

## 太湖水体理化指标在夏季短时间尺度上的分层及其控制因素\*

赵林林<sup>1,2</sup>, 朱梦圆<sup>2</sup>, 冯龙庆<sup>3</sup>, 刘笑菡<sup>2</sup>, 朱广伟<sup>2\*\*</sup>, 陈元芳<sup>1</sup>, 秦伯强<sup>2</sup>

(1: 河海大学水文水资源学院, 南京 210098)

(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)

(3: 南京农业大学资源与环境学院, 南京 210095)

**摘要:** 通过连续9d(2010年7月24日至2010年8月1日)对太湖水体理化指标垂向分层的高频率观测,揭示太湖多指标垂向分层规律. 观测表明:(1)太湖中各水质指标频繁出现分层现象,但不稳定;(2)分层的主要控制因素包含气温的日变化、蓝藻水华堆积与风浪扰动等;(3)气温和太阳辐射日变化影响水温分层,水温垂向变幅可达3.94℃,进而影响其他水质理化指标分层;(4)蓝藻水华堆积是影响水体理化指标垂向分层最强烈的因子,堆积发生时水体各理化指标垂向分层明显,垂向变幅溶氧达8.67mg/L,溶解氧饱和度达122.8%,电导率达48μC/cm,pH达1.49,叶绿素达9.1μg/L,浊度达26.5NTU;(5)随着风速的增加,除浊度外其他指标分层明显减弱,在大风期水体理化指标基本无分层现象,小风期则容易形成分层,但对分层的影响程度小于蓝藻水华堆积. 研究表明,尽管太湖是大型浅水湖泊,长时间的分层不会形成,但是水体各理化指标昼夜或1-2d的短时期尺度垂向分层现象经常出现,对水生物、水气界面和水土界面物质交换的影响不容忽视,在湖泊水质高频观测等调查方案设计中应充分考虑.

**关键词:** 浅水湖泊; 水体理化指标; 垂向分层; 蓝藻水华; 风浪扰动

## Stratification and its driving factors of water physicochemical variables in large, shallow Lake Taihu

ZHAO Linlin<sup>1,2</sup>, ZHU Mengyuan<sup>2</sup>, FENG Longqing<sup>3</sup>, LIU Xiaohan<sup>2</sup>, ZHU Guangwei<sup>2</sup>, CHEN Yuanfang<sup>1</sup> & QIN Boqiang<sup>2</sup>

(1: *College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, P. R. China*)

(2: *State Key Laboratory of Lake Science and Environment, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, P. R. China*)

(3: *College of Resources and Environmental Sciences, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, P. R. China*)

**Abstract:** A nine-day observation on the process of vertical stratification of physicochemical variables was taken from 24th July to 1st August, 2010 in Lake Taihu, a large shallow lake of China. Frequent stratification processes occurred during the 9 days. But the stratifying state was unstable, and normally last less than 1 day. The main factors causing stratification were water temperature and its diel variation, cyanobacterial bloom scum and wind-induced wave disturbance. The vertical difference of water temperature may reached 3.94℃, which was mainly influenced by diel variation of air temperature and solar radiation. And the stratification of water temperature was the basic factor causing the stratification of dissolved oxygen, electric conductivity, and pH. Cyanobacterial bloom scum could cause the strongest stratification, which could cause vertical difference of 8.67mg/L of dissolved oxygen, 48μC/cm of electric conductivity, 1.49 of pH, 9.1μg/L of chlorophyll-a and 26.5NTU of turbidity. Besides turbidity, stratification of physicochemical variables became weaker with the increase of wind speed. No stratification happened during strong wind period in which of wind speed over 6m/s, while it often happened during weak condition in which of wind speed less than 2m/s. The study indicated that, stratification processes could frequently short-term occurred in large shallow lakes, and might have potential influ-

\* 中国科学院知识创新工程重大交叉项目(KXCX1-YW-14)、国家自然科学基金重点项目(40730529)和美国国家自然科学基金项目(DBI-0639229)联合资助. 2010-09-13 收稿; 2010-12-20 收修改稿. 赵林林, 男, 1987年生, 硕士研究生; E-mail: zhaolinlinstudent@126.com.

\*\* 通讯作者; E-mail: gwzhu@niglas.ac.cn.

ences on the processes of biological activities and exchange on air-water interface and water-sediment interface.

**Keywords:** Shallow lakes; physicochemical variables; stratification; cyanobacterial bloom; wind-induced wave disturbance

作为一个流动性相对较差的水体单元,湖泊中各生态要素的时空分布不均是其基本特征,比如湖泊的温度分层现象<sup>[1]</sup>,浮游动物的垂直迁移分层<sup>[2]</sup>.湖泊水体理化指标,如水温、溶解氧、营养盐等的垂直分层对湖泊的生态系统产生至关重要的影响,是生命活动的基础,也是认识湖泊生态属性的基本参数.不同湖泊因其形态、气候、水文等背景的不同,理化指标分层特征差别很大.

