

基于 DYRESM 模型的红枫水库水体热分层特征及关键控制因素模拟研究

陆顶盘^{1,2}, 王敬富^{1,*}, 陈敬安¹, 张润宇¹, 杨海全¹, 邹银洪^{1,2}, 金祖雪³

(1.中国科学院地球化学研究所,环境地球化学国家重点实验室,贵阳 550081; 2.中国科学院大学资源与环境学院,北京 100049; 3. 贵州大学 资源与环境工程学院,贵阳 550025)

摘要: 水温结构是湖库生态系统演化的重要基础,热分层稳定性对深水湖库水体物理、化学和生物演化具有重要影响,因此研究水体热分层特征及关键控制因素具有重要意义。本文运用 DYRESM 水动力模型模拟了红枫水库 2014 年全年的水温变化特征,并对影响水体热分层结构的关键控制因素进行了探究。结果表明:1) DYRESM 水动力学模型可有效模拟红枫水库的水体热分层特征及时间演化规律,可准确预测水体热分层形成和消亡的时间及去分层强度。2) 气温变化对水库水体热分层具有明显影响,增温可加速水体热分层的形成,造成温跃层下潜和去分层延迟;短波辐射的增强(<40%)不会对红枫湖水温结构造成明显影响,但可导致去分层发生时间后延;风速是水体热分层稳定性的敏感因素,当风速增加 40%后,热分层演化发生较大变化,表现在 6~9 月份中层及底层水温大幅升高(从 9℃上升到 14℃),去分层时间提前 30 天,相应造成分层期缩短。

关键词: 热分层; DYRESM 模型; 气温; 短波辐射; 风速; 红枫水库

中图分类号: X143 文献标识码: A 文章编号: 1672-9250(2019)02-0131-10 doi: 10.14050/j.cnki.1672-9250.2019.47.028

河道筑坝成库后水动力强度降低,水深大幅增加,水深及水动力条件的变化改变了天然河道的演变特性^[1],使水环境出现类似于天然湖泊的“湖沼学反应”过程^[2-3],水库热力学条件也随之发生改变。水深超过 7 米就可能存在水体季节性热分层的现象^[4],水库水温典型垂向结构通常有三层,分别是水温易受太阳辐射、气温和风速影响的表温层(Epilimnion),水温相对稳定的滞温层(Hypolimnion),以及表温层和滞温层之间垂向温度梯度变化的温跃层(Thermocline)。大量研究表明,稳定的热分层会阻碍上层水体与下层水体的对流,从而在温跃层上下形成“热/冷”、“氧化/还原”的对立环境,该差异会对湖泊、水库内水化学、物质循环过程及水生生命活动造成极大影响^[5-6]。

西南地区是我国水资源富集区,深型、亚深型水库是该地区水资源利用的主要形式^[1]。研究表明,贵州地区水库发生的“黑潮”、“蓝藻爆发”等季节性水质恶化事件多与水体热分层的季节性演化

有密切关系^[7]。水体去分层造成湖泊水体的垂向对流混合,是导致内源污染物释放和秋季藻类爆发的重要机制,研究这些水体的热分层演化特征,建立能够准确预测水温的数学模型,对于贵州乃至西南地区水库水环境保护与水质灾害预测预警具有非常重要的意义。为此,本文选取贵州红枫水库为研究对象,利用 DYRESM(Dynamic Reservoir Simulation Model)水动力学模型在红枫湖水库研究深水型水库水温结构及时空变化规律,揭示控制水体热分层演化的敏感气象因素,以期为西南地区水库水文、水动力过程和演变规律研究及水质灾害预警提供参考。

1 材料与方法

1.1 红枫水库自然地理概况

红枫水库(26°26′~26°30′N,106°19′~106°28′E)位于贵州省清镇市、平坝县和安顺市西秀区境内,于 1960 年 5 月建成蓄水,是一座集饮用、农灌、

收稿日期: 2018-01-12; 改回日期: 2018-10-18.

基金项目: 贵州省应用基础研究计划重大项目(黔科合 J 重大字[2015]2001 号); 贵州省社会发展科技支撑计划项目(黔科合 SY 字[2015]3014)和贵州省环境保护厅环境科技项目联合资助。

第一作者简介: 陆顶盘(1991-),男,硕士研究生,主要研究方向为湖泊环境。E-mail: 792769051@qq.com.

* 通讯作者: 王敬富(1983-),男,博士,副研究员,研究方向为湖泊环境。E-mail: wangjingfu@vip.skleg.cn.

发电、防洪、景观等多种功能于一身的中型人工水库。红枫水库南北长约 16 km,东西宽约 4 km,水位海拔为 1 240 m 时库容蓄水面积约为 57.2 km²,最大水深 45 m,平均水深 10.5 m,总库容 6.01 × 10⁸ m³,补给系数 49.64,湖水滞留时间为 0.325 a。流域地貌类型多样,主要以二叠系、三叠系的碳酸盐岩为主,占流域总面积 80% 以上,石灰土和黄壤也分布广泛^[7]。主要入湖河流有五条,分别为羊昌河、后六河、麻线河、桃花园河和麦包河,猫跳河是红枫水库唯一出水河流^[8]。

根据红枫水库多年实测水温数据分析,红枫水库是典型季节性热分层湖泊,其热分层始形成于春季初期,夏季时湖库上层水体与下层水体间最大温差可达 15.6 °C,温跃层深度为 6~12 m。秋季随着气温骤降,热分层现象会突然消亡,从而引发水体垂向对流混合,造成水体突发性缺氧和理化性质的改变,从而导致“蓝藻暴发”、“黑潮”等突发性水质事件^[5,9-11]。

