

DOI: 10. 20040/j. cnki. 1000-7709. 2023. 20222236

基于 CMIP6 模式的云南省六大流域气候变化趋势预测

刘智天, 胡贤群, 朱艳霞, 杨操静, 张小潭, 周 峰, 高 超

(中国电建集团昆明勘测设计研究院有限公司, 云南 昆明 650051)

摘要: 基于云南省六大流域 36 个基准气象站降水、平均气温的逐月资料, 利用 CMIP6 已发布的 11 个气候模式, 模拟预估六大流域气象要素变化过程, 应用 3 种模式集成方法提升模拟能力, 评价各模式及集成方法的适宜性, 选择最优方法预测六大流域在 SSP2-4.5 情景下未来气候变化可能的发展趋势。结果表明, 预测云南省六大流域未来近、中、远期降水逐渐增多, 气温逐渐升高; 预测 2060 年后降水可能呈显著增加趋势, 2050 年后气温可能呈显著升高趋势。

关键词: 云南省六大流域; CMIP6 模式; 气候变化; 趋势预测

中图分类号: [TV123]; P339

文献标志码: A

文章编号: 1000-7709(2023)08-0010-05

1 引言

联合国政府间气候变化专门委员会最新公布的第六次评价报告指出, 气候变化已造成巨大破坏和不可逆转的损失, 使海洋和沿海生态系统面临数千年来前所未有的状况^[1-3]。根据《中国气候变化蓝皮书(2022)》, 中国是气候变化敏感区, 2021 年我国地表平均气温等指标均打破历史观测纪录, 升温速率高于同期全球平均水平^[4]。大气环流模式是研究气候变化的基础, 相关研究成果较丰富, 如郝文龙等^[5]基于 CMIP5 模式模拟汉江流域的降水和气温; 刘锋等^[6]利用 CMIP5 模式数据预测塔里木河流域未来降水数据, 确定年尺度降水要素波动幅度随情景排放量升高而变大; 谢子琪等^[7]利用 CMIP6 多模式数据预估南水北调中线工程水源区的径流, 预测未来水源区径流深可能呈增加趋势。模式集成可整体提升模拟精度, 在相关研究亦应用广泛。智协飞等^[8]构建了气温的模式集成预估模型; 张恒德等^[9]利用神经网络集成模拟预估污染物浓度, 发现模式集成误差低于单模式; 李晓蕾等^[10]在利用 13 个已发布的 CMIP6 气候模式, 分析预测未来长江流域随着辐射强迫水平的上升, 降水量增加趋势逐渐增大。本文基于云南省省情、水情, 预测六大流域未来气

候变化, 为预测未来水资源量输入气候因子及构建水资源配置方案、变化环境下洪旱灾害防治与水资源保护利用提供参考。

2 资料方法

2.1 实测资料

以云南省金沙江、澜沧江、怒江、伊洛瓦底江、红河、珠江六大流域为例, 选取省内 36 个基准气象站 1951~2014 年降水量、平均气温逐月的实测资料, 资料来源于中国气象数据网(<http://data.cma.cn/>), 资料序列完整, 基本可代表区域的气候变化特征。本文所用气象站分布见图 1, 气象站信息见表 1。

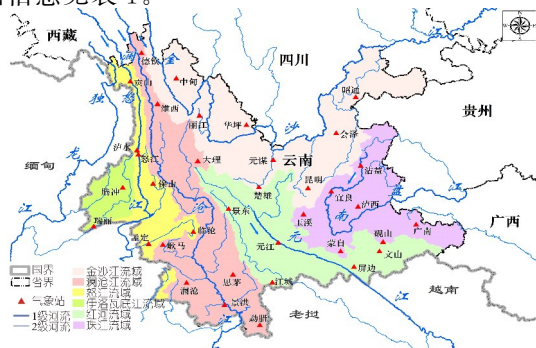


图 1 云南省六大流域气象站分布

Fig. 1 Distribution of meteorological stations of six river basins in Yunnan Province

收稿日期: 2022-10-25, **修回日期:** 2022-11-05

基金项目: 中国电力建设股份有限公司核心攻关技术项目(DJ-HXGG-2021-04); 云南省科技厅重点研发计划(202203AA080010)

