

# 静态温度分层水体中点源羽流云团垂向运动规律

陈 铂<sup>1,2</sup>, 彭梦辉<sup>1</sup>, 王 华<sup>1,2</sup>

(1. 长沙理工大学水利工程学院, 湖南 长沙 410004; 2. 水沙科学与水灾害防治湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410004)

**摘要:** 为了解水温分层型水库中瞬时点源污染物的运动规律, 通过物理试验研究了点源羽流云团在静态温度分层水体中的垂向运动规律。试验结果表明: 不同水温结构水体中, 羽流云团的运动规律有着显著差异; 线性分层水体中, 云团沉降时横向扩散受到一定限制; 有温跃层存在的水体中, 云团会在温跃层位置停滞, 由于云团与环境水体密度之间的差异, 可能出现 Rayleigh-Taylor 不稳定或双扩散对流, 并出现指状侵入; 云团垂向沉降速度与所受浮力正相关, 与云团前锋位置和浮力频率负相关。

**关键词:** 点源羽流云团; 污染物扩散; 温度分层; 垂向运动; 沉降

中图分类号: TV131.2+1

文献标志码: A

文章编号: 1006-7647(2020)01-0037-05

**Vertical motion characteristics of thermal in static thermal-stratified water**//CHEN Bo<sup>1,2</sup>, PENG Menghui<sup>1</sup>, WANG Hua<sup>1,2</sup> (1. School of Hydraulic Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410004, China; 2. Key Laboratory of Water-Sediment Sciences and Water Disaster Prevention of Hunan Province, Changsha 410004, China)

**Abstract:** To understand the movement characteristics of a sudden point-source pollution in thermal-stratified reservoirs, the vertical movement of the thermal in the static thermal-stratified water was studied by experiment. The results show that the motion of the thermal is significantly different in water bodies with different temperature structures. The horizontal diffusion of the thermal is damped in linear stratified water. If the thermocline exists in the stratified water, the thermal can be retarded at the thermocline. Due to the density difference between the thermal and ambient water, Rayleigh-Taylor instability or double-diffusion convection may occur, and a finger-shaped intrusion can emerge. The vertical velocity of the thermal is positively correlated with the buoyancy but is negatively correlated with the cluster forward position and the buoyancy frequency.

**Key words:** thermal; pollutant diffusion; thermal-stratification; vertical movement; settling velocity

经济高速发展使得我国环境污染形势严峻, 而水污染事件已成为我国主要的突发性环境污染事件<sup>[1-8]</sup>。我国可建设的大型水电站共有 1 360 多座, 其中很多都是高坝深库。大型深水库在蓄水后往往出现水体温度分层, 使水库有着与河流不同的水温分层结构<sup>[9-11]</sup>。水库建成运行后, 为处理类似新安江水库苯酚泄漏、墨西哥湾漏油事件等突发污染事件造成的环境问题, 需要准确掌握温度分层水体中污染物运动规律, 对污染情况进行预测和预警, 为控制污染物扩散提供事故处理决策支持。

很多突发环境事件中, 污染物泄漏是以瞬时点源羽流 (thermal) 的形式扩散。Scorer<sup>[12]</sup>研究了静态均质水体中的点源羽流云团运动规律, 认为云团的运动会在一个顶角约为 30° 的圆锥体范围内; 马福喜等<sup>[13]</sup>通过试验观测与大涡模拟也得到了相近的结果。Tarshish 等<sup>[14]</sup>采用直接模拟方法研究了紊动

热气团 (turbulent thermals) 运动规律, 发现气团上升时均为椭球体, 而气团加速上升时所受的浮力与椭球的高宽比相关; 林伟波<sup>[15]</sup>对密度分层流中的浮射流进行了试验, 并对垂向密度呈线性变化的垂直浮力射流进行了数值模拟, 得到射流的密度场、射流轨迹、稀释度和射流宽度等的分布规律; 黄海宁等<sup>[16]</sup>为研究碱渣倾倒入海洋后引起的污染情况, 在静态温度分层水体中进行了碱渣云团和泥浆云团沉降试验, 认为密度跃层对云团有阻碍作用, 当分层强度大时, 云团会停滞在密度跃层处振荡; 分层强度弱时, 云团会穿过跃层, 但部分云团内的细颗粒仍会滞留在跃层。

