

土地利用和气候变化对嘉陵江流域水文特征的影响

王 莺^{1,2}, 王劲松¹, 武 明³, 王素萍¹

(1. 中国气象局 兰州干旱气象研究所, 甘肃省干旱气候变化与减灾重点实验室

中国气象局干旱气候变化与减灾重点开放实验室, 兰州 730020;

2. 兰州大学 大气科学学院, 兰州 730000; 3. 兰州工业学院 材料工程学院, 兰州 730050)

摘 要:以嘉陵江流域为研究区,通过模型校准与验证得到适宜于该流域的 SWAT 模型,在综合考虑土地利用和气候变化特征的基础上构建多种情景模式,模拟了不同情景下的主要水文要素。结果表明:(1) 1985—2005 年,流域林地减少,城镇和农村居民用地增加;草地和工业用地在上游减少,中下游地区增加;耕地在上游增加,中下游地区减少。流域总体呈暖干化趋势,上游地区水热条件的变化较中下游地区大。(2) 与 1976—1995 年相比,土地利用和气候变化共同作用使地表径流增加,地下径流、土壤含水量、壤中流、实际蒸散发和产水量减少。其中,气候变化对流域水文过程的影响大于土地利用变化。林草地具有明显的水土保持作用,耕地在水土保持和水源涵养方面呈负贡献。RCP 8.5 情景下年平均产水量较 RCP 4.5 情景高,但长期来看,RCP 4.5 情景对降低地表径流和实际蒸散发,增加地下径流、壤中流和产水量的作用优于 RCP 8.5。(3) 土地利用和气候变化对流域地表径流的影响较大,对中下游的影响大于对上游的影响。

关键词:SWAT 模型;土地利用;气候变化;嘉陵江;水文特征

中图分类号:F301.24; P344

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2019)01-0135-08

Impacts of the Land Use and Climate Changes on the Hydrological Characteristics of Jialing River Basin

WANG Ying^{1,2}, WANG Jinsong¹, WU Ming³, WANG Suping¹

(1. Key Laboratory of Arid Climatic Change and Reducing Disaster of Gansu Province, Key Open Laboratory of Arid Change and Disaster Reduction of CMA, Institute of Arid Meteorology, China Meteorological Administration, Lanzhou 730020, China; 2. College of Atmospheric Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China;

3. School of Materials and Engineering, Lanzhou Institute of Technology, Lanzhou 730050, China)

Abstract: Taking Jialing River Basin as the research area, we got a suitable model by calibrating distributed hydrological model SWAT (Soil and Water Assessment Tool), constructed scenarios based on comprehensive consideration of variation characteristics of Land use and climate changes, and simulated the hydrological factors and discussed the hydrological response in different scenarios at basin scale. The results showed that: (1) between 1985 and 2005, the forestland area decreased, urban and rural residential land area increased; grassland and industrial land area decreased in the upper reaches and increased in the middle and lower reaches; cultivated land area increased in the upper reaches and decreased in the middle and lower reaches; The whole basin was warm and dry, and the change of water and heat conditions in the upper reaches was larger than that in the middle and lower reaches; (2) compared with the data in the period from 1976 to 1995, the joint action of land use and climate change increased surface runoff, and decreased groundwater runoff, soil water content, interflow, actual evapotranspiration and water yield; the impact of climate change on hydrological process was greater than that of land use change; forestland and grassland had obvious function of soil and water conservation, and farmland had negative contribution to soil and water conservation; the water

yield under the RCP 8.5 scenario was higher than RCP 4.5 scenario; but in the long term, the climatic conditions of RCP 4.5 is superior to RCP 8.5 in reducing surface runoff and actual evapotranspiration, and increasing groundwater runoff, interflow and water yield; (3) land use and climate change had the greater impact on the surface runoff, which was more significant in the middle and lower reaches than that in the upper reaches in this basin.

Keywords: SWAT model; land use; climate change; Jialing River; hydrological characteristics

气候变化和人类活动对流域水资源的影响是适应性流域管理的基础^[1]。在长时间尺度下,气候变化是影响流域水文过程的主要原因。IPCC 第一工作组第五次评估报告指出,近 60 a 来全球平均地表温度升温速率大约为 0.12 °C/10 a。中国气候变化趋势同全球基本一致。根据《中国气候变化监测公报》指出,1951—2015 年,中国年平均地表温度呈显著上升趋势,但区域差异较大,北方较南方增温速率更加明显,西部较东部更加突出。这些变化极大地改变了大气降水的时空分布格局,使流域水文循环和区域水资源分布发生变化。但在较短时间尺度下,人类活动可驱动流域土地利用/覆被发生变化,改变地表性状,进而影响流域水文循环过程,增加水文要素时空分异的复杂性和不确定性,破坏流域水量平衡,导致生态退化,制约社会经济的可持续发展。

土地利用和气候变化对流域水文过程影响的定量研究方法主要有对比流域试验法、统计分析法和模型模拟法。对比流域法有利于揭示植被—土壤—大气相互作用机理,但研究周期长,且一般应用于小流域,因此具有明显的局限性。统计分析法计算比较容易,但对资料的时序要求较高,且这种方法缺乏机理基础。模型模拟法是将自然界中的复杂水文现象进行简化,使用数学模型概化气候—人类活动—水资源之间的关系。较早出现的是集总式水文模型,如 HBV 模型和 SSARR 模型。后来发展出了半分布式或分布式水文模型,SWAT(Soil Water Assessment Tool)是其中应用较广的模型^[2]。该模型由美国农业部于 1990s 开发,以水循环的物理过程为基础,考虑了流域的空间异质性特征,具有先进的模型结构。用户可根据研究目的构建模拟情景,获得流域土地利用和气候变化的水文过程响应特征^[3-5]。

