

# 夏季太湖水体固有光学参数对光传输行程、积分平均余弦影响的研究

赵巧华<sup>1,2</sup>, 张运林<sup>3</sup>

(1. 南京信息工程大学气象灾害重点实验室, 南京 210044; 2. 南京信息工程大学遥感学院, 南京 210044; 3. 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 南京 210008)

**摘要:**基于2006-07-29~2006-08-01于太湖采集的水体固有光学参数和部分水质参数,利用辐射传输的理论,研究了夏季散射对太湖水体中光传输行程的作用、散射和吸收对光场积分平均余弦的影响,并分析了其可能机制.结果表明,垂直入射的辐射沿入射方向的平均传输行程和积分平均余弦呈现从西北向东南递增的趋势;垂直入射的辐射沿入射方向的平均传输行程、水柱的积分平均余弦与叶绿素a、悬浮物浓度、有机悬浮物浓度及无机悬浮物浓度均呈非线性相关,其关系可用对数函数来描述.本研究对水体中光合有效辐射的环境效应、及建立生物-光学模型有着重要意义.

**关键词:**传输行程;积分平均余弦;固有光学参数;吸收;散射

中图分类号:X122 文献标识码:A 文章编号:0250-3301(2010)10-2285-07

## Effect of Inherent Optical Parameters on Average Penetration Depth of Photon Flux and the Integral Average Cosine of Underwater Light Field in Lake Taihu During Summer

ZHAO Qiao-hua<sup>1,2</sup>, ZHANG Yun-lin<sup>3</sup>

(1. Jiangsu Key Laboratory of Meteorological Disaster, 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; 3. Nanjing Institute of Geography & Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

**Abstract:** Based on the inherent optical parameters of the water and water quality data in lake Taihu from 2006-07-29 to 2006-08-01, the effect of scattering on the penetration path along the original direction of the flux and the Integral average cosine of underwater light field were study by the radiative transfer theory, and the possible mechanism was analyzed. There were increasing trend from northwest to southeast of them. There were a nonlinear relation between them and concentration of Chl-a, suspended matter, inorganism matter, organism matter. The relation was described by logarithmic function. The study was helpful for bio-optical model and the environmental effects of photosynthetic active radiation in waters.

**Key words:** penetration path; integral average cosine; inherent parameter; absorption; scattering

在水生生态系统中,光是影响其结构和功能的关键性因子之一<sup>[1]</sup>,光在水下传输过程中,需经历散射及选择性吸收的作用,尽管散射并未使水体中光合有效辐射的能量减小,但却能改变光的传输方向,改变水体中光场的几何结构,使得光场中漫射的比例增大,光的传输路径加长,光能被吸收的概率增大,从而影响藻类的光合作用,同时也改变了光沿入射方向的传输行程<sup>[2,3]</sup>,进而影响水体中浮游藻类、高等水生植物等对光能的竞争<sup>[4]</sup>.

在大型浅水湖泊中(太湖),浮游植物的生长存在明显的空间分化,就光合有效辐射的环境效应而言,由于水体中光学介质受地表径流,及主导风向与非主导风向引起的非均匀底泥<sup>[5,6]</sup>再悬浮及输移的影响<sup>[7]</sup>,使得光合有效辐射能量在不同介质之间的

分配和流动存在空间上的明显差别,从而造成浮游植物的光合有效辐射获取和利用能力也就存在空间变化.另一方面,一类水体中光合有效辐射的环境效应理论应用到内陆水体中往往难以奏效,其主要原因除了水体层化的动态变化性和固有光学参量的特性还没有准确获得之外,还有如下2个问题:其一,同波段的辐射在不同的内陆湖泊水域穿透能力不同,造成真光层深度不同,这不仅会造成浮游植物的廓线分布的差异,也会使得光传输信号中包含不对

收稿日期:2009-11-24;修订日期:2010-03-15

基金项目:国家自然科学基金项目(40701168);国家水体污染控制与治理科技重大专项(2009ZX07101-013);中国科学院南京地理湖泊研究所湖泊环境国家重点实验室开放基金项目

作者简介:赵巧华(1972~),男,博士,副教授,主要研究方向为水光学及水环境,E-mail: zqh3531@sina.com

等的水体信息量<sup>[8]</sup>,由此可能产生对水体初级生产力的估算误差;其二,当穿透深度大于水体几何深度时,底质反射的辐射<sup>[9]</sup>可能被低估,可见散射作用对辐射传输路径及光场几何结构的影响在生物-光学的相互关系中有着重要意义.梁顺林等<sup>[8]</sup>和 Gordon 等<sup>[10]</sup>均针对海洋采用了单次散射近似的方法计算了光传输过程中的辐射穿透深度,然而对内陆大型浅水湖泊而言,单次散射近似能否适用,是值得商榷的.

