

DOI:10. 3880/j. issn. 1004 - 6933. 2018. 06. 13

# 海湾水库突然混合临界风速的预测

秦志新,高增文,李 静,李 红

(青岛大学环境科学与工程学院,山东 青岛 266071)

**摘要:**以拟建的沐官岛海湾水库为研究对象,从内假潮促使底边界层咸水与表层淡水混合的角度探讨海湾水库突然混合的临界风速。利用 Shintani 改进的有效韦德伯恩数,结合沐官岛水库地形及分层位置,计算沐官岛水库突然混合的临界风速。风向为 NNW 时,水体表面最大吹程为 3 103.45 m,湖面之上 10 m 处风速大于 20.5 m/s 时,沐官岛水库水体突然混合,同样条件下长方体水库突然混合的临界风速为 21.7 m/s;风向为 SW 时,水体表面最大吹程为 3 620.69 m,水体突然混合的临界风速为 22.7 m/s,同样条件下长方体水库临界风速为 19.6 m/s;风向为 SW(由海吹向陆岸)时,虽然沐官岛水库水体表面最大吹程大于风向为 NNW(由陆岸吹向海)时的最大吹程,库水却更难发生突然混合,并且在这两个不同的风向下,该水库临界风速与长方体水库临界风速的大小关系相反。

**关键词:**海湾水库;临界风速;突然混合;内假潮;地形;分层;韦德伯恩数

**中图分类号:**X524      **文献标志码:**A      **文章编号:**1004 - 6933 (2018)06 - 0076 - 06

## Prediction of critical wind speed of sudden mixing in bay reservoir

QIN Zhixin, GAO Zengwen, LI Jing, LI Hong

(College of Environmental Science and Engineering, Qingdao University, Qingdao 266071, China)

**Abstract:** Taking Muguandao Reservoir, a proposed bay reservoir, as the research object, the critical wind speed of sudden mixing in the bay reservoir was discussed from the point of view that the internal falsehood caused the mixing of salt water in the bottom boundary layer and fresh water in the surface layer. The critical wind speed of sudden mixing of Muguandao reservoir was calculated by using Shintani's improved effective Wadburn number, combined with the topography and stratified position of Muguandao Reservoir. When the wind direction is NNW, the maximum blowing distance is 3 103.45 m on the water surface, and the wind speed is more than 20.5 m/s at 10 m above the lake surface, the water of Muguandao Reservoir suddenly mixes. Under the same conditions, the critical wind speed of sudden mixing in the cuboid reservoir is 21.7 m/s. When the wind direction is SW, the maximum blowing distance is 3 620.69 m on the water surface, the critical wind speed of sudden mixing in the reservoir is 22.7 m/s. Under the same conditions, the critical wind speed of sudden mixing in the cuboid reservoir is 19.6 m/s. When the wind direction is SW (from sea to land), the sudden mixing in reservoir is more difficult, although the maximum surface blow distance of Muguandao Reservoir is larger than that of NNW (from land to sea). And in these two different wind directions, the critical wind speed of the reservoir is opposite to the critical wind speed of the cuboid reservoir.

**Key words:** bay reservoir; critical wind speed; sudden mixing; internal falsehood; topography; layered; Wedderburn number

基金项目:国家自然科学基金(51279075);山东省自然科学基金(ZR2009EQ001)  
作者简介:秦志新(1990—),男,硕士研究生,研究方向为水资源利用与水环境保护。E-mail:715708579qin@sina.com  
通信作者:高增文,副教授。E-mail:gaozengwen@163.com

海湾水库在运行过程中常出现周期性突然泛咸问题(如浙江大塘港水库在建库后的20年内每5~6年发生一次),严重影响水库供水区域的工农业生产和居民生活<sup>[1-2]</sup>。由于建库时库内残存的海水和水库运营过程中咸化浅层地下水的补给以及库底咸化沉积物中盐分向库水扩散,海湾水库底部常存在数米厚的咸化底层,底层咸水与上层淡水的突然混合可能是海湾水库周期性突然泛咸的原因<sup>[3-4]</sup>。

水体表面的热通量和风压能够引起湖库水体的混合<sup>[5]</sup>。与双季混合湖库不同,海湾水库底层水与表层水的密度差通常大于 $3\text{ kg/m}^3$ <sup>[4,6]</sup>,温带湖库春秋季节表层热通量引起的垂直对流不足以引发海湾水库水体的突然完全混合<sup>[7]</sup>,因此温带地区具有咸化底层的海湾水库通常属于半混合水库。在强分层湖库中内假潮通常是底边界层主要的动力源<sup>[8]</sup>,大风引起的扰动是造成半混合水库突然混合的重要原因之一。吹过水库表面的风不仅直接影响表层水运动,而且间接影响下层水运动<sup>[9]</sup>,即风压不仅引起水体表层的紊动剪切流,还会引起底边界层的倾斜<sup>[10]</sup>,而当底边界层倾斜到一定程度时,水库将发生突然混合。因此预测海湾水库突然混合的临界风速,将为海湾水库的建设和运营管理提供重要的指示作用。

