

太湖日成层现象的监测与模拟研究*

张玉超 钱新 钱瑜 王勤耕 陆根法

(污染控制与资源化研究国家重点实验室, 南京大学环境学院, 江苏 南京 210093)

摘要 水温是湖泊重要的物理参数之一, 其结构特征对湖泊生态系统中的物理、化学和生物过程起着不容忽视的作用。以长期定点监测数据为基础, 分析了太湖水温结构特征, 证明了浅水型湖泊日成层现象的存在, 并利用一维 $k-\epsilon$ 紊流模型模拟研究了太湖日成层现象的水温垂直分布。

关键词 浅水型湖泊 日成层 $k-\epsilon$ 紊流模型 富营养化

Field measurement and model simulation of diurnal stratification in Lake Taihu Zhang Yuchao, Qian Xin, Qian Yu, Wang Qingeng, Lu Genfa. (State Key Laboratory of Pollution Control and Resource Reuse, School of the Environment, Nanjing University, Nanjing Jiangsu 210093)

Abstract: Vertical distribution of water temperature plays a vital role in the physical, chemical and biological processes of the lake. The long term lake water temperature and distribution were analyzed and evaluated; the results suggest that there has been diurnal stratification in Taihu Lake. A one-dimensional $k-\epsilon$ turbulence model was developed and employed for simulating the vertical temperature distribution; the predicted lake water temperatures at three levels (0.5, 1.0 and 1.5 m) below the water surface were in good agreements with the field measurements.

Keywords: shallow lake; diurnal stratification; $k-\epsilon$ turbulence model; eutrophication

水温是重要的湖泊物理学参数之一, 对湖泊水生生态系统的物理、化学及生物过程产生不容忽视的影响。因水温垂直方向上的差异而形成的温度成层是众多湖泊、水库和海湾常见的现象。

对于湖库而言, 温度成层将会限制紊流的上下混合运动, 受跃温层稳定性影响, 湖流也将呈现分层流动, 甚至会出现交叉流^[1]; 值得关注的是, 温度成层还将造成湖面与湖底之间水质上的差异。在湖底因有机物的降解造成溶解氧迅速减少, 而温度成层却阻碍了湖水表面溶解氧自上而下的补充, 湖底可能形成厌氧环境, 底泥中的氨氮、磷酸盐释放到水中, 一旦温度成层消失, 大量的氨氮、磷酸盐上升到湖水表面, 造成湖水中溶解氧的急剧降低, 同时也为湖水表面藻类的生长提供了大量的营养物质^[2-4]。因此, 对于富营养化湖泊, 温度成层现象将会加剧湖面藻类的非正常生长。

温度成层在深水型湖库中, 温差大、持续时间长, 称之为季节性分层现象, 是众多学者们公认的事实。而浅水型湖泊是否存在温度成层现象, 其对湖泊水生生态的影响程度尚缺乏相关研究。

笔者选择典型的浅水型湖泊——太湖作为研究对

象, 通过一段时间持续监测, 证明了水温日成层现象的存在, 分析了其出现的频次和特点, 并利用包含 $k-\epsilon$ 紊流模型的一维模型模拟了太湖的日成层现象。

1 现场监测

1.1 监测点布设

根据太湖的基本形状、湖岸地形地貌以及湖水富营养化程度, 将监测点布设在太湖北部靠近梅梁湾的中国科学院南京地理与湖泊研究所的太湖湖泊生态系统研究站(以下简称太湖站)附近。该站长期设有气象监测站, 且设有水质、水生生物的观测站和实验场, 有利于今后对日成层现象的深入研究。此外, 监测点地处太湖富营养化较严重的地区——梅梁湾湾口处, 水深为 2 m, 与太湖的平均水深一致, 借助于太湖站的实验栈道, 将监测仪器设置于栈道下, 避免了监测船舶等外界因素干扰。

