

基于 SWAT 模型的开都河上游 未来土地利用变化对径流的影响

罗映雪, 徐长春*, 杨秋萍, 杨媛媛, 张晋霞

(新疆大学, 乌鲁木齐 830046)

摘要:【目的】揭示土地利用变化下的流域径流变化。【方法】以开都河上游区域为研究对象,利用分布式水文模型 SWAT,采用元胞自动机-马尔科夫模型(CA-Markov)预测法、当地土地利用规划要求和极端土地利用情景法共设置了4种2025年土地利用情景,包括自然发展情景、规划发展情景、极端草地情景、极端林地情景。【结果】①构建的 SWAT 模型在率定期($R^2=0.74$, $NSE=0.73$)与验证期($R^2=0.58$, $NSE=0.57$)的模拟结果可以接受。②采用 CA-Markov 模型模拟的2010年土地利用类型图 Kappa 系数为0.83,可用于预测2025年土地利用类型。1980—2010年土地利用类型变化主要表现为草地转换为水体和未利用地,其转换面积分别为106.09 km²和0.5 km²。③相较于基准年2010年,各土地利用情景下的年均径流量均减少,自然发展情景减少最快,极端草地情景减少最慢;从丰水期与枯水期来看,2种时期下各情景月均径流变化完全相反;从其季节分配来看,各土地利用类型在夏季对径流变化影响最大,冬季影响较小。【结论】该地区草地是影响径流最主要的调控因子,原有草地的减少会引起夏季径流较大幅度减少,对于未利用地,可考虑开发为草地。

关键词:土地利用; SWAT 模型; CA-Markov 模型; 径流模拟; 开都河

中图分类号:TV121

文献标志码:A

doi:10.13522/j.cnki.ggps.2019103

罗映雪,徐长春,杨秋萍,等. 基于 SWAT 模型的开都河上游未来土地利用变化对径流的影响[J]. 灌溉排水学报, 2019,38(11):100-108.

0 引言

流域径流变化是自然因素和人为因素共同作用的结果,其中人为因素最为直接的方式就是通过改变土地利用状态^[1]。土地利用方式的变化影响了水分的下渗、截留及土壤湿度等,从而对地表径流、蒸散发等过程产生影响^[2-3]。不合理的土地利用方式已经造成水资源的供需关系发生变化,例如大面积砍伐森林、过度放牧、围湖造田等改变了河流流量,使得降水的再分配不均,导致部分地区水资源短缺,甚至造成一些流域水资源枯竭。因此,在水科学研究中,探究土地利用变化对流域水资源的影响已成为热点^[3-5]。

流域对比试验法^[6]、水文特征参数法^[7]等用于早期研究土地利用/覆被变化对水文和水资源的影响。随着技术的不断发展,水文模型的出现使得人们可以用模型模拟手段来定量评估土地利用/土地覆盖(LUCC)对水循环各个环节的影响^[8-10]。目前,分布式水文模型——SWAT(Soil and Water Assessment Tool)模型被国内外学者广泛运用,Laurent等^[11]、Deng等^[12]使用 SWAT 模型探究了流域不同土地利用覆被状况与流域水文特征的关系;同时,该模型也广泛运用于干旱区,如Zang等^[13]在黑河流域运用 SWAT 模型探究了气候和土地利用变化对蓝水、绿水的影响,发现1980—2005年土地利用方式的改变对蓝水、绿水总量影响不大,但是由绿水转变为蓝水的流量达2.06亿 m³;邱国玉等^[14]应用 SWAT 模型对泾河流域土地利用变化与径流关系的研究表明,LUCC 的变化使得流域多年平均年径流量增加26.57 m³/s,占气候和土地利用共同变化量的

收稿日期:2019-06-23

基金项目:国家自然科学基金项目(41561023)