通常认为,造成半混合水库垂向混合有两种机制:搅拌机制和剪切机制<sup>[11]</sup>。搅拌机制是因水面或近水面的波碎现象、风和水之间压力波动的耦合、吹流和朗缪尔流中的流速切变以及热对流产生。剪切机制是因雷诺应力与大尺度平均流的剪切力的相互作用产生,这种机制不仅存在于混合层的内部,还存在于混合层的底部。而当风速足够大,风压和正压能够克服边界层倾斜产生的斜压时,底边界层在水库上风端倾斜到达水体表面<sup>[12]</sup>,较高密度的底层水在风压的作用下到达低密度上层水的上方,进而导致半混合水库水体的突然混合<sup>[13]</sup>(图1),此时剪切机制在混合过程中占主导作用<sup>[11]</sup>。

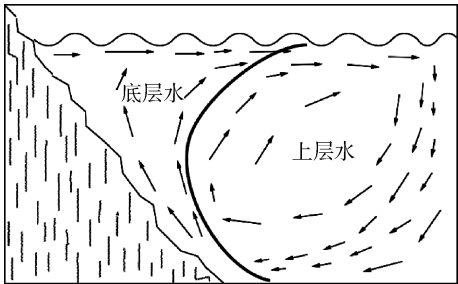


图1 半混合水库突然混合机理

Thompson等<sup>[10,14]</sup>提出了无量纲参数韦德伯恩数 $W$ ,并表明湖库中上升流与韦德伯恩数成反比;Spigel等<sup>[11]</sup>建立了无量纲参数理查德森数 $R_i$ 与底

边界层线性倾斜斜率的定量关系,同时根据理查德森数与韦德伯恩数的计算公式,推导得出当底边界层上风端线性倾斜到达水体表面时线性韦德伯恩数 $W_{\text{linear}}=0.5$ ;Monismith等<sup>[13,15]</sup>进行的水槽实验证明底边界层在风影响下的倾斜轮廓为非线性,并且非线性韦德伯恩数 $W_{\text{non-linear}}\approx 1$ 时底边界层上风端倾斜到达水体表面;Shintani等<sup>[12]</sup>提出了底边界层上风端垂直位移尺度与韦德伯恩数关系的经验公式,表明长方体半混合湖库中 $W=8/9$ 时底边界层上风端倾斜到达水体表面。传统线性、非线性韦德伯恩数与理查德森数均仅适用于长方体湖库,Imam等<sup>[16]</sup>通过对比3种湖库地形,发现不同地形下底边界层倾斜对风压的响应不同;Shintani等<sup>[12]</sup>进一步将传统韦德伯恩数的计算公式进行了改进,使其适用于具有不规则地形的实际湖库。目前,在计算海湾水库突然混合的临界风速时,对于临界风速下水库底边界层下风端与水库边界不同的接触位置影响水库突然混合临界风速的考虑较少。

青岛市拟在黄岛棋子湾内修建沐官岛海湾水库,由上文所述,该水库存在突然泛咸风险。在Shintani等<sup>[12]</sup>提出的底边界层上风端垂直位移尺度与韦德伯恩数定量关系的基础上,结合沐官岛水库的地形及分层位置,预测引起该水库突然混合的临界风速。风向为水库所在地区主导风向NNW时,年发生大风日数最多(6.8 d)<sup>[17]</sup>,因此本文主要计算风向为NNW(风由陆岸吹向海),水库突然混合的临界风速,并对比风向为SW(风由海吹向陆岸,年发生大风日数5.9 d,仅次于风向为NNW时大风发生日数<sup>[17]</sup>)时沐官岛水库突然混合的临界风速。同时对分析当分层位置等条件不变,风向分别为NNW和SW时虚拟的长方体水库突然混合的临界风速。

## 1 研究区概况和计算方法

### 1.1 沐官岛水库概况

#### 1.1.1 基础数据

拟建的沐官岛水库既有临海坝又有临岸坝,其垂直剖面为不规则的五边形(图2)。其中水库最大水深 $H_1$ 为9 m,临岸坝高 $H_2$ 为3 m,上层水体厚度为 $h_1$ ,库底水平部分 $L_2$ 为800 m,风向为NNW时水库最大表面吹程 $L_{1,\text{NNW}}$ 为3 103.45 m,风向为SW时水库最大表面吹程 $L_{1,\text{SW}}$ 为3 620.69 m。可见,沐官岛水库不同于上文提到的两种湖库地形,底边界层倾斜程度对风的响应将随地形而发生改变。由于临岸坝的存在,Shintani等<sup>[12]</sup>提出的底边界层上风端上升高度 $\Delta$ 和底边界层下风端下降高度 $\nabla$ 的计算关系也发生了改变。这影响了倾斜后底边界层上界面

