

## 热分层对水库水质的季节性影响——以西安黑河水库为例\*

卢金锁, 李志龙

(西安建筑科技大学环境与市政工程学院, 西安 710055)

**摘要:** 深水库作为城市的重要供水水源, 通常由于热量在垂向水体上的不均匀分配形成热分层. 热分层会阻碍垂向上水体交换引发水质分层现象, 在冬季水库发生“翻库”之后, 水体混合导致水库的整体水质下降. 结合热分层指数可以客观、直接地表达水库热分层的稳定程度. 综合水库的气温、水体更新率和水质参数(溶解氧、pH、总磷、氨氮)的年度变化, 对陕西黑河水库 2008—2010 年的热分层状况进行研究. 研究表明: 水库的热分层形成会直接恶化底部水质尤其会加速底部水体中溶解氧的消耗; 热分层的年度变化主要受气温控制, 但在特定期较大的水体更新率可以在一定程度上弱化水体热分层, 减缓底部水质恶化. 该结果可使水库管理者在水库分层最稳定、水质恶化最严重时期以人工调节水体更新率的方式弱化热分层, 为保证水质安全提供参考.

**关键词:** 深水库; 黑河水库; 热分层指数; 溶解氧; 水体更新率

### Seasonal effects of thermal stratification on the water quality of deep reservoirs: A case study of Heihe Reservoir, Xi'an City

LU Jinsuo & LI Zhilong

(School of Environmental and Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, P. R. China)

**Abstract:** As a major source of water supply for cities, deep reservoirs usually form thermal stratification due to the uneven vertical heat distribution. Thermal stratification can hinder the vertical water exchange, thus cause water quality stratification. In winter, the water mixing caused by the “turnover” of a reservoir leads to the deterioration of overall water quality. With the application of thermal stratification index, the reservoir thermal stratification stability can be objectively and directly expressed. Integrated with the annual changes of reservoir temperature, water renewal rate and water quality parameters (dissolved oxygen, pH, total phosphorous, ammonia nitrogen), this paper studied the thermal stratification conditions of Heihe Reservoir, Shanxi Province, in 2008–2010. Studies showed that the formation of the thermal stratification could directly deteriorate the water quality and particularly accelerate the consumption of dissolved oxygen, in the bottom water. Although annual changes of thermal stratification are mainly controlled by the temperature, at certain periods the higher water renewal rate can weaken the thermal stratification to some extent, and mitigate the deterioration of the bottom water quality. The results show that during the periods of the most stable thermal stratification managers of the most serious deteriorating water quality reservoirs can manually adjust the water renewal rate to weaken the thermal stratification; this is a valuable mechanism in safeguarding the water quality.

**Keywords:** Deep reservoir; Heihe Reservoir; thermal stratification index; dissolved oxygen; water renewal rate

水库建成之后在库区形成巨大的停滞水域, 光照的直接辐射和水体自身的物理、化学作用使水库水体产生与自然河流完全不同的水域环境<sup>[1]</sup>. 由于水库的水力停留时间过长, 水体的对流交换不佳, 导致夏季高温时期温度会在深度方向上形成分层现象, 使水体在垂直方向上形成变温层、斜温层和恒温层 3 层水体. 湖库热分层现象的主要影响因素即是大气温度升高对于水体的传热不均形成, 再加上夏季时期是太阳辐射热的最强时期, 依托水库水体拥有的较长水力停留时间致使水体热分层现象在夏季高温时期达到最稳定<sup>[2]</sup>.

\* 国家自然科学基金项目(5100824)、陕西省科技发展项目(2012KJXX-32)和人社部留学人员科技活动项目联合资助. 2013-08-10 收稿; 2014-03-04 收修改稿. 卢金锁(1977~), 男, 博士, 教授; E-mail: lujinsuo@163.com.

水库稳定分层的形成会对水体理化指标(如溶解氧、氮、磷等)产生较大影响<sup>[3]</sup>.持续的热成层使水库表层水体出现较高的pH、溶解氧、亚硝酸盐氮、总磷和藻类细胞密度,进而影响水质安全<sup>[4-5]</sup>.对于水库底部的恒温层在长期的分层状态下,由于斜温层阻碍了水中各类物质与表层水体对流交换,因此底部底泥表层处溶解氧的变化最为明显<sup>[6]</sup>.而底泥中富含大量的微生物和氮、磷类颗粒物,有研究表明厌氧条件是释放底泥中氮、磷的主要原因<sup>[7]</sup>,因此在厌氧环境下,水体中的氮、磷会释放进入水中,影响底部水质.

进入秋季气温下降会引发水库水体在垂直方向上由于密度的差异而发生“翻库”现象,底泥在厌氧条件下所释放的大量铁、锰、氨类污染物进入上层水体,促进浮游藻类的大量繁殖进而引发水体富营养化,危害城市供水安全<sup>[8-9]</sup>.我国目前已基本建成的三峡水库其支流库湾在每年的春季之后都会暴发不同程度的水华现象,这是由于水库底部水体中的有机质在厌氧情况下进行厌氧分解,释放了各类内源污染物,导致水质过营养而引起水华发生<sup>[10]</sup>.