作者简介: 刘智天(1995-), 男, 硕士、助理工程师, 研究方向为水文水资源与气候变化影响, E-mail: 1435322899@qq.com

通讯作者: 胡贤群(1980-), 男, 硕士、正高级工程师, 研究方向为水文学及水资源, E-mail: 44500728@qq.com

表 1 云南省六大流域气象站点基本信息统计

Tab.1 Statistical of basic information of meteorological stations of six river basins in Yunnan Province

流域	站名	站号	纬度 / (°)	经度 / (°)	高程 / m	流域	站名	站号	纬度 / (°)	经度 / (°)	高程 / m
金沙江	中甸	56543	27.83	99.70	3 276.7	怒江	贡山	56533	27.75	98.67	1 583.3
	丽江	56651	26.87	100.22	2 392.4		泸水	56741	25.98	98.82	1 804.9
	楚雄	56768	25.03	101.55	1 824.1		怒江	56643	25.87	98.85	5 910.0
	华坪	56664	26.63	101.27	1 244.8		保山	56748	25.12	99.18	1 652.2
	元谋	56763	25.73	101.87	1 120.6		临沧	56951	23.88	100.08	1 502.4
	昆明	56778	25.00	102.65	1 886.5		孟定	56945	23.57	99.08	511.4
澜沧江	会泽	56684	26.42	103.28	2 110.5	红河	景东	56856	24.47	100.87	1 162.3
	昭通	56586	27.35	103.72	1 949.5		元江	56966	23.60	101.98	400.9
	德钦	56444	28.48	98.92	3 319.0		江城	56977	22.58	101.85	1 120.5
澜沧江	维西	56548	27.17	99.28	2 326.1	屏边	56986	22.98	103.68	1 414.1	
	大理	56751	25.70	100.18	1 990.5	文山	56994	23.38	104.25	1 271.6	
澜沧江	耿马	56946	23.55	99.40	1 104.9	珠江	沾益	56786	25.58	103.83	1 898.7
	澜沧	56954	22.57	99.93	1 054.8		宜良	56880	24.92	103.17	1 532.1
澜沧江	景茅	56964	22.78	100.97	1 302.1	玉溪	56875	24.33	102.55	1 716.9	
	思洪	56959	22.00	100.78	582.0	蒙自	56985	23.38	103.38	1 300.7	
澜沧江	勐腊	56969	21.48	101.57	631.9	泸西	56886	24.53	103.77	1 704.3	
	伊洛瓦	56739	25.02	98.50	1 654.6	砚山	56991	23.62	104.33	1 561.1	
底江	瑞丽	56838	24.02	97.85	776.6	广南	59007	24.07	105.07	1 249.6	

2.2 模式数据

考虑气候模式在我国尤其是西南地区的适宜性,采用 CMIP6 已发布的 11 个模式。预先利用双线性插值方法计算模式在各气象站处降水、气温模拟结果。基于各气象站实测及模拟数据,构建六大流域的泰森多边形,计算出六大流域降水、气温的面平均实测及模拟结果。选择模式信息见表 2。

表 2 CMIP6 模式基本信息统计

Tab.2 Statistical of CMIP6 basic information

序号	CMIP6 气候模式	国家	发布机构	格点数
1	BCC-CSM2-MR	中国	Beijing Climate Center	160×320
2	CanESM5	加拿大	the Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis	64×128
3	FGOALS-f3-L	中国	EC-Earth consortium	180×288
4	GFDL-ESM4	美国	Geophysical Fluid Dynamics Laboratory	180×288
5	INM-CM4-8	俄罗斯	Russian Institute for Numerical Mathematics Climate Model	120×180
6	INM-CM5-0	俄罗斯	Russian Institute for Numerical Mathematics Climate Model	120×180
7	IPSL-CM6A-LR	欧洲	IPSL(Institute Pierre-Simon Laplace)	90×144
8	MIROC6	日本	Japanese Research Community	128×256
9	MRI-ESM2-0	日本	MRI(Meteorological Research Institute)	160×320
10	NESM3	中国	NUIST(Nanjing University of Information Science & Technology)	96×192
11	ACCESS-ESM1-5	澳大利亚	CSIRO-ARCCSS	144×192

