

文章编号: 0253-2239(2010)10-2821-07

冬夏两季太湖离水辐亮度贡献的深度廓线分布模拟

赵巧华^{1,2} 邱 辉³

¹南京信息工程大学气象灾害省部共建教育部重点实验室, 江苏 南京 210044
²南京信息工程大学遥感学院, 江苏 南京 210044; ³南京信息工程大学大气科学学院, 江苏 南京 210044

摘要 基于冬夏两季太湖50个采样点的散射、吸收系数,在假定水体混合均匀、无非弹性散射及内光源的情况下,利用多次散射模式模拟了冬夏两季太湖离水辐亮度贡献的深度廓线分布及相同离水辐亮度贡献之和情况下的深度分布。结果表明,由于冬夏两季风浪作用及水体中藻类浓度的差异,各层离水辐亮度贡献之和(自表层向下累加)达到99.5%,时在各采样点深度具有明显的不同。夏季梅梁湾和竺山湾最小,湖心开阔区及贡湖湾次之,太湖东南部最大,且在东太湖及西山的部分区域,底质反射的贡献不可忽略;冬季该深度基本均小于水深,无需考虑底质反射,且梅梁湾、竺山湾、西部沿岸、贡湖湾、东太湖及西山附近深度相对较大,但不超过450 mm。夏季影响该深度的因子主要是悬浮颗粒物及叶绿素,而冬季主要是悬浮颗粒物。内陆水体光学特性在空间上的非均匀分布,决定了不同深度处因散射引起的向上辐射对离水辐亮度贡献在空间上的不同,耦合离水辐亮度贡献廓线分布对提高二类水体水质参数的遥感有着重要意义。

关键词 遥感;多次散射;最大深度;离水辐亮度贡献

中图分类号 P733.3 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20103010.2821

Simulation of the Profile Distribution of Water-Leaving Radiation Contribution in Taihu Lake in Winter and Summer

Zhao Qiaohua^{1,2} Qiu hui³

¹Key Laboratory of Meteorological Disaster, Ministry of Education, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing Jiangsu 210044, China
²College of Remote Sensing, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing Jiangsu 210044, China
³College of Atmospheric Science, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210044, China

Abstract Based on the measured scattering and absorption coefficient at fifty points in Taihu lake in winter and summer, the profile distribution of water-leaving radiation contribution and the depth of the same contribution of water-leaving radiation at different point in Taihu lake are simulated by multiple scattering models assuming that the radiation field has no internal light source, no inelastic scattering and the water is uniformly mixed. The results show that, the depth for the sum of water-leaving radiation contribution reaching 99.5% (accumulated downward from the surface) has significant difference in different space on the account of wind wave action and the concentration of phytoplankton in winter and in summer. In summer, the smallest depth is in Meiliang bay and Zhushan bay, followed by the center of the lake and Gonghu bay, in the south-east of Taihu lake the depth is the biggest and the contribution of sediments reflection in east Taihu lake and Xishan hills can not be ignored. In winter, the sediments reflection need to doesn't be considered since the depth for the sum of water-leaving radiation contribution reaching 99.5% is less than the water depth. In Meiliang Bay, Zhushan Bay, western coast, Gonghu Bay, east Taihu Lake and Xishan Hills the depth is relatively large, but not more than 450 mm. In summer the suspended particulate and chlorophyll are the mainly factors which effected the depth, in winter the mainly factor is suspended particle. The spatial inhomogeneous distribution of the interior water body optical characters determines the spatial difference of the water-leaving radiation contribution which is caused by the upward radiation due to the different depth scattering. Coupling the profile distribution of water-leaving radiation contribution has a great improvement on remote sensing of the quality parameters of water II.

Key words remote sensing; multiple scattering; maximum depth; water-leaving radiation contribution

收稿日期: 2009-10-19; 收到修改稿日期: 2010-03-01

基金项目: 国家自然科学基金(40701168)和水体污染控制与治理科技重大专项(2009ZX07101-013)资助课题。

作者简介: 赵巧华(1972—),男,博士,副教授,主要从事水光学及水环境等方面的研究。E-mail: zqh3531@sina.com

1 引 言

近年随着生态环境问题的日益突出,利用可见光对内陆湖泊水质遥感的需求也越来越迫切。然而由于内陆水体受陆地输送的影响存在空间差异,尤其是在大型浅水湖泊中,沉积物的分布存在明显的空间差异^[1,2],主导风向与非主导风向引起的底泥再悬浮及输移也就存在空间上的不同^[3],因而内陆水体的光学特性与一类水体之间存在明显的差异,即其在空间上分布是非均匀的,所以把一类水体的遥感算法应用到内陆水体中往往难以凑效,其主要原因除了大气气溶胶的复杂性、水体层化的动态变化性和固有光学参量的特性没有准确获得之外,还存在如下几个问题:1)在可见光波段,同波段的辐射在不同的内陆湖泊区域穿透能力不同,遥感数据中也就包含不对等的水体信息量^[4],由此可能引起对叶绿素、悬浮质等参数浓度的监测误差。2)由于水体离水辐亮度信号来源于不同深度水体中介质的散射,当穿透深度大于水体几何深度时,离水辐亮度信号中可能包含了底质反射的信号^[5],由此亦会引起遥感估算误差。鉴于上述原因,梁顺林等^[4]、及 Gordon 等^[6]分别对水体的遥感探测深度及辐射穿透深度进行了研究,但他们的研究都是基于单次散射近似的算法。由于大型浅水湖泊底泥在风浪作用下极易再悬浮,水体中悬浮物浓度较大,因而该算法并不适用于内陆的大型浅水湖泊。