为了较直观地表达热分层的分层强弱,目前国际上常用的方法是将热分层这一抽象定义以具体的系数呈现出来,做到以系数值的大小确定一年之中热分层的强弱.目前表达热分层系数的方法包括 Lake number 指数<sup>[11]</sup>、APE 水库潜在势能指数<sup>[12]</sup>、Schmidt stability 系数、Wedderburn 指数<sup>[13]</sup>和 RWCS 指数<sup>[14]</sup>等.其中, Lake number 指数、Schmidt stability 系数和 Wedderburn 指数计算方法繁琐且所需数据量巨大,不利于进行快速验证研究;而 RWCS 指数计算虽然方便但其数据只考虑了上、下两层水体密度的差异性,不具有对水库的整体评估作用,无法正确表达水库的热分层程度.为此本文选用能量系数 APE 指数并结合水质参数作为描述水体热分层对湖库整体水质影响的一个评价指标.

作为一项分层稳定性的评价因子,其数值的波动代表了分层的稳定强弱,分层稳定的主要影响因素是气温的波动.除此之外,由于水库的水文过程(人为调蓄)、水体滞留时间、来水方式(异重流影响)等与自然湖泊存在较大差异,因此对于研究水库的热分层不能完全仅按照温度一项考虑<sup>[15]</sup>.本文着重研究了水库水体更新率的年际变化与分层指数 APE 间的关系,以从中获得人为调控水库运行改变各月份 APE 值, APE 值的变化则意味着水库的热分层稳定性可以实现人工控制,这一措施有助于水库水质的提升.

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区域概况

黑河为渭河右岸较大支流,属黄河二级支流,全流域面积为 2258 km<sup>2</sup>,干流总长为 125.8 km,河道比降为 8.77‰.黑河水库位于西安市周至县秦岭山中,设计正常高水位为 594.0 m,平均水深为 70~90 m,总库容、有效库容、多年平均调节水量分别达到 2.0×10<sup>8</sup>、1.77×10<sup>8</sup>、4.28×10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>,其平均每年向西安市供水 3.05×10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>,每日平均供水量可以达到 76.0×10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>,供水保证率达到 95%.有关黑河水库的主要测量学特征见表 1.

黑河水库入流依赖于上游集水地域地表径流,入库水量的季节变化受降雨影响,同时上游山区森林覆盖率很高,并且基本没有工矿企业以及集中居民生活区,因此其上游水质能长期保持良好状态(达 I~II 类水质).因此在这种入流环境下黑河水库基本没有外源污染物的输入,其水质呈现出的季节性恶化主要归因于内源污染<sup>[16]</sup>.目前黑河水库水质现状整体符合地表水 III 类水质限值要求.

### 1.2 采样与分析方法

本研究在水库取水口设置固定监测点,每隔 2 周检测 1 次,持续时间为 2008—2010 年.选择在水库垂直剖面用美国哈希公司生产的 Hydrolab

表 1 黑河水库主要测量学特征  
Tab. 1 Main morphometry characteristics of Heihe Reservoir

参数	数值
坝高/坝顶高程	130 m/600 m
坝址控制流域面积	1481 km <sup>2</sup>
最大库容	2.0×10 <sup>8</sup> m <sup>3</sup>
主库区最大水面积	4.68 km <sup>2</sup>
主库区水面宽度	240~680 m
平均/最大水深	70~90 m/106 m
多年平均流量	21 m <sup>3</sup> /s
多年平均径流量	6.67×10 <sup>8</sup> m <sup>3</sup>
干流总长	125.8 km
库底最小高程(海拔)	488.5 m
平均水力停留时间	98~135 d
主库区库盆宽度	50~200 m

DS5 型多功能水质分析仪现场测定水深(表 2)、水温、溶解氧(DO)浓度、pH 指标;总磷(TP)和氨氮(NH<sub>3</sub>-N)浓度分别用过硫酸钾消解-钼锑钨分光光度法(GB/T 11893—1989)和纳氏试剂分光光度法(GB/T 7479—1987)进行测定. 监测期间水库区域的风速、气温、水库流量调配等数据从当地的气象管理站和水库管理部门获得.

表 2 2008—2010 年黑河水库各月份的监测水深(m)

Tab. 2 Monitoring water depth of each month in Heihe Reservoir during 2008—2010

年份	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
2008	75	73	70	79	72	63	66	77	78	85	63	72
2009	84	75	68	64	62	66	80	88	85	91	89	88
2010	81	77	76	66	64	73	74	94	91	86	81	77

### 1.3 热分层系数计算方法

$APE$  系数代表水体潜存的势能总量,以数值的形式表示稳定程度. $APE$  值的大小代表需将水体完全混合时所需外部施加的动能值,因此其值越大表明水体自身稳定程度愈高,外部对其破坏起来需较大能量,而当其值较低时水体自身较为不稳定,极易受到外部影响而出现自身的混合.

