

滇池水体光学物质的吸收特性研究

张红¹, 黄家柱^{1*}, 李云梅¹, 吕恒¹, 吴传庆², 金鑫¹, 王彦飞¹, 尹斌¹

(1. 南京师范大学教育部虚拟地理环境重点实验室, 南京 210046; 2. 环境保护部卫星环境应用中心, 北京 100094)

摘要:基于 2009 年 9 月在滇池的野外采样, 分析了滇池水体中光学活性物质的吸收特性及其空间分布、与水体组分浓度的关系、各光学活性物质吸收对总吸收的贡献率、滇池水体吸收特性与其他二类水体的异同等。结果表明, 总颗粒物吸收光谱曲线与浮游藻类吸收光谱曲线形状相似, 浮游藻类吸收在总颗粒物吸收中占主导; 440、624 和 675 nm 处的浮游藻类吸收 a_{ph} 与叶绿素 a 浓度呈现显著正相关, 蓝藻是滇池水体的优势藻种; 滇池北部湖区藻类密集, 富营养化程度较南部湖区严重。与其他二类水体的吸收特性相比, 滇池水体既表现出相似性, 又表现出一定的差异性。滇池各吸收特性的数值都落在之前二类水体的研究结果范围之中, 这体现了相似性; 而差异性主要表现在: ①非藻类颗粒物吸收光谱曲线斜率 S_d 均值略高于其他二类水体; ②有色可溶性有机物 (chromophoric dissolved organic matter, CDOM) 吸收光谱曲线斜率 S_g 均值相对其他二类水体偏小; ③浮游藻类比吸收系数大致处于中间水平, 造成浮游藻类比吸收不同的原因是其受不同地区、不同季节和浮游植物种群结构等的影响。

关键词:滇池; 吸收系数; 比吸收; 颗粒物; 有色可溶性有机物

中图分类号: X87; X524 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2011)02-0452-12

Spectral Absorption Coefficients of Optically Active Substances in Lake Dianchi

ZHANG Hong¹, HUANG Jia-zhu¹, LI Yun-mei¹, LÜ Heng¹, WU Chuan-qing², JIN Xin¹, WANG Yan-fei¹, YIN bin¹

(1. Key Laboratory of Virtual Geographic Environment, Ministry of Education, Nanjing Normal University, Nanjing 210046, China; 2. Satellite Environment Center, Ministry of Environmental Protection, Beijing 100094, China)

Abstract: A field investigation in Lake Dianchi was carried out in November, 2009, and a dataset including absorption coefficients and concentration of water components was collected. Absorption properties and its spatial distribution of Lake Dianchi have been systematically analyzed, the results show that: ① Absorption spectral curve of total particles (a_p) are similar with that of phytoplankton (a_{ph}), which indicates that phytoplankton absorption dominates absorption of total suspended particles; ② Significant relationships are found between a_{ph} (440), a_{ph} (624), a_{ph} (675) and concentration of chl_a, and cyanophyta dominates the quantity of the algae in water columns; ③ There are more phytoplankton existed in northern lake than other areas because of higher level of eutrophication. Comparing with other water columns, discrepancies mainly appear as below: ① The mean value of slope of absorption spectral curve of non-algal particles (S_d) in Lake Dianchi is much bigger than that in other case-II waters; ② The mean value of slope of absorption spectral curve of chromophoric dissolved organic matter (CDOM) S_g in Lake Dianchi is much smaller than that in other case-II waters; ③ Specific absorption of phytoplankton (a_{ph}^*) at 440 nm and 675 nm is at intermediate level, and a_{ph}^* value is susceptible to different regions, seasons, population structure of phytoplankton and so on.

Key words: Lake Dianchi; absorption coefficients; specific absorption coefficients; suspended particles; chromophoric dissolved organic matter (CDOM)

云南高原湖泊群是我国湖泊分布最密集的五大湖群之一。滇池位于云南省昆明市西南, 是云南省面积最大的湖泊, 也是中国第六大淡水湖, 有着“高原明珠”之称, 是一个具有城市生活供水、工农业供水、养殖、防洪、旅游、疗养、航运、调节径流和发电供水等多种功能的湖泊, 是昆明的“母亲河”^[1]。近年来, 随着经济尤其是工业的迅速发展, 城市化进程的加速, 滇池水环境急剧恶化, 导致了水体严重富营养化、敏感群落的灭绝或濒临灭绝、水葫芦和蓝藻的爆发性繁殖等严重后果^[2], 水体功能受到极大破坏, 已成为昆明市持续发展的制约因素之一。对滇池水

体水质的时空动态监测成为其水质保护亟待解决的问题, 利用遥感技术能够快速、宏观、动态地获得整个水域水质的时空变化情况。

水体吸收特性是固有光学特性的一种, 它不随光照条件的变化而变化, 只和水体水质组分的种类和浓度有关, 是建立遥感反演水质参数半分析模型

收稿日期: 2010-02-24; 修订日期: 2010-03-29

基金项目: 国家自然科学基金项目 (40971215); 国家科技支撑计划项目 (2008BAC34B05); 国家水体污染控制与治理科技重大专项 (2009ZX07527-006)

作者简介: 张红 (1987~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为水质遥感, E-mail: zhanghong1987@hotmail.com

* 通讯联系人, E-mail: huangjiazhu@njnu.edu.cn

的基础,很多国内外学者都研究过二类水体的吸收特性或在此基础上建立适用于研究区域的水色遥感模型^[3-9].然而,二类水体的光学成分复杂,受陆源影响很大,物质组成具有多样性和时空多变性.不同水体之间存在较大差异,甚至同一水体不同水域之间的差异也非常显著.Strömbeck^[10]指出,随着半分析方法的发展和应用,应将重点放在固有光学参数和生物光学模型的区域性研究上,提高生物光学模型精度的一个有效途径就是加强对区域性水体固有光学参数的测量,建立适用于区域性水体的生物光学模型.

滇池作为一个高原型淡水湖泊,其吸收特性是否与其他二类水体相似?已有的吸收光谱模型参数是否可直接应用于滇池?由于目前国内对滇池水体中光学活性物质吸收特性的研究甚少,这些问题未能解决.本研究利用2009年9月在滇池的野外采样数据,系统地分析了滇池水体中光学活性物质的吸收特性变化,阐明其与其他二类水体吸收特性的相应差别,提出了适于滇池水体吸收特性的光谱模型参数,旨在为进一步建立滇池水体的遥感生物光学模型奠定基础.

1 材料与方法

1.1 采样时间与点位

滇池位于 $102^{\circ}36' \sim 102^{\circ}47' E$, $24^{\circ}40' \sim 25^{\circ}02' N$,属于富营养化的半封闭浅水湖泊,呈南北向分布,湖体略呈弓形,弓背向东,面积约为 294 km^2 ,最大水深 11.3 m ,平均水深 5.12 m .2009年9月对滇池全湖进行野外观测,测量的参数包括叶绿素a浓度 c_{CHL} 、总颗粒物浓度 c_{SPM} 、无机颗粒物浓度 c_{SPIM} 、有机颗粒物浓度 c_{SPOM} 、颗粒物吸收系数 a_p 、非藻类颗粒物吸收系数 a_d 、浮游藻类吸收系数 a_{ph} 、CDOM吸收系数 a_g 等.图1为该次野外实验的样点分布,共布设25个样点.

1.2 水质参数的测定

利用表层水测量方法采集的水样立即被保存在低温条件下($2 \sim 4^{\circ}C$),并于当天内将水样运送到实验室进行分析.总颗粒物的吸收系数 a_p 采用定量滤膜技术(QFT)测定,仪器型号为岛津UV-2401PC,光谱范围为 $350 \sim 800 \text{ nm}$,采样间隔为 1 nm ,再采用Cleveland等^[11]提出的公式进行放大因子校正和计算.采用Tassan等^[12]提出的次氯酸钠漂白法将水样漂白 15 min 左右,按上述方法得到非藻类颗粒物的吸收系数 a_d ,两者相减即为浮游藻类的吸收系数

