

湖泊水质遥感的几个关键问题*

潘德炉¹, 马荣华^{1,2}

(1: 卫星海洋环境动力学国家重点实验室, 国家海洋局第二海洋研究所, 杭州 310012)

(2: 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 南京 210008)

摘要: 我国目前约有面积大于1km²的湖泊有3000个, 绝大部分属高叶绿素和高悬浮物浓度水体, 属于典型的II类水体, 物质组成多样, 水体的光学辐射传输复杂, 且有大范围的光学浅水。我国的湖泊水质/水色遥感虽然取得了一定进展, 但借鉴海洋水色遥感的相关理论和经验, 还需要解决以下四个关键问题: 1) 兼顾海洋沿海水质遥感, 发展专用的静止卫星湖泊水质遥感器; 2) 在当前多光谱遥感资料基础上研发高光谱湖泊水质因子提取的遥感量化模型, 提高反演精度; 3) 深化湖底底质对湖泊水质/水色遥感影响研究, 发展湖底水质遥感反射率精确计算模型; 4) 发展适用于湖泊水体区域性II类水体大气校正方法, 并集成反演、遥感产品制作、分发等技术, 构建湖泊水体水质/水色业务化运行体系。

关键词: 湖泊; 水质; 遥感

Several key problems of lake water quality remote sensing

PAN Delu¹ & MA Ronghua^{1,2}

(1: *State Key Laboratory of Satellite Ocean Environment Dynamics, Second Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Hangzhou 310012, P.R.China*)

(2: *Nanjing Institute of Geography and Limnology, CAS, Nanjing 210008, P.R.China*)

Abstract: At present, there are about 3000 lakes with more than 1 km² area in China. Most of them belong to Case II waters with a large volume of shallow waters. Using theories and experiences of ocean water color remote sensing for reference, lake water quality/color remote sensing has a prominent improvement. However, there still exist many problems mainly as follows: (a) there is not a special sensor for lake water quality or color remote sensing up to now; (b) though many scholars have developed many water quality parameter retrieval models, including semi-empirical models and semi-analytical models, there still exists a large gap from practical applications; (c) lake bottom is one of the important influence sources to interfere lake water quality or color remote sensing; (d) it is very difficult for lake water quality or color remote sensing to develop an applied and operational atmosphere correction algorithm, which will have an important barrier on the practical application of lake water quality parameters retrieval.

Keywords: Lake; water quality; remote sensing

我国目前约有面积大于1km²的湖泊3000个, 湖泊总面积约90000km², 约占国土面积的1%, 主要分布在长江中下游、蒙新和青藏高原地区^[1]。近年来, 在自然因素和人为因素的共同作用下, 我国特别是长江中下游湖泊水环境变化剧烈, 面积持续萎缩, 湖泊水质持续恶化, 湖泊生态与环境遭受严重破坏, 湖泊功能和效益不断下降, 成为制约社会经济可持续发展的瓶颈, 越来越成为公众媒体关注的焦点^[1]。随着湖泊生态环境问题的日益突出, 利用卫星遥感对湖泊水体进行水质监测的需求越来越迫切。遥感具有快速、大范围、周期性的特点, 在湖泊水质监测方面具有常规水质监测不可比拟的优越性, 新发射的高分辨率卫星基本上都为满足湖泊等内陆水体水质遥感监测提供了技术支持, 这些卫星传感器在保证较高空间分辨率的同时, 大大提高了光谱分辨率(如Hyperion的空间分辨率30m, 时间分辨率16d, 波谱分辨率

* 浙江省自然科学基金重点项目(Z507024)和中国博士后科学基金(20070410413)联合资助。2007-09-05 收稿; 2007-11-05 收修改稿。潘德炉, 男, 1945年生, 研究员, 中国工程院院士; E-mail: pandelu@sio.hznc.net.