2.3 研究方法

2.3.1 偏差校正

单个模式模拟结果通常与实测有不同程度偏差,为降低模拟的局限性,需作偏差校正处理。利用 σ 方法进行偏差校正。降水量偏差校正公式为:

$$\sigma = P_a / P_{\text{sea}} \quad (1)$$

$$P_s(t) = P_{\text{se}}(t)\sigma \quad (2)$$

式中, σ 为变化率; P_a 为率定期实测的多年平均气象要素结果; P_{sea} 为 $P_{\text{se}}(t)$ 的多年均值; $P_s(t)$ 为气象要素的集成结果; $P_{\text{se}}(t)$ 为率定期内的气象要素序列。

气温偏差校正方法亦采用 σ 方法,但变化率求解不同,计算公式为:

$$T_s(t) = T_a - T_{\text{sea}} \quad (3)$$

$$T_s(t) = T_{\text{se}}(t) + T_s \quad (4)$$

式中, $T_s(t)$ 为平均气温的集成结果; T_a 为率定期实测平均气温; T_{sea} 为 $T_{\text{se}}(t)$ 的平均值; $T_{\text{se}}(t)$ 为率定期的气温集成值; T_s 为气温的变化率。

2.3.2 模式集成

应用算数平均、权重平均、多元回归 3 种模式集成方法来提升模拟气象要素能力。

2.3.3 模式适宜性评价

为直观比较各模式方法模拟降水、气温结果和实测的误差水平,在云南省六大流域分别构建标准化泰勒图,综合考虑各模式方法的归一化标准差、归一化均方根误差和相关系数,比较评选出模拟结果与实测最接近的方法。

2.3.4 克里金空间插值

克里金插值方法以变异函数理论为基础来估计分析区域化变量取值,保证估计值满足无偏性条件及最小方差条件。该插值方法利用以距离为自变量的半变差函数求解权值结果,在分析水文气象要素空间变化中应用较广泛。因此,采用克里金空间插值分析要素空间变化。

2.3.5 Mann-Kendall 非参数检验

采用 Mann-Kendall 检验(简称“M-K 检验”)分析要素年变化的趋势性和突变性特征,该方法无需样本遵循特定分布规律,且不受少量异常结果的影响,计算快捷方便。

3 模式适宜性评价

3.1 降水模拟

比较各模式和集成方法模拟六大流域降水的结果,各流域多元回归集成模拟的平均相对误差均低于 15%,相关系数普遍高于 0.8,评价指标均优于其他模式方法,模拟更接近于实测资料。基于六大流域降水实测及模拟结果,构建标准化泰勒图见图 2。由图 2 可知,多元回归集成模拟结果优于其他模式方法,与实测降水更吻合。

3.2 气温模拟

各模式和集成方法模拟六大流域气温的精度整体较高,平均相对误差基本均在 10% 以内,相关系数普遍高于 0.9。而多元回归集成的平均相对误差普遍低于 7.77%,相关系数均超过了 0.94,评价指标略优于其他模式方法,模拟结果与实测值更接近。基于六大流域气温实测值及模拟结果,构建标准化泰勒图见图 3。由图 3 可知,多

