ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

# ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第10期

Vol.36 No.10

2015

中国科学院生态环境研究中心 主办

科学出版社 出版

中国期刊方阵 双奖期刊 中华人民共和国新闻出版总署

环境科学
(HUANJING KEXUE)
ENVIRONMENTAL SCIENCE
第36卷 第10期
2015年10月15日

# 目 次

基于细颗粒物来源追踪技术的2013年12月上海市严重污染过程中$PM_{2.5}$的源贡献分析…… 李莉, 安静宇, 严茹莎(3543)
华北地区乡村站点(曲周)夏季$PM_{2.5}$中二次无机组分的生成机制与来源解析 …… 陈仕意,曾立民,董华斌,朱彤(3554)
成都市大气$PM_{2.5}$中有机磷阻燃剂的污染水平及来源 …… 印红玲,李世平,叶芝祥,杨迎春,梁金凤,游俊杰(3566)
不同生物质燃烧排放多环芳烃及糖醇类化合物的模拟研究 …… 黄帅,黄欣怡,吴水平,胡清华,陈晓秋(3573)
北京地区大气消光特征及参数化研究 …… 陈一娜,赵普生,何迪,董璠,赵秀娟,张小玲(3582)
光助芬顿反应催化降解气体中甲苯 …… 郑思灿,陈天虎,刘海波,邹雪华,朱承驻,陈冬(3590)
遗体火化二噁英类排放水平及影响因素 …… 尹文华,于晓巍,韩静磊,冯桂贤,付建平,杨艳艳,鞠勇明,张素坤(3596)
我国餐厨废物生化处理设施恶臭排放特征分析 …… 张妍,王元刚,卢志强,韩萌,商细彬,曹阳,张君(3603)
太湖湖表反照率时空特征及影响因子 …… 曹畅,李旭辉,张弥,刘寿东,肖薇,肖启涛,徐家平(3611)
基于GOCI影像的太湖水体漫衰减系数遥感反演 …… 王珊珊,李云梅,王桥,吕恒(3620)
河口盐度梯度下短叶茳芏沼泽湿地土壤间隙水溶解性甲烷时空特征 …… 杨平,张子川,杜威宁,黄佳芳,仝川(3633)
石家庄市区土壤水分运移的稳定同位素特征分析 …… 陈同同,陈辉,韩璐,邢星,付阳阳(3641)
长寿湖水库垂直剖面不同形态汞的季节变化特征及其影响因素 …… 白薇扬,张成,唐振亚,赵铮,王定勇(3649)
三峡库区消落带4种典型植物根际土壤养分与氮素赋存形态 …… 王晓锋,袁兴中,刘红,张磊,尉建军,岳俊生(3662)
湖泊水-沉积物界面DIC和DOC交换通量及耦合关系 …… 王伟颖,吕昌伟,何江,左乐,颜道浩(3674)
水体扰动条件下物质在沉积介质中的迁移 …… 李邵龙,陈道毅(3683)
城市道路径流的排污特征 …… 武俊良,任玉芬,王雪梅,王效科,陈利顶,刘刚才(3691)
杭州市余杭区典型农村暴雨径流污染特征 …… 段圣辉, 赵钰,单保庆,唐文忠,张文强,张淑珍,郎超(3697)
海水淡化超滤-反渗透工艺沿程溴代消毒副产物变化规律 …… 杨哲,孙迎雪,石娜,胡洪营(3706)
天然有机物和电解质对水中$C_{60}$凝聚行为的影响 …… 方华,荆洁,于江华,王锷蓁(3715)
锆改性高岭土原位改良技术控制重污染河道底泥磷释放效果 …… 王虹, 林建伟, 詹艳慧, 章喆, 王笛入(3720)
污水管网中无机氮类营养盐迁变规律 …… 金鹏康,焦丁,任武昂(3730)
微好氧水解酸化在石化废水预处理中的应用研究 …… 朱晨,吴昌永,周岳溪,伏小勇,陈学民,邱延波,吴晓峰(3738)
倒置$A^2$/O-MBR组合工艺处理生活污水效能及膜污染特性 …… 王旭东,马亚斌,王磊,杨怡婷,黄丹曦,夏四清(3743)
高氨氮对具有回流的PN-ANAMMOX串联工艺的脱氮影响 …… 李祥,崔剑虹,袁砚,黄勇,袁怡,刘忻(3749)
苯甲酸盐厌氧驯化体系中三氯乙烯的还原脱氯特性 …… 李姜维,杨晓永,胡安谊,于昌平(3756)
驯化污泥厌氧还原脱氯促进2,4,6-三氯酚矿化及胞外呼吸脱氯途径 …… 宋佳秀,李玲,盛凡凡,郭翠香,张永明,李祖元,王天丽(3764)
苯酚对厌氧氨氧化污泥脱氮效能长短期影响 …… 杨朋兵,李祥,黄勇,朱亮,崔剑虹,徐杉杉(3771)
连续流好氧颗粒污泥系统处理低COD/N实际生活污水的工艺优化 …… 鲁磊,信欣,鲁航,朱辽东,谢思建,武勇(3778)
FNA对好氧吸磷的长期抑制及污泥吸磷方式转化 …… 马娟,李璐,俞小军,孙雷军,孙洪伟,陈永志(3786)
污水处理厂不同工艺的污泥脱水效能分析及其影响因素研究 …… 刘吉宝,李亚明,吕鑑,魏源送,杨敏,郁达伟(3794)
残留过氧化氢对微波-过氧化氢-碱预处理后污泥水解酸化的影响 …… 贾瑞来,刘吉宝,魏源送,才兴(3801)
大围山典型森林土壤有机氮垂直分布特征 …… 丁咸庆,马慧静,朱晓龙,陈珊,侯红波,彭佩钦(3809)
缙云山不同土地利用方式对土壤活性有机碳、氮组分的影响 …… 祁心,江长胜,郝庆菊,李鉴霖(3816)
三峡库区典型退耕还林模式土壤养分流失控制 …… 吴东,黄志霖,肖文发,曾立雄(3825)
坡位与土层对喀斯特原生林土壤微生物生物量与丰度的影响 …… 冯书珍,苏以荣,张伟,陈香碧,何寻阳(3832)
不同种植方式对亚热带红壤微生物多样性的影响 … 沈冰洁,祝贞科,袁红朝,葛体达,王久荣,陈明利,吴晓芙,吴金水(3839)
有色冶金区土壤-玉米系统汞累积及健康风险 …… 纪小凤, 郑娜, 王洋, 刘强, 张静静(3845)
改良剂对4种木本植物的铅锌耐性、亚细胞分布和化学形态的影响 …… 陈永华,张富运,吴晓芙,梁希,袁斯文(3852)
菹草乙酸乙酯组分抑藻活性物质的分离纯化和鉴定 …… 孙颖颖,苏振霞,浦寅芳,肖辉,王长海(3860)
血吸虫病疫区水生生物体内氯苯化合物的污染特征与潜在风险 …… 李昆,赵高峰,周怀东,赵健,张盼伟,刘巧娜,王兴勋,刘晓茹(3866)
生物传感细胞ADP1_pWHlux在水环境急性毒性检测中的应用 …… 唐慧,宋一之,姜博,陈光玉,贾建丽,张旭,李广贺(3872)
虹鳟鱼鳃及肝脏多种CYP1基因表达模式作为生物标志物监测海河水污染状况 …… 高锴,闫佩,檀翠玲,罗彦鹤,孙静,Maria E. Jönsson,Ingvar Brandt,唐运平(3878)
纳米氧化锌对斑马鱼肝脏的毒性效应 …… 刘林,赵群芬,金凯星,朱帅旗,王小飞,吕佳昀(3884)
黄连根茎浸提物对隆线溞的急性毒性作用 …… 陈亚楠,袁玲(3892)
发酵稻壳对亚铁离子和硫离子的吸附-解吸附特性 …… 谢晓梅, 廖敏, 华嘉媛, 陈娜, 张楠, 徐培智, 解开治, 徐昌旭, 刘光荣(3896)
搅拌棒吸附萃取-气相色谱-质谱联用测定海水中邻苯二甲酸酯 …… 高晨晨,李锋民,卢伦,孙玥(3906)
COD组分分析的实验条件及结果可靠性分析 …… 李志华,张银,韩杏,余科,李汝佳(3913)
养猪废水和污泥中11种兽用抗生素的同时分析技术及其在生物降解过程的应用 …… 丁佳丽,刘锐,郑炜,余卫娟,叶朝霞,陈吕军,张永明(3918)
土壤微生物产电技术及其潜在应用研究进展 …… 邓欢,薛洪婧,姜允斌,钟文辉(3926)
《环境科学》征订启事(3553) 《环境科学》征稿简则(3589) 信息(3705,3755,3763,3800)

