

岷沱江流域径流对气候和土地利用变化的响应

聂超, 倪福全, 邓玉, 马捷, 张洋

(四川农业大学 水利水电学院, 四川 雅安 625014)

摘要: 为探究岷沱江流域径流对气候和土地利用变化的响应,构建了岷沱江流域 SWAT 分布式水文模型,并采用情景分析方法从时空尺度上定量分析了 1981-2014 年间岷沱江流域气候和土地利用变化对径流量的影响。结果表明: SWAT 模型在岷沱江流域适用性较好,可用模型模拟流域径流;气候和土地利用变化均引起流域径流量减少,且气候变化的影响强度显著大于土地利用变化的影响强度,气候和土地利用变化分别对流域内大渡河和沱江径流量影响最大;仅考虑气候变化,流域径流量与降雨变化呈正相关关系,与气温变化呈负相关关系,气候变化对流域内大渡河径流量影响最大;仅考虑土地利用变化,将流域坡度 25°以上耕地转化为林地和坡度 15°~25°之间的耕地转化为草地,均会引起流域径流量的微弱减少,分别对流域内大渡河和岷江径流量影响最大,而将全部林地转化为草地则会导致流域径流量的微弱增加,大渡河径流量增加最大。

关键词: SWAT 模型; 气候变化; 土地利用变化; 径流模拟; 岷沱江流域

中图分类号: TV11; P333

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2020)03-0110-09

Response of runoff to climate and land use change in Minjiang and Tuojiang River Basin

NIE Chao, NI Fuquan, DENG Yu, MA Jie, ZHANG Yang

(College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Sichuan Agricultural University, Yaan 625014, China)

Abstract: In order to explore the response of runoff to land use and climate change in Minjiang & Tuojiang River Basin, a hydrological SWAT (soil and water assessment tool) model of Minjiang & Tuojiang River Basin was constructed to quantitatively evaluate the effects of land use and climate change on the runoff in Minjiang & Tuojiang River Basin from 1981 to 2014 on spatio-temporal scale using scenario analysis. The results show that the SWAT model is applicable to the runoff simulation of Minjiang & Tuojiang River Basin. Both climate and land use change will induce a decrease in runoff in this basin, and the influence intensity of climate change is significantly greater than that of land use change. They have the greatest influence on the runoff of Dadu River and Tuojiang River respectively. Only considering climate change, the runoff is positively correlated with the precipitation change, but negatively correlated with the temperature change in this basin. In addition, climate change has the greatest impact on the runoff of Dadu River. When only considering the land use change, both the conversion of cultivated land of 25° slope and above into forest land and cultivated land of 15°-25° slope into grassland will cause a slight reduction of runoff in this basin, and the former has the greatest impact on the runoff of Dadu River, the latter on Minjiang River, respectively. The conversion of all forest land into grassland will lead to a slight increase in the runoff with the largest increase in Dadu River.

Key words: SWAT (soil and water assessment tool) model; climate change; land use change; runoff simulation; Minjiang & Tuojiang River Basin

收稿日期: 2019-09-30; 修回日期: 2019-12-24

基金项目: 四川省教育厅“农村水安全”工程研究中心项目(035Z2289)

作者简介: 聂超(1994-), 男, 四川广安人, 硕士研究生, 主要从事农业水土环境研究。

通讯作者: 倪福全(1965-), 男, 四川成都人, 博士, 教授, 硕士生导师, 主要从事水安全和农业水土环境研究。

1 研究背景

如今,流域水文循环及水资源研究已成为水科学发展的热点方向^[1-4],而影响流域水文循环和水资源的因子主要有气候和土地利用方式的变化^[5-6]。气候和土地利用变化在很大程度上交互影响地表径流的时空演变^[7-8],模拟和预测两者对流域径流的水文响应,对保护流域水生态、治理流域水环境十分必要。

目前,国内对气候和土地利用变化引起的水文效应综合研究较为广泛,研究主要集中在长江、黄河、海河、黑河等流域^[9-12]。例如,冯畅等^[13]、黄锋华等^[14]、林娴等^[15]分别在涟水河、北江、武江流域研究了气候和土地利用变化对径流的影响,并取得了较好的研究结果。这些研究大部分都将各自研究流域作为一个整体,没有考虑流域的空间异质性,不能确切地描述出径流对气候和土地利用变化的响应情况,而流域径流的空间变化对水文循环及水资源研究尤为重要^[16],因此,有必要将流域划分为多个分区研究气候和土地利用变化对径流的影响。

岷沱江流域是四川省成都平原经济区、川西北生态经济区、川南经济区等主要经济区的重要水源^[17],水生态环境条件十分复杂。“十四五”期间,随着岷沱江流域经济社会的不断发展和农业现代化、城镇规模化的不断推进以及气候的区域性变化,岷沱江流域水资源供需矛盾必将日益加剧,水资源、水生态承载力、水环境容量作为刚性约束而产生的诸多水问题必将日益凸现^[18-19]。因此,积极探究岷沱江流域径流对气候和土地利用变化的响应十分迫切。为了辨析岷沱江流域关键生态水文过程,建立适合复杂条件的分布式流域生态水文模型,定量评估气候及土地利用变化对径流的影响,本研究以岷沱江流域为研究区,构建 SWAT 模型,探讨模型在研究区的适用性,并将岷沱江流域划分为青衣江、大渡河、岷江和沱江 4 个子流域,定量分析各子流域的径流对气候与土地利用变化的响应规律,对岷沱江流域内“十四五”水资源优化配置、水生态保护、水环境治理具有重要的科学价值和现实意义。

