

DOI: 10.3880/j.issn.1004-6933.2019.01.012

分层小水库沉积物-水界面热交换时空变化特征

李红, 高增文, 秦志新, 李静, 程晨

(青岛大学环境科学与工程学院, 山东 青岛 266071)

摘要:通过对分层小水库沉积物和上覆水温度剖面的7次监测,计算沉积物-水界面的热交换通量,探讨沉积物与水之间热量交换的时空变化特征。结果表明:沉积物-水界面热交换通量具有明显的季节变化,在春夏季库水升温分层以及秋季降温混合时期由库水向沉积物传递热量;冬季由沉积物向库水释放热量。浅水区水温的日变化促使沉积物-水热交换具有明显日变化特征。库区内由于水深不同,热交换特征也存在空间差异,与坝前相比,水库中心水深较浅,春季热交换方向转变的时间早;水库中心夏季由水传向沉积物的最大热通量(106.6 W/m^2)高于坝前深水区(23.8 W/m^2)。夏季当水体透明度较高时,沉积物直接接受太阳辐射引起热交换方向改变为由沉积物向水传递。

关键词:分层小水库;沉积物-水界面;热量交换;水深;季节性变化;日变化

中图分类号:TV213.4;X524

文献标志码:A

文章编号:1004-6933(2019)01-0063-07

Temporal and spatial characteristics of heat exchange at sediment-water interface in a small stratified reservoir //

LI Hong, GAO Zengwen, QIN Zhixin, LI Jing, CHENG Chen (College of Environmental Science and Engineering, Qingdao University, Qingdao 266071, China)

Abstract: Through seven monitoring of temperature profiles of sediment and overlying water in a small stratified reservoir, the heat exchange fluxes at the sediment-water interface were calculated, and the temporal and spatial characteristics of heat exchange between sediment and water were discussed. The results show that the heat exchange fluxes at the sediment-water interface have obvious seasonal variations. Heat transfers from reservoir water to sediment during the period of warming and stratification of reservoir water in spring and summer and cooling and mixing in autumn, and the heat releases from the sediment to the reservoir water in winter. The diurnal variation of water temperature in shallow water area leads to obvious diurnal variation of sediment-water heat exchange. Because of the different water depths, there are also spatial differences in heat exchange characteristics in the reservoir. The water depth in the reservoir center is shallower than that in the front of the dam, and the direction of heat exchange changes earlier in spring. The maximum heat flux from water to sediment in the reservoir center in summer (106.6 W/m^2) is higher than that in the front of the dam (23.8 W/m^2). When the transparency of water is high in summer, the heat exchange direction changes to be from sediment to water due to the direct acceptance of solar radiation.

Key words: small stratified reservoir; sediment-water interface; heat exchange; water depth; seasonal variation; diurnal variation

湖泊水库等地表水作为重要的陆-气下垫面类型之一,其热量收支和温度变化对其自身水环境(水动力和水质状况)以及区域天气和气候变化具有重要影响。有研究表明水体的酸化^[1-2]、富营养化^[3-4]以及黑臭^[5]等都与其热量特征有关。此外, Tsay 等^[6]指出,在气候变化模拟中,还可以通过湖泊底部的热量状况评估湖泊对温室气体释

放的贡献。

水体热量变化主要与太阳短波辐射^[7]、出入流^[8]、降雨^[9]、水-气界面热交换(蒸发、水面长波辐射、热传导等)^[10]以及沉积物与水之间热量交换^[9,11]等过程相关。在这些过程中,沉积物-水热量交换对水体热量的影响很容易被水-气界面的热量交换以及水体的垂向混合所掩盖。在一些深水水温

基金项目:国家自然科学基金(51279075)

作者简介:李红(1992—),女,硕士研究生,研究方向为水资源利用与水环境保护。E-mail: lihongqdu@163.com

通信作者:高增文,副教授。E-mail: gaozengwen@163.com

数值模拟中,尽管没有考虑沉积物-水的热量交换,水温整体分布的模拟效果依旧很好。因此,在水温研究中往往忽略沉积物-水界面的热交换通量而采取绝热处理^[12-13]或者简化为地热输入(由沉积物向水传递热量,大小为 0.1 W/m^2)。但是对于浅水水体而言,水体底层温度对天气以及气候变化的响应强烈,从而沉积物-水热量交换变化也较为强烈,因此其热量交换是水体热量收支的重要组成部分^[14]。