1.2 野外观测

2014 年 1 月~12 月,在红枫水库设置 3 个水温监测点(图 1),分别是原网箱养殖区与电厂排水汇合处南湖后午(26°29′263″N,106°24′667″E),水深约 15 m;南湖与北湖的交界处花鱼洞(26°31′470″N,106°25′388″E),水深约 25 m;水库唯一的出水口水库大坝(26°32′995″N,106°25′326″E),水深约 30 m。水温监测利用美国 YSI 公司生产的多参数水质监测仪(YSI6600 型)完成,监测间隔为 1 m,连续 12 个月逐月进行。气象数据由贵州省气象局提供,主要参数包括短波辐射、云层覆盖、气温、蒸气压、风速、降雨、降雪等,时间分辨率为每小时。除此以外,每个月定期对红枫水库的七条入湖河流和一条出湖河流的流量、水温与盐度进行监测统计,从而获得数值模型入流及出流的主要参数;地形数据由课题组 2010 年对红枫湖全湖的地形测量获得(共布设观测点 107 个)。

1.3 数值模拟

1.3.1 模型介绍

本研究采用 DYRESM 水动力学模型,该模型是由西澳大学水研究中心研发的一个面向湖泊和水库的一维水动力模型,可以用来预测水体温度、盐度和密度随水深以及湖泊、水库季节性和年内变异等时间上的变化^[12]。在分析水温、水量和水动力的变化时,DYRESM 考虑了入流、出流、表面混合层的



图 1 红枫湖水温监测点

Fig.1 The locations of water temperature monitoring points in the Hongfeng Reservoir

变化和上层滞水层的混合,将湖泊和水库中导致温度、盐度和密度分布时间变化的物理过程参数化。该模型吸收了研究中心多年来对密度分层流进行的大量实验室和野外研究成果,提供了完整的可供选择的参数。

DYRESM 模型基于一维拉格朗日格式,这种格式中模拟的湖泊水体水平分层的位置可随湖泊入流、出流、蒸发和降雨量的变化而变化,分层的厚度也被适时调整、拆分和合并,以保持在用户定义的限度内^[13]。在这一过程中,质量和其他生态状态变量被保守地调整从而保证计算准确。

DYRESM 模型计算流程包括湖体表层热量、质量和动量转换模拟,混合动力学模拟,湖下层混合模拟,底部边界层混合模拟及入出流模拟等 5 个部分^[13]。其中,湖体表层热量、质量和动量转换是此模型的主要驱动机制,提供了湖泊受热、混合和分层所需的大部分能量。实时监测的气象数据可确定由短波辐射造成的可穿透热量,由蒸发、显热、风压和长波辐射造成的表面热通量^[14],是进行成功模拟的首要条件。

1.3.2 模型的计算条件及参数

模型输入包括气象、地形、入流、出流、初始值、

参数和配置等七个文件(图 2)。气象文件包括七个气象指标,分别是短波辐射(W/m^2),云层覆盖([0~1] 1 为全覆盖 0 为晴天无云),气温($^{\circ}C$),蒸气压(hPa),风速(m/s),降雨(m)、降雪(m)。此次数值模拟共采集到 6.16 万个气象数据,涵盖红枫水库地区 2014 年全年每个小时的气象指标,部分气象数据如图 3 所示。地形数据采用现场测量 108 个点的水深数据插值得到水下地形,再将其网格化后输入模型。出入流文件包括红枫水库七条入流和一条出流逐日的流量、温度和盐度的数据,全年共采集到 0.876 万个。模型采用的空气动力学传输系数、临

界风速、有效表面积等相关参数见表 1。输入以上七个文件运行软件后即可得到 2014 年红枫湖不同深度的水温随时间变化的可视化模拟图。

表 1 DRYESM 模型主要参数

Table 1 Key parameters of the DRYESM model

参数描述	参数值	文献来源
空气动力学传输系数	1.3E-03	[15]
水体平均反射率	0.08	[16]
水面散射率	0.96	[17]
临界风速/(m/s)	2.00	[12]
剪切能生成效率	0.06	[12]
势能混合效率	0.20	[12]
风力扰动效率	0.20	[12]
消光系数/ m^{-1}	0.17	[12]

