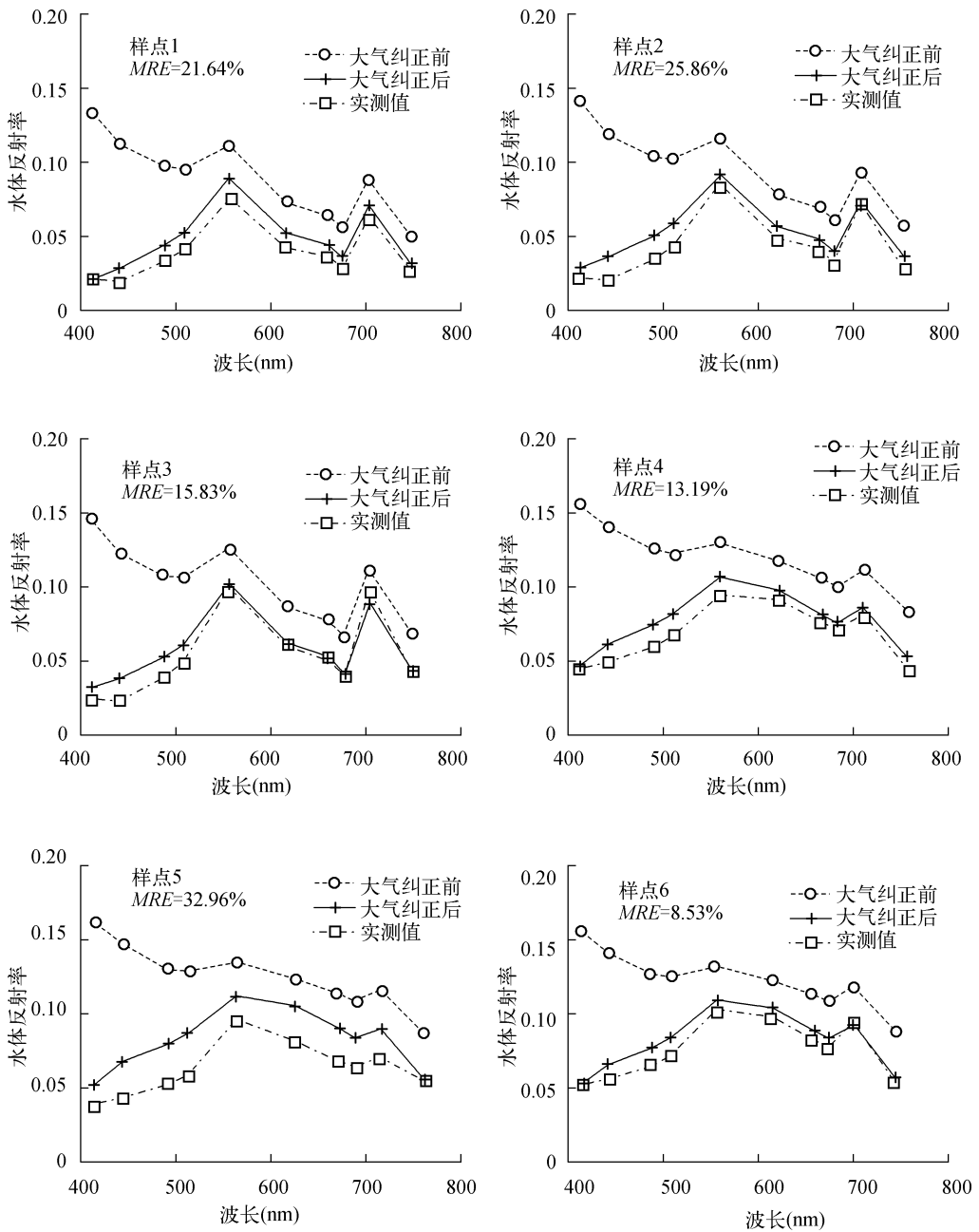


图 2 实测光谱与大气纠正前后的光谱比较

Fig. 2 Comparison between measured and atmospheric-corrected water reflectance

RMSE 为 14.01 $\mu\text{g/L}$ , 略大于直接使用实测光谱数据的误差(图 3b), 但与滇池叶绿素 a 浓度范围 20 - 320 $\mu\text{g/L}$  相比, 模型精度在可以接受的范围内。