嘉陵江是长江第二大支流。截至 2005 年底,该流域内总人口约 2 855.42 万人,国民生产总值约 1 118.12 亿元。嘉陵江流域是主要的粮油产区,且其间分布大量的自然保护区,因此水资源问题是该流域的主要问题。从气候变化来看,嘉陵江流域的年平均气温呈增加趋势,年降水量和径流量呈减小趋势^[6]。同时,由于人类活动的干预,出现了一系列社会问题。例如,

人类剧烈的开发活动造成大量优质耕地退化,城镇化速率加快,林草地破坏严重,土地开发利用程度进一步加深^[7]。这些变化影响了嘉陵江流域的水资源平衡。因此,土地利用和气候变化如何影响嘉陵江流域的水文过程就成了流域管理和规划的重要问题之一。近年来对该流域的研究主要集中在气候变化^[8]、土地利用变化^[7]、水资源变化^[9]等方面。有学者研究了流域的干旱化趋势,发现整体呈干旱增加趋势,特别是流域的西部和北部^[10]。齐师杰等^[7]探讨了流域土地利用/覆被变化特征及其驱动力,发现土地利用类型转移的主要方向是耕地、林地和草地之间的转化。孙一萌等^[11]研究了嘉陵江流域实际蒸散发对气候及土地利用变化的响应,发现流域实际蒸散发主要受下垫面因素变化的影响。目前,对于土地利用和气候变化对嘉陵江流域水文过程影响的研究还鲜见报导,因此,本文基于 SWAT 模型构建嘉陵江流域分布式水文模拟系统,获得二者对流域主要水文要素的贡献度,并由土地利用和气候变化特征设计不同情景,通过模拟不同情景的水文过程分析二者对水文要素的影响特征,为适应性流域规划管理提供理论依据。

1 研究区概况

嘉陵江流域(102.59°—109.02°E,29.29°—34.47°N)发源于秦岭北麓的陕西省代王山,干流流经甘肃省、陕西省、四川省和重庆市,主要支流有八渡河、西汉水、白龙江、渠江和涪江等,全长约 1 345 km(图 1)。嘉陵江昭化以上为上游,属于山区河流,水量丰富,自然比降大;昭化至合川为中游,河道逐渐开阔,属盆地;合川至重庆段为下游,形成峡谷河段,地势复上升为山区地形。主要土壤类型为黄壤土、紫色土和水稻土等。流域主要地区位于亚热带湿润季风气候带,四季分明。多年平均最高和最低气温分别为 19.4 °C 和 4.3 °C。年降水量主要集中在 5—10 月,略阳以上山区约 600~800 mm,中下游丘陵区约 1 000 mm。流域年蒸发能力为 800~900 mm。多年平均径流量约 700 亿 m³。在这样的自然环境下,嘉陵江流域水土流失严重,是长江上游重点产沙区。流域主要的作物为冬小麦、玉米、水稻、土豆和油菜等。

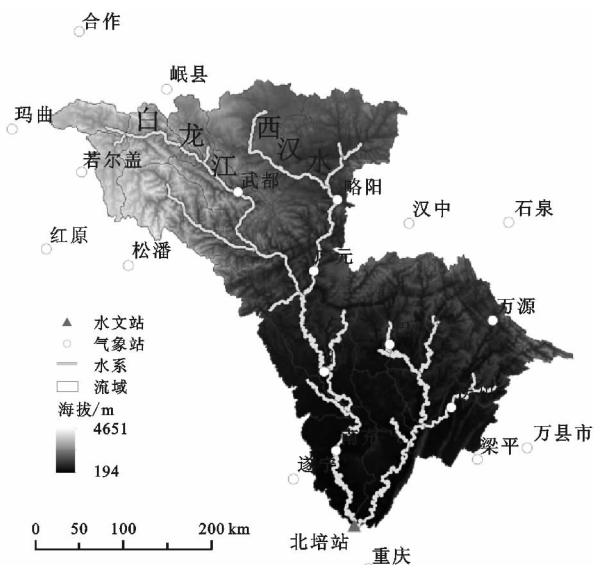


图 1 研究区地理位置示意图

2 资料与方法

2.1 模型介绍

SWAT 模型^[2]属于大中尺度流域模型,其优点在于可模拟无观测数据的流域,以及量化输入参数对水质或其他变量的相对影响。模型基于物理机制,其水文建模主要分为陆地水文循环阶段和汇流演算阶段,而水量平衡始终是流域内所有过程的驱动力,表达式如下:

$$S_{w_t} = S_{w_0} + \sum_{i=1}^t (R_{\text{day}} - Q_{\text{surf}} - E_a - W_{\text{seep}} - Q_{\text{gw}}) \quad (1)$$

式中: S_{w_t} 为土壤最终含水量(mm); S_{w_0} 为第 i 天的土壤初始含水量(mm); t 为时间步长(d); R_{day} 为第 i 天降水量(mm); Q_{surf} 为第 i 天地表径流量(mm); Q_{gw} 表示第 i 天回归流的水量(mm); E_a 为第 i 天蒸散量(mm); W_{seep} 为第 i 天从土壤剖面进入包气带的水量(mm)。