目前,关于沉积物温度剖面实测数据较少。任晓倩等^[15]建立了一种新的湖-气热传输模型,模型中增加了底部沉积物与水体之间的热量交换模块,但由于缺乏实际沉积物温度监测数据,该模块没有得到验证。另外统计数据显示,小水体在水体总数量中占有很大比例^[16-17],生态效应也很突出,比如在全球碳循环研究中考虑小水体的影响后,内陆水体对碳循环的作用更加突出^[18-19]。并且小水体与大水体相比具有不同的物理和生物地球化学特征^[20-21],比如小水体的表层混合往往是热对流驱动。本文选取水域面积小且水深较浅的水库(青岛浮山前水库)作为研究对象,通过沉积物和上覆水温度剖面测量,计算不同时刻沉积物-水界面热交换通量,并分析热交换通量的时空变化特征,探讨其对库水温度的可能影响,以期在水温数值模拟和水质管理提供参考。

1 研究区域概况及研究方法

1.1 研究区域概况

浮山前水库是一个分层小水库,位于山东省青岛市浮山南向山坡上($36^{\circ}04'N, 120^{\circ}25'E$)。该水库没有明显的出流和入流,水位的变化主要由蒸发和降雨引起。在野外监测时期(2016年1月至2017年7月)水体水位没有明显的变化,水深分布如图1所示,最大水深为6.1 m,平均水深为3.8 m,水体表面积约为 1400 m^2 。由于水库的吹程较小,风的扰动效应较弱,春夏季水体会形成稳定分层。库水底层温度随深度变化对气温的响应程度不同,因此为了探讨水深对沉积物-水热量交换的变化,选取水库中心和坝前两个监测点(图1)。库水温度用水质仪YSI 6920测量,沉积物温度用双金属数显温度计(WST/DTm491)测量,后期会对试验数据进行校正(1°C)。透明度用透明度盘测量,水中光照强度用照度计ZDZ-10W-2D测量。

1.2 沉积物-水界面热交换通量计算

1.2.1 沉积物和上覆水的主要物理性质

沉积物和上覆水的主要物理性质见表1,其中

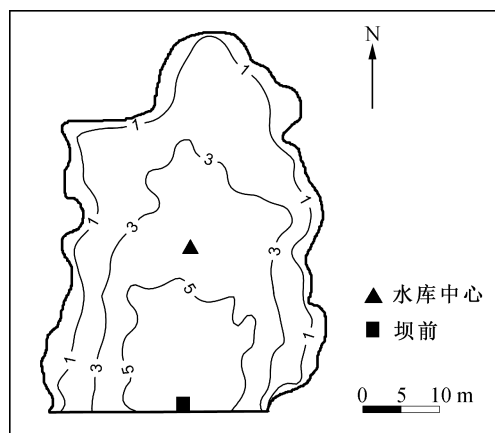


图1 浮山前水库地形图以及监测点位置

表层沉积物的孔隙度和密度根据环刀法和烘干法测定^[22]。对于热扩散率和体积热容很难由现场或者实验室直接测定,通常取经验值,其值与沉积物的孔隙度以及有机物含量相关。热扩散率的取值范围是 $1.16 \times 10^{-7} \sim 1.27 \times 10^{-6}\text{ m}^2/\text{s}$,体积热容的取值范围是 $1.4 \times 10^6 \sim 3.8 \times 10^6\text{ J}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$ ^[23-24]。本文根据文献[20]提出的参考值,沉积物的热扩散率与体积热容分别取值为 $5.6 \times 10^{-7}\text{ m}^2/\text{s}$ 和 $3.2 \times 10^6\text{ J}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$,则导热系数为 $1.8\text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 。

表1 沉积物和上覆水的主要物理性质

类别	密度/ ($10^3\text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	孔 隙 度	热扩散率 k_s / ($10^{-7}\text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)	体积热容 / ($10^6\text{ J} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$)	导热率 λ / ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)
沉积物	1.411	0.47	5.6	3.2	1.80
上覆水	0.998	1.00	1.4	4.18	0.58

1.2.2 计算方法

沉积物-水界面的热交换通量很难直接测量,可以通过沉积物温度剖面分布间接计算。界面处热量交换方式主要有两种:热传导和热对流。在计算中忽略地下水与地表水的对流交换,仅考虑热传导;假设沉积物具有均质性,并且由热传导引起的热量交换只在垂向发生,即:

$$\frac{\partial T_s}{\partial t} = a \frac{\partial^2 T_s}{\partial z^2} \quad (1)$$

式中: T_s 为沉积物温度, $^{\circ}\text{C}$; a 为沉积物的热扩散率, m^2/s 。

热量交换通量根据傅里叶定律进行计算,即:

$$H_{\text{sed}} = -\lambda \left(\frac{dT_s}{dz} \right) \quad (2)$$

式中: λ 为沉积物或水的导热系数,是热扩散率与体积热容的乘积, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$; $\frac{dT_s}{dz}$ 为沉积物-水界面处的温度梯度, $^{\circ}\text{C}/\text{m}$,采用沉积物-水界面与界面之下5 cm处或者沉积物-水界面与界面之上2 cm处的温