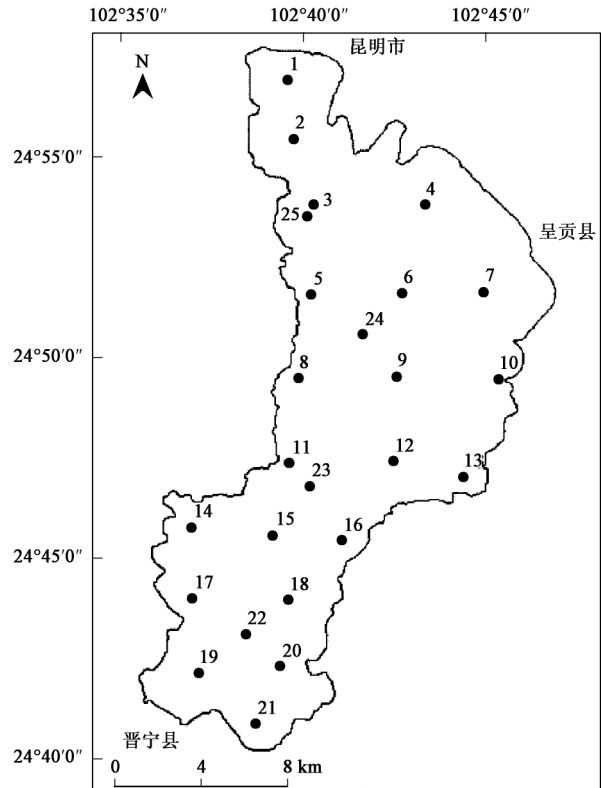


图1 2009年9月滇池采样站点分布示意

Fig.1 Spatial distribution of 25 samples in Lake Dianchi

a_{ph} . CDOM的光谱吸收系数的测定先利用 $0.22 \mu\text{m}$ 的Millipore膜过滤已经过滤过颗粒物得到的水样,再利用岛津UV-2401PC测定其吸光度,光谱范围为 $240 \sim 800 \text{ nm}$,采样间隔为 1 nm ,然后根据Bricaud等^[13]的方法进行散射效应的校正,最后计算得到 a_g .总颗粒物、无机颗粒物和有机颗粒物浓度的测量采用GB 11901-89烘干称重法.叶绿素a浓度的测定采用陈宇炜等^[14]的“热乙醇法”进行萃取,然后用90%的乙醇作为参比液在UV-2401PC中测定其吸光度,最后利用Lorenzen^[15]提出的方法计算得到 c_{CHL} .浮游藻类的比吸收系数可由公式 $a_{\text{ph}}^*(\lambda) = a_{\text{ph}}(\lambda)/c_{\text{CHL}}$ 获得.

1.3 负指数函数斜率S值的计算

非藻类颗粒物和CDOM的吸收光谱曲线的形态可用负指数函数表示,如式(1):

$$a_y(\lambda) = a_y(\lambda_0) \exp[-S(\lambda - \lambda_0)] \quad (1)$$

式中, λ_0 为参考波段,取 440 nm , S 为曲线的斜率值,下标 y 用 d 和 g 表示时,分别代表非藻类颗粒物和CDOM.一些学者如Markager等^[16]和张运林等^[17]在模拟CDOM的吸收光谱曲线时发现,加入背景散射项 K 的负指数函数能够更好地模拟CDOM

的吸收光谱曲线,如式(2):

$$a_y(\lambda) = a_y(\lambda_0) \exp[-S(\lambda - \lambda_0)] + K \quad (2)$$

但是,在大多数情况下,这2种方法得到的 S 值相差不大,且每个站点的 K 值总体比较小,正负不一^[17],因此,本研究仍选用式(1)拟合CDOM的吸收光谱曲线,拟合的波段范围为280~500 nm.非藻类颗粒物的拟合范围为光合有效辐射(PAR)波段即400~700 nm.

2 结果与分析

2.1 水体吸收系数特征

2.1.1 浮游藻类吸收 a_{ph}

图2是滇池湖区25个站点的浮游藻类吸收光谱曲线,从曲线的形状来看,440 nm附近由于叶绿素a的吸收出现极大值,450~550 nm处吸收系数大致随波长的增大而降低,但在480 nm附近由于胡萝卜素 β 的吸收使得吸收系数呈现肩状,550 nm处由于叶绿素和胡萝卜素的弱吸收出现极小值,之后吸收系数逐渐增大,在624 nm处由于藻蓝素的吸收出现了一个小峰值,该峰值是藻蓝素最显著的特征,也是反演藻蓝素浓度的理想波段,吸收系数在650 nm处出现极小值后迅速增大,在675 nm由于叶绿素a的吸收出现了一个明显的峰值,700 nm以后便逐渐减小,在近红外波段可近似忽略.

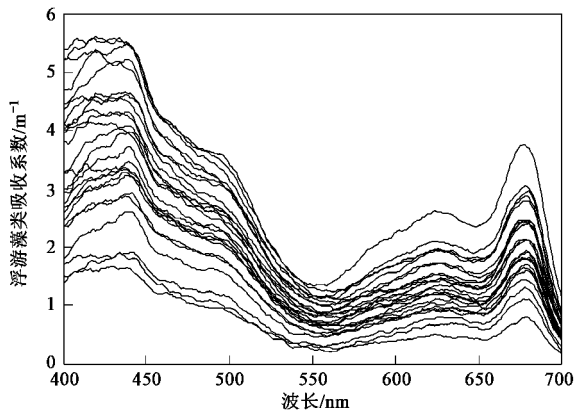


图2 滇池25个站点的浮游藻类吸收光谱曲线

Fig.2 Absorption spectral curve of phytoplankton of the 25 samples in Lake Dianchi

2.1.2 非藻类颗粒物吸收 a_d

非藻类颗粒物是指水体中含有的无机悬浮颗粒,非活性有机碎屑(水体生物的排泄物和新陈代谢的浮游藻类细胞)和活性非藻类有机物.非藻类颗粒物的吸收系数随着波长的增大遵循指数衰减规

律(图3).波长越短,各站点非藻类颗粒物的吸收系数差别越大,在700 nm以后均趋于0.

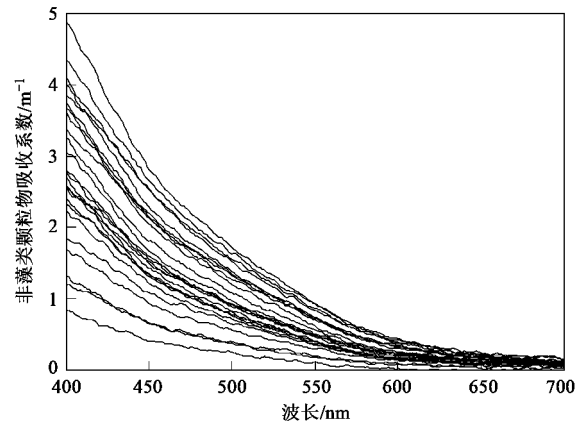


图3 滇池25个站点的非藻类颗粒物吸收光谱曲线

Fig.3 Absorption spectral curve of non-algal particles of the 25 samples in Lake Dianchi

2.1.3 总颗粒物吸收 a_p

总颗粒物吸收 $a_p = a_{ph} + a_d$,图4给出了25个站点的总颗粒物吸收光谱曲线.从 a_p 的形状来看,25个站点的总颗粒物吸收光谱曲线均与浮游藻类的吸收光谱曲线相似,未发现与非藻类颗粒物吸收光谱曲线相似的站点.由于叶绿素a和藻蓝蛋白的吸收,总颗粒物吸收光谱曲线在440、624和675 nm附近存在吸收峰,在480 nm附近由于胡萝卜素 β 的吸收呈现肩状,在550 nm和650 nm附近出现吸收系数极小值.这与许多二类水体如张运林等^[18]研究的太湖梅梁湾、曹文熙等^[19]研究的珠江口域、Nelson等^[20]研究的美国东南海岸不同,这些水体中的总颗粒物吸收光谱曲线均可以分为2种典型类型:与浮

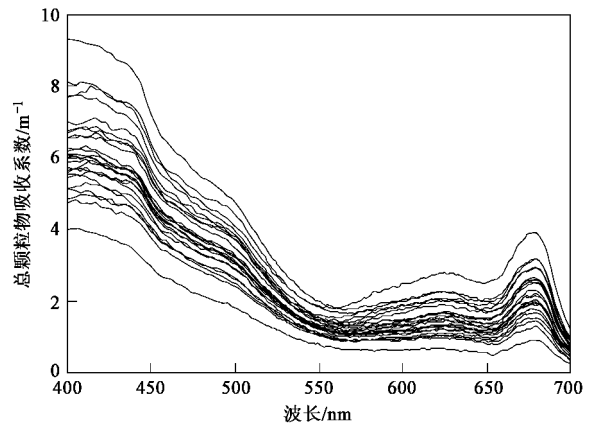


图4 滇池25个站点的总颗粒物吸收光谱曲线

Fig.4 Absorption spectral curve of total suspended particles of the 25 samples in Lake Dianchi

游藻类吸收光谱曲线形态相似、与非藻类颗粒物吸收光谱曲线形态相似. 与李方等^[8]研究的石头口门水库也不一致,在6月和9月,石头口门水库的总颗粒物吸收光谱曲线都与非藻类颗粒物类似,这是因为东北气温较低以及上游水土流失的影响,石头口门水库的藻类污染不是很严重,而泥沙颗粒物含量较高. 滇池总颗粒物吸收曲线形态单一表明此时滇池水体的颗粒物组成较均一,主要以浮游藻类为主.

