

DOI: 10.20040/j.cnki.1000-7709.2023.20222207

未来气候变化及土地利用情景下清水河流域径流模拟

周 凡^{a,b}, 李 涵^{a,b}, 刘瑞芬^{a,b}

(湖北工业大学 a. 河湖生态修复与藻类利用湖北省重点实验室; b. 土木建筑与环境学院, 湖北 武汉 430068)

摘要: 气候变化及土地利用情景下流域径流模拟和预测对流域水量平衡研究和水资源规划管理具有重要意义。以张家口市清水河流域为例,采用全球气候模式 GFDL-ESM2M 和 CA-Markov 模型分析和预测清水河流域气象数据和土地利用,构建流域 SWAT 水文模型,量化气候变化和土地利用共同影响下流域 2025 年水量平衡要素变化。结果表明,在三种温室气体排放情景下,2025 年清水河流域降雨量大幅增加,RCP2.6 情景下的最高温度和平均温度相比 2015 年下降,RCP4.5 和 RCP8.5 情景下最高温度和平均温度均上升,三种情景下最低温度均有下降;2015~2025 年间,耕地、林地、草地、水域、建设用地五种土地利用类型分别变化了-6.24%、-0.86%、6.32%、0.20%、0.59%;相比 2014~2015 年,流域 2025 年水量平衡分配发生改变,月径流量峰值出现在 7 月或 9 月,三种排放情景下年平均径流量分别为 4.40、5.84、9.94 m³/s。

关键词: 清水河流域; 气候变化; 土地利用; SWAT 模型; 径流

中图分类号: TV121⁺.4; P333 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-7709(2023)09-0011-04

1 概况

清水河起源于张家口市崇礼区桦皮岭南麓,流经崇礼区、张家口市,于宣化区姚家乡清水河村西南 2.5 km 处汇入洋河,属海河流域永定河水系。清水河上游有西沟、中沟和东沟三条主要支流,下游出口处有水文站张家口(三)站,集水面积达 2 300 km²。清水河流域地处东亚大陆性季风气候中温带亚干旱区,年均气温 3.4 °C,年均降雨量 455.56 mm。流域全境山峦起伏,地势由东北向西南倾斜,海拔在 758~2 164 m 之间,流域土壤类型包括淋溶土、灰色土、栗钙土、锥形土、潜育土、岩性土和冲积土^[1]。清水河流域作为张家口市的环境支撑区,对张家口市构建绿色屏障、护佑首都生态有着重要意义。区域气候变暖趋势可通过对全球气候模式 GFDL-ESM2M 进行降尺度处理后获得;而未来土地利用预测则可通过 CA-Markov 模型实现,发挥 CA 模型的空间动态模拟能力和 Markov 模型的长期预测优势。在径流模拟方面,SWAT 水文模型的输入数

据包括气象、土地利用、土壤和高程数据^[2,3]。但至今尚缺少将 GFDL-ESM2M、CA-Markov 模型与 SWAT 模型相结合预测未来气候及土地利用变化下的流域径流的方法。为此,本文以清水河流域为例,基于 GFDL-ESM2M 降尺度得到的气候数据和 CA-Markov 模型预测的土地利用数据,构建流域 SWAT 模型,评估了未来气候变化和土地演变背景下流域径流的变化,以期为清水河流域的水资源管理提供参考。

2 研究资料与方法

2.1 未来气候变化及土地利用情景

2.1.1 气候预测

全球气候模式 GFDL-ESM2M 是描述未来气候变化的趋势,而人为辐射强迫是气候变化的驱动力,根据不同等级的辐射强迫,IPCC 提出了温室气体排放情景——代表性浓度路径(RCPs)^[4]。本文将 GFDL-ESM2M 降尺度后的气候数据作为 2025 年清水河流域气候预测,数据来源于国家青藏高原科学数据中心,包括

收稿日期: 2022-10-21, **修回日期:** 2022-12-07

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目(51909081);国家科技重大专项水专项项目(2017ZX07101003-08)