$APE$  系数可以反映水库水体在一年内的整体稳定性的波动,其计算公式为:

$$APE = \frac{1}{D} \int_{-D}^0 (\rho - \rho^*) g dz \quad (1)$$

式中, $D$  为水体总深度(m), $\rho$  为不同水层处水体密度( $\text{kg}/\text{m}^3$ ), $\rho^*$  为水库垂直方向上的平均密度( $\text{kg}/\text{m}^3$ ), $g$  为重力加速度, $z$  为积分运算中的微元深度.

## 2 结果

### 2.1 黑河水库热分层指数的季节变化

2008—2010 年黑河水库  $APE$  系数的年际变化情况表明, $APE$  所代表的水库纵向水体 3 年来经历了从最初水体混合期—分层形成期—分层稳定期—分层衰减期—水体再混合的变化过程. $APE$  值在每年 3—4 月上旬为热分层的形成阶段,4 月中旬到 8 月达到最稳定程度,8 月中旬至 10 月伴随气温下降水体进入分层衰减期,10 月至次年 2 月重新处于水体混合阶段(图 1).

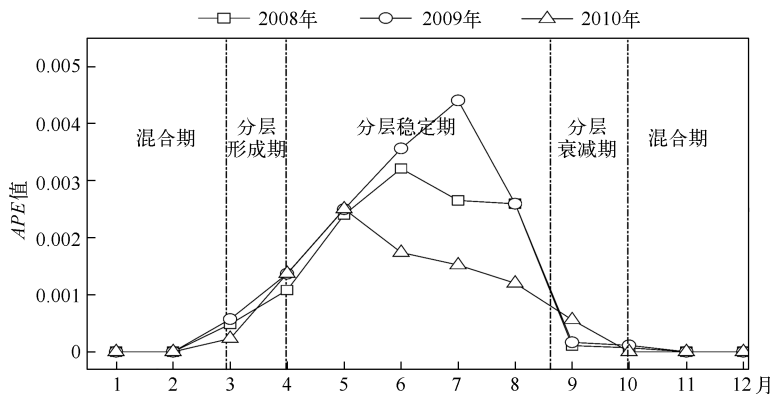


图 1 2008—2010 年黑河水库热分层指数的季节变化

Fig. 1 Seasonal variation of thermal stratification index of Heihe Reservoir during 2008—2010

各个分层时期的分布时间从  $APE$  图可以看出(图 1),水体混合期即为  $APE$  值在 0 处时;对于水库分层形成期,本文为便于研究将  $0.0005 < APE < 0.001$  时定义为分层形成期;而对于持续时间最长的分层稳定

期,当  $APE$  值  $\geq 0.001$  后即认为水库进入热分层的稳定时期;而进入 8 月份后当  $APE$  值低于 0.001 时即认为水库热分层进入衰减弱化阶段,水库纵向水体已开始呈现微弱的混合,直到水体完全混合,即  $APE = 0$ .

### 2.2 黑河水库底部水体中 pH 变化

黑河水库底部水体的 pH 变化主要受水体中氧化还原类物质的分解反应影响.黑河水库底部水体中 pH 变化表明,pH 并没有像 DO 一样有明显的季节变化规律,但上半年的 pH 相对较高于下半年(图 2),分析原因是由于底部水体中的有机质腐化分解产生各类有机酸<sup>[17-18]</sup>,在夏季热分层稳定之后底部水体无法补充 DO 致使缺氧现象日趋明显,导致底泥中有机质在不断腐化过程中使水体出现显著的 pH 降低现象.

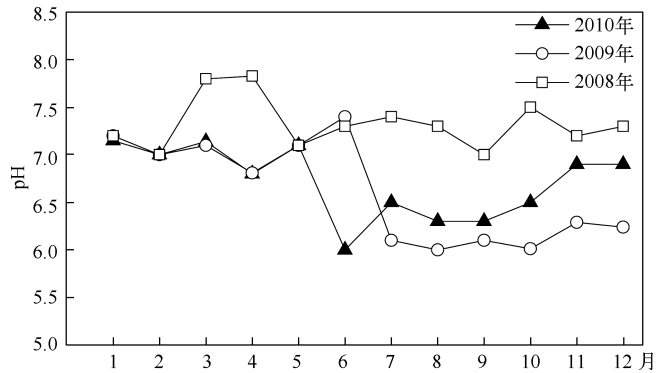


图 2 2008—2010 年黑河水库底部 pH 的季节变化

Fig. 2 Seasonal variation of pH at the bottom of Heihe Reservoir during 2008 - 2010

