

太阳高度角对太湖水体真光层深度变化的影响分析

邱 辉¹,赵巧华^{2*},孙德勇²,朱伟军¹,陶蓉茵²,钱昊钟¹,姜雨薇²,季春华²(1.南京信息工程大学大气科学学院,江苏 南京 210044; 2.南京信息工程大学遥感学院,江苏 南京 210044)

摘要: 在假定水体表面为镜面、水体中无内光源、无非弹性散射的前提下,通过 Kirk 的辐射传输理论,研究了太湖水体中不同的太阳高度角对真光层深度变化的影响.结果表明,散射系数与吸收系数的比(b/a)值的大小是决定太阳高度角对真光层深度影响的关键因子, $b/a>15$ 时,太阳高度角对真光层深度的影响较小,基本可以忽略.针对秋季太湖区域而言,在较短波段(400~540nm) b/a 的值在整个湖区均较小,此时要考虑太阳高度角对真光层深度的影响;在较长波段(540~700nm), b/a 的值在整个湖区均较大,可以不考虑太阳高度角对真光层深度的影响.

关键词: 真光层深度; 太阳高度角; 太湖水体

中图分类号: X122 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-6923(2011)10-1690-07

Analysis on the effect of the solar altitude angles on the euphotic depth in Lake Taihu. QIU Hui¹, ZHAO Qiao-hua^{2*}, SUN De-yong², ZHU Wei-jun¹, TAO Rong-yin², QIAN Hao-zhong¹, JIANG Yu-wei², JI Chun-hua² (1.College of Atmospheric Science, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China; 2.College of Remote Sensing, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China). *China Environmental Science*, 2011,31(10): 1690~1696

Abstract: In the context of Kirk's radiative transfer theory under the assumption that a mirror surface water column has no internal light source and elastic scattering, an investigation was conducted on the effect of the solar altitude angles on the depth of euphotic layer in Taihu Lake. Evidences showed that the ratio of scattering to absorption coefficients (b/a) was the key factor to determine the extent of the above effect, which would be smaller and even be neglected if the ratio (b/a) reached to 15 or larger. As for the autumn season, due to the fact that the ratio (b/a) was relatively smaller (larger) in the entire lake, the solar altitude angle effect should be taken into account (ignored) in the short-wave (long-wave) band of 400~540nm (540~700nm).

Key words: euphotic depth; solar altitude angles; water body of Lake Taihu

水体真光层深度定义为水柱中支持净初级生产力的水体部分,其底部临界深度,即水柱的日净初级生产力为零值的深度^[1].真光层深度直接影响着水体中浮游植物分布、初级生产力及水体生态系统变化,是水生态系统研究中的一个重要参数^[2].真光层深度一方面取决于水体中各类物质对光的衰减,同时还与到达水表面的光强有关,为了研究的方便和规范化,大多数研究者将辐照度为水表面辐照度 1% 的深度定义为真光层深度^[3].水体真光层深度与水质参数(如:透明度、叶绿素、悬浮物浓度等)之间存在很好的统计关系,例如在大洋水体中,真光层深度与叶绿素浓度之间有很好的相关,往往通过计算叶绿素浓度来反演真光层深度^[4-6],而对于以非色素颗粒物主导

的浑浊二类水体,真光层深度很大程度上受制于非色素颗粒物浓度,其次才是叶绿素浓度^[7-11].针对一类大洋水体,曹文熙等^[6]研究表明,真光层深度不仅与水体叶绿素浓度有关,而且与入射光的光场分布有关.

不同的水体真光层深度差异显著,在清洁的海洋中,真光层深度可以达到 100m 以上,而在浑浊的内陆水体有时则只有几十 cm.太湖是典型的混浊富营养化湖泊水体,水体在物质组成上和组分浓度大小上都与海洋水体差异明显.针对混

收稿日期: 2010-12-14

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41071070,40701168);国家科技重大专项(2009ZX07101-013)

* 责任作者, 副教授, qzhao@nuist.edu.cn

浊湖泊水体,水体真光层深度受太阳高度变化的影响研究仍鲜有报道.本研究利用数值实验方法研究太阳高度角的变化对真光层深度的定量影响,探寻真光层深度与入射光场分布的关系,并结合太湖地区实测数据对结果进行验证,得到太湖区域真光层深度与太阳高度角的关系,以期对太湖水体真光层的变化、水下光场分布及水生态环境变化研究起到一定的推动作用.

