

太湖梅梁湾漫衰减系数季节性差异及其主导因素

黄昌春*, 李云梅, 乐成峰, 孙德勇, 伍 蓝, 王利珍, 王 鑫

(南京师范大学虚拟地理环境教育部重点实验室, 江苏 南京 210046)

摘要: 利用 2006-08-16、2007-3-28 和 2007-11-12 三次在太湖梅梁湾 15 个样点的观测数据, 对漫衰减系数 (K_d) 及其影响因素的时空差异性进行分析, 发现: 梅梁湾地区 K_d 的主要决定因素是总吸收系数, 后向散射作用对 K_d 具有一定的影响作用, 但非主导作用; 梅梁湾地区水体 K_d 影响因素的主次关系并非固定不变, 而是随着水体组分的季节性变化而变化, 3 月份 K_d 的主导影响因素是非色素物质, 其次是有色可溶性有机物 (CDOM)、色素物质和后向散射作用, 而 8 月份的主导影响因素是色素物质, 其次是非色素物质、CDOM 和后向散射作用, 而 11 月份相对较为复杂, 在 440nm 处主导影响因素是非色素物质, 其次是色素物质、CDOM 和后向散射作用, 595nm 处主导影响因素是非色素物质吸收作用, 其次是色素物质吸收作用、后向散射作用、CDOM 吸收作用, 675nm 处主导影响因素是色素物质, 其次是非色素物质、后向散射作用和 CDOM。

关键词: 漫衰减系数; 季节性差异; 太湖梅梁湾

文章编号: 1000-0933(2009)06-3295-12 中图分类号: Q178, X171 文献标识码: A

Seasonal characteristics of the diffuse attenuation coefficient of Meiliang Bay waters and its primary contributors

HUANG Chuang-Chun*, LI Yun-Mei, LE Cheng-Feng, SUN De-Yong, WU-Lan, WANG Li-Zhen, WANG-Xing

Key Laboratory of Virtual Geographic Environment (Nanjing Normal University), Ministry of Education, Nanjing 210046, China

Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(6): 3295 ~ 3306.

Abstract: For waters of Meiling Bay, Taihu Lake, field measurements were carried out Aug. 16, 2006, March 28 and Nov. 12, 2007. These measurements included diffuse attenuation coefficient of downwelling irradiance, absorption coefficients of pigments and non-pigments (a_{ph} and a_d , respectively), and the colored dissolved organic matter (a_{CDOM}), and backscattering coefficients (b_b). For the total of 15 stations that have K_d , a_{ph} , a_d , a_{CDOM} , and b_b , it is found that the primary contributor to K_d is absorption coefficient. b_b does contribute to K_d , but in a minor role. Also, it is found that this relative significance in contributing to K_d varies seasonally. In March, the order of major to minor contributors was a_d , a_{CDOM} , and a_{ph} , and then b_b . In August, this order became a_{ph} , a_d , a_{CDOM} , and then b_b . It is more complicated in November, as at 440 nm, the order is a_d , a_{ph} and a_{CDOM} , and b_b ; at 595 nm, the order is a_d and a_{ph} , b_b , and a_{CDOM} ; at 676 nm, however, the order became a_{ph} and a_d , b_b , and then a_{CDOM} .

Key Words: diffuse attenuation coefficient; seasonal variations; Meiliang Bay

当光线进入水体时, 由于水体组分的吸收和散射作用, 光线逐渐被衰减直至消亡, 而漫射衰减系数 (K_d) 直接指示了光线衰减的剧烈程度以及水下光场结构, 从而成为水生态系统的重要影响因素, 因而已有众多学者对 K_d 与水体组成的吸收和散射系数之间的关系进行了研究^[1~5]。 K_d 综合反映了光照在水体中的变化和分布, 直接影响水体的透明度和真光层深度, 当水体中 K_d 较大时, 可能导致沉水植物由于没有足够的光照进行

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (40571110)

收稿日期: 2008-03-11; 修订日期: 2008-07-08

致谢: 感谢李忠平老师对本文写作的帮助。

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: huangchangchun_aaa@163.com

光合作用而死亡和衰退,导致水体生态系统类型的转化; K_d 可以用于水体等级的划分^[6],精确计算水下光场的分布和光强^[7],反推正好位于水面以下的辐照度,同时还可以用于真光层深度的计算,因此研究湖泊水体漫衰减系数有助于了解太湖水体的光学特性和光学类型及其对生态系统的影响。国内学者张运林等^[8~11]对太湖水体漫衰减系数进行了深入的研究,认为太湖不同湖区漫衰减系数存在较大的空间和季节差异,同时 K_d 与透明度和真光层深度具有很好的相关性;Gallegos^[12]等对 Chesapeake 湾和 Rhode 河流进行了研究,其漫衰减系数在 $1 \sim 10 \text{ m}^{-1}$ 范围内;Deepak^[13]等对 Roatan 岛附近水域进行研究,求出其蓝光、绿光、红光漫衰减系数分别为 0.138 , 0.158 m^{-1} 和 0.503 m^{-1} ,并估算出其光线穿透深度分别为 8 、 6 m 和 2 m 。从前人的研究可以看出,漫衰减系数、真光层的深度等具有较大的时空差异。

针对太湖“水华”高发区域——梅梁湾地区的水体漫衰减系数,本文利用 2006-08-16、2007-3-28 和 2007-11-12 三次在太湖梅梁湾 15 个样点的观测数据,通过数据处理,计算得到漫射衰减系数和水体固有光学量。首先分析 3、8、11 月份太湖水体漫射衰减系数特性、类型及其影响因素,在此基础上,确定不同季节梅梁湾水体漫衰减系数的主导影响因素及其差异。

1 材料与方法

1.1 采样时间及点位

2006-08-16、2007-3-28 和 2007-11-12 三次对太湖梅梁湾 15 个样点进行了观测,样点分布如图 1 所示,选择几乎无风、水面较平的测量条件下进行测量,测量的参数包括室内分析的总悬浮物、色素物质、非色素颗粒物和黄质的光谱吸收系数;野外测量的下行辐照度、后向散射系数。野外仪器测量深度设置为 0.20 、 0.40 、

