

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第5期

Vol.35 No.5

2014

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

长三角地区秸秆燃烧排放因子与颗粒物成分谱研究	唐喜斌, 黄成, 楼晟荣, 乔利平, 王红丽, 周敏, 陈明华, 陈长虹, 王倩, 李贵玲, 李莉, 黄海英, 张钢锋 (1623)
南京市大气颗粒物中水溶性离子的粒径分布和来源解析	薛国强, 朱彬, 王红磊 (1633)
2011年春季沙尘天气影响下上海大气颗粒物及其化学组分的变化特征	李贵玲, 周敏, 陈长虹, 王红丽, 王倩, 楼晟荣, 乔利平, 唐喜斌, 李莉, 黄海英, 陈明华, 黄成, 张钢锋 (1644)
结合外场观测分析珠三角二次有机气溶胶的数值模拟	郭晓霜, 司徒淑婷, 王雪梅, 丁翔, 王新明, 闫才青, 李小滢, 郑玫 (1654)
2013年夏季嘉兴市一次光化学事件的观测分析	沈利娟, 李莉, 吕升, 张孝寒, 吴博, 章国骏, 王翥 (1662)
移动监测法测量厦门春秋季节近地面 CO ₂ 的时空分布	李燕丽, 邢振雨, 穆超, 杜可 (1671)
秸秆烟尘和灰烬中元素碳的稳定同位素组成	刘刚, 李久海, 徐慧, 吴丹, 刘艳 (1680)
连续测量大气·OH的化学电离飞行时间质谱仪的研制	窦健, 花磊, 侯可勇, 蒋蕾, 谢园园, 赵无垠, 陈平, 王卫国, 田地, 李海洋 (1688)
我国重点城市水源及水厂出水中乙草胺的残留水平	于志勇, 金芬, 李红岩, 安伟, 杨敏 (1694)
巢湖水体组分垂向分布特征及其对水下光场的影响	马孟泉, 张玉超, 钱新, 马荣华, 段洪涛 (1698)
京杭大运河(杭州段)典型断面水生植物多样性调查及其与水环境相关性研究	陆胤, 许晓路, 张德勇, 王莉, 朱旭妮, 冯凤, 周巧君, 谢鹏 (1708)
合肥市典型景观水体氮磷污染特征及富营养化评价	李如忠, 刘科峰, 钱靖, 杨继伟, 张翩翩 (1718)
重庆园博园龙景湖新建初期内源氮磷分布特征及扩散通量估算	潘延安, 雷沛, 张洪, 单保庆, 李杰 (1727)
千岛湖库区及其主要入库河流水中有机氯农药残留污染特征及健康风险评价	唐访良, 张明, 徐建芬, 阮东德, 陈峰, 吴志旭, 程新良 (1735)
九龙江流域潜在病原菌污染分析	侯丽媛, 胡安谊, 马英, 于昌平 (1742)
江湖关系变化对鄱阳湖沉积物重金属分布及生态风险影响	刘婉清, 倪兆奎, 吴志强, 王圣瑞, 曾清如 (1750)
鄱阳湖-乐安河湿地水土环境中重金属污染的时空分布特征	简敏菲, 李玲玉, 徐鹏飞, 陈朴青, 熊建秋, 周雪玲 (1759)
典型岩溶水系统中溶解性有机质的运移特征	姚昕, 邹胜章, 夏日元, 许丹丹, 姚敏 (1766)
基于扰动分析方法的 AnnAGNPS 模型水文水质参数敏感性分析	席庆, 李兆富, 罗川 (1773)
混合胁迫条件下蓝藻运动特性研究	孙秀秀, 丛海兵, 高郑娟, 崔朝杰, 曹倩倩 (1781)
不同波长和强度光照对水体汞还原的影响	李希嘉, 钟紫旋, 孙荣国, 杨鲲, 王定勇 (1788)
地下水中常见离子对纳米零价铁除 Se(IV) 动力学的影响	杨文君, 郭迎庆, 杜尔登 (1793)
溴氧化铋可见光催化降解高效氯氟酯的研究	彭一莱, 赵小蓉, 贾漫珂, 周薇, 黄应平 (1798)
石墨烯基磁性复合材料吸附水中亚甲基蓝的研究	常青, 江国栋, 胡梦璇, 黄佳, 唐和清 (1804)
电化学氧化 PFOA 阳极材料筛选及其机制研究	卓琼芳, 邓述波, 许振成, 余刚 (1810)
典型抗生素在中国西南地区某污水处理厂中的行为和归趋	甘秀梅, 严清, 高旭, 张怡昕, 訾成方, 彭绪亚, 郭劲松 (1817)
颗粒状大孔阴树脂去除有机物以及缓解膜污染的效果与机制	何欢, 董秉直, 许光红, 闫昭辉 (1824)
石墨-活性炭纤维复合电极电吸附处理含盐废水的研究	周贵忠, 王兆丰, 王珣, 李文倩, 李少香 (1832)
酞基甲基化聚苯乙烯的制备及废水生化处理应用	张华雨, 许晴, 牛春梅, 王亚君, 侯正浩, 李绍英, 陈延明, 廉静, 吴士彬, 郭建博 (1838)
FePMo ₁₂ 催化电化学反应降解染料废水的研究	王栗, 岳琳, 郭建博, 杨景亮, 廉静, 罗晓, 王开红 (1843)
实际污水培养好氧颗粒污泥及其特性研究	杨淑芳, 张健君, 邹高龙, 杜至力 (1850)
SFBR 中好氧颗粒污泥的培养及特性研究	龙焙, 杨昌柱, 濮文虹, 杨家宽, 白俊, 王晶, 周玄月, 蒋国盛, 李春阳, 刘福标 (1857)
不同好/厌氧区容积负荷对生物膜/颗粒污泥耦合工艺脱氮除磷的影响	尹航, 刘畅, 高辉, 高大文 (1866)
黄原酸化废弃污泥吸附 Cu ²⁺ 研究	岑艳, 全向春, 姜晓满 (1871)
轮叶黑藻和穗花狐尾藻对铜的吸收机制研究	薛培英, 李国新, 赵全利 (1878)
不同烧制温度下玉米秸秆生物炭的性质及对苯的吸附性能	黄华, 王雅雄, 唐景春, 朱文英 (1884)
北京常见绿化树种叶片富集重金属能力研究	李少宁, 孔令伟, 鲁绍伟, 陈波, 高琛, 石媛 (1891)
泰州市区重金属污染的薛袋法与路生法评价研究	陈勤, 方炎明, 颜赞, 陈步金 (1901)
放牧对呼伦贝尔草甸草原土壤呼吸温度敏感性的影响	王旭, 闫瑞瑞, 邓钰, 闫玉春, 辛晓平 (1909)
苹果园土壤呼吸的变化及生物和非生物因素的影响	王蕊, 郭胜利, 刘庆芳, 张彦军, 姜继超, 郭慧敏, 李如剑 (1915)
重庆铁山坪森林土壤汞释放通量的影响因子研究	王琼, 罗遥, 杜宝玉, 叶芝祥, 段雷 (1922)
上海市郊区养殖场周边环境砷含量特征	奚功芳, 周守标, 丁海城, 姚春霞, 孔娟娟 (1928)
不同施氮量下水稻分蘖期光合碳向土壤碳库的输入及其分配的量化研究: ¹³ C 连续标记法	谭立敏, 吴昊, 李卉, 周萍, 李科林, 王久荣, 葛体达, 袁红朝, 吴金水 (1933)
污灌区盐分累积对土壤汞吸附行为影响的模拟研究	郑顺安, 李晓华, 徐志宇 (1939)
石灰干化污泥稳定后土壤中 Pb、Cd 和 Zn 浸出行为的研究	李翔, 宋云, 刘永兵 (1946)
大连市海产品中短链氯化石蜡的含量与分布研究	虞俊超, 王宝盛, 王亚韩, 孟梅, 陈茹, 江桂斌 (1955)
应用生物配体模型(BLM)研究辽河与太湖水体中铜对大型溞的急性毒性	周腾耀, 曹莹, 覃璐玫, 张亚辉, 曾鸿鸣, 闫振广, 刘征涛 (1962)
氧化铜纳米颗粒对水稻幼苗根系代谢毒性的研究	王淑玲, 张玉喜, 刘汉柱, 辛华 (1968)
吐温 80 对苏云金芽孢杆菌降解三苯基锡的促进机制	黄捷, 叶锦韶, 尹华, 彭辉, 马嘉雯, 唐立椿, 王惜若 (1974)
牛粪混合液微生物燃料电池长期运行稳定性研究	焦燕, 张国栋, 赵庆良 (1981)
针铁矿对城市生活垃圾有机组分厌氧发酵的影响	杨露露, 岳正波, 陈天虎, 王进 (1988)
城市生活垃圾集装箱转运过程中污染物产生状况研究	王晓媛, 刘殷华, 汪飞, 黄长缨, 陆峰, 谢冰 (1994)
铈插层黏土负载铁催化剂在 H ₂ S 选择性催化氧化过程中催化性能的研究	孙超, 张鑫, 郝郑平, 窦广玉, 孙春宝 (2002)
脱硫酸类水滑石衍生复合氧化物不同方法的制备与表征	祝春蕾, 王海林, 孙春宝 (2010)
固定污染源排气中 PM _{2.5} 采样方法综述	蒋靖坤, 邓建国, 李振, 李兴华, 段雷, 郝吉明 (2018)
产甲烷微生物研究概况	李煜珊, 李耀明, 欧阳志云 (2025)
《环境科学》征稿简则(1961) 《环境科学》征订启事(1967) 信息(1643, 1687, 1803, 1837)	