为此本研究拟通过多次散射辐射传输理论,分析太湖水体中的散射作用对辐射传输行程、水体中光场的几何结构的影响,该研究将有助于探讨水体中的光场对水生生态系统的影响、构建二类水体遥感的物理模型和生物-光学模型,提高二类水体遥感的精度.

## 1 材料与方法

### 1.1 采样站点与时间

2006-07-29 ~ 2006-08-01 在太湖分别进行了夏季水体光学参量测定和水样的采集(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,又有大太湖开阔水域和胥口湾等草型湖区,采样期间天气晴朗,每季各采集 50 个水样回实验室分析总悬浮颗粒物、有色可溶性有机物(chromophoric dissolved organic matter, CDOM)吸收系数、光束衰减系数等固有光学参数和各组份物质的浓度.

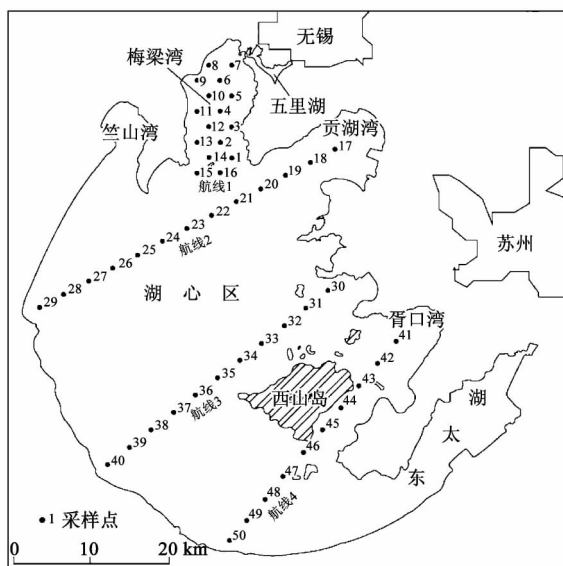


图1 采样站点分布示意

Fig.1 Distribution of sampling stations

### 1.2 吸收系数和散射系数测定及计算

颗粒物和 CDOM 的具体吸收系数测定与计算参见文献<sup>[10]</sup>.

总吸收系数为悬浮颗粒物、CDOM 和纯水吸收系数的线性加<sup>[11]</sup>:

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

式中,  $a_t(\lambda)$ 、 $a_p(\lambda)$ 、 $a_g(\lambda)$ 、 $a_w(\lambda)$  分别代表总吸收系数、颗粒物、CDOM 和纯水吸收系数,  $\lambda$  为波长. 纯水的光谱吸收系数采用 Smith 等<sup>[12]</sup>测定的值.

除纯水之外的光束衰减系数  $c_{t-w}(\lambda)$  是利用 UV-2401PC 型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,同时为尽可能降低多次散射,将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<sup>[10]</sup>,根据式(2)计算得到光束衰减系数<sup>[8]</sup>.

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

式中,  $c_{t-w}(\lambda)$  为  $\lambda$  波长相对于超纯水的光束衰减系数( $\text{m}^{-1}$ );  $D(\lambda)$  为  $\lambda$  波长的光学密度;  $r$  为光程路径(m).

光束衰减系数为吸收系数和散射系数的线性加和. 除纯水之外的散射系数  $b_{t-w}(\lambda)$  和总散射系数  $b_t(\lambda)$  计算如下.

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

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

式中  $b_w(\lambda)$  为纯水的散射系数.