点源羽流云团在温度分层水体中的沉降主要受浮力影响, 水温结构不同时, 浮力变化有很大差异, 对云团垂向运动规律影响很大。本文通过物理试验, 对静态温度分层水体中点源羽流云团垂向运动

规律进行研究,为水库和湖泊中污染物扩散预测提供依据。

## 1 试验装置与试验方法

试验用水箱如图 1 所示,水箱中间位置布置有挡板,挡板下方先注入冷水,挡板闭合后在其上方注入热水,待水体平静后(约 5 min)缓慢打开,形成温度分层水体。使用电热耦合温度计测量水箱中间垂线上温度随时间变化情况,结果如图 2 所示,可以看出不同温差的 stratified 水体,在 50 min 内仍旧保持稳定的分层结构。污染物垂向扩散试验通常不到 1 min,故在试验中忽略热量损失。所有试验中水箱中部温度梯度最大可以达到  $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{mm}$ 。

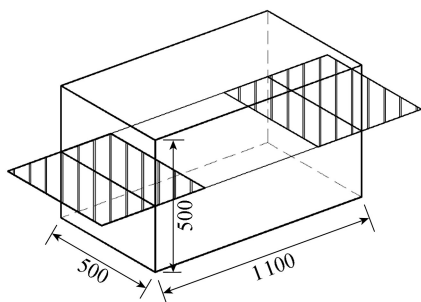


图 1 试验水箱示意图(单位:mm)

—○— 5 min —■— 10 min —△— 30 min —◇— 50 min  
温度/ $^{\circ}\text{C}$

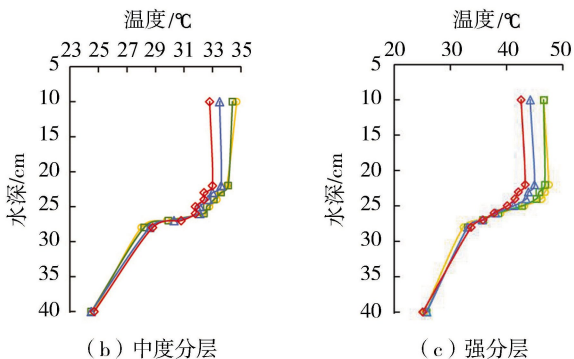
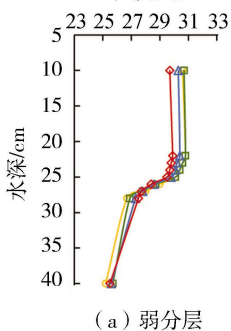


图 2 分层水体温度场

试验使用氯化钠和少量染色剂作为模拟污染物的溶质,与水混合形成模拟污染物溶液,模拟污染物室温下初始密度为  $1.028 \sim 1.126\text{ g}/\text{cm}^3$ 。试验中假定污染物云团的平均密度为云团内环境水体与污染

物溶质的质量和云团体积的比值。使用 3 种方式在水体表面投放模拟污染物:①试验组 R1 使用一无底圆筒(图 3(a)),内部填充纱网,试验时将圆筒大部置于水面以下,倒入 5 mL 污染物后提起,形成污染物云团;②试验组 R2 使用一硅胶软管(图 3(b)),一端储存污染物(0.4 mL),另一端密封,试验时将污染物一端置于水面以上 5 cm,打开另一端释放污染物,形成点源羽流云团;③试验组 R3 释放方法与 R2 相同(图 3(c)),但其释放口略低于水面,释放污染物 0.25 mL。由于投放污染物体积远小于环境水体,故认为污染物投放后立即与上层水体混掺,形成的云团内部温度与上层水体相同。