SWAT 模型以数字高程模型为基础,结合土地利用/覆被数据和土壤数据将全流域划分为若干水文响应单元(Hydrologic Response Units, HRU),最后基于传统概念模型对 HRU 做汇流演算,得到出口断面总径流。

2.2 数据来源

(1) 地面气象数据:1976—2014 年嘉陵江流域及其周边 20 个气象站点(图 1)逐日最高和最低气温($^{\circ}\text{C}$)、降水量(mm)、日照时数(h)、平均风速(m/s)和相对湿度($\%$)数据来源于国家气象科学数据共享服务平台(<http://data.cma.cn/>)。太阳辐射数据由儒略日、纬度、海拔和日照时数等来计算,具体计算方法见文献^[12]。

(2) 区域气候模式数据:RCPs(Representative Concentration Pathways)为 IPCC 第五次评估报告

中采用的新一代情景(RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 6 和 RCP 8.5)^[13]。这些情景被广泛应用于气候建模。其中 RCP 4.5 是指辐射强度稳定在 4.5 W/m^2 , 2100 年后 CO_2 当量浓度稳定在约 650 ml/m^3 ; RCP 8.5 是指辐射强度上升至 8.5 W/m^2 , 2100 年后 CO_2 当量浓度达到约 1370 ml/m^3 。收集 2020—2049 年由 RegCM 4.0 区域模式计算得到的 RCP 4.5 和 RCP 8.5 情景下的逐日最高和最低气温($^{\circ}\text{C}$)、降水量(mm)、平均风速(m/s)和相对湿度($\%$)数据。数据来源于国家气候中心。数据水平分辨率为 0.5° 。

(3) 地理信息数据:SRTM (Shuttle Radar Topographic Mission) 90 m 数字高程(Digital Elevation Model, DEM)数据来源于 <http://srtm.csi.cgiar.org/>。全国土地利用数据(1 km 分辨率)(1985 年和 2005 年)由中国科学院资源环境科学数据中心提供。HWSD(Harmonized World Soil Database)嘉陵江流域土壤质地数据集由“黑河计划数据管理中心”(http://westdc.westgis.ac.cn)提供。

(4) 水文资料:嘉陵江流域北碚站($103^{\circ}34'\text{E}$, $35^{\circ}48'\text{N}$)水文资料来源于《中华人民共和国水文年鉴》第 6 卷第 9 册。

2.3 数据预处理

2.3.1 气象数据 根据 SWAT 模型要求,将收集到的研究区逐日气象资料和计算得到的太阳辐射数据以 DBF 格式存储。

2.3.2 土地利用数据 SWAT 模型中采用的土地利用分类系统是基于美国国家地质调查局(United States Geological Survey, USGS)的土地利用分类标准建立的,并以 4 个英文字母为代码与模型附带数据库关联。中国的土地利用分类系统以数字为代码。因此,要想获得可被 SWAT 模型读取的土地利用数据,就必须建立与中国土地利用分类系统对应的英文字母代码索引文件。具体分类和代码见表 1。

2.3.3 土壤数据 SWAT 模型中的土壤数据库采用 USDA(U. S. Department of Agriculture)简化的美制标准,所需参数主要为土层厚度(mm)、土壤粒径级配(%wt.)、土壤容重(g/cm^3)、土壤有机碳含量(%wt.)、土壤饱和导水率(mm/h)、有效土壤田间持水量(%Vol)和根系深度(mm)等。应用 HWSD 数据在 SPAW(Soil-Plant-Atmosphere-Water)模型中得到土壤数据库所需的主要参数。查阅《土壤发生与系统分类》等资料获得根系深度、土层厚度等数据。

2.4 模型敏感性分析、校准与验证

SWAT 模型中水文建模需要 26 个参数。各参数对流量过程的敏感性随流域不同而发生变化。有

的参数发生细微变化就会对模拟结果产生很大影响,有的参数则对结果影响很小。在模型校准前需要先对参数进行敏感性分析,重点校准对模拟结果影响程度大的参数。本研究选用 LH-OAT 方法。根据各参数敏感性值将其分为 4 个敏感性等级(表 2)。

表 1 嘉陵江流域土地利用分类对照表

编码	土地利用类型	SWAT 代码	编码	土地利用类型	SWAT 代码
21	有林地	FRST	53	其他建设用地	UIDU
22	灌木林地		62	戈壁	BARE
23	其他林地		65	裸土	
24	疏林地		66	裸岩	
31	高覆盖度草地	PAST	67	未利用地	
32	中覆盖度草地		64	沼泽	WETL
33	低覆盖度草地		111	山地水田	AGRL
41	河渠	WATR	112	丘陵水田	
42	湖泊		113	平原水田	
43	水库、坑塘		121	山地旱地	
46	滩涂		122	丘陵旱地	
51	城镇	URBN	123	平原旱地	
52	农村居民点	URLD	124	>25°坡地旱地	

表 2 SWAT 模型参数敏感性分级表

类别	敏感性值	敏感性分级
I	[0.00,0.05)	低
II	[0.05,0.20)	中
III	[0.20,1.00)	高
IV	[1.00,∞)	很高

SWAT 模型校准主要包括自动校准和手动校准两种方法。自动校准的结果比较稳定,但计算需要耗费大量时间,因此本研究选择手动校准进行参数率定。参数率定时需了解各参数是如何参与并影响水文循环过程,遵循先调整水量平衡,再调整过程的原则,进行有目的的参数微调。