### 1.3 辐射传输深度及光场积分平均余弦的计算

#### 1.3.1 散射事件的概率分布

针对辐射传输过程中未被吸收的光子而言,在时间间隔为  $\Delta t$  时(取值方法见 1.3.2 节),所有光子传输路径应为  $c_w \Delta t$  (其中  $c_w$  为光在水中的传输速度),则该过程中,这些光子未发生一次散射的比例为  $p(0) = \exp(-b_t c_w \Delta t)$ ,设在  $c_w \Delta t$  中有一行程  $l$  ( $0 < l < c_w \Delta t$ ),在行进了  $l$  未被散射,然而在随后的微元  $\delta l$  中被散射的比例为  $b_t \delta l$ ,在此微元中经历一次散射的比例为<sup>[13]</sup>:

$$p(1, l \rightarrow l + \delta l) = \exp(-b_t l) b_t \delta l \cdot$$

$$\exp[-b_t(c_w \Delta t - l)] = \exp(-b_t c_w \Delta t) b_t \delta l \quad (5)$$

则在  $c_w \Delta t$  中,经历一次散射的比例为<sup>[13]</sup>:

$$\begin{aligned} p(1) &= \int_0^{c_w \Delta t} \exp(-b_t c_w \Delta t) b_t dl \\ &= b_t c_w \Delta t \cdot \exp(-b_t l) \end{aligned} \quad (6)$$

由此可知,在经历了一次散射后再经历第二次散射的概率为:

$$p(2, l \rightarrow l + \delta l) = \exp(b_l c_w \Delta t) b_l^2 l \delta l \quad (7)$$

则积分后可知:

$$\begin{aligned} p(2) &= b_l^2 \exp(-b_l c_w \Delta t) \int_0^{c_w \Delta t} l dl \\ &= \frac{(b_l c_w \Delta t)^2}{2} \exp(-b_l c_w \Delta t) \end{aligned} \quad (8)$$

由此类推,在  $\Delta t$  时间内经历了  $n$  次散射的概率为:

$$p(n) = \frac{(b_l c_w \Delta t)^n}{n!} \exp(-b_l c_w \Delta t) \quad (9)$$

### 1.3.2 散射对传输行程的影响

在不考虑吸收的情况下,设不经过散射的光子的沿着初始方向的行程为  $\Delta r_0$ , 散射 1 次光子的行程为  $\Delta r_1$ , 散射 2 次的光子的行程为  $\Delta r_2$ , 散射 3 次的光子行程  $\Delta r_3$ , 以此类推.

光子在不经过散射而是沿着初始方向的行程为  $d_0$ , 散射 1 次后的行程为  $d_1$ , 散射 2 次后为  $d_2$ , 以此类推. 然而在  $d (= c_w \Delta t)$  上发生散射在统计学上来说是等概率事件<sup>[3]</sup>. 为简单起见, 取  $d$  水体平均几何深度, 同时也就确定  $\Delta t$  的取值, 则可知:

$$\begin{aligned} \Delta r_n &= \frac{d}{n+1} [1 + \mu_s + \mu_s^2 + \cdots + \mu_s^n] \\ &= \frac{d}{n+1} \sum_{i=0}^n \mu_s^i \end{aligned} \quad (10)$$

式中  $\mu_s$  为散射平均余弦<sup>[14]</sup>.

于是结合散射事件的概率分布状况, 沿着入射方向的辐射平均行程 $\Delta r$ <sup>[3]</sup>为:

$$\begin{aligned} \Delta r &= p(0) \Delta r_0 + p(1) \Delta r_1 + \\ &\quad p(2) \Delta r_2 + \cdots + p(j) \Delta r_j \end{aligned} \quad (11)$$

### 1.3.3 水柱的积分平均余弦

平均余弦表征的是在任一空间位置上的体积微元内光场的几何结构, 系一表观光学参量, 通过 Gershun 公式在表观光学参量和固有光学参量之间构建了定量联系. 在水柱中, 光场的几何结构与漫射吸收系数及离水辐亮度有密切关系<sup>[15,16]</sup>, 而积分平均余弦  $\mu_c$  表征的是整个水柱光场的几何结构, 表达式如下<sup>[13]</sup>.

$$\mu_c = \frac{\mu_0 a_t}{a_t + b_l(1 - \mu_s)} \quad (12)$$

式中  $\mu_0$  为辐射刚进入水面时的光场平均余弦.