#### 4 结果分析

将所建立的叶绿素 a 反演三波段模型(公式 9)应用到滇池 MERIS 系列数据上, 计算得到 2003 - 2009 年

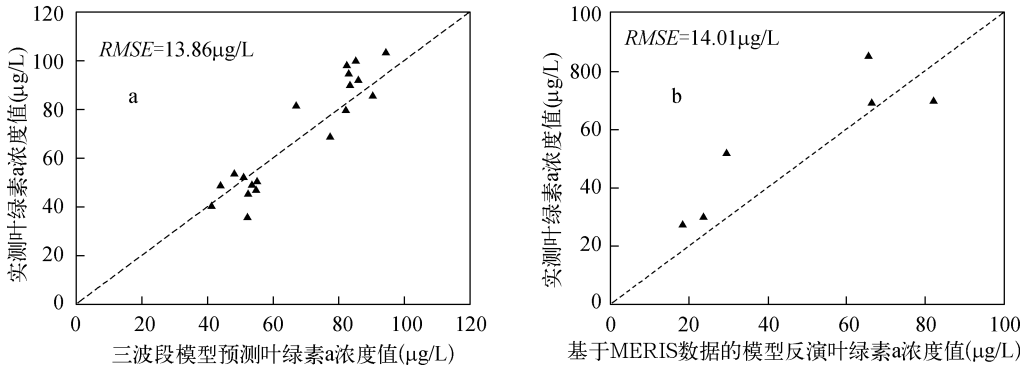


图3 实测叶绿素 a 浓度与三波段模型预测值(a)和基于 MERIS 数据的模型反演值(b)比较

Fig. 3 Relationship between measured and estimated Chlorophyll-a concentration by three-band model with in-situ spectra(a) and by three-band model with MERIS data(b)

57 幅滇池叶绿素 a 浓度分布图。具体流程为:1) 对 MERIS 图像进行几何纠正、大气纠正等预处理;2) 根据每一个像元的水体反射率计算三波段指数,代入公式(9)计算得到叶绿素 a 浓度。

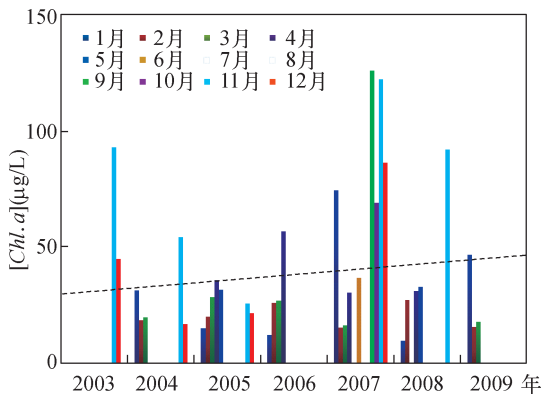


图4 2003 - 2009 年间滇池叶绿素 a 浓度变化

Fig. 4 Variation of chlorophyll-a concentration from 2003 to 2009 in Lake Dianchi