本文在假定水体均匀,水体中无非弹性散射及内光源的条件下,拟采用多次散射模式,模拟不同深度的介质因散射作用引起的向上辐亮度对紧贴水表下方离水辐亮度信号的贡献,以探讨离水辐亮度贡献的廓线分布规律及底质反射在何时、何区域需要加以考虑;为在不同探测深度区域遥感获取的叶绿素、悬浮物浓度的可比性提供理论依据。

2 材料与方 法

2.1 采样站点与时间

2006年1月7~9日,7月29日~8月1日在太湖分别进行了冬夏两季水样的采集和水体光学参量的测定(图1),基本覆盖了太湖不同生态类型的湖区,既有藻型湖区的梅梁湾,又有开阔水域的大太湖和草型湖区的胥口湾等。采样期间天气晴朗,每季各采集50个水样并分析总悬浮颗粒物、有色可溶性有机物(CDOM)的吸收系数、光束衰减系数等固有光学参数和各组分物质浓度。

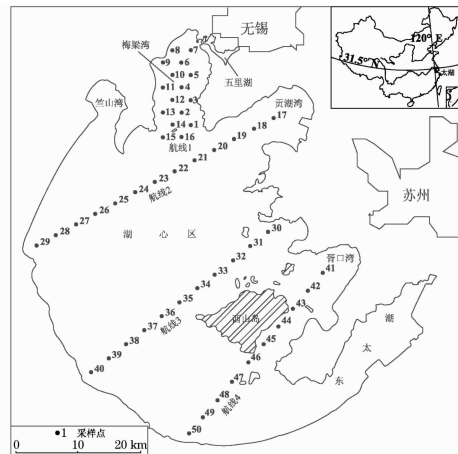


图1 采样站点分布

Fig. 1 Distribution of sampling stations

2.2 吸收系数和散射系数测定及计算

悬浮颗粒物和CDOM的具体吸收系数测定与计算参见文献^[7]。总吸收系数为悬浮颗粒物、CDOM和纯水吸收系数的线性迭加^[8]:

$$a_t(\lambda) = a_p(\lambda) + a_g(\lambda) + a_w(\lambda), \quad (1)$$

式中 $a_t(\lambda)$, $a_p(\lambda)$, $a_g(\lambda)$ 和 $a_w(\lambda)$ 分别代表总吸收系数、悬浮颗粒物、CDOM和纯水吸收系数, λ 为波长。纯水的光谱吸收系数采用Smith等^[9]测定的值。

除纯水之外的光束衰减系数 $c_{t-w}(\lambda)$ 是利用分光光度计直接测量原始水样相对于超纯水的光学密度得到的。为了降低前向散射,使用4 cm的比色皿并尽量远离接受窗口在UV-2401PC型分光光度计下测定原水样的吸光度,为尽可能降低多次散射,对部分样品进行稀释以确保样品吸光度低于1.2。理论上光束衰减系数可能被轻微低估尤其当出现前向散射峰时,但研究表明这种方法仍然近似可行^[10],光束衰减系数表示为^[8]:

$$c_{t-w} = 2.303D(\lambda)/r, \quad (2)$$

式中 $D(\lambda)$ 为 λ 波长的光学密度, r 为光程路径。

光束衰减系数为吸收系数和散射系数的线性迭加,除纯水之外的散射系数 $b_{t-w}(\lambda)$ 和总散射系数 $b_t(\lambda)$ 为

$$b_{t-w}(\lambda) = c_{t-w}(\lambda) - a_p(\lambda) - a_g(\lambda), \quad (3)$$

$$b_t(\lambda) = b_{t-w}(\lambda) + b_w(\lambda). \quad (4)$$

2.3 不同深处介质散射引起的高水辐亮度贡献计算

2.3.1 散射引起入射辐射的重新分布

为了定量计算因散射作用引起的向上辐射,应准确知道入射角为 θ 的辐亮度(假定辐亮度与方位角无关)发生散射后在各个天顶角方向上的重新分布。

根据Sathyendranath的模式^[11],先定义一个以

天顶角 θ_i 为轴线的圆锥体, 其母线的天顶角范围分别为 $\theta_1 = (\theta_i - 1/2\Delta\theta)$ 和 $\theta_2 = (\theta_i + 1/2\Delta\theta)$, 并以此作为散射的天顶角。若以 θ 为入射辐射的天顶角, θ_i 为散射辐射的天顶角, χ 为散射角, φ_i 和 φ 分别为入射和散射辐射的方位角, 则它们之间关系为

$$\cos \theta_i = \cos \theta \cos \chi + \sin \theta \sin \chi \cos \psi. \quad (5)$$