2 研究区概况与数据来源

2.1 研究区概况

岷沱江是长江上游的一级支流,为四川盆地腹地区重要水系,岷沱江流域介于 $99^{\circ} \sim 106^{\circ} \text{E}$, $28^{\circ} \sim 34^{\circ} \text{N}$,面积 $16.30 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。其中,岷江发源于岷山,流经阿坝州、成都、眉山、乐山、宜宾等地,在宜宾市城区

汇入长江,流域面积 $4.6 \times 10^4 \text{ km}^2$ (不含大渡河、青衣江),长 735 km,多年平均流量 $600 \text{ m}^3/\text{s}$,多年平均水资源量 $189 \times 10^8 \text{ m}^3$;岷江主要支流为大渡河和青衣江,大渡河发源于青海省玉树藏族自治州内阿尼玛卿山脉的果洛山南麓,东行至萧公嘴与松潘流来的岷江干流相汇,长 1 074 km,流域面积 $7.72 \times 10^4 \text{ km}^2$ (不含青衣江),多年平均流量 $1 490 \text{ m}^3/\text{s}$,多年平均水资源量 $459.17 \times 10^8 \text{ m}^3$;青衣江发源于邛崃山脉巴朗山与夹金山之间的蜀西营,在乐山市水口乡草鞋渡注入大渡河,距大渡河入岷江口仅 7 km,长 285.2 km,流域面积 $1.28 \times 10^4 \text{ km}^2$,多年平均流量 $499 \text{ m}^3/\text{s}$,多年平均水资源量 $157.25 \times 10^8 \text{ m}^3$;沱江发源于四川西北部九顶山区域,经德阳、资阳、内江、自贡、泸州等地,于泸州市城区汇入长江^[20],流域面积为 $2.78 \times 10^4 \text{ km}^2$,干流长 634 km,多年平均流量 $454 \text{ m}^3/\text{s}$,多年平均水资源量 $143 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

岷沱江流域属亚热带季风气候,夏季高温多雨,冬季温和少雨,多年平均气温约 14°C ,多年平均降雨量约 900 mm,汛期(5-9月)雨量约占全年雨量 80%,土地利用类型以耕地、林地和草地为主,流域人口、城市多聚集于岷江中下游和沱江流域。岷沱江流域水系、子流域及监测站点分布见图 1。

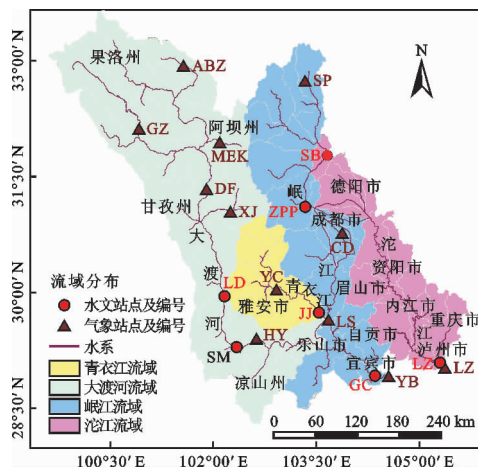


图1 岷沱江流域水系、子流域及监测站点分布

2.2 数据来源

本研究采用全球 30 m 分辨率 DEM 数据集、1980 和 2015 年土地利用数据以及 2010 年土壤数据,气象数据来自研究区 12 个标准气象站点 1979-2014 年的逐日气象数据(降雨、日最高气温、日最低气温、风速、相对湿度、日照时数、太阳辐射),水文数据来自研究区 7 个主要水文监测站,其中,岷江干流水文监测站分别为沙坝站、紫坪铺站、高场站;岷江支流青衣江水文监测站为夹江水文站;岷江支

流大渡河水文监测站分别为泸定站、石棉站;沱江干流水文站为泸州站(见图 1)。数据来源见表 1。

表 1 数据来源及特征

数据名称	数据来源	数据格式	数据年份	分辨率
DEM 数字高程数据	CGIAR – CSI SRTM 高程数据库//srtm. csi. cgiar. org/	GRID	2010 年	30m
土地利用数据	黑河数据中心 //westdc. westgis. ac. cn/	GRID	1980 和 2015 年	1km
土壤数据	黑河数据中心 //westdc. westgis. ac. cn/	GRID	2010 年	1km
气象数据	研究区气象监测站	监测数据	1979 – 2014 年	
月径流资料	研究区水文监测站	监测数据	1982 – 2013 年	

3 研究方法

3.1 SWAT 模型的建立及校准与验证

本研究采用 SWAT 模型,根据收集的土壤数据、气象数据分别建立土壤数据库、气象数据库,并根据研究区 DEM 生成流域河网水系、划分符合模型要求的子流域,再利用土地利用数据、土壤数据划分水文响应单元(hydrologic research units, HRUs),进而构建岷沱江流域的 SWAT 模型。

利用 SWAT – CUP,基于序列不确定性拟合算法(sequential uncertainty fitting algorithm, SUFI – 2)对 SWAT 模型进行校准和验证。选取研究区 7 个主要水文站点的实测月径流数据用于模型的校准与验证,并选用决定系数 R^2 和效率系数 $NSE^{[2-3]}$ 来衡量模型模拟值与实测值的拟合度。