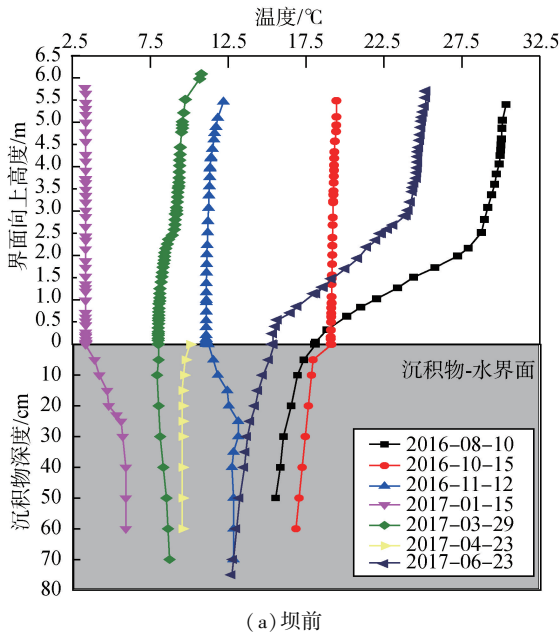
度梯度进行计算。

2 结果与讨论

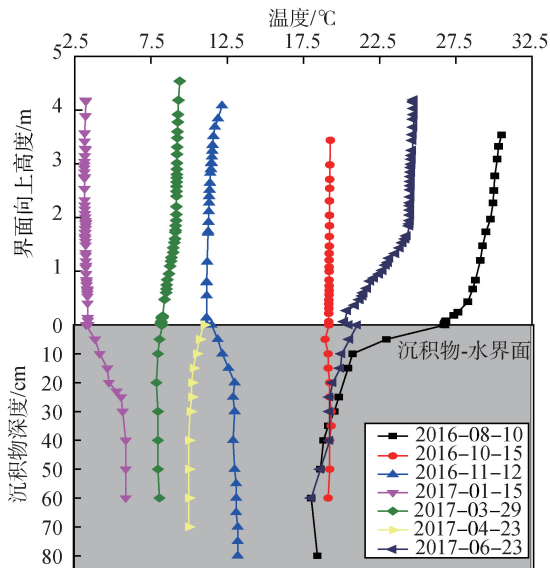
2.1 水库水体分层特征

2.1.1 季节性特征

浮山前水库水体分层具有明显的季节性特征,库水温度年变化较大,最低温度为 3.3°C ,最高温度为 30.1°C 。2016年8月10日水体处于典型的分层期,从图2(a)可以看出,坝前表层水体温度比底层水体高 12.3°C ,温差较大;而水库中心尽管也出现了分层现象,但是由于水深较浅,水体整体温差较小,且其底层水温要比坝前底层水温高 8.7°C (图2(b))。2016年10月15日水库水体已经完全混合,混合后坝前和水库中心库水整体温度相近,约为 19.2°C ,较混合之前坝前库底水温高,而较混合之前



(a) 坝前



(b) 水库中心

图2 坝前和水库中心水温与沉积物温度变化

水库中心库底水温低。由此可以推测水库中心的混合时间应早于坝前混合时间。水体完全混合后稳定性差,对气温变化的响应更强烈,水体温度随气温降低而迅速降低。2016年11月12日水体温度为 11.1°C ,2017年1月15日温度降低为 3.3°C 。次年春季气温开始回升,水体温度也随之升高,开始出现分层现象,2017年3月29日至6月23日水体包括库水底层温度快速升高,并且表层升温幅度显著大于底层,引起分层强度不断增加,这个阶段水库中心的底层水温也高于坝前。

2.1.2 日变化特征

图3为坝前水温日变化剖面图,可以看出,坝前表层水体温度以及混合层深度具有明显的日变化特征。白天(2017年5月17日9:00—15:00)强烈的太阳辐射使表层水体温度迅速升高,由 20.5°C 升高至 24.5°C ,水体几乎完全分层;晚上气温降低,水体表层温度下降,产生热对流,17日20:00水体已经开始混合,此时混合深度为30 cm;夜间气温持续降低,热对流作用更加明显,水体混合深度增加,18日6:00混合深度为1.60 m。