SWAT 模型的模拟精度由相对误差 R_e 、线性回归方程相关系数 R^2 和 Nash-Suttcliffe 系数 E_{ns} 验证。具体公式如下:

$$R_e = \frac{\sum_{i=1}^n P_i - \sum_{i=1}^n Q_i}{\sum_{i=1}^n Q_i} \times 100\% \quad (2)$$

$$R^2 = \frac{[\sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q})(P_i - \bar{P})]^2}{\sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q})^2 \sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2} \quad (3)$$

$$E_{ns} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q})^2} \quad (4)$$

式中: Q_i 和 P_i 分别是实测值和模拟值; \bar{Q} 和 \bar{P} 分别是实测值和模拟值的平均值; n 为实测值的个数。 R^2 越接近 1, $|R_e|$ 越小, E_{ns} 越大,说明模型的模拟效果

越好;当 $R^2 > 0.6$, $|R_e| < 20\%$, $E_{ns} > 0.5$,模型模拟结果可以被接受。

2.5 情景设置与模型分析

设置 3 种模拟情景,定量分析土地利用和气候变化对嘉陵江流域水文特征的影响(表 3)。情景 1 为基准期;情景 2 与情景 1 的差值代表土地利用和气候变化共同作用对产流量的影响;情景 3 与情景 1 的差值代表气候变化对产流量的影响;情景 2 与情景 3 的差值代表土地利用变化对产流量的影响。

表 3 模拟情景设置

情景	土地利用	气象数据
1	1985 年	1976—1995 年
2	2005 年	1996—2014 年
3	1985 年	1996—2014 年

土地利用/覆被变化的水文效应情景分析法通常有参照对比法、模型预测法、历史反演法、土地利用空间配置法和极端土地利用法。为了理解不同土地利用类型对水文要素的影响,研究中应用极端土地利用法,即以 1985 年土地利用为基准期,假设流域内除水域所在区域外土地利用类型全部为林地、草地和耕地,模拟这 3 种极端土地利用情景下嘉陵江流域主要水文要素变化过程。

为了分析气候变化对流域水文特征的影响,在 RCP 4.5 和 RCP 8.5 两种情景下,采用区域气候模式数据模拟嘉陵江流域 2020—2049 年的主要水文要素,并分析其变化特征。

3 结果与分析

3.1 模型敏感性分析、校准与验证

根据水文气候条件的相似性和实测径流数据的可获取性,以 1985 年的土地利用作为输入数据,1976—1983 年作为模型校准期,进行径流参数率定。采用率定后的参数,以 2005 年的土地利用作为输入数据,2007—2012 年作为模型验证期。

通过 LH-OAT 计算,得到 SWAT 模型水文模拟中涉及的 26 个参数的敏感度,并由表 1 得各参数的敏感性等级(表 4)。将分类等级为 II 和 III 的参数进行调参。

与嘉陵江流域出水口北培站的月径流实测数据做对比,模型校准前, R^2 , R_e 和 E_{ns} 分别为 0.91, -19.37% 和 0.85;模型校准后, R^2 , R_e 和 E_{ns} 分别达到 0.95, 9.87% 和 0.93。由此可见,模型校准明显提升了 SWAT 在嘉陵江流域的模拟能力。从图 2 可以看出,经过校准的模型模拟值与实测值相比,枯水期的模拟值略小于实测值,汛期的模拟效果相对较好。

表 4 SWAT 模型参数敏感性等级

参数	名称	重要性	敏感性值	敏感性等级
Esco	土壤蒸发补偿系数	1	0.540	Ⅲ
Cn2	SCS 径流曲线系数	2	0.454	Ⅲ
Canmx	最大冠层蓄水量	3	0.200	Ⅲ
Gwqmn	浅层地下水径流系数	4	0.135	Ⅱ
Sol_Awc	土壤可利用水量	5	0.132	Ⅱ
Sol_Z	土层深度	6	0.121	Ⅱ
Revapmn	浅层地下水再蒸发系数	7	0.086	Ⅱ
Sol_K	土壤饱和导水率	8	0.064	Ⅱ
Slope	坡度	9	0.061	Ⅱ
Gw_Revap	地下水再蒸发系数	10	0.054	Ⅱ