2.1.4 CDOM 吸收 a_g

图5给出了实测 CDOM 吸收光谱曲线,其光谱特征与非藻类颗粒物类似,随着波长的增长吸收系数呈指数衰减,在700 nm 后趋向于0. 相比非藻类颗粒物吸收光谱曲线(图3),CDOM 吸收光谱曲线的斜率要大于非藻类颗粒物,且各站点的 CDOM 吸收系数差异较小,曲线相对集中.

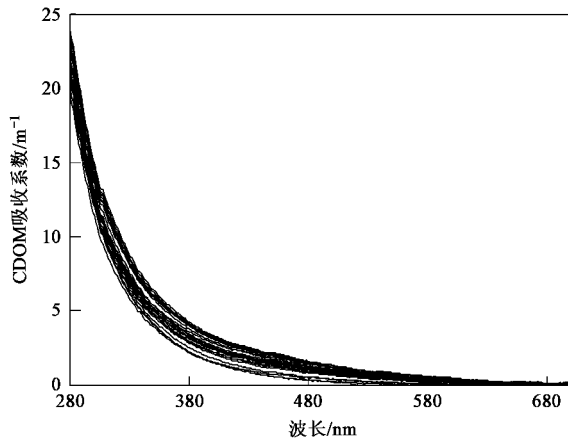


图5 滇池25个站点的CDOM吸收光谱曲线
Fig. 5 Absorption spectral curve of CDOM of the 25 samples in Lake Dianchi

2.2 水体中各组分的吸收贡献

图6是滇池水体25个站点的浮游藻类和非藻类颗粒物在PAR波段内的平均吸收占总颗粒物平均吸收的比例. 从图6可看出,PAR波段范围内,浮游藻类在总颗粒物中占有绝对优势,浮游藻类吸收占总颗粒物吸收的百分比始终>50%,这一方面是由于滇池流域四季如春,9月时正处于藻类密集生长的阶段,另一方面是由于滇池流域内城市工业用水、生活污水以及土壤腐殖质进入滇池,带来大量的氮、磷等营养物质,促进了浮游藻类的生长.

图7给出了25个站点的浮游藻类、非藻类颗粒物、CDOM和纯水在PAR波段内的平均吸收对总吸收的贡献率. 如图7所示,在PAR波段内浮游藻类吸收的贡献率一直是最大的,直至700 nm后由于纯

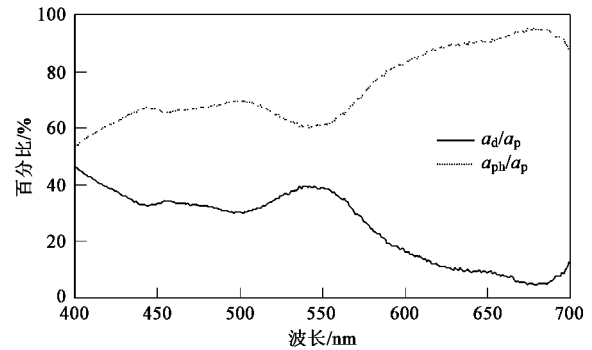


图6 a_d 、 a_{ph} 对总颗粒物吸收 a_p 的贡献率

Fig. 6 Contributions of non-algal particles, phytoplankton to the absorption of total suspended particles

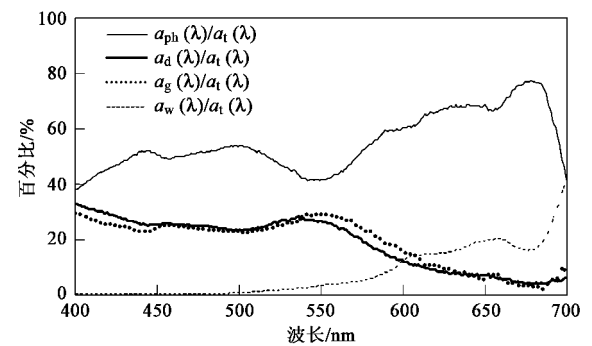


图7 a_{ph} 、 a_d 、 a_g 和 a_w 对总吸收 a_t 的贡献率

Fig. 7 Contributions of phytoplankton, non-algal particles, CDOM and water to the total absorption

水吸收能力的迅速增强以及浮游藻类吸收系数的下降,纯水在总吸收中占据了主导地位;非藻类颗粒物和CDOM的吸收占总吸收的比例范围以及比例曲线的形态非常相似,大致随波长的增加而递减,但是在550 nm左右处,由于叶绿素和胡萝卜素的弱吸收,两者占总吸收的比例曲线出现一个小峰值,之后曲线迅速下降,直至690 nm附近处,CDOM和非藻类颗粒物的吸收比例系数又似乎有小幅增大的现象,产生这个现象的原因可能有2点:①浮游藻类的吸收在690 nm以后下降的幅度远大于CDOM和非藻类颗粒物的吸收,使得这两者占总吸收的比例相对增大;②690 nm以后,CDOM和非藻类颗粒物的吸收系数很小甚至接近于0,此时,仪器的噪声可能埋没了这两者的本身信号,使得其占总吸收的比例不正常地小幅增大. 纯水对总吸收的贡献率大体上随着波长的增加而增加,在675 nm处由于浮游藻类的强吸收而出现极小值,之后其贡献率迅速上升. 总体而言,在PAR波段内,浮游藻类对总吸收的贡献率最大,非藻类颗粒物和CDOM对总吸收的贡献率

相近,纯水的贡献率最小。

表 1 列出各站点的水体组分在 PAR 波段内积分吸收系数及其贡献的数值. 如表 1 所示,非藻类颗粒物对总吸收的贡献大小范围为 5.291% ~ 41.686%,平均贡献率为(22.622 ± 9.1)%;浮游藻类对总吸收的贡献大小范围为 28.676% ~ 77.733%,平均贡献率为(51.479 ± 12.519)%;CDOM 对总吸收的贡献大小范围为 8.932% ~ 35.804%,平均贡献率为(21.491 ± 6.485)%;纯水对总吸收的贡献大小范围为 3.086% ~ 6.091%,平均贡献率为(4.462 ± 0.749)%。总颗粒物对总吸收的贡献大小范围为 58.18% ~ 86.704%,平均贡献率为(74.101 ± 6.642)% ,其中,浮游藻类颗粒物吸

收占总颗粒物吸收的最小贡献率为 41.555% ,最大贡献率为 92.921% ,平均贡献率为(68.957 ± 13.319)% ,非藻类颗粒物吸收占总颗粒物吸收的最小贡献率为 7.079% ,最大贡献率为 58.445% ,平均贡献率为(31.043 ± 13.319)%。此外,笔者还分析了表 1 中各指标的空间分布情况,发现 a_{ph}/a_t 明显呈现出由北部湖区到南部湖区递减的趋势,表明在采样期间,滇池北部湖区的藻类密集,其富营养化程度较严重,这是由于:①北部湖区靠近昆明城市,大量的城市污水及其所含的氮、磷等营养元素被排放到滇池水体中,有利于藻类的生长;②滇池湖区此时盛行西南风,湖面的浮游藻类被源源不断输送到滇池北部。

表 1 各光学活性物质在 PAR 波段内积分吸收系数、贡献率

Table 1 Absorption coefficients and contributions of optically active substances integrated over the range of PAR