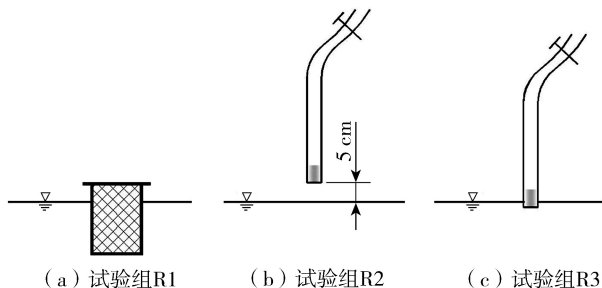


图 3 污染物表层投放方式

采用摄像机拍摄羽流云团垂向运动过程,对试验图像进行分析并得到所需的各项参数。羽流云团沉降时其形状近似于椭球(图 4),与 Tarshish 等<sup>[14]</sup>数值模拟结果相同,可认为云团是水平向两轴长度均为  $w$ 、垂向高度为  $h$  的椭球。根据 Beer-Lambert 定律,将云团图像与原有背景之间的亮度差与污染物质量相关联,定性分析污染物浓度分布<sup>[17]</sup>。

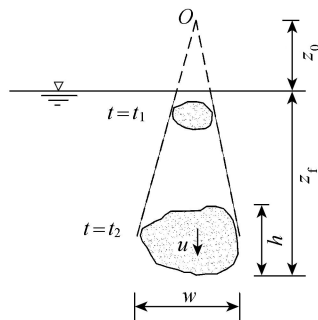


图 4 羽流云团垂向运动示意图

将试验照片(图 5)与原背景图片逐像素比较,得到由染色剂引起的亮度变化,使用云团内最大亮度变化值的 50% 作为阈值消去噪点(孤立的亮度变化像素点),再将最大亮度变化值的 20% 作为阈值勾勒出云团的边界。每一帧图片处理完后,将各像素点位置浓度分别在垂向和水平向叠加(图 6),并按照时间顺序排列得到历时变化过程,如图 7 所示。根据边界位置计算云团宽度  $w$  和高度  $h$ ,由浓度分布确定云团重心位置,并根据重心位置变化计算云