## 3 讨论

### 3.1 黑河水库 APE 值的季节变化对底层水体中溶解氧的影响

黑河水库底层水体 DO 年际变化表明(图 3),强烈的热分层作用抑制了水体垂向上的交换,加剧了底层溶解氧在分层期过度消耗.在热分层没有稳定形成之前(即每年的 1—4 月左右),在水库垂向上由于没有稳定的斜温层结构无法阻止水体在垂向上的自由更换,因此可使水库底层水体中的 DO 含量均处于 8 mg/L 之上,良好的溶氧状态使底部水体还原反应受到抑制,可保证水质良好(图 3).而进入热分层形成期后, $APE$  指数迅速上升(图 1),斜温层的逐渐形成与稳定会直接抑制表层水体与底层水体的自由更换,因此该时期的底层水体成为一个被孤立的水体积存区,造成其 DO 无法得到外界的快速补充<sup>[19]</sup>.但底层水体中的大量好氧微生物仍不断消耗 DO 以获取自身能量,造成底层水体中的 DO 在热分层形成期和稳定期呈显著下降趋势.在进入热分层衰减期后,底层水体中的 DO 浓度基本处于 0.24 mg/L 的水平甚至更低,此时水体已处于缺氧阶段,好氧类微生物无法进行正常的呼吸作用,但厌氧类微生物能进行厌氧分解释放一些金属离子和有

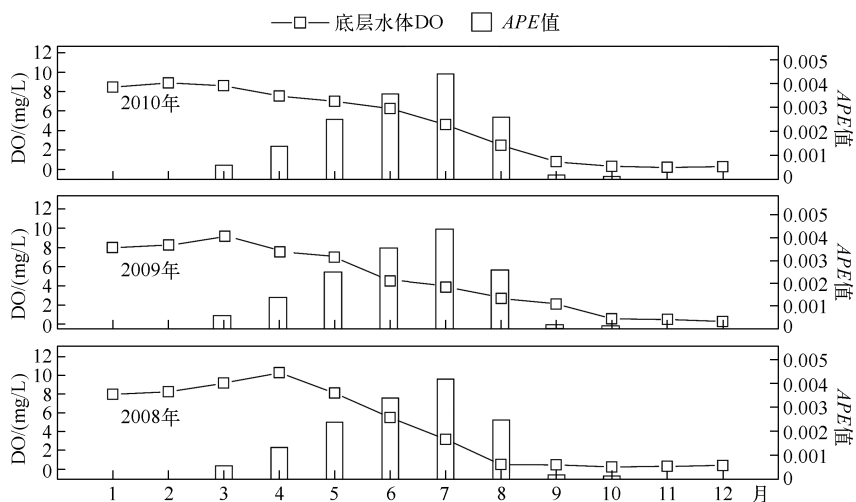


图 3 2008—2010 年黑河水库热分层指数与底层水体溶解氧的关系

Fig. 3 The relationship between thermal stratification index and dissolved oxygen in the bottom water of Heihe Reservoir during 2008 - 2010

机物.

当水库进入冬、春季季节更替时期,表层水体由于温度下降而使自身密度升高,但底层水体温度却能保持高于表层水体,因此形成表层水体的密度大于底层水体,即发生“翻库”现象,“翻库”会将底层水体中在厌氧分解下释放的一些氮、磷类污染物和金属离子混合至表层水体,造成整体水质恶化.目前我国一些地区的水库常在春季发生藻类大量生长的现象即是由于“翻库”导致表层水体营养盐浓度升高所造成的;同时“翻库”也会使底层水体中的 DO 浓度短时间内恢复至与表层水体相同的水平,这也就是每年年末至次年 1 月间 DO 浓度出现突增的主要原因,“翻库”的发生是造成水质恶化的直接原因.

水体 DO 主要来自以下 3 个方面:第一,当水体中的 DO 小于其溶解度时,大气中的氧溶入水体.在水-气界面进行气体交换,水体将二氧化碳排入大气,大气中的氧溶入水体,这是水体中氧的主要来源.第二,水生植物通过光合作用向水中释放出的氧.第三,水库在各个不同时期的入流水体携带有丰富的 DO,而入流水体对整个水库形成的掺混作用有助于恢复不同深度处的 DO 含量<sup>[20-21]</sup>. DO 的前两个来源均产生于水体表层,第三个来源则受困于入流水的入流深度,而由于黑河水库处于我国西北地区,受当地气候的限制其大流量的来水发生于夏季,但在夏季入流水体温度较高、入流深度相对较浅(普遍处于斜温层以上的深度),无法对底层水体形成有效的补氧.

因此,底层水体中的 DO 只能依靠与上层水体的对流交换得以补充,在混合时期,良好的水体对流交换使底层水体始终保持较高的 DO 水平.水中 DO 的消耗通常来自水中硫化物、亚硝酸根、亚铁离子等还原性物质和水中微生物的自身呼吸作用以及好氧微生物对有机物质的分解作用<sup>[22]</sup>.

但在夏季水库发生的热分层现象,形成的斜温层直接阻碍了表面水体和底部水体的物质交换,再加上底层底泥中大量还原性物质和微生物的存在造成其耗氧速率远大于其复氧速率,长期作用下在底泥附近形成厌氧区域,而厌氧条件会加速硫化氢、颗粒中氮磷的释放进而恶化底层水质.