## 2 结果与分析

根据夏季太湖 50 个点位的吸收、散射系数, 针

对垂直入射辐射, 分别计算辐射经历散射次数的概率分布; 垂直入射的辐射传输行程的空间分布; 积分平均余弦的空间分布.

### 2.1 垂直入射的平均行程空间分布

图 2、图 3 分别表示 490 nm 和 676 nm 的垂直入射在夏季太湖传输行程的空间分布, 从图 2 可以看出, 在贡湖湾北部、竺山湾、梅梁湾及太湖北部, 垂直入射光传输行程介于 0.2 ~ 0.5 m; 在太湖东南部, 主要包括东太湖等湾区, 基本介于 0.8 ~ 1.8 m 之间; 而在太湖的西北部与东南部之间存在一个狭窄的过渡区, 其介于 0.5 ~ 0.7 m 之间. 而 676 nm 的垂直入射传输行程的空间分布状况基本与 490 nm 相似, 但也存在一定的区别, 其主要是 676 nm 的辐射传输行程较 490 nm 的大 (见图 3).

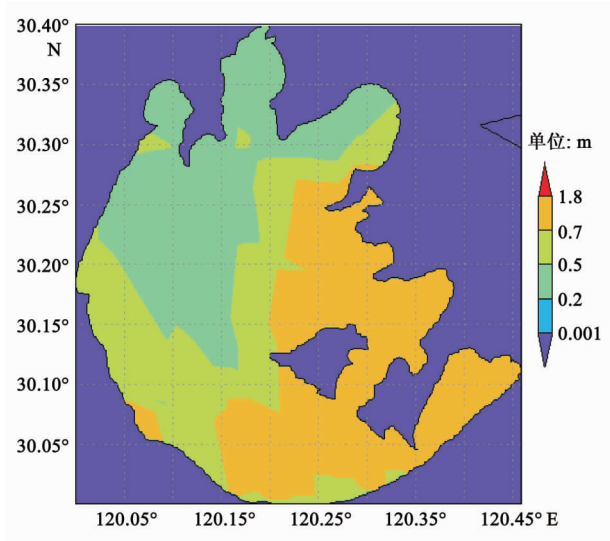


图 2 太湖夏季 490 nm 的垂直入射传输行程的空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of the penetration path at 490 nm in Lake Taihu during Summer

其主要原因如下: 太湖属于典型的大型浅水湖泊, 风浪作用易造成底泥再悬浮, 夏季, 在太湖东南方向盛行风的作用下<sup>[17]</sup>, 浮游植物和悬浮起来的沉积物水平输移到太湖西北部, 从而造成在太湖西北部沉积物浓度相对较高, 使得辐射在传输过程可能经历散射次数较多, 对辐射传输的改变较多, 即垂直辐射传输行程在西北部较浅, 另一方面, 由于波长较长, 散射次数相对较小, 所以 676 nm 的传输行程较大, 同时散射的空间分布特征也基本类似.

### 2.2 积分平均余弦的空间分布

图 4、图 5 给出了夏季 490 nm 和 676 nm 辐射在水柱中平均余弦的时空分布, 从图 4 可以看出, 太湖北部的 3 个湾区及太湖的 O 西北部的积分平均余

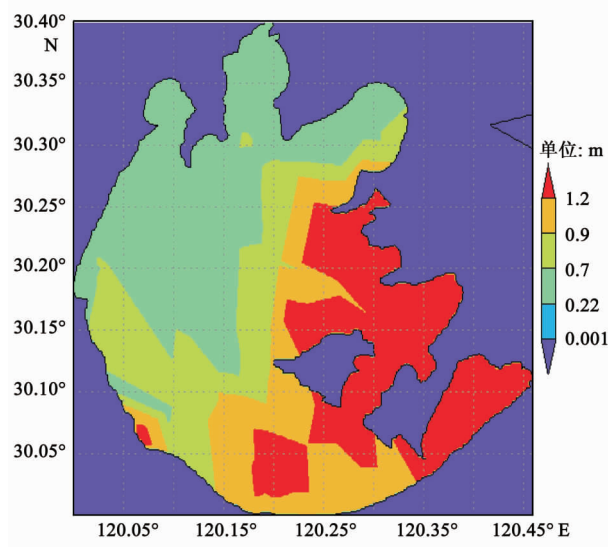


图3 太湖夏季 676 nm 的垂直入射传输行程的空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of the penetration path at 676 nm in Lake Taihu during Summer