团垂向沉速  $u$ 。

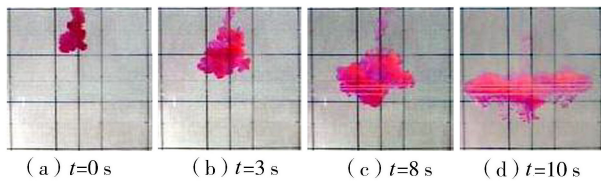


图5 原始试验照片

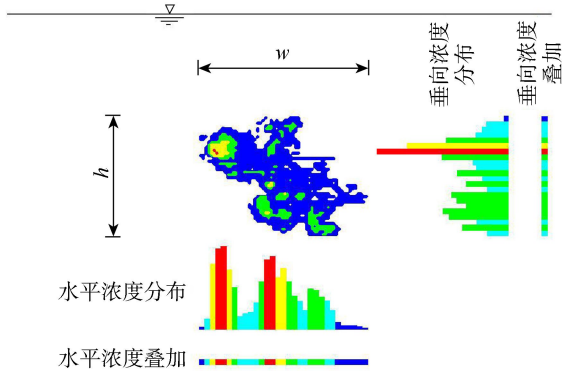


图6 单帧图片垂向浓度分布和水平浓度分布叠加示意图

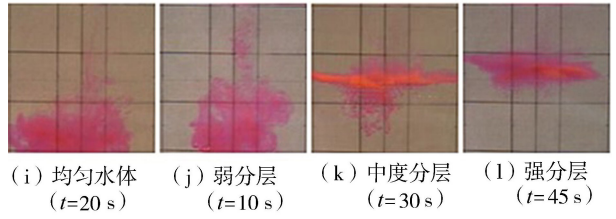
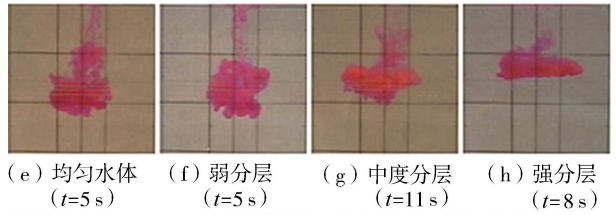
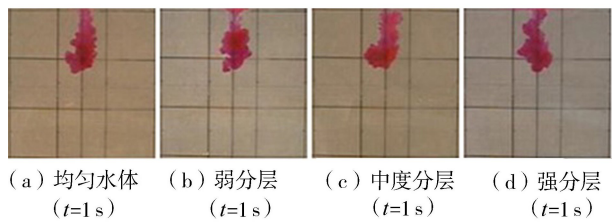
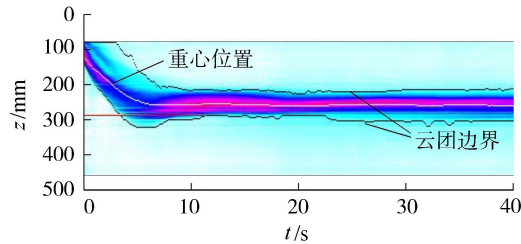
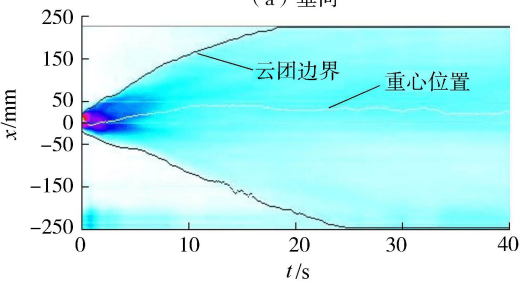


图8 羽流云团试验照片



(a) 垂向



(b) 水平向

图7 污染物云团浓度分布叠加历时变化

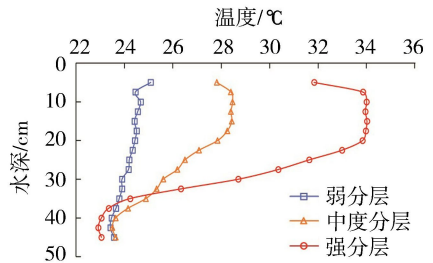


图9 试验环境水体温度场

## 2 试验结果与分析

图8为不同分层程度典型试验照片,不同水温结构的分层水体中,羽流云团的运动规律有着显著差异。当上下层水温差异较小时,温度梯度引起的浮力作用较弱,挡板开合产生的扰动会在垂向传播,最终形成近乎线性分层的水温结构(图9中弱分层)。此时,羽流云团的运动(图8(b)(f)(j))与均匀水体中的羽流云团(图8(a)(e)(i))相近,但垂向速度要小于不分层情况;同时由于线性分层水体内的斜压作用,横向扩散也受到限制。如果增大上下层水体温差,此时水箱内可以分为3层:上下层不

同温度的均匀水体和中间温度线性分布的温跃层,如图9中的中度分层。此时的羽流云团在温跃层会受到明显的浮力顶托。由于云团内部浓度分布不均匀,浓度小的部分(密度小于下层水体)停滞在温跃层后会沿横向继续扩散,浓度大的部分(密度大于下层水体)会因 Rayleigh-Taylor 不稳定,产生尺寸较大的指状液滴,侵入下层水体,如图8(c)(g)(k)所示。上下层水体温差很大时,温跃层厚度会变得很小,此时可认为温度场为阶梯形分布,如图9中的强分层。由于较强的浮力作用,羽流云团会被阻滞在温跃层,由于温度梯度(上热下冷)和浓度梯度(上层水含溶质,下层为清水)的共同作用产生双扩散对流(double-diffusion convection)<sup>[18]</sup>,云团下部会出现大量细小的指状对流液滴,如图8(d)(h)(l)所示。Chen等<sup>[19]</sup>测量了上述指状侵入液滴的尺寸与侵入量(中度分层试验与强分层试验),认为指状侵入液滴的量约为总污染物量的5%~20%,且其宽度大于双扩散盐指(salt-finger)宽度。显然其测量的指状液滴既有因双扩散对流产生的液滴,也包含了中度分层时 Rayleigh-Taylor 不稳定产生的液滴。