### 3.2 氮、磷营养盐受底层水体中 DO 季节变化的响应特征

氮、磷营养盐是引发水体富营养化与藻类高发的重要营养因素,其在水体-沉积物-微生物多相界面处发生的生物地球化学作用对于整个库区水质变化具有重要影响.伴随着黑河水库热分层的季节性形成、强化与衰减,其对底层水体造成季节性的缺氧和厌氧,沉积物中不同形态的氮、磷会在强还原条件下释放和扩散不断促进整个库区的富营养化.

2008—2009 年间,水库表层和底层水体中的 TP、NH<sub>3</sub>-N 浓度与底层水体中的 DO 浓度的变化关系表明,每年年初 DO 浓度都维持在 8 mg/L 左右的富氧水平,此时垂向水体中的 TP、NH<sub>3</sub>-N 浓度分布均匀并且都处于全年最低水平,TP、NH<sub>3</sub>-N 浓度分别为 0.02~0.03、0.03~0.08 mg/L(图 4 和图 5);表层水体中的 TP、NH<sub>3</sub>-N 浓度季节性变化相对较小,而底层水体中的 TP、NH<sub>3</sub>-N 浓度伴随着热分层强度的加大、底层 DO 的大量消耗,TP、NH<sub>3</sub>-N 浓度都在每年的 8、9 月份达到最大值,分别为 0.223~0.247、0.582~0.630 mg/L.

底层水体中的 TP、NH<sub>3</sub>-N 营养盐浓度与底层水体中的 DO 浓度呈明显负相关性,热分层的强化使得底层水体中的 DO 浓度持续降低,导致底泥中氮、磷营养盐释放进入水体,至夏季热分层最强时期,TP、NH<sub>3</sub>-N 浓度达到峰值状态,但由于斜温层的稳定存在阻断了表层和底层水体的交换,使得表层水体的 TP、NH<sub>3</sub>-N 浓度波动较小,直到进入热分层后期其稳定性逐渐减弱,水体出现交换使底层中的 TP、NH<sub>3</sub>-N 开始向上部扩散,在每年的 12 月至次年 1 月间“翻库”水体混合,表层、底层水体的 TP、NH<sub>3</sub>-N 浓度呈接近趋势,并致使底层水体大量复氧,重新进入下一个营养盐循环周期.

### 3.3 热分层系数 APE 值的影响因子探究

为控制底部水体中溶解氧的过度消耗现象,需采取利于水体对流交换的措施,促进底部水体中溶解氧的更新.最为直接的方法则是在热分层的形成和稳定期,采用适当方法延迟热分层的形成和缩短分层稳定期的持续时间,弱化热分层强度,减缓其对底部水体中溶解氧消耗的影响.

热分层的主要控制因子是气温,气温的季节变化决定了水体的含热量,而热量的不均匀分配是直接促进斜温层形成的主导因素.黑河水库气温具有明显季节性分布现象,热稳定系数 APE 值表现出与气温类似的季节性变化(图 6).最稳定时期的 APE 值都与夏季的高气温时期相吻合,而进入 9 月份后伴随气温降低,热分层的稳定性也逐渐进入衰减期.

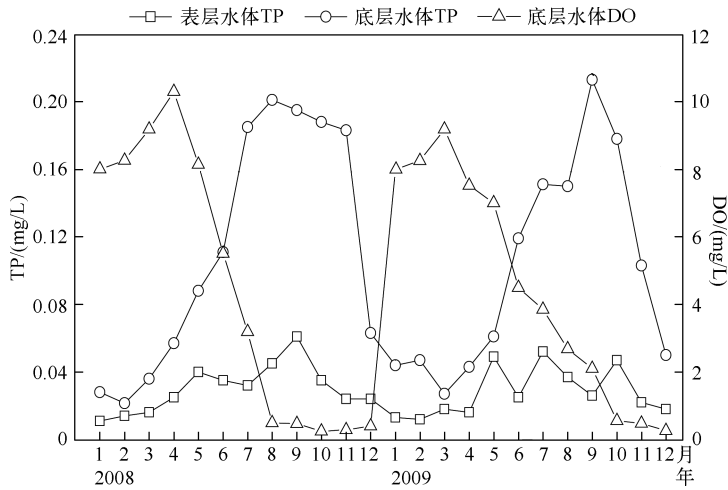


图 4 2008—2009 年黑河水库垂向水体总磷浓度和底层水体中溶解氧浓度的季节变化  
 Fig. 4 Seasonal changes of vertical total phosphorous concentration and dissolved oxygen concentration in the bottom water of Heihe River during 2008 - 2009