3.2 影响因子变化分析

3.2.1 气象因子变化分析 采用 Mann – Kendall 非参数统计方法及线性趋势法分别对 1979 – 2014 年的降雨和气温气象数据进行突变和趋势检验^[21],以分析研究区各气象因子的变化情况。

3.2.2 土地利用变化分析 土地利用转移矩阵能反映研究区某一时段初期和末期各地类的面积变化趋势以及相互转化的动态过程^[22],因此,利用土地利用转移矩阵分析 1980 – 2015 年土地利用变化特征,通用形式为:

$$S_{ij} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & \cdots & S_{1n} \\ S_{21} & S_{22} & \cdots & S_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ S_{n1} & S_{n2} & \cdots & S_{nn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: S_{ij} 为转移前的第 i 类土地利用转移后的第 j 类土地利用的面积, hm^2 ; i 和 j 分别为转移前和转移后的土地利用类型($i, j = 1, 2, \cdots, n$); n 为转移前后

的土地利用类型数。

3.3 情景设置

3.3.1 气候和土地利用变化共同影响下的径流模拟情景 为了区分气候和土地利用变化对径流的贡献大小,结合现有资料和岷沱江流域土地利用变化情况,选取 1980、2015 年土地利用数据和 1981 – 2014 年气象数据(1979 – 1980 年作为模型运行的预热期)为基础,通过将各时段的土地利用和气象数据相互交叉设计出情景^[23],详细情景设置见表 2。

表 2 综合模拟情景设置

情景	土地利用数据年份	气象数据年份
情景 1	1980	1981 – 1994
情景 2	1980	1995 – 2014
情景 3	2015	1981 – 1994
情景 4	2015	1995 – 2014

3.3.2 气候变化情景 为了探讨气候变化对岷沱江流域水文特征的影响,以 2015 年土地利用和 1981 – 2014 年气象数据为基准期,在未来气候变化的预估范围内,设定气温不变,降雨量 $\pm 10\%$ 、 $\pm 20\%$ 情景以及降雨量不变,气温 $+1.5^\circ\text{C}$ 、 $+2.0^\circ\text{C}$ 情景^[24],具体设置情况见表 3。

表 3 气候变化情景设置

情景	气温变化/ $^\circ\text{C}$	降雨量变化/%
基准期		
情景 5		+ 20
情景 6		+ 10
情景 7		– 10
情景 8		– 20
情景 9	+ 2.0	
情景 10	+ 1.5	

3.3.3 土地利用变化情景 为了探讨土地利用变

化对水文特征的影响,以 2015 年土地利用数据和 1981 – 2014 年气象数据为基准,依据《中华人民共和国水土保持法》等相关法律法规的规定,严禁在坡度 25°以上的耕地进行农耕操作,必须全部退耕还林,对于坡度在 15° ~ 25°之间的耕地,采取保护措施,可适当耕作。考虑研究区土地利用类型主要为耕地、林地、草地,设置 3 种情景,即在保持其余土地利用类型不变的情况下,分别将研究区坡度 25°以上耕地转为林地、坡度 15° ~ 25°之间的耕地转为草地以及将研究区全部林地转为草地^[25]。具体情况见表 4。

表 4 土地利用变化情景设置

情景	土地利用变化
基准期	
情景 11	坡度 25°以上耕地转为林地
情景 12	坡度 15° ~ 25°之间的耕地转为草地
情景 13	全部林地转为草地

4 结果与分析

基于 ARCGIS 加载整理好的研究区 DEM 数据,参照流域实际河网情况,将流域划分为 89 个子流域,载入处理好的土地利用数据、土壤数据,设定合理的土地利用类型面积阈值(5%)和土壤类型面积阈值(5%),进而将研究区划分为 1929 个 HRUs,随后加载气象数据,进行模型的运行以及参数的校准与验证。

4.1 模型的校准与验证

在岷沱江流域 2015 年土地利用情况下,基于 SUFI-2 算法选用岷沱江流域 7 个水文监测站的月径流数据进行 SWAT 模型的校准和验证,由于已有的各水文监测站实测径流资料年限不同,致使各站点的校准和验证期有一定差异,但不影响校准和验证的准确性。根据水文监测站实测数据进行参数敏感性分析,选取敏感性强的参数进行调参校准,具体见表 5。

表 5 SWAT 模型敏感性参数及其率定

参数名称	参数定义	敏感排名	调参方法	取值范围	最佳值
CANMX	最大冠层截留量	1	V	(- 10,10)	- 8.01
SOL_BD	湿密度	2	R	(0.08,0.26)	0.25
SOL_Z	土壤深度	3	R	(- 0.46, - 0.12)	- 0.14
SOL_K	地表径流延迟时间	4	R	(- 0.06,0.11)	0.05
ESCO	土壤蒸发补偿系数	5	V	(0.76,1.27)	1.22
SLSUBBSN	平均坡长	6	R	(0.09,0.38)	0.21
CH_K2	土壤饱和导水率	7	V	(41.25,60.51)	44.81
EPCO	植物蒸腾补偿系数	8	R	(- 0.42, - 0.32)	- 0.39
CN2	SCS 径流曲线系数	9	R	(0.06,0.17)	0.12
SURLAG	地表径流滞后时间	10	V	(19.55,29.12)	22.47
CH_N2	主河道的曼宁系数	11	V	(0.05,0.10)	0.08
GW_DELAY	地下水滞后系数	12	V	(458.76,548.41)	502.06