1 材料与方法

1.1 采样时间及点位

于2010年10月4~8日在太湖进行野外调查,共采集32个样点数据,样点分布如图1所示.采样期间风速较小,天气晴好.采集水样带回实验室分析水体固有光学量,同时野外原位记录采样点的经纬度,测定水温、风速、风向等辅助参数.

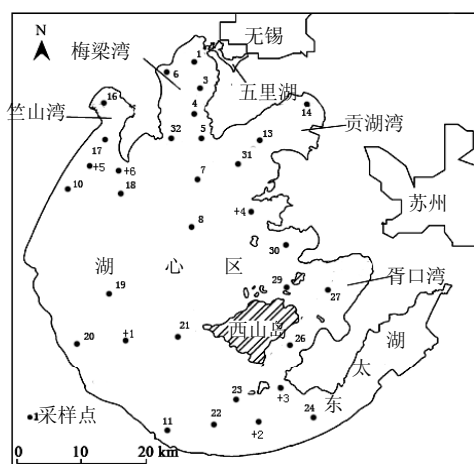


图1 太湖采样站点分布示意

Fig.1 Distribution of sampling stations

1.2 总悬浮物、黄质光谱吸收系数的测定

1.2.1 总悬浮物光谱吸收系数的测定 悬浮颗粒物的吸收系数利用定量滤膜技术测定^[12].首先用滤膜过滤一定量的水样,然后用UV-240IPC型紫外分光光度计测量过滤所得的滤膜的吸光度,计算吸收系数.计算方法为:利用Cleveland等^[13]提出的公式进行散射校正:

$$D_s(\lambda) = 0.378D_f(\lambda) + 0.523D_f^2(\lambda) \quad (1)$$

式中: $D_s(\lambda)$ 为校正后滤膜上悬浮颗粒物的吸光度; $D_f(\lambda)$ 为直接在仪器上测定的滤膜上颗粒物的吸光度减去 700nm 波长处的吸光度.

吸收系数的计算^[14]:

$$a_p(\lambda) = 2.303 \times \frac{S}{V} D_s(\lambda) \quad (2)$$

式中: $a_p(\lambda)$ 为光谱吸收系数; S 为沉积在滤膜上颗粒物的有效面积; V 为被过滤水样的体积.

1.2.2 有色溶解有机质(CDOM)光谱吸收系数的测定 使用 0.22 μm 的滤膜过滤水样,提取出黄质,然后将黄质水样放入 1cm $\times$ 4cm 的比色皿中,再利用分光光度计(实测波长 240~800nm)测量 CDOM 的吸光度.光谱吸收系数的计算为^[14]:

$$a_{\text{CDOM}}(\lambda)' = 2.303 \times D(\lambda) / r \quad (3)$$

$$a_{\text{CDOM}}(\lambda) = a_{\text{CDOM}}(\lambda)' - a_{\text{CDOM}}(700)' \lambda / 700 \quad (4)$$

以式(4)进行散射校正.

式中: $D(\lambda)$ 为吸光度; r 为光程路径; m ; $a_{\text{CDOM}}(\lambda)'$ 为波长 λ 的未校正的吸收系数, m^{-1} ; $a_{\text{CDOM}}(\lambda)'$ 为波长 λ 的吸收系数, m^{-1} ; $a_{\text{CDOM}}(700)$ 为参考波长 700nm 处的吸收系数.

1.3 真光层深度的计算

将辐照度为水表面辐照度 1% 的深度视为真光层深度,其与漫射衰减系数存在如下关系^[15]:

$$D_{\text{eu}}(\lambda) = 4.605 / K_d(\lambda) \quad (5)$$

式中: λ 为波长; $D_{\text{eu}}(\lambda)$ 为真光层深度, m ; $K_d(\lambda)$ 为漫射衰减系数, m^{-1} .