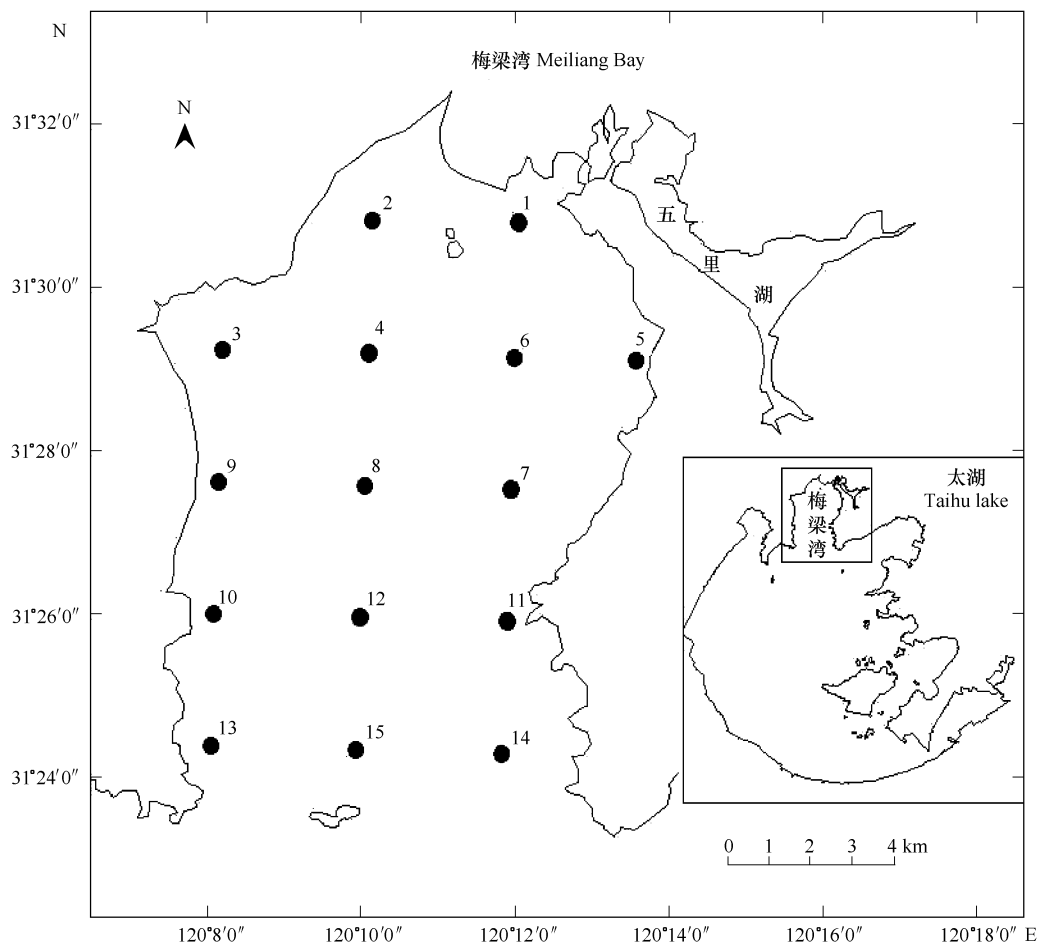


图1 样点分布图

Fig. 1 The sample sites

0.60、0.80、0.90、1.00、1.20 m 和 1.50m;采集的水样为表层水样。

1.2 参数测定

1.2.1 下行辐照度和后向散射系数的测量

利用 TRIOS 水下光谱仪的辐照度探头测量水体中下行辐照度,测量波段范围为 320 ~ 950nm, 光谱分辨率为 3.3nm,辐照度探头的测量饱和值为 $10 \text{ W m}^{-2} \text{ nm}^{-1}$ (400nm)、 $8 \text{ W m}^{-2} \text{ nm}^{-1}$ (500nm)、 $14 \text{ W m}^{-2} \text{ nm}^{-1}$ (700nm);为去除较小波浪和船体晃动影响,在同一样点同一水层进行连续测量,将测量的不同时间序列的数据由小到大排列,若其中有异常值,它们必位于数据系列的两端,左端的称为异常小值,右端的称为异常大值,剔除两端异常极值^[14]。

后向散射系数的测量仪器为后向散射计 BB_9 , BB_9 测得的 117° 体散射函数,利用经验关系计算得到后向散射系数,具体处理过程参见文献^[15]。

1.2.2 总悬浮物、浮游藻类色素物质、非色素颗粒物和有色溶解有机质(CDOM)的光谱吸收系数的测量^[16]

(1) 总悬浮物的光谱吸收系数的测量

吸光度采用 UV-240IPC 型紫外分光光度计测量,总悬浮物吸光度的测定采用如下方法:首先,使用滤膜过滤一定量的水样,其次,用 UV-240IPC 型紫外分光光度计测量过滤所得到的滤膜的吸光度,最后利用吸光度来计算吸收系数。

首先进行放大因子校正:

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

式中, $OD_s(\lambda)$ 为校正后的滤膜上悬浮物颗粒的吸光度, $OD_f(\lambda)$ 为直接在仪器上得到的悬浮物颗粒吸光度。

其次计算吸收系数:

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

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

(2) 非色素颗粒物光谱吸收系数的测量

测量非色素颗粒物的光谱吸收系数,首先需要通过漂白,去除总悬浮物中的色素成分,一般可以使用 0.1% 活性的 NaClO_3 溶液或甲醇溶液。本次实验使用 0.1% 活性的 NaClO_3 溶液进行样品的漂白处理,其次,对漂白过的水样进行过滤,同样利用 UV-240IPC 型紫外分光光度计测量过滤所得到的滤膜,得到非色素颗粒物的吸光度。在测量时,如果在 675nm 处没有出现峰值说明漂白充分,测量的数据有效,否则说明漂白不充分,需要再次漂白。非色素的吸收系数的计算方法与总悬浮物吸收系数的计算方法相同。

(3) 浮游藻类色素物质的光谱吸收系数的测量

浮游藻类色素物质的吸收系数由总悬浮物的吸收系数减去非色素颗粒物的吸收系数获取。

(4) 黄质的光谱吸收系数的测量

使用 $0.22 \mu\text{m}$ 的滤膜过滤水样,提取出黄质,然后,将黄质溶液装入 $1\text{cm} \times 4\text{cm}$ 的比色皿,以超纯水作为参考水样,利用 UV-240IPC 型紫外分光光度计测量黄质的吸光度,光谱吸收系数计算方法为,利用公式:

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

计算各个波长的吸收系数

再利用公式:

$$a(\lambda) = a(\lambda') - a(750) \times \lambda / 750 \quad (4)$$

进行校正,其中 $a(\lambda)$ 为波长 λ 的吸收系数 (m^{-1}), $a(\lambda')$ 为波长 λ 未校正的吸收系数 (m^{-1}), $D(\lambda)$ 为吸光度, r 为光程路径 (m)。

1.3 漫衰减系数分析的理论基础

1.3.1 漫衰减系数计算方法

水下辐照度在均一水体中遵循指数衰减规律^[17]:

$$K_d = -\frac{1}{z} \ln \left(\frac{E_d(z)}{E_c(z_c)} \right) \quad (5)$$

式中, K_d 为水体漫衰减系数, z 为从参考水层到测量处的深度, z_c 为参考水层深度, $E_d(z)$ 为 z 深度处的向下辐照度, $E_c(z_c)$ 为参考水层深度处的辐照度。 K_d 通过对不同深度的下行辐照度进行指数回归得到的, 只有当 $R^2 \geq 0.95$, 深度数 ≥ 3 时, 其 K_d 才被接受, 否则视为无效值^[11]。

1.3.2 漫衰减系数分析理论基础

根据 Dekker 的研究, K_d 可以近似地表示为^[2]:

$$K_d \approx \frac{a + b_b}{u_d} = \frac{a_{NAP} + a_c + a_{CDOM} + b_b}{u_d} \quad (6)$$