从(3)式可知散射角 χ 及散射方位角 ψ ($\psi = [\pi - (\varphi_i - \varphi)]$) 的取值范围分别为^[11]

$$\chi_{\min} = |\theta_1 - \theta|, \quad \chi_{\max} = \theta_2 + \theta. \quad (6)$$

和

$$\begin{aligned} \cos \psi_1 &= \frac{\cos \theta_1 - \cos \theta \cos \chi}{\sin \theta \sin \chi}, \\ \cos \psi_2 &= \frac{\cos \theta_2 - \cos \theta \cos \chi}{\sin \theta \sin \varphi}. \end{aligned} \quad (7)$$

因此天顶角为 θ 的入射辐射经散射进入天顶角为 θ_i 方向的散射系数可以表示为 $\mathcal{R}(\theta, \theta_i)$ ^[11]

$$\mathcal{R}(\theta, \theta_i) = \frac{2}{\Delta\theta} \int_{\chi_{\min}}^{\chi_{\max}} (\psi_1 - \psi_2) \beta(\chi) \sin \chi d\chi, \quad (8)$$

式中 $\beta(\chi)$ 为体散射函数。

2.3.2 多重散射对下行辐照度的作用及向上辐亮度传输模拟

为进一步计算辐照度在传输过程中向上漫射时散射系数等参数的变化, 给定任一水体, 其吸收系数为 $a(z)$, 体散射函数为 $\beta(\chi)$, 且深度为 z 处天顶角为 θ 的入射辐照度为 $\xi(\theta, z)$, 则该辐照度在垂直方向上传输 dz 距离时, 发生散射的辐照度可表示为^[11]

$$d\xi(\theta, z + dz) = \xi(\theta, z) \exp[-a(z)dz/\cos \theta] \times \{1 - \exp[-b(z)dz/\cos \theta]\}, \quad (9)$$

式中 $b(z) = \int_{4\pi} \beta(\chi, z) d\omega$ 为散射系数, ω 为立体角。

在这部分辐照度中, 天顶角为 θ_i 的辐照度为 $d^2\xi(\theta, \theta_i)$ 。(9)式成立的严格条件是在辐射传输 dz 的距离上光子被散射不超过一次, 因此需要限定 dz 足够小以保证 $b dz / \cos \theta \ll 1$ 。此时

$$d^2\xi(\theta, \theta_i, z + dz) d\theta_i = d\xi(\theta, z + dz) \mathcal{R}'(\theta, \theta_i, z) d\theta_i, \quad (10)$$

式中 $\mathcal{R}'(\theta, \theta_i, z) = \mathcal{R}(\theta, \theta_i, z) / b(z)$, 则在 θ_i 方向上的辐照度可近似为

$$\begin{aligned} \xi(\theta_i, z + dz) &= \xi(\theta_i, z) \exp\{-[a(z) + b(z)] \times \\ &dz / \cos \theta\} + \int_0^{\pi/2} d^2\xi(\theta, \theta_i, z + dz) d\theta. \end{aligned} \quad (11)$$

首先可以通过(9)~(11)式计算从水表下方向下传输, 然后再模拟各深度处因散射引起的向上辐照度

的向上传输, 得出深度 z 处因散射作用向上传输到水表下方 (0^-)、天顶角为 θ 的辐照度 $\xi'(\theta, z, 0^-)$, 最后将 $\xi'(\theta, z, 0^-)$ 除以方位角 (2π) 得到辐亮度 $L'(\theta, z, 0^-)$ 。该模式利用了光场平均余弦并与 Monte-Carlo 模拟的结果进行了比较, 其结果非常吻合[参见文献[11]的图 3(b)]。

2.3.3 不同深度的离水辐亮度贡献及最大深度确定

在深度 z 处因散射作用引起的向上传输对 0^- 处、天顶角为 θ 的离水辐亮度贡献可用下式表示为

$$\alpha(\theta, z) = L'(\theta, 0^-) / \left[\sum_{i=1}^{i=N} L'(\theta, z_i) \right]. \quad (12)$$

最大深度定义为从 0^- 处向下对 $\alpha(\theta, z)$ 逐层累加, 步距为 1 mm, 以太湖的平均深度为限, 当其和大于 99.5% 时的深度。

3 结果与分析

计算所需输入的参数分别为水体的吸收系数、散射系数、体散射函数, 其中吸收系数、散射系数是通过在图 1 中所标出的采样点上采集水样测量得到, 而体散射函数是通过 Sathyendranath^[11] 测定的值得到。主要讨论各深度处散射引起的向上辐射对离水辐亮度的贡献。