这是导致叶绿素 a 浓度呈现上升趋势的根本原因。而年际波动则主要受水温及湖水量变化的影响,一般而言,水温较高有利于藻类生长繁殖,而降水导致的湖水量增加则可以稀释营养物质及藻类浓度。中国气象局提供的数据表明:滇池流域年平均气温分别约 16.50℃(2003 年)、15.67℃(2004 年)、16.68℃(2005 年)、16.38℃(2006 年)、15.64℃(2007 年)、15.42℃(2008 年)和 16.57℃(2009 年),年降水量分别为 833mm(2003 年)、1094mm(2004 年)、976mm(2005 年)、993mm(2006 年)、933mm(2007 年)、978mm(2008 年)和 566mm(2009 年)。可以看出,2003 - 2009 年间气温与降水量的匹配模式存在一定的差异,高温少雨年(如 2003、2009 年)一般对应于叶绿素 a 浓度高值年,而低温多雨年(如 2004 年)一般对应于叶绿素 a 浓度低值年。但这里 2007 年异常高值和 2005 年相对低值却不能很好地从气象要素的变化角度解释。2005 年的低值估计与该年度昆明市实施了入湖河流截污整治、湖滨带生态恢复等多项工程有关,而 2007 年异常高值可能与该年度污染事故等原因导致入湖氮、磷量猛增有关。由于缺乏具体监测数据,上述推论仍需进一步考证。

2007 年作为高值年且数据较完备,故进一步分析了其年内变化规律。滇池叶绿素 a 浓度在一年内呈现“降-升-降”的季节变化模式(图 6)。其中,2、3 月叶绿素 a 浓度最低,全湖平均值约为 15 μg/L;4 - 6 月开始缓慢上升,达到 40 μg/L 左右;9 - 11 月达到较高值,约为 103 μg/L;12 月开始下降,至 2 月降至最低浓度。这

#### 4.1 滇池叶绿素 a 浓度的时间变化趋势

2003 - 2009 年滇池全湖叶绿素 a 浓度平均值变化范围约为 10 - 130 μg/L,其中,2003、2007、2009 年为相对高值年,2004、2005 年为相对低值年(图 4)。不同年份同一月份叶绿素 a 浓度的变化情况见图 5,受数据时间覆盖的限制,这里只分析 11 - 4 月。总体而言,浓度越高,年际差异越显著,较高浓度月份(11、12、1 月)呈现周期性波动中上升趋势。已有研究表明,藻类生长状况是湖泊营养条件、温度、光照、风及风浪等因素综合作用的结果<sup>[20-24]</sup>。下面我们主要从营养条件和气象因素角度分析滇池叶绿素 a 年际变化的原因。

昆明市环境监测中心的监测数据表明<sup>[20]</sup>,近二十年来,滇池的总氮、铵氮和总磷年均浓度呈波动式上升趋势,而氮、磷是藻类生长的重要营养物质,

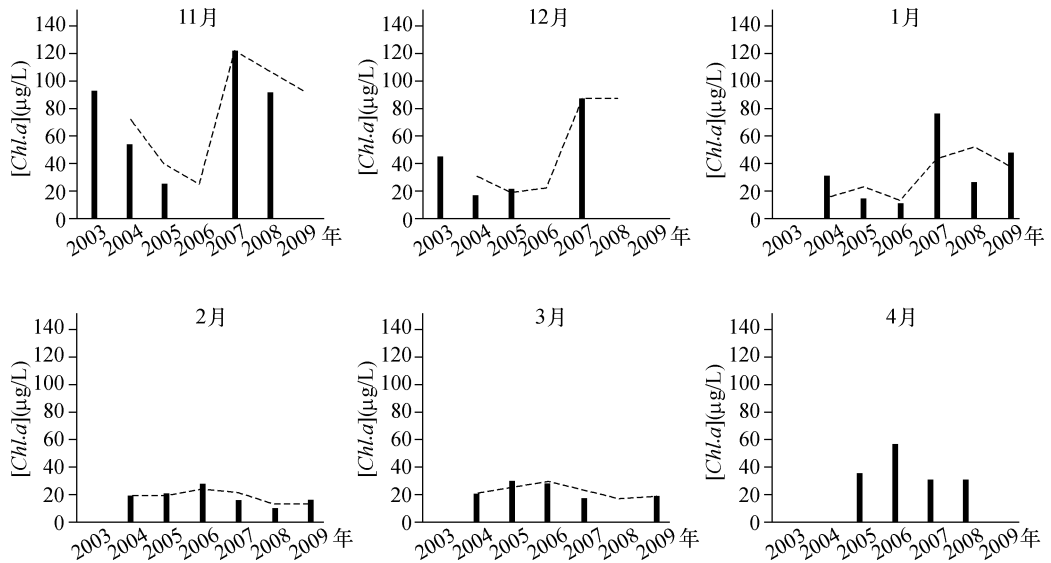


图 5 2003 - 2009 年间滇池叶绿素 a 浓度不同月份变化

Fig. 5 Variation of chlorophyll-a concentration by the month from 2003 to 2009 in Lake Dianchi