羽流云团垂向运动主要受浮力影响,其值为

$$B = g \frac{\frac{m_0}{V} - \rho_0 + \rho_1}{\rho_0} V \quad (1)$$

式中： $\rho_0$  为云团所在水平位置环境水体平均密度； $\rho_1$  为上层水体密度； $m_0$  为模拟污染物中溶质的质量； $V$  为云团体积（若假设云团为椭球，水平向两轴长度均为  $w$ ，垂直轴长  $h$ ，其体积  $V = \frac{4}{3} \pi w^2 h$ ）。云团垂向运动还受温度分层影响，在不同水深位置云团垂向沉速可认为是浮力  $B$ 、浮力频率  $N$  和云团前锋位置  $z_f$ （图 4）的函数：

$$u = f(B, N, z_f) \quad (2)$$

其中

$$N = \sqrt{-\frac{g}{\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial z}}$$

使用量纲分析可以得到分层水体中羽流云团的垂向沉速为

$$u = c_1 \left( \frac{B}{N z_f^3} \right) \left( \frac{B^2}{N^4 z_f^8} \right)^{c_2} + c_3 \quad (3)$$

式中： $c_1, c_2, c_3$  均为系数。对于均匀水体，羽流云团的垂向沉速为

$$u = c_4 \left( \frac{B^{\frac{1}{2}}}{z_f} \right) + c_5 \quad (4)$$

式中： $c_4, c_5$  为系数。根据试验采集数据，采用文献 [20] 中的方法计算每组试验中的系数，所得结果如图 10 和图 11（图中白点为中位数，黑色粗条为上、下四分位点，外部为对称的概率密度曲线）所示，系数  $c_1, c_2, c_3, c_4, c_5$  中位数分别为 0.44、-0.2、8.18、1.65 和 -3.46。

试验使用了 3 种不同的污染物投放方式，且污染物投放量也不相同，同时羽流云团在不同环境水体中的运动规律有很大差异（图 8），为了解不同情况时羽流云团的垂向运动规律，需要分别分析沉速公式中的系数。由图 10(a) 和图 11(a) 可以看出，投放方式 R2 试验得到的系数  $c_1$  和  $c_4$  与其他投放方式有明显差异，显示 R2 试验中采取水面以上 5 cm 投放污染物，污染液滴下落产生的较大初始动量对云团垂向运动有影响。而分层水体羽流云团沉速公式（式(3)）中的幂指数  $c_2$  在不同投放方式和水温结构中变化不大，且都集中在 -0.2 附近；相反  $c_3$  和  $c_5$  的值虽然受投放方式或水温分层影响不大，但数值较为离散。式(3)中的  $c_1$  和  $c_3$  以及式(4)中的  $c_4$  和  $c_5$ ，与具体试验时的初始动量、虚源点  $O$  位置（见图 4，综合反映投放位置和投放量）和试验误差相关，不同情况会有一定差异；式(3)中的幂指数  $c_2$  反映了各物理量之间的关系，受初始状态影响较小。