站点	a_d /m ⁻¹	a_{ph} /m ⁻¹	a_g /m ⁻¹	a_w /m ⁻¹	a_p /m ⁻¹	a_t /m ⁻¹	a_d/a_p /%	a_{ph}/a_p /%	a_d/a_t /%	a_{ph}/a_t /%	a_g/a_t /%	a_w/a_t /%	a_p/a_t /%
1	0.84	3.058	0.998	0.16	3.898	5.055	21.553	78.447	16.623	60.504	19.745	3.165	77.128
2	0.78	1.937	0.309	0.16	2.716	3.183	28.709	71.291	24.498	60.836	9.701	5.026	85.334
3	0.765	2.552	0.919	0.16	3.316	4.393	23.057	76.943	17.405	58.083	20.914	3.642	75.489
4	1.013	1.599	0.4	0.16	2.612	3.17	38.795	61.205	31.965	50.43	12.619	5.048	82.395
5	0.672	2.519	1.132	0.16	3.191	4.481	21.052	78.948	14.992	56.223	25.257	3.571	71.215
6	0.325	2.815	0.324	0.16	3.14	3.622	10.346	89.654	8.971	77.733	8.932	4.418	86.704
7	1.142	1.988	1.066	0.16	3.13	4.354	36.476	63.524	26.22	45.664	24.485	3.675	71.884
8	0.897	1.619	0.85	0.16	2.516	3.523	35.659	64.341	25.459	45.938	24.117	4.541	71.397
9	0.475	1.938	0.812	0.16	2.413	3.384	19.688	80.312	14.042	57.282	24.005	4.728	71.324
10	0.61	2.039	0.673	0.16	2.649	3.48	23.032	76.968	17.533	58.59	19.335	4.598	76.123
11	1.098	1.41	0.598	0.16	2.508	3.265	43.78	56.22	33.64	43.198	18.32	4.901	76.838
12	0.189	2.475	0.742	0.16	2.664	3.564	7.079	92.921	5.291	69.445	20.83	4.489	74.736
13	0.664	2.6	0.916	0.16	3.264	4.338	20.345	79.655	15.309	59.94	21.108	3.688	75.249
14	0.547	1.585	1.079	0.16	2.132	3.368	25.642	74.358	16.226	47.054	32.028	4.7	63.28
15	0.328	2.162	0.366	0.16	2.49	3.014	13.176	86.824	10.887	71.736	12.134	5.309	82.622
16	1.42	2.592	1.015	0.16	4.012	5.185	35.394	64.606	27.389	49.994	19.569	3.086	77.383
17	0.752	1.393	0.98	0.16	2.144	3.283	35.058	64.942	22.9	42.42	29.862	4.874	65.32
18	1.337	2.18	0.842	0.16	3.517	4.517	38.017	61.983	29.601	48.262	18.637	3.542	77.864
19	1.236	0.879	0.692	0.16	2.115	2.965	58.445	41.555	41.686	29.639	23.345	5.396	71.325
20	1.25	1.34	0.793	0.16	2.589	3.54	48.256	51.744	35.294	37.846	22.395	4.519	73.14
21	0.775	0.753	0.941	0.16	1.528	2.627	50.711	49.289	29.503	28.676	35.804	6.091	58.18
22	1.05	0.961	0.902	0.16	2.011	3.071	52.207	47.793	34.187	31.296	29.371	5.21	65.483
23	1.084	1.81	0.994	0.16	2.894	4.046	37.441	62.559	26.78	44.745	24.569	3.954	71.525
24	0.649	2.084	0.612	0.16	2.733	3.503	23.75	76.25	18.529	59.49	17.469	4.568	78.019
25	0.692	1.743	0.762	0.16	2.435	3.355	28.407	71.593	20.615	51.954	22.721	4.769	72.569

2.3 吸收系数的参数化

2.3.1 浮游藻类吸收系数的参数化

$a_{ph}(440)$ 、 $a_{ph}(624)$ 、 $a_{ph}(675)$ 的范围分别为 1.632 ~ 5.477 m⁻¹、0.506 ~ 2.622 m⁻¹、0.757 ~ 3.754 m⁻¹, 均值分别为(3.795 ± 1.135) m⁻¹、(1.383 ± 0.495) m⁻¹、(2.082 ± 0.668) m⁻¹, 对应的叶绿素 a 浓度范围为 38.971 ~ 156.696 μg/L, 均值为 97.3 μg/L. 从其分布图(图 8)可看出,3 个波段

处的浮游藻类吸收系数都呈现出从北向南递减的趋势,西北部湖区吸收系数最大,中部湖区次之,南部最小,此现象产生的原因与 a_{ph}/a_t 空间分布差异的原因一致。

浮游藻类的吸收主要受水体中浮游藻类的浓度及种群组成的影响,随叶绿素 a 浓度的变化而变化. 图 9 给出了 440、624 和 675 nm 处浮游藻类的吸收系数与叶绿素 a 浓度(c_{CHL})的关系图. $a_{ph}(440)$ 、 a_{ph}

(624) 和 $a_{ph}(675)$ 都与 c_{CHL} 存在显著正相关, 其中 $a_{ph}(675)$ 与 c_{CHL} 的线性拟合最好, 除了 1 和 4 号站点偏离拟合线较远外, 其余站点都大致分布在拟合线的周围, 说明除了这 2 个站点外, 其余站点的浮游藻类吸收系数相差不大. $a_{ph}(624)$ 和 c_{CHL} 的显著正相关则从侧面表明了蓝藻在滇池中的优势种群地

位. $a_{ph}^*(440)$ 、 $a_{ph}^*(624)$ 、 $a_{ph}^*(675)$ 的范围分别为 $0.021 \sim 0.082 \text{ m}^2/\text{mg}$ 、 $0.007 \sim 0.025 \text{ m}^2/\text{mg}$ 、 $0.012 \sim 0.034 \text{ m}^2/\text{mg}$, 均值分别为 $(0.041 \pm 0.012) \text{ m}^2/\text{mg}$ 、 $(0.015 \pm 0.004) \text{ m}^2/\text{mg}$ 、 $(0.023 \pm 0.006) \text{ m}^2/\text{mg}$, 整个滇池湖区的 $a_{ph}^*(440)$ 、 $a_{ph}^*(624)$ 、 $a_{ph}^*(675)$ 分布并没有表现出明显的空间分异规律(图 10).

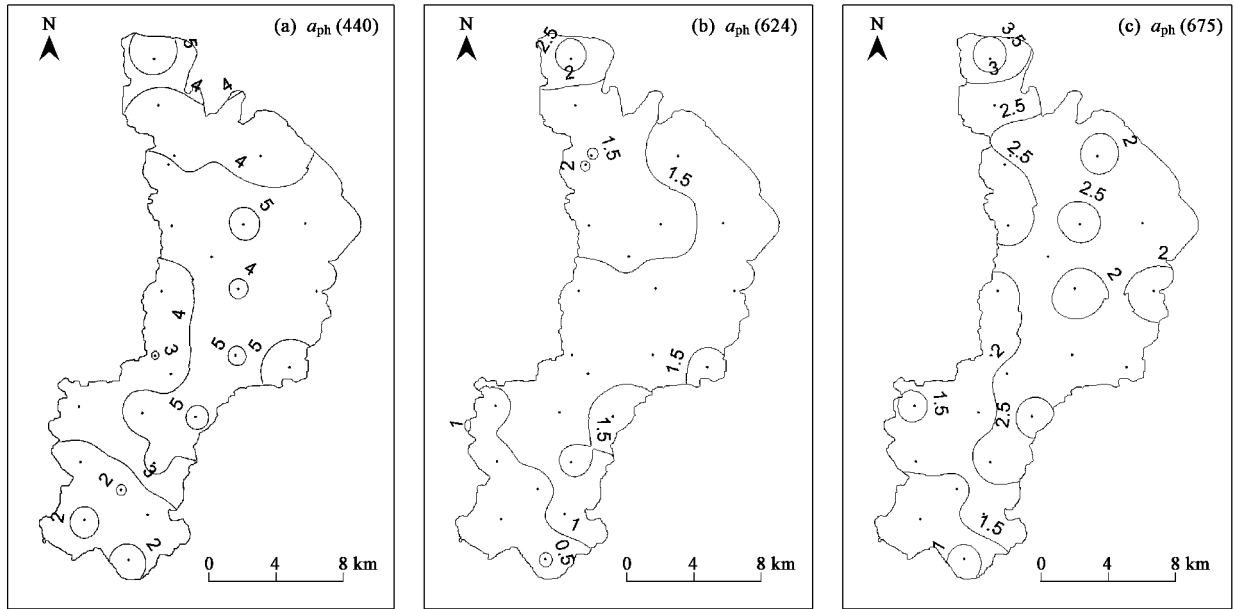


图 8 滇池浮游藻类在 440 nm、624 nm、675 nm 吸收系数分布

Fig. 8 Distribution of $a_{ph}(440)$, $a_{ph}(624)$ and $a_{ph}(675)$ in Lake Dianchi