由于风驱长度与水深的比值很大,对于大型浅水湖泊而言,强烈的水体混合作用是其基本属性<sup>[3]</sup>.也就是说,大型浅水湖泊的理化属性垂向分层是不稳定的,从湖泊分类上,也被定义为混合性湖泊.这导致在大型浅水湖泊的营养盐地球化学研究和生态学研究上,经常认为大型浅水湖泊水体是均一体<sup>[4]</sup>,大型浅水湖泊中不存在高度的空间异质性.

大型浅水湖泊水体理化性质的垂直分层尽管不稳定,但短期分层现象存在.在1960年太湖综合调查中,发现晴朗无风时,水温沿垂向分布会出现较大梯度,但不稳定,当出现风时随即消失<sup>[5]</sup>.1985年在太湖的观测也发现,水温存在频繁的垂向分层,表层、底层温差最大超过4℃<sup>[6]</sup>.张玉超等在太湖的观测也发现了1.5m水深区域频繁出现5℃以内的水温日分层现象,并对水底溶解氧含量产生明显的影响<sup>[7]</sup>.事实上,除了水温的日分层外,浅水湖泊的悬浮物浓度、藻类生物体质量,甚至营养盐浓度,都经常发现短期分层现象<sup>[8-10]</sup>.这种短期分层可能对湖泊的生态过程,如营养盐的内源释放过程和蓝藻水华过程,产生深远的影响.

但是,有关大型浅水湖泊的理化指标分层规律研究很不系统,大多数报道只针对单要素观测,驱动因子的研究也比较零散.本研究以太湖这一大型浅水湖泊为例,通过高频率、多参数的系统观测,揭示亚热带大型浅水湖泊水温、溶解氧、pH、浊度、电导率、叶绿素等的理化指标分层规律,并对气象因子同步监测,弄清湖水理化指标分层的特征及其控制因素,以为浅水湖泊理化指标观测方案制订等提供科学依据.

## 1 材料与方法

### 1.1 观测点概况

太湖为一个大型浅水湖泊,面积2338.1km<sup>2</sup>,最大水深3m,平均水深1.89m.本次观测地点位于太湖湖泊生态系统研究站栈桥顶端(120°12'48"N,31°25'09"E),距离岸边240m,观测期间观测点处水深约为2.3m.

### 1.2 观测方法

观测时间为2010年7月24日至2010年8月1日,共9d.

水质监测采用YSI6600V2型多参数水质仪(美国Yellow Spring Instrument公司)分层测量观测点水柱垂向理化指标,垂向剖面观测点为水下0.1、0.2、0.3、0.5、0.7、1.0、1.3、1.5、1.7、2.0、2.1、2.2、2.3m.每日观测频率为5-7次,时间为6:00、8:30、11:30、14:00、17:30、19:30、22:00,测量指标包含水温(WT)、溶解氧(DO)、溶解氧饱和度(DOS)、电导率(EC)、酸碱度(pH)、叶绿素(CHL)、浊度(TUR)、盐度(SAL).风速(WS)、气温(AT)数据来自距观测点100m的全球湖泊生态观测网络(GLEON)站点Vaisala WXT520自动气象站,数据采集频率为10min一次.

整个采样过程中观测点水体都有明显微囊藻水华颗粒存在,但多数时候没有表层遮盖.水华状况记录标准为:观测点方圆几十米未见表层水华的记为1级,有明显条带状分布但未完全遮盖的记为2级,大面积表层遮盖的记为3级.

### 1.3 数据统计与分析方法

首先将各时间点观测的理化指标求取加权平均值,求取加权平均值的原理为水化指标为连续变量,认为相距很近的两垂向点间的数据呈线性变化,加权方法以各测定水层所代表水层厚度为权重因子.其次求出每组数据的均方差,从而得到每组数据的离均系数,也称为相对均方根误差,公式为 $C_v = \sigma/x$ ( $\sigma$ 为系列均方差, $x$ 为系列均值).

将本次观测中各指标波动强度分为三类:平稳、缓变、陡变.分类方法根据各指标离均系数的大小,通过聚类分析,得到从小到大的  $C_r1$ 、 $C_r2$ 、 $C_r3$  三类.由于各观测指标垂向上均为有规律渐变,而不是杂乱无章的系列,因此  $C_r1$ 、 $C_r2$ 、 $C_r3$  即代表垂向差异较小、中等、显著,分别定义为平稳、缓变、陡变.

## 2 观测结果

观测期间各指标水柱平均值的变化过程见图 1,同时附上了误差线.由于观测期内水体垂向盐度(SAL)基本稳定在 0.25%,说明该指标在太湖中基本没有变化,故下文不涉及到该指标的分析.气温(AT)、风速(WS)的观测频次为 10min,藻蓝素(ALG)、水温(WT)、溶氧饱和度(DOS)、电导率(EC)、酸碱度(pH)、叶绿素(CHL)、浊度(TUR)为观测时间点水柱加权平均值.藻堆积数值 1、2、3,分别代表水华 1、2、3 级.