巢湖水体组分垂向分布特征及其对水下光场的影响

马孟泉¹, 张玉超^{2*}, 钱新^{1*}, 马荣华², 段洪涛²

(1. 南京大学环境学院, 污染控制与资源化研究国家重点实验室, 南京 210023; 2. 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 湖泊与环境国家重点实验室, 南京 210008)

摘要: 富营养化湖泊不同组分垂向分布及其对水下光场的影响是湖泊水环境遥感领域亟待开展的内容. 利用巢湖野外实测数据, 分析水体不同组分垂向分布特征, 结合 Hydrolight 辐射传输模型模拟研究水体不同组分垂向分布对漫衰减系数 K_d 的影响. 结果表明, 巢湖水体悬浮物以及有色可溶性有机物 CDOM 垂向分布较为均一, 水面未发生藻华现象时叶绿素 a 垂向分布符合高斯正态分布, 漫衰减系数 K_d 受叶绿素 a 以及无机悬浮物的显著影响, 其垂向变化复杂多样, 以往以水体光学性质均一为前提计算得到的 K_d 仅仅表示其衰减的平均情况, 不能精确反映水下光场的垂向变化, 因此研究水体组分垂向分布特征及其对漫衰减系数 K_d 的影响是开展藻类垂向分布异质性对水下光场影响机制研究的前提和基础.

关键词: 漫衰减系数; 叶绿素 a; 无机悬浮物; 垂向分布; 巢湖

中图分类号: X122; X52 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)05-1698-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.2014.05.010

Vertical Distribution of Water Quality and Its Influence on Underwater Light Field in Lake Chaohu

MA Meng-xiao¹, ZHANG Yu-chao², QIAN Xin¹, MA Rong-hua², DUAN Hong-tao²

(1. State Key Laboratory of Pollution Control and Resources Reuse, School of the Environment, Nanjing University, Nanjing 210023, China; 2. State Key Laboratory of Lake Science and Environment, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

Abstract: There are few reports on the vertical distribution of water quality and its influence on underwater light field. In our study, we analyzed the vertical distribution of water quality based on the *in situ* data in Lake Chaohu, and studied their influence on diffuse attenuation coefficients of downwelling irradiance K_d via Hydrolight simulation. It was indicated that the suspended matter and colored dissolved organic matter (CDOM) were relatively vertical-uniform in Lake Chaohu; excluding algae scums at the surface, the vertical profiles of chlorophyll-a conformed to Gaussian distribution; the complex K_d in vertical was affected by chlorophyll-a and inorganic suspended matter. The analysis on vertical distributions of water quality and its influence on K_d could be the basis for further studying the influence of algae vertical heterogeneity on underwater light field in Case II waters.

Key words: diffuse attenuation coefficients; chlorophyll-a; inorganic suspended matter; vertical heterogeneity; Lake Chaohu

漫衰减系数 K_d 是水体重要的表观光学属性, 是下行辐照度 E_d 随深度增加而减少的部分与 E_d 的比值^[1], 反映光线进入水体以后的衰减变化, 影响水体的透明度和真光层深度, 是决定水下光场分布结构的重要影响因素, 主要受到水体不同组分(纯水、有色可溶性有机物 CDOM、藻类颗粒物、非藻类颗粒物)吸收、散射的影响^[2], 很多学者是在忽略 K_d 垂向变化的前提下求出 K_d , 得到的其实是漫衰减系数的平均值, 无法体现其垂向变化. 为反映水下光场衰减的垂向变化情况, 必须对 K_d 垂向分布及水体不同组分垂向分布对其造成的影响进行研究, 基于不同组分垂向分布的前提下分析 K_d 与不同组分间的相关关系. 在水体组分垂向分布方面很多学者研究了不同水体藻类垂向分布的影响因素、成因、变化规律^[3~5] 及其垂向分布对于水体表观光学属性的影响, 且对于水体表观光学属性的影响基本是针对大洋一类水

体^[6~9]. 但对于内陆富营养化湖泊而言, 水体不同组分的垂向分布特征(尤其是叶绿素 a 垂向分布)及其对 K_d 垂向分布的影响方面还没有相关的研究, 因此, 研究内陆富营养化湖泊水体组分垂向分布特征及其对漫衰减系数 K_d 垂向分布的影响对于研究湖泊水体水下光场以及生态环境具有重要的意义.

本文以巢湖为研究区域, 基于野外垂向采样实测数据, 分析巢湖水体组分垂向分布特征, 并利用 Hydrolight 辐射传输模型模拟得到漫衰减系数 K_d 垂

收稿日期: 2013-09-10; 修订日期: 2013-11-27

基金项目: 国家自然科学基金项目(41101316, 41171271, 41171273); 国家高技术研究发展计划(863)项目(2014AA06A509); 中国科学院南京地理与湖泊研究所“一三五”战略发展规划重点项目(NIGLAS2012135010)

作者简介: 马孟泉(1988~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为湖泊环境遥感, E-mail: mmmxlb369@163.com

* 通讯联系人, E-mail: yczhang@niglas.ac.cn; xqian@nju.edu.cn

向分布,分析讨论水体不同组分垂向分布对 K_d 的影响,以期为进一步研究水体组分垂向分布对水下光场的影响服务。

1 数据与方法

1.1 野外数据采集

巢湖是我国第四大淡水湖,位于安徽省中部,东经 $117^{\circ}16'54'' \sim 117^{\circ}51'46''$,北纬 $31^{\circ}25'28'' \sim 31^{\circ}43'28''$,湖水面积约 770 km^2 ,平均水深 2.69 m ,是我国典型的内陆富营养化湖泊^[10]。2013 年 5 月 28 日对巢湖 9 个样点(图 1)进行了观测和垂向采样,采样时间为 09:00 ~ 16:30,测量时天空晴朗,无风或者微风,平均风速在 $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以下,风向为东南风或者南风,现场测量每个点位的遥感反射比、水深、透明度、风速、风向等,垂向采集水深为 0、0.1、0.2、0.4、0.7、1.0、1.5、2.0、3.0 m 的水样,采用萃取和分光光度计法测定叶绿素 a 浓度,采样后先用 $1.2 \text{ }\mu\text{m}$ 的 GF/C 膜过滤水样,使用反复冻融法对藻类细胞进行破碎,再用 90% 丙酮溶液提取叶绿素,离心机(TG16-WS)离心后,用分光光度计(UV-2600)分别在 630、645、663、750 nm 波长处测定叶绿素吸光度,进而求出叶绿素 a 浓度^[11];采用烘干称重法测定悬浮物浓度,使用 $0.7 \text{ }\mu\text{m}$ 的 GF/F 滤膜过滤水样,滤膜在烘箱 105° 条件下烘 4 ~ 6 h 后称重得到的重量减去滤膜原重测得总悬浮物(TSM)浓度,马弗炉 450° 条件下烧 4 ~ 6 h 后称重得到的重量减去滤膜原重测得无机悬浮物(ISM)浓度,总悬浮物浓度减去无机悬浮物浓度即为有机悬浮物(OSM)浓度;总颗粒物、非色素颗粒物的吸收系数采用定量滤膜技术测定,用直径 47 mm 的 GF/F 滤膜过滤水样,采用分光光度计测定滤膜上的总颗粒物吸光度,以空白滤膜做参比,进而得到总颗粒物吸收系数 a_p ,利用 NaClO_3 对滤膜上的总悬浮颗粒物进行漂白,测定非色素颗粒物吸收系数 a_d ^[12],浮游植物色素吸收系数 a_{ph} 即为 a_p 与 a_d 的差值;有色可溶性有机物(CDOM)吸收系数的测定是采用 $0.22 \text{ }\mu\text{m}$ 的 Millipore 滤膜过滤已经过滤过总悬浮颗粒物的水样,得到的滤液采用分光光度计测得 CDOM 的吸光度,进而得到其在 440 nm 处的吸收系数 a_g ^[13]。利用 Trios 水下光谱仪测量不同深度处下行辐照度(E_d)、上行辐照度(E_u)以及上行辐亮度(L_u),测量深度对应水样采集深度,实际中根据不同样点的水深大小,水样采集和光谱测量选取的深度最大值有适当的调整。

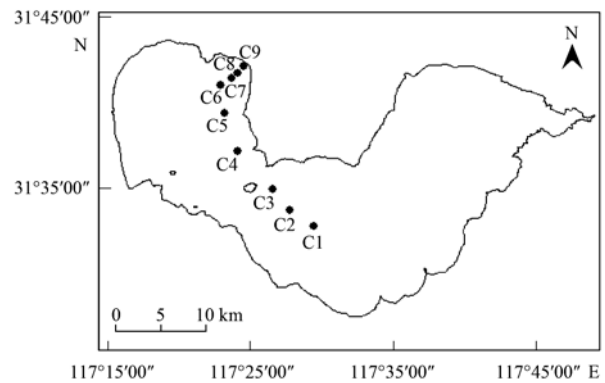


图 1 巢湖采样点位分布示意

Fig. 1 Distribution of sampling sites in Lake Chaohu

1.2 研究方法

1.2.1 巢湖水体藻类垂向分布

许多学者选用高斯模型近似模拟水体藻类(叶绿素 a 浓度)的垂向分布^[7,14,15]:

$$c_z = c_0 + \frac{h}{\sigma \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{z - z_{\max}}{\sigma}\right)^2\right]$$