中点到水面的垂直距离的计算,进而影响水库突然混合临界风速的计算。

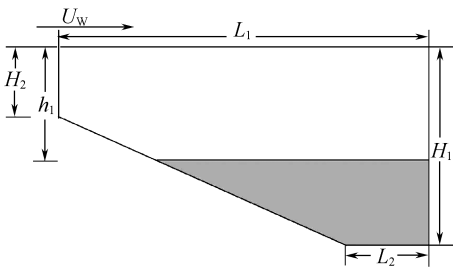


图2 沐官岛水库纵剖面

由于建库时库内残存的海水和水库运营过程中咸化浅层地下水的补给以及库底咸化沉积物中盐分向库水扩散,海湾水库底边界层水体盐分质量浓度较大。浙江大塘港水库在建库19年时对库底深潭水进行抽排,抽水盐分质量浓度始终在 $14\text{ kg/m}^3$ 左右<sup>[18]</sup>。因此,假设沐官岛水库底边界层水平平均盐分质量浓度为 $14\text{ kg/m}^3$ ,上层水盐分质量浓度为 $0.5\text{ kg/m}^3$ ;假设上下层水体温度均在 $4^\circ\text{C}$ ,此时上层水密度 $\rho_1$ 和底边界层水平平均密度 $\rho_2$ 分别为 $1000.5\text{ kg/m}^3$ 、 $1014\text{ kg/m}^3$ 。

由计算过程可知,水库分层位置将对临界风速产生影响。通常分层位置需要实地测量确定,但沐官岛水库目前尚处于设计阶段,所以通过 McGuire 等<sup>[19]</sup>提出的预测半混合湖库分层位置模型进行计算,得出沐官岛水库在水深 $4.7\text{ m}$ 处出现盐分层,即库底边界层厚度为 $4.3\text{ m}$ 。

### 1.1.2 底边界层下风端与水库边界接触部位

在沐官岛水库地形基础上,水库分层位置的变化将引起临界风速下底边界层下风端与水库边界接触位置的差异(图3),进而通过影响有效湖库长度 $L_e$ ,对水库突然混合的临界风速产生影响。因此,基于沐官岛水库地形,考虑临界风速时水库底边界层下风端与水库边界接触位置对临界风速的影响,计算沐官岛水库突然混合的临界风速。以风向为NNW时为例,由于水库分层位置不同,底边界层倾斜并在上风端与库水表面相交时,底边界层下风端与水库边界的接触位置可以分为3种情况:底边界层下风端与水库临海坝相交(图3(a))、底边界层

下风端与水库水平底相交(图3(b))、底边界层下风端与水库斜底相交(图3(c))。

分层位置固定时,风向的改变也可能会影响底边界层下风端与水库边界的接触位置。分层位置为水下 $4.7\text{ m}$ ,在沐官岛水库突然混合的临界风速时,对不同接触情况进行几何计算。计算结果表明,当风向为NNW,沐官岛水库底边界层下风端与水库水平底相交,水库有效湖库长度为 $3\,088.79\text{ m}$ ,同样条件下虚拟长方体水库有效湖库长度为 $2\,965.52\text{ m}$ ;当风向为SW,沐官岛水库底边界层下风端与水库斜底相交,有效湖库长度为 $1\,582.34\text{ m}$ ,同样条件下虚拟长方体水库有效湖库长度为 $3\,459.77\text{ m}$ 。

### 1.2 计算方法

利用韦德伯恩数 $W$ 与底边界层上风端垂直位移尺度的关系,计算海湾水库突然混合的临界风速<sup>[10,14]</sup>,其计算公式为

$$W = g'h_1^2/u_*^2 L \quad (1)$$

其中  $g' = g(\rho_2 - \rho_1)/\rho_1$   $u_*^2 = \left(\frac{\rho_a}{\rho_1}\right)C_{10}U_{10}^2$

式中: $g'$ 为折减重力加速度, $\text{m/s}^2$ ;  $g$ 为重力加速度; $\rho_1$ 和 $\rho_2$ 分别为上层水密度和底边界层水的平均密度, $\text{kg/m}^3$ ;  $h_1$ 为上层水体厚度, $\text{m}$ ;  $L$ 为水体表面最大吹程, $\text{m}$ ;  $u_*$ 为风剪切力速度, $\text{m/s}$ ;  $\rho_a$ 为空气密度, $\text{kg/m}^3$ ;  $U_{10}$ 为水面以上 $10\text{ m}$ 处的风速, $\text{m/s}$ ;  $C_{10}$ 为水面以上 $10\text{ m}$ 处风作用于水面的拖曳力(切力)系数,其与风速的关系为

$$C_{10} = \left[ k^{-1} \ln \left( \frac{g10}{C_{10}U_{10}^2} \right) + K \right]^{-2} \quad (2)$$

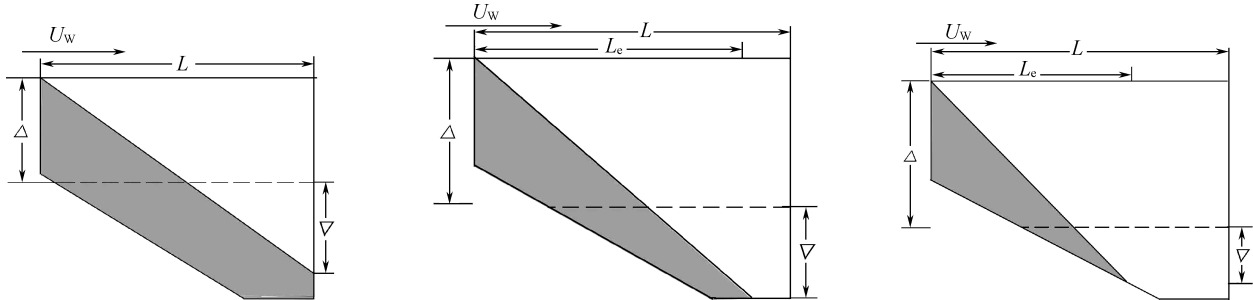
式中: $k$ 为冯卡曼常数,取 $0.41$ ;  $K$ 为诺克常数,取 $11.3$ 。