# 太湖湖表反照率时空特征及影响因子

曹畅[1,2],李旭辉[1],张弥[1,2],刘寿东[1,2],肖薇[1,2],肖启涛[1,2],徐家平[1,2]
(1. 南京信息工程大学 Yale-NUIST 大气环境中心,南京 210044; 2. 南京信息工程大学应用气象学院,南京 210044)

**摘要**: 湖表反照率是影响水-气界面能量平衡和水体内部光温环境的重要因子,受到太阳高度角、云量、风速和水质等环境因子的多重影响. 基于太湖中尺度涡度通量网 4 个涡度通量观测站点(梅梁湾、大浦口、避风港和小雷山)的辐射和风速资料,结合晴空指数和水质数据,分析上述因子对太湖湖表反照率的影响及太湖湖表反照率空间差异的原因. 主要结果为: 太阳高度角是控制湖表反照率日变化、季节变化的主要因子; 太阳高度角低于 35°且当晴空指数在 0 ~ 0.1 和 0.4 ~ 0.6 之间时湖表反照率出现高值. 反照率值呈现随风速、浊度和叶绿素 a 浓度升高而增大的趋势, 而风浪通过影响浅水湖泊浊度、叶绿素 a 浓度从而间接影响湖表反照率. 各站点湖表反照率关系为: 小雷山 > 避风港 > 大浦口 > 梅梁湾,其中小雷山站位于草型和藻型湖区过渡区而梅梁湾站位于藻型湖区. 反照率与叶绿素 a 浓度水平之间的关系对蓝藻暴发及其严重程度并不敏感. 本研究为湖体反照率的参数化过程提供参考依据.

**关键词**:反照率; 晴空指数; 云量; 风速; 浊度; 叶绿素 a
**中图分类号**: X122 **文献标识码**: A **文章编号**: 0250-3301(2015)10-3611-09 **DOI**: 10.13227/j.hjkx.2015.10.009

## Temporal and Spatial Characteristics of Lake Taihu Surface Albedo and Its Impact Factors

CAO Chang[1,2], LI Xu-hui[1], ZHANG Mi[1,2], LIU Shou-dong[1,2], XIAO Wei[1,2], XIAO Qi-tao[1,2], XU Jia-ping[1,2]
(1. Yale-NUIST Center on Atmospheric Environment, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China; 2. College of Applied Meteorology, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China)

**Abstract**: Lake surface albedo determines energy balance of water-atmospheric interface and water physical environment. Solar elevation angle, cloudiness, wind speed, water quality and other factors can affect lake surface albedo. Using solar radiation, wind speed, and water quality data (turbidity and chlorophyll-a concentration) which were observed in four eddy covariance sites (Meiliangwan, Dapukou, Bifenggang and Xiaoleishan i. e. MLW, DPK, BFG and XLS) in Lake Taihu and clearness index ($k_t$), the influence of these factors on Lake Taihu surface albedo and the reasons that led to its spatial difference were investigated. The results showed that solar elevation angle played a leading role in the diurnal and seasonal change of lake surface albedo; lake surface albedo reached two peaks in $0 < k_t < 0.1$ and $0.4 < k_t < 0.6$ respectively, when solar elevation angle was below 35°. The surface albedo increased with the increasing wind speed, turbidity and chlorophyll-a concentration. However, wind could indirectly affect surface albedo through leading to the changes in sediment resuspension and chlorophyll-a distribution. The sequence of albedo in the four sites was XLS > BFG > DPK > MLW. XLS and BFG belonged to the higher albedo group, while DPK and MLW belonged to the lower albedo group. The different biological environments caused by aquatic macrophytes and algae resulting in the spatial variation of Lake Taihu surface albedo. The relationship between albedo and chlorophyll-a concentration was not a very sensitive factor for indicating the outbreak of algae. This study can provide theoretical reference for lake albedo parameterization.

**Key words**: albedo; clearness index; cloudiness; wind speed; turbidity; chlorophyll-a

水体反照率是水体表面反射的太阳短波辐射与入射太阳短波辐射的比值,它不仅直接影响水-气界面的辐射特征与能量平衡,还能表征水体的物化特性,体现水体的光温环境[1],对局地气候、生态环境有重要影响.

水体反照率受太阳高度角、云量、风速、水质等多种因子的影响. 早期关于水体反照率影响因子的研究多考虑太阳高度角和云量. 太阳高度角大时,水体反照率小,反之水体反照率大,对于同一地区,太阳高度角的年变化是规律的,呈现出夏季太阳高度角高因而反照率相对较低,冬季则相反的趋势[2]. 云通过散射和吸收一部分太阳短波辐射从而影响水体反照率. 但是,早期由于观测散射辐射的仪器不够精准,无法得到云量对于水体反照率影响的准确结论[1~3]. 因此,量化天空云量成为研究云量对于反照率影响的一个关键问题. 1972 年,Payn[3]通过引入太阳常数、日-地距离和太阳高度角

**收稿日期**: 2014-06-05; **修订日期**: 2015-05-05
**基金项目**: 江苏高校优势学科建设工程(PAPD)项目; 长江学者和创新团队发展计划项目; 江苏省 2012 年度普通高校研究生科研创新计划项目(CXLX12_0502); 国家自然科学基金项目(31200377)
**作者简介**: 曹畅(1989 ~ ),女,博士研究生,主要研究方向为地-气交换,E-mail: ichangnj@sina.com

等参数得出表征大气传输(atmospheric transmittance)状况的参数 $T$ 用于研究云量状况对巴泽兹湾海表反照率的影响[3],其研究结果表明在太阳高度角为 24°和 32°时,海表反照率在 $0.5 < T < 0.7$ 之间呈现高值. 风通过引起波浪从而改变太阳短波辐射的入射角,Katsaros 等[2]研究发现在晴天并且太阳高度角低于 30°的条件下,随着风速增大海表反照率呈现下降趋势[2]. 在太阳高度角较低时,波浪会使入射角度减小从而导致反照率降低; 而在太阳高度角较高情况下,波浪反而增大入射角度从而导致反照率升高[2,3]. 水质作为水体本身重要的物化属性,也是影响反照率的关键因素. 水体浊度和叶绿素 a 浓度是衡量水质状况的关键参数[4~6]. 水体的反射辐射主要包括水体表面反射的短波辐射和水体内部反射的散射辐射[3]. 对于总悬浮物中无机颗粒物占主导的水体,其内部反射的散射辐射量主要由水体内的无机悬浮物含量决定[4,7],后者能将部分透射进入水体中的太阳短波辐射经后向散射重新返回大气[8]. 水体叶绿素 a 浓度的高低直接标志藻类数量的多少. 研究表明,叶绿素 a 在绿光波段(0.55 ~ 0.65 μm)和近红外波段(0.7 ~ 0.9 μm)有明显的反射峰[4,9].

然而以往对影响水体反照率的因子考虑不够全面,也没有较多关注叶绿素 a、浊度等水质参数对短波反照率的影响. 且研究的对象多为海洋水体[1,3],对湖体尤其是内陆浅水湖泊的研究较少[2]. 太湖是我国第三大淡水湖泊,实际水域面积约为 2 338 $km^2$,平均水深 1.9 m[10]. 近年来由于人类活动的加剧,太湖污染状况严重,富营养化程度加剧,蓝藻暴发现象频出,水质状况恶化[11]. 这些变化会影响太湖湖表反照率从而改变太湖水体的光温特性,最终导致其生物物理过程如水体热力分层、消光系数以及生物化学过程如水生植被生长的变化.

本研究基于太湖中尺度涡度通量网[12]观测站点的气象数据、水质数据和反映天空云量状况的晴空指数,明确太湖反照率的时空特征,结合天文因素(太阳高度角)、气象因子(云量、风速)和水质因子(浊度和叶绿素 a 浓度),研究它们对湖表反照率的影响,同时,对反照率是否可作为指示湖体生物过程的指标进行初步分析, 以期为今后湖泊模型中湖体反照率的参数化过程提供理论依据.

