

长江中下游大型湖泊水体固有光学特性：I . 吸收*

王长凤^{1,2}, 段洪涛¹, 马荣华¹, 张玉超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, 南京 210008)

(2: 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 吸收系数是水体固有光学特性的重要组成部分,也是构建水色参数高精度遥感模型的基础,具有重要的研究意义. 本文针对长江中下游三大淡水湖——鄱阳湖(2010-10, 2011-08)、太湖(2008-10, 2011-08)和巢湖(2009-10)进行5次野外实验,以 International Ocean Colour Coordinating Group (IOCCG) 2000年报告“Remote Sensing of Ocean Colour in Coastal, and Other Optically-Complex, Waters”为基础,对水体不同光学主导类型进行分类;并根据 a_d (非色素颗粒物吸收)、 a_{ph} (浮游植物色素吸收)、 a_g (有色可溶性有机物吸收)等不同主导类型光谱曲线特征差异,引入 a_{d-g} (主导类型 a_d 、 a_g 、 a_d-a_g 的合并类型)和 $a_{ph-related}$ (主导类型 a_d-a_{ph} 、 $a_d-a_{ph}-a_g$ 的合并类型)类型,对主导类型进行归纳合并. 结果显示:秋季,鄱阳湖、太湖、巢湖的主导类型较为单一,分别为 a_d 、 a_d-a_g 、 $a_d-a_{ph}-a_g$;夏季,鄱阳湖和太湖同为两种类型共同主导,分别为 a_d 、 a_d-a_g 、 $a_d-a_{ph}-a_g$ 、 a_d-a_{ph} . 总体来说,鄱阳湖夏、秋季和太湖秋季主导类型都属于 a_{d-g} 类型,而太湖夏季和巢湖秋季则属于 $a_{ph-related}$ 类型. 另外,分别针对 Gons 和 Gitelson 叶绿素 *a* 模型假设条件进行验证,发现不同湖泊水体及不同主导类型下其适用性程度不一致.

关键词: 水色遥感;固有光学特性;吸收系数;主导类型

Inherent optical properties of large lakes in the middle-lower reaches of the Yangtze River: I . Absorption

WANG Changfeng^{1,2}, DUAN Hongtao¹, MA Ronghua¹ & ZHANG Yuchao¹

(1: State Key Laboratory of Lake Science and Environment, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, P. R. China)

(2: University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, P. R. China)

Abstract: Absorption coefficient has important scientific significance, acting as not only an important part of the inherent optical properties of waters, but also as the physical basis to build a bio-optical model. In this paper, dominant types of waters' absorption coefficient were classified and analyzed with the method of “Remote Sensing of Ocean Colour in Coastal, and Other Optically-Complex, Waters (IOCCG)” based on the *in situ* measurements during the period of 2008-2011 of three freshwater lakes (Lake Poyang, Lake Taihu and Lake Chaohu) in the middle-lower reaches of the Yangtze River. Because of the spectrals of a_d (non-pigment particles absorption), a_{ph} (phytoplankton pigment absorption), a_g (colored dissolved organic matter absorption) are greatly different, we consolidated the dominant types of IOCCG as type a_{d-g} and type $a_{ph-related}$. Results show that: 1) In autumn, the dominant type of Lake Poyang, Lake Taihu and Lake Chaohu is a_d , a_d-a_g , $a_d-a_{ph}-a_g$, respectively; In summer, Lake Poyang and Lake Taihu are co-led by two dominant types, they are a_d , a_d-a_g and $a_d-a_{ph}-a_g$, a_d-a_{ph} . 2) Both dominant-type in summer, autumn of Lake Poyang and in autumn of Lake Taihu are a_{d-g} ; however, Lake Taihu in summer and Lake Chaohu in autumn have the $a_{ph-related}$ dominant-type. 3) For the Gons and Gitelson algorithms and their assumptions, the applicability conditions are found inconsistency in different lake water and different dominant types.

Keywords: Water color remote sensing; IOPs; absorption coefficient; dominant-type

* 中国科学院知识创新工程重要方向性项目(KZCX2-EW-QN308)、国家自然科学基金项目(40801137, 40871168)和中国科学院南京地理与湖泊研究所“一三五”项目(NIGLAS2012135014, NIGLAS2012135010)联合资助. 2012-11-16 收稿; 2013-02-06 收修改稿. 王长凤, 男, 1987年生, 硕士研究生; E-mail: wangchangfeng0506@163.com.

长江中下游地区以地势平坦、河湖众多、水网稠密为其主要自然景观特征,素有“水乡泽国”之称,面积在 1.0 km^2 以上的湖泊有 598 个,合计面积 $1.53 \times 10^4 \text{ km}^2$,平均湖泊率约为 9.6%,是我国淡水湖泊数量最多、分布最为密集的地区^[1-3]. 享有盛誉的中国五大淡水湖——鄱阳湖、洞庭湖、太湖、洪泽湖和巢湖,除洪泽湖位于淮河流域外,其他湖泊都位于长江中下游地区. 近年来,随着社会经济的快速发展和人类活动的剧烈影响,该区域水体富营养化严重,蓝藻水华频发,湖泊的水环境问题越来越突出^[4-5]. 大型湖泊是周边人口重要的饮用水源地,因此,亟需加强这些湖泊的水质监测和评价工作.