式中, c_0 为叶绿素背景浓度值, $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$; $z_{\max}$ 为藻类浓度最大值对应的深度, m; σ 是标准偏差, 决定最大值宽度的参数, m; h 是决定藻类浓度最大值的参数, $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

根据实测的巢湖水体叶绿素 a 垂向数据,选用高斯模型进行拟合,分析藻类垂向分布。

1.2.2 漫衰减系数 K_d 垂向分布

求算漫衰减系数 K_d 时,大多数学者是以水体光学性质均一,下行辐照度 E_d 随水深呈指数衰减为前提,通过对不同深度处的下行辐照度进行指数回归得到^[1,16~18]。

$$K_d(\lambda) = -\frac{\ln E_d(\lambda, z) - \ln E_d(\lambda, z_c)}{z - z_c}$$

式中, $K_d(\lambda)$ 为波长 λ 处的漫衰减系数, m^{-1} ; z_c 为参考水层深度, m; z 为水深, m; $E_d(\lambda, z_c)$ 、 $E_d(\lambda, z)$ 分别为参考水层 z_c 和水深 z 处的下行辐照度, $\text{W} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{nm})^{-1}$ 。

这种方法计算得到的 K_d 反映的仅仅是水深 $z_c \sim z$ 处的平均衰减情况^[19,20],光线进入水体以后,受水体不同组分吸收、散射的影响不断地衰减,漫衰减系数 K_d 与水体中浮游植物、悬浮颗粒物以及 CDOM 的浓度密切相关^[2,21,22],这些组分垂向分布对 K_d 垂向分布的影响亟待研究。

许多学者曾利用 Hydrolight 模型模拟漫衰减系数 K_d 的垂向分布^[20,23],因此本研究基于巢湖野外实测数据,选用 Hydrolight 模型模拟得到不同波段处的

漫衰减系数 K_d 垂向分布. Hydrolight 是基于文献[1]编写的辐射传输模型. 它根据不同的输入数据和相应的算法模型模拟所需要的水体辐射传输方程、各种水体光学参数以及光场分布等一系列的光学特性. 本研究利用 Hydrolight 辐射传输模型, 选择适合内陆湖泊二类水体的四组分 ABCASE2 模型(即纯水、藻类颗粒物、非藻类颗粒物、CDOM), 对各水体组分固有光学参数如各组分的单位吸收、单位散射系数、散射相函数以及浓度进行设定, 对环境因子(水-气界面状况、天空状况、底质边界条件等)进行量化设定. 利用该模型模拟得到 K_d 垂向分布, 进而分析叶绿素 a 垂向分布对于 K_d 垂向变化的影响.

根据巢湖 9 个点位的野外实测数据, 在 Hydrolight 模型中分别输入叶绿素 a、无机悬浮物、CDOM 垂向分布数据(CDOM 浓度以 440 nm 处的吸收系数表征)以及各个点位的风速、太阳天顶角等, 固有光学属性参数的设置参照文献[24], 设定水深 0~3 m, 间隔 0.1 m, 模拟得到 400~800 nm 波段范围内的 K_d 垂向分布.

2 结果与分析

2.1 巢湖水体不同组分垂向分布情况

巢湖 9 个采样点垂向采样的室内实验结果整理如表1所示, 从中可以看出, 巢湖水体不同组分中,

表 1 巢湖不同样点水质参数统计

Table 1 Statistics of water quality parameters in Lake Chaohu							
样点	项目	叶绿素 a / $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	总悬浮物 / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	无机悬浮物 / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	有机悬浮物 / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	$a_g(440)$ / m^{-1}	风速, 风向
C1 (N=9)	max	26.00	43.00	33.00	12.00	0.81	3.1 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ SE
	min	8.79	32.00	26.00	3.00	0.37	
	mean	19.14	38.11	29.22	8.89	0.49	
	stdev	7.13	3.52	2.22	3.10	0.14	
C2 (N=9)	max	176.66	44.00	29.00	22.00	0.80	1.4 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ SE
	min	7.73	27.00	18.00	7.00	0.43	
	mean	41.92	34.22	23.44	10.78	0.52	
	stdev	54.96	5.14	3.84	4.52	0.11	
C3 (N=9)	max	169.43	85.00	38.00	62.00	1.77	0.5 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ SE
	min	7.63	28.00	7.00	5.00	0.85	
	mean	38.94	44.22	24.67	19.56	1.28	
	stdev	52.15	16.64	9.17	17.04	0.35	
C4 (N=9)	max	55.81	91.67	53.00	53.33	0.97	1.8 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ SE
	min	16.15	37.00	10.00	2.00	0.61	
	mean	33.82	62.19	36.04	26.15	0.79	
	stdev	14.85	19.48	12.05	17.21	0.11	
C5 (N=9)	max	29.86	87.14	77.14	60.00	0.98	<1.0 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
	min	17.11	50.00	22.86	8.57	0.45	
	mean	21.17	70.00	43.18	26.83	0.71	
	stdev	3.98	14.12	18.18	16.88	0.19	
C6 (N=8)	max	42.63	81.43	62.86	27.14	1.13	<1.0 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
	min	24.22	44.29	17.14	8.57	0.48	
	mean	31.51	65.36	45.36	20.00	0.72	
	stdev	7.36	15.29	18.58	7.08	0.21	
C7 (N=8)	max	218.40	93.00	81.43	67.14	1.01	1.7 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ S
	min	18.75	65.71	25.71	8.57	0.50	
	mean	71.78	82.57	52.27	30.30	0.77	
	stdev	71.39	9.74	19.54	22.36	0.16	
C8 (N=8)	max	183.40	104.29	90.00	60.00	2.48	1.3 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ E
	min	36.54	57.00	19.00	14.29	0.95	
	mean	74.81	78.07	48.57	29.50	1.34	
	stdev	48.28	17.47	24.98	14.88	0.48	
C9 (N=7)	max	257.65	84.00	47.00	67.00	1.90	<1.0 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
	min	58.99	41.00	13.00	9.00	0.94	
	mean	116.52	61.00	25.86	35.14	1.39	
	stdev	68.33	16.37	12.09	19.61	0.32	

叶绿素 a 浓度范围在 $7.63 \sim 257.65 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, 总悬浮物浓度范围为 $27.00 \sim 104.29 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 其中无机悬浮物浓度 $7.00 \sim 90.00 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 有机悬浮物浓度 $2.00 \sim 67.14 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 有色可溶性有机物 CDOM 浓度以 440 nm 处吸收系数表征, 范围在 $0.37 \sim 2.48 \text{ m}^{-1}$. 垂向分布结构中, 叶绿素 a 垂向分布变化显