监测点沿水深方向从湖水表面至湖底每隔 0.5 m 布设 1 点, 共布设 5 个监测点, 并同步监测气温、风速和风向等气象参数。

1.2 监测频次

2004 年 3 月 1 日至 8 月 10 日, 监测设备对水中

第一作者: 张玉超, 女, 1977 年生, 博士研究生, 主要从事环境规划与管理、水环境科学方面的研究。

* 教育部重点项目“湖泊水环境动态模拟系统研究”(No. 105079); 教育部博士点基金资助项目 (No. 20060284011)。

监测点开展每隔 10 min 1 次的 24 h 连续水温监测, 气象参数则每隔 1 h 监测 1 次(24 h 连续监测)。

1.3 监测仪器

采用美国 Onset 公司的 Tidbit 温度存储器, 该设备监测水温在 -5~37 ℃, 监测精度为 0.1 ℃。

2 温度结构分析

2.1 频率与持续时间

监测结果发现, 湖水表面和湖底存在温度差异, 其变化范围在 1~5 ℃, 持续时间不超过 1 d, 这表明太湖存在着日成层现象, 而且这种现象在夏季出现的频率远高于春季出现的频率。通过对监测期间温差超过 1 ℃ 的天数、持续时间统计分析可知, 出现日成层现象的天数从 3 月的 9 d 迅速上升为 7 月的 26 d, 累计出现时间也由 29.5 h 增加为 192.5 h。

2.2 傅立叶频谱分析

为了进一步论证日成层现象的存在, 采用傅立叶频谱方法分别分析了 4、5、8 月各 10 d 的监测数据, 见图 1。由图 1 可知, 在 4 月, 不同深度处的水温变化不具备典型的特征频率; 在 5 月, 水面下 0.5 m 处出现了典型的特征频率 0.041 h⁻¹, 即变化周期为 24 h, 而水面下 1.0、1.5 m 处的水温特征频率不明显; 在 8 月, 所有不同深度的水温均呈现 0.041 h⁻¹ 的特征频率, 表明太湖确实存在着日成层现象。

2.3 温度结构

傅立叶频谱分析说明 8 月的监测数据更具有日成层现象的典型性。为了深入研究日成层现象的水温结构, 针对性地选取了 8 月 1 日至 8 月 10 日的监测数据作为进一步的研究对象。水温的日变化, 主要取决于日内热量收支各要素间的平衡^[5]。8 月 1 日至 8 月 10 日水温及气温监测结果见图 2。由图 2 可知, 水面下 0.5 m 处日温差为 1.9~4.2 ℃, 水面下 1.5 m 处日温差仅为 1.2~2.3 ℃, 说明水温的日变化以表层水最明显, 随着深度的加深, 变化衰减。湖水不同深度处的温度极值出现的时间也有差异, 水面下 0.5 m 处最高温度一般出现在 14:00~16:00, 最低温度一般出现在次日 5:00~8:00; 水面下 1.5 m 处最高温度则一般出现在 17:00~18:00, 最低温度一般出现在次日 7:00~9:00。这说明, 受热量由湖水表面向湖底传递, 随湖水深度的增加, 最高、最低水温出现时间逐渐滞后。

在白天, 湖水不同深度的水温受热量由表面通过传导、对流方式向下传递, 温度发生差异, 最大相差 4 ℃; 在夜晚, 湖水由吸热转为放热, 湖水上层温度逐渐下降, 加上湖水深度较浅, 在风速较大的情况下, 风浪作用加速了湖水上下层热量交换, 水温的垂向差异变小, 甚至为零。