卫星遥感拥有快速、大范围、周期性的特点,具有常规监测方法不可替代的优势;随着新一代水色传感器 MERIS (MEdium Resolution Imaging Spectrometer)、GOCI (Geostationary Ocean Color Imager) 等的陆续发射,卫星遥感在内陆大型湖泊水体监测方面已经发挥着越来越重要的作用. 但由于内陆湖泊等 II 类水体物质组成复杂,水色遥感模型影响因素较多,导致精度通常不高,普适性不强. 因此,大部分 II 类水体模型是针对目标水色参数反演设计的,其它水色因子在模型中一般都被弱化,甚至被忽略. 例如,目前针对叶绿素浓度反演的三段波模型,就是以忽略悬浮泥沙和黄色物质在近红外波段的吸收为前提条件^[6-8]. 因此,了解和掌握水体的固有光学特性,特别是吸收系数,是判断水色遥感模型假设是否合理的关键,对于水色遥感研究具有重要的科学意义^[9].

鄱阳湖、太湖和巢湖等作为长江中下游的大型湖泊和重要水源地,在固有光学特性研究方面已经做了大量的工作. 如 Wu 等^[10]以鄱阳湖为对象,对其水体吸收、后向散射及其与水体中其他组分的关系进行了详细的研究;Ma 等^[11-12]以太湖为研究对象,分别对其吸收和后向散射特性进行了深入分析和揭示;金经纬等^[13]分别对巢湖水体的吸收、后向散射特性以及藻华水体的光学特性进行了研究. 但是这些工作都是将鄱阳湖、太湖和巢湖分别作为独立的湖泊进行研究,而依据各自固有光学特性建立的水色算法通常具有较大的局限性,多适用于所研究区域,较难推广使用. 特别是悬浮泥沙较多的鄱阳湖与富营养化严重、蓝藻水华肆虐的太湖和巢湖,水体光学特性具有较大的差别. 如果能够针对不同湖泊水体固有光学特性进行系统研究,将为 II 类水体普适模型的构建奠定基础,具有较大的应用价值.

本研究针对鄱阳湖、太湖和巢湖 3 个大型湖泊,运用 IOCCG^[14] 报告提供的分类标准,综合考虑水体 3 大组分(悬浮物、浮游植物色素和黄色物质),依据其吸收特性进行分类,将水体划分为不同的主导类型;针对不同主导类型水体的吸收特性进行深入分析,并对 Gons 和 Gitelson 等模型适用性进行评价. 这些研究有助于推动水色遥感的发展,具有较大的科学意义与实用推广价值.

1 数据与方法

1.1 实测数据与方法

分别于 2010 年 10 月和 2011 年 8 月在鄱阳湖、2008 年 10 月和 2011 年 8 月在太湖、2009 年 10 月在巢湖采集表层水样,共获得有效样点 260 个(表 1). 现场采集的水样放在保温箱里覆冰保存,当天带回实验室后立即过滤. 总颗粒物吸收系数(a_p)、浮游植物色素吸收系数(a_{ph})和非色素颗粒物吸收系数(a_d)采用定量过滤技术测定^[15-16];有色可溶性有机物(CDOM)吸收系数(a_g)和叶绿素 a 浓度($C_{chl.a}$)通过分光光度计分别测定^[11,17-19];总悬浮物浓度(C_{SPM})、有机悬浮物浓度(C_{SPOM})和无机悬浮物浓度(C_{SPIM})采用称重法测定^[20].

1.2 水体光学类型划分方法

依据 IOCCG 2000 年报告提出的方法^[14],首先对内陆水体某波长处 3 大组分的吸收系数 a_d 、 a_{ph} 和 a_g 求和后作归一化处理,计算每个样点 3 大组分各自所占的比例,进而可以在三角图中确定每个样点所处的位置.

根据报告中所述 2/3 分界线^[14](表 2),将水体首先划分为 I 类水体(即大洋水体)和 II 类水体(沿岸和内陆等光学复杂水体),然后参考 Morel 等的研究对 II 类水体进一步划分^[21-22],即以 1/6 为分界线(表 2)将 II 类水体划分为单一类型主导、两种类型共同主导和三种类型共同主导,其中以三种类型共同主导最为复杂,这一主导类型大多分布于内陆或沿岸光学复杂的水体. 本文选取 442 nm 为参考波长,按照前面所述方法对 3 大湖泊有效样点的主导类型进行划分(图 1).

表 1 鄱阳湖、太湖和巢湖水体组分的吸收系数及浓度的描述性统计

Tab. 1 Descriptive statistics of absorption coefficients and concentrations of water components in Lake Poyang, Lake Taihu and Lake Chaohu

统计参数	鄱阳湖		太湖		巢湖
	2010-10	2011-08	2008-10	2011-08	2009-10
有效样点数	46	37	144	22	11
$a_d(442)/m^{-1}$					
范围	1.21 ~ 11.43	1.38 ~ 32.04	0.15 ~ 5.83	1.03 ~ 3.19	0.81 ~ 1.52
均值	4.66 ± 2.55	8.54 ± 6.95	2.01 ± 1.19	2.23 ± 0.59	1.07 ± 0.21
$a_{ph}(442)/m^{-1}$					
范围	0.29 ~ 1.95	0.15 ~ 5.13	0.04 ~ 4.23	0.73 ~ 4.05	0.25 ~ 1.28
均值	0.79 ± 0.29	1.38 ± 1.00	0.59 ± 0.69	1.66 ± 0.73	0.58 ± 0.30
$a_g(442)/m^{-1}$					
范围	0.05 ~ 1.32	0.13 ~ 3.47	0.39 ~ 1.64	0.51 ~ 1.59	0.46 ~ 0.86
均值	0.55 ± 0.20	1.67 ± 0.95	0.83 ± 0.27	1.07 ± 0.28	0.59 ± 0.11
$C_{chl.a}/(\mu g/L)$					
范围	1.47 ~ 24.65	0.84 ~ 27.63	0.46 ~ 259.69	12.82 ~ 174.92	6.43 ~ 62.11
均值	8.40 ± 6.25	5.72 ± 5.64	32.91 ± 44.16	39.21 ± 36.52	21.64 ± 14.60
$C_{SPM}/(mg/L)$					
范围	19.00 ~ 168.00	17.16 ~ 543.00	0.80 ~ 100.00	20.15 ~ 62.85	12.50 ~ 36.50
均值	56.50 ± 29.52	110.38 ± 100.25	34.08 ± 21.07	38.48 ± 11.04	22.92 ± 5.83
$C_{SPIM}/(mg/L)$					
范围	13.00 ~ 148.00	15.56 ~ 501.00	0.50 ~ 71.10	6.40 ~ 53.85	10.00 ~ 17.50
均值	48.67 ± 26.78	101.09 ± 92.43	22.30 ± 15.01	27.41 ± 10.83	12.91 ± 2.47
$C_{SPOM}/(mg/L)$					
范围	3.60 ~ 20.00	0.00 ~ 42.00	1.00 ~ 57.50	7.10 ~ 24.40	2.50 ~ 19.00
均值	7.83 ± 3.14	9.30 ± 8.12	12.44 ± 8.87	11.08 ± 3.68	10.01 ± 3.96

