

土地覆被和气候变化对锡林河流域径流量的影响

韩冬冬¹, 朱仲元¹, 宋小园², 郝祥云¹, 刘丹丹¹, 王慧敏¹, 王飞¹

(1. 内蒙古农业大学 水利与土木建筑工程学院, 呼和浩特 010018; 2. 临沂大学 土木工程与建筑学院, 临沂 276000)

摘要:土地覆被和气候变化是影响流域水资源宏观调控以及合理规划的两个主要因素,以锡林河流域为研究区,借助锡林浩特及周边4个国家气象站点,通过设定情景模式与SWAT模型相结合的方法分别对其进行了分析研究。通过极端土地利用法对研究区内土地利用/覆被设定不同情景模式,研究了土地利用/覆被变化对径流量的影响,另外采用最新的气候模式CMIP5的两种RCP排放情景RCP4.5和RCP8.5,预测了未来气温、降水、径流的变化情形。结果表明:土地变化对径流量的年际变化影响较弱,但对于汛期径流量影响显著;研究区径流量对气候表现敏感程度非常显著,未来最低、最高气温均表现出增温趋势且未来降水、径流变化趋势基本保持一致,呈增长趋势。

关键词:SWAT模型;土地利用/覆被;气候变化;极端土地利用;CMIP5气候模式;锡林河流域

中图分类号:F301.2; P467; P333

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2019)02-0153-08

Effects of Land Cover and Climate Change on Runoff in Xilinhe River Basin

HAN Dongdong¹, ZHU Zhongyuan¹, SONG Xiaoyuan²,

HAO Xiangyun¹, LIU Dandan¹, WANG Huimin¹, WANG Fei¹

(1. College of Water Conservancy and Civil Engineering, Inner Mongolia Agriculture University, Hohhot 010018, China; 2. College of Civil Engineering and Architecture, Linyi University, Linyi, Shandong 276000, China)

Abstract: Land cover and climate change are two main factors that affect the macro-control and reasonable planning of water resources in the river basin. Xilinhe River Basin was used as a research area, and Xilinhot and its four national meteorological stations were used to set the scenario model and SWAT model. The combined method was used to analyze and study separately. Through the extreme land use method, different scenarios for land use/coverage in the study area were set up to study the impact of land use/climate change on the runoff. In addition, the latest two RCP emission scenarios RCP4.5 and RCP8.5 of climate model CMIP5 were used to predict future changes in temperature, precipitation, and runoff. The following research results are obtained. Land change had weaker impact on inter-annual change of runoff, but it had significant impact on runoff during flood season; runoff in the study area was very sensitive to climate change, and future minimum and maximum temperatures show warming trends. The future trends of precipitation and runoff remain basically the same, showing the increasing trend.

Keywords: SWAT model; land use/coverage; climate change; extreme land use; CMIP5 climate model; Xilinhe River Basin

当今世界水资源问题及其敏感,探究水文系统演变过程,各个水文分量的变化规律,基于全球气候环境变化下水资源的趋势分析已成为水资源研究的热点问题^[1]。近年来,国内外学者致力于研究区域环境变化、气候变化以及人类活动对水资源的影响^[2-3],并从不同空间和时间尺度对区域水文系统进行模拟、分析和预

测^[4]。多位专家学者表示,流域的产流量与土地利用类型、植被盖度及气候条件的不同都有紧密联系^[5],而在不同地区,随着地区以及气候的复杂多样而呈现出不同程度的影响^[6-7]。土地利用/覆被对流域水量平衡影响较小而对于温暖湿润的雨林地区却呈显著影响^[8]。另外,流域影响因子研究中,土地覆被变化与气候变化对

流域产生的影响也不尽相同,大部分研究认为两者变化对径流产生衰退的影响^[9],而另一部分研究表明,两者的变化会导致径流量的增加^[10]。而在气象条件对流域内径流的影响研究中,其主要影响因子为气温和降水量的变化^[11],张建云等^[12]对黄河中游水文变化趋势的研究发现,气候变化是影响径流的主导因素,同时发现降水的变化相比气温而言更为敏感。在对与本研究区同属于高海拔地区的拉萨河流域的径流影响研究中也同样发现,气候变化相比土地覆被变化对径流的影响更为显著^[13]。

全球气候模式中:GCM 的模拟、分析和预测气候变化是目前最有效且最准确的工具,基于 GCM 输出的气候情景也从对基准气候调整的平衡试验情景发展到如今的典型浓度路径(RCPs)情景,全球气候模式迎来研究热潮^[7]。由于 CMIP 模式极大促进了气候模式的发展,并且各国专家学者在对于 CMIP5 的气候模拟能力以及其进一步的拓展应用开展了研究^[14-15],但对于其与分布式水文模型相耦合并对水文径流研究中对气候变化的影响分析缺少研究。锡林河流域,是一个以典型草原为主的森林、荒漠、沼泽地并存的复杂地区,生态系统较为脆弱,流域径流对土地利用和覆被变化极为敏感。近年来在典型草原开展了一系列的全球化的研究,而对于气候变化和土地覆被变化对流域水文及径流量的研究较为少见。本文以典型草原锡林河流域为研究区基于分布式水文模型 SWAT,通过极端土地利用法设定不同土地类型情景模式,并将 CMIP5 与 SWAT 模型进行耦合,通过设定不同气候情景来探讨流域内土地覆被和气候变化对锡林河径流量的影响。