## 1 材料与方法

### 1.1 研究站点和仪器

本研究数据来自太湖中尺度涡度通量网的 4 个观测站点(见图 1): 梅梁湾(MLW, 31.419 7°N, 120.213 9°E)、大浦口(DPK, 31.266 1°N, 119.931 2°E)分别位于太湖北部和西部的藻型湖区,避风港(BFG, 31.168 5°N, 120.397 2°E)位于太湖东部的草型湖区,小雷山(XLS, 30.997 2°N, 120.134 4°E)位于南部的藻型和草型湖区过渡区[12,13]. 4 个平台分别建于 2010 年 6 月、2011 年 8 月、2011 年 12 月和 2012 年 11 月. 各平台均架设四分量辐射计(CNR4, Kipp & Zonen B. V., Delft, The Netherlands)和三维超声风速计(CSAT3, Campbell Scientific Inc., Logan, UT, USA). 四分量辐射计有 4 个辐射传感器,分别可同时测向下短波辐射、向上短波辐射、向下长波辐射和向上长波辐射. 该辐射计光谱范围短波为 0.3 ~ 2.8 μm,灵敏度为 5 ~ 20 $\mu V \cdot (W \cdot m^{-2})^{-1}$,长波为 4.5 ~ 42 μm,灵敏度为 5 ~ 15 $\mu V \cdot (W \cdot m^{-2})^{-1}$.

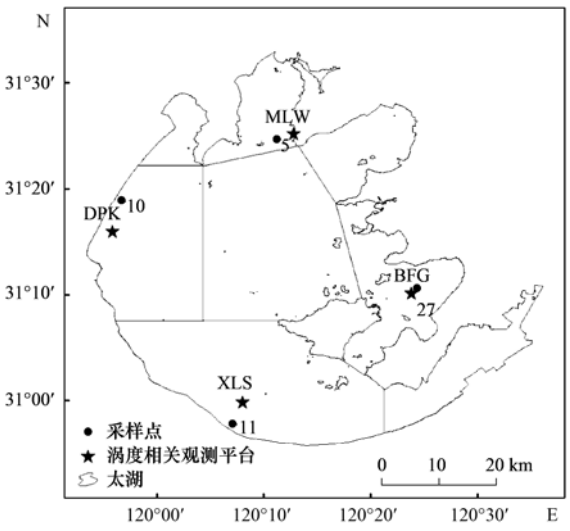



**图 1 太湖涡度通量观测平台和水样采集点位置示意**

Fig. 1 Eddy flux system platforms and sampling sites in Lake Taihu

### 1.2 研究方法

#### 1.2.1 辐射数据处理

对向下和向上短波辐射的输出值进行 30 min 平均. 再进行以下的质量控制: ①剔除辐射计倾斜时段数据; ②剔除辐射数据为负值的异常值; ③计算每日每个时刻的太阳高度角,将太阳高度角为正值的时刻定为白天,夜间向下和向上短波辐射归零.

#### 1.2.2 季节平均反照率

采用经质量控制后的辐射数据,分别计算每个季节中所有白天向上短波辐射之和与向下短波辐射之和,两者的比值作为该季节平均反照率.

**1.2.3**　晴空指数

本研究采用晴空指数作为衡量天空中云量的指标. 晴空指数($k_t$)的定义是指在一定太阳高度角下地表面接收的太阳短波辐射($S$)与大气上界平行于地表面的天文辐射($S_e$)的比值[14].

$$k_t = \frac{S}{S_e} \quad (1)$$

其中:

$$S_e = S_{sc}[1 + 0.033\cos(360t_d/365)]\sin\beta \quad (2)$$

式中,$S_{sc}$是太阳常数(1 370 $W \cdot m^{-2}$),$t_d$ 是日序,$\beta$ 是太阳高度角. $k_t$ 处于0~1之间,越接近于0代表天空中云量越多,而越接近于1代表天空越晴朗. 本研究将 $k_t < 0.35$ 的时刻定义为阴天状况,$0.35 < k_t < 0.65$ 时定义为多云状况,$k_t > 0.65$ 时定义为云量很少的晴天状况[15].

**1.2.4**　水质数据

浊度(NTU)数据采用 YSI(650MDS, YSI Inc., Yellow Springs, OH, USA)现场测得. 叶绿素 a 浓度($\mu g \cdot L^{-1}$)数据来自中国科学院太湖湖泊生态系统研究站水质采样数据. 经站点配对,水质采样点选取图 1 中的 5(31.41°N,120.19°E)、10(31.31°N,119.95°E)、27(31.18°N,120.41°E)和 11(30.96°N,120.12°E). 其中,5、10 号点为每月采样一次,11 和 27 号点为每季度(2、5、8、11 月)采样一次. 将这 4 个采样点水质数据代表相应平台的水质状况. 由于 XLS 站点可用水质采样数据在本文研究时段(2010 年 9 月~2013 年 8 月)只有一次,缺乏代表性. 因此在分析水质对湖表反照率影响时只分析 BFG、DPK 和 MLW 这 3 个站点的情况.

## 2　结果与分析

**2.1**　太湖湖表反照率的时空变化

表 1 为各站点四季平均反照率值. 从时间上看,4 个站点均呈现出秋冬季反照率明显高于春夏季反照率的现象. 太阳高度角在秋冬季节相对春夏季节要低是导致这一现象的主要原因. 2013 年 MLW 夏季湖表反照率明显高于往年同期,因为该段时间 MLW 辐射计下方水体出现较多蓝藻导致反照率值升高. 除此之外,从空间上看,BFG 和 XLS 四季平均反照率都高于 MLW 和 DPK,总体呈现 XLS > BFG > DPK > MLW 的趋势.

**表 1　站点四季平均反照率值**

Table 1　Seasonal variation of surface albedos for the 4 sites

| 站点名称 | 年份 | 春季(3~5 月) | 夏季(6~8 月) | 秋季(9~11 月) | 冬季(12 月~次年 1 月) |
|---|---|---|---|---|---|
| 梅梁湾(MLW) | 2010 | — | — | 0.081 | 0.100 |
| | 2011 | 0.063 | 0.060 | 0.063 | 0.071 |
| | 2012 | 0.055 | 0.061 | 0.075 | 0.077 |
| | 2013 | 0.055 | 0.079 | — | — |
| 大浦口(DPK) | 2012 | 0.083 | 0.063 | 0.084 | 0.098 |
| | 2013 | 0.075 | 0.062 | — | — |
| 避风港(BFG) | 2012 | 0.085 | 0.069 | 0.108 | 0.127 |
| | 2013 | 0.083 | 0.065 | — | — |
| 小雷山(XLS) | 2012 | — | — | — | 0.129 |
| | 2013 | 0.095 | 0.077 | — | — |

**2.2**　太湖湖表反照率的影响因子

**2.2.1**　太阳高度角对太湖湖表反照率的影响

选取 4 个站点某一典型晴天白天反照率和太阳高度角数据来反映日尺度上太阳高度角对湖表反照率的影响. 太阳高度角的日变化规律为从清晨开始逐渐增大,正午达到最大值,然后逐渐降低. 湖表反照率会受到太阳高度角日变化的影响,呈现出有规律的日变化[图 2(a)]. 由图 2(b)可见,湖表反照率随着太阳高度角增大而降低. 因此湖表反照率日变化规律为上午随着太阳高度角增大而降低,下午随着太阳高度角降低而升高.

太阳高度角的年变化规律为从春季开始逐渐增大至夏季达到峰值,随后开始降低. 受其影响,湖表反照率会呈现规律性的年变化. 图 3 为各站点在中午时刻(11:00~13:00)不同太阳高度角区间内的平均反照率值. 由于太阳高度角的最大值往往出现在正午时段,因此,低太阳高度角范围对应的是冬季,反之为夏季. 从中可知,当太阳高度角小于 60°时,各站点反照率随太阳高度角增大而降低. 当太阳高度角大于 60°时,对于太湖区域而言正好是夏季,BFG、XLS 和 DPK 湖表反照率随太阳高度角增大而降低,但 MLW 站点的反照率随太阳高度角增