表 2 主导类型分类方法

Tab. 2 The dominant-type classification

主导类型	所占相对比例范围
单一类型主导	
a_d 主导	$a_d \geq 2/3$
a_{ph} 主导	$a_{ph} \geq 2/3$
a_g 主导	$a_g \geq 2/3$
两种类型共同主导	
a_d, a_{ph} 共同主导 (a_d-a_{ph})	$1/6 \leq a_d < 2/3, 1/6 \leq a_{ph} < 2/3, 0 \leq a_g < 1/6$
a_{ph}, a_g 共同主导 ($a_{ph}-a_g$)	$0 \leq a_d < 1/6, 1/6 \leq a_{ph} < 2/3, 1/6 \leq a_g < 2/3$
a_d, a_g 共同主导 (a_d-a_g)	$1/6 \leq a_d < 2/3, 0 \leq a_{ph} < 1/6, 1/6 \leq a_g < 2/3$
三种类型共同主导	
a_d, a_{ph}, a_g 共同主导 ($a_d-a_{ph}-a_g$)	$1/6 \leq a_d < 2/3, 1/6 \leq a_{ph} < 2/3, 1/6 \leq a_g < 2/3$

2 结果与讨论

2.1 季节性差异

3 大湖泊水体吸收系数分类如图 1 和表 3 所示. 鄱阳湖夏季(8 月份) a_d 为主导类型, 所占比例达 67.57%, a_d-a_g 共同主导类型比例为 29.73%, 二者占有所有样点的 97.30%. 而秋季(10 月份), 鄱阳湖主导类型发生显著变化, 占据绝对主导地位的主导类型只有 a_d , 其所占比例高达 84.78% (>2/3), 其余主导类型基本可以忽略. 这与 Wu 等^[23] 对鄱阳湖的研究结果一致, 鄱阳湖与长江毗连, 水位季节变化显著, 每年 7-9 月份长江江水倒灌鄱阳湖, 并且鄱阳湖北部存在大量采砂活动, 导致悬浮泥沙浓度增大^[24-25], 使得鄱阳湖的主导光学类型为 a_d . 夏季之所以出现 a_d-a_g 共同主导的现象, 是因为夏季雨水较多, 河流携带 CDOM 进入水体相应较

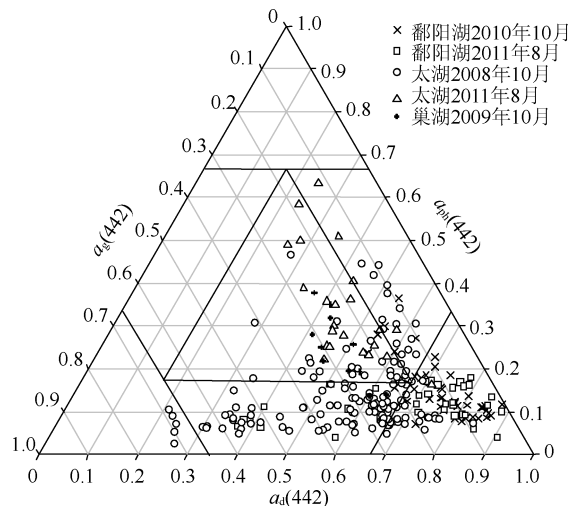


图 1 3 大湖泊水体吸收系数分类结果

Fig. 1 The result of classification of water absorption coefficients of Lake Poyang, Lake Taihu and Lake Chaohu

多;而且湖水温度较高,加剧了浮游植物腐烂分解,导致水体中 CDOM 的含量升高;而秋季,天气转凉,雨量减少,CDOM 吸收变化较为平缓,此时 CDOM 主要来源于内源(浮游植物的分解)^[26]。

太湖夏季占据主导的类型为 $a_d-a_{ph}-a_g$, 所占比例可达 78.26%, 辅助主导类型 a_d-a_{ph} 所占比例为 17.39%。到了秋季, 占据绝对优势的主导类型 $a_d-a_{ph}-a_g$ 比例降为 15.28%, 而原来在夏季没有成为主导的 a_d-a_g 类型在秋季占据优势主导地位, 其比例可达 52.78%; 另外 a_d 所占比例由 4.35% 增加到 16.67%, 增幅较大; 总体来说, 秋季太湖与 a_d 相关的主导类型占到 69.45%。这主要是由于太湖蓝藻暴发时段主要集中在 6—9 月, 8 月份达到最高值^[5,27]。通常太湖叶绿素 a 浓度春、夏季要比秋、冬季高^[28]; 夏季由于藻类具有明显的优势种群, 叶绿素 a 浓度较大, 浮游植物色素吸收系数最大; 到了秋季, 藻类密度出现下降, 非藻类颗粒物成为影响水体光学特性的重要影响因子。另外, 由于太湖中 CDOM 主要来源于藻类死亡降解^[29], a_g 在夏、秋季都具有一定贡献。