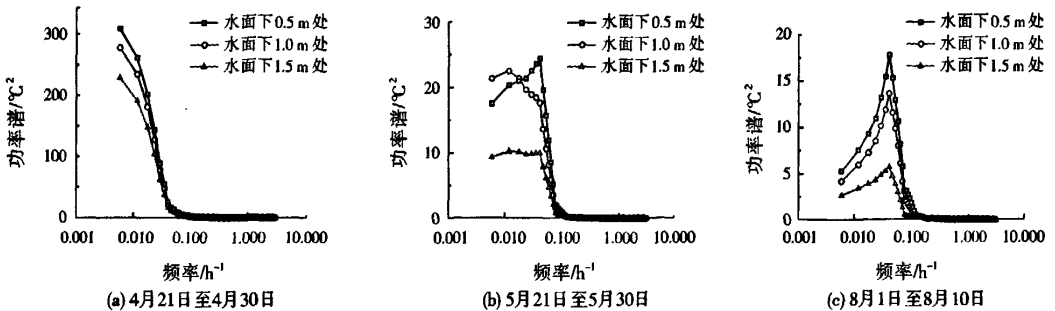


图 1 4、5、8 月傅立叶频谱分析图
Fig. 1 Fourier power spectrum of temperature series

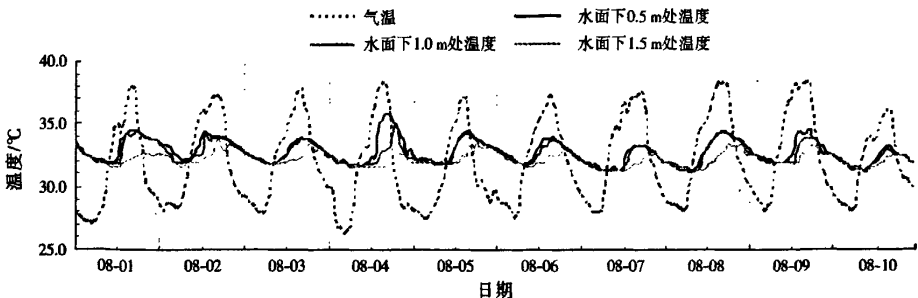


图 2 8 月 1 日至 8 月 10 日水温及气温监测结果分析
Fig. 2 Air and water (3 levels) temperatures on Aug. 1-10

3 日成层现象的模拟

3.1 单位面积水柱总热量的计算

日成层的频率及其垂直结构说明太阳辐射强度是湖泊出现日成层现象的主要因素之一。因此,模拟水温的日成层现象,首先要计算出单位面积水柱的总热量。湖面上的热交换包括长波辐射、短波辐射、潜热和焓等。由于现场仅监测了气温、风速和风向,选取1个半经验型公式计算太湖单位面积水柱的总热量,如下:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} = a_1 S_r + a_2 (T_a - T_w) + a_3 \quad (1)$$

$$Q = \int_0^H \rho C_p T dz \quad (2)$$

式中:Q为总热量,J; ρ 为水的密度, kg/m^3 ;C_p为比热, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$;T为水温, $^{\circ}\text{C}$;S_r为太阳辐射, W/m^2 ;H为水深,m;T_a为气温, $^{\circ}\text{C}$;T_w为湖水表面水温, $^{\circ}\text{C}$;a₁、a₂、a₃在短期内可以假定为常数;t为时间,s;z为垂向坐标。

由于缺乏太阳辐射的实测数据,通过监测点的纬度、监测时间来获得当日的太阳辐射。考虑到大气对太阳辐射的散射和吸收作用,到达湖水表面的

太阳辐射用a₁来修正,a₂、a₃则通过回归分析得到。a₁设定在0.45~0.90,取回归分析偏差最小时的值。经计算,a₁为0.72,a₂为0.0297,a₃为1.1661。

3.2 一维模型

一维模型如下:

$$\frac{\partial u}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial z} \left(v \frac{\partial u}{\partial z} \right) = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial \delta}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial z} \left(v_\delta \frac{\partial \delta}{\partial z} \right) = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial k}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial z} \left(v_k \frac{\partial k}{\partial z} \right) = P_r + G - \epsilon \quad (5)$$

$$\frac{\partial \epsilon}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial z} \left(v_\epsilon \frac{\partial \epsilon}{\partial z} \right) = C_1 \frac{\epsilon}{k} \{ P_r + (1 - C_3) G \} - C_2 \frac{\epsilon^2}{k} \quad (6)$$