观测期间,典型的水动力扰动过程和水华堆积过程以灰度条的形式标示.其中,水华大量堆积过程有 3 次,分别为过程 III、IV 和 VI,时间分别为 7 月 28 日、7 月 29 日和 8 月 1 日(图 1).关于太湖水动力扰动与风速的关系,参照秦伯强等提出的标准<sup>[11]</sup>,即风速大于 6m/s 的状况定义为大风期,会明显扰动湖底底泥;风速小于 2m/s 的状况定义为小风期,不会扰动湖底底泥;而风速介于 2-6m/s 之间的状况定义为中风期,只能微弱扰动底泥,风速的观测高度为水面上 6m.明显的大风期为过程 I,时间为 7 月 25 日至 7 月 27 日,该段时间风速频繁超过 6m/s;小风过程为过程 II 和 V,时间为 7 月 28 日和 8 月 1 日(图 1).

过程 II 为大风期过后的小风期,其弱风状态期维持一段时间后在过程 III 中出现了明显藻堆积情况(图 1),验证了有关稳定大风过后的小风天气容易出现藻堆积的现象<sup>[12]</sup>.水温、溶氧饱和度、电导率的日变化周期现象明显,因为水温具有日周期性,同时水温的变化又能直接或间接影响其他指标,如 pH、电导率、溶解氧等(图 1).这一现象与 1960 年、1987 年太湖及其他相关观测结果一致<sup>[5-7]</sup>.

以较少分层观测的结果来分析水体垂向的差异性略显粗糙,应以整个水柱为研究对象进行垂直变化的研究.本次实验垂向点布设较密,2.3m 的水深中垂向观测点 13 个,很好地反映水柱垂向的变化趋势,计算所得的变幅、离均系数(图 2)也应具有更好的代表性.观测期间水温、溶解氧饱和度、电导率、pH、叶绿素及浊度均值、垂向最大变幅及最小变幅表明,水体各理化指标变幅的最大值、最小值之间差距较大,证明了本次观测既捕捉到了水体垂向变化较大的情况,也捕捉到了基本无变化的情况(表 1).

$C_r$  由起涨点到峰值再到落点记为一次波动过程,代表着该指标出现了一次从不分层-分层-不分层的过程由图 2 可以发现观测点处各指

标的垂向分层比较频繁.浊度的分层频率最高,叶绿素也很频繁,观测 9 天中分层变化过程都达到了 7 次以上,水温、电导率、pH、溶解氧等分层变化过程也在 5 次以上.这说明太湖这种大型浅水湖泊由于气象条件、水华等问题,垂向上理化指标分层的情况相当普遍.

对于水深 2m 左右的浅水湖,大部分情况下水体的垂向变化较小.当风速较小同时出现藻堆积时,即过程 III、IV,水温、溶氧饱和度、电导率、酸碱度的误差线较大,离均系数出现峰值,说明在此情况下水体这些指标垂向离散程度较大.叶绿素的数据也基本反应上述规律,但不明显;浊度与该外部环境的关系较差.在大风期,即过程 I,水温、溶氧饱和度、电导率、酸碱度的误差线以及离均系数都很小,叶绿素的误差线与离均系数的误差线及离均系数相对其他时刻也较小.而浊度难以体现上述规律.在小风期且未发生藻堆积时,即过程 V,水温、溶氧饱和度、电导率、酸碱度、叶绿素误差线及离均系数具有中等的大小,说明垂向还是具有一定的变化,而浊度依然与相关指标关系较差(图 1 和图 2).

表 1 各理化指标变幅及其相对变幅\*

Tab. 1 Mean value and range of physicochemical variables in terms of vertical change

指标	均值	max( $\Delta$ )	max( $\Delta\%$ )	min( $\Delta$ )	min( $\Delta\%$ )
水温( $^{\circ}\text{C}$ )	30.85	3.94	13.00	0.02	0.00
DOS	125.82	128.90	102.00	0.80	1.00
EC( $\mu\text{C}/\text{cm}$ )	579.32	48.00	8.00	0.00	0.00
pH	8.84	1.49	17.00	0.00	0.00
CHL( $\mu\text{g}/\text{L}$ )	8.38	13.30	159.00	0.80	10.00
TUR(NTU)	42.17	189.40	449.00	3.20	8.00

\* max( $\Delta$ )、max( $\Delta\%$ ) 分别表示 60 次观测中垂向变幅与垂向相对变幅的最大值, min( $\Delta$ )、min( $\Delta\%$ ) 分别表示最小值.