对于巢湖, 主导类型 $a_d-a_{ph}-a_g$ 在秋季(10 月份) 占据绝对主导, 其所占比例为 81.82%。巢湖夏、秋季水体叶绿素的浓度没有太大变化, 维持在一个较高的水平^[30]。因此, 与太湖相比, 巢湖在秋季水体的物质组成变化不大, 主导类型较为单一, 形成以 $a_d-a_{ph}-a_g$ 为主、 a_d-a_g 为辅的格局。需要说明的是, 太湖、巢湖所有水华样点由于浮游植物色素浓度过高, a_{ph} 占绝对主导, 没有包含在本研究中。

表 3 长江中下游大型湖泊主导类型分类结果
Tab.3 The dominant-type classification of large lakes in the middle-lower reaches of Yangtze River

大型湖泊	日期	主导类型	所占比例
鄱阳湖	2010-10	a_d	84.78%
		a_d-a_{ph}	8.70%
		a_d-a_g	2.17%
		$a_d-a_{ph}-a_g$	4.35%
	2011-08	a_d	67.57%
		a_d-a_g	29.73%
太湖	2008-10	a_d	16.67%
		a_g	3.47%
		a_d-a_{ph}	11.81%
		a_d-a_g	52.78%
	2011-08	$a_d-a_{ph}-a_g$	15.28%
		a_d	4.35%
		a_d-a_{ph}	17.39%
		$a_d-a_{ph}-a_g$	78.26%
巢湖	2009-10	a_d-a_g	18.18%
		$a_d-a_{ph}-a_g$	81.82%

湖夏季和巢湖秋季(表 3)。

2.2 不同主导类型下的吸收系数

2.2.1 a_{d-g} 类型 a_{d-g} 类型包含 3 种不同的主导类型, 即 a_d 、 a_g 和 a_d-a_g , 根据前文主导类型的划分方法可将这 3 种不同主导类型所包含的有效样点进行区分, 然后分别对这些样点 3 大组分的吸收系数求平均值即可得不同主导类型下的吸收曲线(图 2a、b、c), 图 2d 为所有这 3 种主导类型的平均值。 a_d 主导类型中(图 2a), a_d 曲线显著高于其它两种(a_{ph} 、 a_g) 吸收曲线, 而且 $a_d(442)$ 变化范围和均值都很大(表 4)。 a_g 主导类型中(图 2b), 3 种物质吸收系数差异不是很大, 整体偏低, 颗粒物含量较少; 但是不同颗粒物曲线较易区分, 特别是 a_g 曲线最高, 显著不同于其它类型水体。这种水体多是由藻华死亡分解形成“湖泛”, 因而释放大量的 CDOM, 颜色通常发黑。 a_d-a_g 类型中(图 2c), 3 种物质吸收系数与前两种主导类型又有着较大的区别, 基本呈现 $a_d(442) > a_g(442) > a_{ph}(442)$ 的分布形式(表 4), 这种水体通常处于藻类分解后期, 叶绿素 a 逐步分解为黄色物质。

同一湖泊在不同季节有较大差异, 事实上, 同一季节不同湖泊也有较大差别。在秋季, 鄱阳湖为 a_d 单一主导类型, 太湖为 a_d-a_g 共同主导, 巢湖由 $a_d-a_{ph}-a_g$ 共同主导。3 个湖泊秋季的主导类型均以一种主导类型为主, 其他主导类型比例较小; 而鄱阳湖与太湖主导类型相似, 都与 a_d 相关; 巢湖秋季藻类仍有较大贡献。而在夏季, 鄱阳湖与太湖具有十分明显的区别: 鄱阳湖以悬浮泥沙为主, 包含 a_d 、 a_d-a_g 2 种主导类型; 太湖由于富营养化严重, 藻类密度较大, 占据主导地位的是 $a_d-a_{ph}-a_g$ 和 a_d-a_{ph} 类型。

总体来说, 不同湖泊不同季节, 悬浮泥沙对于水体吸收具有重要影响, 特别是鄱阳湖, 完全以悬浮泥沙为主导; 而对于富营养化湖泊——太湖和巢湖, 浮游植物色素的吸收作用不容忽视, 特别是在夏季发挥了重要作用。事实上, 由于 a_d 、 a_g 光谱具有相似的形状, 可都用幂函数模拟, 因此本研究将 a_d 、 a_g 和 a_d-a_g 主导的类型归纳为一个类型, 命名为 a_{d-g} 类型; 该类型主要存在于鄱阳湖夏、秋两季以及太湖秋季。另外, a_{ph} 光谱曲线与 a_d 和 a_g 光谱曲线差别较大, 因此将其它几种类型, 包括 a_d-a_{ph} 和 $a_d-a_g-a_{ph}$ 等, 统一归纳命名为 a_{ph} -related 类型; 该类型主要存在于太