漫射衰减系数 $K_d(\lambda)$ 按式(6)计算^[15-17]:

$$K_d(\lambda) = \frac{1}{\mu_0} [a(\lambda)^2 + G(\mu_0)a(\lambda)b(\lambda)]^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

式中: $K_d(\lambda)$ 为漫射衰减系数; μ_0 为水表面以下太阳天顶角余弦; $a(\lambda)$ 为吸收系数; $b(\lambda)$ 为散射系数, $G(\mu_0)$ 为 μ_0 的线性函数,可以表示为 $G(\mu_0) = g_1\mu_0 - g_2$, g_1 、 g_2 可以看作是常数,这里 $g_1=0.425$ 、 $g_2=0.19$. $\mu_0 = \sqrt{1 - (\frac{\sin(\theta)}{n})^2}$, 其中 θ 为太阳天顶角, n 为折射指数.

将式(6)代到式(5)中,得到真光层深度与吸收、散射系数以及太阳高度角的定量关系(为简

单起见,公式中省略波长 λ):

$$D_{\text{cu}} = 4.605\mu_0[a^2 + (0.425 \times \mu_0 - 0.19)ab]^{-\frac{1}{2}} \quad (7)$$

式中: a 为总的吸收系数, b 为散射系数.湖水的衰减系数主要由纯水、黄色物质、色素和非色素颗粒物的吸收和散射组成.因此总吸收系数 a 可表示为 $a = a_{\text{CDOM}} + a_p + a_w$,其中 a_{CDOM} 为黄质的吸收系数, a_p 为总悬浮颗粒物的吸收系数, a_w 为纯水的吸收系数.散射系数 b 等于湖水的衰减系数减去总的吸收系数.

2 结果与分析

2.1 太湖吸收光谱和散射光谱特征

从图 2a 可见,2010 年 10 月太湖实测 32 个站点中大部分采样点的吸收系数(a)同时表现出藻类和非藻类颗粒物的吸收谱线特征,在 676nm 的吸收峰明显,在 560nm 附近有吸收谷值,400~500nm 由于 CDOM、非色素悬浮物及浮游植物叶绿素 a 的吸收,水体的总吸收系数较高^[18],吸收系数随波段呈指数衰减.太湖湖区 a 值的空间差异比较明显,除受浮游植物的影响外,还与太湖较浅,受风浪作用沉积物容易再悬浮的影响有关.由图 2b 可见,散射系数(b)的光谱近似为倾斜的直线,从较短波长到较长波长呈逐渐下降的趋势,在 676nm 附近出现较小的低谷,这是受到有机悬浮物强吸收的影响.由图 2c 可见, b/a 的值在较长和较短波长时较小,尤其是在较短波段,这与 a 值在短波较大有关;最大比值出现在 580nm 附近,这是太湖水体悬浮物的敏感波段,同时也是叶绿素和胡萝卜素弱吸收区.676nm 附近的谷值也非常很明显,这是由于叶绿素在该波段附近的吸收作用较强,色素颗粒物的 a 值较大造成的.由于各站点水中颗粒物主导因子类型不同,悬浮物浓度差异明显,造成了太湖水体中各参数的显著差异性.

2.2 真光层深度与吸收、散射系数和太阳高度角的理论关系

根据式(7)令 $a=1(\text{m}^{-1})$,探讨 b/a 在 0~20 之间变化、太阳高度角从 1~90°(天顶角 θ 从 89°变化到 0°)时真光层深度的变化.

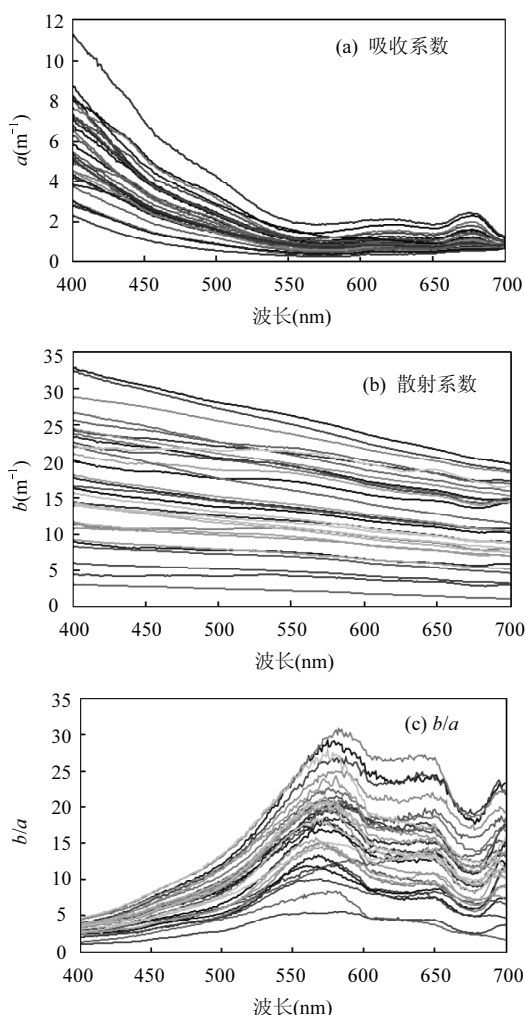
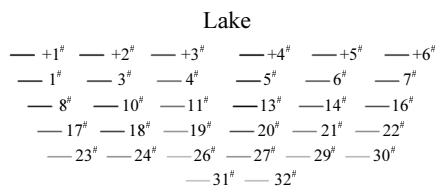


