

兴凯湖春季水体悬浮颗粒物和 CDOM 吸收特性*

李思佳^{1,2}, 宋开山^{2**}, 陈智文¹, 赵莹², 邵田田², 穆光熠^{2,3}, 关莹²

(1: 吉林师范大学生态环境研究所, 四平 136000)

(2: 中国科学院东北地理与农业生态研究所, 长春 130102)

(3: 东北师范大学生命科学学院, 长春 130000)

摘要: 为了分析兴凯湖水体光学活性物质的吸收特性、来源和空间分布以及对 400 ~ 700 nm 范围内总吸收的贡献, 于 2013 年 5 月对该水体进行野外实验, 对水体中浮游藻类、非藻类颗粒物和有色可溶性有机物的吸收特性和水质参数进行测定. 结果表明: 总悬浮颗粒物的吸收光谱与非藻类颗粒物相似, 色素颗粒物含量较少且单一, 非藻类颗粒物在总悬浮颗粒物吸收中占主导地位, 其贡献率始终在 50% 以上. CDOM 吸收曲线的拟合函数斜率值 S_g 均高于其它水体. 440 nm 处总悬浮颗粒物和浮游藻类颗粒物的吸收系数 $a_p(440)$ 、 $a_d(440)$ 与总悬浮颗粒物、无机悬浮颗粒物和有机悬浮颗粒物浓度相关性均较好, 与叶绿素 a(Chl. a) 浓度的相关性较差. 兴凯湖与其它 II 类水体的差异性表现在 440 nm 处 CDOM 吸收系数 $a_g(440)$ 与 Chl. a 浓度、溶解性有机碳(DOC)浓度均无显著相关性, 说明 DOC 以无色部分为主. 总体上, 大兴凯湖各吸收系数和水质参数均值均低于小兴凯湖, 后者水质受农灌区退水及周围渔业、旅游业的影响较大.

关键词: 兴凯湖; 吸收光谱; 有色可溶性有机物; 非藻类颗粒物; 浮游植物

Absorption characteristics of particulates and CDOM in spring in the Lake Xingkai

LI Sijia^{1,2}, SONG Kaishan², CHEN Zhiwen¹, ZHAO Ying², SHAO Tiantian², MU Guangyi^{2,3} & GUAN Ying²

(1: Institute of Ecological Environment, Jilin Normal University, Siping 136000, P. R. China)

(2: Northeast Institute of Geography and Agricultural Ecology, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130102, P. R. China)

(3: Life Science College, Northeast Normal University, Changchun 130000, P. R. China)

Abstract: Field surveys were carried out in the Lake Xingkai (including both the Great Lake Xingkai and the Small Lake Xingkai) in May 2013, and water samples were collected for examination of the absorption features. In the laboratory, tripton and chromophoric dissolved organic matter (CDOM) absorption of 20 water samples were measured through quantitative filter technique. Absorption coefficients were used to analyse the absorption characteristics, source, spatial distribution and relative contribution of optical active constituents over the range of PAR (400–700 nm). The results showed that the absorption spectra of tripton are similar to nonalgal particles, indicating less phytoplankton presence in the water column. The total particulate absorption is dominated by the nonalgal particles, of which the contribution rate is up to 50% of the total absorption, and S_g is higher than that in water bodies being investigated elsewhere. Positive correlation of the particles was observed within $a_p(440)$, $a_d(440)$ and total suspended matter, inorganic suspended matter and organic suspended matter, respectively, while weak correlation was recorded in terms of chlorophyll-a (Chl. a) compared with results reported in literatures. In the current study, low correlations of the particles were observed within $a_g(440)$, Chl. a and dissolve dissolved organic carbon (DOC). This is probably due to the fact that more colorless DOCs are present in the Lake Xingkai. Absorption coefficient and water quality parameters showed insignificant difference between the Great Lake Xingkai and the Small Lake Xingkai, though the latter is greatly impacted by farmland irrigation discharge, fisheries and tourism sewage.

* 国家自然科学基金项目 (44171293) 和兴凯湖生态环境保护基线调查项目 (JXZFCG2013-XXK21-03) 联合资助.
2014-05-26 收稿; 2014-12-18 收修改稿. 李思佳 (1988 ~), 女, 硕士研究生; E-mail: jlsdlsj@126.com.

** 通信作者; E-mail: songks@iga.ac.cn.

Keywords: Lake Xingkai; absorption spectra; CDOM; nonalgal particles; phytoplankton

利用水质参数和固有光学特性与表光光学特性之间的关系构建的水质遥感估算分析或半分析模型,除对传感器的稳定性和辐射定标有较高的要求外,还需要高精度的固有光学、表观光学参数^[1-8]作为支撑. 相对于Ⅰ类水体,Ⅱ类水体生物光学模型受陆源影响较大,浮游藻类、非藻类颗粒物和有色可溶性有机物(CDOM)来源相对独立,非藻类颗粒物和CDOM的光谱吸收均在蓝光波段重叠,甚至成为水体光谱的主导组分^[3],从而对目标物质光谱特征的提取造成干扰,增加了反演难度. 由于Ⅱ类水体所处的地理环境特点及区域发展经济状况不同,光活性物质组成具有多样性和时空差异性,模型依赖的固有光学量呈现区域变化特点. 对水体类型、季相和区域差异的模型系数不可统一参数化,需要大量不同水体研究的实验数据加以支撑、验证和调整^[9]. 固有光学量作为水体生物光学算法构建的重要参数,其特性的研究对于提高水质参数反演精度,实现区域水色遥感算法和生物光学模型参数化具有重要理论意义^[10-13]. 因此,研究引起水体光学活性物质和固有光学量变化机理,确定不同水体光学活性物质的贡献率尤为重要.

吸收系数是固有光学量之一,国外已有较多针对Ⅱ类水体组分吸收特性的研究^[14-15],国内相关研究仅局限于太湖^[16]、巢湖^[17]等富营养化水体. 作为中俄界湖的兴凯湖,是世界上少有的面积广阔、生态完好、物种多样的湿地之一^[18],在涵养水源、补给地下水、降解污染和维持水平衡方面具有重要作用. 近几年来农业面源污染以及旅游业的发展导致我国部分湖水污染加重,已有的吸收光谱模型是否能应用于兴凯湖水体亟待研究. 兴凯湖独特的地理位置及社会经济状况使了解整个兴凯湖湖泊生态系统变化受到限制,通过分析兴凯湖我国部分的固有光学特性,有助于提升对整个兴凯湖光学特性的认识,并为进一步对兴凯湖实施全面遥感机理监测提供参考依据.

1 研究区概况

兴凯湖(45°01'00"~45°34'30"N,131°58'30"~133°07'30"E)地处我国黑龙江省东南部和俄罗斯远东滨海地区,为造山运动地壳陷落形成的构造湖,由大、小兴凯湖组成. 小兴凯湖是兴凯湖湖进再湖退残留而成,两湖中间隔着一条10 m左右高的沙岗,并以湖岗上的第一、二泄洪闸和新开流水道相通,湖底高程为58~69 m. 小兴凯湖总面积为170 km²,平均水深1.8 m,最深为3.5 m;大兴凯湖是中俄两国的界湖,略呈椭圆形,总面积为4380 km²,其中北部1240 km²属我国境内,平均水深3.5 m,最深处达10 m. 该区域属于温带大陆性季风气候,春、秋季风大降水少,夏季温热多雨,冬季漫长干燥. 兴凯湖主要依赖地表径流、湖面降水补给以及湖东北部大片沼泽湿地地下径流补充,汇入河流在我国境内有8条,流入大、小兴凯湖的各有4条,东南侧以松阿察河河口与俄罗斯相连,松阿察河是兴凯湖的唯一泄流通道,汇入乌苏里江. 小兴凯湖属草原湖泊且湖水较浅,湖床具有平缓斜坡,沿岸附近地势低平多沼泽、芦苇,湖底属淤泥底质,为国有渔场;大兴凯湖湖水开阔,以砂粒底质为主.