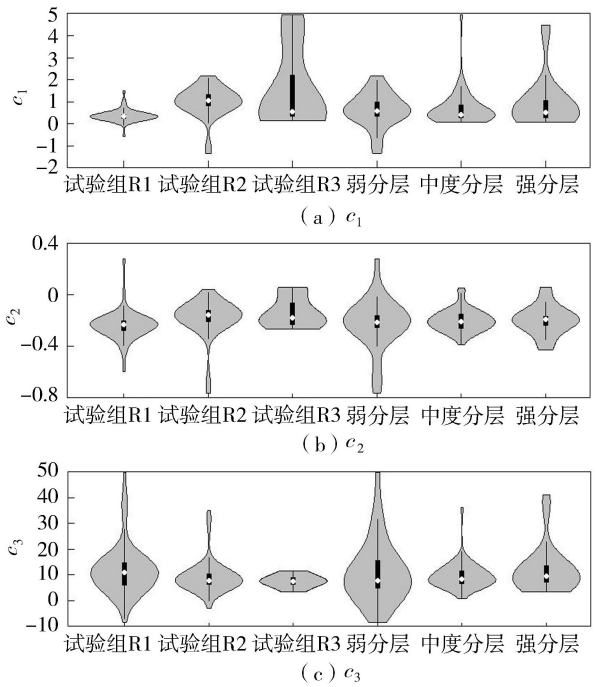


图 10 分层水体沉速公式系数小提琴图

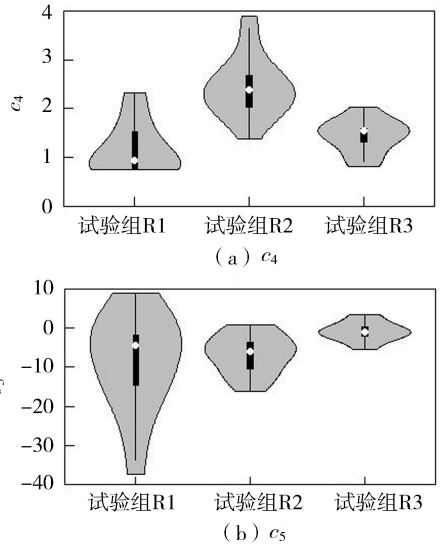


图 11 均匀水体沉速公式系数小提琴图

将分析得到的  $c_1, c_2$  和  $c_3$  的中位数代入式(3)，即可以预测分层水体中污染物云团垂向运动。图 12 为弱分层、投放方式为 R1 的云团垂向沉速预测值和实际值，可见预测沉速与实际沉速趋势相同，但由于不同条件下，污染物初始速度、污染物总量和

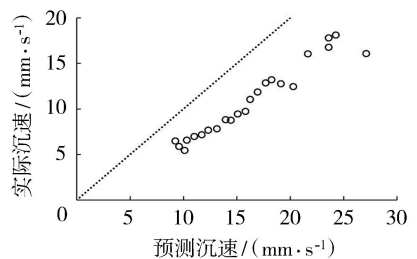


图 12 典型试验云团垂向沉速关系

污染物与环境水体密度差都不相同,导致了预测沉速与实际沉速之间的差异,这也是今后需要继续研究的方向。

### 3 结论

a. 不同水温结构中羽流云团的垂向运动有很大差异,在线性分层水体中云团下沉过程中横向扩散受到一定限制。

b. 在有温跃层的水体中,云团会在温跃层位置停滞,由于云团与环境水体密度之间的差异,可能出现 Rayleigh-Taylor 不稳定或双扩散,并出现指状侵入,且其尺寸较盐指要大。

c. 点源羽流云团垂向沉速  $u$  与  $\left(\frac{B}{Nz_f^3}\right)\left(\frac{B^2}{N^4z_f^8}\right)^{-0.2}$  成正比关系。

### 参考文献:

[1] 韩晓刚,黄廷林.我国突发性水污染事件统计分析[J].水资源保护,2010,26(1):84-86. (HAN Xiaogang, HUANG Tinglin. Statistical analysis of sudden water pollution accidents[J]. Water Resources Protection, 2010, 26(1):84-86. (in Chinese))

[2] 周海炜,范从林,陈岩.流域水污染防治中的水资源网络组织及其治理[J].水利水电科技进展,2010,30(4):30-34. (ZHOU Haiwei, FAN Conglin, CHEN Yan. Organization and governance of water resources network in control of basin water pollution[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2010, 30(4):30-34. (in Chinese))

[3] 郭英华,朱英.美国突发性水污染事故应急处理机制对我国的启示[J].水利经济,2013,31(1):43-47. (GUO Yinghua, ZHU Ying. Inspiration of treatment mechanism of emergent water pollution accidents in USA to that in China [J]. Journal of Economics of Water Resources, 2013, 31(1):43-47. (in Chinese))