Spigel 等<sup>[11]</sup>建立了无量纲参数理查德森数 $R_i$ 与底边界层线性倾斜斜率的定量关系:

$$R_i = x/\xi_1 \quad (3)$$

式中: $\xi_1$ 为底边界层上风端上升的垂直距离, $\text{m}$ ;  $x$ 为湖库长度, $\text{m}$ 。若 $x = L/2$ ,  $\xi_1 = h_1$ ,则 $W = 0.5$ 。因此,假设底边界层线性倾斜, $W = 0.5$ 时,底边界层上风端倾斜到达水体表面。

然而,现实中半混合水库底边界层倾斜时会因



(a) 底边界层下风端与水库临海坝相交

(b) 底边界层下风端与水库水平底相交

(c) 底边界层下风端与水库斜底相交

图3 风向为NNW时临界风速下水库底边界层与水库边界接触情况

有限振幅效应而产生过冲现象,造成底边界层位移轮廓为非线性而不是线性<sup>[12]</sup>(图4)。Shintani 等<sup>[12]</sup>指出,底边界层上风端位移尺度与韦德伯恩数的关系符合经验公式:

$$\Delta^* = 1 - \left\{ \frac{2}{\pi} \tan^{-1} \left[ \left( \frac{9}{8} W - 1 \right)^{0.81} \right] \right\}^{0.57} \quad (4)$$

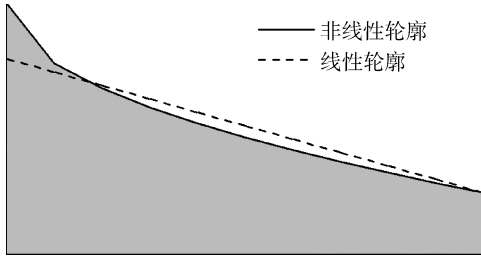


图4 长方体湖库底边界层位移纵剖面

根据式(4),  $W = 8/9$  时  $\Delta^* = 1$ , 即底边界层上风端倾斜到达水体表面, 下层咸水进入上层淡水, 水体将发生突然混合, 库水存在盐分突然超标风险。现实中湖泊水库的垂直剖面大多形状不规则, 例如呈两侧倾斜角不同的梯形(图5), 图5中  $\Delta$  为底边界层上风端上升高度,  $\nabla$  为底边界层下风端下降高度。而 Shintani 等<sup>[12]</sup>提出的边界层上风端垂直位移尺度与韦德伯恩数关系的经验公式仅适用于长方体湖库, 基于此 Shintani 等<sup>[12]</sup>将传统韦德伯恩数进行了改进。由图5可见, 水库  $a$ 、 $b$  两部分在底边界层倾斜后的斜压平衡中未起作用, 因此可建立一个虚拟长方体水库(图5虚线部分), 其中虚拟分层位置为倾斜后底边界层上界面中点所在深度。对于虚拟长方体水库及其中的虚拟分层位置, 突然混合判断标准  $W = 8/9$  能够适用。但是, 韦德伯恩数公式中  $h_1$  不再是底边界层倾斜前上层水体厚度, 而是虚拟分层位置到水面的垂直距离  $h_{1B}$ ;  $L$  不再是水体表面最大吹程, 而是底边界层沿风向的最大水平长度, 即有效湖库长度  $L_e$ 。此时, 韦德伯恩数称为有效韦德伯恩数  $W_e$ , 公式为

$$W_e = g'h_{1B}^2/u_*^2 L_e \quad (5)$$

Shintani 等<sup>[12]</sup>认为库底的摩擦和具有缓坡的水库库底地形能够减小底边界层倾斜时的过冲现象, 并且底边界层非线性震荡围绕并收敛于线性震荡, 因此可使用底边界层线性位移轮廓得来的虚拟矩形

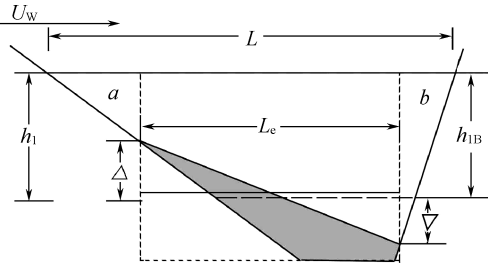


图5 具有双斜坡的盆地纵剖面

代替底边界层非线性位移的虚拟矩形。

综上所述, 联立有效韦德伯恩数  $W_e$  和风剪切力的计算公式, 最终求得当有效韦德伯恩数  $W_e = 8/9$  时海湾水库突然混合的临界风速。

## 2 结果分析

利用1.2节的计算方法, 将沐官岛水库的基础数据代入公式进行计算, 得到当风向为 NNW 时, 沐官岛水库突然混合的临界风速为 20.5 m/s; 当风向为 SW 时, 沐官岛水库突然混合的临界风速为 22.7 m/s。