式中, a_{NAP} 为非色素物质吸收系数, a_c 为色素物质吸收系数, a_{CDOM} 为 CDOM 吸收系数, b_b 为总后向散射系数。两边同时乘以水下平均余弦 u_d , (6) 式可写为:

$$K_d u_d \approx a_{NAP} + a_c + a_{CDOM} + b_b \quad (7)$$

其中非色素颗粒物吸收系数参数化^[18]:

$$a_{NAP} = a(\lambda_0) \exp(S_{NAP}(\lambda_0 - \lambda)), \lambda_0 = 440 \text{ nm} \quad (8)$$

黄质吸收系数参数化^[19]:

$$a_{CDOM} = a(\lambda_0) \exp(S_{CDOM}(\lambda_0 - \lambda)), \lambda_0 = 440 \text{ nm} \quad (9)$$

后向散射系数参数化^[20]:

$$b_b = b_b(\lambda_0) \left(\frac{\lambda_0}{\lambda} \right)^A, \lambda_0 = 532 \text{ nm} \quad (10)$$

为了消除表观光学量中太阳天顶角和直-漫射光比例对 K_d 的影响, 利用 Gordon 归一化公式^[21,22]: $K_{dnor} = \frac{K_d}{D_0}$ 对漫衰减系数进行归一化处理。其中 $D_0 = \frac{f}{\cos(\theta_{0w})} + 1.197(1-f)$, $\cos(\theta_{0w}) = \left(1 - \frac{\sin(\theta)}{n}\right)^{0.5}$, n 为折射指数(假设各个样点的水气界面折射指数相同), θ 为太阳天顶角, f 为直射辐射占总辐射的比例。本文基于公式(7)分析各组分对 K_d 的贡献率, 利用(8)~(10)参数化公式中的参数 S_{NAP} , S_{CDOM} , A 来分析固有光学量吸收系数(由于色素物质差异较为直观明显, 故不需要用参数对其差异性进行描述)和后向散射系数的季节性空间差异。

2 结果分析

2.1 太湖漫衰减系数季节性特征

湖水的漫衰减系数主要是由纯水、CDOM、色素和非色素颗粒物的吸收和散射特性决定的, 其中纯水的吸收和散射是一切水体所共有的, 一般认为是水体漫衰减系数的本底(又称背景值), 因此水体的漫衰减系数的差异主要由黄质、色素颗粒物和 非色素颗粒物的吸收和散射的变化引起^[11]。太湖是大型浅水湖泊, 不同的湖区、不同时间以及不同深度的水层中黄质、色素和非色素颗粒物的吸收和散射特性存在着较大的差异, 决定了太湖水体的漫衰减系数的多样性和时空分布的差异性。

经计算得到的 3 个采样时段内太湖梅梁湾 15 个样点的归一化漫衰减系数, 如图 2 所示。

图 2 中 K_d 曲线特征较为明显, 大约在 400~575nm 之间近似指数衰减, 575~700nm 之间除去 675nm 叶绿素 a 衰减峰值以外, 波段的增加几乎近似成直线, 无明显的变化; 在大于 700nm 波长范围内 K_d 迅速增加, 呈现出纯水的 K_d 特征。但是不同的样点和时间太湖水体 K_d 具有较大的差异性: 在 440nm 波段, K_d 最大值为 18.25 m^{-1} , 是出现在 8 月份的 5 号样点, 而最小值为 3.30 m^{-1} 是出现在 3 月份的 7 号样点, 极差达到了

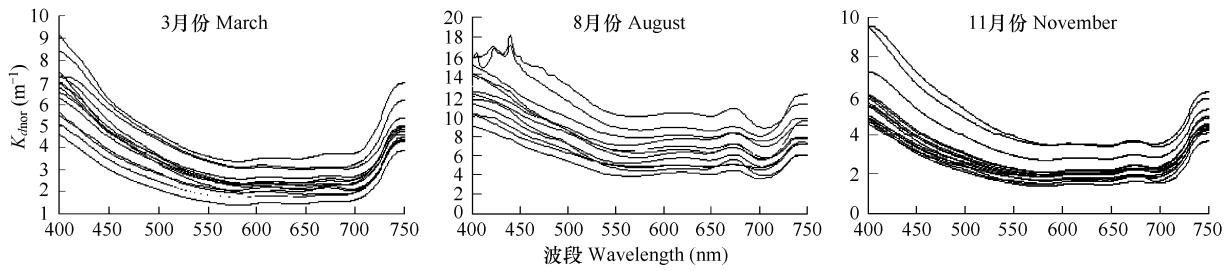


图2 归一化后的3月份、8月份和11月份的 K_d

Fig. 2 K_d normalized by solar zenith angle at March, August and November

15.00 m^{-1} ,平均值为 $(6.76 \pm 3.69) m^{-1}$,变异系数为 54.59%;675nm 波段, K_d 最大值为 10.74 m^{-1} ,同样是出现在 8 月份的 5 号样点,而最小值为 1.56 m^{-1} ,是出现在 3 月份的 7 号样点,极差达到了 9.18 m^{-1} ,平均值为 $(3.70 \pm 2.33) m^{-1}$,变异系数为 62.92%。根据(7)式分析 K_d 光谱曲线形成的原因,主要是由于 K_d 受到水体中色素、非色素和 CDOM 的吸收光谱以及后向散射系数特征的影响,因此梅梁湾地区固有光学属性的形状和大小直接决定 K_d 的形状和大小。

水体组分随着季节的变化发生较大的变化,使得 K_d 具有明显的季节性差异,8 月份的 K_d 要比 3 月份和 11 月份的 K_d 大一倍,并且在 440nm 和 675nm 有明显的叶绿素 a 衰减峰值,而 3 月份和 8 月份的 K_d 相对较为平坦,几乎无任何衰减特征光谱,如图 3A 所示。对 15 个样点的 K_d 的平均值做一阶微分处理,得到 K_d 在 400 ~ 750nm 波段范围内的变化率曲线,如图 3B 图所示,由变化率曲线可以看出,大约在 400 ~ 575nm 之间,8 月份 K_d 随波段的衰减速度要大于 3 月份和 11 月份,这主要是叶绿素 a 在 440nm 的吸收峰值引起的,同时 8 月份的 K_d 在 625 ~ 700nm 波段范围内的变化率要高于 3 月份和 11 月份,特别实在 675nm 叶绿素 a 吸收峰处;在 620nm 左右的藻蓝蛋白的吸收带,3 个月份的漫衰减系数也存在一定的差别,3 月份和 11 月份表现出了迅速衰减和迅速增加的形态,大约在 590nm 处出现变化率的拐点,而 8 月份呈现出了相对平缓的变化形式。