与观测到的 4 - 11 月份间滇池处于藻类暴发期的事实基本一致<sup>[10]</sup>。

上述季节变化模式与滇池气候特点密切相关。滇池地处亚热带高原,属冬暖夏凉性季风气候,气温年较差小。低温期出现在 12 - 2 月,月平均气温小于 10℃;高温期出现在 5 - 9 月,月平均气温约为 20℃。但降水量年内分布不均,6 - 8 月雨季集中了全年 60% 以上的降雨,而冬、春季降水较少。这种温度与降水量的匹配模式决定了叶绿素 a 浓度的年内变化规律。高温少雨月份(9 - 11 月)不仅温度适宜藻类生长繁殖,而且湖水量较少也有助于提高叶绿素 a 浓度;而对于低温少雨月份(12 - 3 月),低温则作为主要限制因子抑制了藻类生长繁殖。夏季月份(6 - 8 月)虽然温度适宜藻类生长繁殖,但降水导致的湖水量增加却稀释了叶绿素 a 浓度。总体而言,滇池叶绿素 a 浓度季节变化受温度的影响更为显著。此外,各月叶绿素 a 浓度也与前期月份藻类生长累积有一定关系,导致叶绿素 a 浓度变化具有渐变和时间后延的特点。

#### 4.2 滇池叶绿素 a 浓度的空间变化趋势

滇池 2007 年除 5、7、8 月外所有月份叶绿素 a 浓度的空间分布情况说明其具有明显的空间分异和季节变化特点(图 7)。2 - 3 月,滇池处于全年水温最低的时期,藻类生长不活跃,全湖除最北端的草海外大部分区域的叶绿素 a 浓度值均低于 50 µg/L(深蓝色、蓝色表示),空间差异不显著。4 月开始,伴随春季气温回升,藻类的生长开始活跃,全湖叶绿素 a 浓度逐渐升高,高值区由草海沿北部近岸水域逐渐向中部扩大。6 月全湖叶绿素 a 浓度有所降低,这可能与降水带来的湖水量增加稀释了叶绿素 a 浓度有关。9 - 12 月全湖整体浓度可超过 100 µg/L,且呈现由北向南、由西向东递减的趋势,中部、南部的个别区域也出现点状高浓度区。我们进一步分析其他年份叶绿素 a 浓度的空间分布特点,所得到的规律与 2007 年基本相似,不同年份仅存在浓度高低差异。