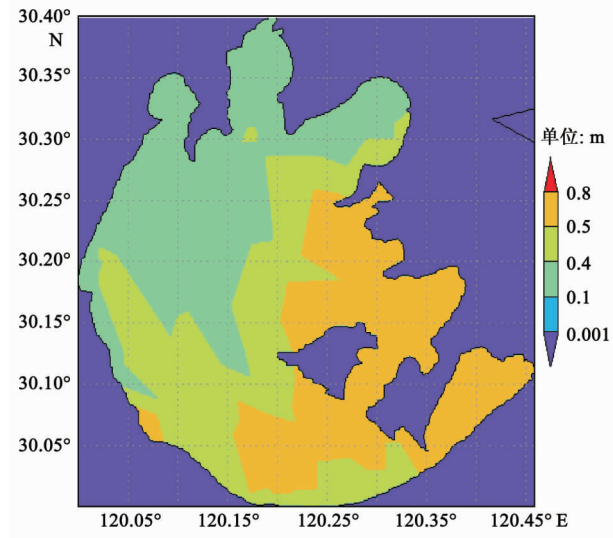


图5 太湖夏季 676 nm 的积分平均余弦的空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of the integral average cosine at 676 nm in Lake Taihu during Summer

弦介于 0.1 ~ 0.4, 而在东太湖及东南部湾区的积分平均余弦相对较大. 可见在太湖西北部的光场被散射比例较高, 而在东南部光场的被散射比例较低. 而在 676 nm 的积分平均余弦空间分布基本与 490 nm 类似, 但整体上基本比 490 nm 的要大, 其主要原因是散射相对 490 nm 较小, 因而散射对光场改变相对较小.

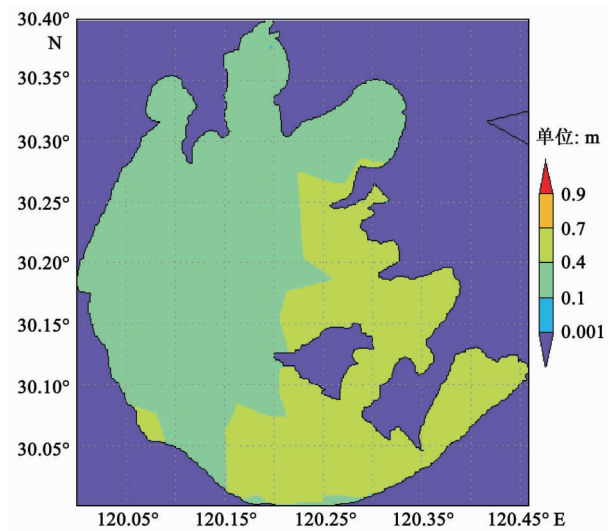


图4 太湖夏季 490 nm 的积分平均余弦的空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of the integral average cosine at 490 nm in Lake Taihu during Summer

### 2.3 垂直入射的传输行程及积分平均余弦空间分布的可能机制

为了进一步分析影响垂直入射的辐射行程和积分平均余弦的空间分布及其可能影响机制, 根据 50

个采样点的水质参数 (叶绿素 a、总悬浮物浓度、无机物浓度及有机物浓度), 分析其与传输行程和积分平均余弦的关系 (见图 6).

从图 6(a) ~ 6(d) 来看, 垂直入射的传输行程与叶绿素 a、总悬浮物浓度、有机悬浮物浓度及无机悬浮物浓度均呈非线性关系 (对数关系), 其中决定系数分别为 0.54、0.778、0.541、0.768 (样本数为 50). 从决定系数来看, 总悬浮物浓度与无机物悬浮物浓度的决定系数相对较大, 说明无机颗粒物的散射是决定垂直入射的传输行程的关键因子, 且总悬浮颗粒物中, 无机悬浮颗粒物占的比例较大, 同时也可知浮游植物等有机颗粒物引起的散射也是降低光子行程的一个重要原因.