注:R 方法表示参数初始值乘以给定倍数,V 方法表示参数初始值赋予给定值。

本研究选用 R^2 和 NSE 来衡量模拟值与实测值的拟合度,一般认为 $R^2 > 0.7$ 、 $NSE > 0.6$ 时模型的拟合精度令人满意^[26-27]。表 6 为模型校准及验证结果,由表 6 可知,经模型参数校准和验证后,研究区 7 个水文监测站 SWAT 月径流模拟效果较好,各个站点的 R^2 和 NSE 均高于模型评价标准,表明 SWAT 模型在岷沱江流域径流模拟中具有较好的适用性。流域出水口水文监测站高场站(GC)和泸州站(LZ)

的月径流模拟值与实测值的对比情况见图 2、3,由图 2、3 可以看出,两个站点月径流模拟值与实测值基本吻合,差异较小,说明模型模拟精度较高,能够使用模型模拟值代替实测值。

4.2 影响因子变化趋势

4.2.1 气象因子变化趋势 本研究中气象因子主要考虑平均气温和降雨量。图 4 为 1981 – 2014 年研究区年平均气温和降雨量的 M – K 突变检验图,根据

M-K突变检验结果,曲线 UF 和 UB 的交点为平均气温和降雨量的突变点。由图 4 可见,年平均气温和年降雨量的 UF 和 UB 曲线均在 1995 年相交,且位于显著水平置信线 (± 1.96) 之内,通过 95% 置信度检验,表明年平均气温和年降雨量在 1995 年发生突变,其主要原因是 1995 年后大量修建水电站^[28],对气温和降雨量产生影响,从而引起突变。

图 5 为 1981-2014 年研究区年均气温和降雨量变化趋势。由图 5 可知:(1)研究区 1981-2014 年平均气温呈整体波动升高的趋势,1981-2014 年间平均气温升高了约 0.6°C ,1998 年年均气温最高,为 14.14°C ,1992 年最低,为 12.67°C ,1981-2014 年平均气温为 13.33°C ,年平均气温与年份之间的线性相关系数为 0.47,通过 95% 显著性检验 ($T = 2.93 > T(0.05/2) = 1.64$),表明年平均气温的升高趋势是显著的;(2)研究区 1981-2014 年年均降雨量呈整体波动减小趋势,34 a 间平均降雨量减少了约 51 mm,1990 年降雨量最大,年降雨量 1 073.18 mm,2006 年降雨量最小,年降雨量 767.19 mm,1981-2014 年平均降雨量为 911.19 mm,年平均降雨与年份之间的线性相关系数为 0.21,降雨量减小趋势比较缓慢。

4.2.2 土地利用变化趋势 按照 SWAT 模型要求,将研究区土地利用类型分为耕地、林地、草地、水域、建设用地、未利用土地 6 类,图 6 为分类过后的研究区 1980 和 2015 年土地利用分布图。

表 6 模型校准及验证情况结果

水文站	阶段	年份	决定系数	效率系数
夹江站(JJ)	校准期	1987-1989	0.91	0.87
	验证期	2012-2014	0.88	0.81
沙坝站(SB)	校准期	1982-1984	0.92	0.92
	验证期	1985-1987	0.78	0.75
泸定站(LD)	校准期	2010-2012	0.90	0.82
	验证期	2013-2014	0.90	0.78
石棉站(SM)	校准期	1983-1985	0.87	0.71
	验证期	1986-1987	0.73	0.61
泸州站(LZ)	校准期	2011-2012	0.76	0.75
	验证期	2013-2014	0.70	0.67
高场站(GC)	校准期	1982-1998	0.76	0.76
	验证期	1999-2013	0.90	0.89
紫坪铺站(ZPP)	校准期	1982-1992	0.93	0.87
	验证期	1993-2001	0.88	0.76