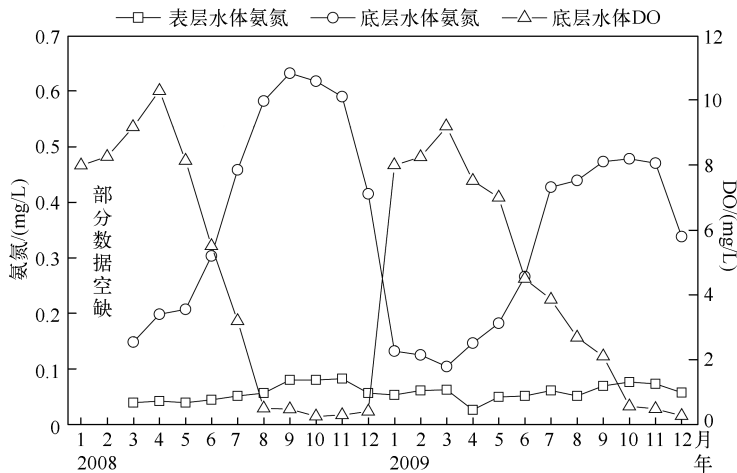


图 5 2008—2009 年黑河水库垂向水体氨氮浓度和底层水体中溶解氧浓度的季节变化  
 Fig. 5 Seasonal changes of vertical ammonia nitrogen concentration and dissolved oxygen concentration in the bottom water of Heihe River during 2008 - 2009

黑河水库 APE 值的总体变化规律主要受气温控制,但一些月份的 APE 值出现了与气温不太一致的关系,如 2010 年的 APE 值在夏季高温条件下,出现逐渐弱化的现象(图 6)。而根据 Wang 等的研究表明,在高入流量的情况下水体的稳定性受到扰动,水体的对流交换能力增强,削弱垂向上的分层状态<sup>[23]</sup>。由此推测黑河水库自身热分层各个时期的水库出入库流量会在一定程度上影响水库的热稳定性。

研究表明,上游入流和下游出流共同产生的扰动力有助于打破斜温层的稳定性,有利于促进水库的提前混合<sup>[24]</sup>。根据水库管理部门所提供的流量数据分析,本文将出入水库的流量之和确立为除温度之外影响斜温层稳定性的另一关键因素,为便于平衡各时期出入库流量的误差,笔者在此提出水库的水体更新率作为等同于出入库流量的一项评价因子。

水体更新率:水库在一定时期(本文定义为 1 个月)之内进库流量与出库流量的算数值之和,再除以水

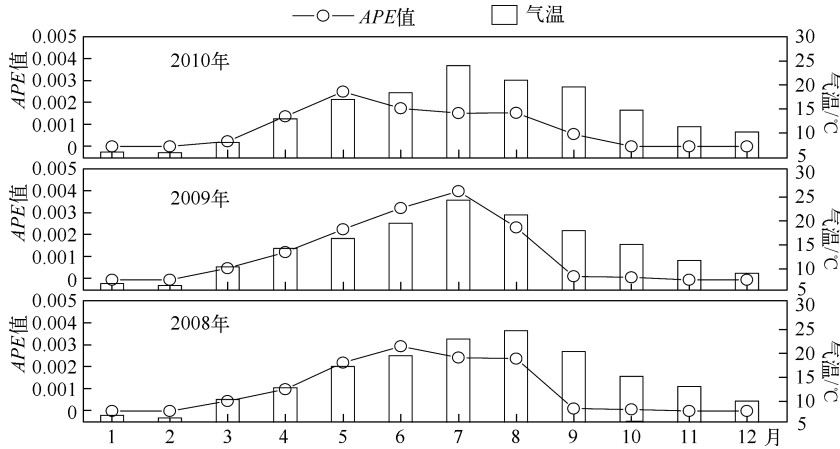


图 6 2008—2010 年黑河水库热分层指数与气温的关系

Fig. 6 The relationship between thermal stratification index and air temperature of Heihe Reservoir during 2008 - 2010

库设计库容而得到的比值(见公式(2)). 以此比值的大小反映水库内部水体更新换水的比率, 由于水库在各个时期进出库水体的入流深度和出流深度都不相同, 其二者的不同深度和不同流量互相作用会对垂向上的水体分层产生大小各异的破坏形式, 本文正是用水体更新率反映在垂向上形成的破坏力的强度, 水体更新率愈大则表明垂向上水体扰动越剧烈破坏分层的能力就越强.

$$\text{水体更新率} = \frac{J+C}{T} \times 100\% \quad (2)$$

式中,  $J$  为当月进库总量 ( $\times 10^4 \text{ m}^3$ ),  $C$  为当月出库总量 ( $\times 10^4 \text{ m}^3$ ),  $T$  为水库自身设计库容 ( $\times 10^4 \text{ m}^3$ ). 水体更新率表达的是水库在一定时间之内内部水体和外部水体的交换比例, 更新率越大表明出入流引起的水体扰动越大, 扰动力便会纵向分层的稳定程度形成一种机械破坏力, 适当的破坏力可减弱热分层, 促进垂向水体的交换.

2008—2010 年全年高水体更新率较多集中出现于每年的 5—9 月份, 而 2010 年的平均水体更新率明显最高, 2008 年的平均水体更新率低于 2009、2010 年(图 7). 每年水体更新率普遍在 8、9 月份最高, 尤其在 2010 年这 2 个月的水体更新率均超过 140%; 而 2009 年在水体更新率相对较高的月份中 6、7 月份出现异常低值, 但 APE 的结果显示在这 2 个月, 水体的稳定性达到全年最高.