从图 6(e) ~ 6(h) 来看, 积分平均余弦与叶绿素 a、总悬浮物浓度、有机物浓度及无机物浓度均呈非线性关系 (对数关系), 其中决定系数分别为 0.815、0.848、0.799、0.686 (样本数为 50). 与垂直入射传输行程和水质参数的关系相比, 积分平均余弦与水质参数的决定系数较大的分别是总悬浮颗粒物、叶绿素 a、及有机悬浮颗粒物, 其原因主要是影响积分平均余弦的因子不仅是散射系数, 而且还有介质的吸收系数. 而无机悬浮颗粒物的吸收系数的特征相对较弱, 散射特征相对较强, 因而与积分平均余弦的关系相对较弱.

从图 6 的各图来看, 上述关系呈现的是非线性相关特征, 与孙德勇等<sup>[18]</sup> 和曹文熙等<sup>[19]</sup> 的研究结果基本一致.

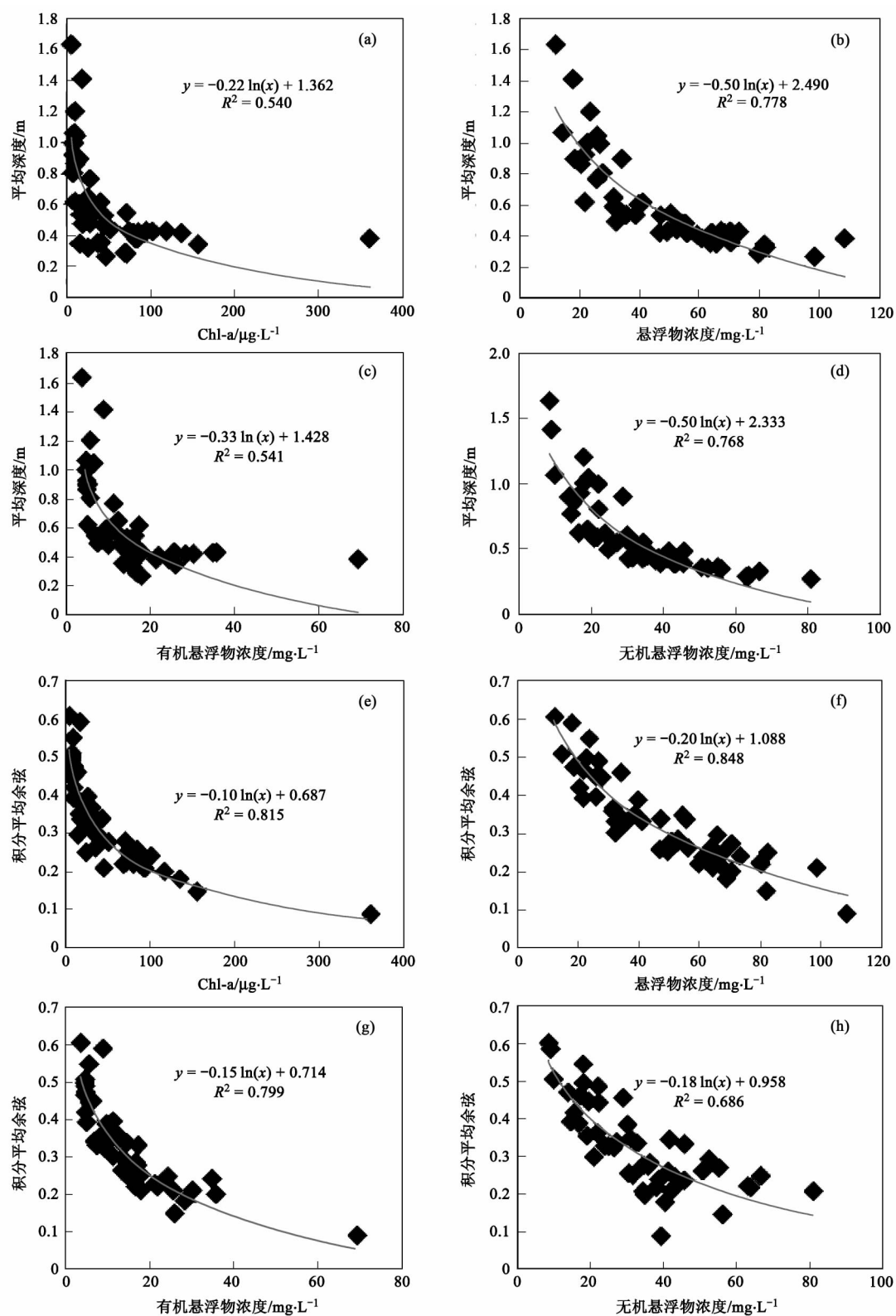


图6 水质参数与垂直入射传输行程、积分平均余弦的相关关系

Fig. 6 Relation between the penetration path, integral average cosine and water quality parameters

### 3 讨论

散射并不减弱能量,但改变辐射传播方向,使得

水体中辐射沿初始方向的传输行程缩短,从上述结果中可以看出,散射是影响辐射传输行程的关键因子,也是影响水柱中的积分平均余弦的主要因子之

一. 为此,在太湖这样的大型浅水湖泊中,在散射次数的概率分布及其空间差异的基础上,可以进一步探讨其空间差异的机制.

根据 Kirk<sup>[3]</sup>的研究,其概率分布函数为:

$$p(n) = \frac{(b_l c_w \Delta t)^n}{n!} \exp(-b_l c_w \Delta t) \quad (13)$$