2 材料与方法

2.1 野外采样

于2012年5月18日和20日分别在小兴凯湖、大兴凯湖各采集10个样点(1[#]~10[#]样点位于小兴凯湖,11[#]~20[#]样点位于大兴凯湖,见图1),并用手持式GPS进行定位导向. 水样采集使用有机玻璃采水器,采样前先将采样器和聚四氟乙烯水样瓶润洗,采样深度设置为表层0~50 cm,每个点位采集水样约1 L,采样后立即用黑色塑料袋罩住,避免阳光直射,放入车载保温箱.

2.2 参数测定

2.2.1 叶绿素a(Chl. a)和悬浮物浓度的测定 为防止酸化引起色素溶解,采样后立即完成水质参数的测定. 采用0.45 μm Whatman GF/F膜过滤150~200 ml水样(根据水中Chl. a浓度决定过滤水样体积),将滤膜剪碎放入15 ml离心管中,加入10 ml 90%的丙酮溶液,充分混合均匀后避光冷藏24~48 h,对其离心后取上清液倒入1 cm石英比色皿中,以90%的丙酮溶液为空白参考,置于UV-2600岛津—紫外可见分光光度计测定波长为630、647、664和750 nm的吸光度,计算Chl. a浓度^[19]. 总悬浮颗粒物(TSM)质量、有机颗粒物

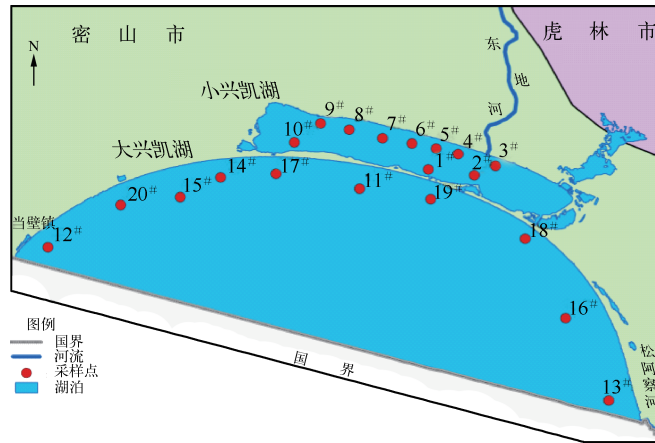


图 1 兴凯湖采样点分布

Fig. 1 Distribution of sampling sites in Lake Xingkai

(OSM) 质量和无机颗粒物 (ISM) 质量采用烘烧、称重的方法测定. 溶解性有机碳 (DOC) 浓度采用 TOC 仪测定. 不同水质参数浓度见图 2.

2.2.2 吸光系数的测定 采用定量滤膜技术 (QFT) ^[20-21] 测定总悬浮颗粒物的吸收系数 $a_p(\lambda)$ 、非藻类颗粒物的吸收系数 $a_d(\lambda)$ 、浮游植物色素颗粒物的吸收系数 $a_{ph}(\lambda)$ 和 CDOM 的吸收系数 $a_g(\lambda)$. 用 $0.47 \mu\text{m}$ Whatman GF/F 滤膜在真空下过滤 50 ~ 400 ml 水样, 利用岛津—紫外可见分光光度计 UV-2006 在 380 ~ 800 nm 范围测定滤膜上颗粒物的吸光度, 每隔 1 nm 测定 1 个吸光度. 为消除仪器间的差异, 用各波段的吸光度减去 750 nm 波长处的吸光度以校正, 并与经蒸馏水润湿的同样湿润程度的空白滤膜作对比. $a_p(\lambda)$ 的计算公式为:

$$a_p(\lambda) = 2.303 \frac{S}{V} OD_s(\lambda) \quad (1)$$

式中, V 为过滤水样的体积, S 为过滤留在滤膜上的有效面积, $OD_s(\lambda)$ 为滤膜上悬浮颗粒物的吸光度.

采用 $500 \mu\text{l}$ 0.1% 的 NaClO 溶液漂白总悬浮颗粒物滤膜 15 min, 利用分光光度计测定 $a_d(\lambda)$, 方法同上. 根据线性叠加原理, $a_{ph}(\lambda)$ 计算公式为:

$$a_{ph}(\lambda) = a_p(\lambda) - a_d(\lambda) \quad (2)$$

利用 $0.22 \mu\text{m}$ 微孔聚碳酸酯膜过滤的水样测定 CDOM 的吸光度, 方法同上. 按照式(3)、(4)计算 $a_g(\lambda)$:

$$a'_g(\lambda) = 2.303 D(\lambda) / r \quad (3)$$

式中, $a'_g(\lambda)$ 为未校正的 CDOM 吸收系数 (m^{-1}), $D(\lambda)$ 为吸光度, r 为光路径 (m). 为消除由过滤液体残留细小颗粒引起的散射影响, 进行散射效应校正:

$$a_g(\lambda) = a'_g(\lambda) - a_g(700) \cdot \lambda / 700 \quad (4)$$

3 结果与分析

3.1 TSM 的吸收光谱特征

兴凯湖 TSM 吸收光谱特征与非藻类颗粒物吸收光谱特征相似 (图 3a), 结合已有的研究结果 ^[22-23] 表明, 在叶绿素 a 浓度较低的情况下, TSM 吸收表现出非藻类颗粒物吸收光谱特征, 且不同点位 $a_p(\lambda)$ 变化较大, 具有空间异质性. 由于水体中个别点位 Chl. a 浓度较低, 光谱曲线在 675 nm 左右出现不明显的吸收峰; 浮游植物色素颗粒物另一个特征吸收波段 440 nm 未出现明显的吸收峰, 与同季节其他研究结果相同 ^[22], 非藻类