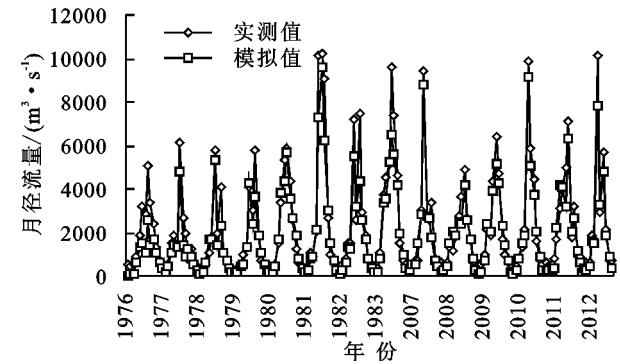


图 2 水文站月径流量模拟值与实测值对比

3.2 土地利用和气候变化特征

通过对比 1985 年、2005 年两期土地利用/覆被数据,获得嘉陵江流域 1985—2005 年土地利用/覆被变化的总体情况。从表 5 中可以看出,流域主要土地利用/覆被类型为耕地、林地和草地,它们之间的相互转化是流域土地利用/覆被变化的主要方式。自 1985—2005 年,耕地和林地面积呈减少趋势,平均每年减少 3.19 km²,19.14 km²;相应的,草地呈增加趋势,平均每年增加 12.19 km²。城镇和农村居民点面积呈增加趋势,增加速率分别为 2.81 km²/a 和 0.62 km²/a。此外,水域、工业用地和未利用地均有增加。分区域来看,嘉陵江上游地区林地和草地分别减少了 167 km²,7 km²,耕地、城镇居民点和农村居民点分别增加了 71 km²,24 km²,5 km²;嘉陵江中下游地区林地和耕地分别减少了 232 km²,174 km²,草地、城镇居民点、农村居民点和工业用地分别增加了 307 km²,33 km²,8 km²,26 km²。总的来说,嘉陵江流域林地减少,城镇和农村居民用地增加;草地和工业用地在上游稍有减少,中下游地区明显增加;耕地面积在上游增加,中下游地区减少。

嘉陵江流域 1976—2014 年的年平均气温为 12.40℃,年平均降水量为 893.18 mm。从图 3 可以看出,46 a 间流域年平均降水量呈微弱下降趋势,下降速率为 1.64 mm/

10 a;年平均温度呈上升趋势,上升速率为 0.25 ℃/10 a,尤其在 90 年代之后,升温速率达到 0.35 ℃/10 a。分区域来看,上游年平均气温增加速率为 0.32 ℃/10 a,年平均降水量降低速率为 3.28 mm/10 a;中下游地区年平均气温增加速率为 0.15 ℃/10 a,年平均降水量增加速率为 0.36 mm/10 a。以上数据说明,嘉陵江流域水热条件在研究时段内发生了较明显变化,总体呈暖干化趋势,上游地区的变化较中下游地区大。

表 5 嘉陵江流域土地利用变化情况

土地利用	面积/km ²		1985—2005 年	
	1985 年	2005 年	变化 总量/km ²	年变 化量/km ²
耕地	48293	48226	-67	-3.19
林地	38700	38298	-402	-19.14
草地	30703	30959	256	12.19
水域	943	1049	106	5.05
湿地	8	8	0	0
城镇	113	172	59	2.81
农村	508	521	13	0.62
工业用地	35	60	25	1.19
未利用地	442	452	10	0.48

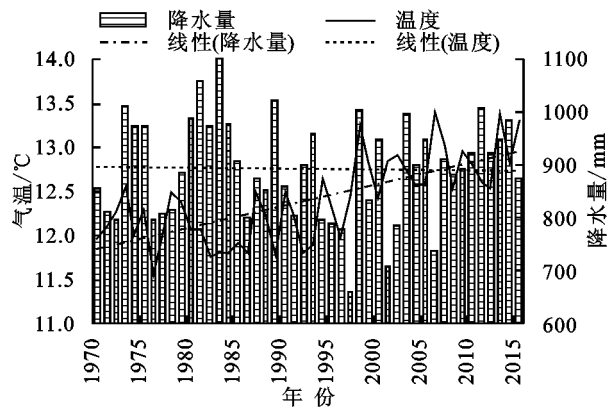


图 3 嘉陵江流域气温和降水年际变化

3.3 情景分析

根据情景设计,使用经过校准验证的 SWAT 模型定量研究土地利用和气候变化对嘉陵江流域水文过程的影响。利用情景 1,2,3 的模拟结果,基于 2.5 中描述的方法可知(表 6),土地利用和气候变化共同作用导致地表径流增加了 5.12 mm,地下径流、土壤含水量、壤中流、实际蒸散发和产水量分别减少了 1.49,0.20,5.30,21.61,2.16 mm。其中,土地利用作用下地下径流、土壤含水量和产水量分别增加了 0.10,0.02,0.04 mm,地表径流、壤中流和实际蒸散发分别减少了 0.03,0.03,0.05 mm;气候变化令地表径流增加了 5.15 mm,地下径流、壤中流、土壤含水量、实际蒸散发和产水量分别减少了 1.60,5.26,0.23,21.56,2.20 mm。从贡献率来看(图 4),除壤

中流和实际蒸散发外,土地利用对其他水文要素的影响表现为负贡献;气候变化对主要水文要素的影响全部表现为正贡献。定量来看,气候变化对研究区水文过程的影响大于土地利用变化,主要原因是气候变化对水文循环表现为长时间、大范围的直接影响,而土地利用变化则是短时间、小范围的间接影响。从流域管理的角度来看,气候变化是一个长期且很难管理和预测的过程,而土地利用变化则可以根据其自身特点和水资源管理目标统筹流域管理,在一定程度上减缓由于气候变化对流域水文过程造成的影响。

表 6 不同情景下嘉陵江流域水文要素模拟结果

情景	地表 径流量	地下 径流量	土壤 含水量	壤中流	实际 蒸散发	产水量
	mm					
1	168.23	157.82	81.12	138.11	414.71	458.41
2	173.35	156.32	80.91	132.81	393.10	456.26
3	173.38	156.22	80.89	132.84	393.15	456.21