1 研究区概况

锡林河位于内蒙古锡林郭勒盟东南部,从东南到西北贯穿锡林浩特市,其发源地在内蒙古赤峰市内的克什克腾旗境内的白音查干诺尔湿地以及奥伦湖等 12 座湖泊。锡林河主要有 3 条支流汇入,3 条支流分别为浩勒图郭勒河、浩勒郭勒河及呼斯特河,且 3 条均从上游汇入。流域内由小型湿地、滩地、湖泊、沼泽地、河渠等几种水域组成,是典型的干旱半干旱区草原内陆河流。河流全长 205 km,自锡林郭勒水库以下近 125 km 的河流已无明显水流活动。锡林河全流域面积为 10 524 km²,地理位置为 43°26′—44°08′N, 116°02′—117°12′E(附图 4)。

锡林河流域地处北半球中纬度地带,属于典型干旱半干旱区温带大陆性季风气候。研究区内多年平

均气温为 2.59℃,多年平均降水量为 270.1 mm,降水年内时空分布极不均匀,年蒸发量较大,全年干旱少雨。锡林河流域植被以草原为主,占流域总面积的 89%,植被类型的差异及其分布的不同,很大原因是由于气候条件的差异。流域上游断面多年径流量为 0.17 亿 m³/a,径流年际变化较小,但年内季节径流存在很大的不同,最大月径流量出现在 4—5 月份,由积雪融水补给。

2 资料与方法

2.1 SWAT 模型介绍

SWAT(Soil and Water Assessment Tool)模型是美国农业研究部(USDA-ARS)历经 30 多年开发的一套长时间尺度流域分布式水文模型,融合了美国农业研究局的 CREAMS,GLEAMS 和 EPIC 模型的特征,在 SWRRB 模型基础上结合了 ROTO 模型的河道演算模块以及 QUAL2E 模型的内河动力模块。模型基于良好的物理基础,能够用来模拟不同土壤类型、土地利用方式、植被覆被、管理方式等变化对流域产流、产沙、营养物质转移及非点源污染等的影响。

2.2 数据收集与处理

2.2.1 DEM 数据 本文所使用的 DEM 数据来源于地理空间数据云平台(<http://www.gscloud.cn/>) 30 m×30 m 的 GDEM(Global Digital Elevation Model)数据。通过 ArcGIS 软件进行裁剪、拼接、掩膜、投影等工作,生成 GRID 格式下的栅格文件,作为 SWAT 模型的输入数据,并且使 DEM 数据中生成的河网与研究区内实际河流水系基本一致。

2.2.2 土地利用数据 土地利用/覆被数据来源于中国西部环境与生态科学数据中心。结合 SWAT 模型中的植被数据库(CROP.dat)和城镇数据库(URBAN.dat),建立土地利用/覆被栅格图(附图 5)。本文研究区内有大面积草地,由于地形及气候的复杂性,导致草地的覆盖度有很大的差别,通过对锡林河流域中草地叶面积指数的研究^[16-17]将草地进行重分类,分为低、中、高覆盖度 3 种草地类型,并在 SWAT 土地利用/覆被数据库建立索引表。

2.2.3 土壤类型数据 土壤数据作为 SWAT 模型主要输入参数之一,在径流系统中决定着流域的产流和汇流等特征,是定义水文响应单元不可或缺的重要因子。在 SWAT 模型的水文过程中,土壤的物理性质如粒径、层数、质地、含水率以及地面坡度等决定着流域系统中的水、气等的运动特征;土壤的化学性质,如各种化学物质,对土壤不同参数量起主要作用。结

合研究区内实际土壤采样调查结果和南京土壤调查所提供的 1 : 100 万的全国土壤数据共同整理出研究区内的空间土壤数据(附图 5)。

2.2.4 气象数据 (1) 实际气象观测资料。研究区内由于气象站点布设的较为稀少,故选取距离研究区最近锡林浩特站、林西站、阿巴嘎旗站以及克什克腾旗站的逐日气象数据(降水、日最高最低气温、风速、相对湿

度、太阳辐射),时间序列长度均为 1962—2017 年。(2) 气候模式数据。来源于美国航天宇航局的 NASA Earth Exchange Global Daily Downscaled Projections(NEX-GDDP),参与 IPCC 第 5 次评估报告中模拟全球气候变化的 CMIP5 的模式数据。根据本文研究需要选择 10 个 GCM 模式,两种未来情景(RCP4.5 和 RCP8.5)数据,具体模式见表 1。

表 1 10 个 CMIP5 模式介绍

模式名称	模式机构	分辨率	国家
BCC-CSM1.1	Beijing Climate Center,China Meteorological Administration	2.8°×2.8°	中国
ACCESS1.0	CSIRO and BOM,Australia	1.3°×1.9°	澳大利亚
BNU-ESM	College of Global Change and Earth System Science,Beijing Normal University	2.8°×2.8°	中国
INM-CM4	Institut for Numerical Mathematics	1.5°×2.0°	俄罗斯
CanESM2	Canadian Centre for Cliamte Modeling and Analysis	2.8°×2.8°	加拿大
NorESM1-M	Norwegian Climate Centre	1.9°×2.5°	挪威
CCSM4	National Center for Atmospheric Research	0.9°×1.3°	美国
MPI-ESM-MR	max-Planck-Insitut fur Meteorologie (max Planck Institute for Meteorology)	1.9°×1.9°	德国
MRI-GCM3	Meteorological Research Institute	0.6°×0.6°	日本
IPSL-CM5A-MR	Institut Pierre-Simon Laplace	1.9°×3.8°	法国