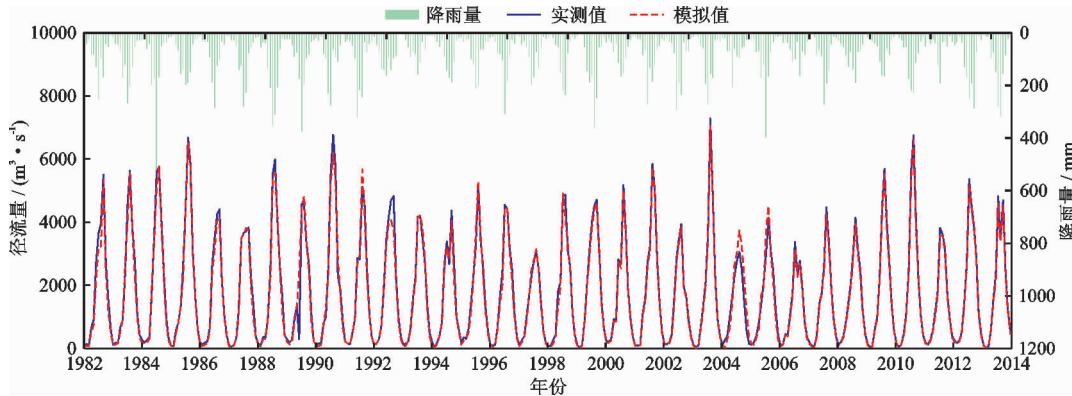


图 2 1982-2013 年高场站月径流量模拟结果

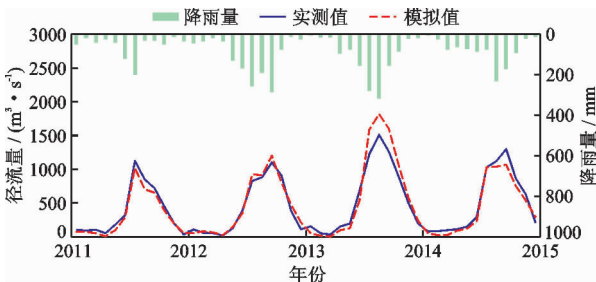


图 3 2011-2014 年泸州站月径流量模拟结果

由图 6 可以看出,研究区以耕地、林地、草地为主,耕地主要集中在沱江和岷江中下游,林地和草地大部分位于大渡河和岷江上游。

表 7 为 1980-2015 年研究区土地利用变化转移矩阵,它能反映出研究区 1980 和 2015 年各土地利用类型组成以及相互转化情况。

由表 7 可以得出,耕地转出面积为 $9\,052\text{ hm}^2$,主要转化为林地和建设用地,转化面积分别为 $4\,847\text{ hm}^2$ 和 $2\,087\text{ hm}^2$,分别占耕地转出面积的 53.55% 和 23.06%;林地转出面积为 $17\,948\text{ hm}^2$,主要转化为草地和耕地,转化面积分别为 $12\,655\text{ hm}^2$ 和 $4\,661\text{ hm}^2$,分别占林地转出面积的 70.51% 和 25.97%。草地转出面积为 $14\,505\text{ hm}^2$,主要转化为林地,转化面积分别为 $12\,511\text{ hm}^2$,占林地转出面积的

86.25%。总体来说,2015 年较 1980 年耕地减少了 1.01%,林地减少了 0.10%,草地增加了 0.47%,主要是因为 2003 年前大量砍伐植被,林地被大肆破

坏,林地被转化为耕地、草地等其他土地利用类型,2003 年后退耕还林、植树造林等政策地实施,耕地、草地等转为林地,林地面积有所增加。

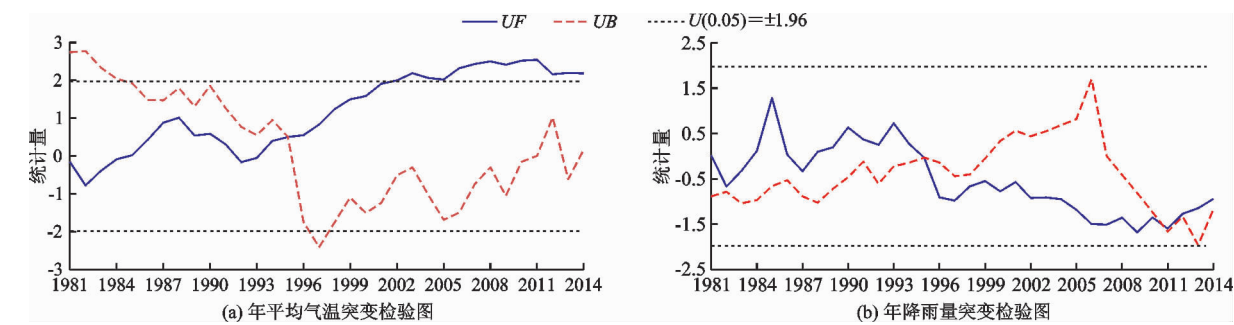


图 4 1981 - 2014 年研究区气象因子 M - K 突变检验

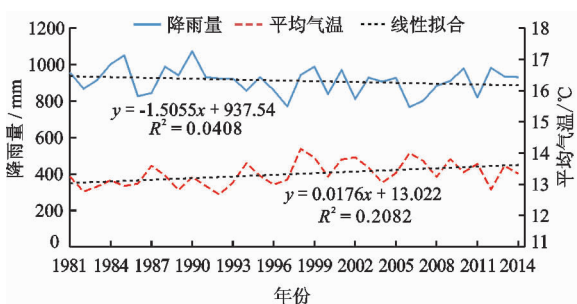


图 5 1981 - 2014 年研究区年均气温和降雨量变化趋势

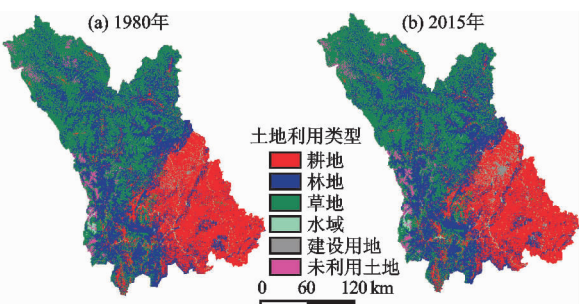


图 6 1980 和 2015 年研究区土地利用类型空间分布

表 7 1980 - 2015 年研究区土地利用变化转移矩阵 hm²

2015 年	1980 年						总计
	耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地	
耕地	34109	4661	1386	559	799	13	41526
林地	4847	37927	12511	109	101	220	55716
草地	1440	12655	43822	162	22	991	59091
水域	668	145	171	425	41	55	1505
建设用地	2087	189	45	69	172	2	2563
未利用地	10	299	394	52	75	1731	2560
总计	43161	55875	58327	1375	1209	3013	162960