作者简介: 周凡(1997-),男,硕士研究生,研究方向为水文数值模拟,E-mail: zzhbut@163.com

通讯作者: 刘瑞芬(1986-),女,副教授、硕导,研究方向为城市雨洪控制技术、水文数值模拟,E-mail: ruifen1986@

RCP2.6、RCP4.5、RCP8.5 三种情景下的 2025 年日最高温度、日最低温度和日降水数据^[5]。通过 ArcGIS 软件预处理,分析气候变化并构建未来气候的天气发生器。

2.1.2 土地利用情景

利用 IDRISI 软件中的 CA-Markov 模型^[6]模拟和预测清水河流域的土地利用情况。

(1)模型的构建和验证。在 Markov 模型中输入 2010、2015 年土地利用,得到 2010~2015 年土地利用转移概率矩阵;将 2015 年图像的水域设置为限制性因子,同时考虑张家口市的林地保护政策并限制林地面积变化,选择 DEM、坡度、离道路距离、离水域距离和离居民点距离作为影响因子,基于限制性因子和影响因子生成适宜性图集;最后在 CA-Markov 模型中以 2015 年为起始年,结合土地利用转移概率矩阵和适宜性图集,设置 5 年的循环次数,得到 2020 年土地利用图像。模拟精度利用 Kappa 系数(简写 K)进行检测,其计算公式^[7]为:

$$K = (P_o - P_c) / (P_p - P_c) \quad (1)$$

式中, P_o 为正确模拟的比例; P_c 为随机情况下的正确预测比例; P_p 为理想状态下正确预测的比例(通常 $P_p=1$)。

当 Kappa 系数大于 0.80 时,认为模拟精度较高,可信度较高^[8]。

(2)模型预测。将 2020 年土地利用的水域设置为限制性因子,选择 DEM、坡度、离道路距离、离水域距离和离居民点距离作为影响因子,基于限制性因子和影响因子生成新的适宜性图集。在 CA-Markov 模型中以 2020 年作为起始年,利用已得到的 2015~2020 年土地利用转移概率矩阵和新的适宜性图集,设置 5 年的循环次数,得到 2025 年土地利用预测资料。

2.2 SWAT 模型径流模拟

2.2.1 模型构建、率定和验证

SWAT 模型为一种可长期模拟流域产流过程的分布式水文模型,其水量平衡公式^[8]为:

$$P_{PREC} = S_{SURQ} + P_{PERCOLATE} + E_{ET} + L_{LATQ} + \Delta S_0 \quad (2)$$

式中, P_{PREC} 为降水量; S_{SURQ} 为地表径流量; $P_{PERCOLATE}$ 为补充给浅层地下水的渗漏量; E_{ET} 为实际蒸发量; L_{LATQ} 为地下侧流量; ΔS_0 为土壤含水率变化量。

SWAT 模型中选择 2012~2013 年作为预热期,2014 年作为率定期,2015 年作为验证期。气象数据来源于 CMADS V1.2 气象数据集,土地利

用采用 2015 年数据。实测径流数据为张家口(三)站的实测月径流量,来源于《海河流域水文资料》。

通过 SWAT-CUP 软件对参数进行率定和验证,选择决定系数 R^2 和纳什效率系数 N_{NSE} 作为评价指标,当 $R^2 > 0.5$ 、 $N_{NSE} > 0.5$ 时^[3],表明模拟结果可接受。

2.2.2 模型预测

将 GFDL-ESM2M 降尺度后得到的 RCP2.6、RCP4.5 和 RCP8.5 三种情景下的气候数据和 CA-Markov 模型预测的 2025 年土地利用图像输入到校准好的 SWAT 模型中,再次运行模型,根据模拟结果分析流域水量平衡及未来径流月变化情况。