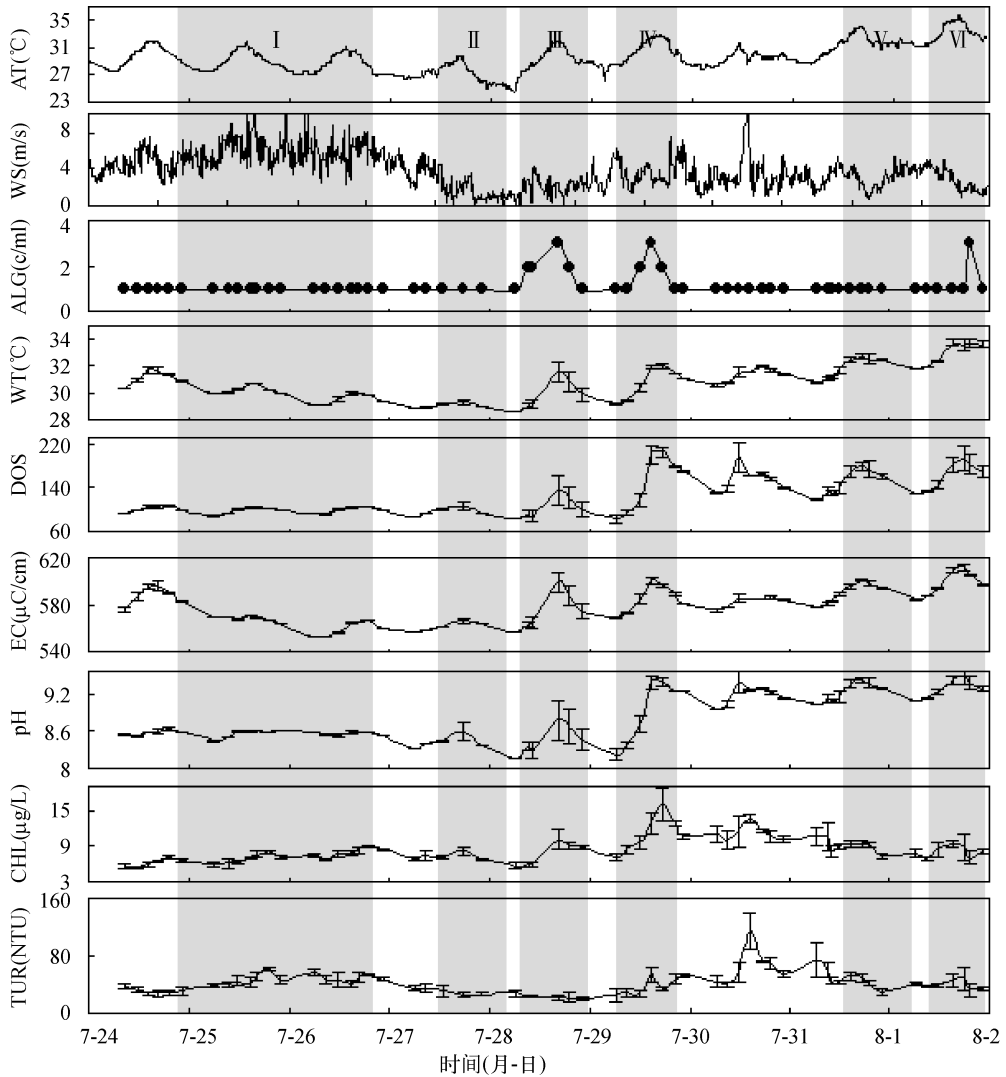


图 1 水体理化指标均值以及误差线

Fig. 1 Mean value and its relative error of physicochemical variables during the observatory period

### 3 讨论

#### 3.1 水体各理化指标分层程度的比较

从同时刻的各指标的离均系数来看,各水质理化指标垂向离散程度的大小为:浊度 > 叶绿素 > 溶解氧 = 溶解氧饱和度 > 酸碱度 > 水温 > 电导率,盐度(无变化).并且酸碱度、水温、电导率、盐度相对变化幅度比其他 4 个指标较小,溶解氧、溶解氧饱和度次之,浊度的离散程度较大(图 2).

#### 3.2 各种控制因素对水体理化指标分层的影响

3.2.1 水温的分层及其日变化对水体理化指标分层的影响 某些指标  $C_r$  的变化趋势比较相近(图 2),故对不同指标离散程度之间进行相关性分析.将上述 8 组水体理化指标的  $C_r$  数据运用 SPSS 软件做相关性分析,由相关系数大小以及  $P$  值可以看出,溶解氧与溶解氧饱和度的离均系数极显著相关;电导率、pH、水温的离均系数相互之间极显著相关;叶绿素的离均系数与水温、电导率、pH 的离均系数之间存在相关关系,但不是极显著相关关系;浊度与其他指标的相关性不显著(表 2).故可知:溶解氧与溶解氧百分比具有相同的垂向