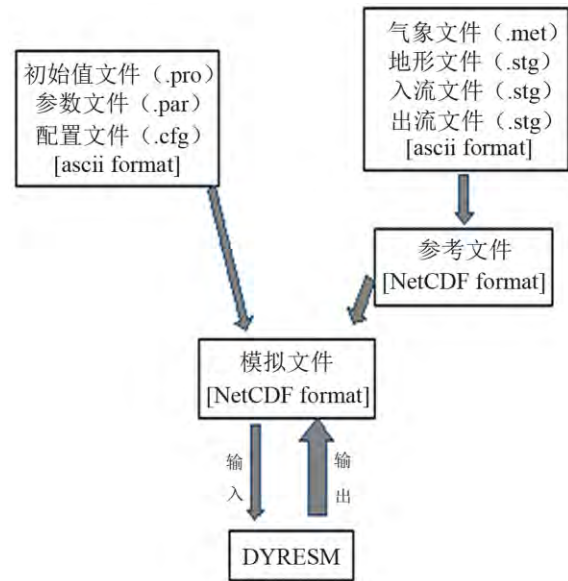


图 2 DRYESM 模型模拟流程图

Fig.2 Simulation chart of the DRYESM model

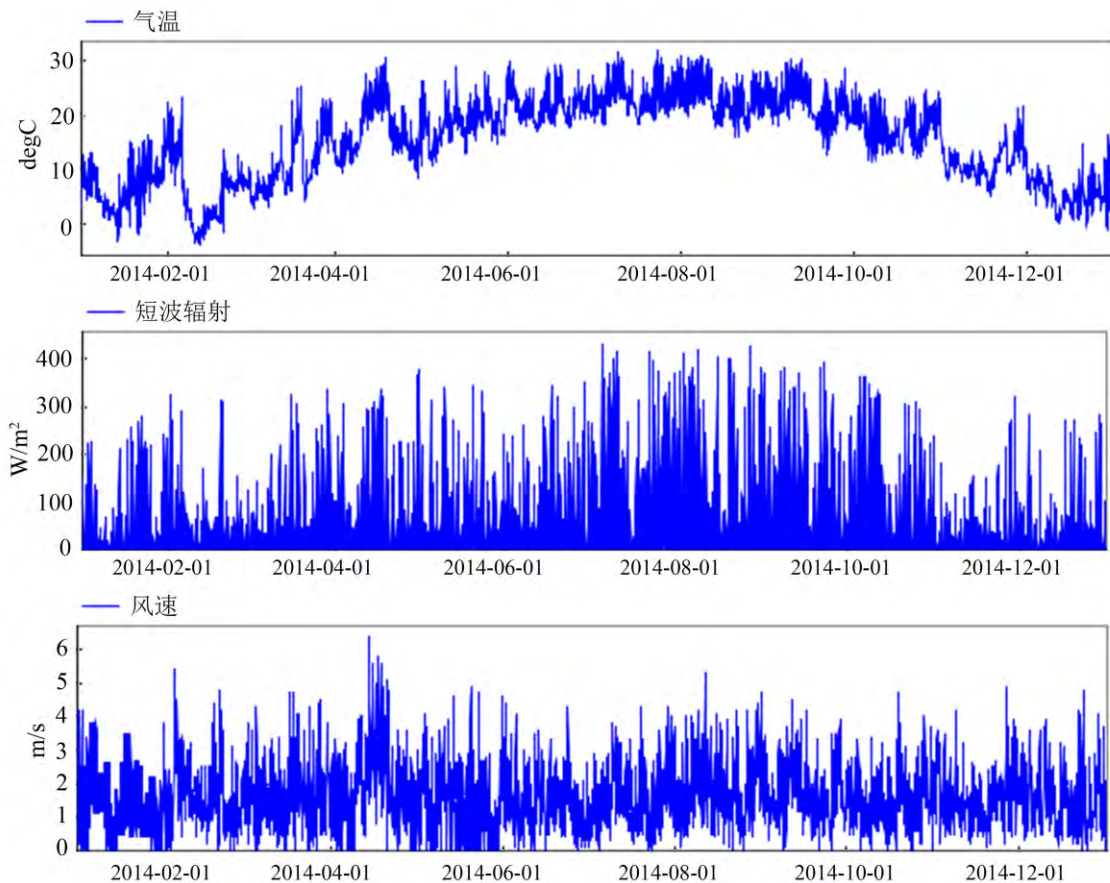


图 3 红枫水库 2014 年全年逐时气温、短波辐射和风速

Fig.3 The hourly air temperature, short wave radiation and wind speed of the Hongfeng Reservoir in 2014

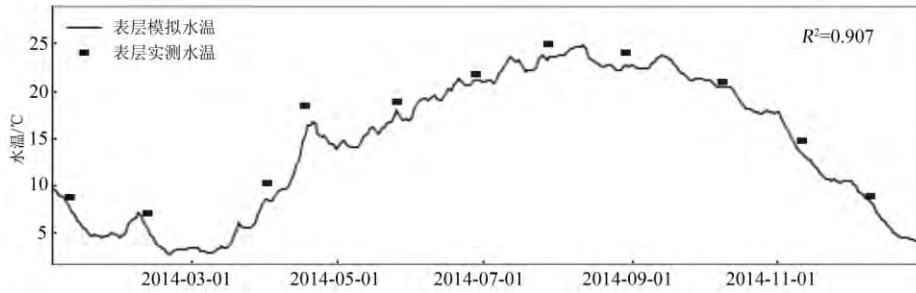


图4 红枫湖2014年表层水温模拟值与实测值比较

Fig.4 Comparison of simulated and measured surface water temperatures in the Hongfeng Reservoir in 2014

2 结果与讨论

2.1 模拟结果与讨论

通过图4表层模拟水温和表层实测水温和的对比,可以看出红枫水库2014年全年表层模拟水温和实测水温有较好的吻合度,除3、4月份的模拟值略低于实测值外(低于实测值 $1.0\sim 1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$),其余月份模拟值基本与实测值相同,表层水温变化趋势也大体一致,相关性达0.907。

通过图5和图6红枫水库剖面水温模拟值与实测值的对比可以看出,水质模型对红枫水库剖面水温及分层结构有较好的模拟效果,具体表现为:1)模拟结果可真实反映出红枫水库水体热分层的月度演化特征,即“春季形成、夏季显著、秋季消亡、冬季混匀”,模拟值与实测值的整体变化规律一致性良好;2)数值模型可较为准确的预测水体去分层过程的发生时间和发生强度,即“9月底、10月初发生;去分层强度大、水体垂向混匀”。

但是,对比分析中也发现在部分时间段模拟值与实测值存在一定差异,如实测值在8月份和12月份整体高于模拟值(约 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$),这可能与实测值中水温均是由当月其中一天的测量值所代表有关,这种情况忽略了当月上中下旬的水温相差较大的情况,故模拟值可能仅在当月中一天或几天的温度值与实测值相同或相近。DYRESM模型对红枫水库水体不同深度的水体温度、热分层形成时间、表温层厚度及去分层时间等重要的水温参数均有较好的模拟效果,在西南地区亚深型水库具有实际应用的价值。

2.2 水体热分层影响因素的敏感性分析

水温变化的本质是热量在水体内部的再分配过程,水库系统的热量平衡由水-大气界面热传播、水-河床界面热传播、入流和出流热传播四部分组成^[18],其中最为活跃的是水-大气界面的热传播,水

温变化基本从这里发生。湖面吸收太阳辐射及气温热传导后获得热量,再通过水面蒸发、水面有效辐射和水面与大气的对流热交换等作用失去热量。太阳辐射与气温热传导主要是增高湖水表层的温度,再通过湖水对流和紊动混合而传递到下层水体,使上下层水体温度保持均一状态。但当湖水较深时,风力无法影响到下层水体,先升温的水体密度较小浮在上层,全湖上轻下重,对流减弱,逐渐形成湖泊的热分层效应。故外界气体温度、太阳辐射及风速是影响水温分布及水温热分层效应的重要因素。