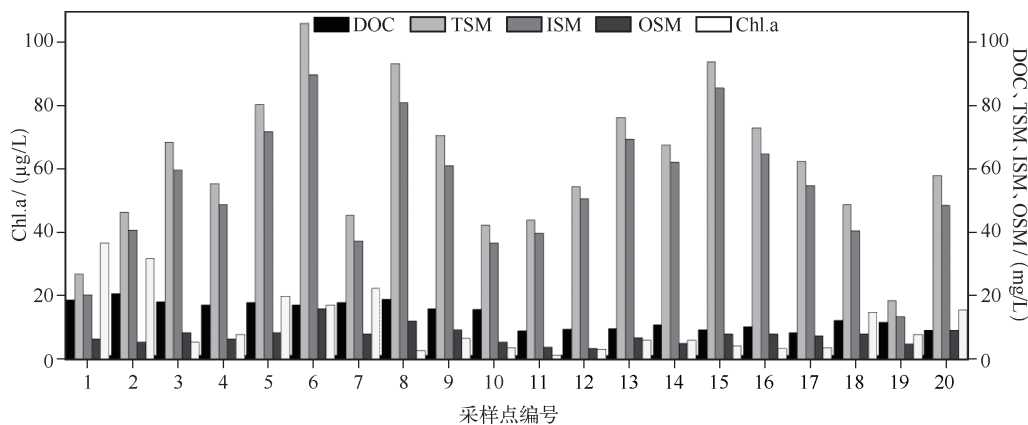


图2 兴凯湖所有点位各组分浓度

Fig. 2 Component concentrations of all the sampling sites in Lake Xingkai

颗粒物在蓝光波段的强吸收使其在光谱曲线中占优势. 兴凯湖 1[#] ~ 20[#] 点位的 TSM 以 ISM 为主, OSM 所占比例较小(图2). 分别对 $a_p(440)$ 、 $a_p(675)$ 与 TSM、ISM、OSM、Chl. a 浓度进行相关分析(表1), $a_p(440)$ 与 TSM、ISM 和 OSM 浓度具有极显著的相关性($P < 0.01$), 与 Chl. a 浓度的相关性较差, $a_p(675)$ 与 Chl. a、OSM 浓度有极显著的相关性($P < 0.01$), 这与其他研究结果一致^[24], 进一步说明春季兴凯湖为非藻类颗粒物占主导的典型Ⅱ类水体, 主要由于春季东北气温相对较低, 藻类正处于生长期, 同时受流域内人类活动和流域内农业污染负荷增加的影响, 非藻类颗粒物浓度较高^[25]. 1[#] ~ 10[#]、11[#] ~ 20[#] 点位 $a_p(440)$ 均值分别为 $21.29 \pm 10.27 \text{ m}^{-1}$ 、 $12.55 \pm 3.56 \text{ m}^{-1}$, 总体上小兴凯湖 TSM 浓度高于大兴凯湖, 主要受人类活动的影响^[18, 26].

表1 440, 675 nm 组分吸收系数、各水色因子浓度之间的线性关系

Tab. 1 Determination coefficients of absorption coefficients at 440, 675 nm and factor concentrations

	$a_p(440)$	$a_p(675)$	$a_d(440)$	$a_d(675)$	$a_{ph}(440)$	$a_{ph}(675)$	$a_g(440)$	TSM	ISM	OSM	Chl. a	DOC
$a_p(440)$	1											
$a_p(675)$	0.744 **	1										
$a_d(440)$	0.973 **	0.654 **	1									
$a_d(675)$	0.919 **	0.858 **	0.907 **	1								
$a_{ph}(440)$	0.718 **	0.745 **	0.504 *	0.620 **	1							
$a_{ph}(675)$	-0.160	0.450 *	-0.311	-0.071	0.355	1						
$a_g(440)$	0.243	0.151	0.185	0.208	0.322	-0.085	1					
TSM	0.645 **	0.300	0.721 **	0.599 **	0.171	0.448 **	0.303	1				
ISM	0.617 **	0.236	0.697 **	0.551 *	0.142	-0.492 *	0.288	0.995 **	1			
OSM	0.635 **	0.662 **	0.660 **	0.743 **	0.321	0.010	0.308	0.712 **	0.640 **	1		
Chl. a	0.234	0.707 **	0.077	0.321	0.632 **	0.808 **	0.073	-0.293	-0.336	0.105	1	
DOC	0.497 *	0.692 **	0.381	0.624 **	0.659 **	0.235	0.334	0.011	-0.040	0.338	0.576 **	1

** 表示在 0.01 水平上显著相关; * 表示在 0.05 水平上显著相关.

3.2 非藻类颗粒物的吸收光谱特征

非藻类颗粒物包括水体中矿物沉积、非生命有机碎屑, 如排泄物与藻类细胞降解物, 以及活的非色素有机体^[27]. 兴凯湖非藻类颗粒物的光谱吸收曲线呈现指数衰减规律和空间异质性(图3b), $a_d(440)$ 均值为 $14.67 \pm 7.19 \text{ m}^{-1}$. 由于Ⅰ类水体中非藻类颗粒物多来自浮游植物的降解, $a_d(440)$ 与 Chl. a 浓度具有较高的相关性, 而Ⅱ类水体 $a_d(440)$ 通常表现出与悬浮物浓度较高的相关性^[28]. 而兴凯湖 1[#] ~ 20[#] 点位的 $a_d(440)$ 、 $a_d(675)$ 与 Chl. a 浓度无显著相关性, 与 TSM、ISM、OSM 浓度相关性均较好(表1), $a_d(440)$ 与颗粒物浓度呈

非线性相关,与其他研究结果一致^[29-30],说明非藻类颗粒物主要为陆源性.进一步进行曲线拟合发现, $a_d(440)$ 与TSM浓度的拟合效果相对较好,其次是ISM和OSM浓度,拟合关系均普遍较差(图3d、e、f),这与太湖2007年6月的研究结果一致^[23],这可能是由于样本数相对较少,需在后续研究中增加样本数.春季随着水温升高、光照时数增长,入湖河流径流量增加且携带流域内大量泥沙、农耕区农田退水和生活污水等无机颗粒物.在该区自然降水少、春季多大风的条件下,湖心区水面开阔,底泥容易发生再悬浮,非藻类颗粒物在TSM中占优势.同时,东北地区5月气温相对南方仍较低,为春、夏交替季节,藻类正处于生长期且降解产物少,一方面在湖水冬季长期低温和冰封的条件下,本身换水周期长,少量藻类降解产物等有机颗粒物积累且含量稳定;另一方面气温的变化导致湖水水流垂直对流扰动加强,也是非藻类颗粒物为主导组分的原因之一.

总体而言,1[#]~10[#]点位TSM、OSM、ISM、DOC和Chl. a浓度均值均高于11[#]~20[#]点位, $a_d(440)$ 最大值出现在6[#]点位,最小值出现在19[#]点位(图2),大、小兴凯湖 $a_d(440)$ 无显著差异(图3b).小兴凯湖西北部为“857”、“856”等国营农场,生活污水、农田退水通过河道和排干流入小兴凯湖,再加上小兴凯湖鱼类人工养殖及周围旅游业的发展,都对水体产生了严重污染.另外,穆棱河流域已形成冲沟较为严重的水土流失区^[22],也给小兴凯湖带来大量无机物.1[#]~10[#]点位的 $a_d(440)$ 最小值出现在1[#]点位,湖岗在大兴凯湖一侧形成沙滩景观,在小兴凯湖一侧多沼泽,1[#]点位距各入湖河流及排干口较远;11[#]~20[#]点位的 $a_d(440)$ 最大值出现在17[#]点位,靠近新开流,其附近有兴凯湖水产养殖场、长林子捕鱼组,最小值出现在19[#]点位,靠近一闸口.1[#]~20[#]点位非藻类颗粒物在400~700 nm按指数衰减规律拟合斜率 S_d 值的变化范围为0.0043~0.0053 nm⁻¹,平均值为0.0048±0.0003 nm⁻¹,决定系数 R^2 均在0.96以上.