3 结果与分析

3.1 清水河流域气候变化分析

分析 2015、2025 年三种排放情景下的气候变化,结果见图 1。由图 1 可知,2025 年 RCP2.6 情景下部分月份(6、8 月)最高温度偏低,RCP4.5、RCP8.5 情景下月最高温度变化趋势接近。三种情景下 2015~2025 年最高温度变化率分别为 -0.017 、 0.177 、 0.223 $^{\circ}\text{C}/\text{a}$ 。最低温度方面,RCP2.6 情景下最低温度接近 2015 年,而 RCP4.5、RCP8.5 情景大部分月份的最低温度要高于 2015 年(1、4、12 月)。三种情景下 2015~2025 年最低温度变化率分别为 -0.574 、 -0.482 、 -0.048 $^{\circ}\text{C}/\text{a}$,与 2015 年最低气温相比未上升,可能是时间序列较短,短期内温度升高的趋势不明显^[9]。平均温度方面,相比 2015 年,RCP2.6 情景下的平均温度(2.72 $^{\circ}\text{C}$)偏低,而 RCP4.5(6.10 $^{\circ}\text{C}$)、RCP8.5(5.56 $^{\circ}\text{C}$)情景下的平均温度均有上升,三种情景下 2015~2025 年平均温度变化率分别为 -0.071 、 0.267 、 0.213 $^{\circ}\text{C}/\text{a}$ 。降雨量方面,相比于 2015 年(364.75 mm),2025

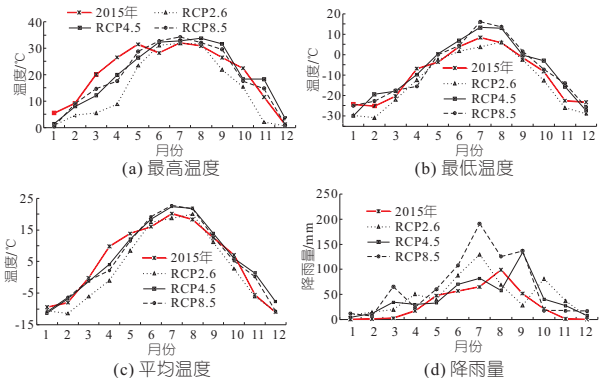


图 1 温度及降雨量变化

Fig. 1 Changes in temperature and rainfall

年三种情景下的降雨均有很大程度增加(分别为 570.72、534.05、781.99 mm),2015~2025 年降雨量变化率分别为 22.643、18.32、43.77 mm/a。

3.2 清水河流域土地利用演变格局分析

图 2 为 CA-Markov 模型模拟得到的 2020、2025 年土地利用情况。由图 2 可知,检验 Kappa 系数达到 0.912 6,说明模拟结果合理。分析清水河流域 2015、2020、2025 年土地利用结果,发现在 10 年间,耕地面积减少了 135 km²,林地面积减少了 18.49 km²,建设用地面积增加了 12.62 km²,草地面积增加了 136.70 km²,水域面积几乎不变(表 1)。这是由于张家口市实行土地利用规划,减少耕地保有量,保护林地同时增加其他类型的土地利用,促进土地资源节约和经济社会可持续发展。

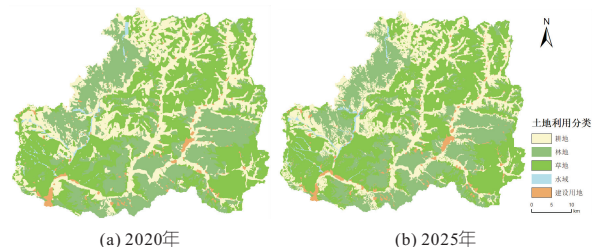


图 2 CA-Markov 模型模拟得到的土地利用
Fig. 2 Landuse simulated by CA-Markov model

表 1 土地利用变化

Tab. 1 Landuse change

土地利 用类型	2015 年		2020 年		2025 年		土地利 用变化 率/%
	面积	比例	面积	比例	面积	比例	
	/km ²	/%	/km ²	/%	/km ²	/%	
耕地	674.31	31.16	580.27	26.81	539.31	24.92	-6.24
林地	648.10	29.95	648.23	29.96	629.61	29.09	-0.86
草地	786.90	36.36	877.89	40.57	923.60	42.68	6.32
水域	15.85	0.73	16.46	0.76	20.04	0.93	0.20
建设用地	38.84	1.79	41.16	1.90	51.46	2.38	0.59
合计	2 164		2 164		2 164		