2.3 模型模拟系统建立

在确定输入参数、各驱动数据的处理以及各参数数据的建立完成后,构建 SWAT 模型,模型构建见图 1,需要对模型进行校准和验证。模型的参数率定采用

SWAT -CUP 软件对 SWAT 模型输出结果进行分析^[18-19],选用 SUFI-2 算法对模型主要参数进行敏感性分析并进行反复迭代计算得到最优参数,逐渐缩小参数的范围,直到得到满意结果,参数率定结果见表 2。

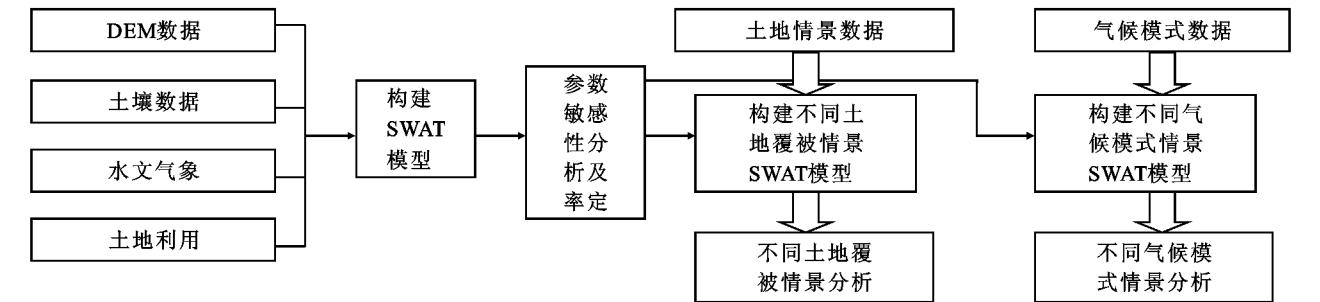


图 1 SWAT 模型构建及情景模式构建流程

2.4 模型评价标准指标

在 SWAT 模型的参数率定和模型验证过程中,需要用特定的评价指标进行判定,本文采用目前比较常规的评价指标:决定系数 R^2 、Nash-Suttcliffe 系数 E_{ns} ^[20] 和相对偏差 PBIAS^[21]。其中 Nash-Suttcliffe 系数 E_{ns} 和决定系数 R^2 检验模型的模拟过程是否合理,相对偏差 PBIAS 则用来评价模拟后结果与实测拟合度,结果越接近 0 越好。

3 结果与分析

3.1 模型验证及评价

利用流域出口处锡林浩特水文站的多年实测径流数据对 SWAT 模型在研究区径流量模拟结果进行分析。预热期设定为 3 a(1979—1982 年),模型率定

期在 1979—1993 年,验证期在 1994—2013 年。模型模拟得到年、月模拟值与实测数据对比(图 2—3)。由图 2—3 可知,模型模拟的两种不同时间尺度的径流量变化趋势和峰值与实测数据基本一致,模型在研究区内模拟表现较好。其具体评价标准见表 3。

3.2 土地利用/覆被变化对径流的影响

根据本文研究区锡林河流域所在位置和当前土地利用类型(表 4),以及将已有数据情况结合锡林郭勒盟以及锡林浩特市对当地土地利用规划和安排,同时考虑本文研究目的、SWAT 模型的处理、时间和空间尺度、锡林河流域自然地理环境等多方面因素,对土地利用/覆被变化的研究采用流域水文研究中常用的极端土地利用法,并设定以下 4 种情景模式,分析近年来锡林河径流量的变化对土地利用/覆被变化的响应关系。

表 2 SWAT 模型月径流参数率定结果

类别	参数	定义	调参方法	最佳值
常规管理变量. mgt	CN ₂	湿润条件Ⅱ的径流曲线值	<i>r</i>	-0.7
	SMTMP	融雪基温	<i>v</i>	-1.4
	SMFMX	最大融雪因子	<i>v</i>	6.7
	SMFMN	最小融雪因子	<i>v</i>	4.5
流域全局变量. bsn	TIMP	积雪温度滞后因子	<i>v</i>	0.1
	SNOCVMX	积雪全覆盖时所对应的最少积雪含水量	<i>v</i>	2.9
	SNO50 COV	积雪半覆盖时占 SNOCVMX 的分数	<i>v</i>	0.3
	SURLAG	地表径流滞后系数	<i>v</i>	29.7
河道变量. ret	CH_N ₂	主河道曼宁系数	<i>v</i>	0.3
	CH_K ₂	主河道有效渗透系数	<i>v</i>	113.4
	ALPHA_BNK	河岸调蓄的基流系数	<i>v</i>	0.1
水文响应单元变量. hru	ESCO	土壤蒸发补偿系数	<i>v</i>	0.8
	EPCO	植被蒸腾补偿系数	<i>v</i>	0.9
	CANMX	最大冠层截留量	<i>v</i>	25.8
地下水变量. gw	ALPHA_BF	基流系数	<i>v</i>	0.2
	GW_DELAY	地下水延迟系数	<i>v</i>	500
土壤变量. sol	SOL_AWC1	第一层土壤有效持水量	<i>r</i>	0.1
	SOL_K1	第一层土壤饱和渗透系数	<i>r</i>	0.5
	SOL_BD1	第一层土壤湿容重	<i>r</i>	0.1

