

抚仙湖历史水位反演与未来 30 年水位变化预测*

李加龙¹, 李慧贇², 罗激葱^{3**}, 龚发露³, 张如枫¹, 刘凤龙⁴, 吴松涛⁵, 罗碧瑜⁶

(1: 云南大学国际河流与生态安全研究院, 昆明 650500)

(2: 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 南京 210008)

(3: 云南大学生态与环境学院高原湖泊生态与治理研究院, 昆明 650500)

(4: 湖南人文科技学院, 娄底 417000)

(5: 浙江省浦江县气象局, 金华 321000)

(6: 广东省梅州市气象局, 梅州 514021)

摘要: 在极端气候事件频发和人类活动加剧的背景下, 抚仙湖水位波动显著, 尤其是 2009—2012 年极端干旱事件的发生, 使抚仙湖平均水位(1721.31 m) 低于法定最低水位(1721.65 m), 给生态环境安全带来严重威胁. 因此, 找到合适有效的湖泊水位模拟方法, 对气候变化影响下的未来水位进行预测, 并做好相应的应对准备, 对湖泊生态系统的保护至关重要. 本文运用 DYRESM 水动力模型对抚仙湖 1959—2050 年水位进行了模拟. 因抚仙湖流域尚无长时间序列的历史水文观测数据, 故利用模型和水量补偿法对抚仙湖入湖水量进行反推, 构建了降水量—入湖水量的回归方程, 并通过有效的实测入湖水量和水位数据, 对回归方程的精度进行了检验. 利用全球气候模式 BCC-CSM2-MR 中 SSP245 和 SSP585 两种情景提供的未来气候预估数据, 运用 DYRESM 预测了抚仙湖 2021—2050 年水位变化趋势. 结果表明: (1) 构建的 DYRESM 水动力模型和降水—入湖水量回归方程精度较高, 模型结果能很好地反映抚仙湖水位的年际和年内变化趋势, 且能有效捕捉到抚仙湖的水位峰值. (2) 在 SSP245 和 SSP585 两种情景下, 抚仙湖 2021—2050 年多年平均水位分别为 1722.98 和 1723.93 m, 较 1959—2017 年平均水位 1721.77 m 分别升高 1.21 和 2.16 m. 两种情景下抚仙湖未来水位均有部分时段超过法定最高蓄水位(1723.35 m), 但均高于法定最低水位. 因此, 未来气候变化对抚仙湖水量的影响有限, 并不会导致水位过低, 当水位超过法定最高蓄水位时, 可通过控制出流闸门将水位调节在合理范围内.

关键词: 抚仙湖; DYRESM 模型; 高原湖泊; 水位预测; CMIP6 模式

Water level retrieval for the past and prediction for the next 30 years at Lake Fuxian*

Li Jialong¹, Li Huiyun², Luo Liancong^{3**}, Gong Falu³, Zhang Rufeng¹, Liu Fenglong⁴, Wu Songtao⁵ & Luo Biyu⁶

(1: Institute of International Rivers and Eco-security, Yunnan University, Kunming 650500, P.R.China)

(2: Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, P.R.China)

(3: Institute for Ecological Research and Pollution Control of Plateau Lakes, School of Ecology and Environmental Science, Yunnan University, Kunming 650500, P.R.China)

(4: Science and Technology, Hunan University of Humanities, Loudi 417000, P.R.China)

(5: Pujiang Meteorological Bureau of Zhejiang Province, Jinhua 321000, P.R.China)

(6: Meizhou Meteorology Bureau of Guangdong Province, Meizhou 514021, P.R.China)

Abstract: With frequent extreme climate events and intensive human activities, the water levels at Lake Fuxian have fluctuated significantly in the past especially during 2009–2010 with an extreme drought. The average water level from 2009 to 2012 was (1721.31 m) lower than the minimum required value (1721.65 m), which caused a great threat to the lake ecosystem. So, it is very important to find an effective method or tool for predicting the water levels under the climate change in the future and to make

* 2021-07-05 收稿; 2021-10-14 收修改稿.

云南大学人才引进启动项目(C176220100043)和国家自然科学基金项目(41671205, 42171034)联合资助.

** 通信作者; E-mail: billuo@ynu.edu.cn.

corresponding adaptation. In this paper, a one-dimensional hydrodynamic model (DYRESM) was used to simulate the water levels at Lake Fuxian from 1959 to 2050. Due to lack of observation of inflow volumes, we developed a regression model between inflow and precipitation to produce the missing lake inflows using DYRESM, existing inflow measurements and rainfall. The model was then verified and used to simulate the water levels for 2021–2050 based on rainfall predicted by a global climate model (BCC-CSM2-MR) under Scenario SSP245 and Scenario SSP585. The results show that DYRESM and the regression model had satisfied performance. The average lake water levels from 2021 to 2050 under Scenario SSP245 and Scenario SSP585 were 1722.98 and 1723.93 m respectively, which will be 1.21 and 2.16 m higher than those for 1959 to 2017. The predicted water levels might be intermittently higher than the maximum warning water level (1723.35 m), but will not be lower than the minimum warning water level (1721.65 m). In conclusion, the climate change in the future might have limited impact on the water volume of Lake Fuxian.

Keywords: Lake Fuxian; DYRESM model; plateau lake; water level forecast; CMIP6 model

水位作为湖泊水情变化最直接和最重要的指标,在现代湖泊研究中具有重要意义.水位波动不仅会直接引起水质的变化^[1],还会通过影响水体中悬浮物浓度、透明度、溶解氧等指标进而影响水生植被^[2];湖泊水位的持续上升会改变湖区原有的生态结构以及湖泊上下游的水文情势,当水位超过控制水位时还会引发洪水灾害^[3];水位的持续下降会给生态环境安全带来严重威胁,并影响流域内水资源的利用^[4].抚仙湖作为我国最大的深水型淡水湖,也是珠江源头的第一大湖,在水资源供给、防洪调控和生物多样性保护等方面发挥着重要作用^[5].近年来,受气候变化和人类活动的共同影响,抚仙湖水位波动显著,尤其在遭遇 2009—2010 年百年一遇的极端干旱事件后,其水位于 2014 年降至历史最低(1720.87 m),给流域内居民生活用水和工农业用水带来严重影响,并危及湖泊生态系统健康.因此,在极端气候事件频发和人类活动加剧的背景下,研究湖泊未来水位变化趋势,寻求有效的湖泊水位模拟方法,无论对湖泊生态系统健康稳定维持,还是对湖泊水环境保护和水资源合理利用,均至关重要.

近年来,已有诸多学者在湖泊水位模拟和预测方面展开了详细的调查和研究^[6-7],取得了很好的成效.例如,李云良等^[8]基于 BP 神经网络对鄱阳湖水位进行模拟,结果表明神经网络模型可很好地反映鄱阳湖水位变化情况;万中英等^[9]通过逐步回归法成功建立了鄱阳湖水位预测模型,实现了对鄱阳湖水位的短期精准预测.上述方法虽然模拟效果较好,但需要大量数据对模型进行训练,且湖泊水位、水量变化属于物理过程,而上述方法的物理基础相对较弱,很难达到对未来湖泊水位进行有效预测的目的.随着研究方法的深入,湖泊水动力模型因其完善的物理机制和对水动力学过程的全面考虑可实现对水位的精准模拟,深受广大学者欢迎.目前广泛应用的湖泊水动力模型有 EFDC^[10-11]、MIKE 系列(MIKE3、MIKE11 和 MIKE21)^[12-14]、Delft3D^[15-16]等,上述模型均可实现对湖泊水动力过程和水质精确模拟.本文选用的 DYRESM 水动力模型,与上述模型相比,具有代码开源且输入参数相对简单的优点,被国内外学者广泛应用于模拟不同类型的湖泊水动力和水质情况,并用来评估和预测未来气候变化对湖泊热力学及水质的影响^[17-19].