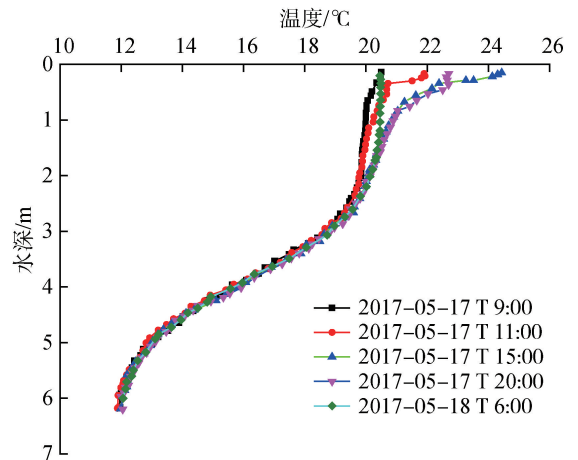


图3 坝前水温日变化

2.2 水库沉积物-水热量交换特征

2.2.1 坝前

2016年8月10日水体处在分层且温度升高时期,此时水温高于沉积物温度,热量由水传向沉积物。2016年10月15日水体已经完全混合,监测数据显示,库底水温由2016年8月10日的 18.1°C 变为 19.2°C ,升高了 1.1°C ,而沉积物-水界面之下5 cm处的温度受其他因素影响较小,没有明显升高(图2(a)),因此沉积物-水界面的温度梯度变大,由水传向沉积物的热通量由 15.4 W/m^2 增大到 23.8 W/m^2 (表2)。水体发生整体混合后,对气温变化的响应更为强烈,气温快速下降导致库水整体温度也迅速下降。2016年11月12日沉积物温度高于水

温,热交换方向发生改变,由沉积物向库水传热,通量大小为 6 W/m^2 。水温继续下降,2017年1月15日沉积物向水传递的热通量增加为 10.4 W/m^2 。接下来由于气温回升,2017年3月29日沉积物-水界面热通量为0,表明热量交换的方向将会再一次转换为由水向沉积物传热。随着时间推移水温高于泥温,并且温度梯度不断增加,2017年4月23日和2017年6月23日由水向沉积物传热,热通量分别为 6 W/m^2 和 12 W/m^2 。

表2 坝前和水库中心沉积物-水界面热通量变化

时间	热通量/($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$)	
	坝前	水库中心
2016-08-10	-15.4	-106.6
2016-10-15	-23.8	-5.2
2016-11-12	6.0	8.0
2017-01-15	10.4	12.0
2017-03-29	0	-4.0
2017-04-23	-6.0	-6.0
2017-06-23	-12.0	14.5

注:正值表示热量由沉积物向水传递,负值表示热量由水向沉积物传递。

2.2.2 水库中心

与坝前沉积物-水界面热交换通量随时间的变化相比,整体上水库中心的热通量具有类似的季节性变化。春夏季水体升温以及秋季降温混合时期,水温高于泥温,由水向沉积物传热;冬季沉积物温度高于水温,热量交换方向发生转变,由沉积物向水传热(表2)。但是由于水库中心水深较浅,其热通量变化与坝前相比存在显著差异:①2016年8月10日水库中心由水传向沉积物的热通量大小为 106.6 W/m^2 ,其值远大于坝前的热通量(15.4 W/m^2)。这是因为同坝前相比,水库中心水深较浅水体底层温度比坝前高 8.7°C ,而沉积物温度相差不大,从而引起沉积物-水温度梯度增加,热通量值也显著增大。②2016年10月15日水库中心热量从库水向沉积物传递,通量数值小于坝前,并且表层沉积物温度与8月份相比有所降低,这表明在该时间段内沉积物曾向库水释放热量。这是由于水库中心水深较浅,混合后水温对气温变化响应强烈引起的,沉积物-水界面热交换的方向可能经历了多次转换过程。③2017年3月29日水库中心热通量为 -4 W/m^2 ,此时水温已经高于表层沉积物温度,而坝前热通量为0,表明春季水库中心由沉积物向水传热转变为由水向沉积物传热的的时间早于坝前的转换时间。这是因为水库中心水深较浅,底层水体温度升高的幅度大于坝前底层水体,热交换方向转变时间也相应提前。④2017年6月23日表层沉积物向水库底层水体传热,热通量为 14.5 W/m^2 。按照沉积物-水热量交换

的季节性变化推算2017年6月23日应该由水向沉积物传热。热量交换方向改变主要是因为2017年6月23日水体的透明度较高(3.63 m),此时太阳辐射在水中的衰减系数较小(图4),界面处沉积物可以直接接受太阳辐射引起温度明显升高(图2(b)),同时向库水底层水体及深层沉积物传热。

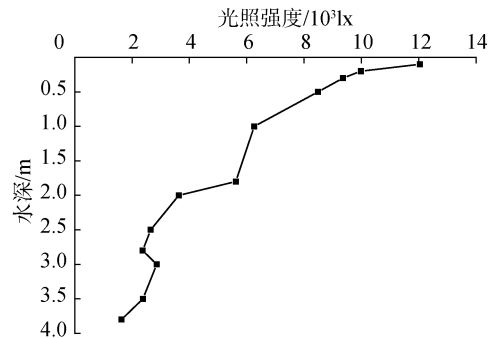


图4 2017年6月23日水库中心水中光照强度剖面

浮山前水库两个监测点沉积物-水界面热交换通量的方向和大小具有明显的季节性变化特征。春夏水体升温 and 秋季降温混合时期水温高于沉积物温度,由水体向沉积物传热;冬季沉积物温度高于水温,由沉积物向水体释放热量。水库浅水区白天水温高于沉积物温度,水体向沉积物传热;夜间在风的扰动或者热对流作用下将发生完全混合。混合后水体对气温的响应更强烈,库水底层温度将随着气温降低持续降低,导致水温低于沉积物温度,热交换方向将由库水向沉积物传热转变为沉积物向库水传热^[25]。因此浅水水体水温的日变化特征促使沉积物-水热交换具有明显的日变化特征。