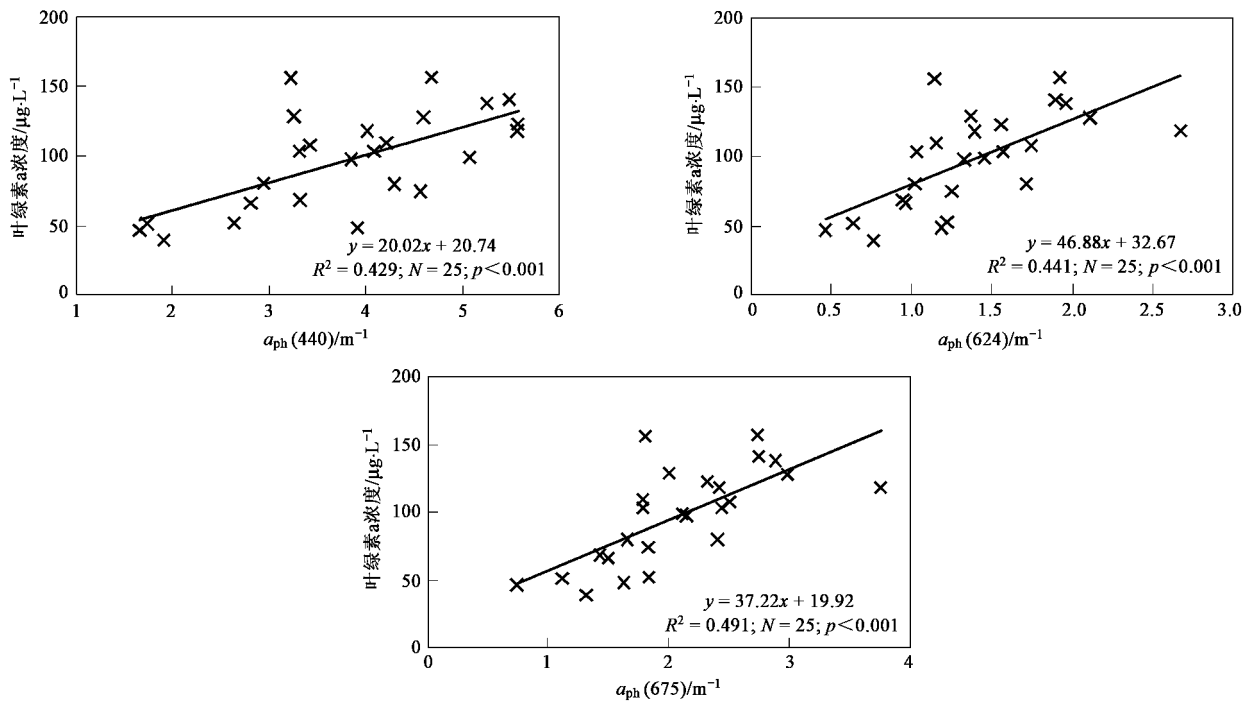


图 9 浮游藻类吸收系数与叶绿素 a 浓度 c_{CHL} 的关系

Fig. 9 Correlations between $a_{ph}(440)$, $a_{ph}(624)$, $a_{ph}(675)$ and concentration of chla

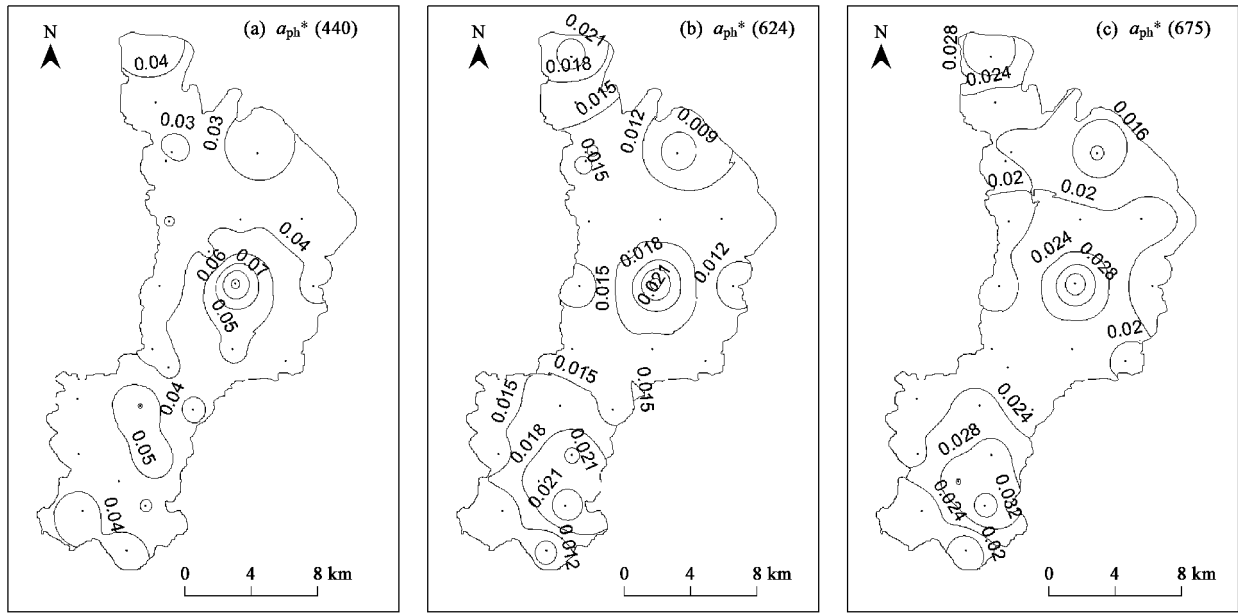


图 10 滇池浮游藻类在 440 nm、624 nm、675 nm 比吸收系数分布
 Fig. 10 Distribution of $a_{ph}^*(440)$, $a_{ph}^*(624)$ and $a_{ph}^*(675)$ in Lake Dianchi

2.3.2 非藻类颗粒物吸收系数的参数化

$a_d(440)$ 范围为 $0.753 \sim 3.173 \text{ m}^{-1}$, 均值为 $(1.935 \pm 0.673) \text{ m}^{-1}$. 若 440 nm 和 675 nm 附近出现小肩状, 说明萃取色素不完全, 本次数据并未出现这种状况, 数据质量较好. 利用最小二乘法拟合 PAR 波段内的 S_d , S_d 值范围为 $11.66 \sim 14.4 \mu\text{m}^{-1}$, 均值为 $(12.508 \pm 0.6) \mu\text{m}^{-1}$. 图 11 给出了

2 个代表站点的拟合非藻类颗粒物吸收光谱曲线和实测非藻类吸收光谱曲线的对比情况, 决定系数在 0.99 以上, 拟合效果较好. 图 12 是滇池湖区 $a_d(440)$ 和 S_d 空间分布, 从图 12 中可看到, 滇池北部湖区的 S_d 略高于南部湖区, 但是总体而言, 滇池湖区的 $a_d(440)$ 和 S_d 分布得较均匀, 并未发生明显的空间分异.

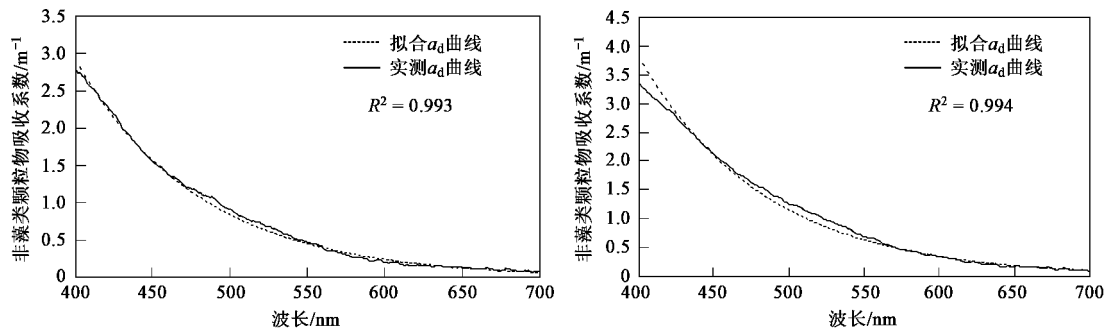


图 11 代表站点的拟合 a_d 曲线和实测 a_d 曲线的对比
 Fig. 11 Comparison of simulated a_d and measured a_d

2.3.3 总颗粒物吸收系数的参数化

滇池所有站点的总颗粒物吸收光谱曲线形态属于同一类型, 均与浮游藻类吸收系数曲线形态相似. 在 440 nm 处的吸收系数 $a_p(440)$ 的范围为 $3.422 \sim 8.411 \text{ m}^{-1}$, 均值为 $(5.704 \pm 1.119) \text{ m}^{-1}$; 在 675 nm 处的吸收系数 $a_p(675)$ 的范围为 $0.882 \sim 3.885$

m^{-1} , 均值为 $(2.186 \pm 0.667) \text{ m}^{-1}$, 对应总颗粒物浓度范围为 $24.7 \sim 66.6 \text{ mg/L}$. $a_p(440)$ 和 $a_p(675)$ 的分布图 (图 13) 显示出, 滇池西北部湖区的 $a_p(675)$ 最高, 南部最低, 而全湖的 $a_p(440)$ 则没有明显的空间分异. 这主要是因为 a_p 在 675 nm 波段处受浮游藻类的影响较大, 同时, 滇池湖区浮游藻类的吸收系

数呈现出由北向南递减的空间格局,因此 $a_p(675)$ 也大致呈现出这样的格局,而在 440 nm 处 a_p 受非藻类颗粒物和浮游藻类的共同影响,且短波处的非

藻类颗粒物吸收系数数值较大,所以整个湖区的 $a_p(440)$ 未发生明显的空间分异.