图 2 全湖 32 个站点 a 、 b 和 b/a 的光谱特征
Fig.2 Spectral characteristics of a , b and b/a in Taihu



从图 3 中可以看到, b/a 的值越小,太阳高度角对真光层深度的影响越大,当 b/a 的值大于 15 时,太阳高度角对真光层深度的影响较小.太阳高度角在 1~10°、70~90°之间变化时,各类 b/a 值所对应的真光层深度变化相对较小;太阳高度角在 10~70°之间变化时,真光层深度的变化比较大.这与 μ_0 的变化趋势基本一致.出现这种现象的原因是:当太阳高度角较小时,由于光的

入射倾角较小,光子行程较长,光子发生散射的次数较多,因而漫射光比例比较大,光子被吸收的概率较高,所以太阳高度角变化时,光垂直衰减的深度变化较小^[19];太阳高度角较大时,光接近于直射,当太阳高度角变化时,光的行程变化较小,光的垂直衰减改变较小.

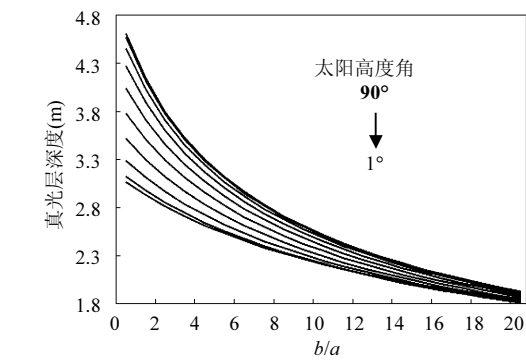


图3 不同 b/a 时 D_{eu} 随太阳高度角的变化
Fig.3 Variation of D_{eu} with the solar altitude angles at different b/a

假定 μ_0 从 μ_{0a} 变化到 μ_{0b} ,则真光层深度的增幅为:

$$\frac{D_{eu}(\mu_{0b})-D_{eu}(\mu_{0a})}{D_{eu}(\mu_{0a})}=\frac{\sqrt{\frac{1+(0.425\mu_{0b}-0.19)\frac{b}{a}}{1+(0.425\mu_{0a}-0.19)\frac{b}{a}}}-\mu_{0a}}{\mu_{0a}}=F(\mu_0,\frac{b}{a})$$

可以看到,真光层深度随太阳高度角变化的增幅只与 μ_0 和 b/a 有关.不同的 b/a 时真光层深度随太阳高度角变化的增幅如表 1(10° 时增幅的计算公式为: $\frac{D_{eu}(10^\circ)-D_{eu}(1^\circ)}{D_{eu}(1^\circ)}$; 20° 时增幅的计算公式为: $\frac{D_{eu}(20^\circ)-D_{eu}(1^\circ)}{D_{eu}(1^\circ)}$;其他类似).

从表 1 中可以看到,对于同样的太阳高度角, b/a 越小,真光层深度随太阳高度角的变化越大.当太阳高度角从 1° 增加到 90° 时,若不考虑散射系数真光层深度增加了 50.2%;若 $b/a=1$,真光层深度增加了 41.3%;若 $b/a=10$,真光层深度增加了 14%; $b/a>15$ 时,真光层深度的增幅小于 10%.当太阳高度角从 1° 变化到 10° 和从 70° 变化到 90° 时,真光层深度的增幅较小,最大不超过 4%每 10° ;而当太阳高度角在 $10\sim70^\circ$ 之间变化时,真光层深度每 10° 的增幅在(5%~8.6%).