大型浅水湖泊受风的扰动强烈且频繁^[26-27],水体不容易形成长期热分层,一般为昼夜或为1~2d的短期分层^[28-29]。水-气界面热量交换以及水体的垂向混合过程对其水体温度结构的影响远超过沉积物-水界面热交换的影响。但是小型浅水水体表面积较小,减弱了风对水体的扰动深度,从而能形成稳定的热分层^[30],因此在浅水分层水体水温研究中,应重视沉积物-水之间的热量交换过程。无论是在季节尺度还是日尺度,水温高于沉积物温度时,水体向沉积物传热能避免热量在水体底部的积累,有利于水体稳定性的增加^[6];沉积物温度高于水温时,沉积物向水体传热,能避免因水-气界面热量交换、出入流等因素引起的水体温度“过低”。Fang等^[11]的监测结果显示浅湖在结冰后水温会升高 $1 \sim 2^\circ\text{C}$ 。因此沉积物作为水体热量重要的源/汇能缓冲水温波动,对水体热量平衡有非常重要的影响^[31-32]。

沉积物-水界面的热量交换也会对小型浅水水体的物理、化学与生物过程产生重要影响。浮山前

水库深水区形成稳定分层的季节性热结构与大型深水湖库的热结构相似(三层结构),表层与底层水的温度梯度小,而中间斜温层温度梯度大,但是二者底边界层(不是指湖底静水层,而是指沉积物之上一定深度范围)混合的机制不一样。很多学者探讨了大型湖库底边界层混合的主要扰动来源,通常认为主要来自内假潮^[33-34]。而小型湖库内假潮效应不明显,沉积物向上覆水释热(10^0 W/m²量级)是底边界层混合的可能扰动源^[34]。在较长时间尺度上,底边界层的混合过程对湖库整体的垂向交换产生重要影响^[35-37]。另外,混合底边界层将对沉积物与湖库水之间的溶质(例如溶解氧、溶解无机磷^[38])交换产生影响,从而对湖库的化学与生物过程产生影响(包括沉积物中的早期成岩作用)。

由于水深不同,水库不同区域在春季热量交换方向转变的时间不同,春季浅水区库水向沉积物传热的转变时间早于深水区;夏季当水体透明度较高时,水深较浅区域的沉积物可以直接接受太阳辐射,引起沉积物-水界面处温度高于水库底层水温与深层沉积物温度,促使表层沉积物同时向底层水体和深层沉积物传热。这表明水深对界面热交换有重要影响,并且水库同时存在沉积物向库水传热与库水向沉积物传热的区域,在水库热量衡算时应予以关注。

综上所述,在水温研究中忽略沉积物-水之间的热量交换或者简化为地热的做法对于浅水分层水体是不合适的,应将沉积物-水热量交换作为影响水体热量的重要过程考虑,并同时考虑其热交换方向和大小的动态变化,尤其要关注水深对界面热交换通量的大小与方向转换(季节与日尺度)的影响。

3 结 论

a. 分层小水库沉积物-水界面热交换通量的方向和大小具有明显的季节和日尺度变化特征。春夏水体升温时期和秋季降温混合前期由水体向沉积物传热,冬季由沉积物向水体传热,并且热通量值远大于地热通量。分层小水库浅水区底层温度对气温日变化的强烈响应促使沉积物-水热量交换具有明显的日变化特征。因此,在浅水水温研究中应该考虑热交换方向和大小的季节和日尺度动态变化。

b. 水深对沉积物-水界面季节与日尺度热交换有重要影响。春季水库浅水区热交换方向转变时间早于深水区;夏季浅水区沉积物可以直接接受太阳辐射,引起沉积物-水热交换方向与深水区不同。水库将同时存在热量输入与热量输出的区域,在库水热量衡算时应予以关注。

c. 本文计算沉积物-水界面热交换通量,只考虑了垂向热传导,没有考虑地表水与地下水交换的影响,在具体湖库热量衡算时应根据地表水与地下水交换强弱决定是否考虑对流对热量传输的影响。

参考文献:

- [1] WIKINSON K J, JONES H G, CAMPBELL P G C, et al. Estimating organic acid contributions to surface water acidity in Quebec (Canada) [J]. *Water Air & Soil Pollution*, 1992, 61 (1-2): 57-74.
- [2] SCHOEN R. Water acidification in the Federal Republic of Germany proved by simple chemical models [J]. *Water Air & Soil Pollution*, 1986, 31 (1-2): 187-195.
- [3] 林佳, 苏玉萍, 钟厚璋, 等. 一座富营养化水库-福建山仔水库夏季热分层期间浮游植物垂向分布 [J]. *湖泊科学*, 2010, 22 (2): 244-250. (LIN Jia, SU Yuping, ZHONG Houzhang, et al. Vertical distribution of phytoplankton in a eutrophic reservoir, Shanzi Reservoir (Fujian) during summer stratification [J]. *Journal of Lake Science*, 2010, 22 (2): 244-250. (in Chinese))
- [4] 王丽婷, 柴增凯, 肖伟华, 等. 潘家口水库秋季水质状况及富营养化评价 [J]. *水资源保护*, 2014, 30 (2): 21-26. (WANG Liting, CHAI Zengkai, XIAO Weihua, et al. Water quality and eutrophication evaluation in Panjiakou Reservoir in autumn [J]. *Water Resources Protection*, 2014, 30 (2): 21-26. (in Chinese))
- [5] MÜLLER B, BRYANT L D, MATZINGER A, et al. Hypolimnetic oxygen depletion in eutrophic lakes [J]. *Environmental Science & Technology*, 2012, 46 (18): 9964-9971.
- [6] TSAY T K, RUGGABER G J, EFFLER S W, et al. Thermal stratification modeling of lakes with sediment heat flux [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1992, 118 (3): 407-419.
- [7] 陈桥, 韩红娟, 翟水晶, 等. 太湖地区太阳辐射与水温的变化特征及其对叶绿素 a 的影响 [J]. *环境科学学报*, 2009, 29 (1): 199-206. (CHEN Qiao, HAN Hongjuan, ZHAI Shuijing, et al. Influence of solar radiation and water temperature on chlorophyll a levels in Lake Taihu, China [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2009, 29 (1): 199-206. (in Chinese))
- [8] 李一平, 邱利, 唐春燕, 等. 湖泊水动力模型外部输入条件不确定性和敏感性分析 [J]. *中国环境科学*, 2014, 34 (2): 410-416. (LI Yiping, QIU Li, TANG Chunyan, et al. Uncertainty and sensitivity analysis of input conditions in large shallow lake hydrodynamic model [J]. *China Environmental Science*, 2014, 34 (2): 410-416. (in Chinese))
- [9] IMBODE D M, WÜEST A. Mixing mechanisms in lakes