4.3 情景模拟分析

4.3.1 气候和土地利用类型共同影响下的径流模拟情景 表 8 为研究区各子流域在气候和土地利用变化共同作用下的径流变化以及气候和土地利用变化分别对径流变化的贡献量情况。

由表 8 可见:(1)基于情景 2 和情景 4 的气候变化引起了研究区径流量减少,青衣江、大渡河、岷江、沱江分别减少 26.04、86.49、50.01、42.49 m³/s,其中大渡河受气候变化影响程度最大,径流量减少最多;(2)基于情景 3,情景 4 的土地利用变化也引起了研究区径流量减少,减少程度较轻,青衣江、大渡河、岷江、沱江分别减少 0.42、0.66、0.75、0.91

m³/s。可见,研究时段内研究区气候变化对径流的影响强度较土地利用变化大,气候变化对研究区径流变化起主导作用。(3)情景 4 与情景 1 比较可见,气候和土地利用变化的共同作用引起研究区径流量减小,青衣江、大渡河、岷江、沱江分别减少 26.46、87.15、50.76、43.40 m³/s,减少的径流量分别占研究区各子流域多年平均流量的 5.3%、5.8%、8.5%、9.5%。目前,岷江、沱江水资源开发利用分别高达 55% 和 40%,青衣江、大渡河水资源开发利用分别仅为 15.7% 和 4.4%。显然,在气候变化和土地利用的共同影响下,岷江、沱江水资源刚性约束力将进一步增大,从青衣江、大渡河向岷江、沱江引调水资源是必要的。根据目前规划,通过“引大青济岷”工程将从青衣江、大渡河引调水资源 25.9 × 10⁸ m³/a、平均流量 82 m³/s 进入岷江、沱江。因此,即使考虑未来气候变化和土地利用的共同影响,青衣江、大渡河引调水后其开发利用仅平均增加 4.4%,分别增至 20.1% 和 8.8%,亦远小于目前岷江、沱江水资源开发利用。因此,从青衣江、大渡河向岷江、沱江引调水资源是可行的。

4.3.2 气候变化情景 表 9 为气温或降雨量变化情况下研究区各子流域径流变化情况。

表 9 模拟结果表明:(1)保持气温不变,当降雨

量增加 10%、20%，研究区径流量均增加，降雨量增加 20% 时引起径流量增加较大。当降雨量减少 10%、20% 时，年均径流量均呈减少趋势，且降雨量减少 20% 情况下径流量减少趋势更明显，可见径流量变化与降雨量变化呈正比，降雨量直接影响研究区产流；保持降雨量不变，当气温增加 1.5℃、2.0℃ 时，研究区径流量均减少，在气温增加 2.0℃ 时，径流量减少幅度较大。气温升高，导致研究区潜在蒸散发增加，径流量减少，且气温升幅越大，蒸散发增幅也越大，而径流量越小，可见径流量变化与气温变

化呈反比。这一结论与冯畅等^[13]、李帅等^[25] 的研究结果一致，即流域内径流量与降雨量呈正相关关系，与气温成负相关关系。（2）在气候变化情景下，研究区内大渡河径流量变化最明显，青衣江径流变化较缓和，降雨量增加情景下大渡河径流量增加最大，降雨量减少或气温升高情景下，青衣江径流量减少最小。在通过“引大青济岷”工程从青衣江、大渡河将水资源调入岷江、沱江过程中，丰水年主要从大渡河引水至岷江和沱江，枯水年主要从青衣江引水至岷江和沱江。

表 8 研究区各子流域在气候和土地利用类型共同影响情景的模拟结果

流域	情景	年均降雨量/ mm	年均气温/ ℃	年均径流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	气候变化对径 流量的影响/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	土地利用变化对 径流量的影响/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	综合模拟对 径流量的影响/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)
青衣江	情景 1	1513.41	14.81	374.34			
	情景 2	1419.47	15.38	348.30	-26.04		
	情景 3			373.92		-0.42	
	情景 4			347.88	-26.04	-0.42	-26.46
大渡河	情景 1	762.14	10.45	748.45			
	情景 2	735.46	11.01	661.96	-86.49		
	情景 3			747.79		-0.66	
	情景 4			661.30	-86.49	-0.66	-87.15
岷江	情景 1	1006.05	14.94	700.71			
	情景 2	966.31	15.71	650.70	-50.01		
	情景 3			699.96		-0.75	
	情景 4			649.95	-50.01	-0.75	-50.76
沱江	情景 1	1020.39	12.26	452.07			
	情景 2	959.46	12.81	409.58	-42.49		
	情景 3			451.16		-0.91	
	情景 4			408.67	-42.49	-0.91	-43.40

4.3.3 土地利用变化情景 基于 1981–2014 年气象数据，以 2015 年土地利用数据为基础，土地利用类型变化情景下的研究区各子流域的年均径流量变化情况见表 10。

由表 10 可看出：（1）与基准期相比，情景 11 将研究区坡度 25° 以上耕地转化为林地，导致研究区径流量略有减少，青衣江、大渡河、岷江、沱江分别减少 0.04%、0.12%、0.09%、0.05%，可见林地相对于耕地具有截留作用，主要是由于耕地变为林地，植被增加，流域蒸散发加强，绿水量增加，蓝水量必然减少，因此径流量减少，而研究区坡度 25° 以上耕地主要集中在大渡河流域，因此研究区内大渡河径流量减少最大；（2）情景 12 将研究区坡度 15°~25° 之间的耕地转化为草地，也导致研究区径流量减少，青