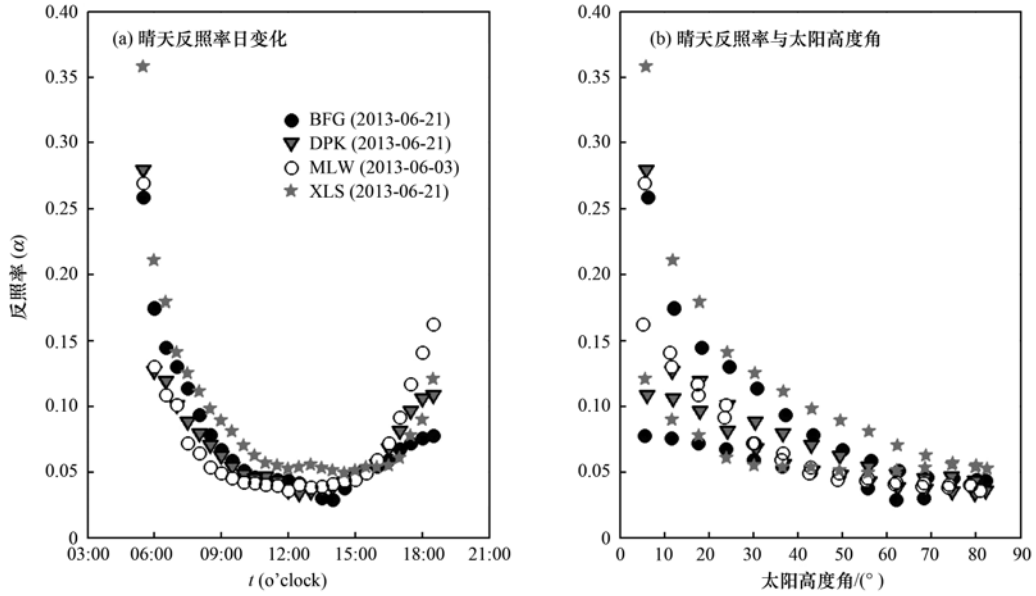



**图 2 晴天反照率日变化和晴天反照率与太阳高度角**

Fig. 2 Diurnal variation of surface albedo and solar elevation angle and surface albedo under clear sky condition

大呈现上升趋势. 这可能与夏季 MLW 站点藻类植物生长旺盛,并且多漂浮于水面,其绿色鲜亮的叶片导致湖表反照率上升有关.

综上所述,太阳高度角日变化和年变化直接影响太湖湖表反照率的日变化和年变化,使其在日尺度和季节尺度上呈现出规律性的变化趋势.

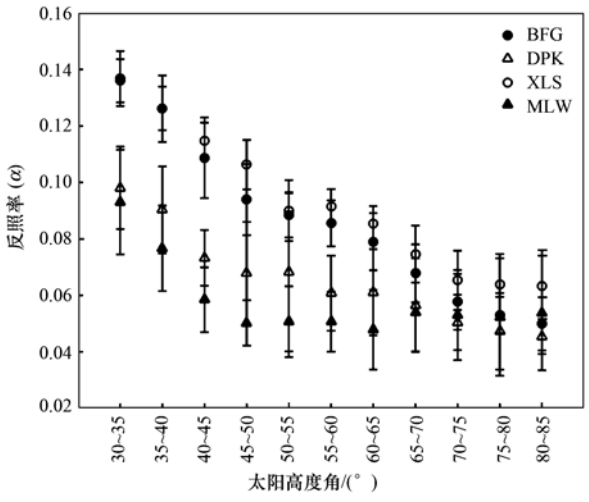



**图 3 不同太阳高度角区间内各站点平均反照率值**

Fig. 3 Average surface albedos of the 4 sites for 5°bands of solar elevation angles

### 2.2.2 云对太湖湖表反照率的影响

云是影响湖表反照率的因素之一. 晴空指数可以表征天空云量的变化,因而分析反照率与晴空指数的关系,可以反映出云量对反照率的影响. 为排除太阳高度角的影响,对太阳高度角以 5°为间隔进行划分,从而在不同太阳高度角范围内分析 $k_t$ 与反照率的关系(图 4). 从图 4 中可以看出,当太阳高度角高于 35°时,不同的太阳高度角间隔内,随着晴空指数逐渐增大(即天空中云量减少),反照率值下降但变化平缓. 而太阳高度角低于 35°时,反照率在 $0 < k_t < 0.1$ 和 $0.4 < k_t < 0.6$ 区间出现高值,但形成机制并不相同. 当晴空指数很小时($0 < k_t < 0.1$),即天空基本被云全部覆盖,太阳辐射在天空中的分布可认为是各向同性,因此反照率值较高. 而当 $k_t$ 处于 0.4 ~ 0.7 之间,天空处于部分有云状况下,云散射太阳短波辐射形成多种入射角. 此时,低于太阳高度角的入射角其反射辐射强度会明显高于比太阳高度角大的入射角[3]. Saunders 的研究也表明[16],当入射角高于该时刻太阳高度角时,反照率随着入射角度的增大缓慢下降; 反之,反照率随着入射角度的降低迅速增大. 因此,在太阳高度角低于 35°时,晴空指数在 0.4 ~ 0.7 区间内即多云天空条件下,湖表反照率升高.

### 2.2.3 风速对太湖湖表反照率的影响

风通过使湖表产生波浪改变向下短波辐射的入射角,从而影响湖表反照率[1]. 为了尽可能排除太阳高度角和云量因素对风速与湖表反照率之间关系的影响,选取不同季节每天正午(11:00 ~ 13:00)晴天时段($k_t > 0.65$)的风速与相应反照率值进行分析. 如图 5 所示,DPK 站点在太阳高度角 50° ~ 55° 区间内以及 BFG 站点在太阳高度角 35° ~ 40°和 65°

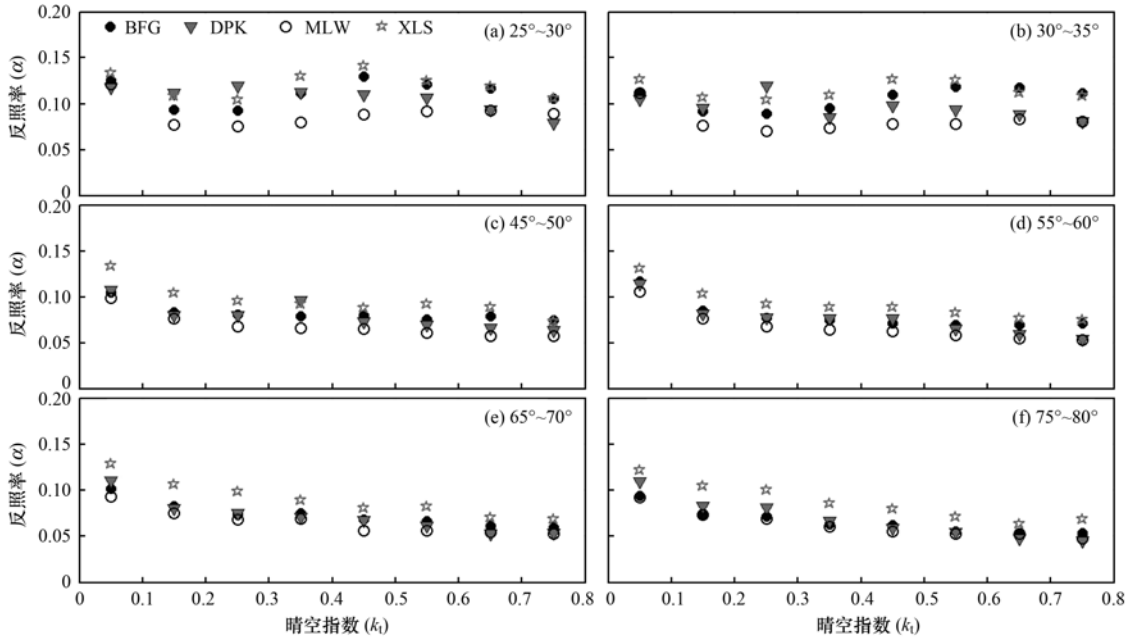



**图 4　不同太阳高度角范围内晴空指数对湖表反照率的影响**

Fig. 4　Albedo vs clearness index of the 4 sites for 5°bands of solar elevation angles

~70°区间内当风速大于 6 m·s$^{-1}$时湖表反照率随风速增大呈现下降趋势. 除此之外,其它太阳高度角及风速区间内各站点的反照率值随风速增大呈现增加的趋势. 由于太湖是内陆浅水湖泊,受风浪影响明显. 大风引起的垂直对流交换作用极易造成太湖水体的整层夹卷,导致大量水底淤泥及细沙上浮[4],正如图 6 所示,风速与浊度呈正相关关系. 水体浊度升高可能会增加水体散射辐射,因此出现风速越大反照率越高的趋势,这与海洋有着较大区别. 风浪很难引起深海的对流导致浊度变化.

### 2.2.4　浊度对太湖湖表反照率的影响

由 2.2.3 节分析可见,风会导致太湖湖水浊度产生变化. 悬浮物通过影响水体后向散射特性[6,7],引起湖表反照率变化. 图 7 为 3 个站点浊度与反照率的关系,无论太阳高度角高低,反照率与浊度呈现正相关关系,而这一关系在低太阳高度角时更为明显.