### 2.1 影响因素

#### 2.1.1 分层位置及水库地形

分层位置是影响底边界层和上层水体混合条件的因素之一, 并且还会影响水库中的生物循环、生产力等<sup>[19]</sup>, 因此探讨半混合水库的分层位置具有重要的意义。将沐官岛水库中分层位置对临界风速的影响进行灵敏度分析。假设该水库混合深度向上浮动 10%, 临界风速下, 风向为 NNW 时底边界层下风端与水库临海坝相交, 此时该水库突然混合的临界风速为 19.2 m/s, 即临界风速减小 6.3%; 风向为 SW 时底边界下风端与水库斜底相交, 此时水库突然混合的临界风速为 20.2 m/s, 即临界风速减小 11.0%。假设混合深度向下浮动 10%, 临界风速下, 风向为 NNW 时底边界层下风端与水库水平底相交, 此时临界风速为 21.2 m/s, 即临界风速增大 3.4%; 风向为 SW 时底边界下风端仍与水库斜底相交, 此时水库突然混合的临界风速为 25.5 m/s, 即临界风速增大 12.3%。结果表明, 海湾水库分层位置的变化将对水库突然混合的临界风速产生影响, 分层位置越浅所需临界风速越小, 即水库越易发生突然混合; 当分层位置的变化引起底边界层下风端与水库边界接触位置情况的改变时, 其对临界风速的影响较大。风向为 NNW(风由陆岸吹向海), 分层位置小范围波动对临界风速的影响并不明显; 风向为 SW(风由海吹向陆岸), 分层位置变化对突然混合临界风速的影响较为明显。这是由于底边界层下风端与水库边界接触位置的不同, 导致风由陆岸吹向海时分层位置的改变对水库有效长度  $L_e$  的影响较小; 风由海吹向陆岸时分层位置的改变对水库有效长度  $L_e$  的影响较大。

海湾水库库底地形同样是影响水库突然混合临界风速的重要因素。通过计算, 风向为 NNW, 其他条件与沐官岛水库相同时, 虚拟长方体水库突然混合的临界风速为 21.7 m/s, 大于沐官岛水库突然混合的临界风速 20.5 m/s, 即沐官岛水库更容易发生突然混合, 这与 Shintani 等<sup>[12]</sup>的结论相反(不规则

地形半混合水库突然混合的临界风速通常大于长方体水库)。这是因为 Shintani 等<sup>[12]</sup>的计算并未涉及底边界层下风端触底的不同情况。而由于分层位置和地形的影响,风向为 NNW 时,沐官岛水库和具有相同条件的长方体水库在底边界层上风端倾斜到达水体表面时,底边界层下风端已经触底,且此时沐官岛水库有效湖库长度大于长方体水库的有效湖库长度;又因水库地形的影响,底边界层上界面中点到水面的垂直距离  $h_{1B}$  随边界层倾斜而减小,所以风向为 NNW 时,相同风速下沐官岛水库底边界层受风的扰动更大,进而导致沐官岛水库比具有同样条件的长方体水库更易混合,风向为 SW 时,沐官岛水库突然混合的临界风速为 22.7 m/s,大于风向为 NNW 时该水库突然混合的临界风速 20.5 m/s,并大于相同条件下长方体水库突然混合的临界风速 19.6 m/s,这与 Shintani 等<sup>[12]</sup>的结论相符。这是由于风向为 SW 时,虽然沐官岛水库水体表面的最大吹程增大为 3 620.69 m,但由于库底地形的影响,有效湖库长度  $L_e$  随着底边界层倾斜迅速减小,在底边界层上风端倾斜到达水体表面时,沐官岛水库有效湖库长度小于风向为 NNW 时该水库的有效湖库长度,且小于相同条件下长方体水库的有效湖库长度,从而使风向为 SW 的风对沐官岛水库底边界层产生的扰动相对较小。

2.1.2 上下层水体密度

水库水体密度受到盐分、温度的影响。沐官岛水库尚未建成,其下层水体温度较难确定。相比较而言,青岛地区冬季 3 个月大风日数最多<sup>[17]</sup>,即冬季时沐官岛水库发生突然混合的风险较大;而青岛地区冬季时水库上下层水体一般温差不大,因此主要考虑盐分对水体密度的影响,水温按 4℃ 计算。

海湾水库水体密度受盐分浓度的影响较大。分别将水库下层水体平均盐分浓度与水库上层水体盐分浓度对临界风速的影响进行灵敏度分析。假设沐官岛水库下层水体平均盐分浓度上下浮动 10%,上层水体盐分浓度不变,风向为 NNW 时,该水库突然混合的临界风速为 19.7 ~ 21.3 m/s,即上下波动 3.9%;风向为 SW 时,水库突然混合的临界风速为 21.8 ~ 23.6 m/s,同样上下波动 3.9%。假设沐官岛水库上层水体盐分质量浓度上下浮动 10%,下层水体平均盐分质量浓度不变,风向为 NNW 时,该水库突然混合的临界风速为 20.4 ~ 20.6 m/s,即上下波动 0.49%;当风向为 SW 时,水库突然混合的临界风速为 22.6 ~ 22.8 m/s,即上下波动 0.44%。分析表明,上层水盐分质量浓度越小、下层水平均盐分质量浓度越大,则水体突然混合的临界风速越大,即水体