抚仙湖属断陷型深水湖泊,其水位不仅受降水和地表径流影响,还受人类活动用水、水表面蒸发和河道出湖^[20-21]以及地下水补给的影响.张月霞等^[22]利用 IWIND-LR 模型对抚仙湖水位进行了为期一年的模拟和验证,结果表明模拟水位与实测水位误差较小,但该模型在模拟过程中,未考虑河道出湖水量和人类活动用水对抚仙湖水位的影响.实际上,历史上抚仙湖和星云湖通过隔河相互连通而具有一定的水量交换^[23].此外,出流改道工程^[24]以及工农业和居民生活用水均对抚仙湖的水位变化具有不可忽略的影响.由于抚仙湖集水域尚无长时间序列的历史水文监测数据,故在无实测入湖水量的条件下,通过调节 DYRESM 水动力模型物理参数,并利用水量补偿法对 2011—2017 年入湖水量(地表径流和地下水量总量)进行反推,通过上述方法得到的 2011—2017 年逐月入湖水量与实测逐月降水量进行拟合,建立降水—入湖水量回归方程,便于在入湖水量缺测的情况下根据降水量计算入湖水量.通过 2007 年抚仙湖实测入湖水量数据和 1959—2010 年长达 52 年的水位模拟结果,分别对回归方程准确性和 DYRESM 模型的精度进行验证.为明晰未来气候变化对抚仙湖水位水量的影响,利用 CMIP6(Coupled Model Intercomparison Project Phase 6)^[25]中 BCC-CSM2-MR 模式下 SSP245 和 SSP585 两种情景中预测的未来气候状况,对抚仙湖 2021—2050 年水位变化趋势进行了预估,以期应对气候变化情况下水资源合理调度提供科学依据和决策支持,也为其他类似的研究提供参考方法.

1 研究区概况

抚仙湖地处云南省玉溪市,位于昆明市东南部^[26],距昆明市区约 60 km,跨澄江、华宁和江川三县,为我国蓄水量最大的湖泊,隶属于南盘江水系,与星云湖通过隔河相连^[27](图 1). 其流域面积为 674.69 km²,当湖面高程为 1722.5 m 时,水域面积约为 216.6 km²,湖容量约为 2.06×10^{10} m³,约为滇池水量的 12 倍之多,占云南省湖泊总蓄水量的 78%. 抚仙湖最大水深为 158.9 m^[28],位于北部,岸线长度为 100.8 km,呈南北长条形,南北最大长度为 31.4 km,东西最宽处位于北部(11.8 km),最窄处位于南部(3.4 km). 抚仙湖流域涉及 8 个镇,238 个自然村,流域内总人口 17.88 万人^[29]. 流域内农业、工业和城镇居民年均用水量分别约为 3.8×10^6 、 3×10^6 和 2.6×10^6 m³^[30].

抚仙湖地处亚热带季风气候区,常年平均气温 15.6℃,年内平均最高和最低气温分别为 22.7 和 9.8℃; 年均降水量为 800~1100 mm,蒸发量在 1200~1900 mm 之间,年日照时数达 2153 h,日照率为 50%,全年无霜期近 300 d^[31-32]. 雨季分明,汛期为 5—10 月,汛期降水量占全年降水量的 80%~90%^[33]. 全湖无大河注入,主要靠降水和周围山间小溪汇集补给. 流域内有大小河流 103 条,其中主要河流 35 条. 入湖河流大多较短且具有间歇性特征,即水流大小依降水而定,旱季断流^[34]. 天然出口河为海口河(图 1),多年平均出流量为 9.02×10^7 m³^[35]. 自 2007 年 12 月抚仙湖—星云湖出流改造工程建成运行后,改变了两湖间的千古流向,隔河也成为抚仙湖的出口河,平均每年有 4.98×10^7 m³ 水量注入星云湖,而海口河仅在特殊年份行使泄洪功能^[23]. 经 2020 年 8 月—2021 年 8 月逐月环抚仙湖考察,目前抚仙湖出湖闸门(海口河与隔河)均已关闭.

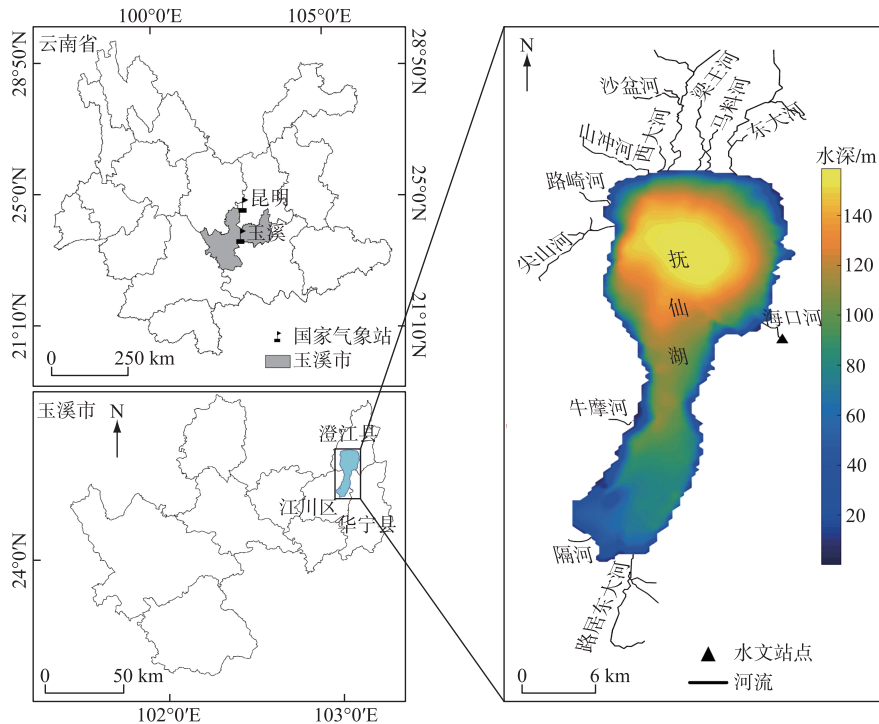


图 1 抚仙湖地理位置、水深分布和主要出入流河道
Fig.1 Location, water depth and main tributaries of Lake Fuxian

2 方法与数据来源

2.1 DYRESM 模型

本文中使用的动力学模型为 DYRESM(dynamic reservoir simulation model)^[36-37]. 该模型最初由西澳大利

亚大学水研究中心研发,为面向湖泊和水库的一维水动力模型,可以用来预测水温和盐度在垂直深度上的变化情况. DYRESM 模型可单独运行进行水温和盐度的模拟,亦可与生态模型 CAEDYM (computational aquatic ecosystem dynamic model) 进行耦合,用来模拟水质和浮游植物、浮游动物、鱼类、底栖动物等生物有机体的生命过程^[38],也可模拟水体和沉积物之间的营养盐交换,已在诸多水体中进行了成功应用. 例如,陆顶盘等^[39]利用 DYRESM 对红枫水库水体热分层特征进行了模拟;Saddek 等^[40]利用 DYRESM-CAEDYM 模拟了萨瓦河水库水体的热分层结构和沉积物内源磷的释放;崔杨等^[41]运用 DYRESM-CAEDYM 对中国沙河水库外源营养盐减少的潜在影响进行了模拟.

2.2 模型边界条件及参数设定

DYRESM 模型需要的基础数据为水域地形信息(即各深度上的水面面积),和出流入流河道的数量以及各河口高程;边界条件包括气象信息和出入流流量与水质;初始条件即为模拟起始时刻的水温或者水质在垂直方向上的分布信息. 所需输入的气象信息包括太阳辐射(W/m^2)、气温($^{\circ}C$)、水汽压(hPa)、平均风速(m/s)、云量(0~1)或太阳长波辐射(W/m^2)、降雨量(m)和降雪(m,无降雪区域设为0)7个气象指标. 水域地形信息由抚仙湖湖底高程-面积关系生成,将抚仙湖以0.1 m水深进行分层,最大水深为158.9 m,分别计算各深度上的水面面积. 入流文件由抚仙湖9个省控入湖河流的逐日流量、水温及水质数据组成,由于仅考虑水位变化,故入湖河流水质浓度均设为0;出流文件由海口河、隔河两条出湖河道水量(两条河道根据各自运行时间进行处理)和人类活动用水量组成. 初始剖面文件中,在模拟不同时段水位时,只需调整文件中的初始水位数据即可. 模型参数文件和配置文件中主要物理参数,借鉴文献提供的各参数取值范围,并在抚仙湖模拟中逐个对物理参数进行调试,调试后得到的各参数值见表1.