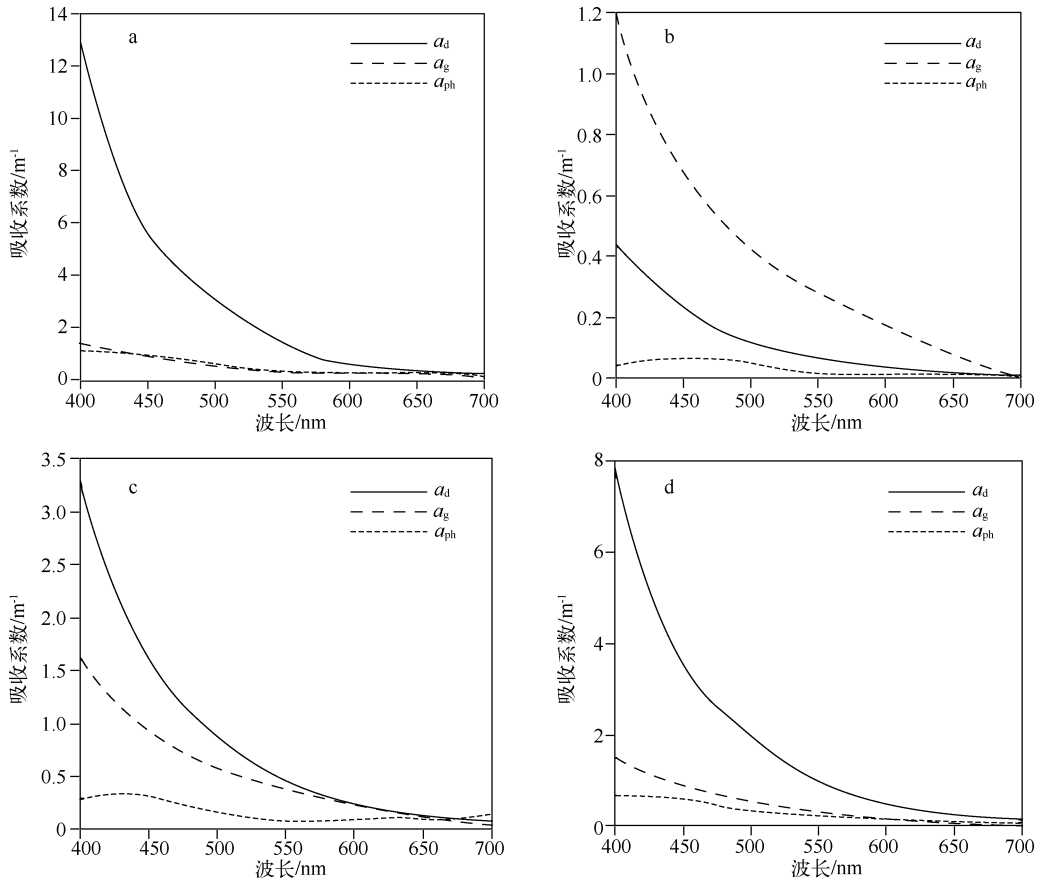


图2 a_{d-g} 类型平均吸收系数曲线: (a) a_d ; (b) a_g ; (c) $a_d - a_g$; (d) $a_d - a_{ph}$

Fig. 2 The average absorption coefficient spectra of a_{d-g} dominant-type: (a) a_d ; (b) a_g ; (c) $a_d - a_g$; (d) $a_d - a_{ph}$

2.2.2 a_{ph} -related 类型 a_{ph} -related 类型包含 2 种不同的主导类型, 即 $a_d - a_{ph} - a_g$ 和 $a_d - a_{ph}$, 与图 2 数据源获取方法一致, 参照前文主导类型的划分方法可将这 2 种不同主导类型所包含的有效样点进行区分, 然后分别对这些样点三大组分的吸收系数求平均值即可得其平均吸收曲线(图 3a、b), 图 3c 为主导类型 $a_d - a_{ph} - a_g$ 和 $a_d - a_{ph}$ 的平均值. a_{ph} -related 类型中 a_{ph} 曲线虽然普遍仍小于 a_d , 但不同于 a_{d-g} 类型, a_{ph} 曲线高于 a_g (图 3). 特别是不同于 a_{d-g} 类型, a_{ph} -related 类型曲线在 667nm 附近具有明显的峰值(图 3c), 由于受其它因素影响较小, 叶绿素 a 浓度的反演模型精度通常会较高. 另外, $a_d - a_{ph} - a_g$ 主导类型的 a_d 虽然总体光谱曲线数值要小于主导类型 $a_d - a_{ph}$ 的, 但是 a_d (442) 均值与其变化范围两者基本一致, 说明 $a_d - a_{ph}$ 主导类型 a_d 曲线斜率(S_d)较大.

2.3 常用模型适用性评价

针对 II 类水体叶绿素浓度的反演, 目前精度较高, 最为常用的是 Gons 两波段和 Gitelson 的三波段算法^[31-32]. 但由于这两个模型都有假设前提条件, 特别是对水体吸收特性有特殊的要求, 因此, 需要针对特定水体分析模型的适用性, 才能保证模型精度.

Gons 模型有关吸收的假设主要有以下 3 个: (1) $a(709) \approx a_w(709)$; (2) $a(665) \approx a_{ph}(665) + a_w(665)$, 即忽略 CDOM 和非藻类颗粒物在 665 nm 的吸收($a_{d+g}(665)$); (3) 浮游植物色素比吸收系数在指定波长处是一个常数, 即 $a_{ph}^*(665)$ 假设为常数. 其中, 假设条件(1)由于分光光度计 700 nm 以后信噪比较差, 吸收基本上没有数值, 因此可以认为满足条件; 但对于假设条件(2)和(3), 则需要进一步研究和验证. 利用实测数据针对 Gons 模型假设条件计算获得的数值, 可以发现(表 5): ① 不同主导类型水体 $a_{d+g}(665)$ 的