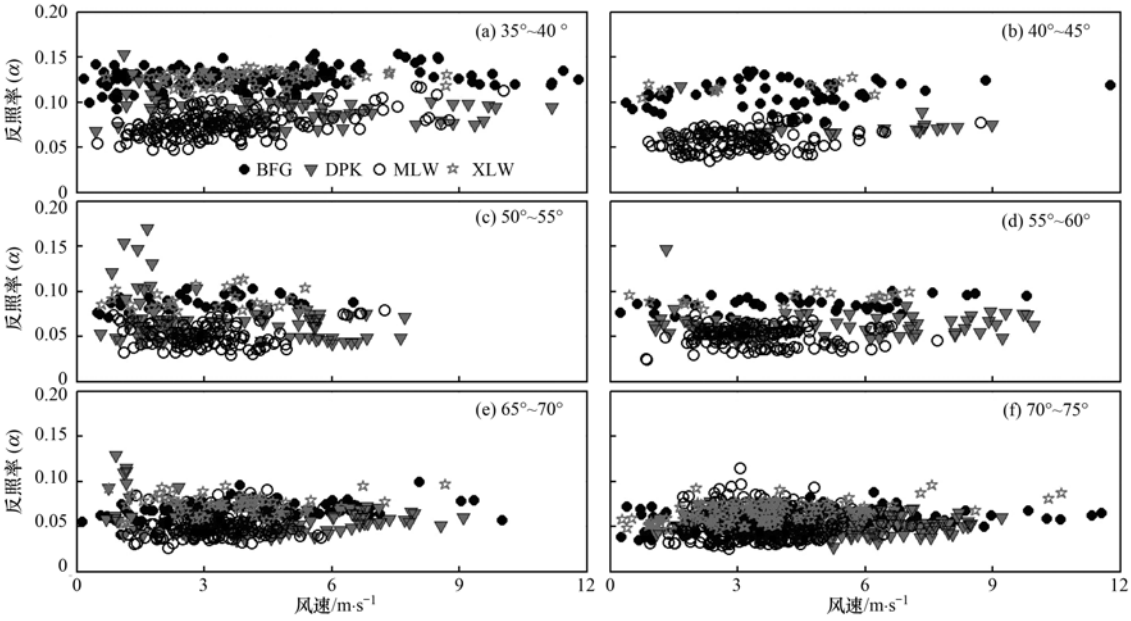



**图 5　不同太阳高度角范围内风速对湖表反照率的影响**

Fig. 5　Changes in albedo with wind speed of the 4 sites for 5°bands of solar elevation angle

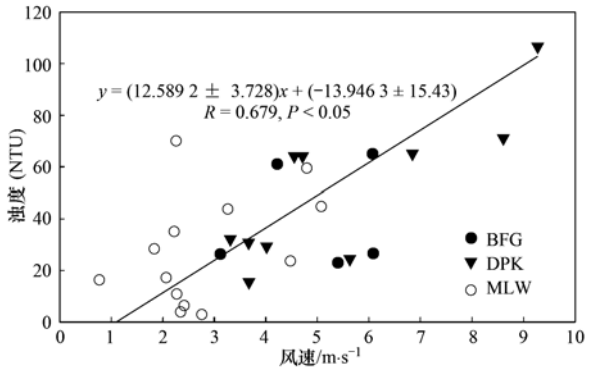
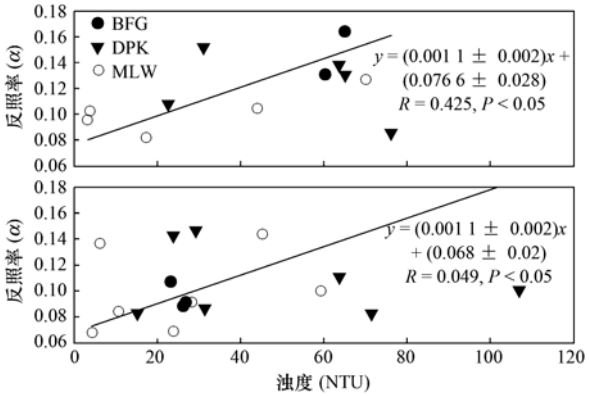



**图 6 风速与浊度关系**

Fig. 6 Relationship between wind speed and turbidity

选取晴天($k_t$ >0.65)的反照率和相应浊度数据分析浊度对湖表反照率的影响. 太湖水体的光学特性夏季主要由浮游藻类、悬浮物和黄色物质共同决定,冬季则由悬浮物和黄色物质决定[17]. 本研究中,划分藻类生长旺盛期(5 ~9 月)和非生长期(其余月份)分别讨论浊度对湖表反照率的影响. 为进一步排除风速的影响,根据风速值大小,将风速分成 <4 m·s$^{-1}$、4 ~6 m·s$^{-1}$和 >6 m·s$^{-1}$这 3 个区间.

如表 2 所示,藻类生长旺盛期,DPK 和 BFG 站点不论太阳高度角高低,反照率呈现随浊度增大而增大的趋势. DFK 站点浊度高于 BFG 站点,其反照率也高于 BFG 站点反照率. 由于 MLW 站点只有一个数据,不具代表性故不讨论. 表 3 所示为藻类非生长期,MLW 站点和 BFG 站点反照率随浊度增大而增大,DPK 站点反照率则呈现随浊度增大而降低的趋势. 这可能由于在该时期水体光学特性还受黄色物质的影响,黄色物质对太阳辐射主要是吸收作用[17],会导致湖表反照率减小. 低太阳高度角情况下,站点浊度大小关系为: BFG > DPK > MLW,反照率大小关系与浊度大小关系一致. 而在高太阳高度角情况下,站点浊度呈现 DPK > MLW > BFG 的趋势,反照率则呈现 BFG > DPK > MLW.




(a)低太阳高度角时浊度与反照率的关系;
(b)高太阳高度角时浊度与反照率的关系

**图 7 浊度与反照率的关系**

Fig. 7 Changes in albedo with turbidity of BFG, DPK and MLW

**表 2 蓝藻生长旺盛期不同太阳高度角区间和风速区间内站点浊度与湖表反照率**

Table 2 Turbidity and surface albedo of MLW, DPK and BFG for different wind bands and solar elevation angles during optimal algal growth period

| 站点 | 项目 | 低太阳高度角(30° ~40°) | | | 高太阳高度角(55° ~70°) | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | <4 m·s$^{-1}$ | 4 ~6 m·s$^{-1}$ | >6 m·s$^{-1}$ | <4 m·s$^{-1}$ | 4 ~6 m·s$^{-1}$ | >6 m·s$^{-1}$ |
| MLW | 浊度(NTU) | — | — | — | — | 25.99 | — |
| | 反照率 | — | — | — | — | 0.063 | — |
| DPK | 浊度(NTU) | — | 63.80 | 64.80 | — | 57.38 | 107.20 |
| | 反照率 | — | 0.060 | 0.079 | — | 0.049 | 0.050 |
| BFG | 浊度(NTU) | 15.70 | 48.97 | — | 7.45 | 59.50 | — |
| | 反照率 | 0.059 | 0.067 | — | 0.034 | 0.053 | — |

**表 3 蓝藻非生长期不同太阳高度角区间和风速区间内站点浊度与湖表反照率**

Table 3 Turbidity and surface albedo of MLW, DPK and BFG for different wind bands and solar elevation angles during other periods

| 站点 | 项目 | 低太阳高度角(30° ~40°) | | | 高太阳高度角(55° ~70°) | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | <4 m·s$^{-1}$ | 4 ~6 m·s$^{-1}$ | >6 m·s$^{-1}$ | <4 m·s$^{-1}$ | 4 ~6 m·s$^{-1}$ | >6 m·s$^{-1}$ |
| MLW | 浊度(NTU) | 42.85 | 60.99 | — | 6.68 | 59.50 | — |
| | 反照率 | 0.067 | 0.073 | — | 0.034 | 0.053 | — |
| DPK | 浊度(NTU) | 63.70 | 42.53 | 36.88 | — | 59.17 | 100.20 |
| | 反照率 | 0.079 | 0.085 | 0.089 | — | 0.059 | 0.050 |
| BFG | 浊度(NTU) | — | 65 | 65 | — | 25.85 | — |
| | 反照率 | — | 0.120 | 0.130 | — | 0.064 | — |

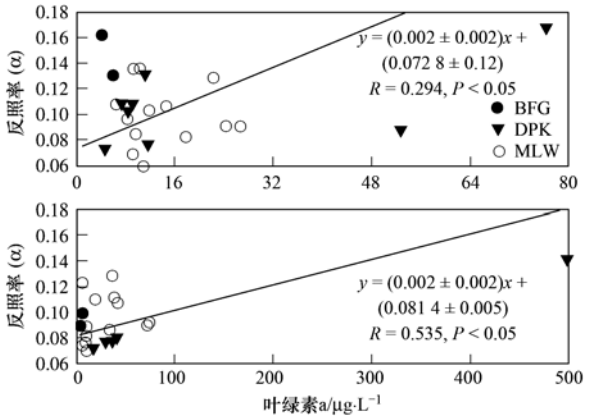
**2.2.5** 叶绿素 a 浓度对太湖湖表反照率的影响

叶绿素 a 是藻类植物的主要色素,太湖水体富营养化导致藻类大量繁殖甚至蓝藻暴发[4],因此叶绿素 a 在很大程度上标志着水体藻类生长状况. 叶

绿素 a 也在一定程度上决定了水体的反射光谱特征[18]，并进而影响湖表反照率.