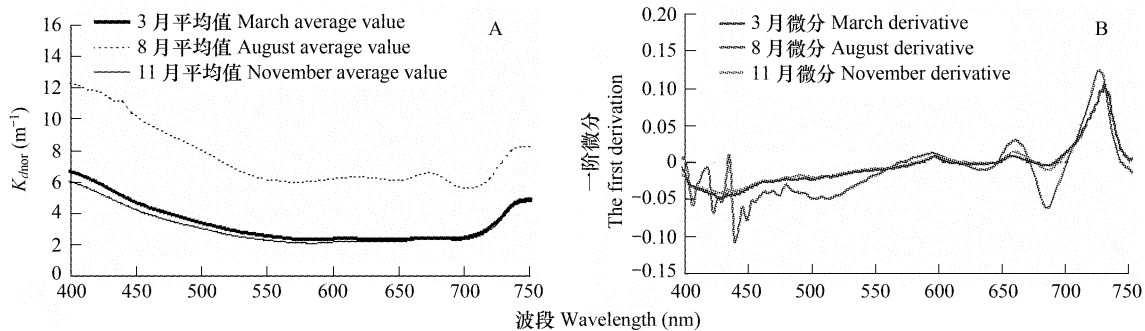


图3 3月份、8月份和11月份 K_d 的平均值及其一阶微分变化率曲线

Fig. 3 The average value of K_d and the first derivative chart of K_d at March, August and November

2.2 梅梁湾固有光学量特征季节性差异

太湖梅梁湾地区水体组分中色素颗粒物、非色素物质和 CDOM 的吸收系数和后向散射系数的大小在时间域和空间域内具有显著的差异性,如图 4 所示。这里主要是通过(8)~(10)式中各自的参数化参数 S_{NAP} , S_{CDOM} , A 对其进行说明,利用指数函数的非线性拟合得到的非色素颗粒物的吸收系数的参数 S_{NAP} 在 3 月份的均值为 0.00941 ± 0.00042 ,变异系数为 4.51%,8 月份的均值为 0.00882 ± 0.00089 ,变异系数为 10.08%,11 月份的均值为 0.01247 ± 0.00077 ,变异系数为 6.17%,非色素物质吸收系数参数 S_{NAP} 相对最大值出现在 11 月份,最小值出现在 3 月,但变异系数却恰恰相反最大值出现 8 月份,而最小值出现在 3 月份,这主要是由于季节的变化导致非色素物质组成发生了较大的差异性。

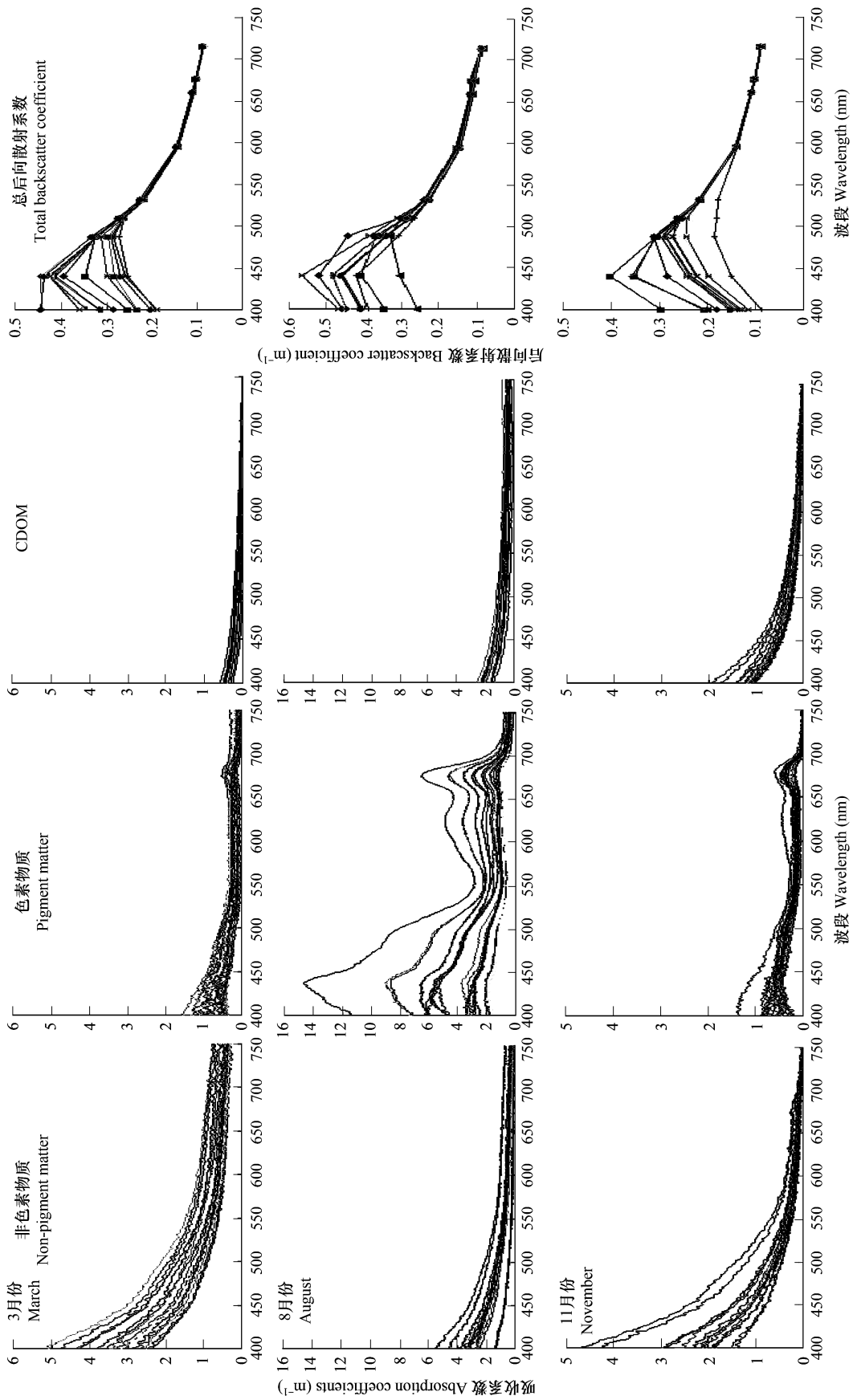


图 4 3 月份、8 月份、11 月份水体组分吸收系数和后向散射系数
 Fig. 4 Absorption curve of different water constitute at March, August and November

同样利用指数函数的非线性拟合得到的 CDOM 的吸收系数的参数 S_{CDOM} 在 3 月份的均值为 0.00789 ± 0.0006 , 变异系数为 7.66%, 8 月份的均值为 0.00836 ± 0.00364 , 变异系数为 43.55%, 11 月份的均值为 0.01427 ± 0.00341 , 变异系数为 23.87%, CDOM 的参数 S_{CDOM} 最大值与 S_{NAP} 相似出现在 11 月份, 最小值在 3 月份, 但是空间差异性最大值出现在 8 月份, 最小值在 3 月份, 这主要是由于 CDOM 的来源在 8 月份较为复杂, 除了陆源排放外, 藻类的降解也占有重要的位置, 而在 3 月份主要是由陆源的排放, 因此 CDOM 的组成差异决定 S_{CDOM} 的大小。