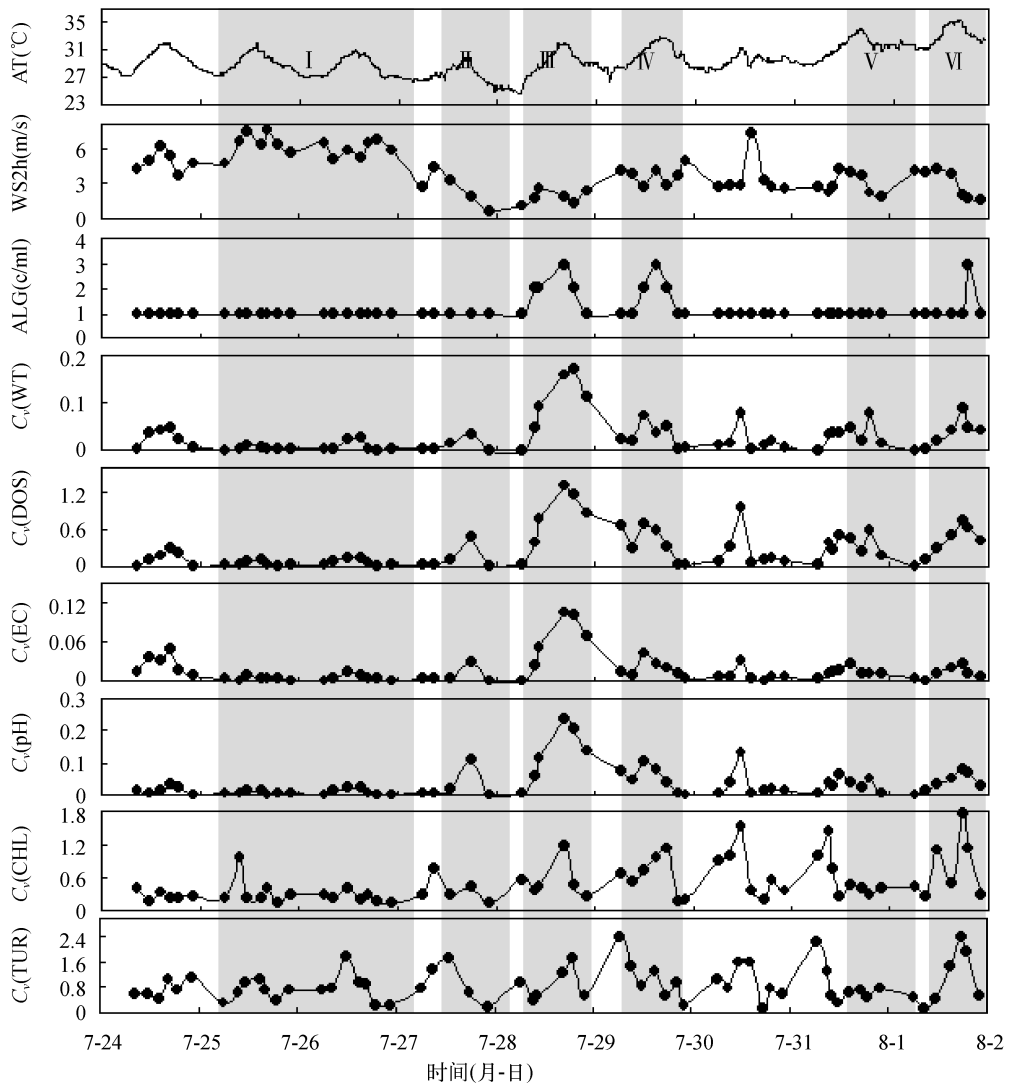


图2 水体各理化指标垂向离均系数变化(WS2h 为观测时前两个小时内风速平均值)

Fig. 2 Temporal change of vertical relative error of physicochemical variables

分层特性;电导率,酸碱度,水温之间具有非常相近的垂向分层特性,前两个指标与这三个指标之间也存在着一定的相近垂向分层特性.水温离散程度与浊度以外的指标之间也存在着比较好的相关性,特别是与溶解氧、电导率、酸碱度的关系密切.验证了水温的垂向分层是否对水体其他指标有影响.张玉超等的研究发现,水温分层导致水体垂向混合作用减弱,使得溶解氧也产生了分层,对于出现温度分层的水体来说,温度分层对水体溶解氧的影响尤为重要<sup>[7, 13]</sup>.湖水温度的变化对溶解氧影响十分明显<sup>[14]</sup>.水温变化与叶绿素 a、溶解氧的垂向分布呈显著正相关<sup>[15]</sup>.因此,水温分层是大多数水质指标分层的基础.

夏季湖水温度一般在白天成正温层分布.早上 5:00 - 6:00 时及晚上 18:00 - 19:00 时水温几乎成同温层分布<sup>[5]</sup>.一天内不同时间水温垂向分布的不同,说明了浅水型湖泊水温存在着日成层现象<sup>[16]</sup>.研究观测期内各指标分层的日变化过程很必要,将不同天同一时间点的离均系数求平均值(图 3),在观测中发现,凌晨及夜间水体各理化指标垂向变化较小,表现为离均系数较小,而在中午时段各指标垂向变化增大,表现为离均系数较大.可得出在夜间水体各理化指标的垂向差异性并不大.