2.2.1 水体分层对气温变化的敏感性

气温的热传导效应直接作用于湖面,水体表层温度对其有着直接、快速的响应。相关研究表明,贵阳的气温骤降很可能是引起红枫水库水体去分层现象发生的重要原因^[5,19]。根据IPCC第五次报告制定的本世纪末全球气温不超过 $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的目标,本文将水动力模型气温参数文件中全年气温值分别升高 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $2\text{ }^{\circ}\text{C}$,观察全球气温的升高对红枫水库水温及其分层结构的影响。将调整后的气温参数输入DYRESM水动力学模型后,得图7模拟结果。

由图7中可以看出,气温的升高对红枫水库的水温及分层结构有较大的影响,且随着气温的增加,影响作用越加显著。当外界气温增加 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,红枫水库全年水温总体均有所升高,7~11月份平均水温增加 $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右,其中8月份增加最多,达 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。同时,由于气温的热传导作用,表温层总体变厚 3 m 左右,去分层时间也从9月初后延至9月末;当外界气温增加 $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,表层水温高于 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的时间从10天左右增加至近80天,表温层厚度总体增加 5 m 左右,去分层时间后延至10月中旬,较升高前整整延长1个半月。气温模拟结果表明,红枫水库水体的去分层的时间及强度对外界气温的变化较为敏感。

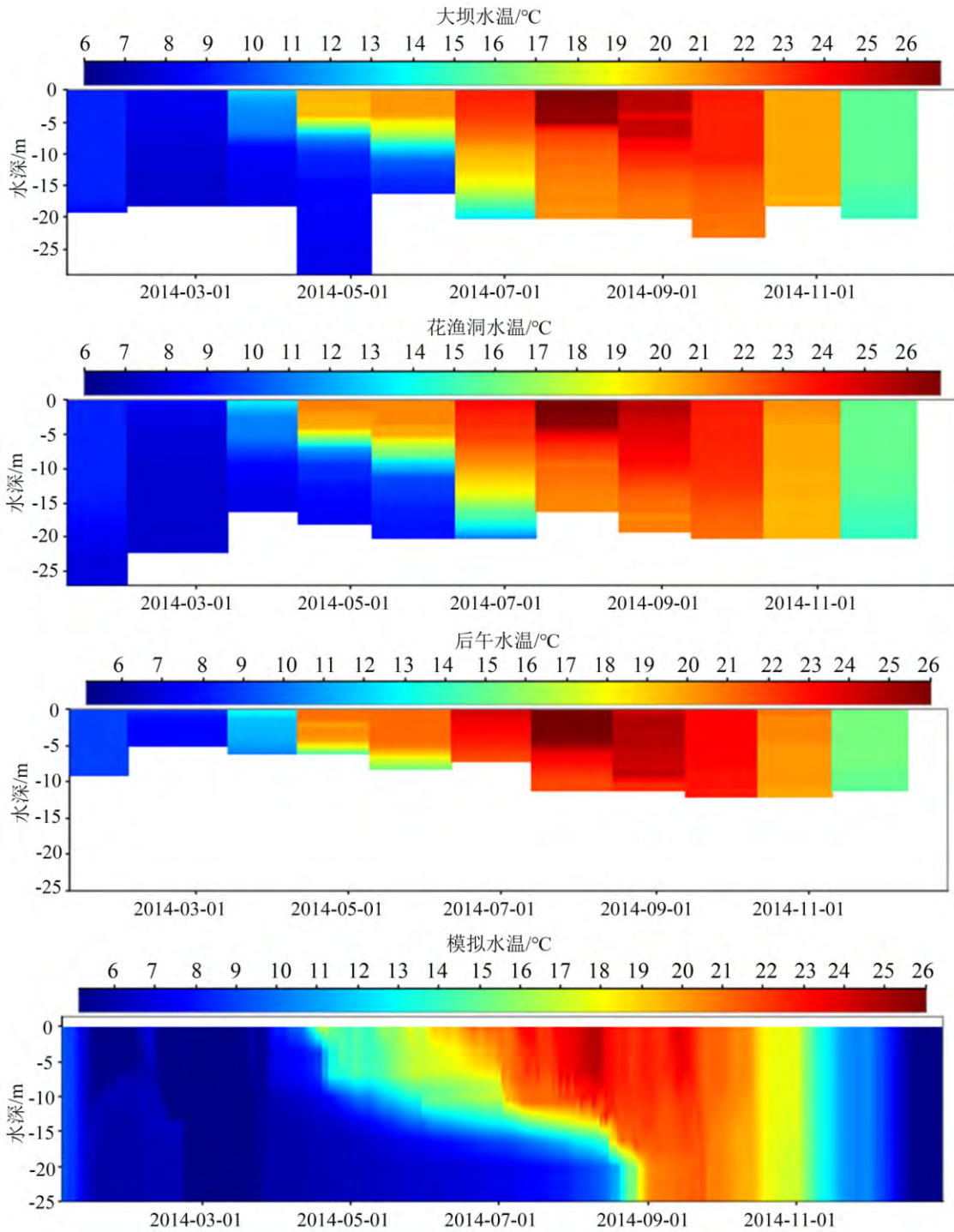


图 5 红枫水库 2014 年大坝、花鱼洞、后午水温剖面实测及模拟图

Fig.5 Measured and simulated profiles of water temperatures at sites of Dam , Huayudong and Houwu in the Hongfeng Reservoir in 2014

2.2.2 水体分层对太阳短波辐射变化的敏感性

湖库输入的热量主要来自于太阳的短波辐射^[20] 太阳辐射量深刻影响着水温的变化,湖库中浮游生物、水生植物、鱼类等物种的种群数量和结构均和太阳辐射有很大的关系。本文取 2014 年红