式中:u为湖水水平流速,m/s; δ 为相对密度差, kg/m^3 ;k为紊流动能,J; ϵ 为紊流能量耗散率,J/s;P_r为紊流动能总量,J;G为势能总量,J;C₁、C₂、C₃为k- ϵ 紊流模型中的经验常数,C₁=1.44,C₂=1.92、C₃=1.00;v为有效涡流粘度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$;v_k、v_ε和v_δ分别为k、 ϵ 、 δ 的有效扩散系数。

$$v = v_0 + C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (7)$$

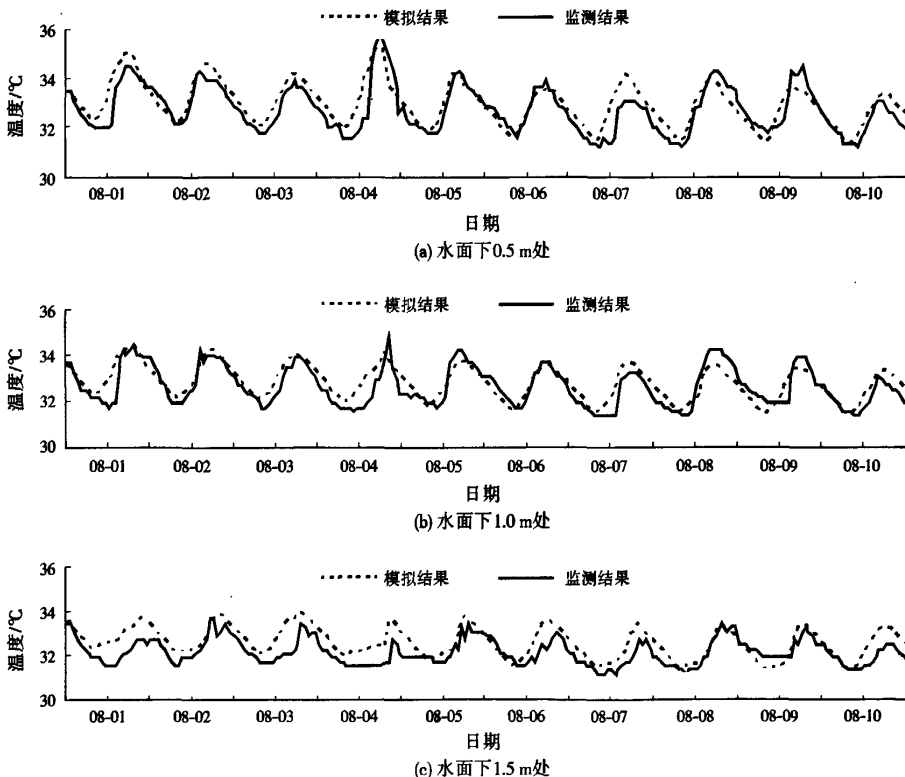


图3 模拟结果与现场监测的比较
Fig. 3 Actual and predicted water temperatures at 3 levels below the surface

$$v_k = v \quad v_i = 0.77v \quad v_b = 1.2v \quad (8)$$

式中： v_0 为水分子动力粘度， $\text{Pa} \cdot \text{s}$ ； C_μ 为 $k-\epsilon$ 紊流模型中的经验常数， $C_\mu = 0.09$ 。

$$P_r = v \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 \quad (9)$$

$$G = -g v_b \frac{\partial \delta}{\partial z} \quad (10)$$

太阳辐射在每个计算单元上以指数函数形式向下传递。计算中假定仅在湖水表面存在热量损失和剪切应力，风的剪切速度(U_s , m/s)对湖水表层流速(u_b , m/s)的作用通过式(11)计算。

$$\rho_w \cdot v \frac{\partial u_b}{\partial z} = \rho_w U_s^2 = 0.5 \times 10^{-3} \rho_a U_{10}^2 \quad (11)$$

式中： U_{10} 为湖面以上10 m处的风速，m/s； ρ_w 为湖水的密度， kg/m^3 ； ρ_a 为空气的密度， kg/m^3 。

3.3 初始条件

所有计算单元的湖水水平流速 u 为 0 m/s；温度垂向分布数据采用现场监测结果； k 和 ϵ 被设定为足够小，以确保模拟运算的稳定性。模拟垂向计算间隔为 0.1 m，水深为 1.8 m，时间间隔为 10 s。

3.4 模拟结果分析

图3给出了8月1日至10日模拟计算出的水温垂向分布剖面图以及与监测结果对比图。由图3可知，该一维模型可以基本再现计算时间内太湖的日成层现象。但8月1日、4日和10日的模拟结果与监测结果的偏差较大，这主要因为太阳辐射是估算数据不是实测数据造成的(太阳辐射的大小还与当天的天气状况密切相关)。