图 8 为 3 个站点叶绿素 a 浓度与反照率的关系，无论太阳高度角高低，反照率呈现随叶绿素 a 浓度升高而升高的正相关关系，而这一关系在高太阳高度角时更为明显. 位于草型湖区的 BFG，其叶绿素 a 浓度明显低于位于藻型湖区的 DPK 和 MLW 的平均水平，并且 DPK 和 MLW 的叶绿素 a 浓度具有更高的离散性. MLW 作为主要的藻类聚集区，其叶绿素 a 浓度在 10 ~ 100 μg·L$^{-1}$变化. 在不同太阳高度角条件下，DPK 叶绿素 a 浓度都有极大值出现，同期浊度、风速也处于高值，反照率也随之相应升高.

表 4 和表 5 分别为藻类生长旺盛期和非生长期 3 个站点晴天时刻($k_t$ > 0.65)反照率和相应叶绿素 a 浓度的关系. 为排除风速的影响，将风速分成 < 4 m·s$^{-1}$、4 ~ 6 m·s$^{-1}$和 > 6 m·s$^{-1}$这 3 个区间. 藻类生长旺盛以及非生长时期(表 4 和 5)，3 个站点的反照率随叶绿素a浓度增大而升高的现象并不显著. 这一结果表明反照率与叶绿素 a 浓度水平的对应关系具有区分草型和藻型湖区的能力，但不能有效表征藻类湖区水华严重程度. 反照率的多控制因子和叶绿素 a 浓度显著的时空变异性是制约其与水藻生长建立显著关系的重要原因.




(a)低太阳高度角时叶绿素 a 浓度与反照率的关系；(b)高太阳高度角时叶绿素 a 浓度与反照率的关系

**图 8　叶绿素 a 浓度与反照率的关系**

Fig. 8　Changes in albedo with chlorophyll-a concentration of BFG, DPK and MLW

**表 4　蓝藻生长旺盛期不同太阳高度角区间和风速区间内站点叶绿素 a 与湖表反照率**

Table 4　Chlorophyll-a and surface albedo of MLW, DPK and BFG for different wind speed ranges and solar elevation angles during optimal algal growth period

| 站点 | 项目 | 低太阳高度角(30° ~ 40°) | | | 高太阳高度角(55° ~ 70°) | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | < 4 m·s$^{-1}$ | 4 ~ 6 m·s$^{-1}$ | > 6 m·s$^{-1}$ | < 4 m·s$^{-1}$ | 4 ~ 6 m·s$^{-1}$ | > 6 m·s$^{-1}$ |
| MLW | 叶绿素 a/μg·L$^{-1}$ | 45.74 | — | — | 48.26 | 50.71 | — |
| | 反照率 | 0.074 | — | — | 0.056 | 0.050 | — |
| DPK | 叶绿素 a/μg·L$^{-1}$ | — | 497.18 | — | — | 365.06 | 38.17 |
| | 反照率 | — | 0.050 | — | — | 0.052 | 0.057 |
| BFG | 叶绿素 a/μg·L$^{-1}$ | 6.22 | 3.1 | — | 4.14 | — | — |
| | 反照率 | 0.072 | 0.064 | — | 0.062 | — | — |

**表 5　藻类非生长期不同太阳高度角区间和风速区间内站点叶绿素 a 与湖表反照率**

Table 5　Chlorophyll-a and surface albedo of MLW, DPK and BFG for different wind speed ranges and solar elevation angles during other periods

| 站点 | 项目 | 低太阳高度角(30° ~ 40°) | | | 高太阳高度角(55° ~ 70°) | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | < 4 m·s$^{-1}$ | 4 ~ 6 m·s$^{-1}$ | > 6 m·s$^{-1}$ | < 4 m·s$^{-1}$ | 4 ~ 6 m·s$^{-1}$ | > 6 m·s$^{-1}$ |
| MLW | 叶绿素 a/μg·L$^{-1}$ | 11.38 | 20.96 | — | 11.76 | — | — |
| | 反照率 | 0.094 | 0.087 | — | 0.033 | — | — |
| DPK | 叶绿素 a/μg·L$^{-1}$ | — | 8.65 | 11.97 | — | 7.37 | — |
| | 反照率 | — | 0.096 | 0.059 | — | 0.075 | — |
| BFG | 叶绿素 a/μg·L$^{-1}$ | 4.02 | — | — | — | — | — |
| | 反照率 | 0.114 | — | — | — | — | — |

## 3　讨论

### 3.1　风浪及其后续效应对太湖湖表反照率的影响

以往关于风对海表反照率影响的研究多表明，在低太阳高度角情况下，海表反照率会随着风速增大而降低. 这主要是由于在太阳高度角较低时，风浪导致太阳入射角降低从而引起反照率降低[1,3]. 但本研究结果表明，太湖湖表反照率总体呈现随风速增大而增大的趋势(图 5). 因此，风浪对太阳入射角的改变不是风对太湖湖表反照率影响的主要机

制. 风浪会引起湖水垂直紊动造成底泥再悬浮,这是影响浅水湖泊理化性质的重要机制[19,20]. 太湖属于典型的浅水湖泊,较大风浪引起强烈的水动力作用能将湖底的泥沙夹卷至湖体悬浮导致水体悬浊物浓度增大[21](图6). 从而引起水体内部反射的散射辐射增加使反照率上升[4,7](表2).

风速不仅影响水体浊度而且还影响水体叶绿素a浓度的分布[5]. 本研究表明,在藻类生长的不同时期站点间的反照率大小关系和其叶绿素a浓度关系一致. 叶绿素a是藻类的主要色素,因此若湖体中藻类大量繁殖,湖表反照率会呈现上升趋势,这也可从2013年夏季MLW站点的反照率明显高于往年同期(表1)得到验证.

### 3.2 太湖站点反照率空间差异的原因

从空间上看,XLS和BFG站点反照率接近,DPK和MLW站点反照率接近. BFG位于太湖东部的草型湖泊区,水生植物覆盖度较高,而MLW、DPK站点均位于太湖富营养化程度较高的湖区,每年5~9月间藻类生长旺盛. 植被类型差异是造成4个站点的反照率呈现两两相近的原因.

湖表反照率相近站点之间也存在一定差异. DPK站点常年平均风速高于MLW站点[22],以2013年为例:DPK全年平均风速为4.41 $m\cdot s^{-1}$,MLW全年平均风速为2.60 $m\cdot s^{-1}$. 较大风浪携卷底泥至湖体中导致DPK站点浊度升高,使其反照率升高. 同时DPK站点叶绿素含量明显高于MLW站点. 因此,风速导致的浊度和叶绿素a浓度的变化是形成DPK反照率高于MLW反照率的原因. BFG和XLS站点湖表反照率值相近,仅相差0.006. 因为BFG站点水生植物较多,覆盖度高,西南部的XLS站点没有大面积水草分布[23]. 水生植物对水体有净化作用[24]并且可以阻止泥沙悬浮[25],研究表明东太湖的水体透明度位列全太湖最高[26],通常水体透明度高反照率较低. 因此BFG站点的反照率略低于XLS.

湖泊模型对湖表反照率进行估算时,除考虑太阳高度角和云量的影响外,还应着重考虑湖区植被类型对湖表反照率的影响.

## 4 结论

(1) 太阳高度角是太湖湖表反照率的首要控制因子. 太阳高度角较低时,反照率在晴空指数处于0.4~0.6之间和<0.1时形成两个峰值. 反照率值随风速增大有增加的趋势,这与风导致底泥再悬浮有关. 湖表反照率随浊度和叶绿素a浓度升高而呈现增大趋势.

(2) 太湖湖表反照率与其叶绿素a浓度的相关关系具有区分草型和藻型湖区的能力,但不能有效表征藻类湖区水华严重程度及暴发情况.