越稳定,越难发生突然混合;风向不同时,上下层水体盐分浓度对水库突然混合临界风速的灵敏度相差不大;上下层水体盐分质量浓度小范围波动对水库突然混合的临界风速灵敏度不高。由此可见上下层水体密度小范围的变化,对临界风速的影响不大。

2.2 突然泛咸临界风速对水库管理的启示

水库管理者常常只关注表层水的盐分浓度是否超标,所以在海湾水库常规水质监测时通常仅进行表层水体分析<sup>[20]</sup>。然而海湾水库一般为半混合水库,其水体常年存在分层现象,表层水盐分浓度符合用水标准的同时,底层水会出现盐分的大量累积,两层水体的突然混合将使库水存在盐分突然超标的风险。根据青岛 2013—2017 年风速数据,青岛在 NNW 方向 6 ~ 7 级大风时有发生,这已经接近沐官岛水库在该风向突然混合的临界风速 20.5 m/s,水库出现突然混合的风险较大。因此,海湾水库运营管理过程中,不能只是监测表层水的盐分浓度,而应对库水整体的垂向盐分分布进行监测,并实时统计上下层水体的盐分浓度和温度以及水库分层位置,计算水库突然混合的临界风速,同时结合天气预报,在恰当的时机抽排库底咸水,预防库水盐分突然超标。为避免强风经过时水体突然混合造成库水盐分浓度超标,提出 3 点建议:

a. 水库蓄水前排尽库区内残存海水,并在水库运营过程中保证较高的蓄水水位。有学者指出,库内残存海水和水库运营过程中咸化浅层地下水的补给为海湾水库水体主要盐分来源<sup>[3,21]</sup>。水库蓄水前尽量排尽库内海水,并使水库运营过程中尽量维持水库的高水位蓄水状态,以减少周边咸化地浅层下水的汇入,能够有效减少海湾水库底边界层中盐分的累积。

b. 蓄水前开挖库底排咸沟,并排出初期蓄水。有学者<sup>[22-23]</sup>认为,库底咸化沉积物是海湾水库中盐分的主要来源之一。水库蓄水之前开挖库底排咸沟,排出初期蓄水能够有效排出库底沉积物中的盐分,从而减少盐分在底边界层中的累积<sup>[24]</sup>。

c. 结合天气预报及实时统计的水库分层位置、上下层水体的盐分浓度和温度等信息,确定抽排海湾水库底层咸水的时机。室内实验<sup>[25]</sup>与野外实践<sup>[1,18]</sup>均表明,抽排水库底层咸水可以有效降低库水盐分浓度,并减小海湾水库因突然混合而导致盐分超标的风险。海湾水库常出现周期性泛咸现象,抽排底部咸水后,盐分会再次在底层累积,所以在未达到库水混合泛咸条件时实施抽排底层咸水措施将造成水库咸化防治资金的浪费。因此,实时统计水库上下层水体的盐分浓度和温度,确定分层位置,计

算水库突然混合的临界风速;通过天气预报提前获知有达到突然混合条件的强风出现时再抽排底层咸水,有助于提高资金利用效率。

### 3 结 论

a. 当风向为 NNW,水面以上 10 m 处的风速大于 20.5 m/s 时,沐官岛水库将出现突然混合,该风速小于同样条件下虚拟的长方体水库突然混合的临界风速(21.7 m/s);当风向为 SW,突然混合的临界风速为 22.7 m/s,大于同样条件下虚拟长方体水库临界风速(19.6 m/s)。风由海吹向陆岸时,虽然沐官岛水库水体表面最大吹程大于风由陆岸吹向海时水库水体表面的最大吹程,而水库水体却更难发生突然混合;同时在这两个不同的风向下,该水库临界风速与具有相同条件的虚拟长方体水库突然混合临界风速的大小关系相反。

b. 由于地形以及分层位置等因素的差异,以往对于半混合湖库突然混合临界风速的计算方法并不适用于所有情况;风向不同将导致同一湖库突然混合临界风速的差别。因此在进行海湾水库突然混合的临界风速计算时,需结合具体水库合理选择参数,尤其要关注风向以及临界风速时底边界层下风端与水库边界接触位置的影响。

c. 根据实时统计的水库上下层水体的盐分浓度、温度和分层位置等信息,计算海湾水库突然混合的临界风速,并结合天气预报确定抽排底层咸水的时机,这有助于提高咸化防治资金的利用率。

### 参考文献:

[ 1 ] 王高正,朱江平. 大塘港水库机械排咸技术[J]. 水利水电科技进展,1998,18(4):44-46. ( WANG Gaozheng, ZHU Jiangping. The mechanical discharge salt water technology of Datanggang reservoir [ J ]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 1998, 18 ( 4 ): 44-46. ( in Chinese ) )