表1 DYRESM 模型主要物理参数
Tab.1 Key parameters of DYRESM

参数描述	参数值	单位	参数值范围
空气动力传输系数	1.3×10^{-3}	—	$1.3 \times 10^{-3} \sim 1.9 \times 10^{-3}$ ^[17,42]
水体平均反射率	0.08	—	0.08~0.084 ^[43-44]
水面辐射率	0.96	—	0.94~0.96 ^[44-45]
临界风速	3.00	m/s	3~6.5 ^[17,44]
剪切能生成效率	0.08	—	0.06~0.084 ^[17,44]
势能混合效率	0.15	—	0.15~0.29 ^[44,46]
风力扰动效率	0.15	—	0.06~0.9 ^[40,47]
消光系数	0.8	m^{-1}	0.2~0.8 ^[46-47]
垂向混合系数	200	—	200~2500 ^[18,47]

2.3 湖泊水量变化和水量补偿法计算原理

2.3.1 模型中湖泊水量变化计算原理 (1)湖面蒸发量计算

水表面蒸发所需消耗的热量由下式计算^[37]:

$$Q_{lh} = \min \left[0, \frac{0.622}{P} C_L \cdot \rho_A \cdot L_E \cdot U_a (e_a - e_s(T_s)) \Delta t \right] \quad (1)$$

式中, Q_{lh} (quantity of latent heat)为 Δt 时间段内,水表面蒸发所需消耗的热量(J/m^2); P 为大气压(hPa); C_L 为10 m参考高度处风速的潜热传导系数(1.3×10^{-3}); ρ_A 为空气密度(kg/m^3);水的蒸发潜热(L_E)取 2.453×10^6 (J/kg)^[37]; U_a 为10 m参考高度处的风速(m/s); e_a (vapour pressure of the air)代表水汽压(hPa); e_s (saturation vapour pressure)为水体表面温度(T_s)条件下的饱和水汽压(hPa); Δt 为模型的计算时间步长,模型中时间步长设置为3600 s^[37].

因蒸发引起湖泊第 N 层水体质量变化(kg)的计算公式为:

$$\Delta M_N^{(lh)} = \frac{-Q_{lh} \cdot A_N}{L_E} \quad (2)$$

式中, $\Delta M_N^{(lh)}$ 代表第 N 层 ($N \geq 1, N=1$ 代表水体表层) 水体由蒸发导致的质量变化 (kg), A_N 是第 N 层水体的表面积 (m^2), 其他变量同上.

(2) 湖面降水量计算

因降水而导致的湖泊水位升高计算公式为:

$$r_h = R_h \frac{\Delta t}{N_d} \quad (3)$$

式中, r_h 代表第 N 层水体由降雨导致的水位变化 (m), R_h 为日总降雨量 (m), N_d 为日降雨持续时间 (s).

因降水引起湖泊第 N 层水体质量变化的公式为:

$$\Delta M_N^{(rain)} = \rho_N \cdot A_N \cdot r_h \quad (4)$$

其中, $\Delta M_N^{(rain)}$ 代表第 N 层水体由降雨导致的质量变化 (kg), ρ_N 为水密度 (kg/m^3), 其他变量同上.

模型中在 Δt 时间段内, 湖泊第 N 层水体由蒸发和降水共同引起的总质量变化公式为:

$$\Delta M_N = \Delta M_N^{(lh)} + \Delta M_N^{(rain)} \quad (5)$$

模型根据公式(1~5), 自动完成逐日湖面蒸发量、降水量及其共同导致的水位变化的计算.

2.3.2 水量补偿法计算原理 水量补偿法计算原理如图2所示, 首先将模型中逐日出、入流数据均设为 $0 m^3/d$, 在仅考虑湖面降水和蒸发对湖体库容的影响下, 运行模型得到逐日模拟水位; 利用水下地形图 (比例尺 1:2000) 中提供的不同深度对应的面积和体积数据, 通过线性拟合构建抚仙湖水位库容曲线, 拟合方程为 $y = 2.1634x - 3520.3$, 式中, y 为库容 ($10^8 m^3$), x 为水位 (m), 相关系数 (r) = 0.99; 基于抚仙湖水位-库容变化曲线, 分别计算每日模拟库容和实测库容值, 将计算的模拟库容和实测库容从第2天开始相对于前一天的库容值分别求差值, 即得到每日模拟库容差值和实测库容差值, 计算公式为:

$$Day(x) \text{ 实测库容差值} = Day(x+1) \text{ 实测水体积} - Day(x) \text{ 实测水体积} \quad (6)$$

$$Day(x) \text{ 模拟库容差值} = Day(x+1) \text{ 模拟水体积} - Day(x) \text{ 模拟水体积} \quad (7)$$

式中, $x \geq 1$.

将上步骤中计算得到的每日实测库容差值与模拟库容差值求差值, 得到的就是模型中每日需要调整的补偿值, 即:

$$Day(x) \text{ 补偿值} = Day(x) \text{ 实测库容差值} - Day(x) \text{ 模拟库容差值} \quad (8)$$

补偿值有正有负, 正值表明模拟库容低于实测库容, 说明模型中入湖水量需增加, 故将补偿值补充到入流文件中, 一般情况下直接补充到地下水中, 反之, 说明模型中出湖水量需要增加, 将补偿值取绝对值后补充至出流流量, 便完成了一次水量补偿计算. 更新出入流文件一次以后, 再次运行模型对比模拟水位与实测水位, 若误差较小可停止计算, 若误差较大则再次使用水量补偿法, 计算新的出入流补偿值, 再相应修改入(出)流量. 一般运行两次后, 即可达到理想效果, 完成出入湖水量平衡的计算.

2.4 模型评估标准

模型误差通过计算实际测量值与模型模拟值之间的均方根误差 (RMSE)、纳什效率系数 (NSE) 和相关系数 (r) 来进行验证^[44], 其中 RMSE 和 NSE 的计算方法为:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (S_i - O_i)^2} \quad (9)$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (S_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2} \quad (10)$$

式中, O_i 代表测量值; S_i 代表模拟值; \bar{O} 代表测量值的算术平均值, N 代表数据个数. RMSE 的计算结果可以说明样本的离散程度, 值越小说明模拟效果越好; NSE 是模型常用的描述拟合精度的无量纲统计参数, $NSE \leq 1$. 其中 $NSE = 1$ 说明完全拟合; $NSE \leq 0$ 说明拟合程度极差; 当 NSE 为正时说明模拟值比实测值的平均数能更好地表述实测值的规律; NSE 值越接近 1, 说明拟合程度越好, 模型模拟效果越好.

2.5 数据来源

为保证 DYRESM 模型模拟精度, 本文收集了非常详细的有关抚仙湖流域水文、气象和地形等数据 (表

2), 用来进行模型参数率定。

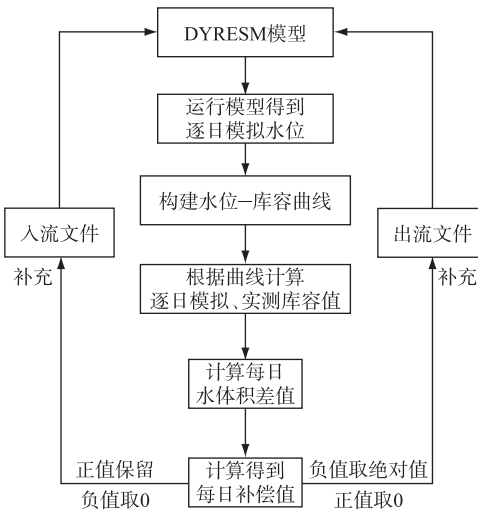


图 2 DYRESM 水量补偿法计算原理

Fig.2 Flowchart of water balancing method for DYRESM

表 2 数据汇总*

Tab.2 Data information

数据类型	数据时段	数据说明	数据来源
实测值	地形数据	—	水体等高线(抚仙湖湖底高程-面积生成)
	气象数据	1959—2017 年	太阳辐射数据来自昆明市气象监测站(国家基本气象站),其余气象数据来自玉溪市气象监测站(国家基本气象站)
		2021—2050 年	CMIP6 中 BCC-CSM2-MR 模式下 SSP245 和 SSP585 输出的逐日气候模拟数据
水位数据	1959—2010 年	逐年水位数据	文献[21,48]
	2011—2017 年	逐月水位数据	玉溪市环境监测站
水量数据	2007 年	逐月入湖水量、农业用水量和人类活动用水量	《抚仙湖流域水环境保护及水污染防治规划》
计算值	入湖数据	1959—2010 年	逐日入湖水量
		2011—2017 年	水量补偿法计算
		2021—2050 年	回归方程计算
河道出湖数据	1959—2017 年	逐日出湖水量	文献[49]
	2021—2050 年		
取水数据	1959—2017 年		文献[50-51]
	2021—2050 年		