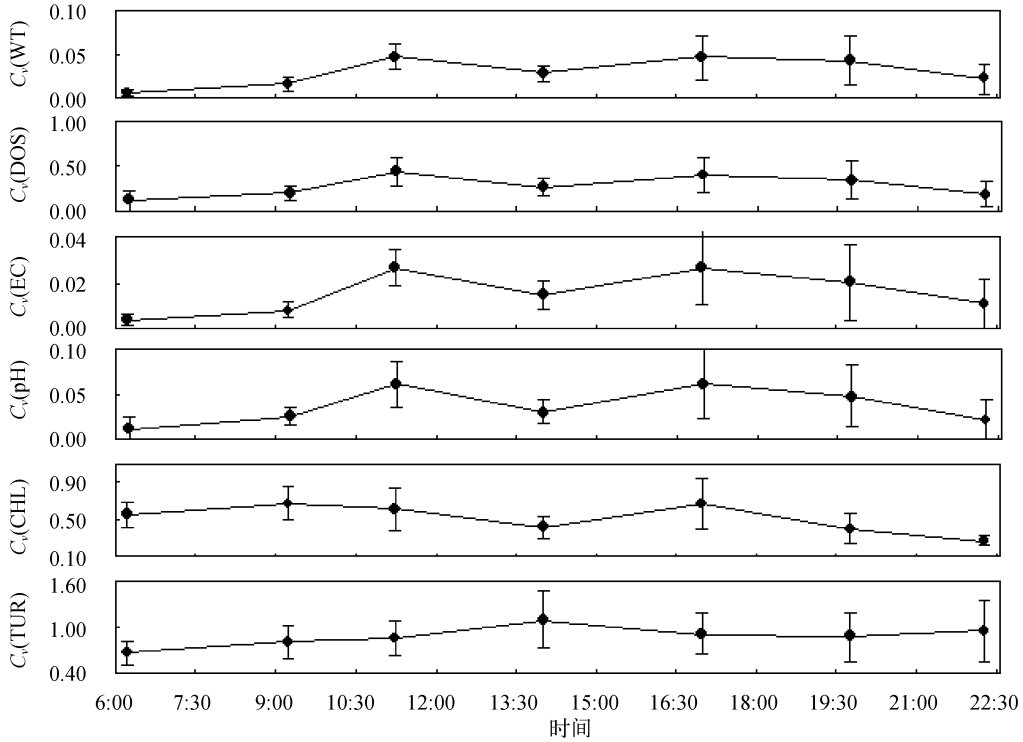


图3 各理化指标分层的日变化过程

Fig. 3 Diel variation of standard error of physicochemical variables

表2 各水质理化指标离均系数相关性分析

Tab. 2 Correlation analysis of standard error of physicochemical variables

相关系数	WT	DO	DOS	EC	pH	CHL
DO	0.92 *					
DOS	0.93 *	0.99 *				
EC	0.92 *	0.80 *	0.82 *			
pH	0.92 *	0.95 *	0.96 *	0.88 *		
CHL	0.35 **	0.49 *	0.48 *	0.20 **	0.40 **	
TUR	0.24	0.32 **	0.35 **	0.18	0.30 **	0.52 *

\* 表示  $P$  值  $< 0.001$ , 极显著相关; \*\* 表示  $P$  值  $< 0.02$ , 显著相关.

3.2.2 藻堆积对水体理化指标分层的影响 在一阵风浪过后,藻类的生长速度明显增加,如果片刻之后刮起阵阵轻风,则很容易引起藻类在迎风岸边大量聚集,形成明显水华<sup>[17]</sup>.如7月28日、29日出现的密集藻堆积.由于各指标在夜间分层不明显,故构造了剔除夜间数据的系列藻蓝素与各指标垂向离散程度的关系(图4).

随着藻蓝素的增加,水体各理化指标离均系数的负对数均出现且

呈减少趋势,说明了蓝藻水华堆积使得水体各理化指标垂向差异变大,分层特性增强(图4).过程II为风速小未发生藻堆积的过程,过程III为风速小但发生了藻堆积的过程,同时观察水体各理化指标的误差线(图1)以及离均系数(图2)发现,过程III各理化指标的误差线以及离均系数均明显大于过程II,故可知藻堆积对水体各理化指标的影响明显大于小风速的情况.过程III水体各理化指标的误差线以及离均系数均比观察期内其他任何时间高出许多,故可知在过程III期间,水体各指标在垂向上均表现出了很大的差异性,证明了藻堆积对于水体垂向分层的显著贡献.当水体表层被大量蓝藻堆积时,光线无法透过水层照射到水体底部,使得水体水温垂向上产生很大差异,水体垂向混合产生了障碍,再结合水温分层对其他理化指标分层的影响,就不难解释水体各理化指标分层对发生藻堆积的剧烈响应.

3.2.3 风浪对水体理化指标分层的影响 浅水型湖泊,水体易受风混合作用的影响,垂向水体之间交换剧烈.水动力过程对理化环境因子会产生很大的影响<sup>[18]</sup>.湖面风速的大小及其变化剧烈程度对分层现象的形成有重要作用.对太湖而言,在晴朗有风时,由于风力而引起强烈扰动,湖水全面混合,湖水温度很快趋于一致,垂线的温度梯度小,有时还出现同温状态;在晴朗无风时,水温沿垂线分布才出现较大梯度<sup>[5]</sup>.同样由于夜间水体各指标无分层,故构造了剔除夜间的系列(图5).从图中可以看出,随着风浪扰动的加强,各指标的分层程度减弱.