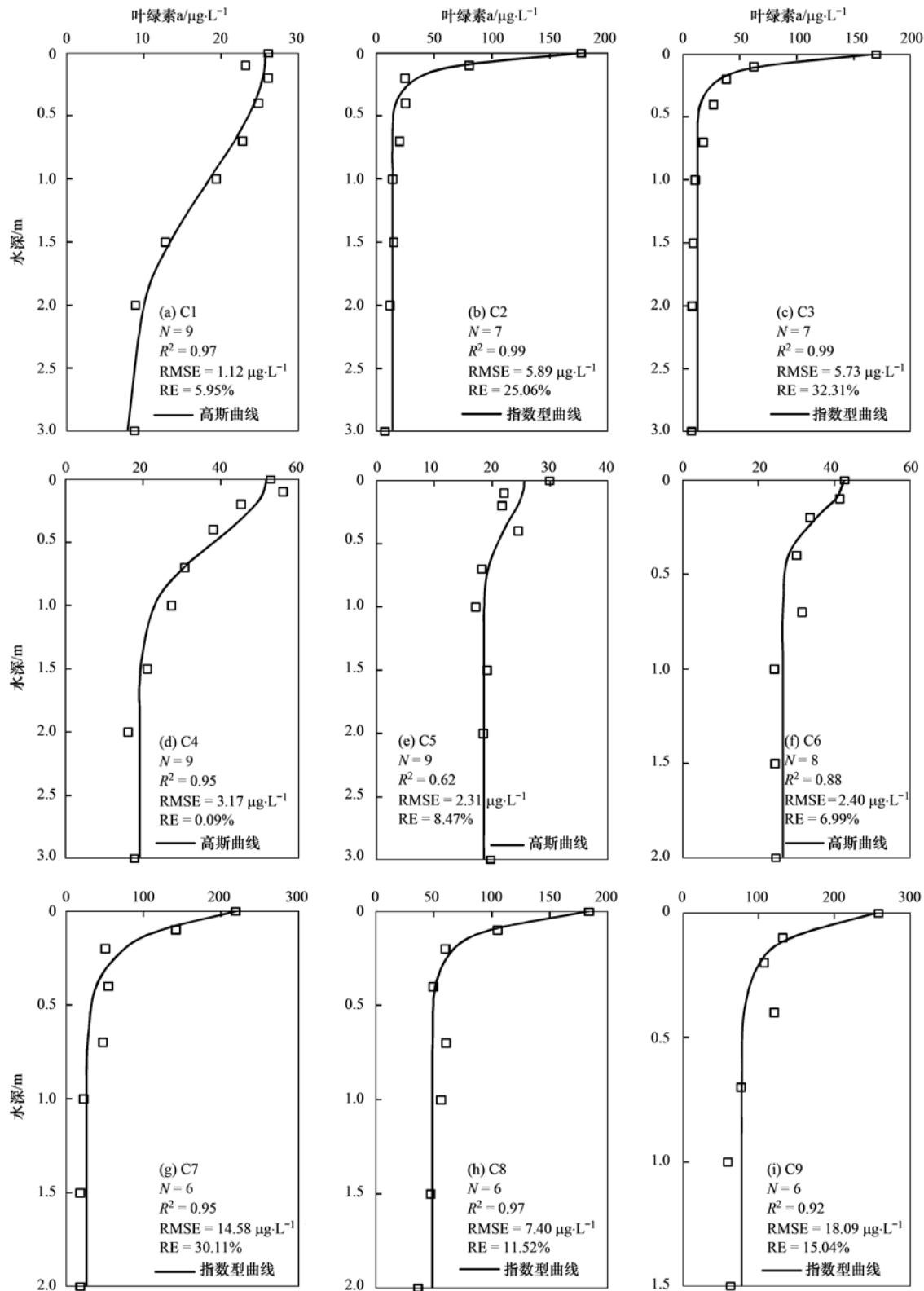


图2 叶绿素 a 浓度垂向分布曲线
Fig. 2 Vertical profiles of chlorophyll-a

著,标准偏差 stdev 范围在 3.98 ~ 71.39,与叶绿素 a 浓度的垂向不均一分布相比,总悬浮物、无机悬浮物、有机悬浮物以及 CDOM 的垂向变化较为均一,标准偏差范围分别为 3.52 ~ 17.47、2.22 ~ 24.98、3.10 ~ 22.36 以及 0.11 ~ 0.48. C1 点位处水体不同组分的垂向变化程度总体最小,这主要是因为 C1 处的风速最大,为 $3.1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,受波浪、风搅动作用,各组分在水体中上下混合,叶绿素 a 垂向分布趋于均一^[25,26],使得垂向变化较小,对于悬浮物以及 CDOM 而言,在风速较大或者微风甚至无风的条件下,其垂向分布均较为均一,可见风速对于悬浮物以及 CDOM 的影响较小. 而当风速较小、水文气象条件合适,水体表层以下的藻类开始上浮、聚集于水面,形成藻华^[27],C2、C3、C7、C8、C9 点位野外观测到有大量藻颗粒漂浮于水面,出现明显的藻华现象.

2.2 叶绿素 a 浓度垂向分布

针对实测的巢湖水体叶绿素 a 垂向数据,选用合适的函数进行拟合,见图 2. C2、C3、C7、C8、C9 点位野外观测到水面明显的藻华现象,其叶绿素 a 垂向分布符合指数型函数;排除暴发藻华现象的点位,其余点位叶绿素 a 垂向分布可以用高斯正态分布曲线拟合.

在定性分析基础上,采用均方根误差 (root mean square error, RMSE) 和相对误差 (relative error, RE) 对高斯模型的拟合精度进行评价.

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (d_{p,i} - d_{m,i})^2}{n}}$$

$$\text{RE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|d_{p,i} - d_{m,i}|}{d_{m,i}} \times 100\%$$

式中, $d_{p,i}$ 和 $d_{m,i}$ 分别表示第 i 个模拟值和实测值, n 为样点总数.

从图 2 中可以看出, C1、C2、C3、C4、C7、C8、C9 点位相关系数 R^2 均在 0.90 以上,均方根误差 RMSE 范围在 $1.12 \sim 18.09 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$,相对误差 RE 范围为 0.09% ~ 32.31%, C5 点位高斯正态分布曲线与实测叶绿素 a 垂向分布数据的相关系数 R^2 虽然较小,为 0.62,但其均方根误差 RMSE 以及相对误差 RE 均较小,分别为 $2.31 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 、8.47%; C6 点位的 R^2 是 0.88, RMSE 为 $2.40 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$, RE 为 6.99%. 可见,水面未出现藻华以及暴发藻华现象时,藻类的垂向分布分别符合高斯正态分布曲线以及指数型函数曲线.

与叶绿素 a 垂向分布相比,巢湖水体无机悬浮物垂向分布较为均一且分布无明显规律,随水深增加浓度不断波动.

2.3 漫衰减系数 K_d 垂向分布

利用模拟得到的巢湖 9 个点位的 K_d 垂向数据,求算出不同点位的平均漫衰减系数值 $\overline{K_d}$,得到平均漫衰减系数光谱特征曲线,如图 3. 从中可以看出,在蓝光波段,由于浮游植物色素在 440 nm 附近的特征吸收影响,光场衰减显著,漫衰减系数较大; 550 ~ 650 nm 波段范围内 K_d 无明显变化; 对于叶绿素 a 而言,其在 676 nm 附近处的特征吸收峰使得 K_d 在该波段处出现较小的峰值; 在 700 ~ 800 nm 波段范围内漫衰减系数 K_d 呈现出与纯水相似的光谱特征,并且在 750 nm 处出现明显的衰减峰值. 因此,本研究选取 440、550、676 以及 750 nm 为特征波段分析 K_d 的垂向变化.

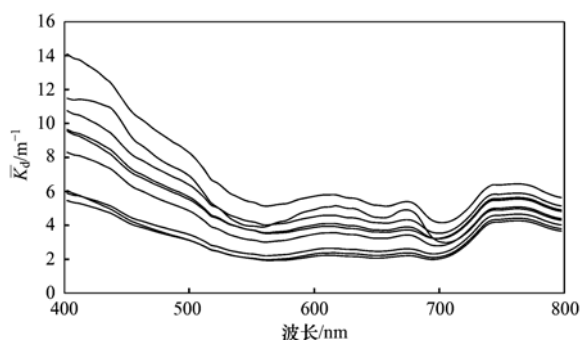


图 3 巢湖 9 个点位平均漫衰减系数光谱特征曲线

Fig. 3 Spectral curve of mean diffuse attenuation coefficient in Lake Chaohu

图 4 显示了巢湖 9 个采样点不同特征波段处漫衰减系数 K_d 的垂向分布. K_d 垂向分布的变化程度采用变异系数 (coefficient of variation, CV) 进行表示,9 个点位的 CV 范围为 7.68% ~ 32.30%,不同点位漫衰减系数 K_d 的垂向分布各不相同; C1 点位处, K_d 在不同波段处的平均变异系数 CV 仅为 7.68%,即其垂向变化不显著,随水深增加仅有较小幅度的波动,这与 C1 点位水体组分垂向变化程度最小相对应; C2、C6、C9 点位,在水面 0 ~ 0.1 m 水深范围内 K_d 随水深明显减小,之后垂向变化较为稳定; C3、C7、C8 点位, K_d 在近水面处先急剧减小,之后随水深增大 K_d 垂向上出现明显波动,其变异系数分别为 32.30%、28.07%、13.48%; C4、C5 点位在近水面处 K_d 垂向先逐渐增大,之后随水深出现不断波动,且在不同深度处出现衰减峰值和谷值. 对于不同波段而言, K_d 垂向变化类型相同,变化幅

度各有不同,440、550、676 以及 750 nm 波段处不同点位的平均变异系数 CV 分别为 22.19%、19.67%、20.85% 以及 10.32%,440 nm 处的 K_d 垂向变化最显著,这主要是由于 440 nm 波段处受到了浮游植物色素和非色素颗粒物共同的强吸收作用,550 nm 与 676 nm 波段处 K_d 垂向变化幅度相似,

750 nm 波段处 K_d 垂向变化最不显著,平均 CV 仅为 10.32%。可见,巢湖水体的漫衰减系数 K_d 垂向变化复杂多样,光线进入水体以后其垂向衰减变化并不均一,以水体光学特性均一为前提,求得的漫衰减系数值仅仅代表水下光场衰减变化的平均情况,不能精确反映其垂向变化。