* (1) 昆明市气象监测站(25°00'N, 102°39'E), 台站号为 56778; 玉溪市气象监测站(24°20'N, 102°33'E), 台站号为 56875; (2) 经 2020 年 8 月—2021 年 8 月逐月环抚仙湖考察, 目前抚仙湖出湖闸门(海口河与隔河)均已关闭, 故 2021—2050 年抚仙湖河道出湖流量设为 0 m³/d。

3 结果与讨论

3.1 抚仙湖入湖水量计算

在出、入湖流量均设为 0 m³/d 的条件下, 模型在仅考虑湖面降水量和蒸发量对库容的影响下, 模拟水位

呈波动下降趋势,这与抚仙湖年蒸发量大于降水量的结论一致^[52](图 3a). 经过 3 次水量补偿计算后,更新出、入流数据,并对模型中逐个物理参数进行调试,再次运行模型得到模拟与实测水位的对比(图 3b),对模拟值与实测值进行误差计算,得到 $RMSE$ 为 0.11 m, NSE 为 0.96, $r=0.99$,表明经水量补偿法计算和模型物理参数率定后,模型模拟效果良好,并利用率定好的模型,计算出 2011—2017 年逐日入湖水量.

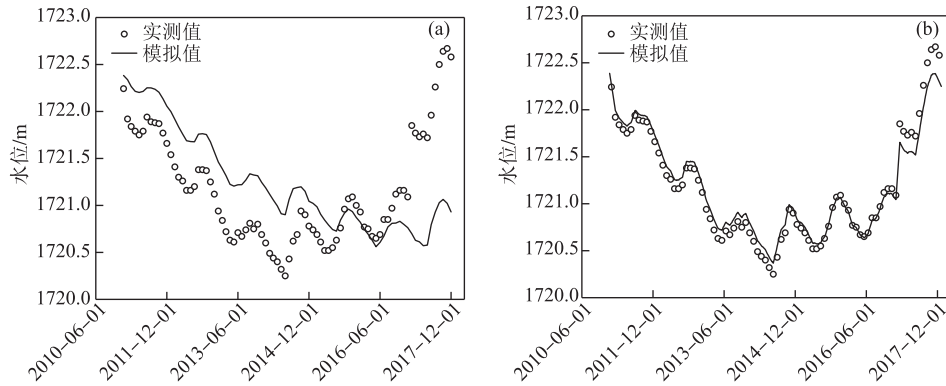


图 3 2011—2017 年逐月水位模拟与实测对比(a: 水量补偿前;b: 水量补偿后)
 Fig.3 Comparison of simulated and measured monthly water levels from 2011 to 2017
 (a: before water balancing; b: after water balancing)

本文分别从日、月、年尺度上建立降雨—入湖水量回归方程,发现通过月尺度上建立的回归方程精度最高,故本文利用 2011—2017 年逐月实测降雨和入湖水量(补偿法计算)数据,建立降雨—入湖水量回归方程.如图 4a 所示,回归方程为 $y=0.0076x+0.85$, $r=0.71$. 用 2007 年抚仙湖实测逐月总入湖水量对拟合方程计算结果进行验证,实测数据散点和模拟数据散点能够较均匀地分布于 1:1 直线两侧(图 4b),经误差分析计算得到 NSE 为 0.67, $r=0.94$. 因此,在入湖水量缺失情况下,通过此回归方程计算得到入湖水量的方法可靠,满足精度要求.

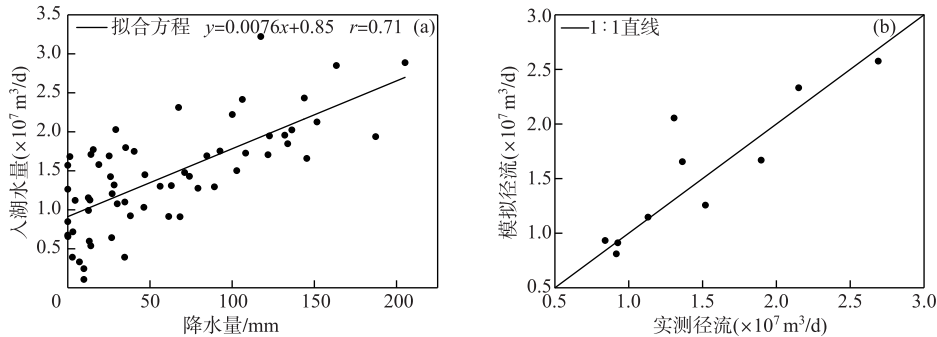


图 4 抚仙湖降水量—入湖水量拟合关系(a: 拟合方程构建;b: 拟合方程验证)
 Fig.4 Regressed equation between precipitation and inflow volume for
 Lake Fuxian (a: regression; b: validation)

3.2 DYRESM 模型验证

3.2.1 出湖水量计算 1959—2006 年抚仙湖海口河多年出湖水量为 $9.02 \times 10^7 \text{ m}^3$, 2007—2010 年由于出流改造工程的完成,抚仙湖倒流星云湖年均水量为 $4.98 \times 10^7 \text{ m}^3$,而海口河仅在特殊年份泄洪^[49];由于模型中出湖水量以日为单位,且河道出湖水量与降雨之间密切相关,为保证模拟水位趋势的准确性,将河道出湖水量根据研究时段年内各月降水量占年总降水量占比进行重新分配,得到 1959—2010 年的逐月出湖水量,再在

各月内根据天数计算平均值,得到各月份的逐日出湖水量;因 1959—2010 年跨越的时间尺度较大,且起始年份较早,无详细实测人类活动用水数据,本文通过农业用水量对其进行估算. 根据文献^[50]查得 1974—2014 年抚仙湖耕地面积,利用线性插值法补全 1959—2010 年抚仙湖流域耕地面积. 据《抚仙湖水环境保护及水污染防治规划》中提供的 2007 年抚仙湖流域农业用水量和人类活动用水总量可知,农业用水占人类活动用水总量的 80.9%,抚仙湖流域耕地的作物类型主要有蔬菜(大蒜、菜豌豆为主)、粮食(水稻、小麦为主)和经济作物(烤烟为主),其种植方式以大小春水旱轮作为主,农业用水主要集中在 5—9 月(种植水稻、烤烟)和 10—12 月(种植大蒜、小麦、菜豌豆)^[53]. 对此根据 2007 年耕地面积及对应的农业用水量,通过线性对应关系,在插值得到 1959—2010 年抚仙湖流域耕地面积条件下,反推其余年份农业用水总量,并在农业用水量占人类活动用水总量比重不变条件下,计算出 1959—2010 年人类活动用水总量,具体计算结果如图 5 所示. 将人类活动用水总量中除农业用水量外做日平均计算,将逐年农业用水量平均分配至 5—9 月和 10—12 月后做日平均计算,与逐日河道出湖水量相加得到逐日总出湖水量.

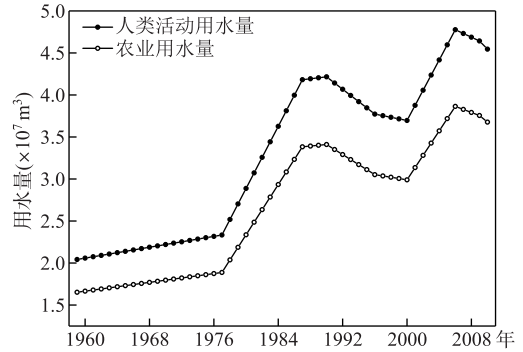


图 5 1959—2010 年抚仙湖流域人类活动用水量与农业用水量

Fig.5 Water consumption by human activities and agriculture at Lake Fuxian catchment from 1959 to 2010

3.2.2 年际水位变化 在长达 52 年模拟时长下, DYRESM 模型模拟的水位与实测水位变化趋势基本一致(图 6). 模拟水位与实测水位间的 $RMSE$ 为 0.4 m, NSE 为 0.63, $r=0.89$, 模型可良好地反映抚仙湖水位的变化趋势. 模型能有效捕捉到抚仙湖的水位峰值,例如 1999 年和 2008 年. 但仍有部分年份的模拟结果不理想,与实测水位有一定偏差,主要出现在 1962—1966 年和 1972—1975 年两个时段,误差一方面是在缺少实测入湖水量条件下,根据回归方程计算的人湖水量所造成的;二是由于早期抚仙湖耕地面积数据缺失,采用插值方法计算得出,并反推出湖水量产生了一定误差. 此外,在收集 1959—2010 年水位数据时,1981—1987 年无实测水位数据,本文通过模型计算出 1981—1987 年多年平均水位为 1721.84 m.