注：*r* 表示(1+变化值)×初始值，*v* 表示直接赋予参数某个值。

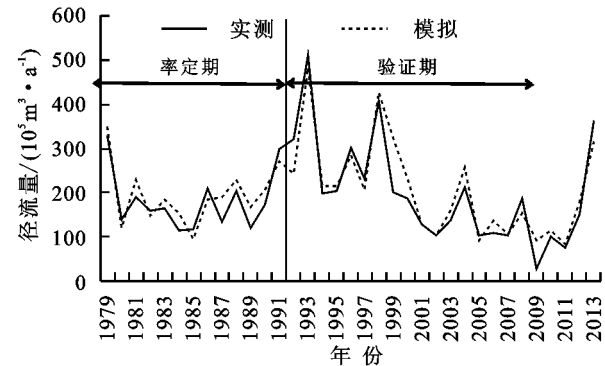


图 2 SWAT 模型锡林河流域年径流模拟结果

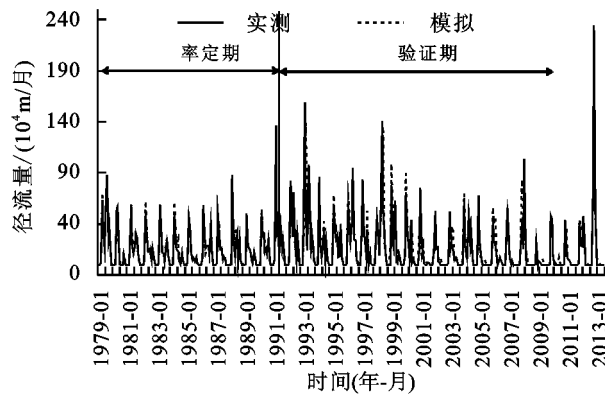


图 3 SWAT 模型锡林河流域月径流模拟结果

表 3 SWAT 模型在锡林河流域径流模拟

时期	时段	年径流			月径流		
		PBIAS	<i>E</i> _{ns}	<i>R</i> ²	PBIAS	<i>E</i> _{ns}	<i>R</i> ²
率定期	1983—1993 年	11%	0.88	0.89	13%	0.79	0.8
验证期	1994—2013 年	13%	0.82	0.85	16%	0.76	0.76

(1) 假设锡林河流域畜牧业超载养殖、干旱频发、地下水过度开采水位持续下降,导致生态环境朝恶性发展,草场退化,土地板结沙化严重,地表覆被较低。在进行 SWAT 模拟时将林地、高覆盖草地、中覆盖草地设置为低覆盖草地或沙地。

(2) 良性土地利用状况。根据锡林郭勒盟国土资源局制定颁布的《锡林郭勒盟土地利用总体规划 2006—2020 版》、《锡林浩特市土地利用总体规划 2009—2020》和《土地利用总体规划管理办法 2015 版》3 条政策,锡林河流域生态朝良性发展,旱地、沙地、荒漠化草地得到有效治理,将旱地、沙地以及低覆盖草原设置为中覆盖草地,同时将原有中覆盖草地的 30%转为高覆盖草地。

(3) 未来最佳土地利用状况。锡林河流域得到充分治理,植被状况恢复良好,地下水恢复正常水平。沙地、旱地、低中覆盖草地设置为高覆盖草地或有林地。

表 4 锡林河流域土地利用类型

土地利用类型	旱地	有林地	高覆盖草地	中覆盖草地	低覆盖草地	河渠	农村居住地	沙地	盐碱地	沼泽地
占比/%	3.01	2.95	54.49	28.94	5.98	0.15	0.27	0.27	0.06	3.87

(4) 保持 2009 年土地利用现状、植被覆盖等情况,用来和以上 3 种土地利用情景模式作对比研究,分析土地利用/覆被变化后锡林河流域径流情况。

由于锡林郭勒盟地处内蒙古草原深处,所以在改革开发以来一直发展较为缓慢,随着 21 世纪的到来,锡林郭勒盟的矿产工业、旅游业、畜牧业等产业的发展,带动了锡林郭勒盟总体的经济发展。故在 2000 年以后由于经济开始蓬勃发展,致使土地的利用也随之产生变化,同时也导致了原来生态环境失去长久以来的平衡,土地开始出现沙化、荒漠化,植被覆盖也逐年降低。

根据上述所建立的 4 种土地利用情景模式,分别模拟了锡林河流域 2000—2013 年共 14 a 的径流量。得出 14 a 的年径流量结果(表 5,图 4—5)。

表 5 不同情景模式下径流模拟变化率

情景	a	b	c	d
年均径流/ ($10^8\text{ m}^3\cdot\text{a}^{-1}$)	11.75596	11.13819	10.09211	10.35014
变化率/%	10.25	-5.27	-10.28	0.00