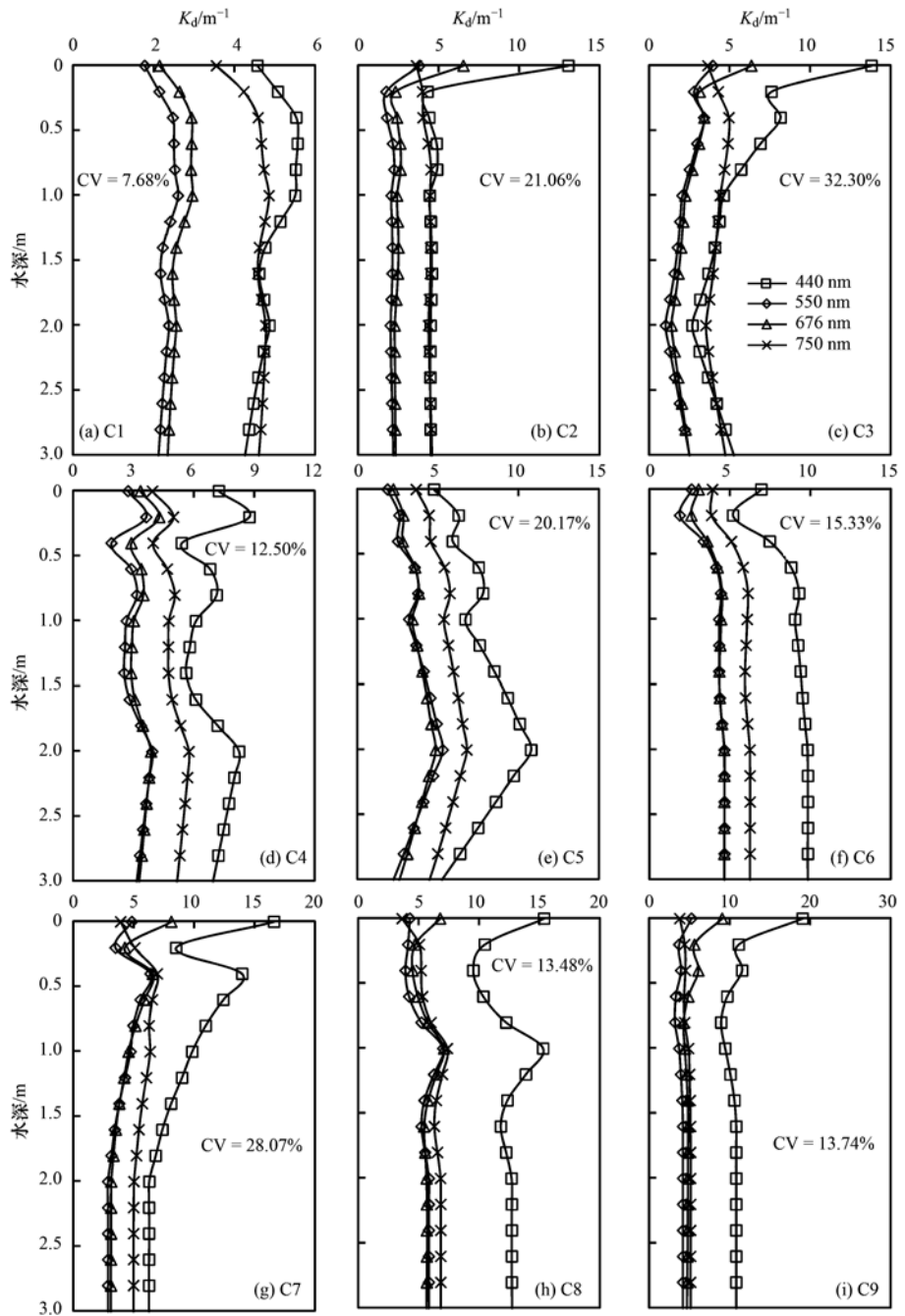


图 4 K_d 垂向分布曲线
Fig. 4 Vertical profiles of K_d

3 讨论

3.1 水体不同组分吸收、散射对 K_d 的影响

漫衰减系数 K_d 主要受到纯水、CDOM、色素颗粒物及非色素颗粒物的吸收和散射影响,水体不同组分对漫衰减系数 K_d 的影响不同,分别利

用色素颗粒物、非色素颗粒物、CDOM、纯水的吸收系数以及总吸收系数、总后向散射系数与漫衰减系数 K_d 的比值表示不同组分对 K_d 的贡献率,由于野外采样中没有测得后向散射系数 b_b 垂向分布数据,因此,利用联系水体固有光学特性与反射率的生物光学模型求算 b_b 。许多学者针对不同水体提出了许多辐照度比 R 与吸收系数 a 和后向散射系数 b_b 间的关系模型, Gordon 等^[28] 针对一类水体,认为 R 与 $b_b/(a+b_b)$ 之间有以下关系:

$$R = f \frac{b_b}{a + b_b}$$

$$R = \frac{E_u}{E_d}$$

式中, f 为受水体属性和光照条件影响的参数, E_u 、 E_d 分别为水体上行辐照度和下行辐照度, Dekker^[29] 通过对 19 个不同内陆水体的吸收和后向散射以及表观光学属性进行测量后,计算得到 f 值为 0.12 ~ 0.56, 平均值为 0.29, 并证实了该模型适用于二类水体。基于以上关系,利用 Trios 水下光谱仪野外实测得到的 E_u 、 E_d 数据以及室内实验得到的吸收数据,求得 b_b 垂向分布数据。

图 5 显示了纯水、CDOM、色素颗粒物及非色素颗粒物的吸收和总吸收系数、总后向散射系数在 440、550、676 以及 750 nm 特征波段处对 K_d 的贡献率随水深的变化。

如图所示,440 nm 和 750 nm 波段处,总吸收系

数对 K_d 的平均贡献率分别为 62.76% 和 52.52%, 明显超过总后向散射系数对 K_d 的平均贡献率(分别为 23.20% 与 14.16%), 是影响 K_d 垂向分布的第一因素;而在 550 nm 和 676 nm 波长处,总后向散射系数对 K_d 的平均贡献率分别增长至 35.36% 和 23.72%, 相应的总吸收系数对 K_d 的平均贡献率分别为 42.50% 以及 34.30%, 与 440 和 750 nm 波段处相比,其贡献率略有下降。随水深增加,总后向散射系数与总吸收系数对 K_d 的贡献率逐渐接近,并在某些水深范围内对 K_d 的贡献率超过了总吸收系数对 K_d 的贡献。

对于水体不同组分的吸收系数而言,440 nm 波段处,非色素颗粒物吸收对漫衰减系数的贡献率最大,且随水深贡献率由 27.11% 增大为 63.29%;色素颗粒物吸收的贡献率次之,并且垂向上由 24.93% 减小至 4.06%;CDOM 吸收对 K_d 的贡献率相对较小且垂向变化很小,平均贡献率仅为 11.77%;纯水在该波段附近对 K_d 的贡献率接近于 0,几乎可以忽略。550 nm 波段处,非色素颗粒物、色素颗粒物吸收以及 CDOM 吸收对 K_d 贡献率均有所减小,平均贡献率相比于 440 nm 处分别由 38.18%、13.40%、11.77% 下降到 19.35%、11.38%、7.19%,纯水吸收的贡献率仍然很小,但相比于 440 nm 处的 0.09% 上升为 1.98%。676 nm 波段处,由于其他组分在该波段附近的弱吸收以及叶绿素 a 在该波段处的特征吸收,非色素颗粒物、CDOM 吸收对 K_d 的贡献率明显减小,平均贡献率仅

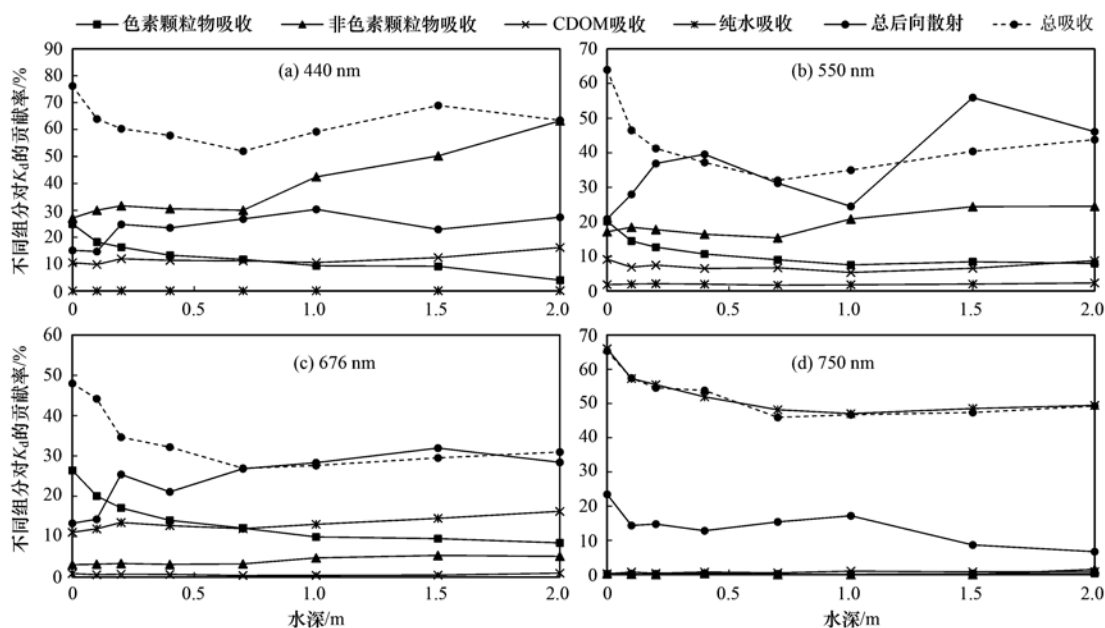


图 5 巢湖水体不同组分垂向分布对 K_d 垂向分布的贡献率

Fig. 5 Contribution of each component to K_d at different depth in Lake Chaohu

为 3.90% 和 0.63%, 色素颗粒物吸收对 K_d 的平均贡献率在 0~0.7 m 水深范围为 17.97%, 成为影响 K_d 垂向分布最主要吸收因素, 且其贡献率随水深增大呈近似指数形式下降, 纯水吸收对 K_d 的贡献明显增大, 平均贡献率达到 13.15%, 并且在 0.7~2.0 m 范围, 超过了色素颗粒物吸收对 K_d 的影响. 750 nm 波段处, 由于纯水在近红外波段的强烈吸收以及其他组分在该波段处的弱吸收, 总吸收系数基本是由纯水吸收系数构成, 纯水吸收成为 K_d 的第一贡献因素, 平均贡献率为 52.97%, 后向散射为第二贡献因素, 色素颗粒物、非色素颗粒物以及 CDOM 吸收对 K_d 的贡献可以忽略不计.