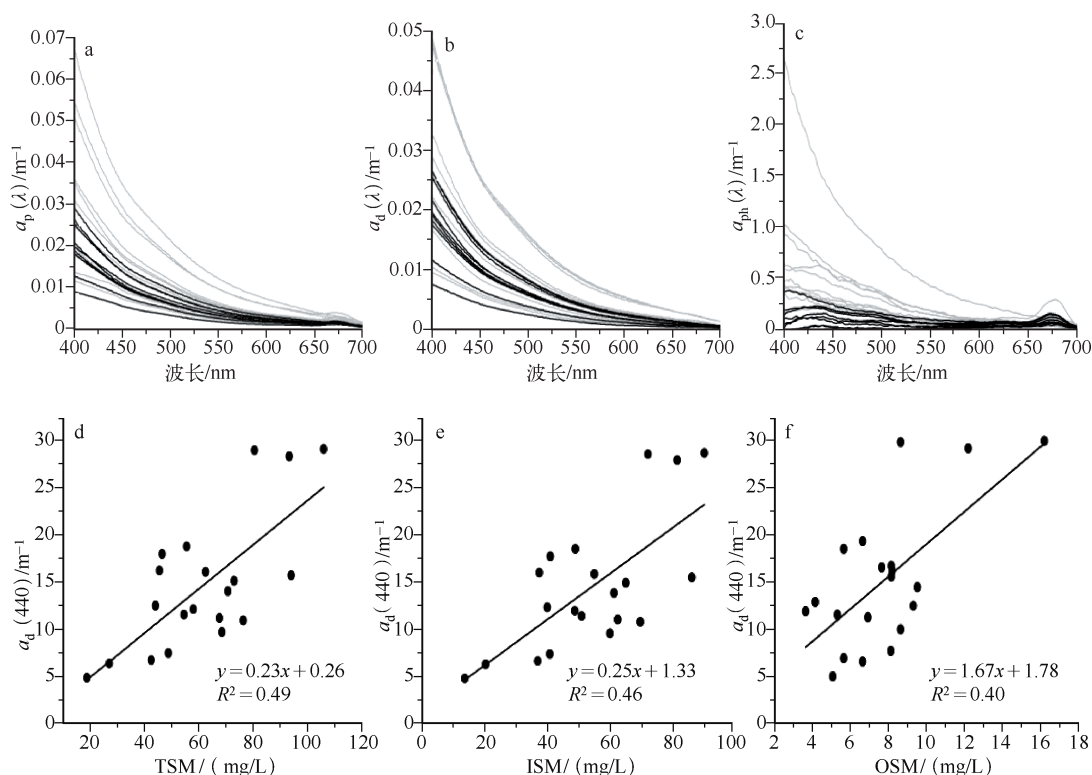


图3 兴凯湖水体 $a_p(\lambda)$ 、 $a_d(\lambda)$ 和 $a_{ph}(\lambda)$ 的吸收光谱(灰色代表1[#]~10[#]样点,黑色代表11[#]~20[#]样点,下同); $a_d(440)$ 与TSM、ISM、OSM浓度的相关性

Fig. 3 Absorption spectra of $a_p(\lambda)$, $a_d(\lambda)$, $a_{ph}(\lambda)$;

Correlation coefficients between $a_d(440)$ and TSM, ISM, OSM concentrations of Lake Xingkai

3.3 浮游植物色素颗粒物的吸收光谱特征

兴凯湖 1[#]~20[#] 点位色素颗粒物浓度较低, 675 nm 处有不明显的吸收峰, 部分点位在 440 nm 呈现浅显的吸收峰(图 2 和 3c), 表现出藻类吸收特征, 与乐成峰等^[31] 对太湖梅梁湾 2007 年春、秋季部分点位的研究结果一致, 且总体上大兴凯湖色素浓度低于小兴凯湖. $a_{ph}(440)$ 、 $a_{ph}(675)$ 均值分别为 0.32 ± 0.34 、 $0.10 \pm 0.058 \text{ m}^{-1}$; $a_{ph}(440)$ 、 $a_{ph}(675)$ 与 Chl. a 浓度均呈极显著相关(表 1). 由于 440 nm 处受其他辅助色素的影响, Chl. a 浓度与 $a_{ph}(675)$ 的拟合关系较 $a_{ph}(440)$ 好(图 4). 两个拟合皆存在异常值, 一方面可能是由于定量滤膜技术测量颗粒物吸收时, 路径放大因子 β 值随颗粒物构成(粒径大小、有机或者无机成分)不同而变化, 可达 20%~30%, 对于无机颗粒物含量大的样本, 光的多次散射对测量结果产生影响更大^[32]; 另一方面, 兴凯湖浮游植物分布具有空间异质性, 图 4a、b 中异常值分别出现在 1[#] 和 6[#] 点位, 6[#] 点位色素组成多为辅助色素, 1[#] 点位为 Chl. a 主导. $a_{ph}(675)$ 与 TSM 浓度呈正相关, 与 ISM 浓度呈显著负相关(表 1). 由于春季气温较低, 水体藻类少且处于生长期, 无机颗粒物浓度愈大, 色素等有机颗粒物浓度所占比例愈小. 蓝红比 $a_{ph}(440)/a_{ph}(675)$ 在一定程度上可以反映辅助色素与 Chl. a 浓度的组成比例, 南海北部水体的 $a_{ph}(440)/a_{ph}(675)$ 为 1.69~5.19, 色素蓝红比在外海的上层水体较大, 在近岸水体较小^[33]. 1[#]~20[#] 点位 $a_{ph}(440)/a_{ph}(675)$ 介于 0~13.33 之间, 均值为 3.4 ± 3.3 , 高于 6 月太湖均值(2.95)^[23] 和石头口门水库均值(1.88)^[34], 表明兴凯湖水体浮游植物色素较单一, 由于东北冬季湖水封冻期较长, 春季为藻类的生长期, 兴凯湖浮游植物以适应低温环境的硅藻为主^[35], 色素颗粒物本身浓度较小. 色素颗粒物的比吸收系数($a_{ph}^*(\lambda) = a_{ph}(\lambda)/\text{Chl. a}$)是水体光学模型构建的重要参数^[36], 色素打包效应和色素成分被认为是影响浮游植物比吸收系数的主要因素^[37-38]. 兴凯湖 1[#]~20[#] 点位 $a_{ph}^*(440)$ 为 $0.23 \pm 0.20 \text{ m}^2/\text{mg}$ (0~0.7897 m^2/mg), 高于加利福尼亚南部海区(0.041 m^2/mg)^[38]、滇池($0.041 \pm 0.012 \text{ m}^2/\text{mg}$)^[22]、Erie 湖(0.086 m^2/mg)^[39]、太湖($0.068 \pm 0.057 \text{ m}^2/\text{mg}$)^[40]. 兴凯湖 1[#]~20[#] 点位 $a_{ph}^*(675)$ 为 $0.09 \pm 0.05 \text{ m}^2/\text{mg}$, 高于太湖($0.028 \pm 0.020 \text{ m}^2/\text{mg}$)^[40] 和珠江口及广东沿海(0.030 m^2/mg)^[41], 反映不同水体色素颗粒物吸收差异. 针对春季兴凯湖水体的 Chl. a 浓度三波段算法, λ_1 应为与 Chl. a 浓度相关性最大的波段, 为 693 nm(相关系数为 $R^2 = 0.91$), λ_2 、 λ_3 分别为 698、705 nm.

小兴凯湖西北部为农业耕作区, 尤其在近几年的旅游业及渔业发展的带动下, 沿岸及入湖河流携带大量营养物质, 促进浮游植物的生长, 水生植物系统较大兴凯湖发达. 根据图 2, 5[#] 点位未表现出藻类吸收特征, 营养盐浓度低. 兴凯湖 Chl. a 浓度最大值出现在泄洪一闸附近的 1[#] 点位, 营养盐的聚积使浮游植物增加; 最小值出现在 11[#] 点位, 位于新开流与一闸之间, 与小湖没有闸口, 营养盐流动较弱. 1[#]~10[#] 点位 Chl. a 浓度最小值出现在 8[#] 点位, 距离农业排干口较远. 11[#]~20[#] 点位 Chl. a 浓度最大值出现在 20[#] 点位, 位于白泡子排干口处, 农田退水和生活污水的排入带来较多营养盐, 浮游植物大量生长.