[ 2 ] 岳大伟,高增文,赵全升,等. 海湾水库突然泛咸的实验研究[J]. 水资源保护,2013,19(4):40-44. ( YUE Dawei, GAO Zengwen, ZHAO Quansheng et al. Experimental study of abrupt salinization in estuary reservoirs[J]. Water Resources Protection,2013,19(4):40-44. ( in Chinese ) )

[ 3 ] 吴光红,李金中,李学菊. 天津滨海地区城市供水调节水库水质咸化原因与改善途径[J]. 水资源保护,2010,26(1):29-31. ( WU Guanghong, LI Jinzhong, LI Xueju. Cause and prevention countermeasures of water salinization of city water supply reservoir in the coastal region of Tianjin[J]. Water Resources Protection,2010,26(1):29-31. ( in Chinese ) )

[ 4 ] 王青,吕紫君,孙杰,等. 基于水幕方法的珠江河口抑咸对策[J]. 水资源保护,2018,34(5):50-56. ( WANG Qing, LYU Zijun, SUN Jie, et al. Study on measures of saline water intrusion control to Pearl River Estuary based on water curtain method[J]. Water Resources Protection, 2018, 34 ( 5 ): 50-56. ( in Chinese ) )

[ 5 ] OKELY P,IMBERGER J. Horizontal transport induced by upwelling in a canyon-shaped reservoir [ J ]. Hydrobiologia,2007,586(1):343-355.

[ 6 ] 毛献忠,朱小敖,陈甫源,等. 沿海堵港蓄淡水库加快水体淡化措施的研究[J]. 水科学进展,2005,16(6):773-776. ( MAO Xianzhong, ZHU Xiaobao, CHEN Puyuan, et al. Study on accelerating water desalination in polder reservoir for storage of fresh water water along the coast [J]. Advance in Water Science,2005,16(6):773-776. ( in Chinese ) )

[ 7 ] 高增文,薛青美,李宇浩,等. 海湾水库蓄水初期的单向往复密度流[J]. 水科学进展,2016,27(1):81-87. ( GAO Zengwen, XUE Qingmei, LI Yuhao, et al. Single alternating density currents during initial impoundment of estuarine reservoirs[J]. Advance in Water Science,2016,27(1):81-87. ( in Chinese ) )

[ 8 ] FRICKER P D. The effect of stratification and bathymetry on internal seiche dynamics[D]. Washington:Massachusetts Institute of Technology,2000.

[ 9 ] IMBERGER J. Physical Processes in Lakes and Oceans [M]. Washington:American Geophysical Union,1998:1-17.

[ 10 ] IMBERGER J, HAMBLIN P F. Dynamics of lakes, reservoirs, and cooling ponds[J]. Annual Review of Fluid Mechanics,1982,14:153-187.

[ 11 ] SPIGEL R H,IMBERGER J. The classification of mixed-layer dynamics of lakes of small to medium size [ J ]. Journal of Physical Oceanography, 1980, 10 ( 7 ): 1104-1121.

[ 12 ] SHINTANI T,ALBERTO D L F,ALBERTO D L F,et al. Generalizations of the Wedderburn number:parameterizing upwelling in stratified lakes [ J ]. Limnology & Oceanography,2010,55(3):1377-1389.

[ 13 ] MONISMITH S. An experimental study of the upwelling response of stratified reservoirs to surface shear stress[J]. Journal of Fluid Mechanics,1986,171:407-439.

[ 14 ] THOMPSON R O R Y, IMBERGER J. Response of a numerical model of a stratified lake to wind stress [ J ]. Proceedings International Symposium on Stratified Flows, 1980, 2 : 562-570.

[ 15 ] NIÑO Y, CABALLERO R, REYES L. Mixing and interface dynamics in a two-layer stratified fluid due to surface shear stress [ J ]. Journal of Hydraulic Research, 2003, 41 ( 6 ): 609-621.

(下转第 87 页)