2.3.4 CDOM 吸收系数的参数化

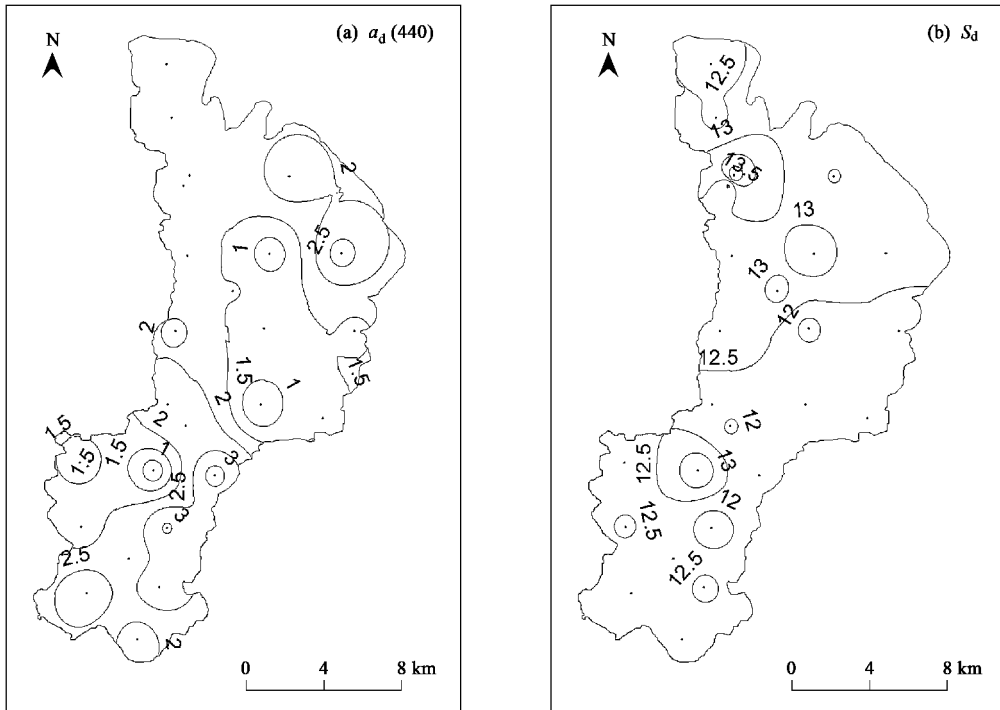


图 12 滇池非藻类颗粒物在 440 nm 的吸收系数和吸收光谱曲线斜率分布
Fig. 12 Distribution of $a_d(440)$ and S_d in Lake Dianchi

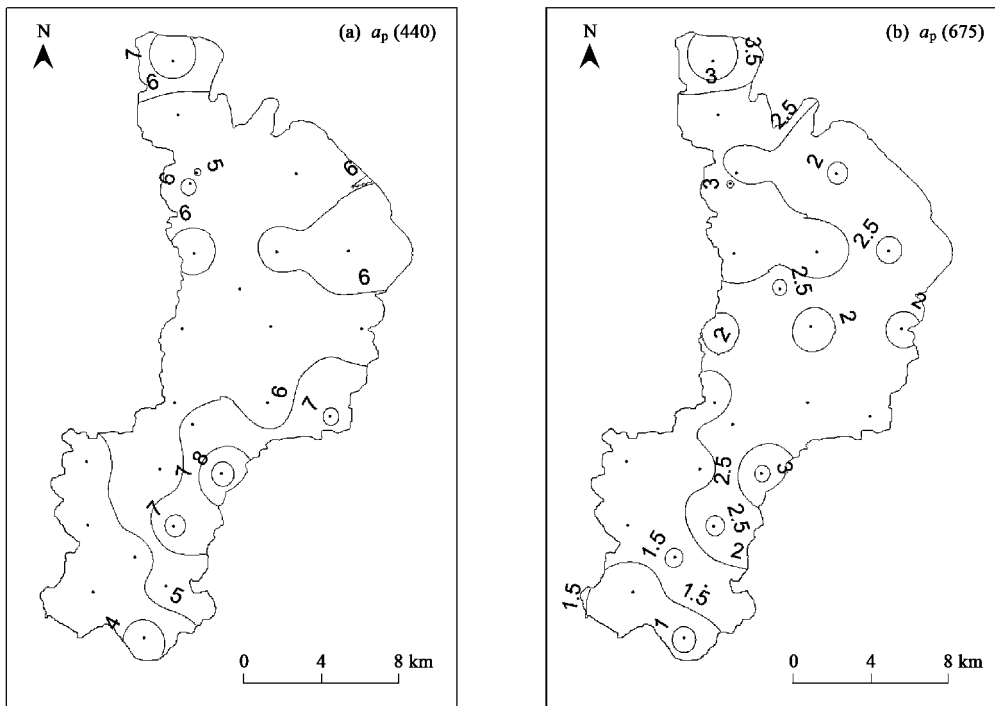


图 13 滇池总颗粒物在 440 nm 和 675 nm 的吸收系数分布
Fig. 13 Distribution of $a_p(440)$ and $a_p(675)$ in Lake Dianchi

$a_g(440)$ 的变化范围为 $0.711 \sim 2.286 \text{ m}^{-1}$, 均值为 $(1.678 \pm 0.485) \text{ m}^{-1}$. 利用 $280 \sim 500 \text{ nm}$ 范围内吸收光谱曲线拟合得到斜率值 S_g 范围为 $11.83 \sim 19.47 \mu\text{m}^{-1}$, 均值为 $(13.818 \pm 2.102) \mu\text{m}^{-1}$. 一些学者^[21,22] 在其研究区域内均发现斜率 S_g 值和 CDOM 的吸收系数之间存在显著相关, 随着吸收系数的增大, S_g 值随之降低, 并尝试以此利用单波段吸收系数 $a_g(440)$ 推算整个波长范围内的 CDOM 吸收系数. 本次数据同样也发现 $a_g(440)$ 和 S 值之间存在显著的负相关, 见图 14. 笔者尝试建立 $a_g(440)$ 与总颗粒物浓度、有机颗粒物浓度、无机颗粒物浓度以及叶绿素 a 浓度之间的关系, 发现几乎没有相关性或仅存在弱相关, 这一现象表明: ① 此时滇池的 CDOM 输入以陆源为主, 主要来自城镇生活污水、工业废水的排放以及流域内土壤侵蚀和植被腐烂等, 浮游藻类的内源释放时间滞后于浮游藻类密集生长阶段; ② 此次采样时段内, 滇池水体中吸附在颗粒物上的 CDOM 在总 CDOM 中所占比例不大.

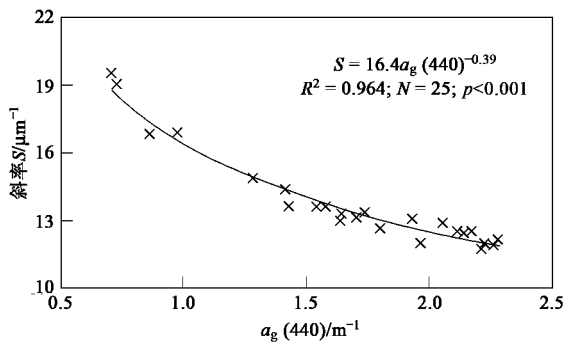


图 14 S 值与 $a_g(440)$ 的关系

Fig. 14 Correlations of S value and $a_g(440)$

Haan^[22] 提出 250 nm 和 365 nm 波长处吸收系数的比值可以表征 CDOM 分子量的大小, 定义为 $M = a(250) / a(365)$, M 值越小对应的相对分子质量越大. 张运林等^[23] 认为 CDOM 相对分子质量的大小大致能反映腐殖酸、富里酸在 CDOM 中的比例, 因为腐殖酸的相对分子质量一般较大, 而富里酸则较小, 因而 CDOM 相对分子质量越大, 腐殖酸的比例就越高. 本次数据的 M 值范围为 $6.443 \sim 10.238$, 均值为 7.678 ± 0.164 . 对 S 和 M 值的相关性进行分析后发现两者存在显著正相关, S 值越大的站点, 其 M 值就越大 (图 15), 进一步说明了 CDOM 的组成是影响 S 值的一个关键因素.