表 1 不同 b/a 时真光层深度的增幅(%)
Table 1 Growth of the D_{eu} in different value of b/a (%)

太阳高度角	$b/a=0$	$b/a=1$	$b/a=2$	$b/a=3$	$b/a=5$	$b/a=10$	$b/a=15$	$b/a=20$
10°	1.86	1.61	1.41	1.24	0.96	0.50	0.22	0.03
20°	7.08	6.11	5.32	4.65	3.60	1.92	0.93	0.28
30°	14.62	12.51	10.82	9.43	7.30	4.01	2.14	0.94
40°	23.24	19.69	16.93	14.71	11.37	6.43	3.71	1.99
50°	31.79	26.68	22.81	19.76	15.28	8.84	5.40	3.25
60°	39.35	32.76	27.87	24.09	18.62	10.97	6.95	4.48
70°	45.23	37.41	31.71	27.36	21.16	12.61	8.19	5.49
80°	48.94	40.31	34.10	29.39	22.73	13.64	8.98	6.15
90°	50.20	41.30	34.91	30.08	23.26	14.00	9.26	6.38

2.3 太湖水体太阳高度角对真光层深度的影响分析
太湖面积 2338.1km^2 ,平均水深 1.9m,最大水深 2.6m,是一个典型的大型浅水湖泊.该湖是一个富营养化、水华频发的内陆水体,其受风浪扰动影响较大,同时不同季节水体组分构成和浓度差异明显,水体光学特性复杂.针对秋季太湖水体,分析了水体总的 b/a 值的空间分布,以及不同太阳高度角时真光层深度的变化.

2.3.1 实测 a 、 b 值大致相同、太阳高度角不同时真光层深度的差别 选择太阳高度角不同、 a 、 b 值大致相同的 3[#]和 23[#]两个点来看不同太阳高度角时真光层深度的差别.3[#]和 23[#]点太阳高度角分别为 51.02° 和 20.63° .由图 4 可见,3[#]和 23[#]点的吸收系数、散射系数以及两者的比值基本一致,3[#]点太阳高度角大于 23[#]点,差值为 30° 左右.从真光层深度谱的变化上来看,3[#]点真光层深度整体上比 23[#]点大,尤其是在波长较短的波段两

者的差值明显,这说明了当吸收系数和散射系数大致相同的时候,太阳高度角越大真光层深度越大;同时在较短波段(400~540nm) b/a 的值较小,真光层深度对太阳高度角的依赖较大,在较长波段(540~700nm) b/a 的值较大,太阳高度角对真光层深度的影响较小。

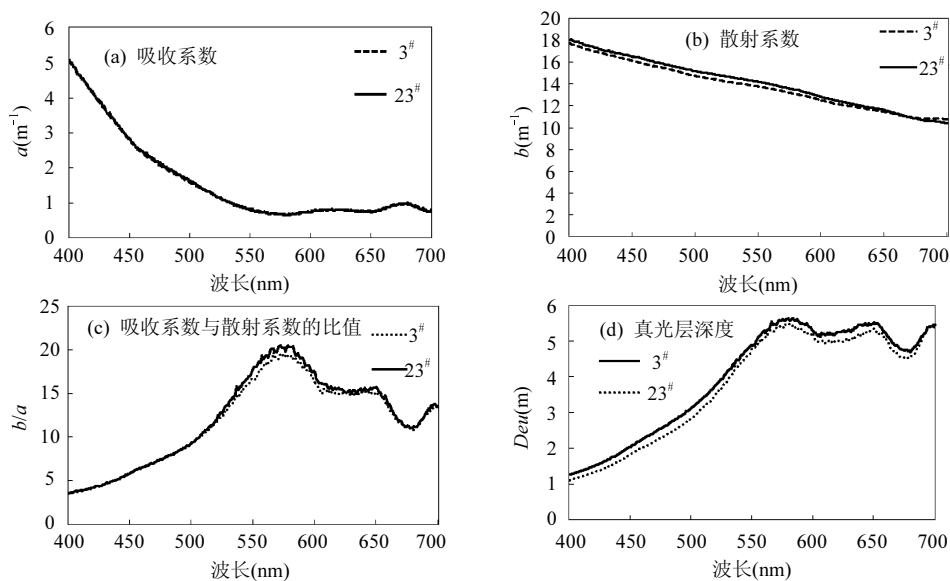


图4 3[#]、23[#]站点 a 、 b 、 b/a 和 D_{eu} 谱的变化
Fig.4 Variation of a , b , b/a and D_{eu} at the stations of 3[#] and 23[#]