10nm), 而一些新的水色遥感器在保证高辐射性能的前提下, 大大提高了空间分辨率, 如 MERIS、HY-1B CZI 等都有 250m 的波段设置, 而传统的陆地卫星遥感器在具有高空间分辨率的情况下, 普遍提高了信噪比, 且加大了刈幅、缩短了重复周期, 如 Landsat TM 设置了水体观测增益, 我国的北京 1 号小卫星有约 600km 的刈幅, 这些都为湖泊水体水质参数遥感反演精度的提高打下了良好的技术基础, 为湖泊水质遥感的发展与应用提供了极有利的技术平台. 在各种主客观有利条件的促进下, 我国湖泊水质遥感取得了很大的进步.

1 水色遥感发展现状

水色遥感的观测能力得到证实后, 最先应用于大洋开阔水体, 先后有 10 多个水色传感器如 CZCS(Coastal Zone Color Scanner), SeaWiFS(Sea-viewing Wide Field-of-view), MODIS(Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer), MERIS(Medium Resolution Imaging Spectrometer)以及我国海洋一号卫星(HY-1)上的水色水温扫描仪 COCTS(Chinese Ocean Color & Temperature Scanner)等相继上天入轨, 推动着海洋水色遥感日趋成熟, 目前水色遥感在海洋科学中已经形成了一个重要的学科分支即海洋水色遥感, 有着稳定的研究队伍. 地球上绝大部分海水属于 I 类水体(低叶绿素和悬浮物浓度的海洋开阔水体), 影响光学特性的物质组成较为简单, 主要的光活性物质是浮游植物色素(叶绿素). I 类水体的水色遥感从试验观测到算法应用, 都形成了一套较为成熟的标准规范, 对固有光学量和表观光学量的认识较为深刻, 水质参数的反演模型较为稳定, 反演的精度也较高(如叶绿素浓度的反演误差 < 35%). 目前实用的反演模型主要有两类, 一是经验/半经验模型, 二是半分析模型. 半分析模型的核心是生物-光学模型, 高精度生物-光学模型参数的获取, 除对传感器的稳定性和辐射定标有较高要求外, 还需要大量高精度的固有光学量和表观光学量现场和实验室观测, 其中的每一个过程或步骤都不可避免地引起一些误差, 最终传递给要反演的水质参数, 因此基于半分析模型的水质参数反演精度一般低于经验/半经验模型. 另外, 海洋 I 类水体在近红外波段强吸收, 表现为离水辐射几乎为 0, 基于这一性质, 针对不同的水色传感器, 发展了较为成熟的业务化大气校正算法, 如 NASA 的 SeaWiFS 和 MODIS 业务化算法、ESA 的 MERIS 业务化算法.

近年来, 随着生态环境问题的日渐突出, 研究的重点和热点逐渐转向海洋沿岸以及内陆湖泊等高叶绿素和高悬浮物浓度的 II 类水体. 国外在湖泊水质遥感方面的研究始于 20 世纪 70 年代末 80 年代初, 监测的指标主要包括悬浮颗粒物、透明度、叶绿素 a、DOC(Dissolved Organic Carbon)以及一些综合污染指标等. 我国的湖泊水质遥感始于 20 世纪 90 年代, 主要以经验/半经验算法为主, 使用的卫星传感器以 Landsat TM/ETM 主^[2], 最近几年来, 随着海洋和湖泊野外光学仪器的发展, 湖泊生物光学模型的研究逐渐深入^[3], 尤其是太湖水体的生物光学特性逐渐明晰^[4-6], 为分析/半分析方法的应用和发展打下了坚实的基础. 值得注意的是, 绝大多数湖泊属于 II 类水体, 物质组成较为复杂, 包含浮游植物色素、悬浮颗粒以及黄色物质等, 引起的光学特性远比 I 类水体复杂的多, 通过海洋水色卫星遥感提取 I 类水体物质含量(主要指叶绿素)的标准算法对湖泊等 II 类水体不再适用^[7], 建立适合 II 类水体组分含量的遥感估测算法是 II 类水体水色遥感的客观要求. 我国特别自“九五”以来, 在科技部“863”高新技术项目的支持下, 联合了国内海洋光学遥感的优势, 在海洋水体光学特性的测量、分析与应用方面做了大量工作, 并取得了丰硕成果^[8]. 国家海洋局第二海洋研究所开发了一套完全具有知识产权的卫星数据接收、处理和综合应用系统; 该系统实现了多颗卫星(MODIS, SeaWiFS, FY-1C, FY-1D, HY-1A, HY-1B 以及 AVHRR 等)的自动接收、实时融合处理以及水色产品的自动提取和发布应用, 系统中针对我国海洋沿岸 II 类水体的反演模型, 精度明显好于 NASA 的 MODIS 和 SeaWiFS 标准反演产品, 推动了我国海洋水色遥感的发展和进步.