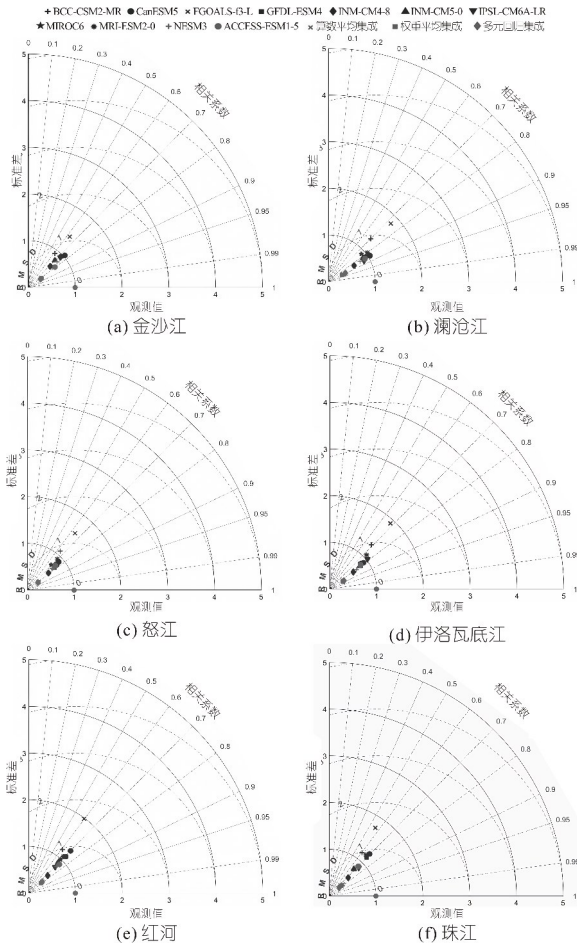


图2 模拟降水标准化泰勒图

Fig. 2 Standardized Teller plot of simulated precipitation

元回归集成模拟结果优于其他模式方法,更接近气温的历史实测结果。

综上所述,多元回归集成模拟结果整体较好,利用该方法预测云南省六大流域气候变化趋势可行。

4 气候变化趋势预测

目前倾向于选择与实际更吻合的中等程度社会经济发展情景,即 SSP2-4.5 情景来预测气候变化趋势。假定未来气候情景为 SSP2-4.5,并将未来划分为近、中、远三个时期,分别为 2030~2040、2041~2070、2071~2100 年。

4.1 降水预测

预测未来伊洛瓦底江、怒江、红河、澜沧江、珠江、金沙江面平均年降水逐渐减少,依次为 1 559.7、1 323.3、1 224.4、1 107.5、946.1、826.3 mm;各流域降水整体呈增加趋势。

预测降水的气候倾向率见表 3。由表 3 可知,未来近、中、远期伊洛瓦底江降水的气候倾向率整体较高,澜沧江、怒江、红河、金沙江次之,珠江降水的气候倾向率相对较低。

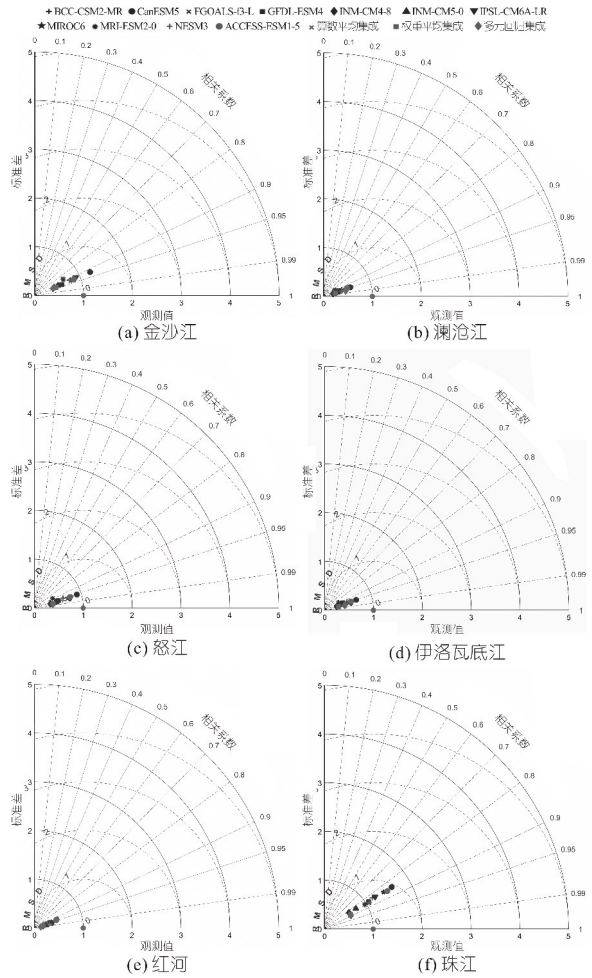


图3 模拟气温标准化泰勒图

Fig. 3 Standardized Teller plot of simulated temperature

表 3 云南省六大流域降水气候倾向率预测结果

Tab. 3 Prediction results of precipitation climatic tendency rate for six river basins in Yunnan Province

时期	降水气候倾向率/(mm·(10a) ⁻¹)					
	金沙江	澜沧江	怒江	伊洛瓦底江	红河	珠江
未来近期	5.5	11.0	19.5	35.1	17.9	11.5
未来中期	15.0	19.5	16.3	27.0	14.0	14.2
未来远期	18.5	14.9	8.6	23.1	25.2	3.9
未来平均	9.9	14.1	12.4	17.3	11.0	6.2