3.3 清水河流域径流模拟分析

3.3.1 SWAT 模型率定和验证

使用 SWAT-CUP 软件筛选出 19 个敏感参数,并进行敏感性排序和最优值确定(表 2)。将确定的参数代入并运行模型,得到相应的模拟值,通过与实测值进行比较(图 3)。由图 3 可知,观测值和模拟值变化趋势较为一致,模型率定期,验证期 N_{NSE} 、 R^2 均大于 0.60,表明 SWAT 模型在清水河流域有良好的适用性。

3.3.2 流域水量平衡及月径流变化

根据 SWAT 模型模拟得到三种情景下的水量平衡要素,见表 3。由表 3 可知,2015 年实际蒸散发占流域水量输出的主要部分,达到 93.98%,其他部分比例较低。2025 年实际蒸散发量范围

表 2 参数敏感性排序及最优值表

Tab. 2 Parameter sensitivity ranking and optimal value

排序	参数名称	物理意义	t 值	p 值	范围	最优值
1	V_SLSUBBSN. hru	子流域平均坡长	2.78	0.00	10~50	48.21
2	V_SURLAG. bsn	地表径流延滞系数	-1.80	0.07	0~5	1.77
3	R_GW_REVAP. gw	地下水再蒸发系数	1.36	0.17	0~20	4.10
4	V_REVAPMN. gw	浅层地下水发生蒸发的 临界水深	-1.32	0.19	0~500	20.74
5	V_CH_N1. sub	支流曼宁系数	-1.02	0.31	0~0.05	0.02
6	V_CH_K2. rte	主河道水力传导率	-0.76	0.45	0~130	70.76
7	R_SOL_BDX(.). sol	土壤湿容重	-0.68	0.50	1~2.5	1.08
8	V_ALPHA_BF. gw	基流系数	0.63	0.53	0~1	0.46
9	V_ESCO. hru	土壤蒸发补偿因子	-0.63	0.53	0~1	0.03
10	V_ALPHA_BNK. rte	河岸贮水基流因子	0.57	0.57	0~1	0.08
11	R_CANMX. hru	最大冠层储水量	-0.49	0.63	0~100	19.70
12	V_CH_N2. rte	主河道曼宁系数	0.40	0.69	0~0.3	0.28
13	R_SLSOIL. hru	亚地表侧渗流坡长	0.39	0.70	0~1	0.78
14	R_SOL_AWC(.). sol	土壤有效含水率	0.37	0.71	0~1	0.39
15	R_CH_COV1. rte	河道覆盖因子	-0.30	0.76	0~1	0.33
16	R_SOL_K(.). sol	土壤饱和水力传导率	0.23	0.82	-0.8~0.8	-0.06
17	V_EPCO. hru	植被蒸发补偿系数	-0.19	0.85	0~1	0.68
18	V_CN2. mgt	SCS 径流曲线系数	0.18	0.86	0~100	49.16
19	V_HRU_SLP. hru	平均坡度	-0.10	0.92	0~1	0.13

注:t 值代表参数敏感程度,绝对值越大越敏感;p 值代表敏感显著性,越接近 0 越敏感。

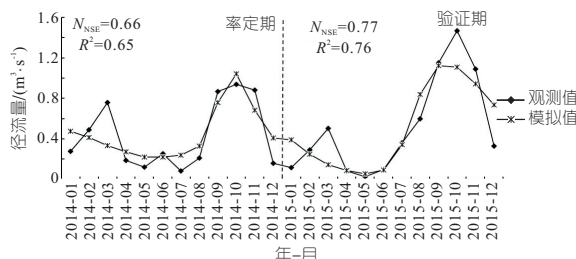


图 3 清水河流域率定期与验证期月径流模拟值
与实测值对比

Fig. 3 Comparison of simulated and measured monthly
runoff values in regular and validation periods
in Qingshui River Basin