致谢:感谢南京信息工程大学大气环境中心所有参与建设、维护太湖中尺度通量网观测平台以及水样采集工作的老师和同学. 特别感谢中国科学院太湖湖泊生态系统研究站提供叶绿素a浓度数据.

**参考文献:**

[1] Henneman H E, Stefan H G. Albedo models for snow and ice on a freshwater lake[J]. Cold Regions Science and Technology, 1999, **29**(1): 31-48.

[2] Katsaros K B, McMurdie L A, Lind R J, *et al*. Albedo of a water surface, spectral variation, effects of atmospheric transmittance, sun angle and wind speed[J]. Journal of Geophysical Research, 1985, **90**(C4): 7313-7321.

[3] Payn R E. Albedo of the sea surface[J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 1972, **29**(5): 959-970.

[4] 孙德勇, 周晓宇, 李云梅, 等. 基于光学分类的太湖水体叶绿素a浓度高光谱遥感[J]. 环境科学, 2013, **34**(8): 3002-3009.

[5] 孙小静, 秦伯强, 朱广伟, 等. 风浪对太湖水体中胶体态营养盐和浮游植物的影响[J]. 环境科学, 2007, **28**(3): 506-511.

[6] 乐成峰, 李云梅, 孙德勇, 等. 太湖叶绿素a浓度时空分异及其定量反演[J]. 环境科学, 2008, **29**(3): 619-626.

[7] 刘忠华, 李云梅, 吕恒, 等. 太湖春季水体固有光学特性及其对遥感反射率变化的影响[J]. 生态学报, 2012, **32**(2): 438-447.

[8] 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.

[9] 佘丰宁, 李旭文, 蔡启铭, 等. 水体叶绿素含量的遥感定量模型[J]. 湖泊科学, 1996, **8**(3): 201-207.

[10] 肖薇, 刘寿东, 李旭辉, 等. 大型浅水湖泊与大气之间的动量和水热交换系数——以太湖为例[J]. 湖泊科学, 2012, **24**(6): 932-942.

[11] 李云亮, 张运林, 李俊生, 等. 不同方法估算太湖叶绿素a浓度对比研究[J]. 环境科学, 2009, **30**(3): 680-686.

[12] Lee X H, Liu S D, Xiao W, *et al*. The Taihu eddy flux network: an observational program on energy, water, and greenhouse gas fluxes of a large freshwater lake[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2014, **95**(10): 1583-1594.

[13] Hu W P, Jørgensen S E, Zhang F B, *et al*. A model on the carbon cycling in Lake Taihu, China[J]. Ecological Modelling, 2011, **222**(16): 2973-2991.

[14] Gu L H, Fuentes J D, Shugart H H, *et al*. Responses of net ecosystem exchanges of carbon dioxide to changes in cloudiness: results from two North American deciduous forests[J]. Journal of

Geophysical Research, 1999, **104**(D24): 31421-31434.

[15] Kudish A I, Ianetz A. Analysis of daily clearness index, global and beam radiation for Beer Sheva, Israel: partition according to day type and statistical analysis[J]. Energy Conversion and Management, 1996, **37**(4): 405-416.

[16] Saunders P M. Shadowing on the ocean and the existence of the horizon[J]. Geophysical Research, 1967, **72**(18): 4643-4649.

[17] 俞宏, 蔡启铭, 吴敬禄. 太湖水体吸收系数与散射系数的特征研究[J]. 水科学进展, 2003, **14**(1): 46-49.

[18] 祝令亚, 王世新, 周艺, 等. 应用 MODIS 监测太湖水体叶绿素 a 浓度的研究[J]. 遥感信息, 2006, (2): 25-28.

[19] Hamliton D P, Mitchell S F. An empirical model for sediment resuspension in shallow lakes[J]. Hydrobiologia, 1996, **317**(3): 209-220.

[20] Carper G L, Bachmann R W. Wind resuspension of sediments in a prairie lake[J]. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 1984, **41**(12): 1763-1767.

[21] 逄勇, 颜润润, 余钟波, 等. 风浪作用下的底泥悬浮沉降及内源释放量研究[J]. 环境科学, 2008, **29**(9): 2456-2464.

[22] Xiao W, Liu S D, Wang W, *et al*. Transfer coefficients of momentum, heat and water vapour in the atmospheric surface layer of a large freshwater lake[J]. Boundary-Layer Meteorology, 2013, **148**(3): 479-494.

[23] 陈永根, 刘伟龙, 韩红娟, 等. 太湖水体叶绿素 a 含量与氮磷浓度的关系[J]. 生态学杂志, 2007, **26**(12): 2062-2068.

[24] 何俊, 谷孝鸿, 刘国锋. 东太湖水生植物及其与环境的相互作用[J]. 湖泊科学, 2008, **20**(6): 790-795.

[25] Stumpf R P, Frayer M L, Durako M J, *et al*. Variations in water clarity and bottom albedo in Florida Bay from 1985 to 1997[J]. Estuaries, 1999, **22**(2): 431-444.

[26] 张运林, 秦伯强, 陈伟民, 等. 太湖水体透明度的分析、变化及相关分析[J]. 海洋湖沼通报, 2003, (2): 30-36.

# HUANJING KEXUE

Environmental Science (monthly)

Vol. 36 No. 10

Oct. 15, 2015


## CONTENTS


Source Contribution Analysis of the Fine Particles in Shanghai During a Heavy Haze Episode in December, 2013 Based on the Particulate Matter Source Apportionment Technology ····· LI Li, AN Jing-yu, YAN Ru-sha (3543)

Transformation Mechanism and Sources of Secondary Inorganic Components in $PM_{2.5}$ at an Agriculture Site (Quzhou) in the North China Plain in Summer ····· CHEN Shi-yi, ZENG Li-min, DONG Hua-bin, *et al.* (3554)

Pollution Level and Sources of Organic Phosphorus Esters in Airborne $PM_{2.5}$ in Chengdu City ····· YIN Hong-ling, LI Shi-ping, YE Zhi-xiang, *et al.* (3566)

Simulation Study of the Emission of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Sugar Alcohols from Biomass Burning ····· HUANG Shuai, HUANG Xin-yi, WU Shui-ping, *et al.* (3573)

Characteristics and Parameterization for Atmospheric Extinction Coefficient in Beijing ····· CHEN Yi-na, ZHAO Pu-sheng, HE Di, *et al.* (3582)

Photocatalytic Degradation of Gaseous Toluene by a Photo-Fenton Reaction ····· ZHENG Si-can, CHEN Tian-hu, LIU Hai-bo, *et al.* (3590)

Emission of PCDD/Fs from Crematories and Its Influencing Factors ····· YIN Wen-hua, YU Xiao-wei, HAN Jing-lei, *et al.* (3596)

Odor Emission Characteristics from Biochemical Treatment Facilities of Kichen Waste in China ····· ZHANG Yan, WANG Yuan-gang, LU Zhi-qiang, *et al.* (3603)

Temporal and Spatial Characteristics of Lake Taihu Surface Albedo and Its Impact Factors ····· CAO Chang, LI Xu-hui, ZHANG Mi, *et al.* (3611)

Remote Sensing Inversion of Diffuse Attenuation Coefficient in Lake Taihu Based on the GOCI Images ····· WANG Shan-shan, LI Yun-mei, WANG Qiao, *et al.* (3620)

Porewater Dissolved Methane in *Cyperus malaccensis* Marshes Along Salinity Gradient in the Minjiang River Estuary ····· YANG Ping, ZHANG Zi-chuan, DU Wei-ning, *et al.* (3633)

Stable Isotopes Characters of Soil Water Movement in Shijiazhuang City ····· CHEN Tong-tong, CHEN Hui, HAN Lu, *et al.* (3641)

Seasonal Variations in Vertical Profile of Hg Species and the Influential Factors in Changshou Reservior ····· BAI Wei-yang, ZHANG Cheng, TANG Zhen-ya, *et al.* (3649)

Nutrient Characteristics and Nitrogen Forms of Rhizosphere Soils Under Four Typical Plants in the Littoral Zone of TGR ····· WANG Xiao-feng, YUAN Xing-zhong, LIU Hong, *et al.* (3662)

Exchange Fluxes and Coupling Relationship of Dissolved Inorganic Carbon and Dissolved Organic Carbon Across the Water-Sediment Interface in Lakes ····· WANG Wei-ying, LÜ Chang-wei, HE Jiang, *et al.* (3674)

Mass Transport in Porous Sediments During a Turbulent Disturbance ····· LI Shao-long, CHEN Dao-yi (3683)