色素物质吸收系数差异十分明显, 8 月份的色素物质吸收系数最高, 主要是由于此时浮游藻类物质较多, 由于藻类的死亡使得 3 月份色素物质吸收系数相对最小, 而 11 月份介于 3 月份和 8 月份之间, 较接近于 3 月份色素物质吸收系数, 但是 675 的叶绿素 a 吸收峰值较 3 月份明显。

后向散射系数的参数 A 在 3 月份的均值为 3.16592 ± 0.29912 , 变异系数为 9.448%, 8 月份的均值为 3.67562 ± 0.23059 , 变异系数为 6.27%, 11 月份的均值为 2.55172 ± 0.44975 , 变异系数为 17.63%, A 值最大值是出现在 8 月份, 差异性最大的月份为 11 月份, 这是由于在 8 月份, 藻类物质含量占有主导地位, 藻类颗粒物的后向散射率较低^[23]并在长波波段散射中占有主要地位, 因而其在长波段的后向散射系数较小, 而在短波波段, 悬浮泥沙的颗粒物的后向散射率较高, 并占主导地位, 使得短波波段的后向散射系数较高, 从而使得由短波波段向长波波段幂函数的幂指数相对最大, 而在 11 月份, 藻类和悬浮泥沙分布的差异以及组成比例的不同使得 11 月份的后向散射系数变得较为复杂, 幂函数指数的变异性最大。

2.3 水体各组分对 K_d 的贡献率

分别利用 CDOM、色素颗粒和非色素颗粒吸收系数以及后向散射系数与漫衰减系数 K_d 的比值表示它们对 K_d 的贡献率。图 5 分别给出了各样点 CDOM、色素物质和非色素物质吸收系数以及总散射系数在特征波长 440nm (CDOM、叶绿素 a、非色素物质的吸收波段)、540~625nm (藻红蛋白的吸收带) 中的 595、675nm (叶绿素 a 的另外一吸收峰) 对 K_d 的贡献率, 表 1 为对图 5 进行统计分析的结果。从图中可以看出, 不同的季节, 水体组分对 K_d 的贡献率有着极大的差异, 在 3 月份, K_d 的首要决定者是非色素物质, 其次是 CDOM, 再次是色素物质, 而后向散射影响最小; 8 月份, K_d 的首要决定者是色素物质, 其次是非色素物质, 再次是 CDOM, 后向散射的影响同样是最小; 而 11 月份影响水体 K_d 的组分相对较为复杂, 在 440、595nm 波段非色素物质占据首要位置, 色素物质次之, 其次是 CDOM, 最后是后向散射系数, 但是在 675nm 波段首要影响因素是色素物质, 非色素物质次之, 其次是散射作用, 而 CDOM 的作用为最小; 并且即使在同一月份和同一波段上, 各个样点的影响因素同样具有较大的不一致性。由此可见影响太湖梅梁湾地区的因素, 随着空间、时间和波段的变化有着较大的差异性, 但可以得到四种因子对 K_d 平均贡献率总体趋势为:

3 月份(440、595、675nm): 非色素物质吸收作用 > CDOM 吸收作用 > 色素物质吸收作用 > 后向散射作用

8 月份(440、595、675nm): 色素物质吸收作用 > 非色素物质吸收作用 > CDOM 吸收作用 > 后向散射作用

11 月份(440nm) ①非色素物质吸收作用 > 色素物质吸收作用 > CDOM 吸收作用 > 后向散射作用

(595nm) ①非色素物质吸收作用 > 色素物质吸收作用 > 后向散射作用 > CDOM 吸收作用

(675nm) ②色素物质吸收作用 > 非色素物质吸收作用 > 后向散射作用 > CDOM 吸收作用

这 3 个月份的 K_d 分别代表了 3 种类型的漫衰减系数, 即根据浮游藻类色素物质和非色素颗粒物的吸收系数对漫衰减系数的贡献率的大小, 漫衰减系数的 3 个类型如图 6 所示: ①浮游藻类色素物质贡献率大于非色素颗粒物贡献率; ②非色素颗粒物贡献率大于浮游藻类色素物质; ③浮游藻类色素物质与非色素颗粒物贡献率相当。

(1) 浮游藻类色素物质贡献率大于非色素颗粒物贡献率

太湖水体中的浮游藻类色素物质具有明显的藻类物质光谱特征, 这种类型一般在 675nm 和 440nm 处有两个峰值, 500nm 左右为(如斜生栅藻等)藻红蛋白吸收带, 540~625nm 是(如铜绿微囊藻)藻蓝蛋白的吸收带, 这些藻类光谱特征在漫衰减系数的曲线上得到了很好的再现(图 6A(4 号样点)), 代表这一类型的是 8 月份的 K_d 。