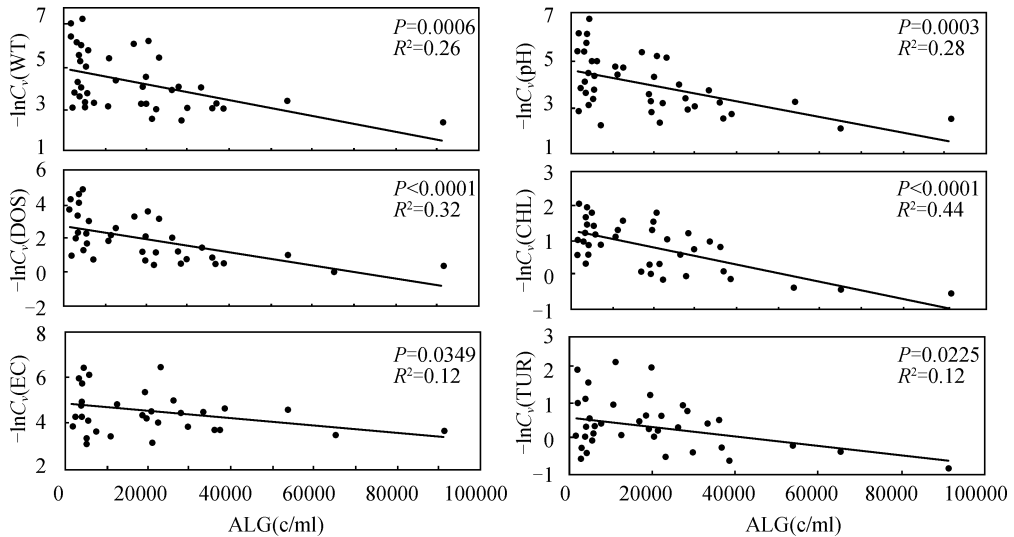


图4 藻蓝素(ALG)与水体各理化指标垂向分层之间的关系

Fig. 4 Relationship between ALG and standard error of physicochemical variables

## 4 结论

通过对太湖这一大型浅水湖泊的水质指标垂向分层观测研究,可以得出如下结论:

(1) 太湖中浊度、叶绿素、溶解氧、pH、水温、电导率等水体理化指标均存在频繁短暂的垂向分层现象.各指标垂向变化离散程度的大小关系式为:浊度 > 叶绿素 > 溶解氧 = 溶解氧百分率 > 酸碱度 > 水温 > 电导率,盐度(无变化).

(2) 对水体指标的垂向分层的控制因素包含气温日变化、蓝藻水华堆积与风浪扰动等;

(3) 气温和太阳辐射日变化影响水温分层,水温垂向变幅可达 $3.94^{\circ}\text{C}$ ,进而影响其他理化指标分层.溶解氧、电导率、酸碱度、水温之间具有相近的垂向分层特性,水温垂向分层对前3个指标的垂向分层影响显著.凌晨及夜间水体各理化指标分层不明显,而在中午时段各指标分层明显.说明水温的分层及其日变化影响着水体其它各理化指标垂向分层.

(4) 观测期间,大量藻堆积的情况下水温垂向变幅达 $3.94^{\circ}\text{C}$ ,电导率达 $48\mu\text{C}/\text{cm}$ ,pH达1.49,这3个指标的变幅均处于各自整体系列中的最大值,溶氧垂向变幅达 $8.67\text{mg}/\text{L}$ ,溶氧饱和度达122.8%,其变幅在各自整体系列中为第二大,叶绿素变幅达 $9.1\mu\text{g}/\text{L}$ ,在叶绿素变幅整体系列中相对较大,浊度仅为26.5NTU,在浊度变幅整体系列中也处于中等的位置.说明藻堆积是影响太湖水体各理化指标垂向分层重要因素.

(5) 观测期间,大风情况下随着风速的增加除了浊度外,其他指标分层减弱,水温垂向变幅仅为 $0.11^{\circ}\text{C}$ ,溶氧为 $0.14\text{mg}/\text{L}$ ,溶氧饱和度为1.8%,电导率为 $1\mu\text{C}/\text{cm}$ ,pH为0.01,叶绿素为 $3.3\mu\text{g}/\text{L}$ ,而浊度达30NTU,除浊度外水体各层混合均匀.小风情况下,水温垂向变幅达 $1.38^{\circ}\text{C}$ ,溶解氧达 $7.26\text{mg}/\text{L}$ ,溶氧饱和度达106.5%,电导率达 $6\mu\text{C}/\text{cm}$ ,pH达0.59,叶绿素达 $6.70\mu\text{g}/\text{L}$ ,浊度达54NTU,在各自整体变幅系列中均较大.说明小风情况下,容易出现垂向分层.说明了风速大小也是影响太湖水体理化指标分层的重要因素.