衣江、大渡河、岷江、沱江径流量分别减少 0.26%、0.19%、0.30%、0.17%，可见草地相对于耕地也具有截流作用。主要原因是相对于耕地而言，草地提高了土壤的涵养水源能力，减少了产汇流，研究区内岷江径流量减少最大，主要是由研究区坡度 15°~25° 之间的耕地主要集中在岷江流域引起的；（3）情景 13 将研究区全部林地转化为草地，导致研究区青衣江、大渡河、岷江、沱江径流量分别增加 0.48%、1.81%、1.11%、0.43%，可见草地相对于林地具有增流作用，这种增流作用是由林地的冠层截留以及林地蒸散发能力大于草地而引起，其中，大渡河增流最大，主要原因是研究区林地主要分布在大渡河流域。这与祖拜代·木依布拉等^[23]、窦小东等^[29] 的研究结果一致，林地相对于耕地具有截留作用，草地

表 9 研究区各子流域气候变化情景模拟结果

子流域	情景	气温变化/℃	降雨量变化/%	年均径流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	径流量变化率/%
青衣江	基准期			358.61	
	情景 5		+20	453.46	+26.45
	情景 6		+10	395.98	+10.42
	情景 7		-10	321.71	-10.29
	情景 8		-20	278.46	-22.35
	情景 9	+2.0		325.76	-9.16
	情景 10	+1.5		330.96	-7.71
	基准期			697.02	
	情景 5		+20	959.09	+37.60
	情景 6		+10	799.96	+14.77
大渡河	情景 7		-10	603.83	-13.37
	情景 8		-20	520.04	-25.39
	情景 9	+2.0		603.34	-13.44
	情景 10	+1.5		623.41	-10.56
	基准期			670.54	
	情景 5		+20	904.23	+34.85
	情景 6		+10	758.05	+13.05
	情景 7		-10	584.64	-12.81
	情景 8		-20	515.38	-23.14
	情景 9	+2.0		581.56	-13.27
岷江	情景 10	+1.5		600.21	-10.49
	基准期			426.17	
	情景 5		+20	558.33	+31.01
	情景 6		+10	478.97	+12.39
	情景 7		-10	382.41	-10.27
	情景 8		-20	323.46	-24.10
	情景 9	+2.0		375.67	-11.85
	情景 10	+1.5		386.37	-9.34

表 10 研究区各子流域土地利用类型变化情景模拟结果

子流域	情景	年均径流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	径流量变化率/%
青衣江	基准期	358.61	
	情景 11	358.47	-0.04
	情景 12	357.68	-0.26
	情景 13	360.31	+0.48
大渡河	基准期	697.02	
	情景 11	696.19	-0.12
	情景 12	695.72	-0.19
	情景 13	709.57	+1.81
岷江	基准期	670.54	
	情景 11	669.97	-0.09
	情景 12	668.53	-0.30
	情景 13	678.03	+1.11
沱江	基准期	426.17	
	情景 11	425.95	-0.05
	情景 12	425.46	-0.17
	情景 13	427.99	+0.43

相对于耕地也具有截流作用,而草地相对于林地具有增流作用。

5 结论与建议

5.1 结论

本研究以岷沱江流域为研究区,基于 SWAT 模型,利用情景分析的方法,定量分析了研究区土地利用和气候变化对径流量的影响,结果表明:

(1)SWAT 模型在岷沱江流域适用性较好,可用模型模拟流域径流。

(2)1981-2014 年间岷沱江流域内的气候和土地利用变化均引起径流量减少,气候和土地利用变化分别对流域内大渡河和沱江径流量影响最大。其中,气候变化对径流量的影响程度较土地利用变化强,岷沱江流域径流量变化由气候变化主导。

(3)以 1981-2014 年气象数据为基础,仅考虑气候变化,岷沱江流域径流量与降雨量呈正相关,与气温呈负相关。气候变化对流域内大渡河径流量影响最大。

(4)仅考虑土地利用变化,将岷沱江流域坡度 25°以上耕地转化为林地和坡度 15~25°之间的耕地转化为草地,均会引起流域径流量减少,分别对流域内大渡河和岷江径流量影响最大,而将流域全部林地转化为草地则会导致流域径流量增加,大渡河径流量增加最大。林地和草地相对于耕地而言有截流作用,草地相对于林地有增流作用。

5.2 建议

气候和土地利用变化情景下,从青衣江、大渡河流域向岷江、沱江流域引调水具有必要性和可行性。针对研究区岷江和沱江流域水资源开发利用率达到 55% 和 40%,水资源生态环境压力大等问题,通过“引大青济岷”水系连通工程,连接大渡河、青衣江与岷江、沱江,丰水年主要从大渡河引水至岷江和沱江,枯水年主要从青衣江引水至岷江和沱江,可从根本上解决岷江和沱江生态环境用水不足的问题。

参考文献:

[1] NIAN Yanyan, LI Xin, ZHOU Jian, et al. Impact of land use change on water resource allocation in the middle reaches of the Heihe River Basin in northwestern China[J]. Journal of Arid Land, 2014, 6(3): 273-286.

[2] 黄斌斌,郝成元,李若男,等. 气候变化及人类活动对地表径流改变的贡献率及其量化方法研究进展[J]. 自然资源学报,2018,33(5):899-910.