吸收都有一定的数值,与假设条件不符,会引起模型的误差;② 特别是 a_{d+g} 相关主导类型中, a_{d+g} (665) 在总吸收系数 a (665) 中的比例占 30%~40%, 很难被忽略(除了 a_g 类型外,但由于样点较少,没有代表性),误差较大;③ a_{ph} -related 相关类型中, a_{d+g} (665) 占总吸收系数比例通常在 25% 以下,可以近似认为满足 Gons 模型假设条件,但也会造成一定误差;④ 对于比吸收系数 a_{ph}^* (665), a_{d+g} 不同主导类型在 0.0095 ~ 0.0376 m^2/mg 之间,与模型默认值 0.0161 m^2/mg 差别较大^[33];而 a_{ph} -related 类型与默认值类似。

表 4 不同主导类型下水体组分的吸收系数及浓度的描述性统计

Tab. 4 Descriptive statistics of absorption coefficients and concentrations of water components at different dominant-types

统计参数	a_{d+g}				a_{ph} -related			
	a_g	a_d	a_d-a_g	a_{d+g}	$a_d-a_{ph}-a_g$	a_d-a_{ph}	a_{ph} -related	
样本数(n)	5	86	91	182	27	51	78	
$a_d(442)/m^{-1}$	范围	0.15~0.50	1.03~32.04	0.17~8.72	0.15~32.04	0.58~4.96	1.54~5.83	0.58~5.83
	均值	0.26±0.13	6.26±5.28	1.76±1.42	3.85±4.41	1.87±0.90	3.25±0.87	2.35±1.10
$a_{ph}(442)/m^{-1}$	范围	0.47~1.38	0.05~2.88	0.40~3.47	0.05~3.47	0.39~3.21	0.35~1.23	0.35~3.21
	均值	0.06±0.02	0.92±0.76	0.34±0.29	0.61±0.64	1.06±0.54	2.02±1.02	1.39±0.87
$a_g(442)/m^{-1}$	范围	0.47~1.38	0.05~2.88	0.40~3.47	0.05~3.47	0.39~3.21	0.35~1.23	0.35~3.21
	均值	0.74±0.35	0.83±0.58	1.00±0.61	0.91±0.60	0.97±0.42	0.78±0.21	0.91±0.38
$C_{chl.a}/(\mu g/L)$	范围	1.63~4.56	1.47~51.43	1.23~47.78	1.23~51.43	6.72~174.92	6.83~259.69	6.72~259.69
	均值	2.94±0.95	11.43±5.72	13.22±10.45	12.15±10.57	35.40±30.39	91.52±69.94	54.83±54.86
$C_{SPM}/(mg/L)$	范围	0.80~4.67	14.80~543.00	1.63~108.75	0.80~543.00	9.54~71.50	24.00~100.00	9.54~100.00
	均值	3.03±1.30	80.56±72.98	28.37±20.58	51.80±58.48	33.58±13.37	54.22±17.95	40.72±18.02
$C_{SPIM}/(mg/L)$	范围	1.00~1.24	7.60~501.00	0.50~96.75	0.50~501.00	2.00~64.00	18.00~65.53	2.00~65.53
	均值	1.12±0.12	70.16±68.57	20.87±18.06	43.89±54.90	21.60±12.59	31.07±10.78	24.88±12.81

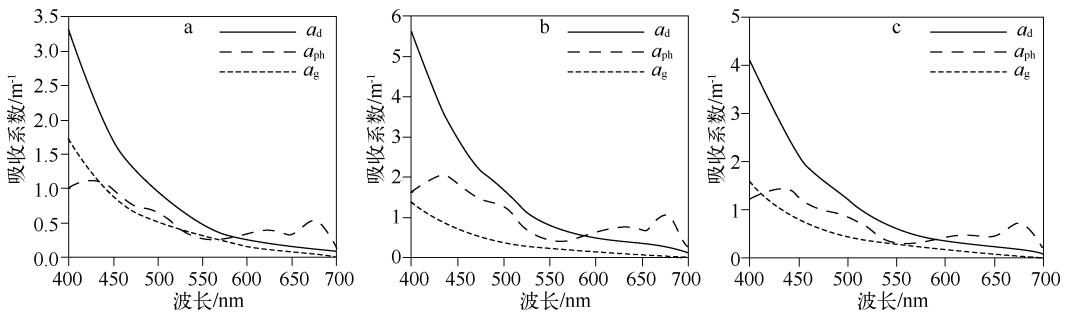


图 3 a_{ph} -related 类型平均吸收曲线:(a) $a_d-a_{ph}-a_g$; (b) a_d-a_{ph} ; (c) a_{ph} -related

Fig. 3 Absorption spectra of a_{ph} -related dominant-type: (a) $a_d-a_{ph}-a_g$; (b) a_d-a_{ph} ; (c) a_{ph} -related

基于 Gordon 经典模型^[34], Gitelson 提出的针对浑水水体的三波段模型^[32], 被广泛使用; 该模型有关吸收的主要假设条件为: (1) $a(\lambda_3) \approx a_w(\lambda_3)$; (2) $a_d(\lambda_1) + a_g(\lambda_1) \approx a_d(\lambda_2) + a_g(\lambda_2)$; (3) $a_{ph}(\lambda_1) \gg a_{ph}(\lambda_2)$. 针对 MERIS 数据, 其三个波段分别为 665, 709 和 753 nm. 类似于 Gons 模型第一假设条件, Gitelson 模型假设条件(1)可以认为已经满足. 而对于假设条件(2), 由于涉及到 709 nm, 本文在实际观测中没有此数值, 由于可根据前文主导类型的划分方法将每种主导类型所包含的有效样点进行区分, 进而可得这些样点的 a_d 和 a_g 值, 因此可以利用 650~700 nm 的 $a_d + a_g$ 曲线(图 4)来判断条件是否满足. 由于非色素颗粒物和 CDOM 吸收都可以用幂函数模拟, 呈逐渐递减趋势, 且 665, 700 nm 的 $a_d + a_g$ 差异较大; 因此, 可以判断该假设条件无法完全满足, 将在模型中引起误差. 而对于假设条件(3), a_{d+g} 相关主导类型相对较难满足该条件, 二者差异较小(图 2); 而 a_{ph} -related 主导类型由于 a_{ph} 在其中起到部分主导作用, 更趋于满足条件.