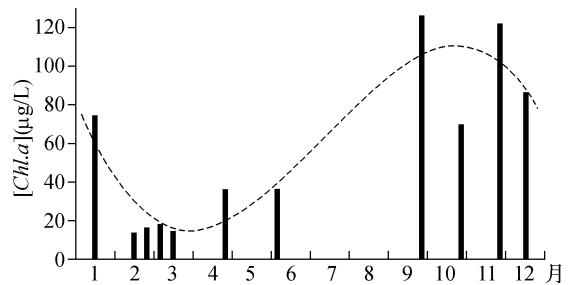


图 6 2007 年滇池叶绿素 a 浓度变化

Fig. 6 Variation of chlorophyll-a concentration in 2007, Lake Dianchi

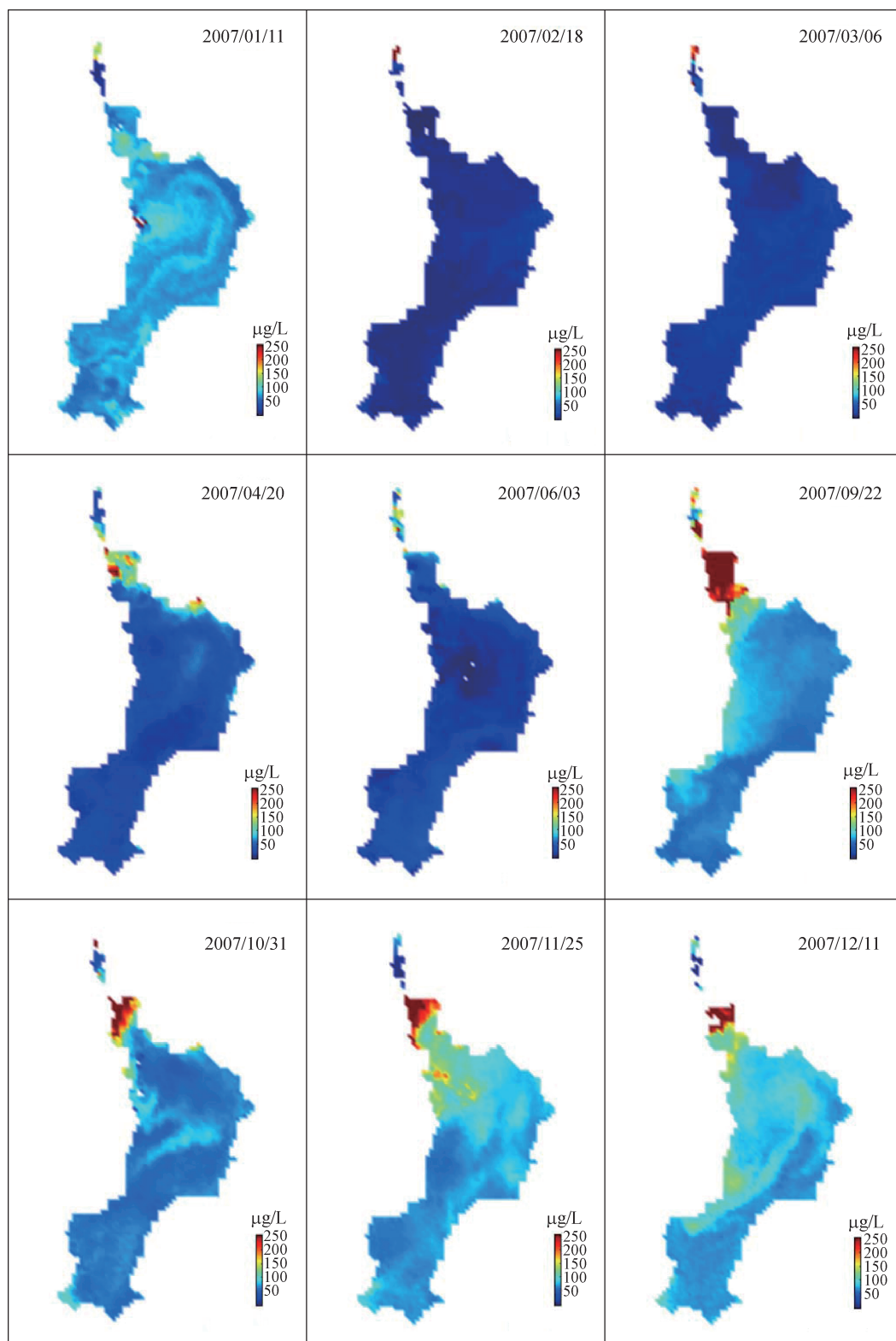


图 7 2007 年滇池叶绿素 a 浓度空间分布

Fig. 7 Spatial distribution of chlorophyll-a concentration in 2007, Lake Dianchi



上述空间分布特点与滇池周边污染源分布密切相关,北部的草海由于靠近昆明市,接受了大量的生活和工农业污水,氮、磷等营养物质含量和水温均偏高,且草海与南部的滇池外海区域连接的河口较小,水量交流缓慢,污染的净化过程迟缓<sup>[10,24]</sup>,导致其一直是全湖氮、磷浓度最高的区域。而北部近岸带(如海埂等)由于靠近昆明市,附近聚集着大量的旅游度假中心及村镇,是污染物排放的重要地点,氮、磷等营养物质含量也较高,一旦温度回升就会导致藻类大量繁殖<sup>[10,24]</sup>。西岸海口和南端的昆阳水域由于附近化工厂的排放浓度较高,也出现点状分布的高值区。其他浓度较高的地点,则是由于季风作用导致藻类聚集形成的。理论上来说,一定强度的风浪可抑制藻类的堆积,但微风则相反。滇池流域虽处于多风地带,但大风期多集中于冬春季,主导风向为西南风,9-12 月风速较小,有利于藻类聚集于水体表层,并向西南部漂移,因而在湖滨地带以及风力较小的湾内易成为叶绿素 a 浓度的较高值点<sup>[24]</sup>。

## 5 结论

本文基于野外实测数据构建了滇池叶绿素 a 浓度反演的三波段模型,并用实测数据和 MERIS 卫星数据进行了模型验证;利用该模型和预处理后的 MERIS 水体反射率数据,对 2003-2009 年滇池叶绿素 a 浓度分布进行了制图分析,得到如下结论:

(1) 2003-2009 年滇池全湖叶绿素 a 浓度呈周期性波动上升趋势,具有明显的年际变化和季节变化特点。每年 2、3 月浓度最低,全湖平均值约为  $15\mu\text{g/L}$ ,且不同年份变化不大;4-6 月浓度开始上升,达到  $40\mu\text{g/L}$  左右;而 9-11 月浓度则达到最高值(超过  $60\mu\text{g/L}$ ),最高值月份年际差异明显;12 月浓度开始下降,但依然处于较高水平,直至 2 月才降至较低浓度。

(2) 滇池叶绿素 a 浓度空间分布亦具有明显季节变化特征。2-3 月,全湖大部分区域的叶绿素 a 浓度值较低,只有最北端的草海水域浓度较高。4-6 月开始升高,且高值区由草海沿北部近岸水域逐渐向中部扩大。9-12 月,全湖整体浓度较高,呈现由北向南、由东向西递减的趋势,中部、南部的个别区域也出现点状高浓度区。

(3) 滇池叶绿素 a 浓度的时空变化是湖泊营养条件、温度、降水、风及藻类种类等因素共同作用的结果。年际和年内波动主要受温度、降水等气象因素控制;空间分布差异则主要受氮、磷等营养物质排放源的分布以及风速、风向的影响。