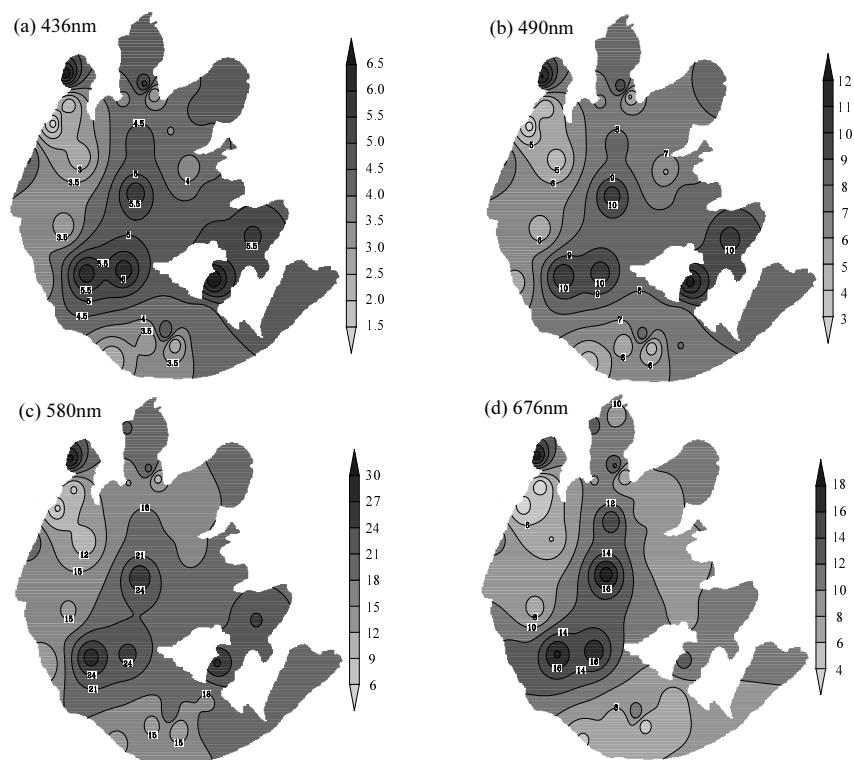


图5 太湖实测 32 个站点 436、490、580 和 676 nm b/a 的空间分布
Fig.5 Spatial distributions of b/a in Lake Taihu at 436, 490, 580 and 676 nm wavelength

2.3.2 太湖典型波段 b/a 的空间分布 不同水体的吸收系数和散射系数的差别比较大,同时由于吸收和散射系数的光谱特性,不同波段 b/a 相差也较大,因此不同波段处真光层对太阳高度角的依赖程度也是不同的.太湖是典型的二类水体,水体的浊度较大,不同湖区水体的组成差异也比较大,吸收系数和散射系数的差别明显.在整个水生生态系统中,水体中各介质的吸收特性决定了它们在水中对光的竞争能力,影响光合有效辐射能量在水体各介质之间的分配,从而决定了水体的初级生产力及水生生态系统结构和功能的演化^[17].不同波段真光层深度是决定水生生态系统的重要环境因子,藻类颗粒物中的叶绿素 a 在 436nm 左右存在一蓝光吸收峰,在 676nm 左右存在一红光吸收峰,藻类颗粒物在 490nm 左右有一肩峰;黄质和非藻类颗粒物强烈的吸收能力主要分布在短波区域,580nm 是水体悬浮物的敏感波段,颗粒物的散射作用强,同时是叶绿素和胡萝卜素弱吸收区.因此选择以上 4 个波段进行研究.将实测的太湖 32 个站点吸收和散射系数的比值利用反距离权重法进行空间插值,得到 b/a 的空间分布.从图 5 可以看出,湖心区 b/a 的值在不同的波段均是较大的,这与湖心区风速较大,底泥容易悬浮造成水体中颗粒物较多,颗粒物的散射作用较大有关; b/a 的最小值出现在竺山湾的外围.在 436nm、490nm 整个湖区 b/a 的值均小于 15,因此在较短波段时不能忽略太阳高度角对真光层深度的影响;在 580nm、676nm 有部分区域 b/a 的值大于 15,在 580nm,除了竺山湾的出口区 b/a 的值较小之外,其他区域均较大,676nm 除了在湖心区和西太湖以及竺山湾里面 b/a 较大,可以不考虑太阳高度角的影响外,其他区域还是要考虑太阳高度角对真光层深度的影响.