[3] 张成凤,杨晓甜,刘酌希,等. 气候变化和土地利用变化

- 对水文过程影响研究进展[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2019, 40(4): 46-50.
- [4] YANG Linshan, FENG Qi, YIN Zhenliang, et al. Identifying separate impacts of climate and land use/cover change on hydrological processes in upper stream of Heihe River, Northwest China[J]. *Hydrological Processes*, 2017, 31(5): 1100-1112.
- [5] 林怡彤. 基于 SWAT 模型的土地利用变化对流域径流的影响研究[D]. 南宁: 广西大学, 2018.
- [6] 杨满根, 陈星. 气候变化对淮河流域中上游汛期极端流量影响的 SWAT 模拟[J]. *生态学报*, 2017, 37(23): 8107-8116.
- [7] 杨沫霞, 马文林, 张质明, 等. 土地利用变化和气候变化对温榆河上游流域径流变化的影响[J]. *南水北调与水利科技*, 2018, 16(3): 72-78.
- [8] YANG Wenting, LONG Di, BAI Peng. Impacts of future land cover and climate changes on runoff in the mostly afforested river basin in North China[J]. *Journal of Hydrology*, 2019, 570: 201-219.
- [9] 罗开盛, 陶福祿. 黑河径流对 LUCC 和气候变化的敏感性分析[J]. *干旱区研究*, 2018, 35(4): 753-760.
- [10] 王莺, 张强, 王劲松, 等. 基于分布式水文模型(SWAT)的土地利用和气候变化对洮河流域水文影响特征[J]. *中国沙漠*, 2017, 37(1): 175-185.
- [11] 郭军庭, 张志强, 王盛萍, 等. 应用 SWAT 模型研究潮河流域土地利用和气候变化对径流的影响[J]. *生态学报*, 2014, 34(6): 1559-1567.
- [12] SUN Fubao, XIA Jun, LIU Wenbin, et al. Impact of LUCC on streamflow based on the SWAT model over the Wei River Basin on the Loess Plateau in China[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2017, 21(4): 1929-1945.
- [13] 冯畅, 毛德华, 周慧, 等. 气候与土地利用变化对涟河流域径流的影响[J]. *冰川冻土*, 2017, 39(2): 395-406.
- [14] 黄锋华, 黄本胜, 邱静, 等. 气候变化对北江流域径流影响的模拟研究[J]. *水利水电技术*, 2018, 49(1): 23-28.
- [15] 林娴, 陈晓宏, 何艳虎, 等. 气候变化和人类活动对武江流域年径流及最大日流量影响的定量分析[J]. *自然资源学报*, 2018, 33(5): 828-839.
- [16] 黎云云, 畅建霞, 金文婷, 等. 基于 SWAT 模型的渭河流域分区径流模拟研究[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2017, 45(4): 204-212.
- [17] 汪嘉杨, 郭倩, 王卓. 岷沱江流域社会经济的水环境效应评估研究[J]. *环境科学学报*, 2017, 37(4): 1564-1572.
- [18] 周君华, 尹铎皓, 范云鹤, 等. 基于 Budyko 假设的岷江流域实际蒸散模拟研究[J]. *灌溉排水学报*, 2017, 36(1): 107-112.
- [19] 胡芸芸, 王永东, 李廷轩, 等. 沱江流域农业面源污染排放特征解析[J]. *中国农业科学*, 2015, 48(18): 3654-3665.
- [20] 杨耿. 岷江及沱江水系磷形态分布特征研究[D]. 北京: 中国环境科学研究院, 2018.
- [21] 杨梦林. 变化环境下大汶河流域径流响应研究[D]. 济南: 济南大学, 2017.
- [22] 朱会义, 李秀彬. 关于区域土地利用变化指数模型方法的讨论[J]. *地理学报*, 2003, 58(5): 643-650.
- [23] 祖拜代·木依布拉, 师庆东, 普拉提·莫合塔尔, 等. 基于 SWAT 模型的乌鲁木齐河上游土地利用和气候变化对径流的影响[J]. *生态学报*, 2018, 38(14): 5149-5157.
- [24] WANG Dandan, YU Xinxiao, JIA Guodong, et al. Sensitivity analysis of runoff to climate variability and land-use changes in the Haihe Basin mountainous area of North China[J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2019, 269: 193-203.
- [25] 李帅, 魏虹, 刘媛, 等. 气候与土地利用变化下宁夏清水河流域径流模拟[J]. *生态学报*, 2017, 37(4): 1252-1260.
- [26] THAVHANA M P, SAVAGE M J, MOELETSI M E. SWAT model uncertainty analysis, calibration and validation for runoff simulation in the Luvuvhu River catchment, South Africa[J]. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 2018, 105: 115-124.
- [27] 袁宇志, 张正栋, 蒙金华. 基于 SWAT 模型的流溪河流域土地利用与气候变化对径流的影响[J]. *应用生态学报*, 2015, 26(4): 989-998.
- [28] 姚磊, 陈盼盼, 胡利利, 等. 长江上游流域水电开发现状与存在的问题[J]. *绵阳师范学院学报*, 2016, 35(2): 91-97.
- [29] 窦小东, 黄纬, 易琦, 等. LUCC 及气候变化对龙川江流域径流的影响[J]. *生态环境学报*, 2019, 28(1): 7-15.