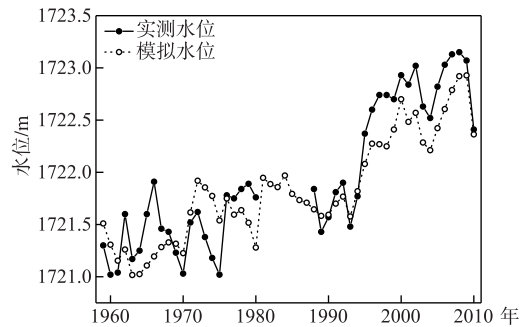


图 6 1959—2010 年抚仙湖逐年模拟与实测水位对比

Fig.6 Comparison of simulated and measured annual water levels for Lake Fuxian from 1959 to 2010

3.2.3 年内水位变化 模拟得到的 1959—2010 年年内水位呈现先下降、后上升再下降的变化趋势(图

7). 年内水位最低值(1721.71 m)和最高值(1721.98 m)分别出现在 5 月和 10 月,这与贺克雕等^[21]分析得到的 1988—2015 年抚仙湖年内水位变化特征一致,表明模型可有效模拟年内水位变化特征.

3.3 抚仙湖水位预测

影响抚仙湖水位变化的主要因素包括气候变化和人类活动两方面. 气候条件无论从短时间尺度还是长时间尺度上均直接影响水位,人类活动不仅可在短时间内对湖泊水位产生很大的影响,对自然因素还有放大作用. 因此,对湖泊未来水位变化趋势进行预测的基本前提是掌握流域内的未来气候变化和未来人类活动的可能用水量.

3.3.1 未来气候场景选择 全球气候系统模式是进行当代气候模拟和不同排放情景下未来气候变化预估的重要工具. 大量学者^[54-55]利用第五次国际耦合模式比较计划(CMIP5)中多种气候模式对云南省及周边地区的未来气候变化展开了研究和预测,结果表明:无论多模式集合、高分辨区域气候模式(如 CCLM)还是单气

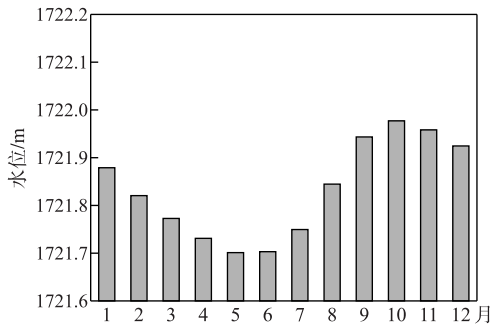


图 7 1959—2010 年水位年内变化特征

Fig.7 Inner-annual variation of water levels at Lake Fuxian from 1959 to 2010

候模式(如 FIO-ESM),对于年总降水量的模拟效果均不佳,但能反映降水的季节性变化,且对降水峰值模拟效果较好^[55-56];对于气温模拟无论年际还是年内均优于降水模拟效果^[57-58];3 种气候情景(RCP2.6、RCP4.5 和 RCP8.5)条件下云南省未来(2021—2050 年)气温和降水均呈持续上升趋势,且 RCP8.5 情景下降水较 RCP4.5 情景偏多^[59].

目前第六次国际耦合模式比较计划(CMIP6)^[25]正在有序开展.相比于 CMIP5,CMIP6 同时使用共享社会经济途径(SSPs)和典型浓度路径(RCPs)的矩阵框架,并显著提高了大气和海洋模式的分辨率精度^[60-61].CMIP6 中 4 种气候情景^[62]SSP126(低强迫情景,辐射强迫在 2100 年达到 2.6 W/m^2)、SSP245(中等强迫情景,辐射强迫在 2100 年达到 4.5 W/m^2)、SSP370(中等至高强迫情景,辐射强迫在 2100 年达到 7.0 W/m^2)和 SSP585(高强度情景,唯一可以实现 2100 年辐射强迫达到 8.5 W/m^2 的 SSP 情景)综合考虑了 SSPs 和 RCPs,其中 SSP126、SSP245 和 SSP585 分别为 CMIP5 中 RCP2.6、RCP4.5 和 RCP8.5 更新后的情景.

本文采用 CMIP6 中 BCC-CSM2-MR 模式的气候预估数据,相比于 CMIP5 中 BCC-CSM1-1 模式,该模式对大气辐射、深对流过程和重力波方案等诸多方面进行了改进,使其更适应气候分布^[63-64].在过去几十年中抚仙湖流域由于气温不断升高,降水呈下降趋势,导致极端干旱事件频发,对此结合各排放情景的特点,在未来情景中选择 SSP245 和 SSP585 两个典型气候情景,研究未来(2021—2050 年)气温在不同增幅条件下抚仙湖水位变化趋势.根据云南省边界对全球数据做裁剪和平均处理,并采用初征等^[65]提出的数据同化方法,对气象模式数据中的降水、平均气温和太阳辐射等数据进行校正.

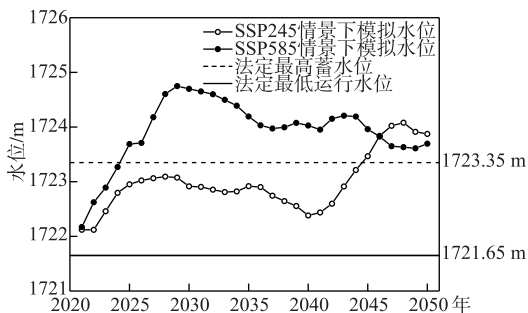


图 8 基于 DYRESM 模型预测的抚仙湖 2021—2050 年平均水位变化趋势

Fig.8 Annual water level for 2021—2050 predicted by DYRESM for Lake Fuxian

两种情景下 2021—2040 年抚仙湖水位变化趋势均呈先上升后下降的趋势,但 SSP585 情景下水位要远大于 SSP245 情景下水位;在 2040—2050 年期间,SSP245 情景下水位呈显著上升趋势,而 SSP585 情景下水位呈波动下降趋势.两种情景下模拟水位最高值分别出现在 2048 和 2029 年,水位分别为 1724.08 和 1724.75 m;最低值均出现在模拟初始年份 2021 年,水位分别为 1722.12 和 1722.17 m.

SSP245 情景中,在 2021—2040 年期间,由于降水和气温波动增加,导致水位呈波动变化趋势(图 9);2040 年后降水增幅显著增加^[66],且于 2045 年达到峰值,气温升温趋势则较为缓慢^[54],从而使得湖体蓄水量增加,水位显著上升. SSP585 情景中,在 2021—2040 年期间,其平均降水量显著大于 SSP245 情景下的平均

3.3.2 抚仙湖未来水位的变化趋势及应对策略

2021—2050 年入湖水量采用降水—入湖水量回归方程进行计算;河道出湖流量为 $0 \text{ m}^3/\text{d}$;未来人类活动用水量,采用冯海涛等^[51]基于抚仙湖最新保护治理政策与未来社会经济的基础上,预测的抚仙湖流域中期(2025 年)用水需求量($6.091 \times 10^7 \text{ m}^3$)和远期(2035 年)用水需求量($6.513 \times 10^7 \text{ m}^3$)数据.将用水量数据线性插值处理后补充 2021—2050 年人类活动用水总量.

利用模型模拟 SSP245 和 SSP585 两种情景下,抚仙湖未来(2021—2050 年)水位变化趋势(图 8).在 SSP245 和 SSP585 两种情景下,抚仙湖 2021—2050 年平均水位分别为 1722.98 和 1723.93 m,较 1959—2017 年平均水位 1721.77 m 分别升高 1.21 和 2.16 m.

降水量,其平均气温小于 SSP245 情景下的平均气温^[54,58],故在 2021—2040 年期间,SSP585 情景下的水位要远高于 SSP245 情景下的水位;而后 2040—2050 年期间,SSP585 情景下升温趋势明显,温度于 2045 年达到峰值,温度升高使得湖体表面蒸发量增加,导致水位下降^[62].