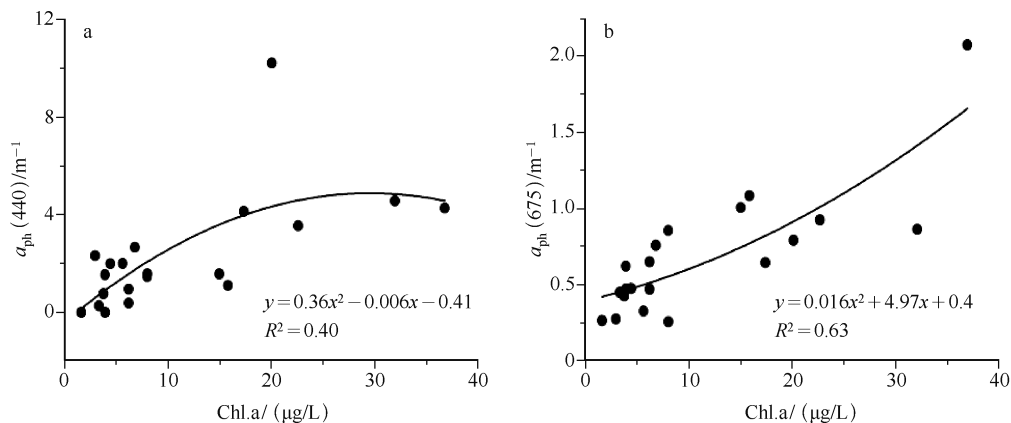


图 4 $a_{ph}(440)$ 、 $a_{ph}(675)$ 与 Chl. a 浓度的相关性

Fig. 4 Correlation coefficients between $a_{ph}(440)$, $a_{ph}(675)$ and Chl. a concentration

3.4 CDOM 的吸收光谱特征

3.4.1 CDOM 的吸收 CDOM 包括 DOC 中有色部分的 60% 以上,占到可溶性有机物质的 10%~90%,CDOM 和 DOC 无色部分均来源于地表径流的陆源输入和浮游植物降解^[42-43]. 由于 CDOM 成分复杂,难以确认其浓度,常用 355、375、400、440 nm 等波长处的吸收系数来表征 CDOM 的浓度^[44]. 由于 CDOM 吸收集中在紫外短波段,本文对兴凯湖水体 CDOM 250~700 nm 波段的吸收特性进行分析,发现其呈指数衰减(图 5a). $a_g(440)$ 介于 $0.37 \sim 2.17 \text{ m}^{-1}$ 之间,均值为 $1.19 \pm 0.54 \text{ m}^{-1}$,与 4、6 月份太湖、巢湖^[17] 样点间差异较大. $a_g(440)$ 吸收系数与 Chl. a、DOC 浓度均无显著相关性(表 1),与前人研究结果有所差异^[16],表明兴凯湖水体 DOC 中无色部分所占比例高. 由于兴凯湖春季藻类浓度低,无色 DOC 的主要来源不是浮游植物降解产物,而是河流的陆源性输入,随着东北地区 5 月气温、光照时数增加,紫外辐射的增强也促进了 CDOM 的光化学降解作用,提高无色 DOC 的比例. 兴凯湖 1[#]~10[#]、11[#]~20[#] 点位的 $a_g(440)$ 分别为 1.34 ± 0.44 、 $1.04 \pm 0.6 \text{ m}^{-1}$,最大值出现在 13[#] 点位,最小值出现在 11[#] 和 12[#] 点位. 13[#] 点位位于龙王庙和松阿察河出口处,松阿察河为兴凯湖唯一出口,大量陆源输入的 CDOM 积聚在此;而 11[#] 点位 Chl. a 浓度最小,其与大小湖的闸口距离较远;12[#] 点位在当壁镇附近,无农田污水排干口, $a_g(440)$ 较低. 1[#]~10[#] 点位东侧点位 $a_g(440)$ 高于西侧,最大值出现在 3[#] 点位,最小值出现在 9[#] 和 10[#] 点位(图 6),主要是因为小兴凯湖东侧不仅有农田排干入湖口,而且流域内流经虎林市的东地河携带大量城市污水注入此湖.

CDOM 的分子量 $M(a_g(250)/a_g(365))$ (简称为 $M_{250/365}$) 可反映腐殖酸和富里酸在 CDOM 中的比例, M 值越大,腐殖酸所占比例越低^[45]. 兴凯湖 $M_{250/365}$ 变化范围为 $5.55 \sim 8.99$ (均值为 7.38 ± 0.99),均值低于太湖梅梁湾冬季水体(8.09 ± 0.56)^[16] 和巢湖(8.66 ± 0.088)^[17]. 由于 CDOM 的陆源为河流携带有机成分的输入,使腐殖酸的比例偏大^[46]. 兴凯湖穆棱河流域等集水区多为农业耕作区,大量输入有机成分且春季浮游植物处于生长期,色素浓度较太湖和巢湖低,表现为兴凯湖水体腐殖酸所占比例相对较高.

3.4.2 CDOM 吸收曲线的拟合函数斜率值 S_g 与特征波长吸收系数的关系 S_g 值反映水体中 CDOM 含量的高低,其值的大小与波段选取的范围和 CDOM 组成有关,光谱微分能够很好地描述光谱斜率随波段的变化情况^[17]. 利用最小二乘法,计算 CDOM 吸收曲线在 250~500 nm 波段的拟合函数斜率 S_g ,其均值为 $0.3161 \pm 0.1278 \text{ nm}^{-1}$. 总体上高于 4 月太湖 S_g 值($0.0171 \sim 0.0032 \text{ nm}^{-1}$)^[47],这一方面可能是由于参考波长和拟合波段选择的不同导致计算出的 S_g 值在不同水体或同一水体间存在差异^[46],另一方面可能是由于不同水体 CDOM 组成及来源不同. 本研究选取 250~290、290~320、320~400、400~500 nm 波段计算指数函数斜率值 S_g (图 5b),不同波段内 S_g 值差异较大,且 S_g 值随波长的增加而减小,与前人的研究结论一致^[48-50]. 将 250~290、290~320、320~400 和 400~500 nm S_g 值与 $a_g(440)$ 进行回归分析,其相关系数分别为 0.54、0.57、0.79 和 0.91,选择相关性较好的 320~400、400~500 nm 处进行函数拟合(图 7),发现均存在较好的二次函数关系

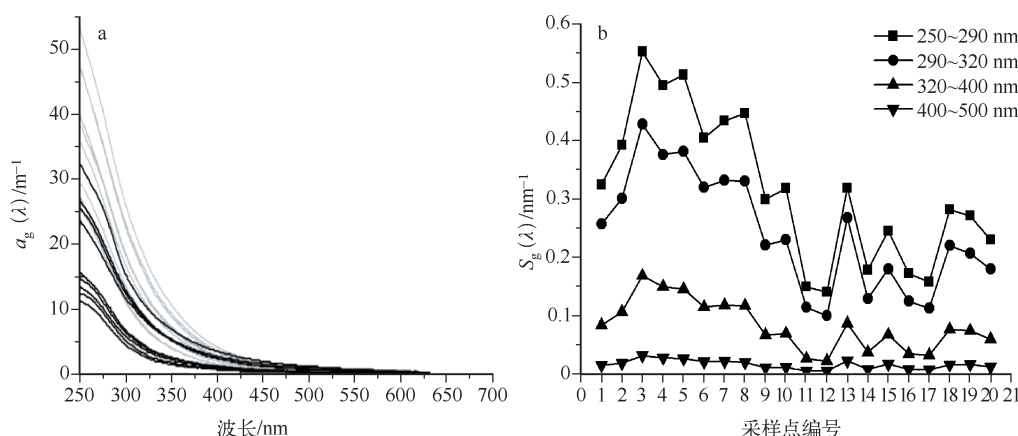


图 5 CDOM 的光谱吸收曲线(a);各波段 CDOM 吸收光谱拟合波段的斜率 S_g (b)

Fig. 5 Absorption spectra of CDOM(a); Shape factor S_g of CDOM absorption spectra from bonds(b)

($R^2 = 0.62, R^2 = 0.83$). 针对 CDOM 的遥感反演, 如 QAA 算法中光谱斜率 S 值应相应增大.