本文尚有如下不足:首先, MERIS 数据时间覆盖范围不够,多集中于秋冬春季节,导致夏季规律分析受到限制;其次,三波段模型估测叶绿素 a 浓度时存在低估情形。因此,提高三波段模型的估算精度以及考虑用其他卫星数据来增强数据的时间覆盖率,将有助于全面、准确地掌握滇池叶绿素 a 浓度的时空动态规律和发展趋势。

## 6 参考文献

- [1] Ayres W, Busia A, Dinar A *et al.* Integrated lake and reservoir management: World bank approach and experience. Washington DC: World Bank, 1996.
- [2] Lorenzen CJ. Determination of chlorophyll and Pheo-Pigments: Spectrophotometric Equations. *Limnology and Oceanography*, 1967, **12**(2): 343-346.
- [3] Dall'Olmo G, Gitelson AA, Rundquist DC. Towards a unified approach for remote estimation of chlorophyll-a in both terrestrial vegetation and turbid productive waters. *Geophysical Research Letters*, 2003, **30** (doi: 10.1029/2003GL018065).
- [4] Kutser T, Metsamaa L, Strombeck N *et al.* Monitoring cyanobacterial blooms by satellite remote sensing. *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 2003, **67**: 303-312.
- [5] Gitelson AA, Schalles JF, Rundquist DC *et al.* Comparative reflectance properties of algal cultures with manipulated densities. *Journal of Applied Phycology*, 1999, **11**(4): 345-354.
- [6] Neville RA, Gower JFR. Passive remote sensing of phytoplankton via chlorophyll fluorescence. *Journal of Geophysical Research*, 1977, **82**(24): 3487-3493.
- [7] Gitelson AA, Keydan GP. Remote sensing of inland waters quality Measurements in the visible spectrum. *Acta Hydrophysi-*