4 结果与讨论

(1) 现场监测表明，太湖存在着温度成层的现象，以1 d为周期，是浅水型湖泊日成层现象的典型特征。

(2) 太阳辐射是影响日成层现象形成的重要因素，而因风引起的湍流运动则会影响到日成层现象的持续时间和强度。

(3) 采用半经验型公式计算太阳辐射，通过一维 $k-\epsilon$ 紊流模型模拟了太湖日成层现象，其结果与现场监测的结果较吻合。

(4) 为进一步提高模拟结果的精确度，必须在太阳辐射、蒸发量以及其他气象参数方面开展必要的监测工作，并以此为基础进行日成层现象对太湖水生生态过程方面的影响研究。

参考文献

[1] QIAN X, NISHIBE T, ISHIKAWA T. Water exchange of Takahamairi Bay during the formation of diurnal thermocline in Lake Kasumigaura[J]. Coastal Engineering, Proceedings of Coastal Engineering, JSCE, 1996, 43: 1216-1220.

[2] HOSOMI M, SUDO R. Nitrogen and phosphorus release from sediments of Lake Kasumigaura[J]. Report of National Institute of Pollution Studies, 1984, 51: 199.

[3] 王立武. 分层型水库浮游生物的研究[J]. 水电站设计, 1999, 15(3): 63-70.

[4] 李凤彬. 洋水水库热成层对水质的影响[J]. 给水排水, 1999, 25(9): 19-22.

[5] 张运林, 陈伟民, 杨顶田, 等. 天目湖热力学状况的监测与分析[J]. 水科学进展, 2004, 15(1): 61-67.

责任编辑: 贺锋萍 (修改稿收到日期: 2008-04-17)

(上接第22页)

[19] 白晓平. 一组优势菌对焦化废水中喹啉、吡啶的降解条件的实验研究[J]. 微生物学杂志, 2004, 24(3): 36-39.

[20] YOU I S, GHOSAL D. Genetic and molecular analysis of a regulatory region of the herbicide 2,4-dichlorophenoxyacetate catabolic plasmid pJP4[J]. Molecular Microbiology, 1995, 16(2): 321-331.

[21] 赵立平, 肖虹, 李艳琴. 一株焦化废水降解菌的质粒初步研究[J]. 应用与环境生物学报, 1999, 5(4): 55-58.

[22] DEJONGHE W, GORIS J, DIERICKX A, et al. Diversity of 3-chloroaniline and 3,4-dichloroaniline degrading bacteria isolated from three different soils and involvement of their plasmids in chloroaniline degradation[J]. FEMS Microbiology Ecology, 2002, 42(2): 315-325.

[23] TOP E M, SPRINGAEL D, BOON N. Catabolic mobile genetic elements and their potential use in bioaugmentation of polluted soils and waters[J]. FEMS Microbiology Ecology, 2002, 42(2): 199-208.

[24] MOHAN S V, SISTLA S, GURUR K, et al. Microbial degradation of pyridine using *Pseudomonas* sp. and isolation of plasmid responsible for degradation[J]. Waste Management, 2003, 23(2): 167-171.

[25] KILBANE J J. Metabolic engineering to develop a pathway for the selective cleavage of carbon-nitrogen bonds[R]. Pittsburgh: Gas Technology Institute, 2005.

[26] 李明, 张灼, 樊竹青, 等. 硅酸盐细菌 JF88 菌株磷化作用的研究[J]. 云南环境科学, 2000, 19(4): 11-12.

[27] 萨姆布鲁克 J, 拉塞尔 D W. 分子克隆实验指南[M]. 3版. 黄培堂, 译. 北京: 科学出版社, 2003.

[28] UMA B, SANDHYA S. Pyridine degradation and heterocyclic nitrification by *Bacillus coagulans* [J]. Canadian Journal of Microbiology, 1997, 43(6): 595-598.

责任编辑: 贺锋萍 (修改稿收到日期: 2008-04-23)