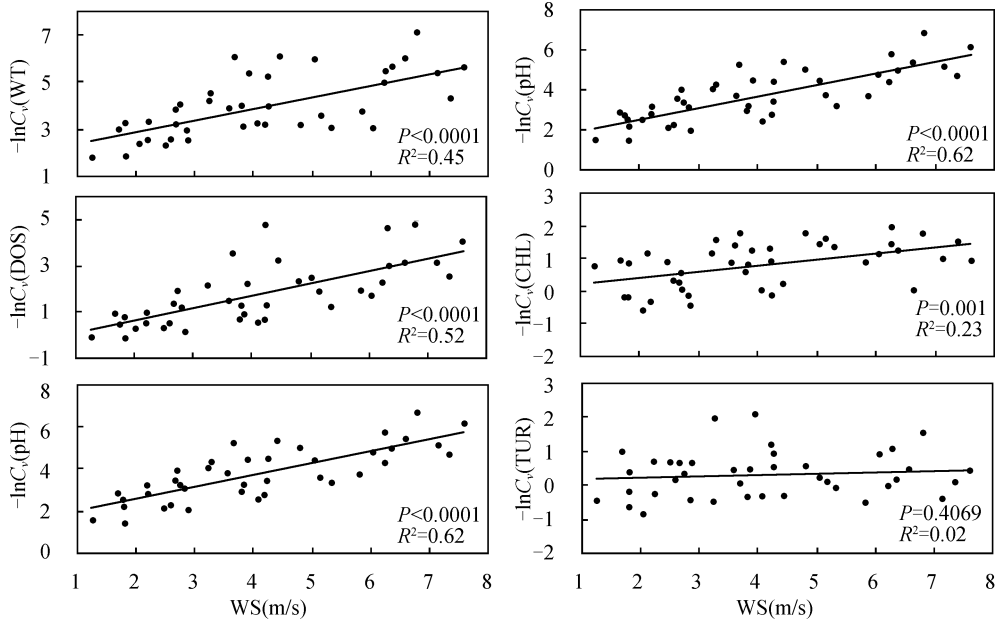


图5 风速与水体理化指标垂直分层强度的关系

Fig. 5 Relationship between wind speed and stratification of physicochemical variables

## 5 参考文献

- [ 1 ] Wetzel RG. Limnology - Lake and River Ecosystems (Third Edition). Academic Press, 2001: 71-92.
- [ 2 ] Wetzel RG, Likens GE. Limnological analyses (Second Edition). Springer-Verlag Press, 1991: 325-329.
- [ 3 ] Scheffern. Ecology of shallow lakes. Kluwer Academic Publishers, 2001: 33-41.
- [ 4 ] Nixdorf B, Deneke R. Why "very shallow" lakes are more successful opposing reduced nutrient loads. *Hydrobiologia*, 1997, **342/343**: 269-284.
- [ 5 ] 中国科学院南京地理研究所. 太湖综合调查初步报告. 北京: 科学出版社, 1965: 26-30.
- [ 6 ] 孙顺才, 黄漪平. 太湖. 北京: 海洋出版社, 1993: 90-94.
- [ 7 ] 张玉超, 钱新, 钱瑜等. 太湖水温分层现象的监测与分析. *环境科学与管理*, 2008, **33**(6): 117-121.
- [ 8 ] French TD, Petticrew EL. Chlorophyll *a* seasonality in four shallow eutrophic lakes (northern British Columbia, Canada) and the critical roles of internal phosphorus loading and temperature. *Hydrobiologia*, 2007, **575**: 285-299.
- [ 9 ] Zhu GW, Qin BQ, Gao G *et al.* Effects of hydrodynamics on phosphorus concentrations in water of Lake Taihu, a large, shallow, eutrophic lake of China. *Hydrobiologia*, 2007, **581**: 53-61.
- [ 10 ] 朱广伟, 秦伯强, 高光. 强弱风浪扰动下太湖的营养盐垂直分布特征. *水科学进展*, 2004, **15**(6): 775-780.
- [ 11 ] 秦伯强, 朱广伟, 张路. 大型浅水湖泊沉积物内源营养盐释放模式及其估算方法——以太湖为例. *中国科学(D辑; 地球科学)*, 2005, **35**: 33-44.
- [ 12 ] 高月香, 张永春. 水文气象因子对藻华爆发的影响. *水科学与工程学报*, 2006, **2**: 10-11.
- [ 13 ] 贺冉冉, 罗蕊薇, 朱广伟. 天目湖溶解氧变化特征及对内源氮释放的影响. *生态与农村环境学报*, 2010, **26**(4): 344-349.
- [ 14 ] 张运林, 陈伟民, 杨顶田. 天目湖热力学状况的监测与分析. *水科学进展*, 2004, **15**(1): 61-67.
- [ 15 ] 王建云, 普发贵. 抚仙湖垂直向水质状况及特征研究. *玉溪师范学院学报*, 2003, **19**(S1): 53-58.
- [ 16 ] 张玉超, 钱新, 石川忠晴等. 浅水型湖泊水温日分层现象的初步探讨. *四川环境*, 2008, **27**(3): 45-48.
- [ 17 ] 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. *湖泊科学*, 1997, **9**(2): 152-158.
- [ 18 ] 陈伟民, 陈宇炜, 秦伯强等. 模拟水动力对湖泊生物群落演替的实验. *湖泊科学*, 2000, **12**(4): 343-352.