- ca, 1990, **34**: 5-27.
- [ 8 ] Gitelson AA, Dall'Olmo G, Moses W *et al.* A simple semi-analytical model for remote estimation of chlorophyll-a in turbid waters; Validation. *Remote Sensing of Environment*, 2008, **112**(9): 3582-3593.
- [ 9 ] European Space Agency. MERIS Product Handbook, 2006: 10-28.
- [ 10 ] Jin X, Wang L, He L. Experience and lessons learned brief for Lake Dianchi. 2003: 159-178.
- [ 11 ] Lee Z, Carder KL, Mobley CD *et al.* Hyperspectral remote sensing for shallow waters. 2. Deriving bottom depths and water properties by optimization. *Applied Optics*, 1999, **38**(18): 3831-3843.
- [ 12 ] Mobley CD. Estimation of the remote-sensing reflectance from above-surface measurements. *Applied Optics*, 1999, **38**(36): 7442-7455.
- [ 13 ] Dekker AG. Analytical algorithms for lake water TSM estimation for retrospective analyses of TM and SPOT sensor data. *International Journal of Remote Sensing*, 2002, **23**(1): 15-35.
- [ 14 ] SCOR-UNESCO. Determination of photosynthetic pigment in seawater. Monographs on oceanographic methodology. France: In Paris, 1966.
- [ 15 ] Huot JP, Tait H, Rast M *et al.* The optical imaging instruments and their applications: AATSR and MERIS. *ESA Bulletin*, 2001, **106**: 56-66.
- [ 16 ] Gordon HR, Wang M. Retrieval of water-leaving radiance and aerosol optical thickness over the oceans with SeaWiFS: a preliminary algorithm. *Applied Optics*, 1994, **33**(3): 443-452.
- [ 17 ] Selby JEA, Kneizys FX, Chetwynd JHJ *et al.* Atmospheric transmittance/radiance; computer code LOWTRAN 4. AFGL-TR-78-0053, 1978.
- [ 18 ] Gordon HR, Brown JW, Evans RH. Exact Rayleigh scattering calculations for use with the Nimbus-7 Coastal Zone Color Scanner. *Applied Optics*, 1988, **27**(5): 862-871.
- [ 19 ] Ångström AK. On the atmospheric transmission of Sun radiation and on the dust on the air. *Geografiska Annaler*, 1929, **11**: 156-166.
- [ 20 ] 王红梅, 陈 燕. 滇池近 20a 富营养化变化趋势及原因分析. 环境科学导刊, 2009, **28**(3): 57-60.
- [ 21 ] Chen Y, Qin B, Teubner K *et al.* Long-term dynamics of phytoplankton assemblages; *Microcystis*-domination in Lake Taihu, a large shallow lake in China. *Journal of Plankton Research*, 2003, **25**(1): 445-453.
- [ 22 ] 李 原, 张 梅, 王若南. 滇池的水华蓝藻的时空变化. 云南大学学报(自然科学版), 2005, **27**(3): 272-276.
- [ 23 ] 万 能, 宋立荣, 王若南等. 滇池藻类生物量时空分布及其影响因子. 水生生物学报, 2008, **32**(2): 184-188.
- [ 24 ] Xing K, Guo H, Sun Y *et al.* Assessment of the spatial-temporal eutrophic character in the Lake Dianchi. *Journal of Geographical Sciences*, 2005, **15**(1): 37-43.