3.1 离水辐亮度贡献的廓线分布

为了简单起见, 以下分析和讨论均针对紧贴水表下方入射天顶角为 0.5° , 而出射天顶角为 179.5° 的情况。从图 2 可以看出, 冬夏两季不同观测点位的离水辐亮度的廓线分布均随深度呈现 e 的负指数衰减规律; 表层离水辐亮度贡献最大, 其值介于 $0.06\% \sim 0.07\%$ 之间, 而最小的介于 $0.005\% \sim 0.001\%$ 之间。从平均状况来看, 离水辐亮度的表层贡献在冬季比夏季大。然而离水辐亮度贡献的空间分布非常不均匀, 从总的情况来看, 夏季, 梅梁湾和竺山湾表层的离水辐亮度贡献相对较大, 且随深度衰减较快, 而贡湖湾及大湖区的次之, 东太湖的最小。造成上述几个特点的原因如下: 1) 表层因粒子散射引起的向上传输所经历的行程较短, 因而其衰减要少, 造成表层的贡献相对较大; 2) 尽管表层相对较大, 但各层的贡献都比较小, 这一现象形成的原因并非弱散射作用造成的, 而是由于在数值计算中, 模拟多次散射过程时, 仅限定每毫米深度的水层中介质散射的作用, 所以其贡献在表现上显得相对较弱。根据离水辐亮度的形成原因及其传输规律来看, 离水辐亮度的表层贡献大小及其随深度衰减的快慢呈现空间及季节分布不均匀的特点, 该现象与水体中的悬

浮颗粒物浓度的空间差异有着密切的关系。

为进一步阐述表层离水辐亮度贡献的廓线特征及成因,利用指数衰减的函数形式 $[\alpha_{z_i} = \alpha_{z_0} \exp(-\kappa z_i)]$ 对各点离水辐亮度贡献随深度变化进行了拟合,其中 α_{z_0} 为表层离水辐亮度的贡献, κ 为离水辐亮度贡献随深度的衰减系数。从拟合结果来看,离水辐亮度贡献随深度呈 e 的负指数形式衰减($P < 0.0001$),同时通

过对 α_{z_0} 及 κ 分别与各站点的悬浮物浓度求相关(如图3所示),可见,无论是冬季还是夏季, α_{z_0} 、 κ 与悬浮颗粒物浓度均有较好的线性相关性(样本数为50)。由此说明,太湖水体中的悬浮颗粒物不仅是散射作用引起离水辐亮度的主要因子,同时还是辐射传输的主要衰减因子。

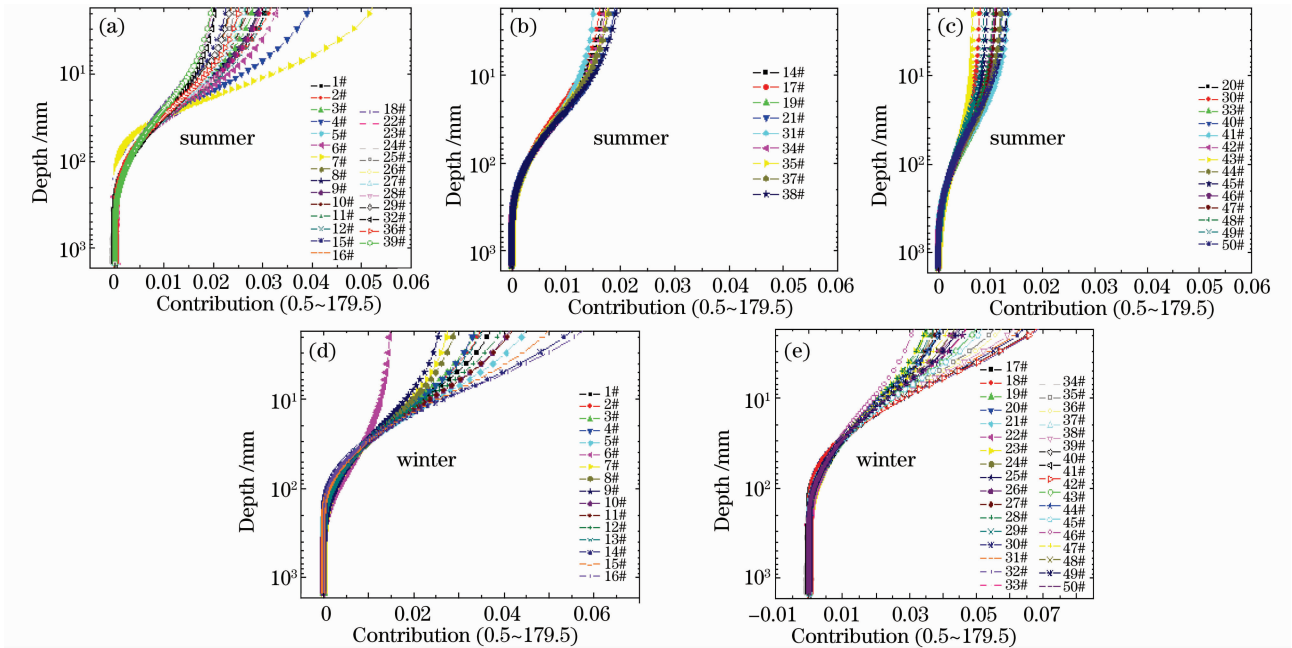


图2 冬夏两季各站点离水辐亮度贡献的廓线分布

Fig. 2 Profile distribution of water-leaving radiation contribution at every sampling location in summer and winter