2 几个关键问题

绝大多数湖泊属于 II 类水体, 其中的光活性物质包括浮游植物色素(叶绿素)、非色素悬浮颗粒以及 CDOM(Colored Dissolved Organic Matter)等, 物质组成受陆源的影响较大, 物质颗粒的物理性质有一定的季节性变化, 同一湖泊, 不同的湖区, 也表现出一定的差异; 另外, 湖泊面积远低于海洋水体, 大部分湖泊存在光学浅水. 湖泊水色遥感研究所利用的遥感数据包括未经辐射标定的灰度值、经辐射校正转换

的向上辐射值以及反射率值等,所使用的反演方法主要为经验/半经验方法和半分析方法.经验/半经验方法具有很强的区域性和时相性,通用性较差,不是湖泊水质遥感监测的最佳方法选择.半分析方法以水色机理为基础,正演和反演相结合,通过生物-光学模型解释或模拟遥感数据,能够通过独立于遥感影像的野外数据进行校正,大大降低了对地面实测数据的依赖度,比较适合于湖泊水质遥感监测.建立适合内陆湖泊水体成分的遥感估测算法,除需要适合的遥感传感器外,还要提高物质含量的估测精度,且必须有足够的固有光学量和表观光学量试验观测,并消除其它相关因素的影响.

2.1 新型传感器研制

目前,湖泊水色遥感研究所使用的绝大多数卫星遥感传感器都是面向陆地资源的多光谱传感器,如 Landsat MSS/TM/ETM, SPOT HRV, CBERS CCD, 随着 SAR 的应用与发展, ERS-1 SAR 以及 ERS-2 SAR 等在湖泊水质遥感监测中也取得了较好的效果,另外高光谱遥感(如 Hyperion)也得到了应用.在湖泊水色遥感方面,上述多光谱传感器虽然具有较高的空间分辨率,但光谱分辨率较低;而高光谱传感器 Hyperion 虽然既具有较高的空间分辨率和光谱分辨率,但刈幅很窄;微波传感器不受制于天气的影响,在蓝藻水华监测方面具有一些独特的优势,但很难用来水质参数定量反演,也存在空间分辨率较低的缺陷;另外,上述这些传感器的时间分辨率都很低,不能满足湖泊监测的实际需求.湖泊水色遥感要求传感器不仅具有较高的光谱分辨率,而且具有较高的空间分辨率和时间分辨率.准确获取湖泊水体水质参数的光谱特征,综合考虑湖泊水体的空间范围 and 实际监测要求,作为静止卫星的载荷,兼顾海洋沿岸水体水质监测需求,研制一个专门的湖泊水色遥感传感器,将有广阔的应用前景.