3 讨论

早期研究认为,漫射衰减系数(K_d)主要是由水体固有光学性质决定的,受环境光场的影响较小,因此被认为是“准固有光学性质”^[20].但是在后来的研究中发现,在一类水体中, K_d 与天顶角之间存在显著的相关,尤其是在波长较长的红光

波段^[21-24], $K_d \propto 1/\cos\theta_w$,其中 θ_w 为直接入射进入水体后的天顶角^[22],数值模拟的结果也显示了 K_d 的变化依赖于天顶角的变化^[16,23].吸收系数和散射系数是衡量水体中各组分对光的吸收和散射程度的物理量,是水体重要的固有光学性质.水体组分的固有光学性质直接影响水体的表观光学量,Kirk^[15]利用 Monte Carlo 方法模拟了浑浊水体中光场的分布,发现漫射衰减系数 K_d 与 a 值和 b 值之间有很好的相关性,同时 Kirk^[16]还利用该方法研究了太阳高度的变化对固有光学性质和表观光学性质之间关系的影响,得到 K_d 主要依赖于 a 值,并且随平均余弦的变化而变化;同时还发现高散射水体的 K_d 对太阳天顶角变化不敏感,这也与 Zheng 等^[22]的研究结论是一致的,其认为在以吸收为主的(例如波长大于 510nm 的一类水体)水体中 K_d 与天顶角的关系密切.

K_d 随着天顶角的增大而增大,因此由 K_d 计算得到的真光层深度也必定与天顶角有关.Morel 等^[24]研究了一类大洋水体中真光层深度与天顶角的关系,得到在固定的叶绿素浓度下真光层深度随着天顶角的增大而减小.本研究结果显示, b/a 值的大小是决定太阳高度角对真光层深度影响的关键因子,吸收系数一定时, b/a 越小,真光层深度随太阳高度角的变化越大.

太湖不同湖区物质含量不同,固有光学量空间变化比较大,同时由于吸收和散射系数的光谱变化也较大,因此 b/a 值存在空间上和光谱上的变化,从而使得真光层深度在不同的湖区和波段受太阳高度角的影响不同.太湖水体在不同的季节水体组分差别较大,固有光学量的光谱特征也不同,本实验仅用了太湖秋季的实测数据进行研究,太阳高度角对真光层深度影响较大的区域在不同的季节是不同的,因此不同的季节太阳高度角对真光深度影响的区域还要分别研究.

4 结论

4.1 b/a 值的大小是决定太阳高度角对真光层深度影响的关键因子,吸收系数一定时, b/a 越小,真光层深度随太阳高度角的变化越大.当太阳高度角从 1° 增加到 90° 时,若不考虑散射系数真光

层深度增加了 50.2%, $b/a=1$ 时,真光层深度增加了 41.3%; $b/a>15$ 时,真光层深度的增幅小于 10%.

4.2 当太阳高度角在 $1\sim 10^\circ$ 和 $70\sim 90^\circ$ 之间变化时,真光层深度的增幅较小,最大不超过 4%每 10° ;而当太阳高度角在 $10\sim 70^\circ$ 之间变化时,真光层深度的增幅在(5%~8.6%)每 10° .

4.3 太湖区域的实测结果显示,湖心区 b/a 的值在不同的波段均是较大的.在较短波段(436nm、490nm 等) b/a 的值在整个湖区均较小,此时要考虑太阳高度角对真光层深度的影响;在 580nm 附近, b/a 的值在全湖基本都大于 15,可以不考虑太阳高度角对真光层深度的影响;在 676nm 附近,除了竺山湾出口区的部分区域外,其他区域可以不考虑太阳高度角对真光层深度的影响.