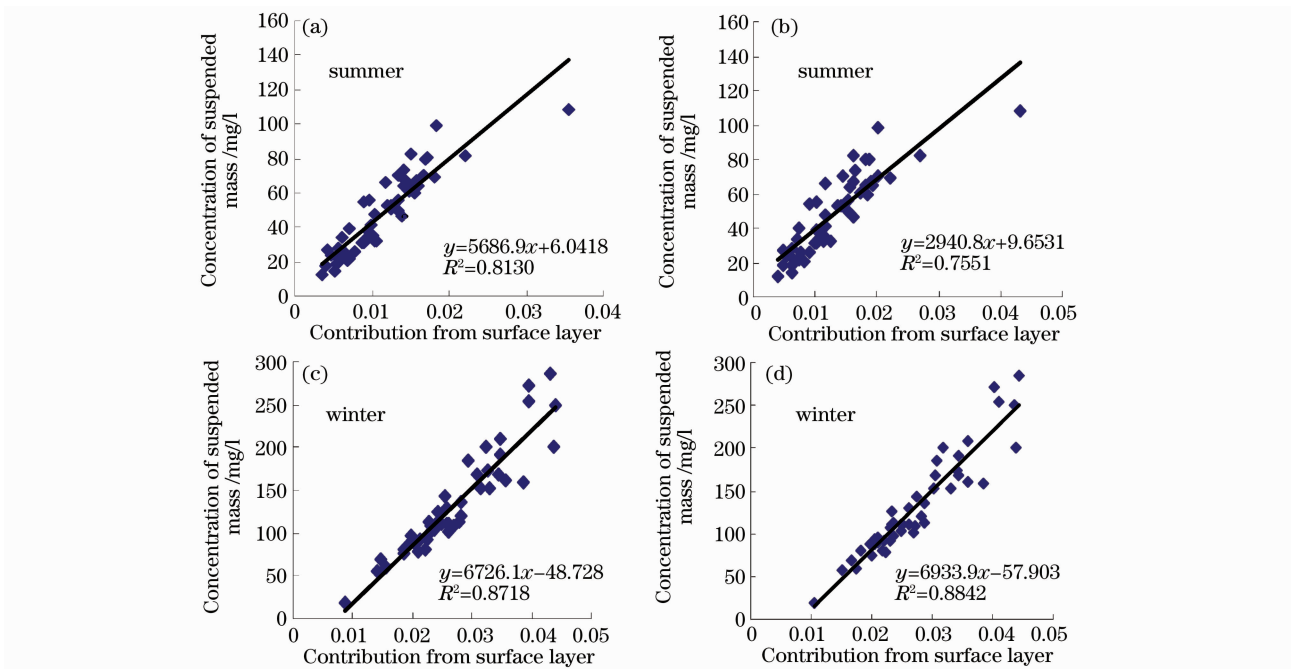


图3 冬夏两季 α_{z_0} 及 κ 与水体中的悬浮颗粒物浓度的线性相关图

Fig. 3 Linear relationship between α_{z_0} and κ with the concentration of suspended matter in water

3.2 冬夏两季最大深度的空间分布

由于二类水体光学介质的浓度在空间上分布不均匀,造成不同深度处因散射引起的向上辐射对离水辐亮度贡献不同,因而在对二类水体遥感时,传感器所接受到的离水辐亮度来自的深度在空间上亦存在着差异,因此针对离水辐亮度的贡献,讨论其空间分布的差异。冬夏两季太湖的最大深度空间分布如图 4 所示。可以看出,夏季,梅梁湾及竺山湾的最大深度最浅,不超过 450 mm;在太湖开阔区域最大深

度基本不超过 600 mm;太湖的东南部(除东太湖沿岸及胥口湾外),最大深度能超过 1000 mm;而在太湖开阔区域及东南部之外,中间存在一过渡区域,该区域包含了贡湖湾,其最大深度介于 600 ~ 1000 mm 之间。冬季,梅梁湾、竺山湾、贡湖湾及西北部沿岸、胥口湾、东太湖湾口区域及西山附近的 46 号、47 号点附近,最大深度较大,但基本不超过 450 mm,而其他区域不超过 305 mm。

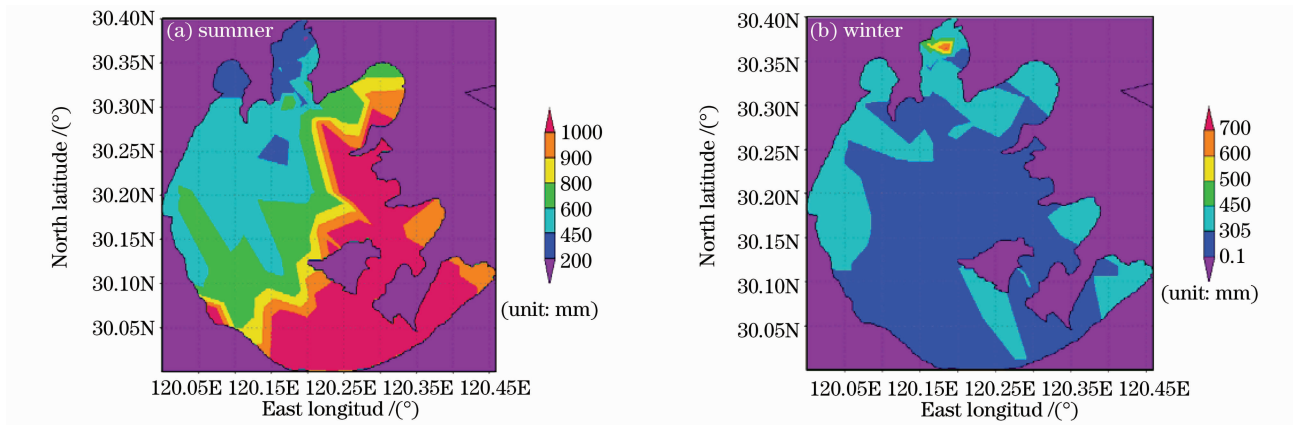


图 4 夏、冬两季最大深度的空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of the maximum depth in summer and winter