2.2 实用半经验模型

目前,针对不同的湖泊水体,野外测试获取了大量的实测光谱.总体而言,湖泊水体的光谱特征已经基本上比较清楚.基于大量实测光谱特征波段的原始反射率值或一阶、二阶微分值,建立了部分水质参数的线性或非线性回归估算模型,这些水质参数既包括直接水质参数,即存在显著光谱特征或光学特性的水质参数,如叶绿素、悬浮物、DOC,也包括间接水质参数,即不存在显著光谱特征和光学特性、但与直接水质参数存在紧密内在关联的其他水质参数,如总氮、总磷、营养状态指数等.遗憾的是,目前常用的多光谱传感器波段覆盖或淹没了这些水质数据的特征波段,原来基于实测光谱所建立的估算模型不能直接用于卫星遥感影像.为此,基于不同卫星遥感影像的单一波段或波段组合,建立了部分水质参数估算的半经验模型,但这些模型离实际应用尚有相当一段距离,还需要更大量实测数据的建模验证或修正.

2.3 半分析模型

水体的光学特性是建立半分析模型(生物光学模型)的基础.为深入研究某区域水体的光学特性,必须对水体的表观光学量/特性和固有光学量/特性进行测量分析.目前,表观光谱测量的方法即水面以上测量法,已经比较成熟.在固有光学量的测量分析方面,国际上在 20 世纪 90 年代开始已有很大发展,其中现场固有光学量的测量仪器主要包括用于吸收系数测量的 AC-9(9 通道双光路吸收系数与光束衰减系数测量仪)、AC-S(高光谱双光路吸收系数与光束衰减系数测量仪)以及用于后向散射系数测量的 HydroScat-6(6 通道光谱后向散射测量仪)和 BB9;实验室内可用分光光度计测量水体的吸收系数,但针对不同物质含量的湖泊水体,测量精度还不够,测量的方法需要继续探讨.目前为止,对于湖泊水体水质参数估测的半分析方法所依赖的水体固有光学特性的认识仍旧比较肤浅,一定程度上限制了这一方法在湖泊水体中的实际应用,国外在这方面作了大量工作,欧洲 SALMON 计划项目测量调查了欧洲几个典型湖泊(如瑞典的 Lake Erken, Lake Vättern, Lake Mälaren)的固有光学特性(吸收和散射),建立了生物光学模型,另外在俄罗斯的 Lake Baikal, 意大利的 Albano Lake 以及芬兰和爱沙尼亚的一些湖泊都进行过光学特性测量,部分尝试了水质参数反演的半分析算法.目前为止,半分析算法在我国湖泊水体中的应用研究刚刚起步,在表观光学量和固有光学量观测、生物光学模型参数的确定以及湖泊水色遥感理论等方面,已经做了大量工作,并进行了较为深入的分析,形成了良好的研究基础.

光学深水(即遥感反射比不受底质影响的水体或者水深大于光穿透深度的水体)中,对辐射传输有重要影响物质的性质等已有较深入的理解^[4].在确定的水下光照条件以及水面波浪的情况下,水下光场的变化很大程度上是由水中的溶解物和悬浮物等光学物质的特性决定的,光在水体水平无限的假设条件下,

按照 Beer 定律随深度的增加而减少^[10], 来自水体的向上辐亮度与水体深度成指数变化关系^[11], 其估算误差随着水体深度的减少而增加^[12]. 令 $u=b_b/(a+b_b)$, 其中 b_b 为水体的总后向散射系数, a 表示水体的总吸收系数, 于是有^[13]:

$$R_{rs}^w \approx gu \quad (1)$$

对大部分海洋水体而言, 有^[13]:

$$R_{rs}^w \approx (0.0949+0.0794u)u \quad (2)$$

或有^[14-15]:

$$R_{rs}^w \approx (0.070+0.155u^{0.752})u \quad (3)$$

$$R_{rs}^w \approx (0.084+0.17u)u \quad (3')$$

对 I 类水体而言, (1)式可以简化为(4)式^[16]:

$$R_{rs}^w \approx gb_b/a$$

$$\text{或 } R_{rs}^w \approx g \frac{u}{1-u} \quad (4)$$

式中, R_{rs}^w 为光学深水中或仅仅来自水体的遥感反射比(Remote Sensing Reflectance, R_{rs}), $g=0.0922$. 有学者认为^[14], (3)式和(4)式的适用条件是 $u < 0.3$ 或 $b_b/a < \sim 0.4$; 一般而言, (3)式和(4)式适用于海洋深水, 而(2)式适用于沿岸浑浊水体. 也有学者认为, (4)式的有效条件是 $b_b/a < 0.35$ ^[10], $b_b/a \leq 0.3$ ^[17] 或 $b_b/a < \sim 0.25$ ^[18]. g 的平均值可取 0.33^[10,16,19](假设太阳处于最高点), 随着太阳天顶角的不同, 会有轻微变化; Ma 等^[4]认为在太湖的整个底质非影响区, g 值的变化范围为 0.0701–0.1064, 平均值为 0.0924; 在非影响区的中混浊水体, 平均值为 0.0965(变化范围 0.0723–0.1121); 在非影响区的低无机悬浮物含量水体, 平均值为 0.0882(变化范围 0.0678–0.1006). 可见随着水体的不同, g 值的变化范围很大.

2.3 底质影响校正

我国以浅水湖泊居多, 其中存在大量的光学浅水. 光学浅水中, 一部分光穿透水体而到达水底, 然后部分被吸收, 部分又被反射回水体, 或者作为荧光而被重新激发, 因此浅水水底对遥感反射比有一定的贡献. 在浅水中, 虽然光的基本辐射传输过程没有变化, 但传播环境发生了变化, 从而影响了辐射传输问题的假设和边界条件. 湖底由不同物质组成, 如沙、泥以及水生植被等, 它们以各种方式影响着由水底反射所产生的向上信号如向上的辐亮度或辐照度^[20], 因此向上的信号(如向上的辐照度或辐亮度)不能用一个简单的指数衰减函数来表达^[21], BRDF(Bidirectional Reflectance Distribution Function)决定着其数量大小和角度分布. 根据光的行为, 可以把湖底分为反射型湖底和吸收型湖底, 反射型水底(如沙质水底)的影响大于吸收型水底(如植被覆盖型水底)^[20]; 另外, 底质特征及其形态, 如聚合体的表面形态、沙质波纹等, 对向上的信号也有影响^[20].

假设水底是朗伯体, 有^[21]:

$$R \approx R^w + (R^B - R^w) \exp(-2KH) \quad (5)$$

式中: R 表示恰在水面下的辐照度反射比; R^B 表示恰在水底以上的辐照度反射比; R^w 表示来自水体的辐照度反射比; K 表示准漫衰减系数. (5)式进而可转化为^[14]:

$$R_{rs} = R_{rs}^w [1 - \exp(-2KH)] + \frac{R^B}{\pi} \exp(-2KH) \quad (6)$$

式中: H 表示水深. 考虑到水体的非弹性过程, 有^[18]:

$$R_{rs}^b \approx 0.17A \exp[-(1.5 + \{D_d\})KH] \quad (7)$$

式中: R_{rs}^b 表示仅来自水底的遥感反射比; $\{D_d\} \approx 1.08D_d^- \approx 1.08/\cos\theta_d$; θ_w 表示恰在水面下的太阳天顶角; A 表示水底反照率. 基于准单次散射理论, (6)式可转化为^[15]:

$$R_{rs} \approx R_{rs}^w \left\{ 1 - \exp \left\{ - \left[\frac{1}{\cos(\theta_w)} + 1.03(1 + 2.4u)^{0.5} \right] KH \right\} \right\} + \frac{A}{\pi} \exp \left\{ - \left[\frac{1}{\cos(\theta_w)} + 1.04(1 + 5.4u)^{0.5} \right] KH \right\} \quad (8)$$

以上述这些公式为基础, 计算水底底质对遥感反射比的贡献就变得相对容易. 需要注意的是, 不同的水体, 影响因素和影响方式会有所差别, 另外公式中的参数也有所不同.