枫水库气象文件中短波辐射值增大 40%为辐射高值,增大 20%为辐射次高值,并将改变短波辐射后的气象参数文件输入 DYRESM 模型后得图 8 所示结果,试通过对比不同辐射条件下红枫水库水体水温和热分层特征的差异以探究太阳短波辐射的对

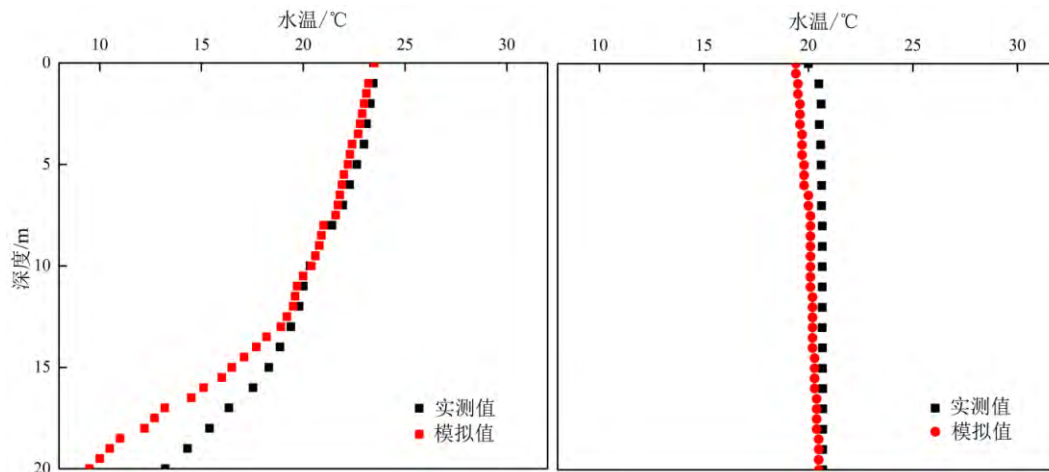


图 6 红枫水库分层期(左)与混合期(右)水温模拟值与实测值对比

Fig.6 Comparison between simulated and measured water temperatures of the Hongfeng Reservoir in the stratified period (left) and the mixed period (right)

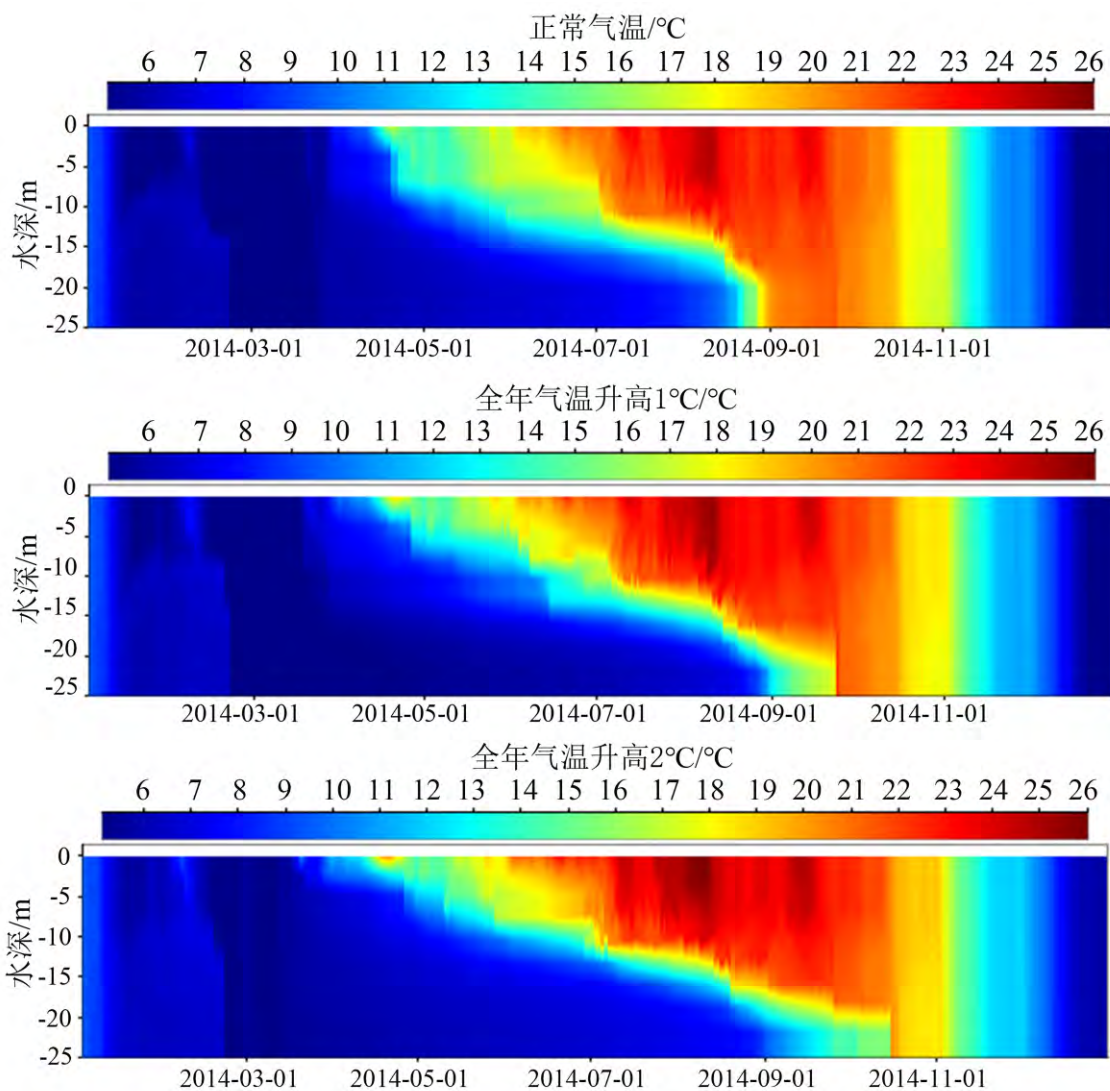


图 7 红枫水库 2014 年正常、全年气温增加 1 °C 和全年气温增加 2 °C 的水温剖面模拟图

Fig.7 Simulated profiles of water temperature in the Hongfeng Reservoir in 2014 under conditions of normal air temperature and air temperatures of 1 °C and 2 °C higher than normal