- [M]. New York: Springer Berlin Heidelberg, 1995: 83-138.
- [10] 余常昭. 水环境中污染物扩散输移原理与水质模型[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1989.
- [11] FANG X, STEFAN H G. Dynamics of heat exchange between sediment and water in a lake [J]. *Water Resources Research*, 1996, 32(6): 1719 - 1727.
- [12] 王冠, 韩龙喜, 常文婷. 基于立面二维水动力-水温耦合模型的水库水温分布[J]. *水资源保护*, 2009, 25(2): 59-63. (WANG Guan, HAN Longxi, CHANG Wenting. Modelling water temperature distribution in reservoirs with 2D literally averaged flow-temperature coupled model [J]. *Water Resources Protection*, 2009, 25(2): 59-63. (in Chinese))
- [13] 周从直. 湖泊热结构和蒸发的模拟计算[J]. *环境科学*, 1994, 15(2): 33-37. (ZHOU Congzhi. Simulation of thermal structure and evaporation in lakes [J]. *Chinese Journal of Environment Science*, 1994, 15(2): 33-37. (in Chinese))
- [14] BENTSSON L, MALM J, TERZHEVIK A, et al. Field investigation of winter thermo-and hydrodynamics in a small Karelian lake [J]. *Limnology & Oceanography*, 1996, 41(7): 1502-1513.
- [15] 任晓倩, 李倩, 陈文, 等. 一个新的湖-气热传输模型及其模拟能力评估[J]. *大气科学*, 2014, 38(5): 993-1004. (REN Xiaoqian, LI Qian, CHEN Wen, et al. A new lake model for air-lake heat exchange process and evaluation of its simulation ability [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2014, 38(5): 993-1004. (in Chinese))
- [16] DOWING J A, PRAIRIE Y T, COLE J J, et al. The global abundance and size distribution of lakes, ponds, and impoundments [J]. *Encyclopedia of Inland Waters*, 2009, 51(5): 469-478.
- [17] MCDONALD C P, ROVER J A, STETS E G, et al. The regional abundance and size distribution of lakes and reservoirs in the United States and implications for estimates of global lake extent [J]. *Limnology & Oceanography*, 2012, 57(2): 597-606.
- [18] COLE J J, PRAIRIE Y T, CARACO N F, et al. Plumbing the global carbon cycle: integrating inland waters into the terrestrial carbon budget [J]. *Ecosystems*, 2007, 10(1): 172-185.
- [19] TRANVIK L J, DOWNING J A, COTNER J B, et al. Lakes and reservoirs as regulators of carbon cycling and climate [J]. *Limnology & Oceanography*, 2009, 54(6): 2298-2314.
- [20] DOWING J A. Emerging global role of small lakes and ponds: little things mean a lot [J]. *Limnetica*, 2010, 29(29): 9-24.
- [21] READ J S, HAMILTON D P, DESAI A R, et al. Lake-size dependency of wind shear and convection as controls on gas exchange [J]. *Geophysical Research Letters*, 2012, 39(9): 1-5.
- [22] PAGE A L, MILLER R H. 土壤分析法[M]. 闵九康, 郝心仁, 严慧竣, 等译. 北京: 中国农业科技出版社, 1991.
- [23] EZEKOYE O A. Conduction of heat in solids [J]. *Physics Today*, 1962, 15(11): 74-76.
- [24] NAKSHABANDI G A, KOHNKE H. Thermal conductivity and diffusivity of soils as related to moisture tension and other physical properties [J]. *Agricultural Meteorology*, 1965, 2(4): 271-279.
- [25] PIVATO M, CAMIELLO L, GARDNER J, et al. Water and sediment temperature dynamics in shallow tidal environments: the role of the heat flux at the sediment-water interface [J]. *Advances in Water Resources*, 2018, 113: 126-140.
- [26] 王建威, 李一平, 罗淑葱, 等. 太湖风生流垂向切变规律的原位观测 [J]. *水资源保护*, 2016, 32(6): 98-103. (WANG Jianwei, LI Yiping, LUO Liancong, et al. Field observation of vertical shear of wind-driven current in Taihu Lake [J]. *Water Resources Protection*, 2016, 32(6): 98-103. (in Chinese))
- [27] 胡维平, 濮培民, 秦伯强. 太湖水动力学三维数值试验研究(1): 风生流和风涌增减水的三维数值模拟 [J]. *湖泊科学*, 1998, 10(4): 17-25. (HU Weiping, PU Peimin, QIN Boqiang. A three-dimensional numerical simulation on the dynamics in Taihu Lake, China(I): the water level and the current during the typhoon process [J]. *Journal of Lake Sciences*, 1998, 10(4): 17-25. (in Chinese))
- [28] 赵林林, 朱广伟, 陈元芳, 等. 太湖水体水温垂向分层特征及其影响因素 [J]. *水科学进展*, 2011, 22(6): 844-850. (ZHAO Linlin, ZHU Guangwei, CHEN Yuanfang, et al. Thermal stratification and its influence factors in a large-sized and shallow Lake Taihu [J]. *Advances in Water Science*, 2011, 22(6): 844-850. (in Chinese))
- [29] 赵林林, 朱梦圆, 冯龙庆, 等. 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 [J]. *湖泊科学*, 2011, 23(4): 649-656. (ZHAO Linlin, ZHU Mengyuan, FENG Qinglong, et al. Stratification and its driving factors of water physicochemical variables in large, shallow Lake Taihu [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2011, 23(4): 649-656. (in Chinese))
- [30] KALFF J. 湖沼学: 内陆水生态系统[M]. 古滨河, 刘正文, 李宽意, 等译. 北京: 高等教育出版社, 2011: 154-179.
- [31] BIRGE E A, JUDAY C, MARCH H W. The temperature of the bottom deposits of Lake Mendota: a chapter in the heat exchanges of the lake [J]. *Transactions of the Wisconsin Academy of Sciences, Arts and letters*, 1927, 23: 187-231.
- [32] PIVOVARO A A. Thermal conditions in freezing lakes and

- rivers[M]. New York: Wiley, 1973.
- [33] WUEST A, PIEPKE G, VAN SENDEN D. Turbulent kinetic energy balance as a tool for estimating vertical diffusivity in wind-forced stratified water[J]. *Limnology and Oceanography*, 2000, 45: 1388-1400.
- [34] WUEST A, LORKE A. Small-scale hydrodynamics in lakes [J]. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 2003, 35: 373-412.
- [35] GOUDSMIT G H, PEETERS F, GLOOR M, et al. Boundary versus internal diapycnal mixing in stratified natural waters [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1997, 102(C13): 27903-27914.
- [36] MACINTYRE S, FLYNNI K M, JELLISON R, et al. Boundary mixing and nutrient fluxes in Mono Lake, California [J]. *Limnology and Oceanography*, 1999, 44: 512-529.
- [37] WAIN D J, REHMANN C R. Transport by an intrusion generated by boundary mixing in a lake [J]. *Water Resources Research*, 2010, 46, W08517.
- [38] GOLOSOV S D, IGNATIEVA N V. Hydrothermodynamic features of mass exchange across the sediment-water interface in shallow lakes [M]. Berlin: Springer, 1999: 153-157.