2010 年和 2008 年最高温度出现在 7、8 月, 但这 2 个月的 APE 均处于下降阶段(图 6), 而 2010 年和 2008 年 7、8 月水库自身拥有较高的水体更新率(图 7), 说明水体纵向扰动无法使水体在高温时期形成更加稳定的热分层结构.

2009 年 APE 在 7 月份达到峰值(图 7), 对应的水库流量在 7 月份出入库的总体流量之和为  $4360 \times 10^4 \text{ m}^3$ , 水体更新率为 21.8%, 而对于与其温差仅为  $3^\circ\text{C}$  的 8 月份, 其出入库的总流量达到  $17840 \times 10^4 \text{ m}^3$ , 水体更新率达到 89.2%, 流量比 7 月份增加 300%, 流量大幅增加导致 APE 值在温度影响因素之外短时间内由 0.0045 降至 0.0026, 说明大流量的扰动作用弱化了水体的热分层. 对比 2008 年和 2010 年, 稳定分层的最强时期都没有出现在气温最高的 7、8 月, 在这 2 个月水库都处于较强的水体更新状态下(图 7), 水库内部的大量换水形成了相对较强的破坏水体稳定性的因素.

因此若能在热分层的稳定期中采用适当措施弱化水体的分层强度, 则可利于纵向上的水体对流交换. 结合图 6 和图 7 表明, APE 的整体变化规律主要受到气温的控制, 气温直接决定了热分层形成与衰减, 但在分析中证明热分层稳定性并非无法改变, 水库自身的水体更新率可以在适当的时机对热分层形成弱化作用, 较大水体更新率可以起到弱化水体热分层强度的作用, 扰乱水体的密度层破坏水体分层, 促进垂向上水

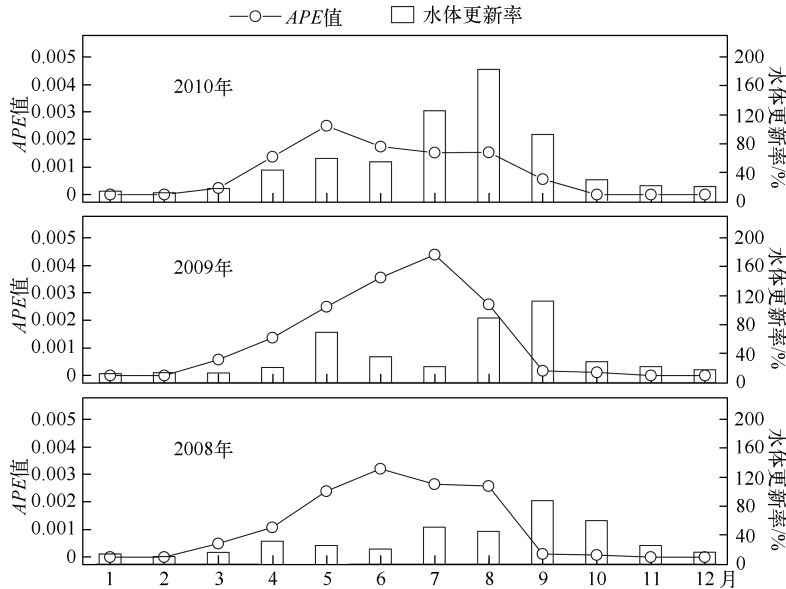


图 7 2008—2010 年黑河水库水体更新率对热分层指数的影响  
 Fig. 7 The effect of water renewal rate on thermal stratification index of Heihe Reservoir during 2008 - 2010

流的交换.水体的顺利交换可加速由于热分层而形成的水质分层的分解,利于上、中、下 3 层水体水质的互换,保证水质的整体安全.

因此在夏季大洪峰流量时期在保证水库自身蓄水安全的情况下可以选择控制泄洪流量以改变一定时间段内的水体更新率,这种人为的调节措施即使不能改变热分层的整体稳定性,但在水库内部的水体循环方面可有利于底层水体的复氧并减缓恶化水质元素的释放.

#### 4 结论

对 2008—2010 年黑河水库的水温、水质指标和水库运行调度分析表明,黑河水库在每年的夏季都会呈现显著的水温热分层结构,显著的热分层结构直接阻碍了水体在垂直方向上的交换,引发各类水体理化指标出现分层状态,进而引发水质的分层差异.

稳定的热分层结构控制了水库的水化学性质,使得底部水体在长期的复氧不足而耗氧加剧的情况下出现缺氧,造成底泥中各类营养盐物颗粒在缺氧条件下释放进入水体影响水质.

在水库热分层稳定时期,城市取水对水质有较高要求,在不同的时期可考虑采用选择性取水(比如在恒温层取水)则可破坏斜温层稳定性利于水库的混合化;或使用向底部水体曝气充氧的措施以增加底层水体的溶解氧抑制营养盐类物质的释放.