云南省六大流域降水空间变化趋势预测结果见图 4。由图 4 可知,未来近、中、远期降水高值区可能由滇西南逐渐向周围扩散;降水高值区主要分布于伊洛瓦底江、怒江、澜沧江、红河、珠江、金沙江降水分布相对较少;未来降水空间变化与历史演变基本一致。

云南省六大流域年降水量变化趋势见图 5。由图 5 可知,金沙江、澜沧江、怒江、伊洛瓦底江 2060 年后呈显著增加趋势;红河、珠江远期呈显著增加趋势;澜沧江、怒江、伊洛瓦底江、珠江降水可能于 2060 年左右发生突变,红河降水可能于 2080 年左右发生突变。

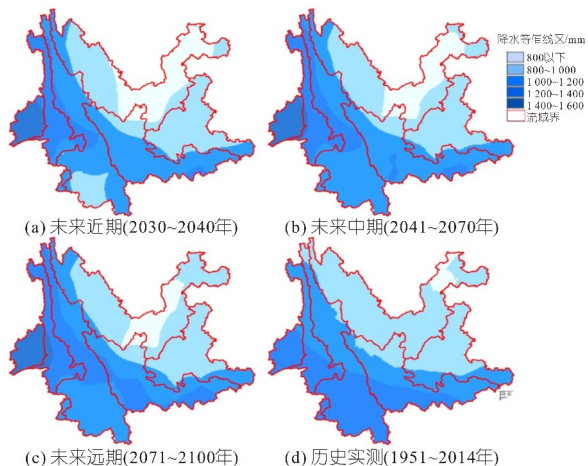


图 4 云南省六大流域降水空间变化预测结果

Fig. 4 Prediction results of spatial variation of precipitation of six river basins in Yunnan Province

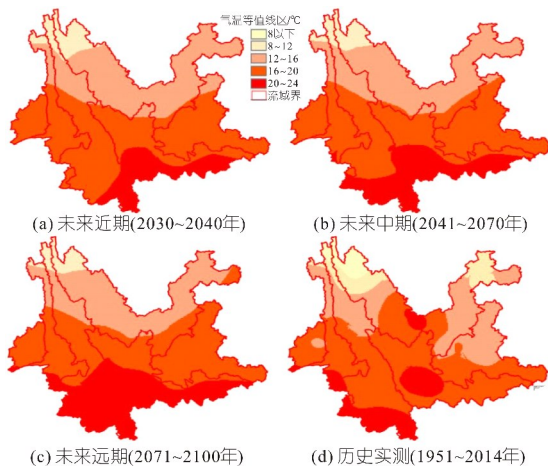


图 6 云南省六大流域气温空间变化预测结果

Fig. 6 Prediction results of spatial variation of temperature of six river basins in Yunnan Province

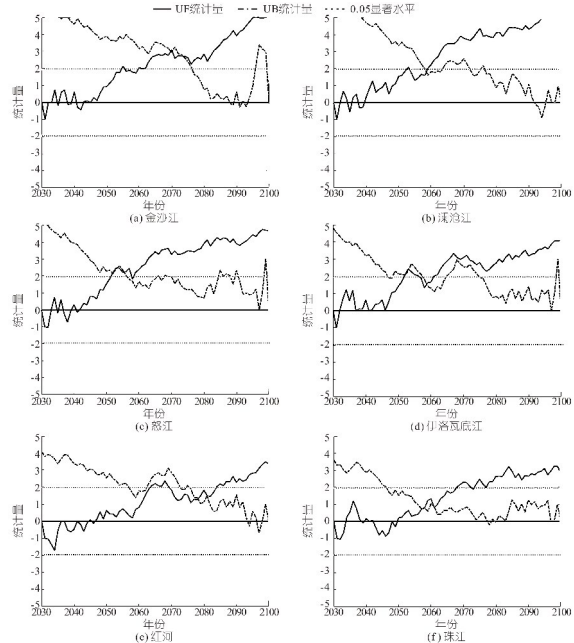


图 5 云南省六大流域降水变化趋势

Fig. 5 Precipitation trend change of six river basins in Yunnan Province

4.2 气温预测

预测红河、怒江、伊洛瓦底江、珠江、澜沧江、金沙江面平均气温逐渐降低,分别为 20.95、18.64、18.27、18.23、17.79、14.58 °C。预测未来近、中、远期珠江气温的气候倾向率整体较高,伊洛瓦底江、澜沧江、红河、怒江次之,金沙江气温的气候倾向率相对较低,具体分别为珠江 0.20 °C/10a、伊洛瓦底江 0.16 °C/10a、澜沧江 0.16 °C/10a、红河 0.13 °C/10a、怒江 0.13 °C/10a、金沙江 0.10 °C/10a。