表 3 不同时期水量平衡

Tab. 3 Water balance sheet during modeling
period and forecasting period

水量平 衡要素	2015 年		RCP2.6		RCP4.5		RCP8.5	
	比例	比例	比例	比例	比例	比例	比例	
	/mm	/%	/mm	/%	/mm	/%	/mm	/%
地表径流	2.17	0.63	29.37	5.02	38.42	7.27	79.10	10.06
地下水渗漏量	3.06	0.89	23.10	3.94	17.35	3.28	46.48	5.91
实际蒸散发	323.56	93.98	428.54	73.18	402.62	76.17	570.81	72.57
地下侧流量	7.40	2.15	11.50	1.96	29.29	5.54	19.21	2.44
土壤含水量变化	8.09	2.35	93.09	15.90	40.9	7.74	70.92	9.02
降雨量	344.29		585.63		528.58		786.52	

为 72.57%~76.17%,相比 2015 年有所减少,地表径流、地下水渗漏量、地下侧流量和土壤含水率变化比例均有一定程度的增加。RCP2.6 情景下的土壤含水率变化较大,因为该情景下平均温度较低(2.72℃),实际蒸散发量较小,降雨量较大的月份分散(4、6、7、8、10 月),降雨后有充分的时间渗入地下;RCP4.5 情景下实际蒸散发量比例最大,达到 76.17%,是因为该情景下降雨量最少

(528.38 mm),而平均温度最高(6.10 ℃),降雨较大的月份集中(6、7、8、9、10月)且这些月份是一年中平均温度最高的,从而使得蒸散发比例增大;RCP8.5情景下的地表径流量和地下水渗漏量比例最大,分别达到10.06%、9.02%,这是由于该情景下降雨量最大(781.99 mm),其中7~10月降雨量大幅增加,短时间内无法下渗从而形成地表径流,因此该部分比例增大。总体来说,三种情景下降雨量的增加导致未来流域的蒸散发量比例下降,而平均温度上升,说明水量平衡要素中降雨的影响大于温度影响,各月份降雨量的差异影响水量平衡中各个要素的差异,而温度的差异导致了三种情景中蒸散发量的差异。

SWAT模型流域径流量由地表径流、地下侧流量和地下水回归量组成。根据模型结果,2015、2025年三种情景下的年平均径流量分别为0.75、4.40、5.84、9.94 m³/s,可知未来清水河流域径流量相比2015年会有大幅增加,建设用地面积增加使得城市下垫面变化(表1),同时降雨量大幅增加导致径流增加(图1(d)),共同导致了流域汇水总量增加^[10]。图4为三种情景下月平均径流变化。由图4可知,三种情景下的月平均径流变化与月降雨量变化一致,6~9月较大。三种情景下的月平均径流量最大值分别出现在7、9月和次年7月,分别为23.52、24.02、40.21 m³/s。未来清水河流域的径流量峰值出现在7月或9月,RCP8.5情景下甚至会出现两个峰值。可见降雨量的增加是影响流域未来径流量的主要因素,其中RCP8.5情景下的降雨变化最剧烈,呈现出反常态特征。未来降雨增加有利于缓解张家口市干旱少雨的情况,政府应合理的水资源规划及分配方案,使水资源利用最大化;同时7~9月降雨过多,可能会造成洪涝灾害,当地应该积极植树造林,增加植被覆盖率的同时改善生态环境,应对洪涝灾害。