作者简介:罗映雪(1993-),女。硕士研究生,主要从事干旱区水文水资源研究。E-mail: luoyingx_123@126.com

通信作者:徐长春(1977-),女。副教授,主要从事干旱区气候变化及水文水资源研究。E-mail: xcc0110@163.com

297.87%。Xu等^[15]、王莉^[16]和何旦旦^[17]均利用SWAT模型结合气候变化对开都河上游区域进行了径流模拟与预测,但几乎很少涉及土地利用变化对此区域产生的影响,特别是近年来,人类活动愈加频繁,不能忽视土地利用变化对径流的影响。此外,现有关于土地利用变化对径流的影响研究也大多基于单一方法,韩强等^[18]采用极端土地利用法分析土地利用变化对径流的影响,权瑞松^[19]运用CA-Markov模型预测法分析并预测上海市土地利用变化及其水文效应。鉴于此,以开都河上游为研究区,结合模型预测法、极端土地利用法以及当地规划发展要求3种方法设置了4种土地利用情景,利用DEM、土壤和气象数据驱动SWAT模型,并借助实测水文数据进行模型的率定、验证,探讨未来土地利用变化对流域水文的可能影响,以期开都河流域水资源管理实践及未来土地利用规划提供理论依据。

1 研究区概况

开都河流域是典型的西北内陆河,是塔里木河四大源头之一,位于新疆巴音郭楞蒙古自治州境内,位于82°58'—86°55'E,41°47'—43°21'N之间(图1)。开都河发源于天山中部海拔5 000 m的萨尔明山,最终汇入博斯腾湖,河流全长610 km,流域面积约2.21×10⁴ km²。该河流为库尔勒市的城市发展和居民生活提供了重要的水源保障,而且对塔里木盆地东部生态环境的保护也起着重要作用。上游区域主要以草地为主,拥有第一大亚高山高寒草甸草原—巴音布鲁克大草原,其他土地利用类型相对较少,但随着人类活动的变化,草地面积逐年减少,其他土地利用类型相应发生改变,上游水量也随之产生变化。

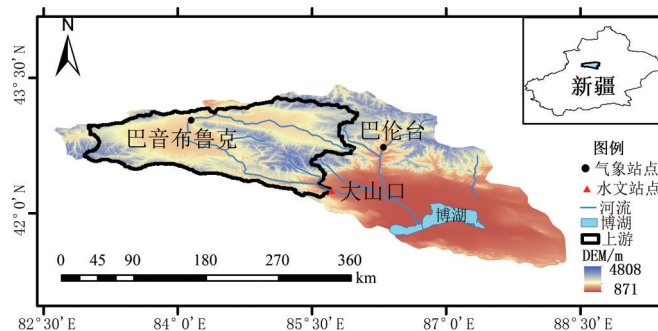


图1 研究区示意图

2 数据资料与方法

2.1 数据资料

①土地利用数据:1980、1995、2010年3期土地利用数据均来自于中国科学院资源环境科学数据中心(www.resdc.cn),分辨率为1 km,该数据是以美国陆地卫星Landsat遥感影像数据作为信息源,通过人工目视解译获取;②DEM数据来源于CGIAR-CSI SRTM 30m (<http://srtm.csi.cgiar.org>),经过ArcGIS投影转换、流域界限划分等步骤,得到研究区的DEM图;③土壤数据下载于寒区旱区科学数据中心(<http://westdc.westgis.ac.cn/>),是基于世界土壤数据库(HWSD)的中国土壤数据集(V1.1),根据SWAT模型中划分水文响应单元(HRU)模块得到研究区土壤类型图(图2)。④中国气象数据网(<http://data.cma.cn>)提供的逐日气象数据,时间尺度为1979—2000年,主要包括降水、气温、风速、相对湿度;⑤水文数据采用大山水文站日径流数据,时间尺度是1982—2000年,来源于新疆维吾尔自治区水文局,其中CA-Markov模型需要的道路信息来源于国家基础数据中心。在本研究中土地利用数据、DEM数据、土壤数据投影坐标系统一设置为WGS_1984_World_Mercator。