对热分层指数 APE 值的分析表明,其主要控制因子为气温变化,但在特定时期改变水库水体更新率可以影响到水体 APE 值的稳定,起到弱化水体热分层的效果.热分层的弱化促进水体的对流更新,帮助减缓在热分层时期底层溶解氧消耗,使底层水质恶化得到缓解.因此可以在夏季雨量充沛时在保证水库安全运行的情况下,以扩大泄洪流量的手段控制水库的水体更新率以达到影响热分层的目的,此方法若能有助于弱化水体热分层,显然对未来的水库安全管理和保证城市供水的水质安全有重要意义.

致谢:感谢黑河水库管理局所提供的各类水库数据.

#### 5 参考文献

[ 1 ] 吴莉莉,王惠民,吴时强. 水库的水温分层及其改善措施. 水电站设计,2007,23(3):97-100.



- [ 2 ] Çalıřkan A, Elçi Ő. Effects of selective withdrawal on hydrodynamics of a stratified reservoir. *Water Resources Management*, 2009, **23**(7): 1257-1273.
- [ 3 ] 王 煜,戴会超. 大型水库水温分层影响及防治措施. 三峡大学学报:自然科学版,2009,**31**(6): 11-14.
- [ 4 ] Liu L, Liu D, Johnson DM *et al.* Effects of vertical mixing on phytoplankton blooms in Xiangxi Bay of Three Gorges Reservoir: implications for management. *Water Research*, 2012, **46**(7): 2121-2130.
- [ 5 ] 李凤彬. 洋水库热成层对水质的影响. 给水排水,1999,**25**(9): 19-21.
- [ 6 ] 袁文权,张锡辉,张丽萍. 不同供氧方式对水库底泥氮磷释放的影响. 湖泊科学,2004,**16**(1): 28-34.
- [ 7 ] 张丽萍,袁文权,张锡辉. 底泥污染物释放动力学研究. 环境污染治理技术与设备,2003,**4**(2): 22-26.
- [ 8 ] 吴丰昌,金相灿,张润宇等. 论有机氮磷在湖泊水环境中的作用和重要性. 湖泊科学,2010,**22**(1): 1-7.
- [ 9 ] Elçi Ő. Effects of thermal stratification and mixing on reservoir water quality. *Limnology*, 2008, **9**(2): 135-142.
- [ 10 ] 刘 流. 三峡水库支流库湾水温分层及其对水华的影响[学位论文]. 宜昌:三峡大学,2012.
- [ 11 ] Imberger J. *Physical processes in lakes and oceans*. Wiley Online Library, 1998.
- [ 12 ] Kumagai M, Nakano S, Jiao C *et al.* Effect of cyanobacterial blooms on thermal stratification. *Limnology*, 2000, **1**(3): 191-195.
- [ 13 ] Read JS, Hamilton DP, Jones ID *et al.* Derivation of lake mixing and stratification indices from high-resolution lake buoy data. *Environmental Modelling & Software*, 2011, **26**(11): 1325-1336.
- [ 14 ] Becker V, Huszar VLM, Naselli-Floresl *et al.* Phytoplankton equilibrium phases during thermal stratification in a deep subtropical reservoir. *Freshwater Biology*, 2008, **53**(5): 952-963.
- [ 15 ] 王雨春,朱 俊,马 梅等. 西南峡谷型水库的季节性分层与水质的突发性恶化. 湖泊科学,2005,**17**(1): 54-60.
- [ 16 ] 段婷婷. 水源水中藻类监测及水质变化原因分析[学位论文]. 西安:西安建筑科技大学,2009.
- [ 17 ] Lee YG, Kang JH, Ki SJ *et al.* Factors dominating stratification cycle and seasonal water quality variation in a Korean estuarine reservoir. *Journal of Environmental Monitoring*, 2010, **12**(5): 1072-1081.
- [ 18 ] 马 越,郭庆林,黄廷林等. 西安黑河金盆水库季节性热分层的水质响应特征. 水利学报,2013,**44**(4): 406-415.
- [ 19 ] Straile D, Jöhnk K, Rossknecht H. Complex effects of winter warming on the physicochemical characteristics of a deep lake. *Limnology and Oceanography*, 2003, **48**(4): 1432-1438.
- [ 20 ] Fan CW, Kao SJ. Effects of climate events driven hydrodynamics on dissolved oxygen in a subtropical deep reservoir in Taiwan. *Science of the Total Environment*, 2008, **393**(2): 326-332.
- [ 21 ] Humborg C, Ittekkot V, Cociasu A *et al.* Effect of Danube River dam on Black Sea biogeochemistry and ecosystem structure. *Nature*, 1997, **386**(6623): 385-388.
- [ 22 ] 夏品华,林 陶,李存雄等. 贵州高原红枫湖水库季节性分层的水环境质量响应. 中国环境科学,2011,**31**(9): 1477-1485.
- [ 23 ] Wang S, Qian X, Han BP *et al.* Effects of local climate and hydrological conditions on the thermal regime of a reservoir at Tropic of Cancer, in southern China. *Water Research*, 2012, **46**(8): 2591-2604.
- [ 24 ] Tuan NV, Hamagami K, Mori K *et al.* Mixing by wind-induced flow and thermal convection in a small, shallow and stratified lake. *Paddy and Water Environment*, 2009, **7**(2): 83-93.