卫星传感器所接受到的离水辐亮度信号有 90% 来自于不同深度的水体^[8],然而由于太湖属于典型的大型浅水湖泊,当最大深度大于水体几何深度,遥感探测水质参数时,其底质的反射贡献必须给与考虑。为此从太湖水深的空间分布来看[图 4(b)、图 5],冬季水深均大于最大深度,而夏季却不尽然。从图 6 来看,在东太湖与西山岛南部的狭长水道及太湖东南部的部分区域的水深小于最大深度,可知在该区域中,底质对离水辐亮度存在一定的贡献,这与马荣华的研究结果基本一致^[5]。

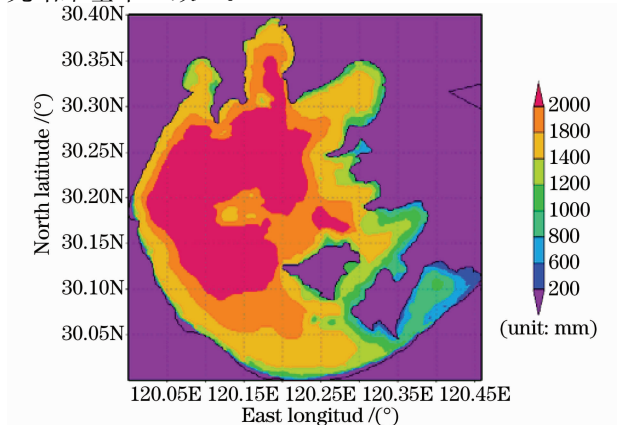


图 5 太湖水深的空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of bathymetry in Taihu lake

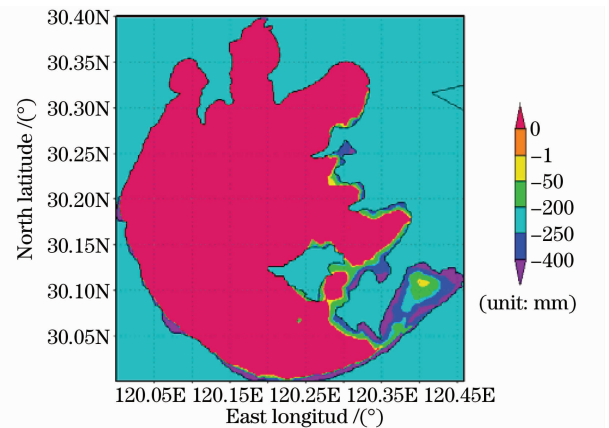


图 6 水深小于最大深度的区域空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of regions where the maximum depth is smaller than the bathymetry

为了探讨不同季节最大深度空间分布的成因,分别分析冬夏两季水体中无机悬浮物、有机悬浮物及叶绿素 a 的浓度与最大深度的关系。夏季,最大深度与有机悬浮物及叶绿素 a 浓度呈良好的幂函数关系,其决定系数分别为 0.8352 和 0.8723[图 7(a)和图 7(c)],但与无机悬浮物浓度的关系相对较差,但其决定系数也达到 0.503[图 7(b)];冬季,最大深度与有机悬浮物、无机悬浮物的浓度也呈很好的幂函数的关系,其决定系数分别为 0.8507 和 0.8982

[图 7(d)和图 7(e)],但最大深度与叶绿素 a 的浓度基本没有关系[图 7(f)].这些幂函数的关系与太湖、珠江口的特征基本一致^[13~15].从上述情况可知,夏季有机悬浮物、叶绿素 a 及无机悬浮物浓度可能是影响最大深度的关键因子;冬季影响最大深度的关键因子是有机悬浮物和无机悬浮物的浓度,叶绿素 a 的浓度对最大深度基本没有什么影响。

造成上述结果的原因是夏季的盛行风向是东南风,使得有机悬浮物、无机悬浮物及叶绿素 a 在梅梁

湾、及竺山湾区域汇集,因而最大深度在该区域相对较小,最大深度在太湖其他区域的分布特征也能得到圆满的解释。同理,由于冬季盛行西北风,使得梅梁湾、竺山湾等区域的吹程相对较小,因此这些区域最大深度较其他区域大,由此可以解释最大深度在太湖开阔区域的分布特征。另外由于冬季温度低,藻类生物量相对较少,其吸收和散射作用较弱,因而叶绿素 a 并不像在夏季一样成为影响最大深度的关键因子。