(收稿日期:2018-01-12 编辑:王 芳)

(上接第 55 页)

- [6] RAHMAN M M, GOEL N K, ARYA D S. Study of early flood warning dissemination system in Bangladesh [J]. *Journal of Flood Risk Management*, 2013, 6(4): 290-301.
- [7] 文俊. 区域水资源可持续利用预警系统研究[D]. 南京: 河海大学, 2006.
- [8] 秦成. 水资源危机预警模型[J]. *水资源保护*, 2012, 28(5): 71-74. (QIN Cheng. Water resources crisis forewarning model[J]. *Water Resources Protection*, 2012, 28(5): 71-74. (in Chinese))
- [9] 徐绪堪, 赵毅, 成春阳. 西安市水资源可持续利用预警分级[J]. *水资源保护*, 2017, 33(5): 25-30. (XU Xukan, ZHAO Yi, CHENG Chunyang. Early warning grading of sustainable utilization of water resources in Xi'an City[J]. *Water Resources Protection*, 2017, 33(5): 25-30. (in Chinese))
- [10] 赵卫, 刘景双, 孔凡娥. 辽河流域水环境承载力的仿真模拟[J]. *中国科学院研究生院学报*, 2008, 25(6): 738-747. (ZHAO Wei, LIU Jingshuang, KONG Fan'e. Simulation of water environmental carrying capacity in Liaohe watershed [J]. *Journal of the Graduate School of the Chinese Acad of Sciences*, 2008, 25(6): 738-747. (in Chinese))
- [11] 朱杰, 祝义平, 曾秀莉. 沱江流域成都段水环境系统预警研究[J]. *安全与环境学报*, 2011, 11(4): 126-129. (ZHU Jie, ZHU Yiping, ZENG Xiuli. Warning of water environmental system of Chengdu section of Tuojiang River Basin [J]. *Journal of Safety and Environment*, 2011, 11(4): 126-129. (in Chinese))
- [12] 田威, 邱利, 李一平. 基于 EFDC 模型的感潮江段溢油事故风险预测[J]. *水资源保护*, 2015, 31(6): 98-102. (TIAN Wei, QIU Li, LI Yiping. Prediction of oil spill risk on tide sect of Yangtze River based on EFDC model [J]. *Water Resources Protection*, 2015, 31(6): 98-102. (in Chinese))
- [13] 左锐, 石榕涛, 王宾, 等. 地下水型水源地水质安全预警技术体系研究[J]. *环境科学研究*, 2018, 31(3): 409-418. (ZUO Rui, SHI Rongtao, WANG Bin, et al. Technological system of early warning for groundwater quality in a groundwater source area [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2018, 31(3): 409-418. (in Chinese))
- [14] 黄继鸿, 雷战波, 凌超. 经济预警方法研究综述[J]. *系统工程*, 2003, 21(2): 64-70. (HUANG Jihong, LEI Zhanbo, LING Chao. A survey for early warning system of economics [J]. *Systems Engineering*, 2003, 21(2): 64-70. (in Chinese))
- [15] 李俊青. 水果市场价格预测与波动预警研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2015.
- [16] 梁勇. 中国石油进口价格风险预警研究[D]. 成都: 西南石油大学, 2010.
- [17] 郇滢. 基于监测数据分析的黄河管桥预警及可靠性计算[D]. 北京: 北京交通大学, 2016.
- [18] 韩瑞玲, 佟连军, 朱绍华, 等. 基于 ARMA 模型的沈阳经济区经济与环境协调发展研究[J]. *地理科学*, 2014, 34(1): 32-39. (HAN Ruiling, TONG Lianjun, ZHU Shaohua, et al. The coordinated development of economy and environment based on ARMA model in Shenyang economic zone [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2014, 34(1): 32-39. (in Chinese))
- [19] AKAIKE H. A new look at the statistical model identification [J]. *Automatic Control IEEE Transactions*, 1974, 19(6): 716-723.
- [20] SCHWARZ G. Estimating the dimension of a model [J]. *Annals of Statistics*, 1978, 6(2): 15-18.
- [21] 张凌翔. STAR 模型的滞后阶数选择与稳健性研究[J]. *统计研究*, 2014, 31(6): 107-112. (ZHANG Lingxiang. Selection of the lag order of star model and its robustness analysis [J]. *Statistical Research*, 2014, 31(6): 107-112. (in Chinese))

(收稿日期:2018-04-04 编辑:王 芳)