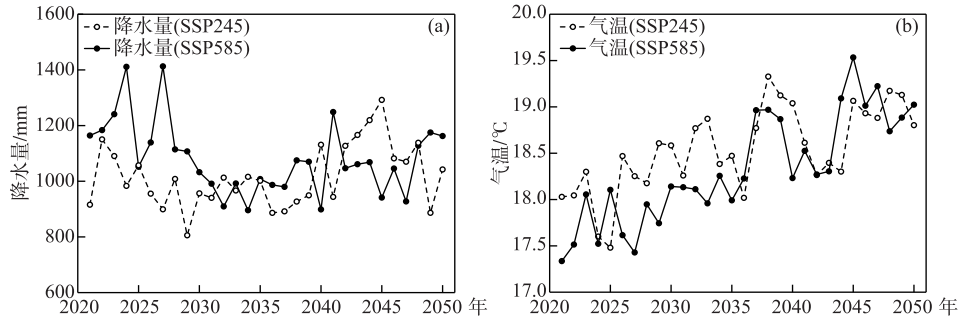


图9 气候模式 BCC-CSM2-MR 在情景 SSP245 和情景 SSP585 下模拟的 2021—2050 年平均降水量(a)与气温(b)

Fig.9 Annual precipitation (a) and air temperature (b) for 2021–2050 predicted by BCC-CSM2-MR under Scenario SSP245 and Scenario SSP585

在出湖河流流量设为 $0 \text{ m}^3/\text{d}$ 情况下,SSP245 情景中未来时段(2021—2044 年)抚仙湖水位处于正常蓄水范围,但 2045—2050 年抚仙湖水位超过法定最高蓄水位(1723.35 m);SSP585 情景中未来时段(2021—2024 年)水位处于正常蓄水范围,但 2025—2050 年抚仙湖水位始终高于法定最高蓄水位;两种情景下,抚仙湖未来水位均有部分时段超过法定最高蓄水位,水位过高会破坏湖区原有的生态结构并引起洪水灾害,危害流域内居民生命财产安全。因抚仙湖为人工调控湖,目前其出湖闸门关闭,当水位接近最高蓄水位时,可开闸泄流至海口河与隔河,以保证水位控制在合理范围内;未来两种情景下水位均高于法定最低运行水位(1721.65 m),水量充足,可满足抚仙湖生态需水、流域内工农业用水和居民生活用水需求。

4 结论

本文运用 DYRESM 水动力模型对抚仙湖 1959—2050 年水位进行了模拟,结论如下:

1) 构建的降水—入湖水量回归方程精度较高,在入湖水量缺测情况下,可通过此回归方程计算得到抚仙湖的入湖水量。

2) DYRESM 模型对抚仙湖水位变化的模拟结果较好,能很好地反映抚仙湖水位的年际和年内变化规律,且能有效捕捉到抚仙湖的水位峰值。

3) 模拟结果表明,在 SSP245 和 SSP585 两种气候情景下,2021—2050 年抚仙湖平均水位均有部分时段超过法定最高蓄水位,但均不低于法定最低运行水位。

5 参考文献

- [1] Wang X, Xiao WH, Zhu WY *et al.* Effects of water level variation on water quality in Lake Dongting. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2012, **10**(5): 59-62. DOI: 10.3724/SP.J.1201.2012.05059. [王旭, 肖伟华, 朱维耀等. 洞庭湖水位变化对水质影响分析. 南水北调与水利科技, 2012, **10**(5): 59-62.]
- [2] Liu Y, Guo HC, Zhou F *et al.* Role of water level fluctuation on aquatic vegetation in lakes. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, **26**(9): 3117-3126. [刘永, 郭怀成, 周丰等. 湖泊水位变动对水生植被的影响机理及其调控方法. 生态学报, 2006, **26**(9): 3117-3126.]
- [3] Gibson JJ, Prowse TD, Peters DL. Partitioning impacts of climate and regulation on water level variability in Great Slave Lake. *Journal of Hydrology*, 2006, **329**(1/2): 196-206. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2006.02.011.
- [4] Dong CY, Wang NA, Li ZL *et al.* Forecast of lake level in Lake Qinghai based on energy-water balance model. *J Lake Sci*,

- 2009, **21**(4): 587-593. DOI: 10.18307/2009.0419. [董春雨, 王乃昂, 李卓仑等. 基于水热平衡模型的青海湖水位变化趋势预测. 湖泊科学, 2009, **21**(4): 587-593.]
- [5] Yu Y, Zhang M, Qian SQ *et al.* Current status and development of water quality of lakes in Yunnan-Guizhou Plateau. *J Lake Sci*, 2010, **22**(6): 820-828. DOI: 10.18307/2010.0603. [于洋, 张民, 钱善勤等. 云贵高原湖泊水质现状及演变. 湖泊科学, 2010, **22**(6): 820-828.]
- [6] Gan F, Tang L, Guo HC *et al.* New method and application of estimating ecological water level of the Lake Poyang. *J Lake Sci*, 2015, **27**(5): 783-790. DOI: 10.18307/2015.0504. [淦峰, 唐琳, 郭怀成等. 湖泊生态水位计算新方法与应用. 湖泊科学, 2015, **27**(5): 783-790.]
- [7] Wu QX, Han GL, Tang Y. Effects of water level fluctuations on ecological environment of lake/reservoir riparian zone: A review. *Earth and Environment*, 2009, **37**(4): 446-453. [吴起鑫, 韩贵琳, 唐杨. 水位变化对湖泊(水库)消落带生态环境影响的研究进展. 地球与环境, 2009, **37**(4): 446-453.]
- [8] Li YL, Zhang Q, Li M *et al.* Using BP neural networks for water level simulation in Lake Poyang. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2015, **24**(2): 233-240. DOI:10.11870/cjlyzyyhj201502008. [李云良, 张奇, 李森等. 基于BP神经网络的鄱阳湖水位模拟. 长江流域资源与环境, 2015, **24**(2): 233-240.]
- [9] Wan ZY, Zhong MS, Wang MW *et al.* Dynamic prediction model of Poyang Lake's water level. *Journal of Jiangxi Normal University: Natural Science Edition*, 2003, **27**(3): 232-236. [万中英, 钟茂生, 王明文等. 鄱阳湖水位动态预测模型. 江西师范大学学报: 自然科学版, 2003, **27**(3): 232-236.]
- [10] Wei ZH, Yang ZX, Lv XJ *et al.* Modeling study of dynamic environmental capacity of Lake Erhai. *Ecological Science*, 2013, **32**(3): 282-289. DOI: 1008-8873 (2013) 03-282-08. [卫志宏, 杨振祥, 吕兴菊等. 洱海动态水环境容量模拟研究. 生态科学, 2013, **32**(3): 282-289.]
- [11] Li SW, Li HY, Xia JX. Dapeng Bay water environment capacity analysis on the base of Delft 3D Model. *Research of Environmental Sciences*, 2005, **18**(5): 91-95. DOI: 10.13198/j.res.2005.05.93.lisw.023. [栗苏文, 李红艳, 夏建新. 基于Delft 3D模型的大鹏湾水环境容量分析. 环境科学研究, 2005, **18**(5): 91-95.]
- [12] Lalander E, Leijon M. In-stream energy converters in a river-effects on upstream hydropower station. *Renewable Energy*, 2011, **36**(1): 399-404. DOI: 10.1016/j.renene.2010.05.019.
- [13] Wan JB, Li YY. Progress in the research of lake water quality model. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2007, **16**(6): 805-809. [万金保, 李媛媛. 湖泊水质模型研究进展. 长江流域资源与环境, 2007, **16**(6): 805-809.]
- [14] Li YP, Tang CY, Yu ZB. Uncertainly and sensitivity analysis of large shallow lake hydrodynamic models. *Advances in Water Science*, 2012, **23**(2): 271-277. [李一平, 唐春燕, 余钟波. 大型浅水湖泊水动力模型不确定性和敏感性分析. 水科学进展, 2012, **23**(2): 271-277.]
- [15] Lu RQ, He LK. Study on numerical simulation of environmental quality in coastal water based on Delft3D model. *Marine Environmental Science*, 2012, **31**(6): 887-890. [陆仁强, 何璐珂. 基于Delft3D模型的近海水环境质量数值模拟研究. 海洋环境科学, 2012, **31**(6): 887-890.]
- [16] Zhu C, Liang Q, Feng Y *et al.* Reduction of waste water in lake erhai based on MIKE21 hydrodynamic and water quality model. *The Scientific World Journal*, 2013: 1-9. DOI: 10.1155/2013/958506.
- [17] Hetherington AL, Schneider RL, Rudstam LG *et al.* Modeling climate change impacts on the thermal dynamics of polymictic Oneida Lake, New York, United States. *Ecological Modelling*, 2015, **300**: 1-11. DOI: 10.1016/j.ecolmodel.2014.12.018.
- [18] Bueche T, Vetter M. Simulating water temperatures and stratification of a pre-alpine lake with a hydrodynamic model: calibration and sensitivity analysis of climatic input parameters. *Hydrological ProcHydrological Processes*, 2014, **28**(3): 1450-1464.
- [19] Trolle D, Hamilton DP, Pilditch CA *et al.* Predicting the effects of climate change on trophic status of three morphologically varying lakes: Implications for lake restoration and management. *Environmental Modelling & Software*, 2011, **26**(4): 354-370. DOI: 10.1016/j.envsoft.2010.08.009.
- [20] Wang X, Li SH. Driving force analysis of the area and volume change of Lake Fuxian in the last 40 years. *Journal of Yuxi Normal University*, 2017, **33**(8): 36-42. [王新, 李石华. 近40年来抚仙湖湖泊面积与体积变化驱动力分析. 玉溪师范学院学报, 2017, **33**(8): 36-42.]