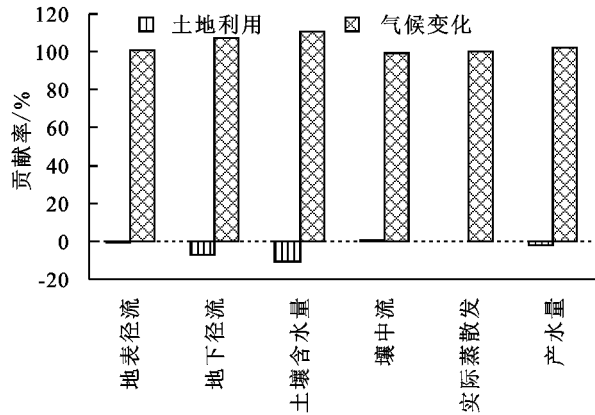


图 4 嘉陵江流域土地利用和气候变化对水文过程的贡献率

以 1985 年土地利用情景为基准,分析土地利用变化对嘉陵江流域水文过程的影响。根据 2.5 的情景设计,对比了极端情况下主导景观(林地、草地和耕地)的水文变化情况。从 CN 值的面积权重平均值来看,林地、草地和耕地情景分别为 63.47,71.68,78.62。从变化率来看(图 5),林地可使地表径流和实际蒸散发降低 32.7%和 27.6%,地下径流、土壤含水量和壤中流增加 75.9%,7.6%和 23.9%,从而增加流域产水量 21.6%。草地也可以降低地表径流,增加地下径流,但程度较林地低。另外,草地可降低土壤含水量和壤中流,增加实际蒸散发,令流域产水量降低。耕地和林地相反,可增加地表径流(11.5%)和实际蒸散发(5.3%),降低地下径流(34.7%)、土壤含水量(3.5%)、壤中流(19.0%)和产水量(11.3%)。由以上分析可知,林地和草地可起到明显的水土保持作用,林地在水源涵养方面呈正贡献,耕地在水土保持和水源涵养方面呈负贡献。不少学者在不同流域

的研究中也得到了相似的结论。王学等^[14]在白马河流域的研究发现,林地、灌木林地和疏林地有促进产流的作用。王根绪^[15]等发现,耕地导致马营河流域年产水量减少了 28.12%。由此可见,在未来流域管理中应根据土地利用对流域水文过程的影响特征,合理布局,增加出水量,维持流域生态环境和社会经济的稳定发展。

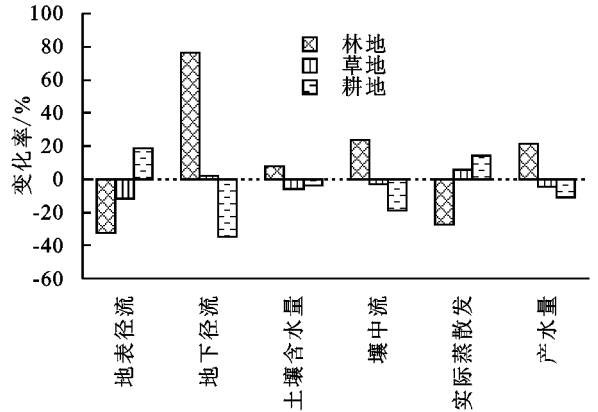


图 5 与 1985 年相比极端土地利用情景下水文要素变化情况

选用 RegCM 4.0 区域模式 RCP 4.5 和 RCP 8.5 两种情景,分析气候变化对嘉陵江流域 2020—2049 年水文过程的影响。RCP 8.5 情景下的年平均气温和降水量分别比 RCP 4.5 情景高 2.26%和 0.71%。RCP 8.5 情景下的年平均地表径流、地下径流、壤中流、实际蒸散发和产水量分别比 RCP 4.5 情景高 6.21%,1.07%,1.17%,0.49%和 1.68%,年平均土壤含水量比 RCP 4.5 低 0.25%。从长期变化趋势来看,RCP 4.5 情景下地表径流、土壤含水量和实际蒸散发在未来 30 a 呈降低趋势,地下径流、壤中流和产水量呈增加趋势;RCP 8.5 情景下地表径流和实际蒸散发在未来 30 a 呈降低趋势,地下径流、土壤含水量、壤中流和产水量呈增加趋势(图 6)。以上结果说明虽然 RCP 8.5 情景下年平均产水量较 RCP 4.5 情景高,但长期来看,RCP 4.5 情景下的气候条件对降低地表径流和实际蒸散发,增加地下径流、壤中流和产水量的作用明显优于 RCP 8.5 情景。从空间分布来看(图 7),RCP 8.5 情景与 RCP 4.5 情景相比,地表径流减少的区域主要位于白龙江流域,其余地区均呈增加趋势;地下径流增加的区域主要位于流域上游,减少的区域主要位于流域中下游地区;实际蒸散发增加的区域主要位于流域中下游地区以及上游白龙江流域右岸。该结果说明在高排放情景下,嘉陵江上游的水资源问题主要是地表径流增加;嘉陵江流域中下游地区的地表径流和实际蒸散发增加,地下径流减少,说明在高排放情景下,嘉陵江流域中下游的水资源问题将愈加严峻。