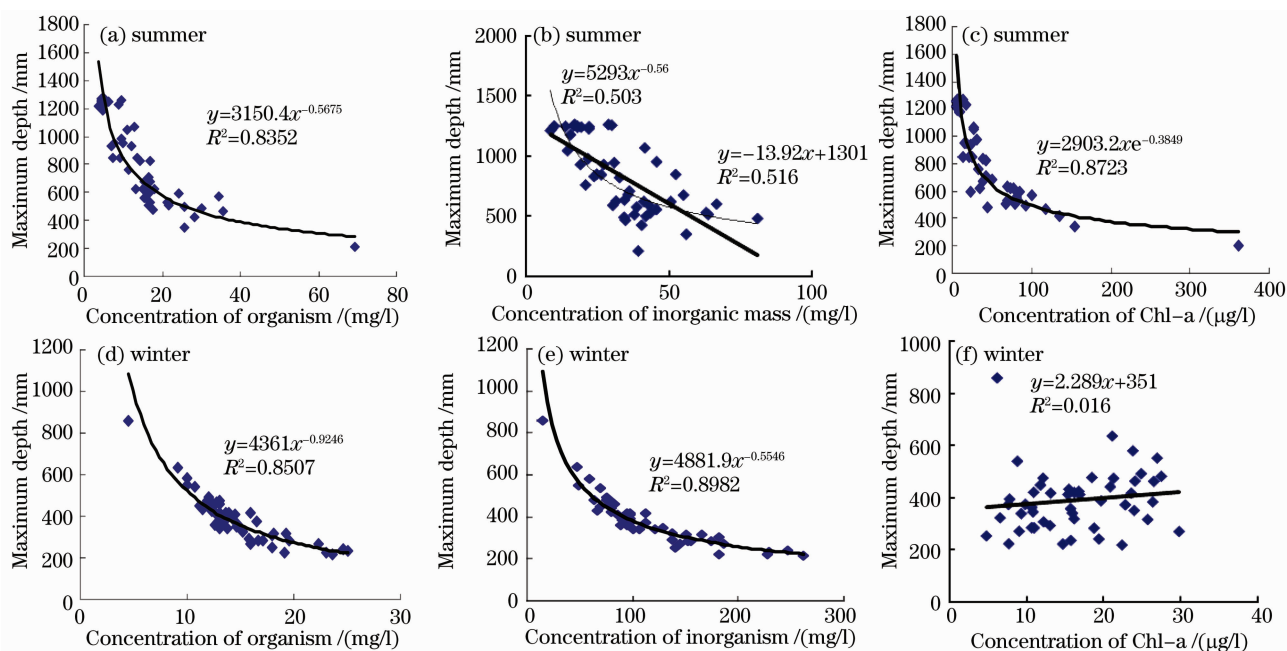


图 7 夏、冬两季的最大深度与无机物浓度、有机物浓度及叶绿素浓度的关系

Fig. 7 Relation of maximum depth with concentration of inorganic suspended particle, organic suspended particle and Chl-a in winter

4 结 论

在大型浅水湖泊中,由于风浪作用显著,易造成底泥的再悬浮,同时通过输移等作用引起物质在空间上的不均匀分布,因而也就造成水体光学特性的空间不均匀,即吸收和散射系数在空间上存在显著差异^[13,15]。尽管现在对监测的需求日益迫切,但是在对内陆水体水质参数(特别是叶绿素浓度)的遥感过程中,大部分仍是利用波段运算、统计或半统计半分析的方法进行估算^[16]。该类方法主要是针对远洋情况而言的,因为在远洋这样的一类水体中,水体光学特性受陆地影响较小,在空间分布较均匀,因而卫星传感器所接受到的离水辐亮度信号来源深度基本一致,其对水质参数遥感在空间上具有可比性。但在内陆湖泊中,由于介质空间分布的非均匀性^[18],即介质通过散射和吸收双重作用改变辐射传

输的能量大小和传输方向不同,造成遥感探测深度在空间上存在较大的差异,因而通过遥感监测水质参数浓度需要考虑不同深度的离水辐亮度贡献,否则会造成遥感模型具有明显的区域及时序差异,使其难以推广。

由于这类大型浅水湖泊中,光学介质的组成、浓度在时空分布的非均匀性,使得光学参数深度廓线模拟的验证,需要 1 cm 级深度(精度)的小型剖面光学系统,但是目前国内外,难以见到类似的仪器,因而此类研究目前难以用实测数据佐证。

鉴于太湖水体中悬浮物浓度较高^[17],因此辐射在传输过程中需经历多次散射,由此通过多次散射模式,计算了不同深度处介质的散射作用引起的向上传输对离水辐亮度的贡献,并探讨了不同季节最大深度的空间分布及其可能机制。经过研究发现,

1) 离水辐亮度贡献随深度变化呈 e 的负指数衰减, 其表层贡献及其衰减系数均与水体中悬浮颗粒物的浓度呈正相关; 2) 最大深度在冬夏两季具有明显的不同。且夏季影响该深度的因子主要是悬浮颗粒物及叶绿素, 而冬季主要是悬浮颗粒物。