六大流域气温空间变化趋势预测结果见图 6。由图 6 可知,云南省六大流域气温未来近、中、远期气温高值区可能由滇南逐渐向滇北延伸;气温高值区主要分布于红河、西南伊洛瓦底江、怒江下

游、澜沧江下游、珠江,而怒江上游、澜沧江上游、金沙江气温相对较低;未来气温空间变化与历史演变基本一致。

六大流域年平均气温变化趋势见图 7。由图 7 可知,金沙江气温 2055 年后呈显著升高趋势,澜沧江气温 2045 年后呈显著升高趋势,怒江气温 2050 年后呈显著升高趋势,伊洛瓦底江气温中期以后呈显著升高趋势,红河气温 2050 年后呈显著升高趋势,珠江气温 2050 年后显著升高。

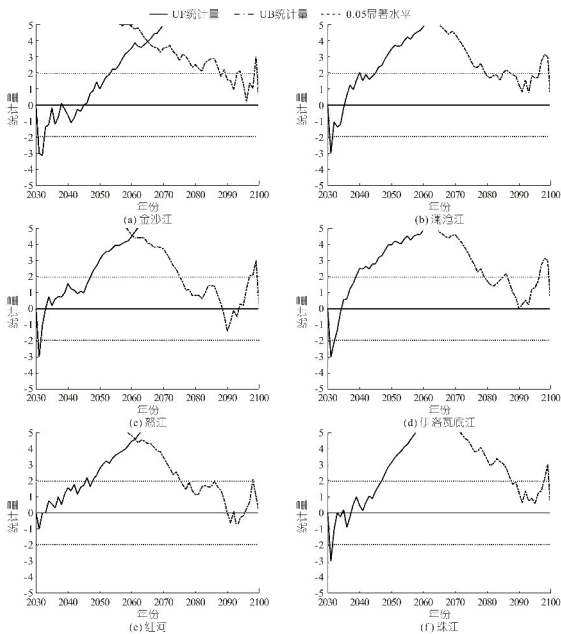


图 7 云南省六大流域气温变化趋势

Fig. 7 Temperature trend change of six river basins in Yunnan Province

5 结论

将 CMIP6 模式应用于云南省六大流域,预测未来(2030~2100 年)六大流域降水增加,气温升

高;2060年后降水显著增加,2050年后气温显著升高。其中澜沧江、怒江、伊洛瓦底江、红河为国际河流,属于敏感区,研究结论有重要价值。下一步拟围绕提升模拟预测能力开展研究。

参考文献:

[1] 翟盘茂,周佰铨,陈阳,等. 气候变化科学方面的几个最新认知[J]. 气候变化研究进展, 2021, 17(6): 629-635.

[2] 匡舒雅,周泽宇,梁媚聪,等. IPCC第六次评估报告第二工作组报告解读[J]. 环境保护, 2022, 50(9): 71-75.

[3] 张建云. 气候变化对国家水安全的影响及减缓适应策略[J]. 中国水利, 2022(15): 3-5, 14.

[4] 吴鹏,谷星月,王朋岭. 中国气候变化蓝皮书(2022)发布[N]. 中国气象报, 2022-08-04(001).

[5] 郝文龙,宋弘东,朱长军,等. 变化环境下非一致性

极端水文事件的模拟及预测[J]. 水电能源科学, 2022, 40(6): 58-62.

[6] 刘锋,薛联青,魏光辉. 基于CMIP5的塔里木河流域未来降水模拟及响应分析[J]. 水电能源科学, 2022, 40(3): 5-8, 148.

[7] 谢子琪,袁飞,周梦瑶,等. 集合CMIP6多气候模式的南水北调中线工程水源区径流预估[J]. 水电能源科学, 2022, 40(7): 19-22, 9.

[8] 智协飞,彭婷,李刚,等. 多模式集成的概率天气预报和气候预测研究进展[J]. 大气科学学报, 2014, 37(2): 248-256.

[9] 张恒德,张庭玉,李涛,等. 基于BP神经网络的污染物浓度多模式集成预报[J]. 中国环境科学, 2018, 38(4): 1243-1256.