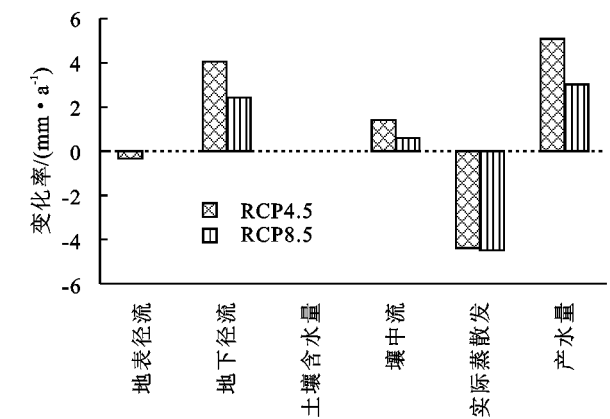


图 6 不同气候情景下主要水文要素变化

3.4 嘉陵江流域主要水文要素的空间分布

模拟 1985 年土地利用情况下 1976—1995 年以及 2005 年土地利用情况下 1996—2014 年的主要水文

要素,通过计算两者的差值,从空间尺度上分析土地利用和气候变化对嘉陵江流域地表径流、地下径流和实际蒸散发的影响。从图 8 中可以看出,土地利用和气候变化对流域地表径流的影响大于地下径流和实际蒸散发,对中下游的影响大于对上游的影响。嘉陵江上游支流白龙江上游、甘陕交界的两当和凤县以及嘉陵江中下游的地表径流增加(图 8A)。地表径流增加地区的面积约占流域总面积的 59%。嘉陵江上游的舟曲、宕昌和若尔盖、甘川交界的青川和平武地区,以及嘉陵江中下游的大部分地区,地下径流增加(图 8B)。地下径流增加地区的面积约占流域总面积的 50%。嘉陵江上游甘陕交界的凤县、徽县和成县以及中下游的旺苍地区实际蒸散发增加(图 8C)。实际蒸散发增加地区的面积约占流域总面积的 14%。

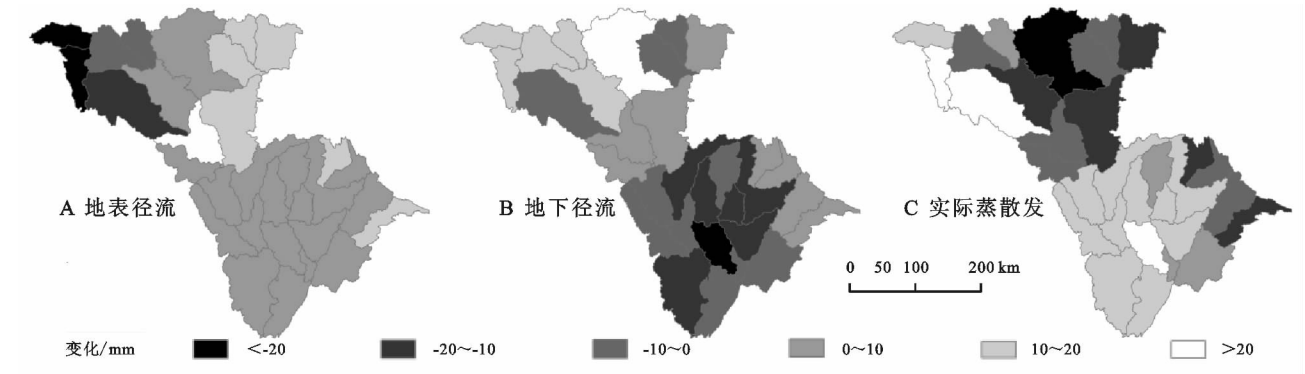


图 7 不同气候情景下主要水文要素变化的空间分布

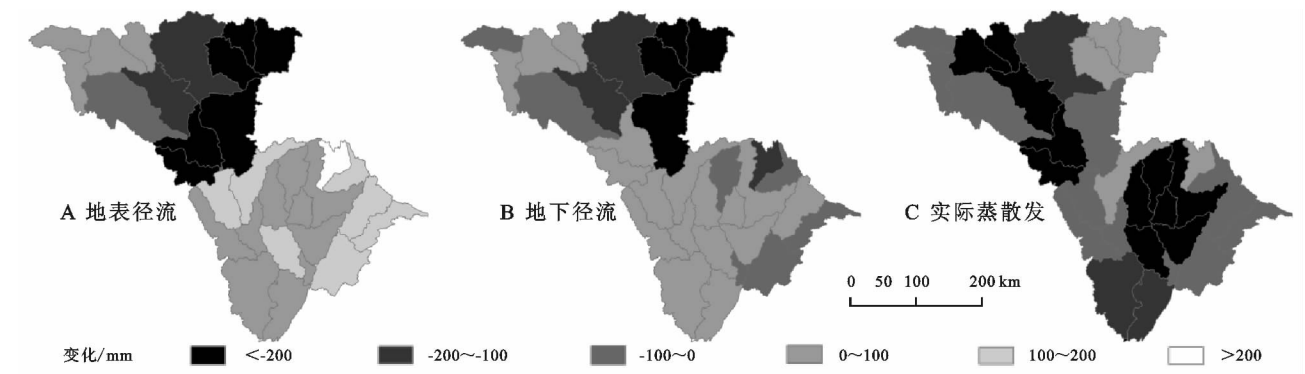


图 8 嘉陵江流域主要水文要素的空间分布

4 结论与讨论

(1) 通过校准与验证,SWAT 模型的 R^2 , R_e 和 E_{ns} 分别达到 0.95,9.87% 和 0.93,可用于嘉陵江流域土地利用和气候变化的水文响应研究。

(2) 嘉陵江流域 1985—2005 年林地面积减少,城镇和农村居民用地面积增加,该现象在中下游地区表现的更加明显;草地和工业用地在上游地区稍有减少,中下游地区明显增加;耕地面积在流域上游增加,中下游地区减少。流域水热条件呈暖干化趋势,上游地区的变化较中下游地区大。