致谢 感谢张运林博士和王鑫硕士提供部分数据及采样时提供的帮助, 谨以此文表示谢意。

参 考 文 献

- 1 Fan Chenxin, Liu Yuanbo. Approach on estimating storage sludge in Lake Taihu and its distributing characteristics [J]. *Shanghai Environmental Sciences*, 2000, **19**(2): 72~75
范成新, 刘元波. 太湖底泥蓄积量估算及分布特征探讨[J]. *上海环境科学*, 2000, **19**(2): 72~75
- 2 Sun Shuncai, Wu Yifan. Formation and evolution of Lake Taihu with the modern sedimentation[J]. *Sci. China. Ser. B.*, 1987, **17**(12): 1329~1339
孙顺才, 伍贻范. 太湖形成演变与现代沉积作用[J]. *中国科学 B 辑*, 1987, **17**(12): 1329~1339
- 3 C. B. Lövestedt, L. Bengtsson. The role of non-prevailing wind direction on suspension and redistribution of sediments in a shallow lake[J]. *Aquat. sci.*, 2008, **70**(3): 304~313
- 4 Liang Shunlin, Chen Bingwei. A study on remote sensing perspective depth into water in visible band [J]. *Journal of Nanjing University*, 1989, **25**(2): 322~332
梁顺林, 陈丙威. 可见光波段的水体透视深度研究[J]. *南京大学学报*, 1989, **25**(2): 322~332
- 5 Ma Ronghua, Duan Hongtao, Zhang Shouxuan *et al.*. Contribution of vegetation bottom to remote sensing reflectance in Taihu Lake, China [J]. *J. Remote Sens.*, 2008, **12**(3): 483~489
马荣华, 段洪涛, 张寿选等. 太湖草型湖区对遥感反射比的贡献[J]. *遥感学报*, 2008, **12**(3): 483~489
- 6 H. R. Gordon, W. R. McCluney. Estimation of depth of sunlight penetration in the sea for remote sensing [J]. *Appl. Opt.*, 1975, **14**(2): 413~416
- 7 Y. L. Zhang, B. Q. Qin, G. W. Zhu *et al.*. Effect of sediment resuspension on underwater light field in shallow lakes in the middle and lower reaches of the Yangtze River: a case study in Longgan Lake and Taihu Lake [J]. *Sci. China Ser. D.*, 2006, **49**(SI): 114~125
- 8 J. T. O. Kirk. Light and photosynthesis in Aquatic Ecosystem [M]. Cambridge, Cambridge University Press, 1994, 12~13, 170~213
- 9 R. C. Smith, K. S. Baker. Optical properties of the clearest natural waters (200~800nm) [J]. *Appl. Opt.*, 1981, **20**(2): 177~184
- 10 S. G. H. Simis, M. Tjidsens, H. L. Hoogveld *et al.*. Optical signatures of the filamentous cyanobacterium *Leptolyngbya boryana* during mass viral lysis [J]. *Limnol. Oceanogr.*, 2007, **52**(1): 184~197
- 11 S. Sathyendranath, T. Platt. Angular distribution of the submarine light field: modification by multiple scattering [J]. *Pro. R. Soc. Lond. A.*, 1991, **433**: 287~297
- 12 J. T. O. Kirk. Light and Photosynthesis in Aquatic Ecosystem [M]. Cambridge: Cambridge university press, 1994
- 13 Sun Deyong, Li Yunmei, Wang Qiao *et al.*. The scattering characteristics of Lake Taihu waters [J]. *J. Lake Sci.*, 2008, **20**(3): 389~395
孙德勇, 李云梅, 王乔等. 太湖水体散射特性及其空间分布差异[J]. *湖泊科学*, 2008, **20**(3): 389~395
- 14 Sun Deyong, Li Yunmei, Le Chengfeng *et al.*. Scattering characteristics of Taihu Lake and its relationship models with suspended particle concentration [J]. *Environ. Sci.*, 2008, **28**(12): 2688~2694
孙德勇, 李云梅, 乐成峰等. 太湖水体散射特性及其与悬浮物浓度的关系模型[J]. *环境科学*, 2008, **28**(12): 2688~2694
- 15 Cao Wenxi, Yang Yuezhong, Xu Xiaoqiang *et al.*. Regional patterns of particulate spectral absorption in the Pearl River estuary [J]. *Chin. Sci. Bull.*, 2003, **48**(17): 1876~1882
曹文熙, 杨跃忠, 徐晓强等. 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
- 16 Duan Hngtao, Zhang Shouxuan, Zhang Yuazhi. Cyanobacteria bloom monitoring with remote sensing in Lake Taihu [J]. *J. Lake. Sci.*, 2008, **20**(2): 145~152
段洪涛, 张寿选, 张渊智. 太湖蓝藻水华遥感监测方法[J]. *湖泊科学*, 2008, **20**(2): 145~152
- 17 Zhang Yunlin, Qin Boqiang, Chen Weiming *et al.*. A study on total suspended matter in Lake Taihu [J]. *Resour. Environ. Yangtze Bas.*, 2004, **13**(3): 266~271
张运林, 秦伯强, 陈伟民. 太湖水体悬浮物研究[J]. *长江流域资源与环境*, 2004, **13**(3): 266~271
- 18 Zhao Qiaohua. Inversion of absorption coefficient of medium in shallow lake [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(7): 1766~1771
赵巧华. 浅水湖泊中介质吸收系数的反演[J]. *光学学报*, 2009, **29**(7): 1766~1771