表5 不同主导类型下 Gons 模型假设条件的响应
Tab.5 The response of different dominant-types on the assumptions of the Gons model

主导类型		Gons 模型		
		$a_{ph}(665) + a_w(665)/m^{-1}$	$a_{d+g}(665)/m^{-1}$	$a_{ph}^*(665)/(m^2/mg)$
a_{d-g}	a_g	0.4541 ± 0.0061	0.0879 ± 0.0703	0.0095 ± 0.0043
	a_d	0.6677 ± 0.1411	0.4140 ± 0.3144	0.0376 ± 0.0321
	$a_d - a_g$	0.5539 ± 0.0775	0.2185 ± 0.1312	0.0136 ± 0.0118
	a_{d-g}	0.6050 ± 0.1273	0.3074 ± 0.2571	0.0249 ± 0.0266
$a_{ph-related}$	$a_d - a_{ph} - a_g$	0.8828 ± 0.2494	0.2114 ± 0.1276	0.0161 ± 0.0085
	$a_d - a_{ph}$	1.3091 ± 0.4711	0.3864 ± 0.1727	0.0162 ± 0.0149
	$a_{ph-related}$	1.0304 ± 0.3983	0.2720 ± 0.1670	0.0162 ± 0.0111

3 结论

1) 秋季鄱阳湖、太湖和巢湖水体(10月份)的主导类型相对单一,以一种主导类型为主,分别为 a_d 、 $a_d - a_g$ 和 $a_d - a_{ph} - a_g$;夏季鄱阳湖和太湖差别较大,虽同为两种类型共同主导,但前者主导类型为 a_d 、 $a_d - a_g$,后者为 $a_d - a_{ph} - a_g$ 、 $a_d - a_{ph}$.

2) 引入 a_{d-g} 类型对主导类型 a_d 、 a_g 、 $a_d - a_g$ 、 $a_{ph-related}$ 类型对 $a_d - a_{ph} - a_g$ 、 $a_d - a_{ph}$ 进行归纳合并,发现 a_{d-g} 类型主要存在于鄱阳湖夏、秋季和太湖秋季, $a_{ph-related}$ 类型主要存在于太湖夏季和巢湖秋季.

3) 相对于 Gons 和 Gitelson 模型的假设条件,不同湖泊水体和不同主导类型适用性不一致; $a_{ph-related}$ 主导的水体更趋于满足假设条件,而 a_{d-g} 主导类型将会产生较大的误差.

总体来说,II类水体叶绿素 a 遥感的核心仍是如何去除高悬浮物的影响.事实上,由于 a_{d-g} 主导类型水体的广泛存在,因此,下一步的工作重点应针对该类水体吸收特性,设计更为有效的模型,推动II类水体水色遥感研究的发展.

致谢:感谢中国科学院南京地理与湖泊研究所“湖泊一流域科学数据共享平台”提供数据.在实验过程中得到了姜广甲、饶家旺、赵晨露、王泽人、尚琳琳、周琳、吕春光、邢永超、肖凯、齐琳、项文华、林珊等人的帮助,在此一并感谢.

4 参考文献

[1] 王苏民, 窦鸿身. 中国湖泊志. 北京: 科学出版社, 1998.
 [2] Ma RH, Duan HT, Hu CM *et al.* A half-century of changes in China's lakes; Global warming or human influence? *Geophysical Research Letters*, 2010, **37**(24): L24106.
 [3] Ma RH, Yang GS, Duan HT *et al.* China's lakes at present; number, area and spatial distribution. *Science China Earth Sciences*, 2011, **54**(2): 283-289.
 [4] 杨桂山, 马荣华, 张路等. 中国湖泊现状及面临的重大问题与保护策略. *湖泊科学*, 2010, **22**(6): 799-810.
 [5] Duan HT, Ma RH, Xu XF *et al.* Two-decade reconstruction of algal blooms in China's Lake Taihu. *Environmental Science & Technology*, 2009, **43**(10): 3522-3528.
 [6] Dall'Olmo G, Gitelson AA, Rundquist D. Towards a unified approach for remote estimation of chlorophyll-a in both terrestrial vegetation and turbid productive waters. *Geophysical Research Letters*, 2003, **30**(18): 1938.