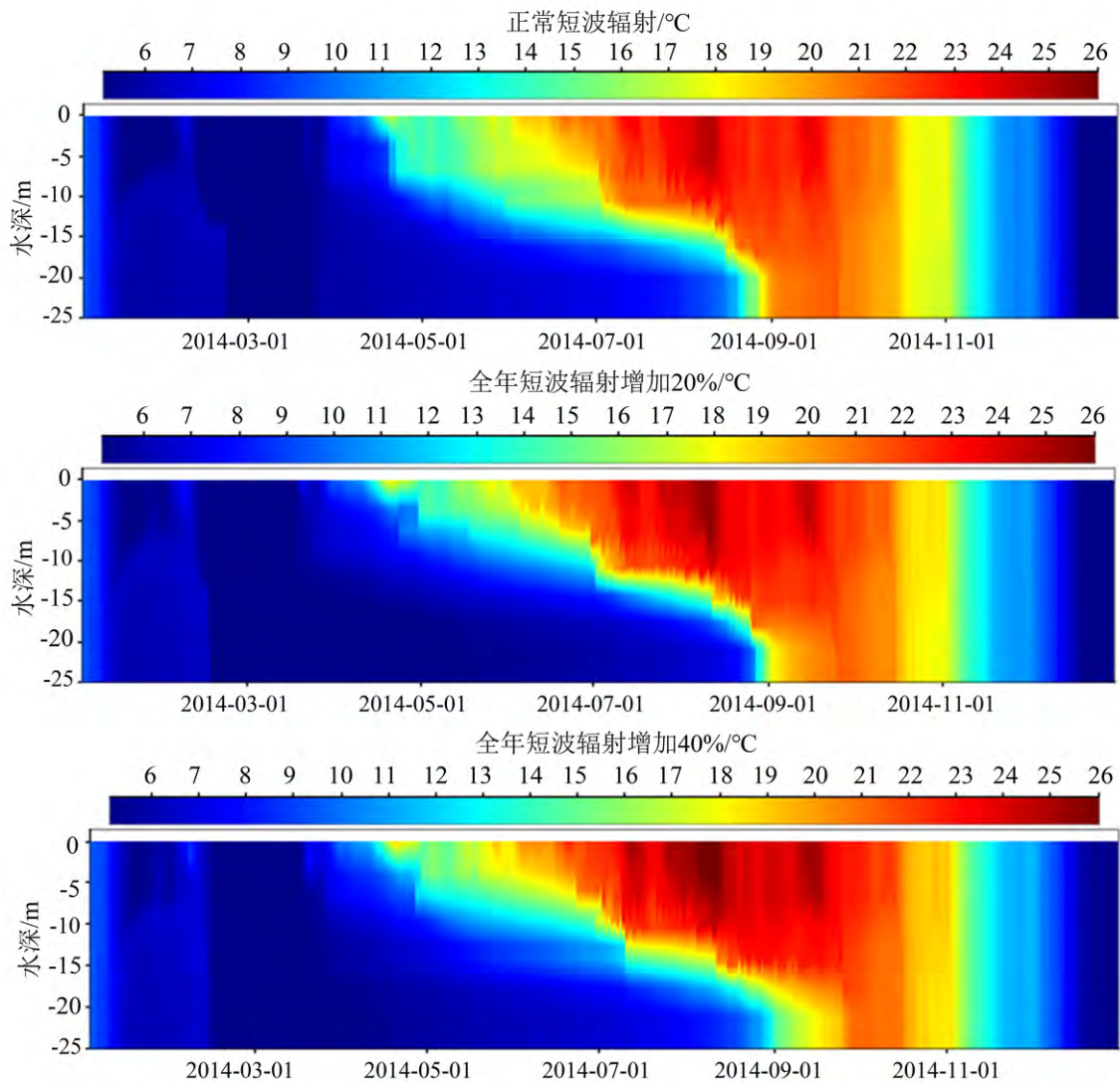


图 8 红枫水库 2014 年正常、全年短波辐射增加 20% 和全年短波辐射增加 40% 的水温剖面图

Fig.8 Simulated profiles of water temperature in the Hongfeng Reservoir in 2014 under conditions of normal shortwave radiation and of normal shortwave radiations 20% and 40% higher than normal

水体分层的影响。

与实际水温剖面模拟图相比,短波辐射增加 20% 后,水温并非在全年都有增加,而只是在春季与夏季增加较为明显,平均约有 0.5 °C 的增幅。这主要是因为贵阳地区秋冬季节阴雨连绵气候条件有关,较厚的云层削减了大部分的太阳辐射,而春夏季节贵阳地区天气晴朗,云层稀薄,大部分太阳辐射可穿透云层大气,从而增加湖体表层水温。当全年太阳辐射增加 40% 后,秋冬季节水温变化仍然不大,夏季表层水温增加到 25 °C 左右,4 月份~11 月份水温平均有 1 °C 左右的增幅,其它月份增幅并不大。同时,短波辐射增加 20% 时,对去分层的时间和强度影响不大,增加 40% 后,去分层的时间后延 10

天左右。

2.2.3 水体分层对风速变化的敏感性

如图 2 所示,2014 年红枫水库全年风速较低,平均值不到 2 m/s。综合多年气象数据分析,风速平均值也通常不超过 2.5 m/s,远低于太湖 4 m/s 左右的平均风速^[21],这与贵阳独特的地形地貌及气候因素有关。气温、太阳辐射、云量等因素直接影响到水体表层的水温,而风的扰动作用有利于水体表层温度向更深处掺混,从而影响到水库的分层结构。将 2014 年红枫水库气象文件中风速增加 20% 即接近多年平均风速,设定增加 40% 为风速高值,探索风速的改变对红枫水体水温变化及热分层演化特征带来的影响。所得模拟结果如图 9 所示。