[4] 吴小刚,尹定轩,宋洁人,等.我国突发性水资源污染事故应急机制的若干问题评述[J].水资源保护,2006,22(2):76-79. (WU Xiaogang, YIN Dingxuan, SONG Jieren, et al. Study on the emergency mechanism for sudden pollution of water resources [J]. Water Resources Protection, 2006, 22(2):76-79. (in Chinese))

[5] 李保刚,周克梅,林涛,等.水源地保护及突发性水污染事件预警应急的研究与实施进展[J].水资源保护,2008,24(1):87-91. (LI Baogang, ZHOU Kemei, LIN Tao, et al. Review of water source areas conservation and early warning system for emergent water pollution accidents[J]. Water Resources Protection, 2008, 24(1):87-91. (in Chinese))

[6] 张希斌,孙昌友,边博,等.水源地突发性污染事件应急处理:以温岭市湖漫水库为例[J].水资源保护,2008,

24(5):76-78. (ZHANG Xibin, SUN Changyou, BIAN Bo, et al. Emergency control of pollution accidents in water source area: a case study on Human Reservoir of Wenling [J]. Water Resources Protection, 2008, 24(5):76-78. (in Chinese))

[7] 潘泊,汪洁.长江流域重大水污染事件应急机制探讨[J].水资源保护,2007,23(1):87-90. (PAN Bo, WANG Jie. Emergency mechanisms of water pollution accidents for Yangtze Valley[J]. Water Resources Protection, 2007, 23(1):87-90. (in Chinese))

[8] 刘震,孙熙,周毅. SOBEK 在突发性水污染事件中的应用[J].水资源保护,2008,24(2):61-64. (LIU Zhen, SUN Xi, ZHOU Yi. Application of SOBEK to water pollution accidents[J]. Water Resources Protection, 2008, 24(2):61-64. (in Chinese))

[9] 邓云.大型深水库的水温预测研究[D].成都:四川大学,2003.

[10] 刘中峰,李然,陈明千,等.大型水库三维水质模型研究[J].水利水电科技进展,2010,30(2):5-9. (LIU Zhongfeng, LI Ran, CHEN Mingqian, et al. Three dimensional model for water quality of large reservoirs [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2010, 30(2):5-9. (in Chinese))

[11] 李红,高增文,秦志新,等.分层小水库沉积物-水界面热交换时空变化特征[J].水资源保护,2019,35(1):63-69. (LI Hong, GAO Zengwen, QIN Zhixin, et al. Temporal and spatial characteristics of heat exchange at sediment-water interface in a small stratified reservoir[J]. Water Resources Protection, 2019, 35(1):63-69. (in Chinese))

[12] SCORER R S. Experiments on convection of isolated masses of buoyant fluid[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1957, 2(2):583-594.

[13] 马福喜,李志伟.大涡模拟水环境中污染物团的运动规律[J].水利学报,2002,33(9):55-60. (MA Fuxi, LI Zhiwei. Large eddy simulation of pollutant movement in water[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2002, 33(9):55-60. (in Chinese))

[14] TARSHISH N, JEEVANJEE N, LECOANET D. Buoyant motion of a turbulent thermal [J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 2018, 75(9):3233-3244.

[15] 林伟波.密度分层流中的浮射流模拟[J].华东师范大学学报(自然科学版),2009,41(3):56-62. (LIN Weibo. Simulation of buoyant flow in density-stratified flow [J]. Journal of East China Normal University (Natural Science), 2009, 41(3):56-62. (in Chinese))

[16] 黄河宁,王锡侯,韩康.碱渣海洋倾倒的模拟实验研究[J].海洋通报,1987(2):29-35. (HUANG Hening, WANG Xihou, HAN Kang. Modelling experiments on ocean dumping of calcium carbonate residue[J]. Marine Science Bulletin, 1987, 6(2):29-35. (in Chinese))

(下转第 80 页)