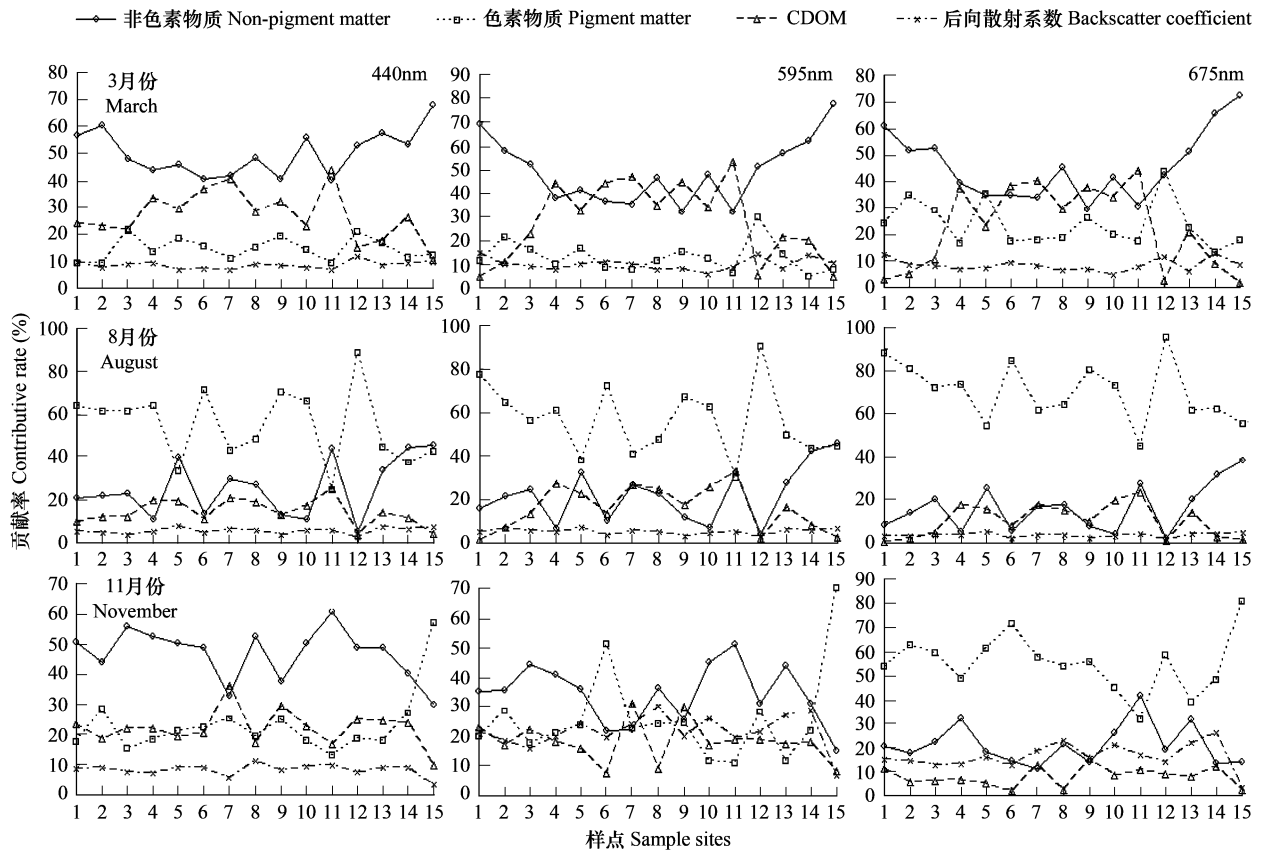


图5 CDOM、色素颗粒和非色素颗粒吸收系数以及后向散射系数在440nm、595nm、675nm处对 K_d 的贡献率

Fig. 5 The contribution of CDOM, pigment, nonpigment matter's absorption and back scattering coefficient to the K_d at 440nm, 595nm and 675nm wave bands

表1 影响因子对 K_d 贡献率的统计分析

Table 1 The statistic analysis table of contribution of each influence factor

波长* (nm)	因子类型	3月份 March		8月份 August		11月份 November	
		平均贡献率(%)	变异系数(%)	平均贡献率(%)	变异系数(%)	平均贡献率(%)	变异系数(%)
440	非色素物质	50.36 ± 8.46	16.798	25.65 ± 13.69	53.375	47.03 ± 8.48	18.023
	色素物质	14.33 ± 4.17	29.142	54.80 ± 17.24	31.464	22.87 ± 10.43	45.628
	CDOM	26.99 ± 9.44	34.999	14.11 ± 6.18	43.772	22.01 ± 6.12	27.782
	后向散射系数	8.30 ± 1.34	16.236	5.43 ± 1.46	26.833	8.09 ± 1.84	22.671
595	非色素物质	49.21 ± 13.79	28.034	22.11 ± 12.84	58.067	34.48 ± 10.09	29.259
	色素物质	12.73 ± 6.41	50.389	56.44 ± 16.51	29.248	25.84 ± 15.61	60.404
	CDOM	28.26 ± 16.84	59.602	16.18 ± 10.26	63.429	18.14 ± 6.84	37.675
	后向散射系数	9.79 ± 2.56	26.178	5.27 ± 1.17	22.21	21.54 ± 5.79	26.888
675	非色素物质	45.85 ± 13.03	28.414	16.31 ± 10.92	66.92	21.06 ± 8.52	40.45
	色素物质	23.54 ± 8.74	37.132	70.13 ± 14.01	19.98	55.07 ± 12.16	22.073
	CDOM	22.36 ± 15.88	71.012	10.18 ± 7.81	76.749	7.722 ± 4.06	52.584
	后向散射系数	8.23 ± 2.31	28.07	3.39 ± 0.98	28.799	16.15 ± 5.45	33.718

* 波长 Wavelength; 因子类型 Factor style; 平均贡献率 Average contributive rate; 变异系数 Variation coefficient; 非色素物质 Non-pigment matter, 色素物质 Pigment matter, 后向散射系数 Backscatter coefficient

(2) 非色素颗粒物贡献率大于浮游藻类色素物质贡献率

当非色素颗粒物贡献率大于浮游藻类色素物质贡献率时,由浮游藻类色素物质440nm处的吸收峰值所引起的漫衰减系数的衰减峰,被非色素颗粒物在短波波段强吸收的贡献率所掩盖,而675nm处的吸收峰所引

起的漫衰减系数的衰减峰,被非色素颗粒物的吸收和强散射作用的贡献率所掩盖,使得整个漫衰减系数表现出平滑的类似指数衰减形式的曲线如图 6B(8 号样点)所示,这一类型的典型代表是 3 月份的 K_d 。

(3) 浮游藻类色素物质与非色素颗粒物贡献率相当

浮游藻类色素物质和非色素颗粒物的吸收系数对漫衰减系数的贡献率大致各占 40% 左右,浮游藻类色素物质对漫衰减系数的贡献率在 440nm 和 675nm 高于非色素颗粒物,除此以外的其他区域非色素颗粒物的贡献率高于浮游藻类色素物质;总散射作用的影响在 550nm 以后与非色素贡献率相似,占有同样重要的地位,在 550nm 前相对较小,与第一种类型相比较,在 675nm 处的峰值还很明显并与第一种类型相似,但是在 571nm 以下,其指数衰减形式的衰减指数要大于色素颗粒物占主导地位时衰减指数(图 6C),代表这一类型的是 11 月份的 K_d 。

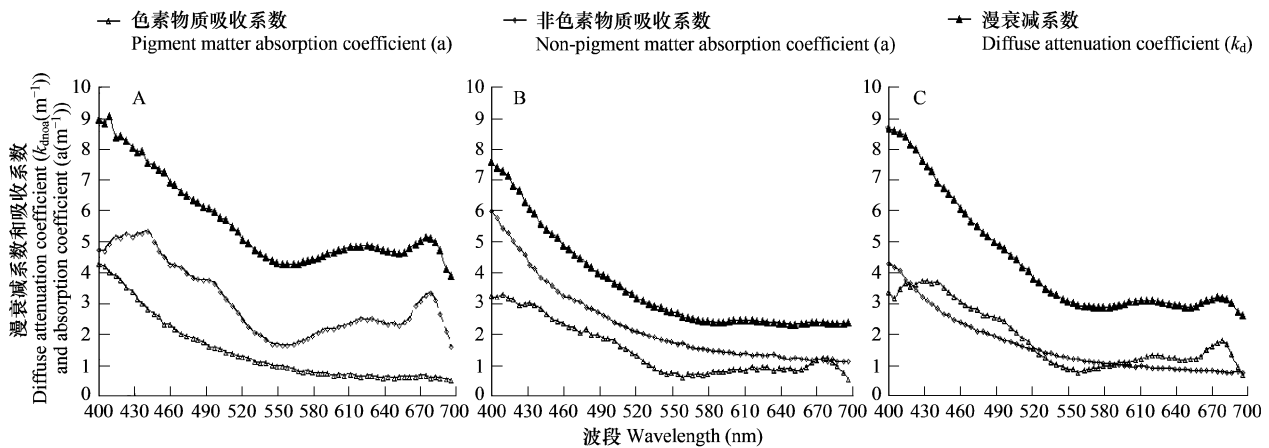


图 6 不同类型的 K_d 曲线

Fig. 6 The curve of different style's K_d

2.4 梅梁湾 K_d 时空差异

利用 ARCGIS 分别对 440、595、675nm 处的 K_d 进行空间插值,得到季节的变化对 K_d 空间差异的影响,如图 6 所示,由于插值算法并不是依据水体物质扩散动力模型,因而具有一定的误差,但是能够从整体上反映漫衰减系数的空间差异。