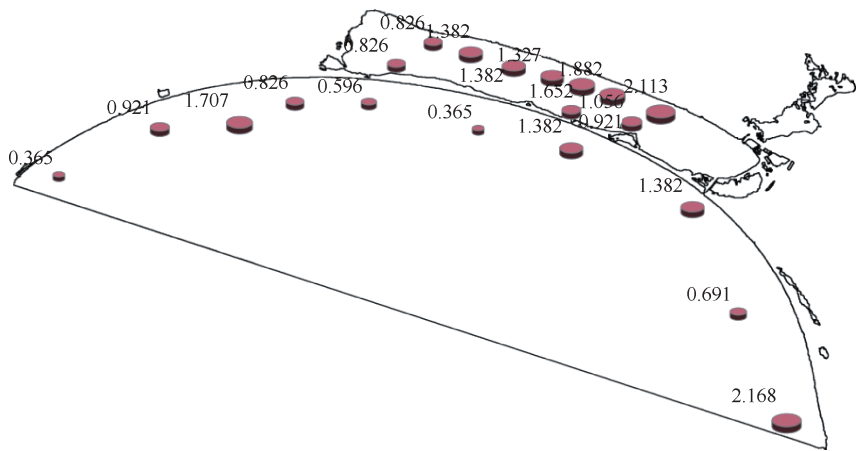


图 6 兴凯湖所有点位 $a_g(440)$ 值的空间分布

Fig. 6 Distribution of $a_g(440)$ of all the sampling sites in Lake Xingkai

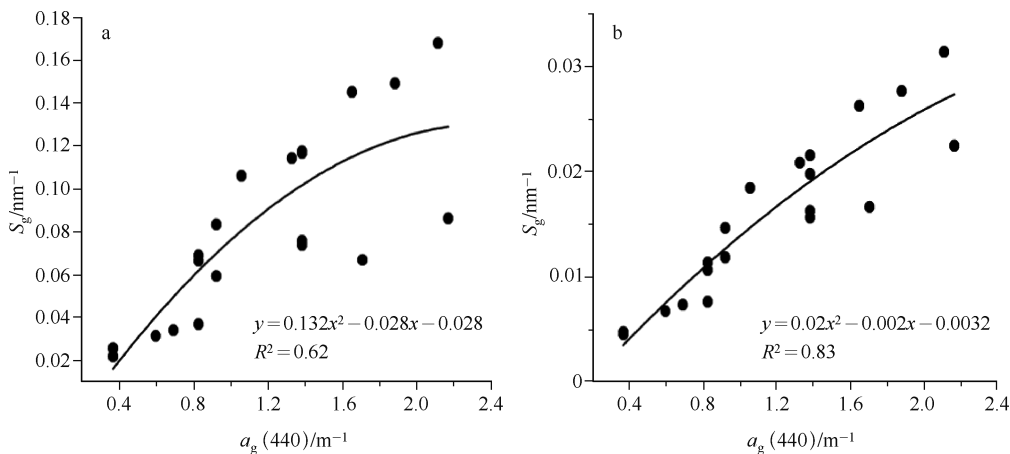


图 7 两种波段下 $a_g(440)$ 与 S_g 的关系 (a: 320 ~ 400 nm; b: 400 ~ 500 nm)

Fig. 7 Relationship between $a_g(440)$ and S_g under two bands (a: 320 ~ 400 nm; b: 400 ~ 500 nm)

3.5 各组分对水体总吸收系数的贡献

水体各组分的吸收贡献率可衡量太阳辐射的有效利用率和水体组分对光的衰减程度, 根据线性叠加原理, 水体总吸收系数是各个水色因子吸收系数的和:

$$a(\lambda) = a_d(\lambda) + a_{ph}(\lambda) + a_g(\lambda) + a_w(\lambda) \tag{5}$$

式中, $a_w(\lambda)$ 为纯水的吸收系数. 由于纯水的吸收系数为常数^[51], 本文以非藻类颗粒物、色素颗粒物和 CDOM 的吸收系数为总吸收系数, 研究在 PAR 波段内分析不同组分吸收系数的贡献率 (图 8a). 总体上, 兴凯湖 1# ~ 20# 点位水体各组分吸收系数贡献率为非藻类颗粒物 > 色素颗粒物 > CDOM, CDOM 的贡献主要集中于紫外短波波段, 非藻类颗粒物的贡献率始终大于 50%, 表明兴凯湖水体非藻类颗粒物的吸收和散射是 PAR 波段光衰减的主要因子. 约 550 nm 处, 由于叶绿素 a 的吸收, 非藻类颗粒物的贡献曲线逐渐下降, 直至 670 nm 附近到达最低谷后逐渐上升, 色素颗粒物的贡献曲线与非藻类颗粒物的贡献曲线走势相反, 表明春季兴凯湖 5 月水体色素含量单一并以叶绿素 a 为主. 非藻类颗粒物和 CDOM 的吸收集中于短波段并呈指数

递减,其贡献率曲线在约 675 nm 后出现不稳定的增幅,可能是仪器的噪声所致.

选取各点位 PAR 蓝光(400 ~ 500 nm)、绿光(500 ~ 600 nm)、红光(600 ~ 700 nm)的特征波长 440、550、675 nm(图 8b、c、d),进行各组分贡献率的研究. 蓝光波段小兴凯湖色素贡献大于 CDOM,主要受农业退水和生活污水的影响;大兴凯湖靠近松阿察河的 13[#]点位 CDOM 的贡献大于色素. 绿光波段小兴凯湖点位色素贡献大于 CDOM,大兴凯湖点位 CDOM 贡献大于小湖;红光波段处色素贡献率比例大,主要是因为非藻类颗粒和 CDOM 贡献集中于短波段,点位 1[#]、18[#]、19[#]、20[#]的色素贡献率相对最大,其中 18[#]、19[#]、20[#]点位分别位于一闸口、二闸口和白泡子排干附近,陆源输入较多营养盐.