为此相应给出了 3 个不同空间采样点的散射概率分布,如图 7.

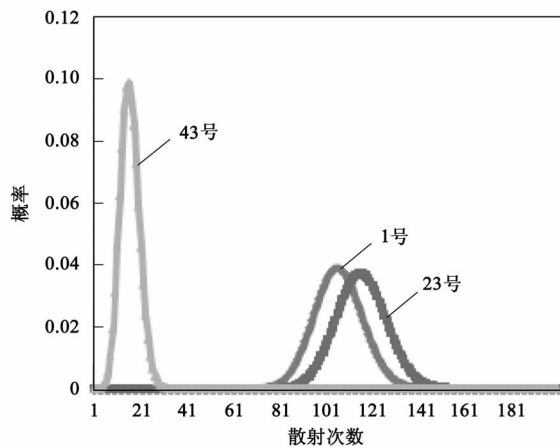


图 7 散射概率分布函数

Fig. 7 Probability distribution function of scattering

从图 7 可见,43 号点峰值为 0.081 15,峰值对应的散射次数为 24;23 号点峰值为 0.033 682,对应的散射次数为 140;1 号点峰值为 0.034 46,对应的散射次数为 134. 可见散射次数越大,其概率峰值越小,而对应的总悬浮颗粒物浓度也越大.

上述原因可从式(13)中寻找,在  $bd$  确定情况下,  $(bd)^n$  与  $n!$  变化相比,后者属于快变函数,而前者属于慢变函数,在太湖这一区域的状况下,随着  $n$  的增长,虽然  $n!$  增长快于  $(bd)^n$ ,但在初期,式(13)依然是以增函数,而当二者相交时,式(13)增长达到最大值,随着  $n$  的继续增大,式(13)开始递减,可见拐点处的  $n$  值即为散射概率峰值对应的散射次数;为此在不同  $bd$  情况下,可以确定式(13)拐点对应的  $n$  值(见图 8),即  $bd$  越大,拐点的  $n$  值也就越大;另一方面,当位于拐点时,式(13)的值主要有  $\exp(-bd)$  确定,即上述  $bd$  越小,该函数也就越大,就太湖而言,太湖西北部及其北部弯区,  $bd$  相对较大,造成上述区域散射较强,因而垂直入射的传输行程相对较小,而在东太湖、胥口湾等东南部的传输行程相对较大.