2.4 大气校正

水质/水色遥感涉及水体组分参数和光谱反射率的关系以及大气—水面系统的辐射传输, 最终反映在卫星遥感传感器获得的辐亮度值, 其中大气的程辐射约占总辐射的 90%^[22]; 大气校正成为利用卫星遥感影像高精度提取湖泊水质参数的关键. 除个别高原和山区清洁湖泊外, 我国绝大多数湖泊都是复杂的浑浊水体即 II 类水体, 而 II 类水体的大气校正是国际水色遥感界公认的难题, 湖面上空比海面上空的气溶胶分布类型更为复杂、多变, 十分有必要发展区域性的大气校正模型.

陆地资源卫星影像数据的大气校正, 通常使用已有的大气模型(如 6S, MODTRAN, LOWTRAN 等), 利用标准大气剖面数据, 估算出大气的影响, 然后剔除; 但由于采用的标准大气数据是一种平均状态数据, 与遥感卫星过境的实时大气剖面数据有很大差异, 并且不同地区的大气剖面状态不同, 因此仅仅用标准数据进行大气模拟, 并据此进行水质参数的反演, 误差通常较大, 经常出现意想不到的非合理结果, 不能实现业务化运行, 因此这些大气模型不适合水色遥感的大气校正. 对于清洁的 I 类水体, 已有较成熟的大气修正算法. 这些算法都基于“暗像元”假设, 即水体目标的近红外离水辐射为零. 对于悬浮物, CDOM 和浮游植物色素等含量高的湖泊 II 类水体, 由于气溶胶和水体的复杂性(包括由悬浮物强后向散射导致的近红外波段离水反射率不为零), 使得大气修正复杂化. 到目前为止, 国际水色遥感界已提出了多种针对“亮像元”(即近红外离水辐射非零)算法, 但还处于区域性试验阶段.

3 讨论与结论

大部分湖泊属典型的 II 类水体, 物质组成复杂, 并伴随有大量的光学浅水, 湖泊水质/水色遥感远复杂于大洋开阔水体, 也不同于海洋沿岸水体. 我国的湖泊水质/水色遥感虽然取得了一定进展, 但借鉴海洋水色遥感的相关理论和经验, 还需要解决以下四个关键问题: 1) 兼顾海洋沿岸水体的水质遥感, 发展专用的静止卫星湖泊水质传感器; 2) 以当前多光谱遥感资料为基础, 研发高光谱湖泊水质因子提取的遥感定量化模型, 提高反演精度; 3) 深化湖底底质对湖泊水质/水色遥感的影响研究, 发展湖底水质遥感反射比精确计算模型; 4) 发展适用于湖泊水体区域性大气校正方法, 并集成反演、遥感产品制作、分发等技术, 构建湖泊水体水质/水色遥感业务化运行体系.

本期专辑在重点关注目前正在发展的水质/水色遥感半分析方法的同时, 特别关注了太湖蓝藻水华的遥感监测. 较为深入地讨论了太湖水体的固有光学特性和表观光学特性, 导出了一定条件下太湖水体的悬浮物以及叶绿素遥感估算模型; 深入讨论了多源卫星遥感影像(EOS MODIS, CEBERS CCD, Landsat ETM 和 IRS-P6 LISS-3)尤其是基于 MODIS 的蓝藻水华识别模式和提取方法、蓝藻水华强度分级方法; 基于蓝藻爆发前后的动态监测和水温反演, 初步探讨了蓝藻爆发与水温的关系; 另外还研究了基于水体透明度反演的太湖水生植被遥感信息的提取方法, 为太湖光学浅水区底质对遥感反射比的影响研究打下了良好的基础, 也为太湖水生植被的动态变化研究提供了可借鉴的方法和基础.