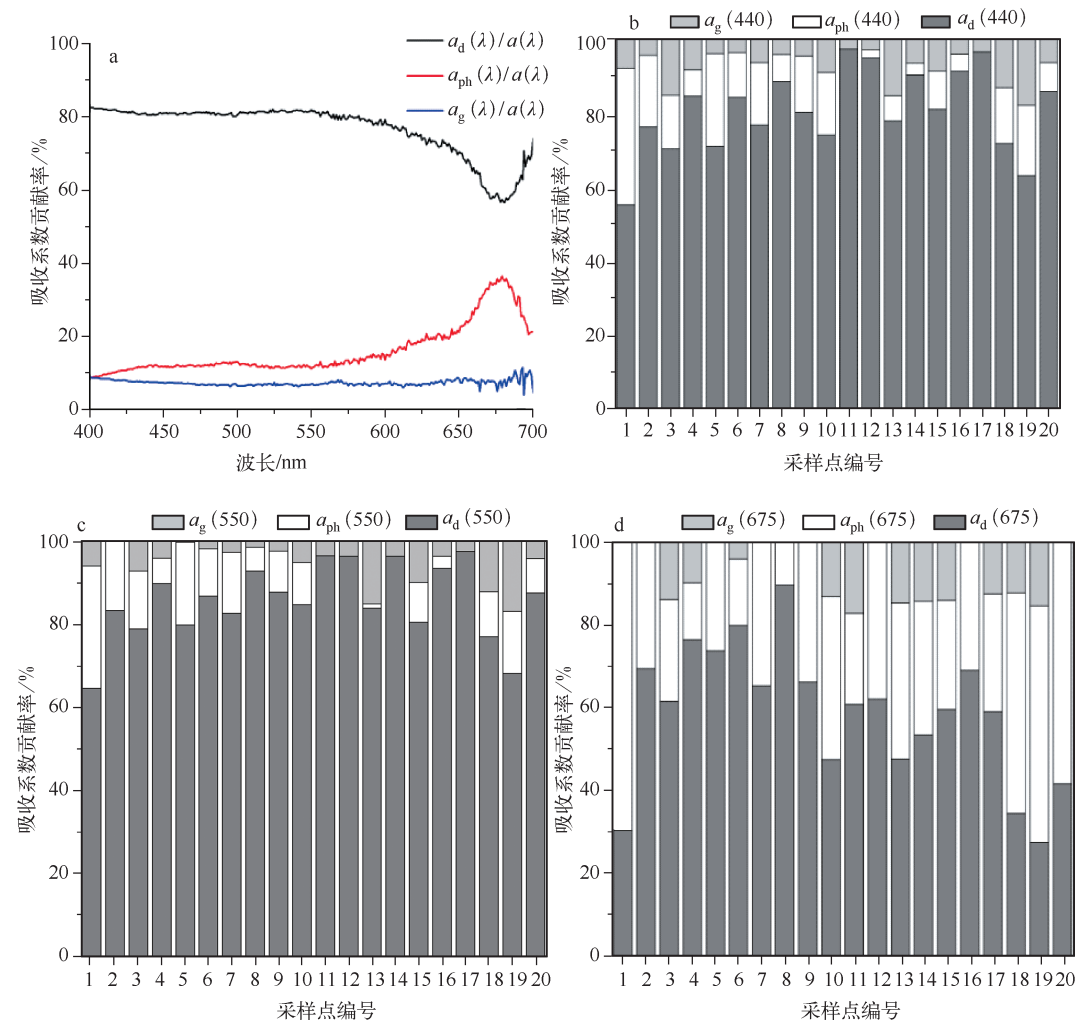


图 8 兴凯湖所有点位各组分平均吸收系数贡献率(a);400 ~ 500 nm(b)、500 ~ 600 nm(c)和 600 ~ 700 nm(d)波段各组分平均吸收系数贡献率

Fig. 8 The average absorption contribution(a); The average absorption contribution over the range of 400 - 500 nm(b), 500 - 600 nm(c) and 600 - 700 nm(d) in all the sampling sites of Lake Xingkai

4 结论

春季兴凯湖 TMS 吸收光谱特征与非藻类颗粒的吸收光谱特征相似,总体上 $a_d(\lambda)$ 大于 $a_{ph}(\lambda)$,颗粒物以非藻类颗粒物为主,总贡献率为非藻类颗粒物 > 色素颗粒物 > CDOM,且非藻类贡献率始终在 50% 以上,

说明非藻类颗粒物为兴凯湖光衰减的主导因子. TMS 的吸收光谱在 675 nm 附近出现不明显的吸收峰, 蓝红比 $a_{ph}(440)/a_{ph}(675)$ 介于 0 ~ 13.33 之间, 均值为 3.4 ± 3.3 , 表明兴凯湖藻类色素较为单一. 兴凯湖 1[#] ~ 20[#] 点位 $a_{ph}^*(440)$ 为 $0.23 \pm 0.20 \text{ m}^2/\text{mg}$ ($0 \sim 0.7897 \text{ m}^2/\text{mg}$), $a_{ph}^*(670)$ 为 $0.09 \pm 0.05 \text{ m}^2/\text{mg}$. 非藻类颗粒物 $a_d(440)$ 为 $14.67 \pm 7.19 \text{ m}^{-1}$, 400 ~ 700 nm 指数函数斜率 S_d 为 $0.0048 \pm 0.0003 \text{ nm}^{-1}$; $a_g(440)$ 为 $1.19 \pm 0.54 \text{ m}^{-1}$, $M_{250/365}$ 均值为 7.38 ± 0.99 . 选取 250 ~ 290、290 ~ 320、320 ~ 400、400 ~ 500 nm 波段计算指数函数斜率值 S_g , 并与 $a_g(440)$ 进行回归分析, 结果表明 400 ~ 500 nm 处 R^2 最大, 存在较好的二次函数关系. $a_p(440)$ 、 $a_d(440)$ 与 TSM、ISM 和 OSM 浓度的相关性均较好, 与 Chl. a 浓度的相关性较差; $a_g(440)$ 与 Chl. a、DOC 浓度均无显著相关性, 说明兴凯湖水体 DOC 中以无色 DOC 为主, CDOM 主要来源于陆源输入. 总体上小兴凯湖 TSM、ISM、OSM、Chl. a、DOC 浓度和 $a_p(440)$ 、 $a_d(440)$ 、 $a_{ph}(440)$ 、 $a_g(440)$ 均高于大兴凯湖. 蓝光和绿光波段, 小兴凯湖点位色素贡献率高于 CDOM, 大兴凯湖点位色素贡献率几乎均低于 CDOM, 小兴凯湖水水质受农田退水、渔业、旅游业的影响较大.

5 参考文献

- [1] Zibordi G, Berthon JF, Mélin F *et al.* Validation of satellite ocean color primary products at optically complex coastal sites: Northern Adriatic Sea, Northern Baltic Proper and Gulf of Finland. *Remote Sensing of Environment*, 2009, **113**: 2574-2591.
- [2] Zhang Y, Liu M, Qin B *et al.* Modeling remote-sensing reflectance and retrieving chlorophyll-a concentration in extremely turbid case-2 waters (Lake Taihu China). *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2009, **47**(7): 1937-1948.
- [3] Zimba PV, Gitelson AA. Remote estimation of chlorophyll concentration in hyper-eutrophic aquatic systems: Model tuning and accuracy optimization. *Continental Shelf Research, Aquaculture*, 2006, **256**: 272-286.
- [4] Gitelson AA, Schalles JF, Hladik CM. Remote chlorophyll-a retrieval in turbid, productive estuaries: Chesapeake Bay case study. *Remote Sensing of Environment*, 2007, **109**(4): 464-472.
- [5] Gitelson AA, Gurlin D, Moses WJ *et al.* A bio-optical algorithm for the remote estimation of chlorophyll-a concentration in case 2 waters. *Environmental Research Letters*, 2009, **4**(4): 045003.
- [6] Gons HJ, Rijkeboer M, Ruddick KG. A chlorophyll-retrieval algorithm for satellite imagery (medium resolution imaging spectrometer) of inland and coastal waters. *Journal of Plankton Research*, 2002, **24**(9): 947-951.
- [7] Brando VE, Dekker AG. Satellite hyperspectral remote sensing for estimating estuarine and coastal water quality. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2003, **41**(6): 1378-1387.
- [8] Song K, Li L, Tedesco LP *et al.* Remote estimation of chlorophyll-a in turbid inland waters: Three-band model versus GA-PLS model. *Remote Sensing of Environment*, 2013, **136**: 342-357.
- [9] 马荣华, 唐军武. 湖泊水质遥感参数获取与算法分析. *水科学进展*, 2006, **17**(5): 720-726.
- [10] Siegel DA, Michaels AF. Quantification of non-algal light attenuation in the Sargasso Sea: Implications for biogeochemistry and remote sensing. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 1996, **43**(2): 321-345.
- [11] Zhang Y, Zhang B, Wang X *et al.* A study of absorption characteristics of chromophoric dissolved organic matter and particles in Lake Taihu, China. *Hydrobiologia*, 2007, **592**(1): 105-120.
- [12] D'Sa EJ, Miller RL. Bio-optical properties in waters influenced by the Mississippi River during low flow conditions. *Remote Sensing of Environment*, 2003, **84**(4): 538-549.
- [13] Lee ZP, Carder KL. Absorption spectrum of phytoplankton pigments derived from hyperspectral remote-sensing reflectance. *Remote Sensing of Environment*, 2004, **89**(3): 361-368.
- [14] Lakhtaki A, Varadan VK, Varadan VV. Scattering and absorption characteristics of lossy dielectric, chiral, nonspherical objects. *Applied Optics*, 1985, **24**(23): 4146-4154.
- [15] Darecki M, Weeks A, Sagan S *et al.* Optical characteristics of two contrasting case 2 waters and their influence on remote sensing algorithms. *Continental Shelf Research*, 2003, **23**: 237-250.
- [16] 张运林, 秦伯强, 杨龙元. 太湖梅梁湾水体悬浮颗粒物和 CDOM 的吸收特性. *生态学报*, 2006, **26**(12): 3970-3979.
- [17] 施坤, 李云梅, 王桥等. 太湖、巢湖水体 CDOM 吸收特性和组成的异同. *环境科学*, 2010, **31**(5): 1183-1191.