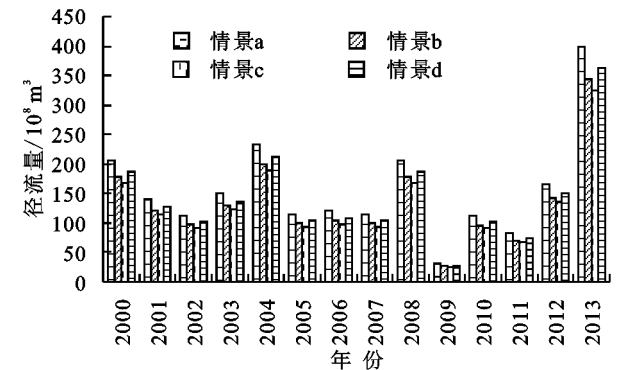


图 4 不同土地利用情景模式下年径流量

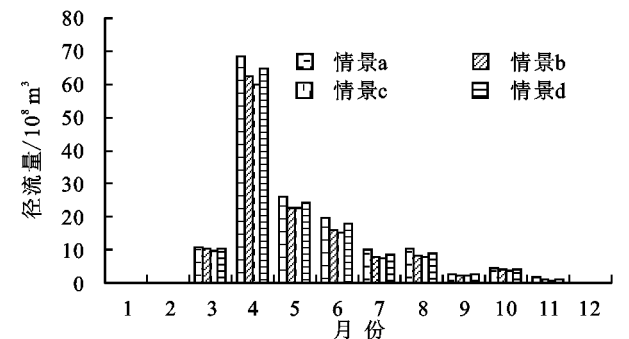


图 5 不同土地利用情景模式月平均下年径流量

从表 5、图 4 可以得出在锡林河流域,由于土地利用/覆被变化,径流量变化较为明显,不同覆盖度草地面积的增加对流域内保水、产流、汇流都有不同程度的影响。对于情景模式 a,随着有林地、高中覆盖度草地面积减少,转变为低覆盖草地及沙地,径流量增加 10.25%。对于情景模式 b,根据锡林郭勒盟政

府颁布的有关土地利用的政策,在遵循科学、合理的方法开发、治理和改造土地,积极治理生态环境,在锡林河流域将旱地、沙地以及低覆盖草原有效治理,转变为中覆盖草地,同时将现有中覆盖草地的 30% 转为高覆盖草地,得到模拟结果:锡林河年径流量有所降低,相比在不改变土地利用情况下径流量减少 5.27%。从结果不难看出,在土地利用良性发展的情况下,土地利用对涵养水源、存蓄水量都有较大的影响,大大减少了水量的流失。迫使径流量减少最多的情景模式是模式 c——最佳土地利用情况,沙地、旱地、中、低覆盖草地全部转化为有林地和高覆盖草地。在未来最佳土地利用情况下,锡林河年径流量较正常情况下减少 10.28%。从模式 d 结果可以看出,较最佳土地利用仍有较大的差距,锡林河流域土地利用还需要加强治理和完善生态管理措施,以达到锡林河流域生态环境的恢复朝良好方向发展。

另外对于不同情景模式下各月平均径流量也存在不同程度的影响,见图 5,表 6,在各月径流变化率上 6 月、7 月、8 月、9 月要高于平均变化率且远高于其他月份。对于锡林河流域以上月份,属于草原的雨季,对于雨季流域的产汇流及流域的径流,土地覆被情况对其有直接影响。植被覆被的不同直接导致了地表对降雨的截留能力及地表保水、存水的能力增强,同时地表植被的蒸腾、地表的蒸散发都对径流有不同程度的影响。除雨季外,土地覆被的变化对其他月份影响不大。

表 6 不同情景模式下各月平均径流变化率 %

月份	情景 a	情景 b	情景 c	情景 d
1	0	0	0	0
2	0	0	0	0
3	3.915526	-1.50547	-7.41411	0
4	5.903287	-3.13551	-7.63169	0
5	8.035193	-5.3	-6.09464	0
6	11.89522	-10.7056	-14.1548	0
7	16.11975	-9.0143	-14.9558	0
8	15.80726	-10.4251	-15.8073	0
9	10.69832	-6.57	-10.3	0
10	9.87	-0.00211	-7.75105	0
11	9.975089	-0.87643	-8.18821	0
12	0	0	0	0

3.3 气候变化变化对径流的影响

本文选用世界气候研究计划(WCRP)中实施的耦合模式比较计划(CMIP),采用 2012 年开始启动的 CMIP5 的 10 种气候模式中 RCPs(Representative

Concentration Pathways) 情景模式作为输出资料。由于研究区较小,在情景模式中只能选择 RCP4.5 和 RCP8.5 两种排放情景。RCP8.5 为高排放情景,即到 2100 年温室气体浓度对应辐射强迫为 8.5 W/m^2 。RCP4.5 为中等排放情景,即到 2100 年温室气体浓度对应辐射强迫分别为 $6.0, 4.5\text{ W/m}^2$ 。当前,对于水文学科中气候变化研究一般采用定量化方法,基于一个或者多个 GCM(Global Climate Model)输出,确定降水量和气温的变化情形,然后根据气象数据的变化特征对历史数据进行调整。然后设定气候变化情景模式,采用人为估计以及对历史气候变化特征分析以得到其变化特征^[22]。