(3) 除壤中流和实际蒸散发外,土地利用对流域其余水文要素表现为负贡献;气候变化对流域主要水文要素表现为正贡献。林地和草地具有明显的水土保持作用;耕地在水土保持和水源涵养方面呈负贡献。RCP 8.5 情景下年平均产水量较 RCP 4.5 情景高 1.7%,但 RCP 4.5 情景下的气候条件对降低地表径流和实际蒸散发,增加地下径流、壤中流和产水量的作用明显优于 RCP 8.5 情景。在高排放情景下,嘉陵江上游的水资源问题主要是地表径流增加;嘉陵江流域中下游地区的主要问题是地表径流和实际蒸散发增加,地下径流减少,

(4) 土地利用和气候变化对嘉陵江流域地表径流的影响大于地下径流和实际蒸散发,对中游的影响大于对上游的影响。

应用 SWAT 模型定量分析土地利用和气候变化对流域水文过程的影响,初步区分了土地利用和气候变化对不同水文要素的贡献程度。研究发现,过去 40 a 来气候变化对嘉陵江流域主要水文要素的变化起主要作用,土地利用变化对其的影响较小。虽然如此,通过调整土地利用类型从而改善流域小尺度水循环状态仍然是流域管理的一个有效手段。从空间分布来看,无论是现在还是未来,嘉陵江流域中下游地区的水资源问题都较上游地区大。从嘉陵江流域经济发展特征来看,上游主要为经济不发达地区,中游为经济欠发达地区,下游为经济较发达和发达地区^[16]。应该根据不同地区的经济发展状态,结合流域自然资源条件,在确保耕地红线的前提下,制定合理的经济政策和水资源管理方案。例如,恢复未利用土地的林草覆盖度,降低城市扩张速度,提高建筑容积率等。

由于资料原因,本研究只选择了流域出水口北培站的月径流数据作为模型校准与验证时的实测值。虽然从北培站的资料来看,SWAT 模型的模拟精度较好,但该流域空间差异很大,使得 SWAT 模型对各 HRU 的模拟能力仍存在一定的可信度问题。在今后的研究中应完善该部分内容。

参考文献:

- [1] Nian Y, Li X, Zhou J, et al. Impact of land use change on water resources allocation in the middle reaches of the Heihe river basin in northwestern China [J]. *Journal of Arid Land*, 2014, 6: 273-286.
- [2] Arnold J, Srinivasan R, Muttiah R S, et al. Large area hydrologic modeling and assessment part I: Model development [J]. *Journal of American Water Resources Association*, 1998, 34(1): 73-89.
- [3] Sun X, Bernard-Jannin L, Garneau C, et al. Improved simulation of river water and groundwater exchange in an alluvial plain using the SWAT model[J]. *Hydrological Processes*, 2016, 30(2): 187-202.
- [4] Krysanova V, Srinivasan R. Assessment of climate and land use change impacts with SWAT [J]. *Regional Environmental Change*, 2015, 15(3): 431-434.
- [5] 王莺,张雷,王劲松. 洮河流域土地利用/覆被变化的水文过程响应[J]. *冰川冻土*, 2016, 38(1): 200-210.
- [6] 曾小凡,叶磊,翟建青,等. 嘉陵江流域极端降水变化及其对水文过程影响的初步研究[J]. *长江流域资源与环境*, 2014, 23(S): 159-164.
- [7] 齐师杰,张兴南,夏达忠,等. 嘉陵江流域土地利用/覆被变化特征及其驱动力分析[J]. *长江科学院院报*, 2013, 30(1): 1-7.
- [8] 向田恬,陈华,郭家力,等. 气候变化对嘉陵江流域降水变化影响分析[J]. *南水北调与水利科技*, 2010, 8(1): 75-77, 91.
- [9] 胡云华,冯精金,王铭烽,等. 气候及下垫面变化对嘉陵江流域径流与输沙的影响[J]. *中国水土保持科学*, 2016, 14(4): 75-83.
- [10] 杜华明,延军平,杨登兴,等. 嘉陵江流域降水变化及旱涝多时间尺度分析[J]. *自然资源学报*, 2015, 30(5): 836-845.
- [11] 孙一萌,陈喜,黄日超,等. 气候及土地利用变化对嘉陵江流域实际蒸散发量的影响[J]. *水电能源科学*, 2016, 34(12): 33-36, 73.
- [12] Duffie J A, Beckman W A. *Solar engineering of thermal processes*[M]. New York: John Wiley and Sons, 1980.
- [13] 沈永平,王国亚. IPCC 第一工作组第五次评估报告对全球气候变化认知的最新科学要点[J]. *冰川冻土*, 2013, 35(5): 1068-1076.
- [14] 王学,张祖陆,宁吉才. 基于 SWAT 模型的白马河流域土地利用变化的径流响应[J]. *生态学杂志*, 2013, 32(1): 186-194.
- [15] 王根绪,张钰,刘桂民,等. 马营河流域 1967—2000 年土地利用变化对河流径流的影响[J]. *中国科学(D 辑: 地球科学)*, 2005, 35(7): 671-681.
- [16] 罗君,白永平. 嘉陵江流域经济空间分异研究[J]. *长江流域资源与环境*, 2010, 19(4): 364-369.