Characterization of Pollutant Wash-off in the Urban Stormwater ····· WU Jun-liang, REN Yu-fen, WANG Xue-mei, *et al.* (3691)

Research of the Stormwater Runoff and Pollution Characteristics in Rural Area of Yuhang District, Hangzhou ····· DUAN Sheng-hui, ZHAO Yu, SHAN Bao-qing, *et al.* (3697)

Formation and Variation of Brominated Disinfection By-products in A Combined Ultrafiltration and Reverse Osmosis Process for Seawater Desalination ····· YANG Zhe, SUN Ying-xue, SHI Na, *et al.* (3706)

Effect of Natural Organic Matter and Electrolytes on the Aggregation of $C_{60}$ Nanoparticles in Aquatic Systems ····· FANG Hua, JING Jie, YU Jiang-hua, *et al.* (3715)

Efficiency of Sediment Amendment with Zirconium-Modified Kaolin Clay to Control Phosphorus Release from Sediments in Heavily Polluted Rivers ····· WANG Hong, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, *et al.* (3720)

Transformation of Nitrogen Nutrients in the Urban Sewage Pipe Network ····· JIN Peng-kang, JIAO Ding, REN Wu-ang (3730)

Application of Micro-aerobic Hydrolysis Acidification in the Pretreatment of Petrochemical Wastewater ····· ZHU Chen, WU Chang-yong, ZHOU Yue-xi, *et al.* (3738)

Efficacy of $A^2$/O-MBR Combined Process in Wastewater Treatment and the Characteristics of Membrane Fouling ····· WANG Xu-dong, MA Ya-bin, WANG Lei, *et al.* (3743)

Effect of High Ammonium on Nitrogen Removal in an Partial Nitritation-ANAMMOX Process with Reflux System ····· LI Xiang, CUI Jian-hong, YUAN Yan, *et al.* (3749)

Reductive Dechlorination of Trichloroethylene by Benzoate-Enriched Anaerobic Cultures ····· LI Jiang-wei, YANG Xiao-yong, HU An-yi, *et al.* (3756)

2,4,6-Trichlorophenol Mineralization Promoted by Anaerobic Reductive Dechlorination of Acclimated Sludge and Extracellular Respiration Dechlorination Pathway ····· SONG Jia-xiu, LI Ling, SHENG Fan-fan, *et al.* (3764)

Short or Long Term Influence of Phenol on Nitrogen Removal Efficiency of ANAMMOX Sludge ····· YANG Peng-bing, LI Xiang, HUANG Yong, *et al.* (3771)

Process Optimization of Aerobic Granular Sludge Continuous-Flow System for the Treatment of Low COD/N Ratio Sewage ····· LU Lei, XIN Xin, LU Hang, *et al.* (3778)

Long-Term Inhibition of FNA on Aerobic Phosphate Uptake and Variation of Phosphorus Uptake Properties of the Sludge ····· MA Juan, LI Lu, YU Xiao-jun, *et al.* (3786)

Performance and Factors Analysis of Sludge Dewatering in Different Wastewater Treatment Processes ····· LIU Ji-bao, LI Ya-ming, LÜ Jian, *et al.* (3794)

Effect of Residual Hydrogen Peroxide on Hydrolysis Acidification of Sludge Pretreated by Microwave -$H_2O_2$-Alkaline Process ····· JIA Rui-lai, LIU Ji-bao, WEI Yuan-song, *et al.* (3801)

Vertical Distribution Characteristics of Typical Forest Soil Organic Nitrogen in Dawei Mountain ····· DING Xian-qing, MA Hui-jing, ZHU Xiao-long, *et al.* (3809)

Effects of Different Land Uses on Soil Active Organic Carbon and Nitrogen Fractions in Jinyun Mountain ····· QI Xin, JIANG Chang-sheng, HAO Qing-ju, *et al.* (3816)

Control of Soil Nutrient Loss of Typical Reforestation Patterns Along the Three Gorges Reservoir Area ····· WU Dong, HUANG Zhi-lin, XIAO Wen-fa, *et al.* (3825)

Effects of Slope Position and Soil Horizon on Soil Microbial Biomass and Abundance in Karst Primary Forest of Southwest China ····· FENG Shu-zhen, SU Yi-rong, ZHANG Wei, *et al.* (3832)

Effects of Different Plantation Type on the Abundance and Diversity of Soil Microbes in Subtropical Red Soils ····· SHEN Bing-jie, ZHU Zhen-ke, YUAN Hong-zhao, *et al.* (3839)

Accumulation of Mercury in Soil-maize System of Non-ferrous Metals Smelting Area and Its Related Risk Assessment ····· JI Xiao-feng, ZHENG Na, WANG Yang, *et al.* (3845)

Effects of Different Modifier Concentrations on Lead-Zinc Tolerance, Subcellular Distribution and Chemical Forms for Four Kinds of Woody Plants ····· CHEN Yong-hua, ZHANG Fu-yun, WU Xiao-fu, *et al.* (3852)

Isolation, Purification and Identification of Antialgal Activity Substances of Ethyl Acetate Extracts from the Submerged Macrophytes *Potamogeton crispus* ····· SUN Ying-ying, SU Zhen-xia, PU Yin-fang, *et al.* (3860)

Distribution Characteristics and Potential Risk of CBs in Aquatic Organisms from Typical Epidemic Areas of Schistosomiasis Prevalence ····· LI Kun, ZHAO Gao-feng, ZHOU Huai-dong, *et al.* (3866)

Application of Whole-cell Biosensor ADP1_pWHlux for Acute Toxicity Detection in Water Environment ····· TANG Hui, SONG Yi-zhi, JIANG Bo, *et al.* (3872)

Application of Rainbow Trout CYP1 Gene Expression Patterns in Gill and Liver for Haihe River Bio-monitoring ····· GAO Kai, YAN Pei, TAN Cui-ling, *et al.* (3878)

Toxic Effect of Nano-ZnO in Liver of Zebrafish ····· LIU Lin, ZHAO Qun-fen, JIN Kai-xing, *et al.* (3884)

Acute Toxicity of *Coptis chinensis* Rhizome Extracts to *Daphnia carinata* ····· CHEN Ya-nan, YUAN Ling (3892)

Adsorption-desorption Characteristics of Fermented Rice Husk for Ferrous and Sulfur Ions ····· XIE Xiao-mei, LIAO Min, HUA Jia-yuan, *et al.* (3896)

Application of Stir Bar Sorptive Extraction and Gas Chromatograph Mass Spectrometer to the Phthalic Acid Esters Analysis in Seawater ····· GAO Chen-chen, LI Feng-min, LU Lun, *et al.* (3906)

Experimental Conditions and Reliability Analysis of Results of COD Components ····· LI Zhi-hua, ZHANG Yin, HAN Xing, *et al.* (3913)

Method for Simultaneous Determination of 11 Veterinary Antibiotics in Piggery Wastewater and Sludge and Its Application in Biological Treatment ····· DING Jia-li, LIU Rui, ZHENG Wei, *et al.* (3918)

Research Progress in Technology of Using Soil Micro-organisms to Generate Electricity and Its Potential Applications ····· DENG Huan, XUE Hong-jing, JIANG Yun-bin, *et al.* (3926)

# 《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　刘　毅　汤鸿霄　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）

2015 年 10 月 15 日　第 36 卷　第 10 期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

（Monthly　Started in 1976）

Vol. 36　No. 10　Oct. 15, 2015

| | | | |
|---|---|---|---|
| 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）<br>北京市环境保护科学研究院<br>清 华 大 学 环 境 学 院 | **Co-Sponsored** by | Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection<br>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<br>北京市 2871 信箱（海淀区双清路 18 号，邮政编码：100085）<br>电话：010-62941102，010-62849343<br>传真：010-62849343<br>E-mail：hjkx@ rcees. ac. cn<br>http://www. hjkx. ac. cn | **Edited** by | The Editorial Board of Environmental Science（HUANJING KEXUE）<br>P. O. Box 2871, Beijing 100085, China<br>Tel：010-62941102, 010-62849343; Fax：010-62849343<br>E-mail：hjkx@ rcees. ac. cn<br>http://www. hjkx. ac. cn |
| 出　　版 | 科　学　出　版　社<br>北京东黄城根北街 16 号<br>邮政编码：100717 | **Published** by | Science Press<br>16 Donghuangchenggen North Street,<br>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<br>电话：010-64017032<br>E-mail：journal@ mail. sciencep. com | **Distributed** by | Science Press<br>Tel：010-64017032<br>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<br>（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**：120.00 元　　**国外发行代号**：M 205

国 内 外 公 开 发 行