3.3.1 锡林河流域未来气温变化

(1) 流域未来最高气温变化。为了避免各模式之间的差异所带来的误差,本文设定各个模式 1971—2000 年模拟值为基准期气候态。由表 7 可知,在 RCP4.5 情景下,锡林河流域最高气温模式各个模式大都升温 1°C 以上,只有 INM-CM4 和 MRI-GCM3 模式上升幅度较小,到 2080s,升温趋势较为显著,尤其是 ACCESS1.0, BNU-ESM, NorESM1-M 和 IPSL-CM5A-MR,升温幅度均超过 3°C 。但是,在 RCP4.5 情景下的 2020s 的各个模式结果得出,升温幅度出现减缓,甚至出现变暖停滞现象(INM-CM4 模式),与其他学者的最新研究结果相符^[23]。在 RCP4.5 情景下,升温幅度表现显著的模式有 ACCESS1.0, BNU-ESM, NorESM1-M 和 IPSL-CM5A-MR;另外该情境下可以较好地表现出 21 世纪前 30 a 出现变暖减缓以及停滞现象的模式主要为 INM-CM4 和 MRI-GCM3。在 RCP8.5 情景下各气候模式均呈现增温趋势,到 21 世纪末,绝大部分模式增温幅度超过 4°C ,其中 ACCESS1.0, BNU-ESM 和 IPSL-CM5A-MR 模式表现极为显著,增温幅度超过 5.5°C 。由此可知,各年代不同模式最高气温的增温幅度 RCP8.5 情景要明显高于 RCP4.5 情景。

(2) 流域未来最低气温变化。锡林河流域内未来最低气温的变化幅度可知(表 8),在 RCP4.5 情景下,最低气温增温幅度较慢的模式同样为 INM-CM4 和 MRI-GCM3。到 21 世纪后期, BNU-ESM, NorESM1-M 和 IPSL-CM5A-MR3 种模式增温幅度超过 3.5°C 。RCP8.5 情景下, INM-CM4 和 MRI-GCM3 模式在 2020s 也表现出变暖减缓现象,但从 2050s 到 2080s 增温较为明显, 2050s 大部分增温超过了 3°C , 2080s 绝大部分模式增温超过了 5°C ,其中 ACCESS1.0, BNU-ESM, IPSL-CM5A-MR 这 3 种模式表现最为显著,到 2080s,升

温超过 6°C 。

在 RCP4.5 和 RCP8.5 两种气候情境下,在整体上各模式的最高和最低气温均表现出不同程度的增温现象, RCP8.5 情境较为显著,但在 RCP4.5 情景下, 21 世纪前期出现变暖减缓以及停滞现象,一方面说明人类对环境保护以及限制温室气体排放起了一定的作用,另一方面气候的自然变率也产生一定的影响。

表 7 未来最高气温变化幅度 $^{\circ}\text{C}$

模式名称	RCP4.5 情景			RCP8.5 情景		
	2020s	2050s	2080s	2020s	2050s	2080s
BCC-CSM1.1	1.1	2.0	2.5	1.5	2.8	4.7
ACCESS1.0	1.6	2.9	3.4	1.2	3.3	5.7
BNU-ESM	1.9	2.5	3.1	2.4	3.9	5.9
INM-CM4	0.0	0.6	1.1	0.5	1.3	2.6
CanESM2	1.2	2.4	2.9	1.5	3.5	5.2
NorESM1-M	1.7	2.7	3.4	1.6	3.3	5.2
CCSM4	1.1	2.0	2.2	1.4	2.8	4.4
MPI-ESM-MR	1.0	2.0	2.6	1.4	2.8	4.7
MRI-GCM3	0.7	1.0	1.4	0.5	1.9	3.8
IPSL-CM5A-MR	1.7	2.8	3.3	1.5	3.5	6.3

表 8 未来最低气温变化幅度 $^{\circ}\text{C}$

模式名称	RCP4.5 情景			RCP8.5 情景		
	2020s	2050s	2080s	2020s	2050s	2080s
BCC-CSM1.1	1.3	2.2	2.6	1.7	3.1	5.1
ACCESS1.0	1.5	2.6	3.3	1.4	3.4	6.1
BNU-ESM	2.1	2.9	3.6	2.5	4.4	6.8
INM-CM4	0.2	0.7	1.3	0.5	1.5	2.9
CanESM2	1.2	2.4	3.0	1.5	3.5	5.5
NorESM1-M	1.6	2.8	3.6	1.9	3.7	5.7
CCSM4	1.2	2.3	2.4	1.5	3.2	5.1
MPI-ESM-MR	1.1	2.1	2.7	1.5	3.0	5.0
MRI-GCM3	0.8	1.5	1.9	0.7	2.3	4.4
IPSL-CM5A-MR	1.9	3.1	3.6	1.8	4.1	6.8

3.3.2 锡林河流域未来降水变化分析 锡林河流域的各个模式未来年降水变化程度见表 9,两种情景下,未来降水均表现出不同程度的增加趋势,证实了当气温升高时,蒸发量增加,导致大气中的水汽增加,更加有利于降水的形成^[24]。RCP4.5 情景中,在 2020s 除 NorESM1-M 模式外,其他模式降水量均呈现不同程度增加趋势,其中 BNU-ESM 降水超过 20% ;在 2050s 只有 ACCESS1.0 和 MPI-ESM-MR 两种模式表现下降趋势外,其余模式仍旧表现出增长趋势,且大部分模式超过 2020s;在 2080s,仅有 MPI-ESM-MR 模式的降水均呈现减少趋势;在 10 个 GCM 中, BNU-ESM 模式的降水在未来 3 个阶段增加幅度均超过 20% ,其主要原因是由于该

模式下气温升高幅度较大,最高最低气温在 3 个时期的升温幅度为 1.9~3.6℃。在 RCP8.5 情景中,在 2020s,IPSL-CM5A-MR 模式降水增幅最为明显,达到 10%;到 2050s,仅有少数几个模式的降水呈下降趋势,INM-CM4,ACCESS1.0 和 MPI-ESM-MR,其余模式呈现不同程度增加趋势,其中 BNU-ESM 的降水增幅高达 36.5%;到 21 世纪末各个模式均呈增加趋势。BNU-ESM 模式在两种情景下增加最大。降水在 RCP8.5 情景下的增加幅度要明显大于 RCP4.5 情景,这主要是由于 RCP8.5 情景的升温普遍较高,大气所含水汽较多。