4 参考文献

- [1] 王苏民, 窦鸿身主编. 中国湖泊志. 北京: 科学出版社, 1998.
- [2] 马荣华, 戴锦芳. Landsat ETM 与光谱特征结合估测太湖叶绿素及悬浮质含量. 湖泊科学, 2005, 17(2): 97-103.
- [3] 汪小勇, 李铜基, 朱建华. 青海湖水表光学特性分析. 海洋技术, 2005, 24(2): 50-54.
- [4] Ma R, Tang J, Dai J. Bio-optical model with optimal parameter suitable for Taihu Lake in water colour remote sensing. *International Journal of Remote Sensing*, 2006, 27(19): 4305-4328.
- [5] Ma R, Tang J, Dai J *et al.* Absorption and scattering properties of water body in Taihu Lake, China: absorption. *International Journal of Remote Sensing*, 2006, 27(19): 4275-4302.
- [6] 张运林, 秦伯强, 马荣华等. 太湖典型草藻型湖区有色可溶性有机物的吸收与荧光特性. 环境科学, 2005, 26(2): 142-147.
- [7] IOCCG. Remote sensing of ocean colour in coastal, and other optically-complex, waters. In: Sathyendranath S ed. Reports of

- the international ocean-colour coordinating group, No.3. IOCCG, Dartmouth, Canada, 2000.
- [8] 潘德炉, 王迪峰. 我国海洋光学遥感应用科学研究的新进展. 地球科学进展, 2004, **19**(4): 506-512.
- [9] Ackleson SG. Light in shallow waters: A brief research review. *Limnology & Oceanography*, 2003, **48**: 323-328.
- [10] Kirk JTO. Dependence of relationship between inherent and apparent optical properties of water on solar altitude. *Limnology & Oceanography*, 1984, **29**: 350-356.
- [11] Lyzenga DR. Passive remote sensing techniques of mapping water depth and bottom features. *Applied Optics*, 1978, **17**: 379.
- [12] Tassan S. A procedure to determine the particular content of shallow water from Thematic Mapper data. *International Journal of Remote Sensing*, 1998, **19**: 557-562.
- [13] Gordon HR, Brown OB, Evans RH *et al.* A semianalytic radiance model of ocean color. *Journal of Geophysical Research*, 1988, **93**: 10909-10924.
- [14] Lee Z, Carder KL, Mobley CD *et al.* Hyperspectral remote sensing for shallow waters: 1. A semianalytical model. *Applied Optics*, 1998, **37**: 6329-6338.
- [15] 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**: 3831-3843.
- [16] Morel A, Prieur L. Analysis of variations in ocean color. *Limnology & Oceanography*, 1977, **22**: 709-722.
- [17] Sathyendranath S, Prieur L, Morel A. A three-component model of ocean colour and its application to remote sensing of phytoplankton pigments incoastal waters. *International Journal of Remote Sensing*, 1989, **10**: 1373-1394.
- [18] Lee Z, Carder KL, Hawes SK *et al.* Model for the interpretation of hyperspectral remote-sensing reflectance. *Applied Optics*, 1994, **33**: 5721-5732.
- [19] Morel A, Gentili B. Diffuse reflectance of oceanic waters: its dependence on sun angle as influenced by the molecular scattering contribution. *Applied Optics*, 1991, **30**: 4427-4438.
- [20] Mobley CD, Sundman LK. Effects of optically shallow bottoms on upwelling radiances: Inhomogeneous and sloping bottoms. *Limnology & Oceanography*, 2003, **48**: 329-336.
- [21] Maritorena S, Morel A, Gentili B. Diffuse reflectance of oceanic shallow waters: influence of water depth and bottom albedo. *Limnology & Oceanography*, 1994, **39**: 1689-1703.
- [22] Kirk JTO. Light and photosynthesis in aquatic ecosystems. Cambridge: Cambridge University Press, 1994.