- [21] He KD, Gao W, Duan CQ *et al.* Water level variation and its driving factors in Lake Dianchi, Fuxian and Yangzong during 1988–2015. *J Lake Sci*, 2019, **31**(5): 1379-1390. DOI: 10.18307/2019.0504. [贺克雕, 高伟, 段昌群等. 滇池、抚仙湖、阳宗海长期水位变化(1988—2015年)及驱动因子. 湖泊科学, 2019, **31**(5): 1379-1390.]
- [22] Zhang YX, Xie J. Application of IWIND-LR model in water level simulation of Lake Fuxian. *Environmental Science Survey*, 2018, **37**(3): 46-51. [张月霞, 谢骏. IWIND-LR 模型在抚仙湖水位模拟中的应用. 环境科学导刊, 2018, **37**(3): 46-51.]
- [23] Hou CD, Wu XH. Analysis of ecological effect of altering outlet project of Lake Xingyun. *Yunnan Geographic Environment Research*, 2002, **14**(2): 80-88. [侯长定, 吴献花. 抚仙湖-星云湖出流改道工程环境影响分析. 云南地理环境研究, 2002, **14**(2): 80-88.]
- [24] Liu HY. Demonstration on the scale of Lake Xingyun and Lake Fuxian outflow diversion project. *Pearl River*, 2007, (1): 52-54. [刘海洋. 星云湖、抚仙湖出流改道工程规模论证. 人民珠江, 2007, (1): 52-54.]
- [25] Zhou TJ, Zou LW, Chen XL. Commentary on the coupled model intercomparison project phase 6 (CMIP6). *Climate Change Research*, 2019, **15**(5): 445-456. [周天军, 邹立维, 陈晓龙. 第六次国际耦合模式比较计划(CMIP6)评述. 气候变化研究进展, 2019, **15**(5): 445-456.]
- [26] Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences ed. Lake Fuxian. Beijing: Ocean Press, 1990: 317. [中国科学院南京地理与湖泊研究所. 抚仙湖. 北京: 海洋出版社, 1990: 317.]
- [27] Xiao L, Jin BX, Li SH *et al.* Analysis on the change of total phosphorus concentration in Lake Fuxian from 2002 to 2015. *Journal of Zhejiang Agricultural Sciences*, 2017, **58**(2): 335-337. [肖蕾, 金宝轩, 李石华等. 2002—2015年抚仙湖总磷浓度变化分析. 浙江农业科学, 2017, **58**(2): 335-337.]
- [28] Ma DX, Li L, Luo RH *et al.* Preliminary discussion of automatic system of hydrologic data collection and transmission in Lake Xingyun and Lake Fuxian outlet improvement project. *Resources Environment & Engineering*, 2011, **25**(5): 543-546. [马丹璇, 李林, 罗仁辉等. 浅谈星云湖、抚仙湖出流改道工程水情自动测报系统建设. 资源环境与工程, 2011, **25**(5): 543-546.]
- [29] You QG, Guo LJ. Problems and suggestions on management and protection of Lake Fuxian in Yuxi City. *Journal of Economics of Water Resources*, 2019, **37**(4): 32-35. [尤庆国, 郭利君. 玉溪市抚仙湖管理保护的问题及建议. 水利经济, 2019, **37**(4): 32-35.]
- [30] Kang JH. Discussion on current situation and protection measures of water resources development and utilization in Lake Fuxian Basin. *Pearl River*, 2011, **32**(1): 75-77. [康健红. 浅谈抚仙湖流域水资源开发利用现状及保护措施. 人民珠江, 2011, **32**(1): 75-77.]
- [31] Gao W, Chen Y, Xu M *et al.* Trend and driving factors of water quality change in Lake Fuxian (1980–2011). *J Lake Sci*, 2013, **25**(5): 635-642. DOI: 10.18307/2013.0503. [高伟, 陈岩, 徐敏等. 抚仙湖水质变化(1980—2011年)趋势与驱动力分析. 湖泊科学, 2013, **25**(5): 635-642.]
- [32] Zhang YX, Wang HM, Zhang R. Study on the relationship between surface temperature and air temperature of Lake Fuxian. *Environmental Science Survey*, 2018, **37**(4): 26-29. [张月霞, 王慧梅, 张睿. 抚仙湖表层水温和气温关系研究. 环境科学导刊, 2018, **37**(4): 26-29.]
- [33] Sun H, Ma ZH, Xiao XM. Analysis and control strategies of process of pollutants entering Lake Fuxian. *Pearl River*, 2015, **36**(6): 117-120. [孙浩, 马卓莹, 肖许沐. 抚仙湖污染物入湖过程分析与控制策略. 人民珠江, 2015, **36**(6): 117-120.]
- [34] Yang SX. Analysis of the pollution characteristics of the main rivers following into Lake Fuxian. *Environmental Science Survey*, 2019, **38**(z1): 62-65. [杨淑香. 浅析抚仙湖主要入湖河流污染物特征. 环境科学导刊, 2019, **38**(z1): 62-65.]
- [35] Li Y, Li BF, Luo LY. Study on spatial and temporal distribution feature of annual precipitation over Lake Fuxian Basin in Yunnan Province. *Yangtze River*, 2016, **47**(21): 48-51. [李芸, 李宝芬, 罗丽艳. 云南抚仙湖流域年降水量时空分布特征研究. 人民珠江, 2016, **47**(21): 48-51.]
- [36] Imberger J, Patterson J. A dynamic reservoir simulation model: DYRESM 5. *Transport Models/Inland & Coastal Waters*, 1981: 310-361. DOI: 10.1016/B978-0-12-258152-6.50014-2.
- [37] Imerito A. Dynamic reservoir simulation model DYRESM v4: v4.0 science manual. 2012.
- [38] David FB, David PH, Conrad AP. Modelling the relative importance of internal and external nutrient loads on water col-