表 9 未来降水变化率		%					
模式名称	RCP4.5 情景			RCP8.5 情景			
	2020s	2050s	2080s	2020s	2050s	2080s	
BCC-CSM1.1	8.0	13.8	10.7	1.6	12.5	16.0	
ACCESS1.0	1.2	-1.0	0.7	0.3	-8.1	7.0	
BNU-ESM	20.9	26.2	22.4	8.0	36.5	38.6	
INM-CM4	2.4	3.3	1.6	-4.0	-4.7	5.8	
CanESM2	8.0	14.4	26.1	9.7	18.1	33.9	
NorESM1-M	-7.8	3.7	12.1	-0.5	8.7	27.0	
CCSM4	2.3	9.8	8.6	6.7	21.9	21.5	
MPI-ESM-MR	2.3	-3.3	-9.2	-1.0	-3.2	0.4	
MRI-GCM3	1.9	16.4	20.2	6.2	11.6	18.7	
IPSL-CM5A-MR	12.2	5.2	8.1	10.0	20.3	24.8	

3.3.3 锡林河流域未来径流变化情景 将 10 个 GCM 的逐日降水量、日最高气温和日最低气温作为 SWAT 模型的气象驱动数据,运行已经率定好的 SWAT 模型,得到两种情景下的未来 10 个模式的径流结果(表 10),在 RCP4.5 情景下,除了 BNU-ESM 模式的径流量呈增加趋势之外,其余模式在 2020s 呈不同程度减小趋势;另外除 CanESM2 和 MRI-GCM3 模式在 2050s 和 2080s 呈增长趋势,其原因可能与这两种模式的气温和降水增加幅度大于其他模式有关,其余模式呈不同程度下降趋势,其中以 MPI-ESM-MR 和 INM-CM4 模式最为明显,下降幅度超过 30%,在 10 个模式中仅有 CanESM2 和 MRI-GCM3 两种模式上升幅度超过 15%。在 RCP8.5 情景中,2020s 时期内,除 ACCESS1.0 呈大幅度增加趋势外,其余模式均呈现下降趋势,但在 2050s 时期大部分模式则呈大幅度上升趋势,尤其以 ACCESS1.0 和 BNU-ESM 模式上升幅度最为明显,高达 50%,到 2050s,ACCESS1.0 的增加幅度已超过 100%,而到了 2080s 则仅有 BCC-CSM1.1,INM-CM4,MPI-ESM-MR 这 3 种模式相对于基准期出现下降情况。

表 10 未来径流变化率							%
模式名称	RCP4.5 情景			RCP8.5 情景			
	2020s	2050s	2080s	2020s	2050s	2080s	
BCC-CSM1.1	-6.7	8.5	7.0	-21.7	-4.3	-6.2	
ACCESS1.0	-8.0	-11.9	-4.7	46.2	51.0	149.0	
BNU-ESM	8.0	19.5	5.3	-17.2	50.0	36.4	
INM-CM4	-2.6	-4.5	-31.6	-37.3	-36.5	-16.1	
CanESM2	-2.8	2.8	16.9	-9.3	6.3	29.8	
NorESM1-M	-42.5	-21.0	-13.1	-26.1	-18.8	18.1	
CCSM4	-14.5	-4.0	-5.4	-2.7	29.2	33.8	
MPI-ESM-MR	-16.4	-22.1	-33.9	-19.4	-32.4	-15.8	
MRI-GCM3	-15.5	10.8	20.6	-10.6	2.3	15.6	
IPSL-CM5A-MR	-1.0	-10.1	-8.4	-6.1	16.9	28.5	

4 讨论与结论

(1) 通过建立以上 4 种土地利用情景模式进行径流模拟,结果表明,土地利用类型不同,植被盖度的不同,从对降水截留到植被根部对水量的吸收再到植被本身的蒸散发以及地表的直接蒸发都有不同程度的影响,从而直接对流域内径流的影响也有很大的不同。植被覆盖度降低导致径流量增加,在模式 a 情况下,径流增加 10.25%,增加植被盖度,或改变植被类型,如本文的将草地转为有林地,都会减少径流量,在情景模式 b,c 下,径流量分别增加 5.27%,10.18%。这一结果与杨立哲^[25]研究锡林河流域草地退化对锡林河流域水文过程影响结果趋于一致。同时土地利用类型的不同对季节性流域水文过程有着不同程度的影响,汛期时,植被盖度的不同直接对径流量的影响较为明显,说明土地覆被的增加对于草原流域的保水存水、涵养水源有一定的作用。

(2) 采用最新气候模式 CMIP5 气候模式 RCP4.5 和 RCP8.5 排放情景输出资料,以 1971—2000 年模拟值作为各个模式基准期气候态,大多数气候模式最高气温和最低气温在两种情景下表现增温明显,少数气候模式显示增温减缓,RCP8.5 情景下增温幅度高于 RCP4.5 情景下。多数气候模式下未来降水呈增加趋势,径流呈减小趋势。多模式集成下,两种情景下未来气温均表现增温,最低气温增温幅度略高于最高气温。降水径流变化趋势基本保持一致。在 RCP4.5 情景下,降水增加幅度为 5%~10%,径流变化幅度控制在-10%~-5%,在 RCP8.5 情景下,降水增加幅度从 2020s 的 5%增加到 2080s 的 19%,径流变化幅度从-10%增加到 27%,径流对降水的敏感程度非常显著。不同模式、不同情景对预测结果均