可见, 对于不同波段而言, 总吸收、总后向散射是影响 K_d 垂向分布的两大主要因素, 其中色素颗粒物吸收系数以及总吸收系数对 K_d 垂向分布的贡献率随水深增大逐渐减小, 非色素颗粒物吸收在 440 nm 处对 K_d 垂向分布的贡献率随水深增大逐渐增大, 其他波段处随水深变化较为均一.

3.2 叶绿素 a 与总吸收系数间的相关性分析

光进入到水体以后, 会受到水体不同组分的吸收影响造成光束衰减. 影响水体吸收的因素主要是 4 种: 纯水、浮游植物色素、非色素颗粒物以及 CDOM. 因此, 在给定波段处水体的总吸收系数 $a(\lambda)$ 可以表示为这 4 种因素的贡献之和^[22]:

$$a(\lambda) = a_w(\lambda) + a_{ph}(\lambda) + a_d(\lambda) + a_g(\lambda)$$

式中, $a_w(\lambda)$ 、 $a_{ph}(\lambda)$ 、 $a_d(\lambda)$ 、 $a_g(\lambda)$ 分别是纯水、浮游植物色素、非色素颗粒物和 CDOM 的吸收系数. 通过分析巢湖 9 个点位叶绿素 a 浓度垂向分布与不同波段总吸收系数 a 之间的相关关系, 得到 440、550、676 以及 750 nm 处, 其相关系数 R^2 分别为 0.515、0.403、0.810 以及 0.092. 676 nm 波段是叶绿素 a 特征吸收波段, 其与总吸收系数间的相关关系显著, 呈现出较高的相关系数 $R^2 = 0.810$, 说明在整个垂向水柱中, 676 nm 附近的总吸收主要受叶绿素 a 的影响, 非色素颗粒物、CDOM 以及纯水的吸收对总吸收的影响较小; 440 nm 波段附近的总吸收, 由于受到除叶绿素 a 以外其他色素成分的影响, 其相关系数 R^2 明显小于 676 nm 波段, 仅为 0.515. 其它波段处叶绿素 a 对总吸收系数的影响较小, 相关关系较弱.

3.3 漫衰减系数 K_d 与叶绿素 a、总悬浮物以及无机悬浮物间的相关性分析

由前面的分析可知, 总吸收与总后向散射是影响 K_d 垂向分布的两大主要因素, 其中叶绿素 a 与总

吸收系数在 676 nm 处有显著相关性, 而许多研究也表明巢湖水体后向散射系数主要受总悬浮物以及无机悬浮物的影响^[30~32]. 因此, 分别对 K_d 与叶绿素 a 浓度、总悬浮物浓度以及无机悬浮物浓度之间的相关关系进行研究, 见图 6. 其中仅选取 K_d 与不同组分间相关关系最好的情况进行说明, 从图 6 可以看出, K_d 与叶绿素 a 浓度在 676 nm 处的相关性最好, R^2 为 0.682, 这与叶绿素 a 在 676 nm 处的特征吸收相符合; K_d 与总悬浮物浓度相关性不显著, 相关系数 R^2 最大仅为 0.579; 而 K_d 与无机悬浮物浓度在 750 nm 处有显著相关性, 相关系数 $R^2 = 0.831$, 其在其余波段处的相关关系较差. 该结果与文献[17, 33, 34]在不考虑垂向变化时得到的 $\overline{K_d}$ 主要受总悬浮物尤其是无机悬浮物显著影响, 与叶绿素 a 浓度相关性较差(相关系数 R^2 分别仅为 0.177、0.2 以下、0.42)的结论存在差异, 可见在考虑水体组分垂向分布以及 K_d 垂向变化的情况下, 叶绿素 a 对 K_d

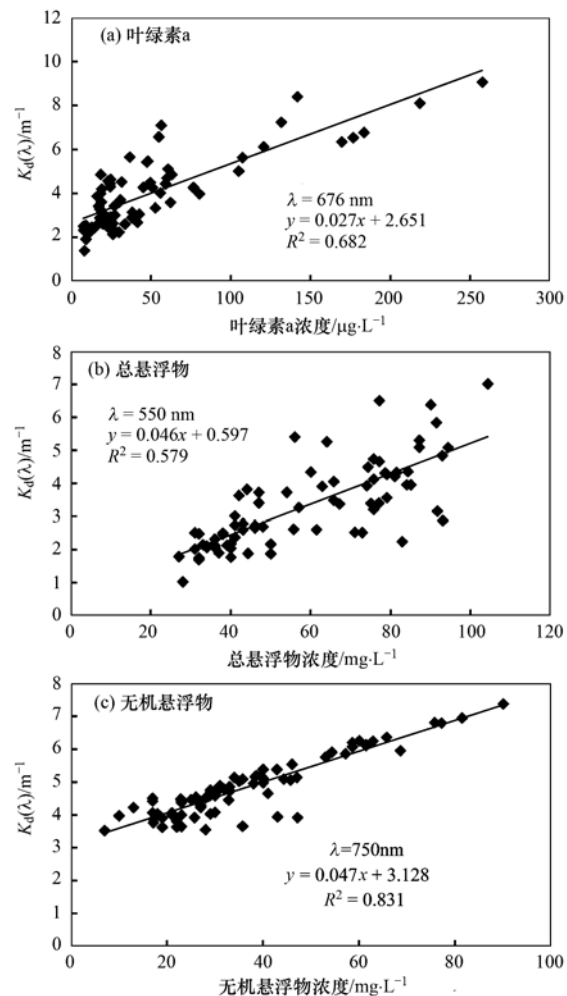


图 6 K_d 与不同组分浓度之间的相关性

Fig. 6 Correlation between K_d and different components

的影响增大,相关性提高。

为进一步研究 K_d 与叶绿素 a、悬浮物间的相关关系,对漫衰减系数 K_d 、叶绿素 a 浓度以及无机悬浮物浓度进行多元线性回归,结果如下:

$$K_d(440) = 1.197 + 0.064 \times c_{\text{chla}} + 0.112 \times c_{\text{ISM}} \\ (R^2 = 0.925; \text{RMSE} = 0.930 \text{ m}^{-1}; \text{RE} = 9.507\%)$$

$$K_d(550) = 0.414 + 0.016 \times c_{\text{chla}} + 0.061 \times c_{\text{ISM}} \\ (R^2 = 0.879; \text{RMSE} = 0.220 \text{ m}^{-1}; \text{RE} = 10.845\%)$$

$$K_d(676) = 0.756 + 0.030 \times c_{\text{chla}} + 0.049 \times c_{\text{ISM}} \\ (R^2 = 0.926; \text{RMSE} = 0.195 \text{ m}^{-1}; \text{RE} = 8.155\%)$$

$$K_d(750) = 3.215 - 0.001 \times c_{\text{chla}} + 0.047 \times c_{\text{ISM}} \\ (R^2 = 0.797; \text{RMSE} = 0.186 \text{ m}^{-1}; \text{RE} = 6.717\%)$$

式中, $K_d(440)$ 、 $K_d(550)$ 、 $K_d(676)$ 、 $K_d(750)$ 分别为 440、550、676、750 nm 处的漫衰减系数 (m^{-1}); c_{Chla} 为叶绿素 a 浓度 ($\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$); c_{ISM} 为无机悬浮物浓度 ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)。

可见,漫衰减系数 K_d 与叶绿素 a 浓度以及无机悬浮物浓度存在显著的相关性,尤其在叶绿素 a 特征吸收波段 676 nm 处的相关关系最好,相关系数 R^2 为 0.926,均方根误差 RMSE 以及相对误差 RE 分别仅为 0.195 $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 8.155%,观察每个回归函数中 c_{Chla} 以及 c_{ISM} 的系数,可以发现,无机悬浮物对 K_d 的影响超过叶绿素 a 对 K_d 的影响,尤其在 750 nm 处叶绿素 a 对 K_d 的影响很小,几乎可以忽略不计。因此对于巢湖富营养化浑浊湖泊而言,其水下光场衰减主要受到叶绿素 a 和无机悬浮物的共同影响,无机悬浮物影响超过叶绿素 a 的影响,并且在 750 nm 处主要是受无机悬浮物的显著影响。

4 结论

(1) 未出现藻华现象时,叶绿素 a 垂向符合高斯正态分布,水面出现藻华现象时,其垂向符合指数型分布;悬浮物以及有色可溶性有机物 CDOM 的垂向分布较为均一,且受风速影响不明显。