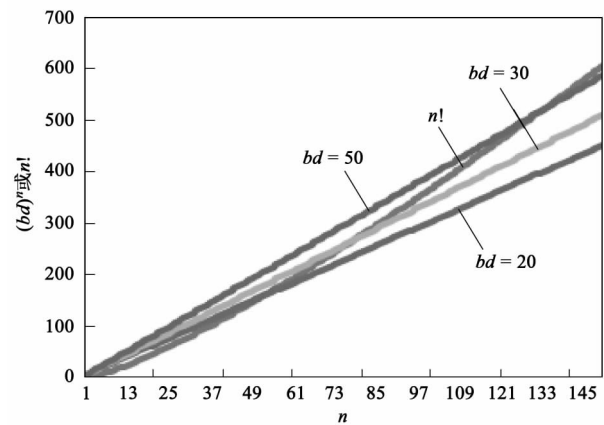


图 8 介质散射分布概率函数特征

Fig. 8 Characteristics of probability distribution function

#### 4 结论

(1)垂直入射的辐射沿入射方向的平均传输行程在贡湖湾的北部、竺山湾、梅梁湾及大太湖的西北部不超过 50 cm,在东西太湖在内的太湖东南部不超过 1.8 m,中间有明显的过渡带.

(2)积分平均余弦在太湖的西北部较小,东南部相对较大,说明太湖西北部水下光场的漫射比例较高,而东南部相对较小.

(3)垂直入射的辐射沿入射方向的平均传输行程、水柱的积分平均余弦与叶绿素 a、悬浮物浓度、有机悬浮物浓度及无机悬浮物浓度均呈非线性相关,其关系可用对数函数来描述.同时针对辐射在太湖水体中传输模拟而言,单次散射近似难以适用.

致谢:感谢王鑫硕士、冯胜博士采样期间给予的支持和帮助.

#### 参考文献:

- [1] Kirk J T O. Light and photosynthesis in aquatic ecosystem[M]. London: Cambridge University Press, 1994.
- [2] Kirk J T O. The upwelling light stream in natural waters[J]. Limnol Oceanogr, 1989, 34(8):1410-1425.
- [3] Kirk J T O. Radiation transfer in ocean water: Average penetration depth of a photon flux in a fixed time interval[J]. J Geophys Res, 2007, 112, doi:10. 1029/2006JC003500.
- [4] Van D E H S, Bloom G, Los J, et al. Modeling underwater light climate in relation to sedimentation, resuspension, water quality and autotrophic growth[J]. Hydrobiologia, 2001, 444:25-42.
- [5] 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.
- [6] 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, 12:1329-1339.
- [7] Lövested C B, Bengtsson L. The role of non-prevailing wind

- direction on suspension and redistribution of sediments in a shallow lake[J]. *Aquatic Sciences*, 2008, **70**:304-313
- [ 8 ] 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.
- [ 9 ] 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.
- [10] Gordon H R, McCluney W R. Estimation of depth of sunlight penetration in the sea for remote sensing[J]. *Appl Opt*,1975, **14**(2): 413-416.
- [11] 张运林,秦伯强,朱广伟,等. 长江中下游浅水湖泊沉积物再悬浮对水下光场的影响研究——以龙感湖和太湖为例[J]. *中国科学(D辑)地球科学*,2005,(增刊II). 101-110.
- [12] Smith R C, Baker K S. Optical properties of the clearest natural waters (200-800nm)[J]. *Appl Opt*, 1981, **20**: 177-184.
- [13] Kirk. Multiple scattering of a photon flux: implications for the integral average cosine of the underwater light field [J]. *Appl Opt*,1999, **28**(15):3134-3140.
- [14] Kirk J T O. Volume scattering function, average cosines, and the underwater light field[J]. *Limnol Oceanogr*, 1991, **36**:455-467.
- [15] Kirk J T O. Monte Carlo study of the nature of the underwater light field in, and the relationships between optical properties of, turbid yellow waters[J]. *Aust J Mar Freshwater Res*, 1981, **32**: 517-532.
- [16] 赵巧华, 宋玉芝. 水体中介质多次散射对向上漫射散射系数, 上、下行漫射吸收系数影响的数值研究[J]. *遥感学报*,2009, **13**(5):771-778.
- [17] 秦伯强,胡维平,陈伟民,等. 太湖水环境演化过程与机理[M]. 北京:科学出版社,2004. 107-124.
- [18] 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关系模型[J]. *环境科学*,2007, **28**(12):2688-2694.
- [19] 曹文熙,杨耀忠,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.