图 16 是滇池湖区 $a_g(440)$ 、 S 值和 M 值的分布图, 这 3 个固有光学量的数值在整个湖区中分布均

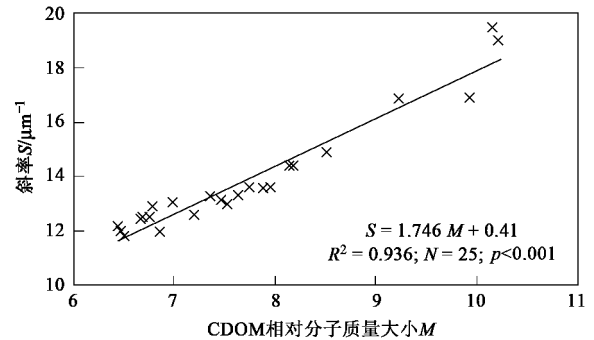


图 15 S 值与 M 值的关系

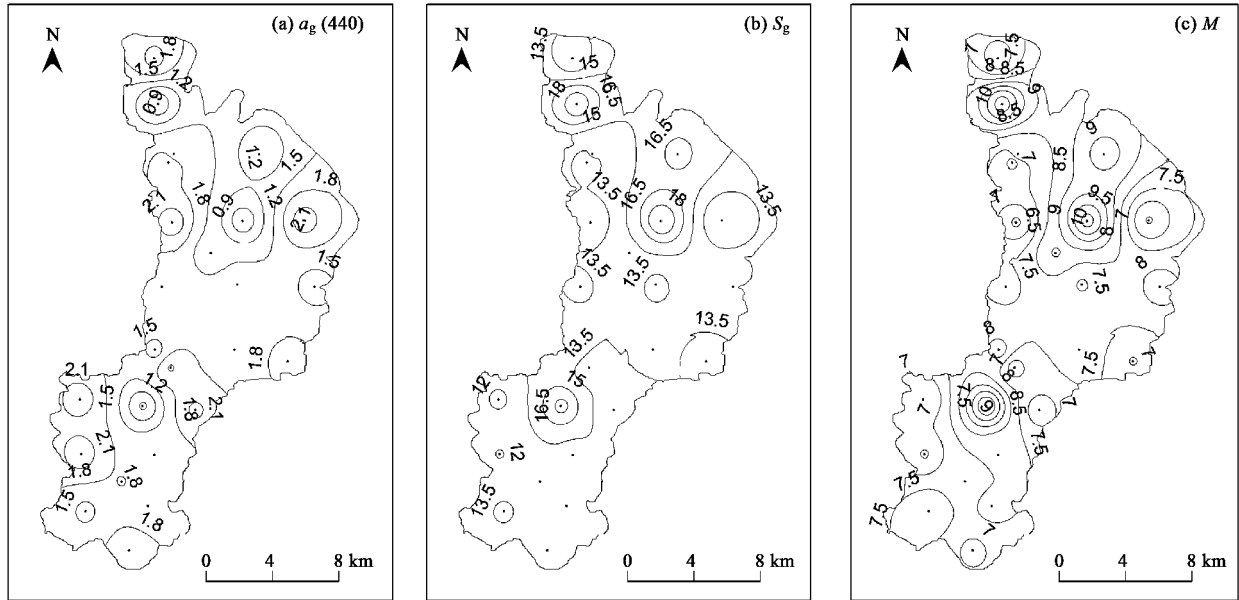
Fig. 15 Correlations of S value and M value

匀, 未发现有明显的空间分异格局, 图 5 中各站点的 CDOM 吸收光谱曲线分布相对集中, 也可看出不同站点之间 CDOM 吸收特性的差异较小.

2.4 与其他水域的对比分析

滇池南北最长约 40 km , 东西最宽约为 12.5 km , 湖面平均海拔为 1885 m , 至今约有 340 万年的漫长演化历史, 已演化成半封闭型湖泊. 在现代演化过程中, 水面不断缩小, 目前滇池的水面积仅为古滇池的 25% , 蓄水量更是仅为古滇池的 1.9% ^[2]. 滇池的演化阶段、地理背景以及周围城镇社会经济发展对滇池的影响很可能使滇池的吸收特性与其他二类水体之间存在差异性, 笔者在对滇池和其他二类水体的吸收特性进行比较后证实了这一假设. 比较滇池吸收特性和其他二类水体吸收特性的异同性, 有助于进一步加深对滇池水体吸收特性的认识, 便于在借鉴其他水域水色遥感研究成果的同时选取适用于滇池自身的固有光学参数, 从而提高生物光学模型精度.

滇池水体吸收特性的相似性主要表现在: ① 水体光学特性由浮游藻类、非藻类颗粒物、CDOM 和纯水这 4 种光学活性物质共同主导, 光学特性复杂, 明显区别于由纯水和浮游藻类主导的一类大洋水体; ② 各光学活性物质的吸收光谱曲线形态与已报道的一致, 非藻类颗粒物与 CDOM 吸收随着波长的增长呈现负指数衰减^[6,13,17,21], 浮游藻类的吸收光谱曲线在 440 、 624 和 675 nm 附近形成色素吸收峰, 在 480 nm 处呈肩状, 在 550 nm 处出现极小值^[6,8,18]; ③ 非藻类颗粒物吸收光谱曲线的斜率值 S_d 、CDOM 吸收光谱曲线的斜率值 S_g 和浮游藻类的比吸收系数 a_{ph}^* 属于水体的固有光学特性, 反映了水体的本质属性, 基本上不随水体中光学物质的浓度变化而变化 (浮游藻类密集时, 会存在“包裹”效应), 因此在

图 16 滇池 $a_g(440)$ 、 S_g 值和 M 值的分布Fig. 16 Distribution of $a_g(440)$, S_g value and M value in Lake Dianchi

一定程度上,可以进行不同水体之间的数值比较.滇池水体 S_d 的范围为 $11.66 \sim 14.44 \mu\text{m}^{-1}$,均值为 $(12.508 \pm 0.6) \mu\text{m}^{-1}$; S_g 的范围为 $11.83 \sim 19.47 \mu\text{m}^{-1}$,均值为 $(13.818 \pm 2.102) \mu\text{m}^{-1}$; $a_{ph}^*(440)$ 和 $a_{ph}^*(675)$ 的范围分别为 $0.021 \sim 0.082 \text{ m}^2/\text{mg}$ 和 $0.012 \sim 0.034 \text{ m}^2/\text{mg}$,均值分别为 $(0.041 \pm 0.012) \text{ m}^2/\text{mg}$ 和 $(0.023 \pm 0.006) \text{ m}^2/\text{mg}$,这些固有光学特性的数值均落在之前二类水体的研究结果范围之内,具体可参见表 2 ~ 表 4.

其差异性主要表现在:①如表 2 所示,滇池的 S_d 虽然在已发表的数值范围内,但是均值略高于其他二类水体,达到 $12.508 \mu\text{m}^{-1}$ 左右,与其最接近的是欧洲附近的近海水体,影响 S_d 变化的因素包括颗粒物的类型以及非藻类颗粒物中有机颗粒物和无机

颗粒物的相对比例^[6].②滇池 S_g 均值相对于其他二类水体偏小,表 3 中列出的各湖区中只有段洪涛等^[28]报道的太湖沿岸水体的 S_g 比滇池略小.这一现象在一定程度上辅证了上述关于滇池 CDOM 浓度较高原因的设想,很多学者^[6,31]都指出,当 CDOM 中外源输入占主导时,腐殖质含量较多,相应的 S_g 较小,当 CDOM 中内源释放占主导时,黄腐酸含量较多,相应的 S_g 较大.③相比表 4 中列出的各地区的二类水体,滇池浮游藻类的比吸收系数大致处于中等水平,440 nm 和 675 nm 处的比吸收约等于或大于李方^[8]报道的 9 月的石头口门水库、张运林等^[31]报道的太湖和 Eduardo 等^[32]报道的 California 南部海区,造成各水体浮游藻类比吸收不同的原因是其受不同地区、不同季节和浮游植物种群结构的影响.

表 2 滇池和其他水体的 S_d 值比较¹⁾Table 2 Value of S_d from some literatures, as well as from this study

研究区	波段范围 /nm	参考波段 /nm	$S_d/\mu\text{m}^{-1}$		文献
			范围	均值	
石头口门水库(6月)	400~650	440	—	11.78	[8]
石头口门水库(9月)	400~650	440	—	11.38	[8]
太湖梅梁湾(7月)	400~700	440	9.4~12	10.91 ± 0.62	[18]
太湖(10月)	400~650	440	9~12.9	11.7 ± 0.6	[24]
Lake Erie(5~9月)	350~750	440	7.7~17	11	[6]
Sargasso Sea(9,10月)	350~750	440	8~15	10.9 ± 1.9	[25]
Peruvian upwelling(8,9月)			2.4~17	9.9 ± 3.6	[25]
coastal waters around Europe(4~10月)	350~500	440	8.9~17.8	12.3 ± 1.3	[26]
滇池整个湖区(9月)	400~700	440	11.66~14.4	12.508 ± 0.6	本研究

1) 表中湖区除 Peruvian upwelling 外均位于北半球

表 3 滇池和其他水体的 S_g 值比较¹⁾Table 3 Value of S_g from some literatures, as well as from this study

研究区	波段范围 /nm	波段 /nm	$S_g/\mu\text{m}^{-1}$		文献
			范围	均值	
巢湖(8月)	350~550	440	13.3~17.5	15.4	[7]
太湖梅梁湾(7月)	280~500	440	14.7~16.4	15.52±0.4	[18]
梅梁湾大太湖(夏季水华期)	280~500	355	14~18.5	15.5±1.2	[23]
梅梁湾大太湖(冬季)	280~500	355	14.3~20.1	17±1.5	
太湖沿岸水体(6月)	400~600	440	3.9~23.2	11.7	[28]
Lake Erie(5~9月)	350~750	440	12.8~19.7	16.1	[6]
coastal waters around Europe(4~10月)	300~500	—	11.4~25.1	17.6±2	[26]
the Clyde Sea(6月)	350~750	440	8~27	18±5	[29]
滇池整个湖区(9月)	280~500	440	11.83~19.47	13.818±2.102	本研究

1) 表中湖区均位于北半球

表 4 滇池和其他水体的 $a_{ph}^*(440)$ 和 $a_{ph}^*(670)$ 值比较¹⁾Table 4 Value of $a_{ph}^*(440)$ and $a_{ph}^*(670)$ from some literatures, as well as from this study