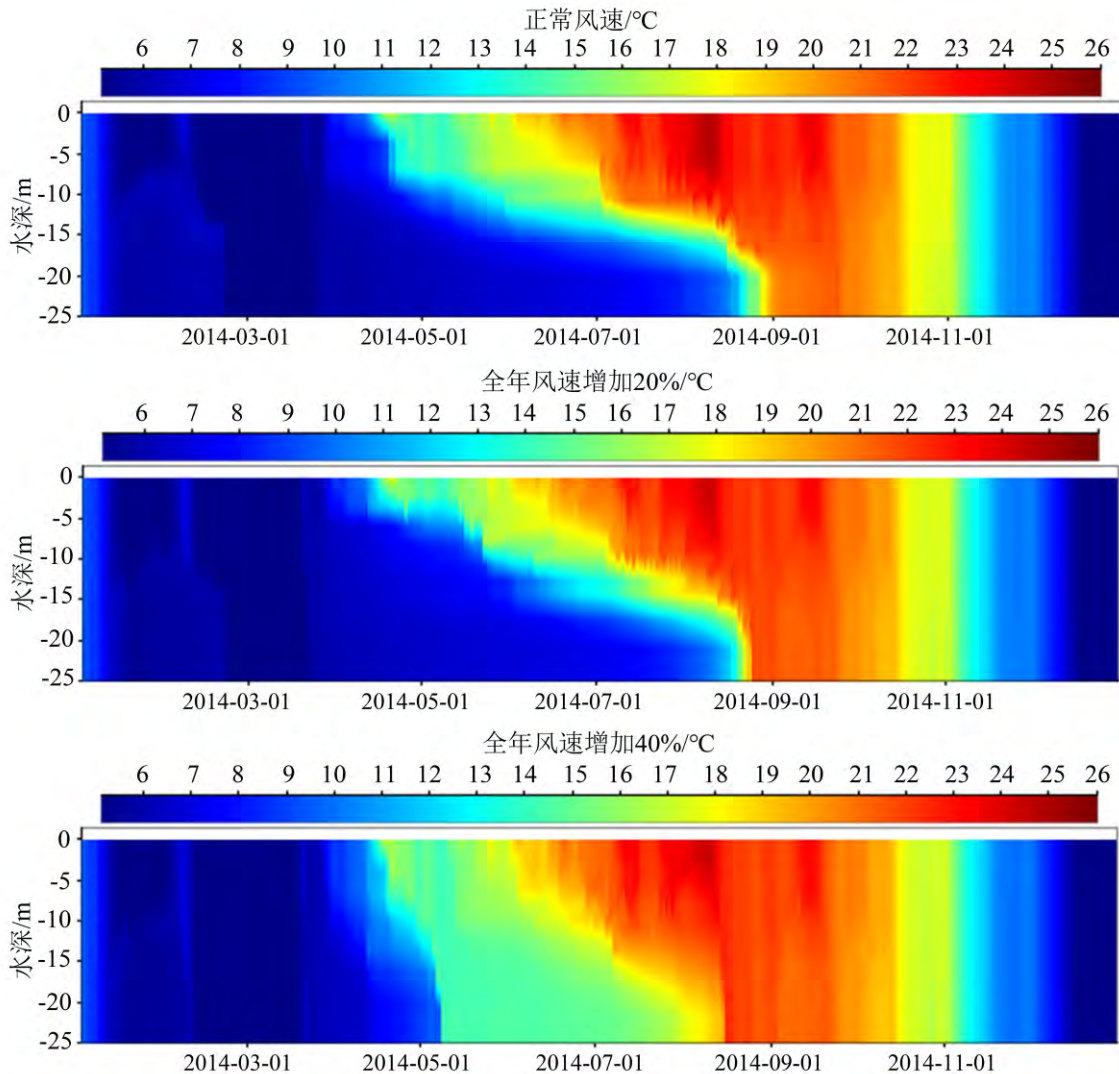


图9 红枫水库2014年正常、全年风速增加20%和全年风速增加40%的水温剖面图

Fig.9 Simulated profiles of water temperature in the Hongfeng Reservoir in 2014 under conditions of normal wind speed and wind speeds of 20% and 40% higher than normal

与正常风速条件下的水温剖面模拟图相比,风速增加20%后全年表层温度均略有降低,8月份下降最为明显(约 0.5°C),这是由于红枫水库地区8月份风速最大,风的扰动作用促进表层热量向湖体中层及底层传递的结果。模拟结果显示6月份~8月份时表温层下潜 0.5 m 左右,温跃层厚度平均增加 2 m 左右。去分层时间从9月中旬提前到8月底,这同样是由于更高的风速提升了水库中表温层热量的传递能力而引起的;当风速增加40%后,风力对水库水体有更强的扰动掺混能力,全年表层温度有更大幅度的下降,热分层结构也发生了较大变化,由于水体中热量掺混能力因为风力扰动而得到更大提升,6月份~9月份水库中层及底层水温均有大幅升高,平均从 9°C 左右

上升到 14°C 以上,去分层时间从9月中旬提前到8月中旬,提前1个月发生,水库热分层期从4个月缩短至3个月。表明风速是影响红枫水库水体热分层稳定的重要因素。

3 结论

水温是湖泊(水库)最重要的物理参数之一,显著影响着水体的物理、化学性质,进而其影响水文及水生态。本文运用DYRESM水动力学模型对红枫水库水体分层演化的关键控制因素开展模拟研究,得到以下主要结论:

1) DYRESM水动力学模型对于红枫水库的水体热分层演化特征具有较好的模拟效果,特别是对水体分层形成和消亡的时间及强度的预测较为准

确,对全年水温的变化趋势做到同步表达,整体误差不超过 1.5 °C。因此,DYRESM 水动力学模型有望成为西南地区深水水库水文、水动力学研究的有效工具。

2) 敏感性分析表明: ①气温变化对水库水体热分层具有明显影响。增温可加速水体热分层的形成,造成温跃层下潜和去分层延迟。②短波辐

射的增强(<40%)不会对红枫水库水温结构造成明显影响,但可导致去分层发生时间后延 10 天左右。③风速是红枫水库水体热分层稳定性的敏感因素,当风速增加 40%后,热分层演化发生较大变化,表现在 6~9 月份中层及底层水温大幅升高(从 9 °C 上升到 14 °C),去分层时间提前 30 天,分层期明显缩短。

参 考 文 献

- [1] 陈敬安,王敬富,于佳,等. 西南水库研究展望[J]. 地球与环境,2017,45(2): 115-125.
- [2] 林国恩,望甜,林秋奇,等. 广东流溪水库湖沼学变量的时空动态特征[J]. 湖泊科学,2009,21(3): 387-394.
- [3] 曹广晶,惠二青,胡兴娥,等. 三峡水库蓄水以来近坝区水温垂向结构分析[J]. 水利学报,2012,39(10): 1254-1259.
- [4] 贺冉冉,罗淑葱,朱广伟,等. 天目湖溶解氧变化特征及对内源氮释放的影响[J]. 生态与农村环境学报,2010,26(4): 344-349.
- [5] 王敬富,陈敬安,杨永琼,等. 红枫湖季节性热分层消亡期水体的理化特征[J]. 环境科学研究,2012,25(8): 845-851.
- [6] Morira S,Boehrer B,Schultze M,et al. Modeling geochemically caused permanent stratification in Lake Waldsee (Germany) [J]. Aquatic Geochemistry,2011,17: 1-16.
- [7] 汪福顺. 季节性缺氧湖泊微量金属元素的界面地球化学行为[D]. 贵阳:中国科学院地球化学研究所,2003.
- [8] 杨永琼. 高原亚深水湖泊沉积物内源磷释放特征与控制途径研究[D]. 贵阳:中国科学院地球化学研究所,2013.
- [9] 王雨春,朱骏,马梅,等. 西南峡谷型水库的季节性分层和突发性水质恶化[J]. 湖泊科学,2005,17(1): 54-60.
- [10] Lawson R,Anderson M A. Stratification and mixing in Lake Elsinore,California: An assessment of axial flow pumps forimproving water quality in a shallow eutrophic lake[J]. Water Research,2007,41(19): 4457-4467.
- [11] Elci S. Effects of thermal stratification and mixing on reservoir water quality[J]. Limnology,2008,9(2): 135-142.
- [12] Antenucci J P,ImeritoA. The CWR dynamic reservoir simulation Model-DYRESM: Science Manual[EB/OL]. <http://www2.cwr.uwa.edu.au/~ttfadmin/model/dyresm1d/index.html> 2002-12-30.
- [13] Imerito A. Dynamic Reservoir Simulation Model- Dyresm v4 v4.0 ScienceManual[EB/OL]. <http://www.cwr.uwa.edu.au/software1/CWRDownloads/model Docs/ DYRESM Science.pdf> 2015-2-28.
- [14] 陈德元. 泸沽湖多年热力学状况初步数值模拟[D]. 广州:暨南大学,2015.
- [15] Stull R B. An Introduction to Boundary Layer Meteorology[M]. Kluwer Academic Publishers,1988: 515-520.
- [16] Patten B C,Egloff D A,Richardson T H. 10-Total ecosystem model for a cove in Lake Texoma [J]. Systems Analysis & Simulation in Ecology,1975: 205-421.
- [17] Imberger J,Patterson J C. A Dynamic reservoir simulation model - DYRESM [J]. Transport Models/inland & Coastal Waters,1981: 310-361.
- [18] 张士杰,彭文启. 二滩水库水温结构及其影响因素研究[J]. 水利学报,2009,10(10): 1254-1258.
- [19] 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[J]. 中国环境科学,2011,31(9): 1477-1485.
- [20] 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.
- [21] 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): 844-849.

A Numerical Simulation Study Using the DRYESM Model on the Thermal Stratification and Its Controlling Factors in the Hongfeng Reservoir

LU Dingpan^{1 2}, WANG Jingfu¹, CHEN Jingan¹, ZHANG Ruiyu¹, YANG Haiquan,
ZHOU Yinhong^{1 2}, JIN Zuxue³

(1.State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550081, China; 2.University of Chinese Academy of Sciences, College of Resources and Environment, Beijing 100049, China; 3.Guizhou University, College of resources and environmental engineering, Guiyang 550025, China)

Abstract: The vertical structure of water temperature is an important basis for the evolution of lake/reservoir ecosystem. The stability of thermal stratification has important impacts on physical, chemical and biological evolutions of deep-water lakes and reservoirs. Therefore, it is of great significance to study the characteristics and key control factors of water thermal stratification. In this study, the DYRESM hydrodynamic model was applied to simulate the water temperature variation of the Hongfeng Reservoir in 2014, and the key factors affecting the water thermal stratification were explored. Our results showed that: 1) the DYRESM model can effectively simulate the characteristics and time evolution of the water thermal stratification and can accurately predict the formation and extinction of the thermal stratification and the intensity of de-stratification. 2) the temperature changes have significant impacts on the thermal stratification, and the increasing temperature can accelerate the formation of the water thermal stratification, resulting in the thermocline submergence and the delay of de-stratification. The enhancement of shortwave radiation (<40%) will not significantly affect the water temperature structure, but may cause the time delay of de-stratification. The wind speed is a sensitive factor of the thermal stratification stability. When the wind speed increases by 40%, the water temperatures in the middle and bottom waters will increase significantly (from 9 to 14 °C) from June to September, and the de-stratification will occur 30 days earlier, correspondingly, the stratification period will be shortened.

Key words: thermal stratification; DYRESM model; air temperature; shortwave radiation; wind speed; Hongfeng Reservoir