(2) 巢湖水体漫衰减系数 K_d 垂向分布类型复杂多样:有些点位 K_d 随水深先显著减小后变化稳定;某些点位 K_d 随水深先急剧减小,后垂向不断波动;还有些点位 K_d 随水深先增大,之后在不同水深处出现衰减峰值和谷值;当水体各组分垂向分布较为均一时, K_d 垂向变化相应较小。以水体光学性质均一为前提求算的漫衰减系数仅仅反映光场垂向衰减的平均情况($\overline{K_d}$),不能精确反映其垂向变化。

(3) 巢湖水体漫衰减系数 K_d 与叶绿素 a 浓度

以及无机悬浮物浓度具有显著相关性,水下光场衰减变化受叶绿素 a 和无机悬浮物的共同影响。

致谢:数据源来自湖泊-流域科学数据共享平台 (<http://lake.geodata.cn>),在此表示感谢。

参考文献:

- [1] Mobley C D. Light and water: radiative transfer in natural waters [M]. San Diego: Academic Press, 1994.
- [2] 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]. Australian Journal of Marine & Freshwater Research, 1981, **32**(4): 517-532.
- [3] Moreno-Ostos E, Cruz-Pizarro L, Basanta A, *et al.* The influence of wind-induced mixing on the vertical distribution of buoyant and sinking phytoplankton species[J]. Aquatic Ecology, 2009, **43**(2): 271-284.
- [4] Webster I T, Hutchinson P A. Effect of wind on the distribution of phytoplankton cells in lakes revisited [J]. Limnology and Oceanography, 1994, **39**(2): 365-373.
- [5] 朱永春,蔡启铭. 风场对藻类在太湖中迁移影响的动力学研究[J]. 湖泊科学, 1997, **9**(2): 152-158.
- [6] 曹文熙. 叶绿素垂直分布结构对离水辐亮度光谱特性的影响[J]. 海洋通报, 2000, **19**(3): 30-37.
- [7] 席颖,杜克平,张丽华,等. 叶绿素浓度垂直不均一分布对于分层水体表观光学特性的影响[J]. 光谱学与光谱分析, 2010, **30**(2): 489-494.
- [8] Gordon H R. Diffuse reflectance of the ocean: influence of nonuniform phytoplankton pigment profile[J]. Applied Optics, 1992, **31**(12): 2116-2129.
- [9] Xiu P, Liu Y, Tang J. Variations of ocean colour parameters with nonuniform vertical profiles of chlorophyll concentration [J]. International Journal of Remote Sensing, 2008, **29**(3): 831-849.
- [10] 王苏民,窦鸿身. 中国湖泊志[M]. 北京: 科学出版社, 1998.
- [11] 王建,王骥. 浮游植物叶绿素与脱镁叶绿素的测定方法[J]. 武汉植物学研究, 1984, **2**(2): 321-328.
- [12] 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.
- [13] Bricaud A, Morel A, Prieur L. Absorption by dissolved organic matter of the sea (yellow substance) in the UV and visible domains[J]. Limnology and Oceanography, 1981, **26**(1): 43-53.
- [14] Lewis M R, Cullen J J, Platt T. Phytoplankton and thermal structure in the upper ocean: consequences of nonuniformity in chlorophyll profile[J]. Journal of Geophysical Research, 1983, **88**(C4): 2565-2570.
- [15] Platt T, Sathyendranath S, Caverhill C M, *et al.* Ocean primary production and available light: further algorithms for remote sensing[J]. Deep Sea Research, 1988, **35**(6): 855-879.

- [16] Huovinen P S, Penttö H, Soimasuo M R. Spectral attenuation of solar ultraviolet radiation in humic lakes in Central Finland[J]. *Chemosphere*, 2003, **51**(3): 205-214.
- [17] 乐成峰, 李云梅, 查勇, 等. 太湖水体漫射衰减系数的光学特性及其遥感反演模型[J]. *应用生态学报*, 2009, **20**(2): 337-343.
- [18] 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[J]. *水科学进展*, 2003, **14**(4): 447-453.
- [19] Arst H, Reinart A, Erm A, *et al.* Influence of the depth-dependence of the PAR region diffuse attenuation coefficient on the computation results of the downward irradiance in different type of water bodies[J]. *Geophysica*, 2000, **36**(1-2): 129-139.
- [20] Lee Z P, Darecki M, Carder K L, *et al.* Diffuse attenuation coefficient of downwelling irradiance: an evaluation of remote sensing methods[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2005, **110**, C02017, doi: 10.1029/2004JC002573.
- [21] Gordon H R. Can the Lambert-Beer law be applied to the diffuse attenuation coefficient of ocean water? [J]. *Limnology and Oceanography*, 1989, **34**(8): 1389-1409.
- [22] Kirk J T O. *Light and photosynthesis in aquatic ecosystems*[M]. Britain: Cambridge University Press, 1994.
- [23] Liu C C, Carder K L, Miller R L, *et al.* Fast and accurate model of underwater scalar irradiance[J]. *Applied Optics*, 2002, **41**(24): 4962-4974.
- [24] 李云梅, 王桥, 黄家柱, 等. 太湖水体光学特性及水色遥感[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- [25] 杨清心. 太湖水华成因及控制途径初探[J]. *湖泊科学*, 1996, **8**(1): 67-74.
- [26] 高月香, 张永春. 水文气象因子对藻华爆发的影响[J]. *水科学与工程技术*, 2006, (2): 10-12.
- [27] 孔繁翔, 高光. 大型浅水富营养化湖泊中蓝藻水华形成机理的思考[J]. *生态学报*, 2005, **25**(3): 589-595.
- [28] Gordon H R, Brown O B, Jacobs M M. Computed relationships between the inherent and apparent optical properties of a flat homogeneous ocean[J]. *Applied Optics*, 1975, **14**(2): 417-427.
- [29] Dekker A G. Detection of optical water quality parameters for eutrophic waters by high resolution remote sensing [M]. Amsterdam: Vrije University, 1993.
- [30] 刘忠华, 李云梅, 吕恒, 等. 基于生物光学模型的巢湖后向散射概率估算[J]. *环境科学*, 2011, **32**(2): 464-471.
- [31] 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.
- [32] 孙德勇, 李云梅, 王桥, 等. 巢湖水体散射和后向散射特性研究[J]. *环境科学*, 2010, **31**(6): 1428-1434.
- [33] 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[J]. *海洋与湖沼*, 2004, **35**(3): 209-213.
- [34] 金鑫, 李云梅, 王桥, 等. 巢湖水体漫衰减系数特性及其影响因子分析[J]. *环境科学*, 2011, **32**(6): 1581-1590.