3 月份和 11 月份的 K_d (440nm) 的高值主要出现在梅梁湾的西部和西北部地区,同时 11 月份的 K_d (440nm) 在东部的 11 号样点也存在一高值点,8 月份的 K_d (440nm) 的高值主要出现在梅梁湾的东部和梅梁湾口西部地区,3 月份的 K_d (440nm) 的平均值为 5.02897 ± 1.02994 , 变异系数为 20.48%; 8 月份的 K_d (440nm) 的平均值为 11.13104 ± 3.61733 , 变异系数为 32.498%; 11 月份的 K_d (440nm) 的平均值为 4.56436 ± 1.29395 , 变异系数为 28.349%。这主要是由于 3 月份藻类物质几乎全部沉于水体底部,此时梅梁湾水体组分的吸收系数主要是由非色素物质、CDOM 的吸收特性决定的,相对于梅梁湾东部山地区域,梅梁湾的西部以及西北部地区是平原居民区提供了更多的非色素物质和 CDOM。而 8 月份的 K_d 分布主要是受夏季的西南风的作用,使得藻类集中在梅梁湾的东北部,同时在梅梁湾口西部滞留了部分藻类物质,使得 8 月份的 K_d 成为 3 个月份中变异性最大的一个月;11 月份的 K_d 同时受色素、非色素、CDOM 和后向散射共同作用,因而分布具有 3 月份和 8 月份的分布特征。

3 月份、8 月份和 11 月份的 K_d (595), K_d (675) 分布与 K_d (440) 较为相似,3 月份的 K_d (595), K_d (675) 的平均值分别为 2.36005 ± 0.55525 和 2.42692 ± 0.56801 , 变异系数分别为 23.527% 和 23.405%; 8 月份的 K_d (595), K_d (675) 的平均值分别为 6.2353 ± 2.19124 和 6.5257 ± 2.24618 , 变异系数分别为 35.142% 和 34.42%; 11 月份的 K_d (595), K_d (675) 的平均值分别为 2.20999 ± 0.14918 和 2.40987 ± 0.14651 , 变异系数

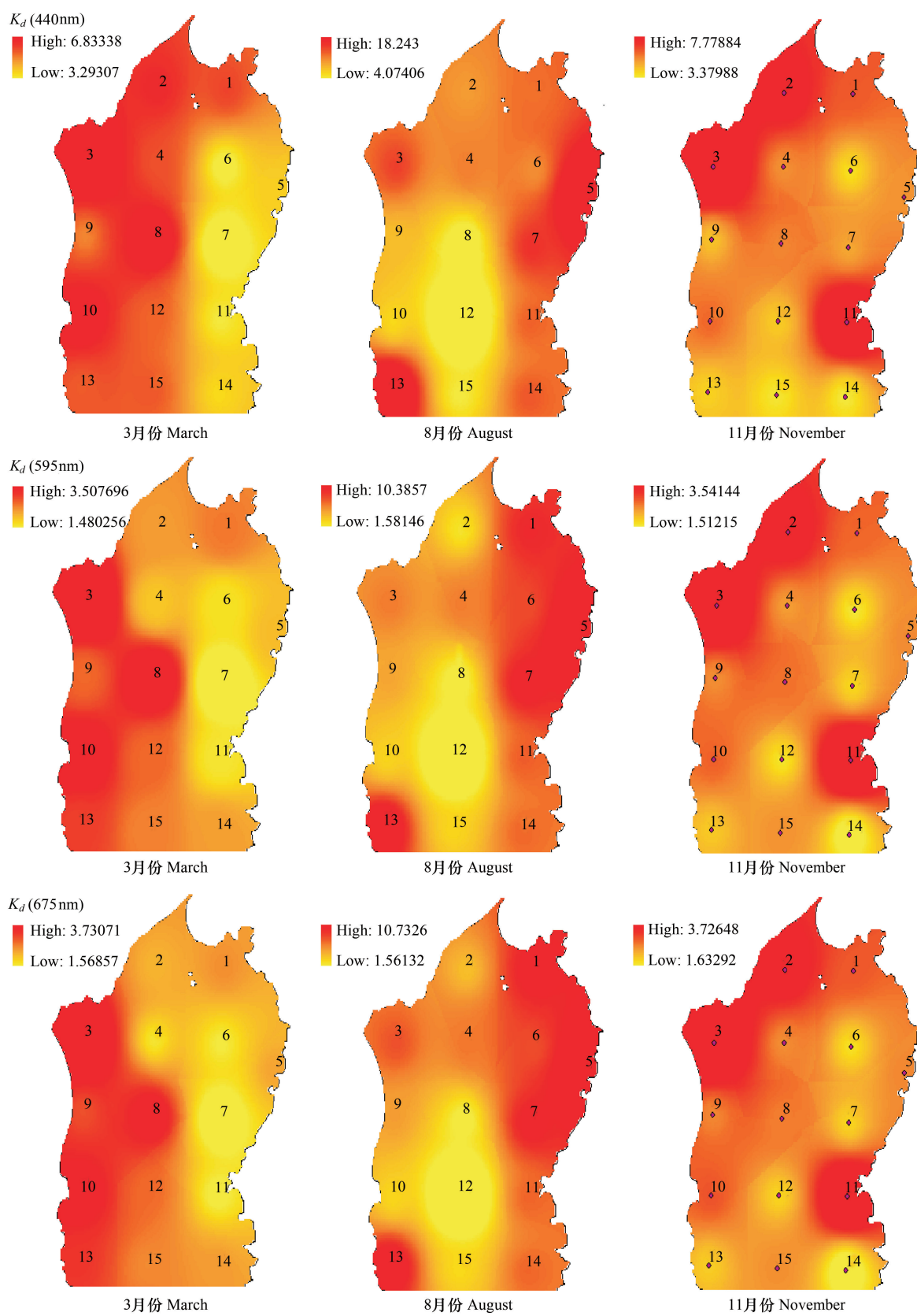


图7 $K_d(440)$, $K_d(595)$, $K_d(675)$, 季节性分布图

Fig.7 The seasonal distribution of $K_d(440)$, $K_d(595)$, $K_d(675)$

分别为 27.001% 和 24.318% ;

3 结论

3.1 梅梁湾水体组分固有光学量存在较大时空差异,使得漫衰减系数在时间和空间域内差异性较大,同时水体组分对漫衰减系数的贡献率随季节的变化具有较大的不稳定性:

(1) 3 月份非色素物质吸收系数是 K_d 的第一贡献者,而 CDOM 吸收系数是 K_d 的第二贡献者,色素物质吸收系数为第三贡献者,而后向散射作用的贡献率最小。