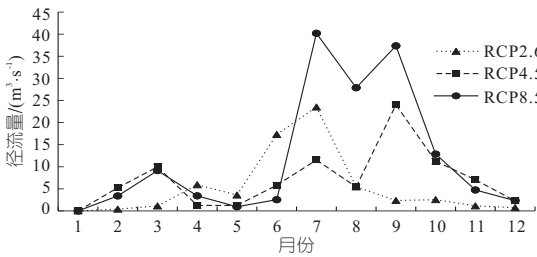


图4 三种情景下月平均径流变化

Fig. 4 Mean monthly runoff changes under the three scenarios

4 结论

a. 2025年清水河流域在三种情景下的降雨

量均有不同程度的增加,RCP4.5、RCP8.5情景下最高温度和平均温度均上升;2015~2025年草地和建设用地面积逐渐增加,林地和耕地面积逐步减少;2025年流域水量平衡的分配发生较大变化,三种情景下年平均径流量分别达4.40、5.84、9.94 m³/s。

b. 考虑未来气候和土地利用变化,清水河流域的降雨量和径流量均会增加,当地应加强水资源的合理配置、预防洪涝灾害的发生。

参考文献:

[1] FAO SOILS PORTAL. 基于世界土壤数据库(HWSD)土壤数据集(v1.2)[EB/OL]. 国家冰川冻土沙漠科学数据中心(www.ncdc.ac.cn), 2021. https://cstr.cn/11738.11.ncdc.nieer.db2701.2023.

[2] 曹灿, 孙瑞, 吴志祥, 等. 基于SWAT模型的南渡江流域土地利用/覆被变化的径流响应[J]. 水土保持研究, 2022,29(4):167-175.

[3] 潘张榕, 李薇, 郭军红, 等. CN05.1再分析资料在西北偏远流域水文模拟中的适用性[J]. 水电能源科学, 2022,40(11):6-9.

[4] 叶加俊. 汉江上游流域径流模拟及未来气候变化响应[D]. 武汉:华中科技大学, 2018.

[5] PAN X D, ZHANG L, HUANG C L. Future climate projection in Northwest China with RegCM4.6[J]. Earth and space science, 2020,7(2): e2019EA000819.

[6] GIDEY E, DIKINYA O, SEBEGO R, et al. Cellular automata and Markov Chain (CA-Markov) model-based predictions of future land use and land cover scenarios (2015~2033) in Raya, northern Ethiopia[J]. Modeling earth systems & environment, 2017,13:1245-1262.

[7] SUBEDI P, SUBEDI K, THAPA B. Application of a hybrid cellular automaton-Markov (CA-Markov) model in land-use change prediction: A case study of Saddle Creek Drainage Basin, Florida[J]. Applied ecology and environmental sciences, 2013,1(6):126-132.

[8] 王胜, 许红梅, 高超, 等. 基于SWAT模型分析淮河流域中上游水量平衡要素对气候变化的响应[J]. 气候变化研究进展, 2015,11(6):402-411.

[9] 唐中楠, 杨国丽, 李军, 等. 未来气候情景下兰江流域径流响应模拟[J]. 水电能源科学, 2022,40(2):32-35.

[10] 陈梓楹, 郭巧玲, 韩瑶瑶, 等. 降水与土地利用变化对窟野河流域径流的影响[J]. 水电能源科学, 2022,40(7):14-18.

Analysis of Influence of Different Spillway Bends on Spiral Flow of Spillway Side Troughs

GUO Jin-nan¹, QIU Yong¹, HE Pei-shan², WU Si-heng¹, JI Lun-yong¹

(1. College of Water Resources and Hydraulic Engineering, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China; 2. Kunming Hongzhao Water Conservancy and Hydropower Engineering Design Consulting Co., Ltd., Kunming 650020, China)