存在一定的不确定性。而降水的不确定性则会对径流产生和汇集都会产生不同的影响。

(3) 对土地利用/覆被变化的情景设定以及未来不同气候模式的设定,通过二者比较得出,气候变化在流域水文过程中扮演着更加重要的角色,尤其是对径流的影响更明显,土地利用/覆被变化的影响甚至是极端的土地利用变化情景也是次要的。相比于气候变化对流域全年的影响均为显著,土地利用/覆被变化只对流域内雨季或汛期影响较大,而对于非雨季或非汛期影响程度并不突出,说明土地覆被变化对汛期径流调蓄有一定的作用。

参考文献:

- [1] 夏军,刘春蓁,任国玉. 气候变化对我国水资源影响研究面临的机遇与挑战[J]. 地球科学进展,2011,26(1):1-12.
- [2] Li Z, Liu W, Zhang X, et al. Impacts of land use change and climate variability on hydrology in an agricultural catchment on the Loess Plateau of China[J]. Journal of Hydrology, 2009, 377(1):35-42.
- [3] Jiang D, Li L, Li J. Runoff variation affected by precipitation change and human activity in Hailu River basin, China[J]. Chinese Journal of Population Resources and Environment, 2014,12(2):116-122.
- [4] 杨满根. 气候变化和土地利用变化背景下淮河流域中上游径流变化研究[D]南京:南京大学,2016.
- [5] Sun G, McNulty S G, Moore Myers J A, et al. Impacts of multiple stresses on water demand and supply across the southeastern United States[J]. Journal of the American Water Resources Association, 2008, 44(6): 1441-1457.
- [6] 莫淑红,王学风,勾奎,等. 气候变化和人类活动对澜河流域径流情势的影响分析[J]. 水力发电学报,2016,35(9):7-17.
- [7] 宋小园. 气候变化和人类活动影响下锡林河流域水文过程响应研究[D]呼和浩特:内蒙古农业大学,2016.
- [8] Legesse D, Vallet-Coulomb C, Gasse F. Hydrological response of a catchment to climate and land use changes in Tropical Africa: case study South Central Ethiopia [J]. Journal of Hydrology (Amsterdam), 2003, 275(1/2):67-85.
- [9] 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.
- [10] 裴亮,刘阳,陈晨. 大凌河流域土地利用/覆被变化及其对气候变化的响应研究[J]. 地理科学,2017,37(9): 1403-1410.
- [11] 王云琦,齐实,孙阁,等. 气候与土地利用变化对流域水资源的影响:以美国北卡罗莱纳州 Trent 流域为例[J]. 水科学进展,2011,22(1):51-58.
- [12] 张建云,王国庆,贺瑞敏,等. 黄河中游水文变化趋势及其对气候变化的响应[J]. 水科学进展,2009,20(2): 153-158.
- [13] 张圣微,雷玉平,姚琴,等. 土地覆被和气候变化对拉萨河流域径流量的影响[J]. 水资源保护,2010,26(2):39-44.
- [14] 杨笑宇,林朝晖,王雨曦,等. CMIP5 耦合模式对欧亚大陆冬季雪水当量的模拟及预估[J]. 气候与环境研究,2017,22(3):253-270.
- [15] 祁晓凡,李文鹏,李海涛,等. 基于 CMIP5 模式的干旱内陆河流域未来气候变化预估[J]. 干旱区地理,2017, 40(5):987-996.
- [16] 韩砚君. 锡林河流域近三十年草原植被格局动态及其驱动力分析[D]呼和浩特:内蒙古大学,2013.
- [17] 柳艺博,居为民,朱高龙,等. 内蒙古不同类型草地叶面积指数遥感估算[J]. 生态学报,2011,31(18):5159-5170.
- [18] 祁敏,张超. 基于 SWAT 模型的阿克苏河流域径流模拟[J]. 水土保持研究,2017,24(3):283-287.
- [19] 刘闻. 基于 SWAT 模型的水文模拟及径流响应分析[D]西安:西北大学,2014.
- [20] 寇丽敏,刘建卫,张慧哲,等. 基于 SWAT 模型的洮儿河流域气候变化的水文响应[J]. 水电能源科学,2016, 34(2):12-16.
- [21] 高超,刘莉,王紫霞,许月萍. 黄河唐乃亥以上流域降雨偏差纠正方法研究[J]. 水力发电学报,2018,37(9):29-39.
- [22] 陈敏鹏,林而达. 代表性浓度路径情景下的全球温室气体减排和对中国的挑战[J]. 气候变化研究进展,2010, 6(6):436-442.
- [23] Kosaka Y, Xie S P. Recent global-warming hiatus tied to equatorial Pacific surface cooling[J]. Nature, 2013,501(7467):403-407.
- [24] 吴晶,罗毅,李佳,等. CMIP5 模式对中国西北干旱区模拟能力评价[J]. 干旱区地理,2014,37(3):499-508.
- [25] 杨立哲. 气候变化与草地退化对锡林河流域水文过程的影响模拟[D]. 南京:南京信息工程大学,2014.