- [18] 刘东兴. 浅析兴凯湖湿地保护. 东北水利水电, 2009, **6**: 50-52.
- [19] Arar EJ, Collins GB. Method 445.0: In vitro determination of chlorophyll a and pheophytin a in marine and freshwater algae by fluorescence. United States Environmental Protection Agency, Office of Research and Development, National Exposure Research Laboratory, 1997.
- [20] Bricaud A, Stramski D. Spectral absorption coefficients of living phytoplankton and non-algal biogenous matter: A comparison between the Peru upwelling area and the Sargasso Sea. *Limnology and Oceanography*, 1990, **35**: 562-582.
- [21] Mitchell BG, Kahru M, Wieland J *et al.* Determination of spectral absorption coefficients of particles, dissolved material and phytoplankton for discrete water samples. *Ocean Optics Protocols for Satellite Ocean Color Sensor Validation. Revision*, 2002, **3**: 231-257.
- [22] 张红, 黄家柱, 李云梅等. 滇池水体光学物质的吸收特性研究. 环境科学, 2011, **32**(2): 452-463.
- [23] 马荣华, 段洪涛, 唐军武等. 湖泊水环境遥感. 北京: 科学出版社, 2010.
- [24] 王远东, 刘殿伟, 宋开山等. 吉林省查干湖水体悬浮颗粒物光谱吸收特性研究. 光谱学与光谱分析, 2011, **31**(1): 162-167.
- [25] 李方, 徐京萍, 何艳芬等. 长春市石头口门水库颗粒物光谱吸收特性. 湖泊科学, 2009, **21**(2): 280-287. DOI 10.18307/2009.0218.
- [26] 朴德雄, 王凤昆. 兴凯湖水环境状况及其保护对策. 湖泊科学, 2011, **23**(2): 196-202. DOI 10.18307/2011.0206.
- [27] 柳彩霞, 郭子祺, 张宝钢等. 太湖流域昆承湖春季颗粒物和有色可溶性有机物吸收特性. 湖泊科学, 2011, **23**(5): 773-782. DOI 10.18307/2011.0516.
- [28] Babin M, Stramski D, Ferrari GM *et al.* Variations in the light absorption coefficients of phytoplankton, nonalgal particles, and dissolved organic matter in coastal waters around Europe. *Journal of Geophysical Research*, 2003, **108**(C7): 1-4.
- [29] Roesler CS, Perry MJ, Carder KL. Modeling in situ phytoplankton absorption from total absorption spectra in productive inland marine waters. *Limnology and Oceanography*, 1989, **34**(8): 1510-1523.
- [30] Loisels H, Morel A. Light scattering and chlorophyll concentration in case 1 waters: A reexamination. *Limnology and Oceanography*, 1998, **43**(5): 847-858.
- [31] 乐成峰, 李云梅, 查勇等. 太湖梅梁湾水体组分吸收特性季节差异分析. 环境科学, 2008, **29**(9): 2448-2455.
- [32] 张亭禄, 徐青娜, 陈树果等. 海水吸收光谱测量方法比较——定量滤膜技术和现场测量方法. 中国海洋大学学报, 2011, **41**(7/8): 164-169.
- [33] 王桂芬, 曹文熙, 许大志等. 南海北部水体浮游植物比吸收系数的变化. 热带海洋学报, 2005, **24**(5): 1-10.
- [34] 徐京萍. 石头口门水库水体光学特性及水色物质遥感反演研究[学位论文]. 长春: 中国科学院东北地理与农业生态研究所, 2009.
- [35] 袁翔翔, 于洪贤, 姜明. 小兴凯湖浮游植物群落结构及多样性. 湿地科学, 2013, **11**(2): 151-157.
- [36] Bricaud A, Babin M, Morel A *et al.* Variability in the chlorophyll specific absorption coefficients of natural phytoplankton: Analysis and parameterization. *Journal of Geophysical Research*, 1995, **100**(C7): 13321-13332.
- [37] Kirk JTO. Light and photosynthesis in aquatic ecosystems. Cambridge: Cambridge University Press, 1994: 1-431.
- [38] Millán-Núñez E, Sieracki ME, Millán-Núñez R *et al.* Specific absorption coefficient and phytoplankton biomass in the southern region of the California Current. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 2004, **51**(6): 817-826.
- [39] Binding CE, Jerome JH, Bukata RP *et al.* Spectral absorption properties of dissolved and particulate matter in Lake Erie. *Remote Sensing of Environment*, 2008, **112**(4): 1702-1711.
- [40] 孙德勇, 李云梅, 王桥等. 太湖水体中悬浮颗粒物的比吸收光谱特性及其参数化分析. 环境科学学报, 2009, **29**(9): 1820-1829.
- [41] 邢小罡, 赵冬至, 刘玉光等. 渤海非色素颗粒物和黄色物质的吸收特性研究. 海洋环境科学, 2008, **27**(6): 595-598.
- [42] Song K, Liu D, Li L *et al.* Spectral absorption properties of colored dissolved organic matter (CDOM) and total suspended matter (TSM) of inland waters. *Proceedings of the International Society for Optical Engineering*, 2010, **7811**: 78110B.
- [43] Zhang YL, Yin Y, Feng LQ *et al.* Characterizing chromophoric dissolved organic matter in Lake Tianmuhu and its catchment basin using excitation emission matrix fluorescence and parallel factor analysis. *Water Research*, 2011, **45**(16): 5110-5122.
- [44] Del Castillo CE, Coble PG. Seasonal variability of the colored dissolved organic matter during the 1994-95 NE and SW

- monsoons in the Arabian Sea. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 2000, **47**(7): 1563-1579.
- [45] De Haan H. Solar UV-light penetration and photodegradation of humic substances in peaty lake water. *Limnology and Oceanography*, 1993, **38**(5): 1072-1076.
- [46] 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): 4277-4304.
- [47] Kowalczyk PA, Stedmon C, Markager S. Modeling absorption by CDOM in the Baltic Sea from salinity and chlorophyll. *Marine Chemistry*, 2006, **101**(1): 1-11.
- [48] Spencer RGM, Butler KD, Aiken GR. Dissolved organic carbon and chromophoric dissolved organic matter properties of rivers in the USA. *Journal of Geophysical Research*, 2012, **117**: G3.
- [49] Zhang Y, Qin B, Zhu G *et al.* Chromophoric dissolved organic matter(CDOM) absorption characteristics in relation to fluorescence in Lake Taihu, China, a large shallow subtropical lake. *Hydrobiologia*, 2007, **581**(1): 43-52.
- [50] Zhang Y, Qin B, Zhang L *et al.* Spectral absorption and fluorescence of chromophoric dissolved organic matter in shallow lakes in the middle and lower reaches of the Yangtze River. *Journal of Freshwater Ecology*, 2005, **20**(3): 451-459.
- [51] 刘忠华, 李云梅, 吕恒等. 太湖春季水体固有光学特性及其对遥感反射率变化的影响. *生态学报*, 2012, **32**(2): 438-447.