- ECOMSED[J]. Yangtze River, 2017, 48(15): 30-34. (in Chinese))
- [21] 潘存鸿, 张舒羽, 唐子文. 钱塘江河口水流-河床相互作用及对盐水入侵的影响[J]. 水科学进展, 2015, 26(4): 535-542. (PAN Cunhong, ZHANG Shuyu, TANG Ziwen. Interaction of flow-riverbed and its effects on saltwater intrusion in Qiantang River estuary [J]. Advances in Water Science, 2015, 26(4): 535-542. (in Chinese))
- [22] 丁磊, 窦希萍, 高祥宇, 等. 长江口 2013 年和 2014 年枯季盐水入侵分析[J]. 水利水运工程学报, 2016(4): 47-53. (DING Lei, DOU Xiping, GAO Xiangyu. Analysis of saltwater intrusion into Yangtze estuary during dry seasons of 2013 and 2014 [J]. Hydro-Science and Engineering, 2016(4): 47-53. (in Chinese))
- [23] OU S, ZHANG H, WANG D. Dynamics of the buoyant plume off the Pearl River Estuary in summer [J]. Environmental Fluid Mechanics, 2009, 9(5): 471-492.
- [24] SCULLY M E, FRIEDRICHS C, BRUBAKER J. Control of estuarine stratification and mixing by wind-induced straining of the estuarine density field[J]. Estuaries and Coasts, 2005, 28(3): 321-326.
- [25] HILTON T W, NAJJAR R G, ZHONG L, et al. Is there a signal of sea-level rise in Chesapeake Bay salinity? [J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2008, 113(C9): 566-578.
- [26] ZHANG X F, DENG J Q. Affecting factors of salinity intrusion in Pearl River Estuary and sustainable utilization of water resources in Pearl River Delta: sustainability in food and water[M]. Netherlands Springer, 2010: 11-17.
- [27] 诸裕良, 闫晓璐, 林晓瑜. 珠江口盐水入侵预测模式研究[J]. 水利学报, 2013, 44(9): 1009-1014. (ZHU Yuliang, YAN Xiaolu, LIN Xiaoyu. Study on prediction model of saline intrusion in Pearl River delta [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2013, 44(9): 1009-1014. (in Chinese))
- [28] PARSA J, ETEMAD-SHAHIDI A. An empirical model for salinity intrusion in alluvial estuaries [J]. Ocean Dynamics, 2011, 61(10): 1619-1628.
- [29] XIN P, WANG S J, ROBINSON C, et al. Memory of past random wave conditions in submarine groundwater discharge [J]. Geophysical Research Letters, 2014, 41(7): 2401-2410.

(收稿日期: 2017-11-07 编辑: 王 芳)

+++++  
(上接第 81 页)

- [16] IMAM Y E, LAVAL B E. The effect of non-uniform depth on the baroclinic response to wind in elongated basins [J]. Environmental Fluid Mechanics, 2013, 13(2): 101-123.
- [17] 宫攀, 孙即霖, 公延华. 黄海大风日数长期变化特征研究[J]. 现代农业科技, 2013(12): 185-187. (GONG Pan, SUN Jilin, GONG Yanhua. Long-term change characteristics of gale days on the Yellow Sea [J]. Modern Agricultural Sciences, 2013(12): 185-187. (in Chinese))
- [18] 王高正, 朱江平. 港港蓄淡工程小流量机组群抽水排咸技术及效益分析[J]. 浙江水利科技, 1997(3): 23-25. (WANG Gaozheng, ZHU Jiangping. The technology and benefit analysis of discharging salt water using small flow unit group in estuarine reservoirs [J]. Zhejiang Hydraulics, 1997(3): 23-25. (in Chinese))
- [19] MCGUIRE S, CURRIE D J. Factors related to the variation in mixing depth among meromictic lakes [J]. Canadian Journal of Fisheries & Aquatic Sciences, 1993, 50(6): 1338-1342.
- [20] 高增文, 李宇浩, 赵全升, 等. 海湾水库沉积物对水体咸化影响的时间尺度[J]. 水科学进展, 2015, 26(2): 221-226. (GAO Zengwen, LI Yuhao, ZHAO Quansheng, et al. Time scale for effects of sediment on water salinization of estuary reservoirs [J]. Advances in Water Science, 2015, 26(2): 221-226. (in Chinese))
- [21] 徐詠岗, 李敏中. 沿海滩涂水库排咸研究[J]. 河海大学学报(自然科学版), 1998, 26(3): 76-80. (XU Yonggang, LI Minzhong. Study on desalinization of coastal area reservoirs [J]. Journal of Hohai University (Natural Science), 1998, 26(3): 76-80. (in Chinese))
- [22] 姜翠玲, 裴海峰. 天津市北塘水库水质咸化原因和防治对策[J]. 湖泊科学, 2007, 19(4): 428-433. (JIANG Cuiling, PEI Haifeng. Reasons of water salinization and its prevention measures in Beitang Reservoir, Tianjin City [J]. Journal of Lake Science, 2007, 19(4): 428-433. (in Chinese))
- [23] 叶清华, 李煜, 王文, 等. 底泥盐分释放影响下的滨海水库水体盐度变化过程数值模拟[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2015, 43(6): 14-19. (YE Qinghua, LI Yu, WANG Wen, et al. Numerical simulation of water salinity change process in coastal reservoir influenced by sediment salt release [J]. Journal of Hohai University (Natural Science), 2015, 43(6): 14-19. (in Chinese))
- [24] 王娟, 高增文, 赵全升. 库底排咸沟对控制海湾水库库水咸化的效应[J]. 环境科学与技术, 2010(增刊2): 33-35. (WANG Juan, GAO Zengwen, ZHAO Quansheng. Effects of draining interstitial water on the water salinization in polder reservoirs [J]. Environmental Science & Technology, 2010(Sup2): 33-35. (in Chinese))
- [25] 高增文, 郑西来, 吴俊文. 海湾水库蓄水初期底质与淡水盐分交换的试验研究[J]. 水科学进展, 2006, 17(2): 170-175. (GAO Zengwen, ZHENG Xilai, WU Junwen. Experimental studies on salt exchange between fresh water and sediments in a polder reservoir [J]. Advances in Water Science, 2006, 17(2): 170-175. (in Chinese))

(收稿日期: 2017-12-12 编辑: 王 芳)