Abstract: For side channel spillways, although the adjustment section can be arranged on the downstream side to smooth the water flow, it is difficult to completely avoid the interference of the transverse axis spiral flow on the water flow pattern of the chute. Through numerical simulation, the impacts of the curved circulation in the turning section of the chute on the spiral flow on the lateral axis of the side trough were studied. The results show that when the direction of the circulation and the spiral flow are the same (the turning angle is 14.505°), the streamline in the bend rolls obliquely from the concave bank to the convex bank, the superposition of the flow velocity is obvious, and the circulation intensity intensifies. The lateral flow velocity of the outlet section of the curve reaches 3.29 m/s, and the height difference of the outlet water surface has reached 1.140 m (low left and high right); When the circulation flow of channel bend and spiral flow are in opposite directions (the turning angle is -5°); The water flow in the bend turns from both sides to the axis and then flows downstream, and the circulation phenomenon almost disappears; The lateral flow velocity at the outlet section of the bend decreases to -0.19 m/s, and the height difference of the outlet water surface decreases to -0.467 m (high left and low right). That is, the turbulence of the spiral flow in the upstream groove can be improved by providing a curved path in the chute.

Key words: transverse velocity; vertical velocity; chute circulation flow of channel bend; side groove spiral flow; water flow regime

(上接第 14 页)

Runoff Simulation of Qingshui River Basin Under Future Climate Change and Land Use Scenarios

ZHOU Fan^{a,b}, LI Han^{a,b}, LIU Rui-fen^{a,b}

(a. Hubei Key Laboratory of River and Lake Ecological Restoration and Algae Utilization;

b. School of Civil Engineering, Architecture & Environment, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China)

Abstract: Simulation and prediction of runoff under climate change and land use scenarios are of great significance for the study of water balance and water resources planning and management. Taking the Qingshui River Basin in Zhangjiakou City as the research area, the global climate model GFDL-ESM2M and CA-Markov model were used to analyze and predict the meteorological data and land use in the Qingshui River basin, and the SWAT hydrological model was constructed to quantify the changes of water balance factors in the basin in 2025 under the joint influence of climate change and land use. The results show that under the three GHG emission scenarios, the rainfall in Qingshui River Basin increased significantly in 2025, the maximum temperature and average temperature under the RCP2.6 emission scenario decreased compared with 2015; The maximum temperature and average temperature under the RCP4.5 and RCP8.5 emission scenario increased, and the minimum temperature under the three scenarios decreased. From 2015 to 2025, arable land, woodland, grassland, water area and construction land changed by -6.24% , -0.86% , 6.32% , 0.20% and 0.59% , respectively. Compared with 2014-2015, the water balance distribution of the watershed changed in 2025, and the peak monthly runoff occurred from July to September. The average annual runoff under the three discharge scenarios were 4.40 m³/s, 5.84 m³/s and 9.94 m³/s, respectively.

Key words: Qingshui River Basin; climate change; landuse; SWAT model; runoff

(上接第 115 页)

Numerical Simulation of Hydrodynamic Characteristics in a Channel with Fish-nest Brisk

YANG Ji^a, GONG Yi-qing^b, MAO Jing-qiao^a, GAO Huan^a, DAI Jie^a

(a. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering;

b. Institute of Water Science, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: In order to investigate the impact of typical ecological revetment fish-nest brick on the hydrodynamic characteristics of straight water conveyance channels, a 3-D numerical model (LES) incorporating fish-nest brick was developed using large-eddy simulation technology. Periodic boundaries were employed in the longitudinal direction to allow for the repeated development of water flow within the computational domain. The reliability of the numerical model was extensively validated through experimental data from flume tests. Subsequently, the LES model was used to simulate the hydrodynamic characteristics of channels containing fish-nest brick. The results indicate that the fish-nest brick divide the channel into a high-speed main flow region and a low-speed fish-nest cavity. The time-averaged flow velocity in the main flow region is approximately 1.8 times the cross-sectional average flow velocity (U_0), and a continuous distribution of vortices exists throughout the entire water depth range. Conversely, the time-averaged flow velocity and turbulence within the fish-nest cavity are at relatively low levels, making it suitable for fish habitat and the hatching of adhesive eggs. The mixing layer at the mouth of the fish-nest cavity exhibits relatively strong vortex structures, which significantly enhances turbulence intensity and services as the primary driving force for momentum exchange between the interior and exterior of the fish-nest cavity.

Key words: fish-nest brisk; large-eddy simulation; vortex structures; fish swimming