CONTENTS

Emission Factors and PM Chemical Composition Study of Biomass Burning in the Yangtze River Delta Region	TANG Xi-bin, HUANG Cheng, LOU Sheng-rong, <i>et al.</i> (1623)
Size Distributions and Source Apportionment of Soluble Ions in Aerosol in Nanjing	XUE Guo-qiang, ZHU Bin, WANG Hong-lei (1633)
Characteristics of Particulate Matters and Its Chemical Compositions During the Dust Episodes in Shanghai in Spring, 2011	LI Gui-ling, ZHOU Min, CHEN Chang-hong, <i>et al.</i> (1644)
Numerical Modeling Analysis of Secondary Organic Aerosol (SOA) Combined with the Ground-based Measurements in the Pearl River Delta Region	GUO Xiao-shuang, SITU Shu-ping, WANG Xue-mei, <i>et al.</i> (1654)
Observation of a Photochemical Event in Jiaying During Summer 2013	SHEN Li-juan, LI Li, LÜ Sheng, <i>et al.</i> (1662)
Spatial and Temporal Variations of Near Surface Atmospheric CO ₂ with Mobile Measurements in Fall and Spring in Xiamen, China	LI Yan-li, XING Zhen-yu, MU Chao, <i>et al.</i> (1671)
Isotope Compositions of Elemental Carbon in the Smoke and Ash from Crop Straw Combustion	LIU Gang, LI Jiu-hai, XU Hui, <i>et al.</i> (1680)
Development of a Chemical Ionization Time-of-Flight Mass Spectrometer for Continuous Measurements of Atmospheric Hydroxyl Radical	DOU Jian, HUA Lei, HOU Ke-yong, <i>et al.</i> (1688)
Residual Levels of Acetochlor in Source Water and Drinking Water of China's Major Cities	YU Zhi-yong, JIN Fen, LI Hong-yan, <i>et al.</i> (1694)
Vertical Distribution of Water Quality and Its Influence on Underwater Light Field in Lake Chaohu	MA Meng-xiao, ZHANG Yu-chao, QIAN Xin, <i>et al.</i> (1698)
Correlation Between Aquatic Plant Diversity and Water Environment in the Typical Sites of Hangzhou Section of the Beijing-Hangzhou Grand Canal	LU Yin, XU Xiao-lu, ZHANG De-yong, <i>et al.</i> (1708)
Nitrogen and Phosphate Pollution Characteristics and Eutrophication Evaluation for Typical Urban Landscape Waters in Hefei City	LI Ru-zhong, LIU Ke-feng, QIAN Jing, <i>et al.</i> (1718)
Distribution of Nitrogen and Phosphorus in the Sediments and Estimation of the Nutrients Fluxes in Longjing Lake, Chongqing City, During the Initial Impoundment Period	PAN Yan-an, LEI Pei, ZHANG Hong, <i>et al.</i> (1727)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Organochlorine Pesticides (OCPs) in the Water of Lake Qiandao and Its Major Input Rivers	TANG Fang-liang, ZHANG Ming, XU Jian-fen, <i>et al.</i> (1735)
Distribution of Potential Pathogenic Bacteria in the Jiulong River Watershed	HOU Li-yuan, HU An-yi, MA Ying, <i>et al.</i> (1742)
Influence of the River-lake Relation Change on the Distribution of Heavy Metal and Ecological Risk Assessment in the Surface Sediment of Poyang Lake	LIU Wan-qing, NI Zhao-kui, WU Zhi-qiang, <i>et al.</i> (1750)
Spatiotemporal Variation Characteristics of Heavy Metals Pollution in the Water, Soil and Sediments Environment of the Lean River-Poyang Lake Wetland	JIAN Min-fei, LI Ling-yu, XU Peng-fei, <i>et al.</i> (1759)
Dissolved Organic Matter (DOM) Dynamics in Karst Aquifer Systems	YAO Xin, ZOU Sheng-zhang, XIA Ri-yuan, <i>et al.</i> (1766)
Sensitivity Analysis of AnnAGNPS Model's Hydrology and Water Quality Parameters Based on the Perturbation Analysis Method	XI Qing, LI Zhao-fu, LUO Chuan (1773)
Movement Characteristics of <i>Cyanobacteria</i> Under Stress of Water-Lifting Aeration	SUN Xiu-xiu, CONG Hai-bing, GAO Zheng-juan, <i>et al.</i> (1781)
Influence of Light Wavelength and Intensity on the Reduction of Divalent Mercury in Aquatic System	LI Xi-jia, ZHONG Zi-xuan, SUN Rong-guo, <i>et al.</i> (1788)
Dynamic Effects of Commonly Co-Existing Anions on the Removal of Selenite from Groundwater by Nanoscale Zero-Valent Iron	YANG Wen-jun, GUO Ying-qing, DU Er-deng (1793)
BiOBr Promoted the Photocatalytic Degradation of Beta-cypermethrin Under Visible Light	PENG Yi-zhu, ZHAO Xiao-rong, JIA Man-ke, <i>et al.</i> (1798)
Adsorption of Methylene Blue from Aqueous Solution onto Magnetic Fe ₃ O ₄ /Graphene Oxide Nanoparticles	CHANG Qing, JIANG Guo-dong, HU Meng-xuan, <i>et al.</i> (1804)
Selection of Electrochemical Anodic Materials for PFOA Degradation and Its Mechanism	ZHUO Qiong-fang, DENG Shu-bo, XU Zhen-cheng, <i>et al.</i> (1810)
Occurrence and Fate of Typical Antibiotics in a Wastewater Treatment Plant in Southwest China	GAN Xiu-mei, YAN Qing, GAO Xu, <i>et al.</i> (1817)
Effects and Mechanism on Removing Organics and Reduction of Membrane Fouling Using Granular Macro-Porous Anion Exchange Resin in Drinking Water Treatment	HE Huan, DONG Bing-zhi, XU Guang-hong, <i>et al.</i> (1824)
Research on Treatment of High Salt Wastewater by the Graphite and Activated Carbon Fiber Composite Electrodes	ZHOU Gui-zhong, WANG Zhao-feng, WANG Xuan, <i>et al.</i> (1832)
Preparation and Application of the Quinonyl Chloromethylation Polystyrene in Biological Treatment of Wastewater	ZHANG Hua-yu, XU Qing, NIU Chun-mei, <i>et al.</i> (1838)
Enhanced Electro-Catalytic Oxidation of Dye Wastewater with FeMo ₁₂ Adopted Catalyst	WANG Li, YUE Lin, GUO Jian-bo, <i>et al.</i> (1843)
Formation and Characterization of Aerobic Granules in a Pilot-scale Reactor for Real Wastewater Treatment	YANG Shu-fang, ZHANG Jian-jun, ZOU Gao-long, <i>et al.</i> (1850)
Research on Cultivation of Aerobic Granular Sludge and Its Characteristics in Sequencing Fed Batch Reactor	LONG Bei, YANG Chang-zhu, PU Wen-hong, <i>et al.</i> (1857)
Effect of Different Volume Loading of Aerobic/Anaerobic Zone on Nitrogen and Phosphorus Removal by Biofilm and Granular Sludge Coupling Process	YIN Hang, LIU Chang, GAO Hui, <i>et al.</i> (1866)
Adsorption of Cu ²⁺ by Xanthate-Functionalized Waste Sludge	CEN Yan, QUAN Xiang-chun, JIANG Xiao-man (1871)
Mechanisms of Copper Uptake by Submerged Plant <i>Hydrilla verticillata</i> (L. f.) Royle and <i>Myriophyllum spicatum</i> L.	XUE Pei-ying, LI Guo-xin, ZHAO Quan-li (1878)
Properties of Maize Stalk Biochar Produced Under Different Pyrolysis Temperatures and Its Sorption Capability to Naphthalene	HUANG Hua, WANG Ya-xiong, TANG Jing-chun, <i>et al.</i> (1884)
Beijing Common Green Tree Leaves' Accumulation Capacity for Heavy Metals	LI Shao-ming, KONG Ling-wei, LU Shao-wei, <i>et al.</i> (1891)
Assessment of Heavy Metal Contamination by Moss-bag Method and Road-dust Method for Taizhou Urban Area	CHEN Qin, FANG Yan-ming, YAN Yun, <i>et al.</i> (1901)
Effect of Grazing on the Temperature Sensitivity of Soil Respiration in Hulunber Meadow Steppe	WANG Xu, YAN Rui-rui, DENG Yu, <i>et al.</i> (1909)
Variation Characteristic in Soil Respiration of Apple Orchard and Its Biotic and Abiotic Influencing Factors	WANG Rui, GUO Sheng-li, LIU Qing-fang, <i>et al.</i> (1915)
Influencing Factors of Mercury Emission Flux from Forest Soil at Tieshanping, Chongqing	WANG Qiong, LUO Yao, DU Bao-yu, <i>et al.</i> (1922)
Characteristics of Arsenic Content in the Livestock Farms' Surrounding Environment in Shanghai Suburbs	XI Gong-fang, ZHOU Shou-biao, DING Hai-cheng, <i>et al.</i> (1928)
Input and Distribution of Rice Photosynthesized Carbon in the Tillering Stage Under Different Nitrogen Application Following Continuous ¹³ C Labeling	TAN Li-min, WU Hao, LI Hui, <i>et al.</i> (1933)
Simulation Study on the Effect of Salinity on the Adsorption Behavior of Mercury in Wastewater-Irrigated Area	ZHENG Shun-an, LI Xiao-hua, XU Zhi-yu (1939)
Leaching Behavior of Pb, Cd and Zn from Soil Stabilized by Lime Stabilized Sludge	LI Xiang, SONG Yun, LIU Yong-bing (1946)
Levels and Distribution of Short Chain Chlorinated Paraffins in Seaford from Dalian, China	YU Jun-chao, WANG Thanh, WANG Ya-wei, <i>et al.</i> (1955)
Application of Biotic Ligand Model for the Acute Toxicity of Copper to <i>Daphnia magna</i> in Water of Liaohe River and Taihu Lake	ZHOU Teng-yao, CAO ying, QIN Lu-mei, <i>et al.</i> (1962)
Phytotoxicity of Copper Oxide Nanoparticles to Metabolic Activity in the Roots of Rice	WANG Shu-ling, ZHANG Yu-xi, LIU Han-zhu, <i>et al.</i> (1968)
Enhancing Effect of Tween 80 on Degradation of Triphenyltin by <i>Bacillus thuringiensis</i>	HUANG Jie, YE Jin-shao, YIN Hua, <i>et al.</i> (1974)
Long-term Performance of Microbial Fuel Cell Using Manure as Substrate	JIAO Yan, ZHANG Guo-dong, ZHAO Qing-liang (1981)
Influence of Goethite on Anaerobic Fermentation of Organic Fraction of Municipal Solid Waste (OFMSW)	YANG Lu-lu, YUE Zheng-bo, CHEN Tian-hu, <i>et al.</i> (1988)
Pollutants Produced in Municipal Refuse Container During Transfer Process	WANG Xiao-yuan, LIU Yin-hua, WANG Fei, <i>et al.</i> (1994)
Selective Catalytic Oxidation of H ₂ S over Supported Fe Catalysts on CeO ₂ -Intercalated Laponite Clay	SUN Chao, ZHANG Xin, HAO Zheng-ping, <i>et al.</i> (2002)
Preparation by Different Methods and Characterization of Desulfurization Mixed Oxides Derived from Hydrotalcites	ZHU Chun-lei, WANG Hai-lin, SUN Chun-bao (2010)
Sampling Methods for PM _{2.5} from Stationary Sources: a Review	JIANG Jing-kun, DENG Jian-guo, LI Zhen, <i>et al.</i> (2018)
A Research Overview of Methanogens	LI Yu-shan, LI Yao-ming, OUYANG Zhi-yun (2025)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 汤鸿霄 陈吉宁 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2014年5月15日 35卷 第5期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 5 May 15, 2014

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 90.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行