- umn nutrient concentrations and phytoplankton biomass in a shallow polymictic lake. *Ecological Modelling*, 2008, **211**(3/4): 411-423. DOI: 10.1016/j.ecolmodel.2007.09.028.
- [39] Lu DP, Wang JF, Chen JA *et al.* A numerical simulation study using the DYRESM model on the thermal stratification and its controlling factors in the Hongfeng reservoir. *Earth and Environment*, 2019, **47**(2): 131-140. [陆顶盘, 王敬富, 陈敬安等. 基于 DRYESM 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. *地球与环境*, 2019, **47**(2): 131-140.]
- [40] Saddek T, Xavier C. Application of the DYRESM-CAEDYM model to the Sau Reservoir situated in Catalonia, Spain. *Desalination & Water Treatment*, 2016, **57**(27): 12453-12466. DOI: 10.1080/19443994.2015.1053530.
- [41] Cui Y, Zhu GZ, Li HY *et al.* Modeling the response of phytoplankton to reduced external nutrient load in a subtropical Chinese reservoir using DYRESM-CAEDYM. *Lake and Reservoir Management*, 2016, **32**(2): 146-157. DOI: 10.1080/10402381.2015.1136365.
- [42] Stull RB ed. An introduction to boundary layer meteorology. Berlin: Springer Netherlands, 1988.
- [43] Patten BC, Egloff DA, Richardson TH. Total ecosystem model for a cove in Lake Texoma. *Systems Analysis and Simulation in Ecology*, 1975, 205-421.
- [44] Luo LC, Hamilton DP. Estimation of total cloud cover from solar radiation observations at Lake Rotorua, New Zealand. *Solar Energy*, 2010, **84**(3): 501-506. DOI: 10.1016/j.solener.2010.01.012.
- [45] Imberger J, Patterson JC. A dynamic reservoir simulation model—DYRESM. *Transport Models/Inland & Coastal Waters*, 1981: 310-361.
- [46] Spigel RH, Imberger J, Rayner KN. Modeling the diurnal mixed layer. *Limnology and Oceanography*, 1986, **31**(3): 533-556. DOI: 10.1016/0198-0254(86)94335-9.
- [47] Fadel A, Lemaire BJ, Leite BV *et al.* On the successful use of a simplified model to simulate the succession of toxic cyanobacteria in a hypereutrophic reservoir with a highly fluctuating water level. *Environmental Science & Pollution Research International*, 2017, **24**(26): 20934-20948. DOI: 10.1007/s11356-017-9723-9.
- [48] Yuan JX, Chen JL. Water level and water quantity of Lake Fuxian. *Transactions of Oceanology and Limnology*, 1983, (2): 1-6. [袁静秀, 陈加伦. 抚仙湖的水位和水量. *海洋湖沼通报*, 1983, (2): 1-6.]
- [49] Yang WC, Wang MH eds. Discussion on the construction of water resources and water ecological monitoring system of Lake Fuxian- Lake Xingyun in Yunnan Province. Wuhan: 13th World Lake Conference, 2009. [杨文春, 王美华. 云南省抚仙湖-星云湖水资源暨水生态监测系统构建探讨. 武汉: 第十三届世界湖泊大会, 2009.]
- [50] Li SH, Zhou JS, Wang JL. Spatio-temporal LUCC and driving force in Lake Fuxian watershed from 1974 to 2014. *Remote Sensing for Land & Resources*, 2017, **29**(4): 132-139. DOI: 10.6046/gtzyyg.2017.04.20. [李石华, 周俊松, 王金亮. 1974-2014 年抚仙湖流域土地利用/覆盖时空变化与驱动力分析. *国土资源遥感*, 2017, **29**(4): 132-139.]
- [51] Feng HT, Zhang XX. Research on the changes of water supply and demand of Lake Fuxian under the influence of protection and governance policy implementation. *Environmental Science Survey*, 2020, **39**(5): 10-16. [冯海涛, 张晓旭. 保护治理政策影响下抚仙湖流域水资源供需变化研究. *环境科学导刊*, 2020, **39**(5): 10-16.]
- [52] Zhao Y, Li C, Wang D *et al.* Variation trend and case analysis of evaporation and precipitation in Lake Fuxian watershed. *Shandong Agricultural Sciences*, 2017, **49**(10): 100-106. [赵耀, 李超, 王栋等. 抚仙湖流域蒸发与降水的变化趋势及原因分析. *山东农业科学*, 2017, **49**(10): 100-105.]
- [53] Li ZZ. Research on surface source pollution and countermeasures in typical farmland areas of Lake Fuxian basin [Dissertation]. Nanjing: Southeast University, 2008. [李正兆. 抚仙湖流域典型农区面源污染及对策研究[学位论文]. 南京: 东南大学, 2008.]
- [54] Xiang JW, Zhang LP, Deng Y *et al.* Projection and evaluation of extreme temperature and precipitation in major regions of China by CMIP models. *Engineering Journal of Wuhan University*, 2021, **54**(1): 46-57. DOI: 10.14188/j.1671-8844.2021-01-007. [向竣文, 张利平, 邓瑶等. 基于 CMIP6 的中国主要地区极端气温/降水模拟能力评估及未来情景预估. *武汉大学学报: 工学版*, 2021, **54**(1): 46-57.]
- [55] Zhu XY, Su BD, Huang JL *et al.* Simulation of climatic change in Yunnan Province and RCP4.5 scenario projected trend by CCLM. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2015, **24**(3): 476-481. DOI: 10.11870/cjlyzyhj201503018. [朱娴韵, 苏布达, 黄金龙等. 云南气候变化高分辨率模拟与 RCP4.5 情景预估. *长江流域资源与环境*, 2015, **24**(3): 476-481.]

- [56] Tian MQ, Zhang J, Luo Y *et al.* Evaluation and estimation of climate change in Yunnan Province on CMIP5 modeling. *Mid-low Latitude Mountain Meteorology*, 2019, **43**(6): 26-31. [田孟勤, 张杰, 罗阳等. CMIP5 气候模式对云南气候变化模拟评估及未来情景预估. 中低纬山地气象, 2019, **43**(6): 26-31.]
- [57] Wu Q, Jiang XW, Xie J *et al.* Multimodel superensemble prediction of air temperature in southwestern China during 2020–2050 based on CMIP5 data. *Journal of Arid Meteorology*, 2018, **36**(6): 79-86. [伍清, 蒋兴文, 谢洁等. 基于 CMIP5 资料的西南地区 2020–2050 年气温多模式集合预估. 干旱气象, 2018, **36**(6): 79-86.]
- [58] Zhou XH, Xiao ZN. Climate projection over Yunnan Province and the surrounding regions based on CMIP5 data. *Climatic and Environmental Research*, 2014, **19**(5): 601-613. [周秀华, 肖子牛. 基于 CMIP5 资料的云南及周边地区未来 50 年气候预估. 气候与环境研究, 2014, **19**(5): 601-613.]
- [59] Hu ZH, Li YH, Hu YW *et al.* Prediction of future precipitation in southwest China by CMIP5 and RegCM4.0 models. *Mid-low Latitude Mountain Meteorology*, 2020, **44**(5): 21-27. [胡祖恒, 李永华, 胡跃文等. CMIP5 和 RegCM4.0 模式对西南区域未来降水的预估. 中低纬山地气象, 2020, **44**(5): 21-27.]
- [60] O'Neill BC, Tebaldi C, Vuuren DPV *et al.* The Scenario model intercomparison project (ScenarioMIP) for CMIP6. *Geoscientific Model Development*, 2016, **9**(9): 3461-3482. DOI: 10.5194/gmd-9-3461-2016.
- [61] Ukkola AM, Kauwe M, Roderick ML *et al.* Robust future changes in meteorological drought in CMIP6 projections despite uncertainty in precipitation. *Geophysical Research Letters*, 2020, **47**(11). DOI: 10.1029/2020GL087820.
- [62] Zhang LX, Chen XL, Xin XG. Short commentary on CMIP6 scenario model intercomparison project (ScenarioMIP). *Climate Change Research*, 2019, **15**(5): 519-525. [张丽霞, 陈晓龙, 辛晓歌. CMIP6 情景模式比较计划(ScenarioMIP)概况与评述. 气候变化研究进展, 2019, **15**(5): 519-525.]
- [63] Li YP, Zhu R, Liu T *et al.* Trend analysis of future temperature and precipitation in Shule River Basin based on BCC-CSM2-MR model. *Plateau Meteorology*, 2020, **40**(3): 1-12. [李雅培, 朱睿, 刘涛等. 基于 BCC-CSM2-MR 模式的疏勒河流域未来气温降水变化趋势分析. 高原气象, 2020, **40**(3): 1-12.]
- [64] Wu T, Lu Y, Fang Y *et al.* The Beijing climate center climate system model (BCC-CSM): the main progress from CMIP5 to CMIP6. *Geoscientific Model Development*, 2019, **12**(4): 1573-1600. DOI: 10.5194/gmd-12-1573-2019.
- [65] Chu Z, Guo JP, Zhao JF. Impacts of future climate change on agroclimatic resources in Northeast China. *Journal of Geographical Sciences*, 2017, **72**(7): 1248-1260. DOI: 10.11821/dlxb201707010. [初征, 郭建平, 赵俊芳. 东北地区未来气候变化对农业气候资源的影响. 地理学报, 2017, **72**(7): 1248-1260.]
- [66] Hu XQ, Huang ZY, Zhu Y *et al.* Climatic divisions and suitability for tobacco cultivation in Yunnan. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology*, 2006, **29**(4): 563-568. [胡雪琼, 黄中艳, 朱勇等. 云南烤烟气候类型及其适宜性研究. 大气科学学报, 2006, **29**(4): 563-568.]