(2) 8 月份色素物质吸收系数是 K_d 的第一贡献者,而非色素物质吸收系数是 K_d 的第二贡献者,CDOM 吸收系数和后向散射作用的贡献率次之。

(3) 11 月份影响 K_d 的因素十分的复杂,在不同的波长水体各组分对 K_d 贡献率的大小具有不一致性:① 440nm 处,非色素物质吸收作用为第一贡献者,色素物质吸收作用为第二贡献者,CDOM 吸收作用和后向散射作用分别为第三和第四贡献者;② 595nm 处,非色素物质吸收作用和色素物质吸收作用与 440nm 处相似,但是后向散射作用的贡献率大于 CDOM 吸收作用而成为第三贡献者,③ 675nm 处,色素物质吸收作用为第一贡献者,非色素物质吸收作用为第二贡献者,后向散射作用和 CDOM 吸收作用与 595nm 处相似分别为第三和第四贡献者。

3.2 梅梁湾水体漫衰减系数的影响因素的主次关系并不是固定不变的,而是随着水体组分的季节性变化而变化,但是可以将 3 个月时间段内 45 个样点的漫衰减系数归纳为 3 种主要的类型:① 以 8 月份为代表的的第一种类型:浮游藻类色素物质贡献率大于非色素颗粒物贡献率型;② 以 3 月份为代表的第二种类型:非色素颗粒物贡献率大于浮游藻类色素物质型;③ 以 11 月份为代表的第三种类型:浮游藻类色素物质与非色素颗粒物贡献率相当型。

3.3 无论是 3 月份、11 月份还是 8 月份,漫衰减系数的主要决定者为总吸收作用,后向散射作用对漫衰减系数具有一定的影响力,但非主导影响因素。

References:

- [1] Kirk J T O. The vertical attenuation of irradiance as a function of the optical properties of the water. *Limnol Oceanogr*,2003,48(1): 9-17.
- [2] Dekker A G, Hoogenboom H J, Goddijn L M, *et al.* the relationship between spectral reflectance absorption and backscattering for four inland water types. In proceedings of 6th int symp on physical measurements and signatures in remote sensing, CNES, val disere, france, 1994; 245-252.
- [3] Bowers D G, Mitchelson E G. Inherent Optical Properties of the Irish Sea Determined from Underwater Irradiance Measurements. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 1996, 43: 433-447.
- [4] Melin F, Berthon J F, Zibordi G. Assessment of apparent and inherent optical properties derived from SeaWiFS with field data. *Remote Sensing of Environment*, 2005, 97: 540-553.
- [5] McKee D, Cunningham A J, Slatera K J, *et al.* Inherent and apparent optical properties in coastal waters: a study of the Clyde Sea in early summer. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2003, 56: 369-376.
- [6] Jerlov N G. *Marine Optics*. New York: Elsevier Scientific Publishing Company, 1976.
- [7] Lee Z P, Du K P, Arnone R. A model for the diffuse attenuation coefficient of downwelling irradiance. *Journal of Geophysical Research*, 2005, 110, C02016, doi:10.1029.
- [8] Zhang Y L, Qin B Q, Chen W M, *et al.* Attenuation of photosynthetically available radiation (PAR) in Meiliang Bay under different winds and waves. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005, 16(6): 1133-1137.
- [9] Zhang Y L, Qin B Q, Chen W M, *et al.* Biological and optical properties of Meiliang Bay in Lake Taihu. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 5(3): 454-460.
- [10] Zhang Y L, Qin B Q, Chen W M, *et al.* Regression analysis of beam attenuation coefficient underwater in Lake Taihu. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2004, 35(3): 209-213.
- [11] Zhang Y L, Qin B Q, Chen W M, *et al.* Analysis on distribution and variation of beam attenuation coefficient of Taihu Lake's water. *Advances in Water Science*, 2003, 14(4): 447-453.
- [12] Gallegos L C, Correll L D. Modeling spectral diffuse attenuation, absorption, and scattering coefficients in a turbid estuary. *Limnol Oceanogr*, 1990, 35(7): 1486-1502.

- [13] Deepak R, Sunil N, Narumalani S, *et al.* Characterizing the vertical diffuse attenuation coefficient for downwelling irradiance in coastal waters: Implications for water penetration by high resolution satellite data. *Journal of Photogrammetry Remote Sensing*, 2005, 60:48–64.
- [14] Huang E H, Pan D L, Li S J, *et al.* Comparing methods for identifying the outliers in the in-water profile spectral data. *Journal of Marine Sciences*, 2006, 24(1):91–96.
- [15] Moore C, Barnard A, Hankins D, *et al.* Spectral Absorption and Attenuation Meter (ac-s) User's Guide, 2004, Revision A. America; WET Labs Inc. 5–20.
- [16] Mueller J L, Fargion G S, Zaneveld R V, *et al.* Ocean Optics Protocols For Satellite Ocean Color Sensor Validation. Revision 4. Volume IV. NASA, 2003.
- [17] Huovinen p s, penttol H, Soimasuo M R. Spectral attenuation of solar ultraviolet radiation in humic lake in Central Finland. *Chemosphere*, 2003, 51(3): 205–214.
- [18] Bricaud A, Stramaki D. spectral absorption coefficients of living phytoplankton and nonalgal biogenous matter: A comparison between the peru upwelling area and the Sargasso sea. *Limnol Oceanogr*, 1990, 35(3):562–582.
- [19] Bricaud A, Morel A, Prieur L. Absorption by Dissolved organic Matter of The Sea (Yellow Substance) in the UV and Visible Domains. *Limnol Oceanogr*, 1981, 26: 43–53.
- [20] Morel A. Chlorophyll-specific scattering coefficient of phytoplankton A simplified theoretical approach. *Deep-sea Research*, 1987, 34(7): 1093–1105.
- [21] Gordon H R. Absorption and scattering estimates from irradiance measurements: Monte Carlo simulations. *Limnol Oceanogr*, 1991, 36(4): 769–777.
- [22] Gordon H R. Dependence of the diffuse reflectance of natural waters on the sun angle. *Limnol Oceanogr*, 1989, 34(8):1484–1489.
- [23] Stramski D, Bricaud A, and Morel A. Modeling the inherent optical properties of the ocean based on the detailed composition of the planktonic community. *Applied Optic*, 2001, 40(18):2929–2945.

参考文献:

- [8] 张运林, 秦伯强, 陈伟民, 等. 不同风浪条件下太湖梅梁湾光合有效辐射的衰减. *应用生态学报*, 2005, 16(6): 1133~1137.
- [9] 张运林, 秦伯强, 陈伟民, 等. 太湖梅梁湾沿岸带水体生物学与光学特性. *生态学报*, 2005, 5(3): 454~460.
- [10] 张运林, 秦伯强, 陈伟民, 等. 太湖水体光学衰减系数的特征及参数化. *海洋与湖沼*, 2004, 35(3): 209~213.
- [11] 张运林, 秦伯强, 陈伟民, 等. 太湖水体光学衰减系数的分布及其变化特征. *水科学进展*, 2003, 14(4): 447~453.
- [14] 黄二辉, 潘德炉, 李淑菁, 等. 水下剖面光谱原始数据异常值的判断方法. *海洋学研究*, 2006, 24(1): 91~96.