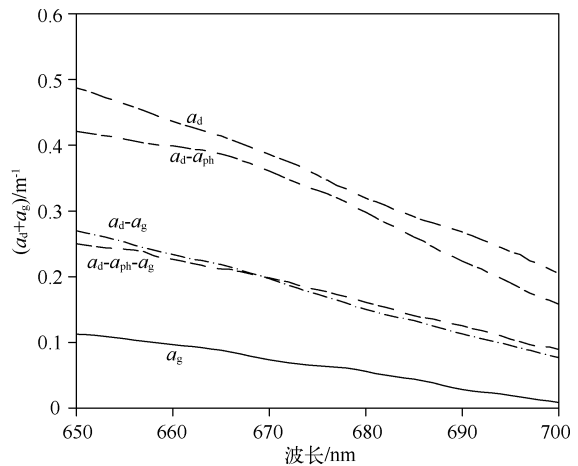


图4 不同主导类型下 $a_d + a_g$

Fig. 4 $a_d + a_g$ of different dominant-types

- [7] Gitelson AA, Gurlin D, Moses W *et al.* A bio-optical algorithm for the remote estimation of the chlorophyll-a concentration in case 2 waters. *Environmental Research Letters*, 2009, **4**(4): 045003.
- [8] Duan HT, Ma RH, Zhang YZ *et al.* A new three-band algorithm for estimating chlorophyll concentrations in turbid inland lakes. *Environmental Research Letters*, 2010, **5**: 044009.
- [9] Mobley CD. Light and water: Radiative transfer in natural waters. San Diego: Academic Press, 1994.
- [10] Wu GF, Cui LJ, Duan HT *et al.* Absorption and backscattering coefficients and their relations to water constituents of Lake Poyang, China. *Applied Optics*, 2011, **50**(34): 6358-6368.
- [11] Ma RH, Tang JW, Dai JF *et al.* Absorption and scattering properties of water body in Lake Taihu, China: absorption. *International Journal of Remote Sensing*, 2006, **27**(19): 4277-4304.
- [12] Ma RH, Pan DL, Duan HT *et al.* Absorption and scattering properties of water body in Lake Taihu, China: backscattering. *International Journal of Remote Sensing*, 2009, **30**(9): 2321-2335.
- [13] 金经纬, 段洪涛, 赵晨露等. 湖泊藻类水体浮游植物色素遥感反演模型. *红外与毫米波学报*, 2012, **31**(2): 132-136.
- [14] IOCCG. Remote sensing of ocean colour in coastal, and other optically-complex, waters. Reports of the International Ocean-Colour Coordinating Group, 2000, (3).
- [15] Mueller JL, Fargion GS, McClain CR *et al.* Ocean Optics Protocols for Satellite Ocean Color Sensor Validation, Revision 4, Volume VI: Special Topics in Ocean Optics Protocols and Appendices, 2003, NASA/TM-2003-211621/Rev4.
- [16] Yentsch CS. Measurement of visible light absorption by particulate matter in the ocean. *Limnology and Oceanography*, 1962, **5**: 207-217.
- [17] 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.
- [18] Simis S, Peters S, Gons H. Remote sensing of the cyanobacterial pigment phycocyanin in turbid inland water. *Limnology and Oceanography*, 2005, **50**(1): 237-245.
- [19] Duan HT, Ma RH, Hu CM. Evaluation of remote sensing algorithms for cyanobacterial pigment retrievals during spring bloom formation in several lakes of East China. *Remote Sensing of Environment*, 2012, **126**: 126-135.
- [20] Neil C, Cunningham A, McKee D. Relationships between suspended mineral concentrations and red-waveband reflectances in moderately turbid shelf seas. *Remote Sensing of Environment*, 2011, **115**: 3715-3730.
- [21] Morel A, Antoine D. Pigment index retrieval in Case 1 waters. ATBD 2.9 MERISWorkshop, Villefranche-sur-mer, October 2-3, 1997.
- [22] Dowell MD. Optical characterisation and reflectance modelling in Case II waters: quantitative tools for investigations of coastal environments [Thesis]. Southampton, UK: University of Southampton, 1998: 192.
- [23] Wu GF, Cui LJ, Duan HT *et al.* Specific absorption and backscattering coefficients of the main water constituents in Lake Poyang, China. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2012, **15**: 1-16.
- [24] 邬国锋, 崔娟娟. 基于遥感技术的鄱阳湖采砂对水体透明度的影响. *生态学报*, 2008, **28**(12): 6113-6120.
- [25] 邬国锋, 崔娟娟, 纪伟涛. 基于遥感技术的鄱阳湖-长江水体清浊倒置现象的分析. *长江流域资源与环境*, 2009, **18**(8): 777-782.
- [26] 姜广甲, 刘殿伟, 宋开山等. 长春市石头口门水库 CDOM 的光学特性. *中国科学院研究生院学报*, 2009, **26**(5): 640-646.
- [27] Hu CM, Lee ZP, Ma RH *et al.* Moderate resolution imaging spectroradiometer (MODIS) observations of cyanobacteria blooms in Lake Taihu, China. *Journal of Geophysical Research*, 2010, **115**: C04002.
- [28] 张运林, 秦伯强, 陈伟民等. 太湖水体中悬浮物研究. *长江流域资源与环境*, 2004, **13**(3): 266-271.
- [29] 张运林, 秦伯强. 梅梁湾、大太湖夏季和冬季 CDOM 特征及可能来源分析. *水科学进展*, 2007, **18**(3): 415-423.
- [30] 缪 灿, 李 堃, 余冠军. 巢湖夏、秋季浮游植物叶绿素 a 及蓝藻水华影响因素分析. *生物学杂志*, 2011, **28**(2): 54-57.
- [31] Gons H. Optical teledetection of chlorophyll a in turbid inland waters. *Environmental Science & Technology*, 1999, **33**(7): 1127-1132.
- [32] Gitelson AA, Keydan GP, Merzlyak MN. Three-band model for noninvasive estimation of chlorophyll, carotenoids, and anthocyanin contents in higher plant leaves. *Geophysical Research Letters*, 2006, **33**(11): L11402.
- [33] Gons H, Rijkeboer M, Ruddick KG. Effect of a waveband shift on chlorophyll retrieval from MERIS imagery of inland and coastal waters. *Journal of Plankton Research*, 2005, **27**(1): 125-127.
- [34] Gordon HR, Brown OB, Evans RH *et al.* A semianalytic radiance model of ocean color. *Journal of Geophysical Research*, 1988, **93**(D9): 10909-10924.