研究区	440 nm 附近的浮游藻类比 吸收系数/ $\text{m}^2 \cdot \text{mg}^{-1}$		670 nm 附近的浮游藻类比 吸收系数/ $\text{m}^2 \cdot \text{mg}^{-1}$		文献
	范围	均值	范围	均值	
	石头口门水库(6月)	0.033~0.069	0.048	0.02~0.034	
石头口门水库(9月)	0.021~0.058	0.034	0.012~0.031	0.019	[30]
南海北部(9月)	0.041~0.295	0.137	0.023~0.107	0.047	[31]
太湖夏季	0.014~0.052	0.028	0.009~0.025	0.016	[6]
Lake Erie(5~9月)	0.013~0.505	0.086	0.007~0.157	0.04	[32]
southern region of California Current((1,2月)	0.008~0.102	0.041	0.001~0.038	0.015	本研究
滇池整个湖区(9月)	0.021~0.082	0.041~0.012	0.012~0.034	0.023±0.006	

1) 表中湖区均位于北半球

3 结论

(1) 滇池水体中总颗粒物的组成以浮游藻类为主导,一方面是因为滇池流域四季如春,即使在9月中旬浮游藻类仍处于密集生长状态,另一方面是因为滇池流域内城市工业用水、生活污水以及土壤腐殖质进入滇池,带来大量的氮、磷等营养物质,促进了浮游藻类的生长. 滇池 $a_{ph}(440)$ 、 $a_{ph}(624)$ 和 $a_{ph}(675)$ 大致呈现出从北向南递减的趋势,北部湖区相比南部湖区藻类更为密集,富营养化程度更高,初步推断主要是因为北部湖区靠近昆明市区,大量城市污水及其所含的氮、磷营养物质被排放到滇池中,促进藻类的生长,加快了富营养化进程,此外,滇池湖区盛行西南风,导致湖面上大量浮游藻类被输送到北部湖区. c_{CHL} 与 $a_{ph}(440)$ 、 $a_{ph}(624)$ 和 $a_{ph}(675)$ 都存在显著线性相关,与 $a_{ph}(624)$ 的显著相关在一定程度上表明了蓝藻在滇池水体中的优势藻种地位.

(2) 滇池水体中 CDOM 和 c_{CHL} 无明显相关性,此时 CDOM 的输入以陆源为主,主要来自陆上生活污水和工业污水的排放以及流域内土壤侵蚀和植被

腐烂等. 斜率 S_g 和 $a_g(440)$ 、相对分子质量大小 M 值之间存在显著相关.

(3) 滇池的吸收特性和世界上其他二类水体之间存在异同性. 滇池水体的 S_d 、 S_g 、 $a_{ph}^*(440)$ 和 $a_{ph}^*(670)$ 的范围均落入之前其他二类水体研究结果之中; S_d 大于其余二类水体; S_g 均值相对于其余水体偏小; $a_{ph}^*(440)$ 和 $a_{ph}^*(670)$ 与其它二类水体相比,大致处于中等水平,浮游藻类的比吸收系数受不同地区、不同季节和浮游植物种群结构等多种因素的影响.

致谢:感谢参加滇池实验的所有工作人员在数据获取过程中的所作的贡献,感谢孙德勇博士和乐成峰博士在论文写作及修改中给予的帮助以及指导.

参考文献:

- [1] 郭慧光, 闫自申. 滇池富营养化及面源控制问题思考[J]. 环境科学研究, 1999, 12(5): 43-44.
- [2] 肖青. 滇池水环境的现状、成因及对策[J]. 水利科技与经济, 2005, 11(1): 26-28.
- [3] Althuis I A. Suspended particulate matter detection in the North Sea by hyper spectral airborne remote sensing [J]. Aquatic Ecology, 1998, 32: 93-98.
- [4] Conmy R N, Coble P G, Chen R F, et al. Optical properties of

- colored dissolved organic matter in the Northern Gulf of Mexico [J]. *Marine Chemistry*, 2004, **89**:127-144.
- [5] Sosik H M, Mitchell B G. Light absorption by phytoplankton, photosynthetic pigments and detritus in the California Current System [J]. *Deep Sea Research*, 1995, **42**(10):1717-1748.
- [6] Binding C E, Jerome J H, Bukata R P, *et al.* Spectral absorption properties of dissolved and particulate matter in Lake Erie [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2008, **112**(4):1702-1711.
- [7] 戴永宁,李素菊,王学军. 巢湖水体固有光学特性研究[J]. *环境科学研究*, 2008, **21**(5):173-177.
- [8] 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[J]. *湖泊科学*, 2009, **21**(2):280-287.
- [9] 张运林. 水体中有色可溶性有机物的研究进展[J]. *海洋湖沼通报*, 2006, **3**:119-127.
- [10] Strömbeck N. Water quality and optical properties of Swedish Lakes and coastal waters in relation to remote sensing [D]. Sweden:Uppsala University, 2001.
- [11] Cleveland J S, Weidemann A D. Quantifying absorption by aquatic particles: A multiple scattering correction for glass-fiber filters [J]. *Limnology and Oceanography*, 1993, **38**(6):1321-1327.
- [12] Tassan S, Ferrari G M. An alternative approach to absorption measurement of aquatic particles retained on filters [J]. *Limnology and Oceanography*, 1995, **40**(8):1358-1368.
- [13] Bricaud A, Morel A, Prieur L. Absorption by dissolved organic matter of the sea (yellow substance) in the UV and visible domain [J]. *Limnology and Oceanography*, 1981, **26**(1):43-53.
- [14] 陈宇炜,陈开宁,胡耀辉. 浮游植物叶绿素 a 测定的“热乙醇法”及其测定误差的探讨[J]. *湖泊科学*, 2006, **18**(5):550-552.
- [15] Lorenzen C J. Determination of chlorophyll and pheo-pigments: spectrophotometric equations [J]. *Limnology and Oceanography*, 1967, **12**:343-346.
- [16] Markager W, Vincent W F. Spectral light attenuation and the absorption of UV and blue light in natural waters [J]. *Limnology and Oceanography*, 2000, **45**(3):642-650.
- [17] 张运林,张恩楼,刘明亮. 云南高原湖泊有色可溶性有机物和颗粒物光谱吸收特性[J]. *湖泊科学*, 2009, **21**(2):255-263.
- [18] 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[J]. *生态学报*, 2006, **26**(12):3969-3979.
- [19] 曹文熙,杨跃忠,许晓强,等. 珠江口悬浮颗粒物的吸收光谱及其区域模式[J]. *科学通报*, 2003, **48**(17):1876-1882.
- [20] Nelson J R, Guarda S. Particulate and dissolved spectral absorption on the continental shelf of the southeastern United States [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1995, **100**(C5):8715-8732.
- [21] Kowalczyk P, Stedmon C A, Markager S. Modeling absorption by CDOM in the Baltic Sea from season, salinity and chlorophyll [J]. *Marine Chemistry*, 2006, **101**:1-11.
- [22] Haan H D. Solar UV-light penetration and photodegradation of humic substances in peaty lake water [J]. *Limnology and Oceanography*, 1993, **38**(5):1072-1076.
- [23] 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[J]. *水科学进展*, 2007, **18**(3):415-423.
- [24] Ma R, Tang J, Dai J, *et al.* Absorption and scattering properties of water body in Taihu Lake, China: absorption [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2008, **27**(19):4277-4304.
- [25] Bricaud A, Stramski D. Spectral absorption coefficients of living phytoplankton and nonalgae biogenous matter: a comparison between the Peru upwelling area and the Sargasso Sea [J]. *Limnology and Oceanography*, 1990, **35**(3):562-582.
- [26] Babin M, Stramski D, Ferrari G M, *et al.* Variation in the light absorption coefficients of phytoplankton, nonalgal particles, and dissolved organic matter in coastal waters around Europe [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2003, **108**(C7):3211, doi: 10.1029/2001JC000882.
- [27] Bowers D G, Binding C E. The optical properties of mineral suspended particles: A review and synthesis [J]. *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 2006, **67**:219-230.
- [28] 段洪涛,马荣华,孔维娟,等. 太湖沿岸水体 CDOM 吸收光谱特性[J]. *湖泊科学*, 2009, **21**(2):242-247.
- [29] Bowers D G, Harker G E L, Smith P S D, *et al.* Optical properties of a region of freshwater influence (the Clyde Sea) [J]. *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 2000, **50**(5):717-726.
- [30] 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[J]. *热带海洋学报*, 2005, **24**(5):1-10.
- [31] 张运林. 太湖水体生物-光学特性及其生态学意义[D]. 南京:中国科学院南京地理与湖泊研究所, 2005.
- [32] Eduardo M N, Sieracki M E, Roberto M N, *et al.* Specific absorption coefficient and phytoplankton biomass in the southern region of the California Current [J]. *Deep-Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 2004, **51**:817-826.