参考文献:

- [1] 韩博平,韩志国,付 翔.藻类光合作用机理与模型 [M]. 北京:科学出版社,2003:180-181.
- [2] 乐成峰,李云梅,查 勇,等.真光层深度的遥感反演及其在富营养化评价中的应用 [J]. 生态学报,2008,28(6):2614-2621.
- [3] Reinart A,Arst H,Erm A, et al. Optical and biological properties of Lake ülemiste,water reservoir of the city of Tallinn II: Light climate in Lake ülemiste [J]. Lakes and Reservoirs:Research and Management, 2001,(6):75-84.
- [4] Morel A, Berthon J F. Surface pigments, algal biomass profiles, and potential production of the euphotic layer: Relationships reinvestigated in view of remote-sensing applications [J]. Limnol. Oceanogr., 1989,34(8):1545-1562.
- [5] Irigoiena X, Castel J. Light Limitation and distribution of chlorophyll pigments in a highly turbid estuary: the Gironde (SW France) [J]. Estuar., Coast. Shelf Sci., 1997,44:507-517.
- [6] 曹文熙,杨跃忠.海洋光合有效辐射分布的计算模式 [J]. 热带海洋学报,2002,21(3):47-54.
- [7] 张运林,秦伯强,胡维平,等.太湖典型湖区真光层深度时空变化及其生态意义 [J]. 中国科学 D 辑(地球科学), 2006,36(3):287-296.
- [8] 张运林,冯 胜,马荣华,等.太湖秋季真光层深度空间分布及浮游植物初级生产力的估算 [J]. 湖泊科学,2008,20(3):380-388.
- [9] 李云亮,张运林,刘明亮.太湖真光层深度的计算及遥感反演 [J]. 湖泊科学,2009,21(2):165-172.
- [10] 李国胜,梁 强,李柏良.东海真光层深度的遥感反演与影响机制研究 [J]. 自然科学进展,2003,13(1):90-94.
- [11] 张运林,秦伯强,陈伟民,等.悬浮物浓度对水下光照和初级生产力的影响 [J]. 水科学进展,2004,15(5):615-620.
- [12] Mitchell B G. Algorithms for determining the absorption coefficient of aquatic particulates using the quantitative filter technique (QFT) [J]. Proceedings of SPIE, 1990,1302:137-148.
- [13] Cleveland J S, Weidemann A D. Quantifying absorption by aquatic particles: a multiple scattering correction for glassfiber filter [J]. Limnology and Oceanography, 1993, 38(6): 1321-1327.
- [14] Bricaud A, Morel A, Prieur L. Absorption by dissolved organic matter in the sea (yellow substance) in the UV and visible domain [J]. Limnology and Oceanography, 1981,26:43-53.
- [15] Kirk J T O. Light and photosynthesis in aquatic ecosystems [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1994.
- [16] Kirk J T O. Dependence of relationship between inherent and apparent optical properties of water on solar altitude [J]. Limnol.Oceanogr., 1984,29(2):350-356.
- [17] Kirk J T O. Volume scattering function, average cosine, and the underwater light field [J]. Limnol.Oceanogr., 1991, 36:455-467.
- [18] 戴永宁,李素菊,王学军.巢湖水体的表观光学特性测量与分析 [J]. 中国环境科学,2008,28(11):979-983.
- [19] 赵巧花,宋玉芝.多次散射对向上漫射散射系数漫射吸收系数影响的数值研究 [J]. 遥感学报,2009,13(5):771-778.
- [20] Baker K S, Smith R C. Quasi-inherent characteristics of the diffuse attenuation coefficient for irradiance [J] Ocean Optics VI, Proc. SPIE, 1979,208:60-63.
- [21] Stramska M, Frye D. Dependence of apparent optical properties on solar altitude: experimental results based on mooring data collected in the Sargasso Sea [J]. J. Geophys. Res., 1997,102: 15679-15691.
- [22] Zheng X, Dickey T, Chang G. Variability of the downwelling diffuse attenuation coefficient with consideration of inelastic scattering [J]. Applied Optics., 2002,30(41):6477-6488.
- [23] Gordon H R. Can the Lambert-Beer law be applied to the diffuse attenuation coefficient of ocean water? [J]. Limnol.Oceanogr., 1989,34:1389-1409.
- [24] Morel A, Gentili B. Radiarion transport within oceanic (case 1) water [J]. J. Geophys. Res., 2004,109:1-22.

作者简介: 邱 辉(1984-),女,江苏徐州人,南京信息工程大学大气科学学院博士研究生,研究方向为动力学与环境效应.