[10] 李晓蕾,王卫光,张淑林. 基于CMIP6多模式的长江流域未来降水变化趋势分析[J]. 中国农村水利水电, 2022(3): 1-7, 12.

Prediction of Climate Change Trend in Six River Basins in Yunnan Province Based on CMIP6 Models

LIU Zhi-tian, HU Xian-qun, ZHU Yan-xia, YANG Cao-jing, ZHANG Xiao-tan, ZHOU Feng, GAO Chao

(PowerChina Kunming Engineering Corporation Limited, Kunming 650051, China)

Abstract: Based on the monthly data of precipitation and average temperature from 36 reference meteorological stations in the six basins in Yunnan Province, 11 climate models published by CMIP6 were used to simulate and predict the change process of meteorological elements in six basins. Three model integration technologies were used to improve the simulation ability and evaluate the suitability of each model and integration method. The optimal method was chosen to predict the possible trend of climate change in six basins under the scenario of SSP2-4.5 in the future. The results showed that precipitation and temperature would increase gradually in the near, middle and long term in the six basins of Yunnan Province. Precipitation might increase significantly after 2060, and temperature might increase significantly after 2050.

Key words: six river basins in Yunnan Province; CMIP6 models; climate change; trend prediction

(上接第 30 页)

Impact of Three Gorges Reservoir Operation on Channel Development of Bailuoji Reach

LI Si-xuan, XIAO Hua, YUAN Jing, BI Hong-wei

(Hydrology Bureau, Changjiang Water Resources Commission, Wuhan 430010, China)

Abstract: Flow and sediment are the driving force and material basis for shaping the riverbed. The process of flow and sediment changed by the operation of Three Gorges Reservoir leads to severe riverbed adjustment downstream of the dam. This paper selects the straight-braided channel-Bailuoji as typical which locates in the middle reaches of the Yangtze River, and analyzes the channel development characteristics from perspectives of channel storage capacity, beach-trough scouring and silting and branch channel diversion capacity variation after the impoundment of the Three Gorges Reservoir. Combined with the change in the duration of floods above the channel forming discharge, the impact of the flow process change on the development of the Bailuoji Reach is quantitatively calculated. The results show that in recent years, the channel storage capacity of the Bailuoji reach has increased and scouring mainly locates in the low-flow channel. The right branch is the main branch and the diversion ratio has increased under the low-discharge. The flow and sediment conditions after the impoundment of the Three Gorges Reservoir can maintain the development of the main branch of the Bailuoji reach. Compared with the flow process without reservoir regulation and storage, the duration of high flow above the channel forming discharge is relatively shortened under the current dispatching mode, the total amount of erosion in the Bailuoji reach is relatively small and the diversion ratio of the right branch is slightly reduced. The research results can provide reference for middle-small flood dispatch of Three Gorges Reservoir.

Key words: Three Gorges Reservoir; river development; Bailuoji reach; channel forming discharge

(上接第 42 页)

Changes of Dynamic Permissible Pollution Bearing Capacity and Hydrological Processes Response Under Influence of Cascade Scheduling

YAN Feng-ling, FAN Hao

(Changjiang Water Resources Protection Institute, Changjiang Water Resources Commission, Wuhan 430051, China)

Abstract: As an essential influencing factor of permissible pollution bearing capacity, hydrological condition was changed significantly due to hydropower cascade development. According to the water functional division and water quality control target in Panzhuhua reach of Jinsha River, the variation of dynamic permissible pollution bearing capacity (COD, NH₃-N) with hydropower cascade development were calculated depending on 2-D hydrodynamic and water quality models. Furthermore, response relationship between permissible pollution bearing capacity and hydrological factors was established to evaluate the effect of hydropower cascade. The results show that the dynamic permissible pollution bearing capacity of COD and NH₃-N decreased by 5.2%-27.8% and 3.8%-41.2%, respectively, and its decreased range was found to be more evident in dry season. The variation trend of permissible pollution bearing capacity and near-bank discharge was similar for different conditions. Simple coefficients between the variation of near-bank discharge and permissible pollution bearing capacity were calculated. However, a significant correlation was found with permissible pollution bearing capacity of NH₃-N only.

Key words: Jinsha River; hydropower cascade; dynamic permissible pollution bearing capacity; hydrological processes