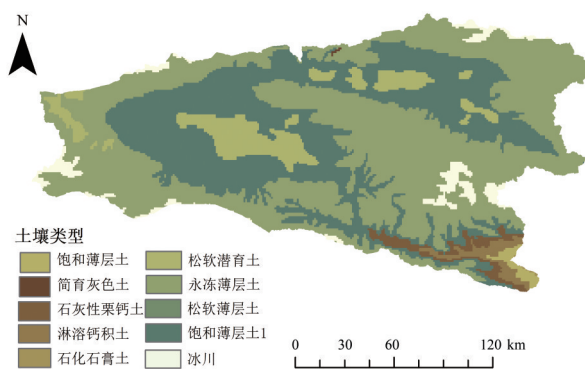


图2 土壤类型图

2.2 主要方法

2.2.1 SWAT 模型及评价标准

SWAT 是美国农业研究中心基于 SWRRB 模型发布的长时段流域的分布式水文模型,具有很强的物理机制,采用了先进的模块化的设计思路,水循环中的每一个环节对应一个子模块,十分方便模型的扩展和应用^[20-22],用户可根据需求改变命令代码。SWAT 模型相较于其他水文模型代码开源且可以免费下载,而且模型对数据资料要求较少,易获取,能够在数据资料匮乏地区建立模型。在本研究中,只涉及到地表径流模拟过程,径流模拟是水文模拟中最基本的、最重要的一个环节,主要依据水量平衡方程进行计算^[23],即:

$$SW_t = SW_o + \sum_{i=1}^t (R_{\text{day}} - Q_{\text{sury}} - E_a - W_{\text{seep}} - Q_{\text{gw}})_i, \quad (1)$$

式中: SW_t 为土壤的最终含水率; SW_o 为第 i 天可被植被吸收的土壤原始含水率; t 为时间; R_{day} 为第 i 天的降水量; Q_{sury} 为第 i 天的地表径流量; E_a 为第 i 天的蒸散发; W_{seep} 为第 i 天土壤剖面底层的渗漏量和侧流量; Q_{gw} 为第 i 天的地下水回流量。

为判断模型的模拟效果,分别选取决定系数 R^2 和纳什效率系数 NSE 评价模型的精度计算公式如下^[24-25]:

$$R^2 = \frac{\left[\sum_{i=1}^n (Q_{oi} - Q_{o, \text{avg}}) \right]^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{oi} - Q_{o, \text{avg}})^2 \sum_{i=1}^n (Q_{mi} - Q_{m, \text{avg}})^2}, \quad (2)$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{mi} - Q_{oi})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{oi} - Q_{o, \text{avg}})^2}, \quad (3)$$

式中: Q_{mi} 为模拟径流序列; Q_{oi} 为实测径流序列; $Q_{o, \text{avg}}$ 为实测径流序列的均值; $Q_{m, \text{avg}}$ 为模拟径流序列的均值; n 为模拟时段数。

决定系数 R^2 取值范围为 0~1, 当 $R^2 \geq 0.5$ 时, 模拟值表示可接受, $R^2 \geq 0.7$ 时, 模拟结果比较准确, $R^2 = 1$ 时, 非常吻合。 NSE 取值范围是 $(-\infty, 1)$, 取值越接近 1, 说明模拟结果与实测值越接近, 当 NSE 变化值在 0.5~1 之间模拟值是可以接受的。

2.2.2 CA-Markov 模型及评价标准

CA-Markov 模型是 CA 模型与 Markov 模型的结合, 既包括了元胞自动机模型模拟复杂空间变化的能力, 也综合了马尔科夫模型长时间的预测优势, 二者互相弥补各自缺陷, 可以更准确地进行空间和数量模拟, 以预测土地利用类型的变化, 并且模型在预测过程中最好使用相同间隔年份模拟, 模拟效果更佳^[26-28]。

本文采取 $Kappa$ 系数进行精度评价^[29-30]:

$$kappa = \frac{P_a - P_b}{P_c - P_b}, \quad (4)$$

式中: P_a 为正确模拟比例; P_b 为随机情况下期望的正确模拟比例; P_c 为理想分类情况下的正确模拟比例, 为 100%。根据 $Kappa$ 系数检验标准^[30], 当 $0 \leq Kappa \leq 0.20$ 时, 表明 2 幅图像之间一致性极低; 当 $0.21 \leq Kappa \leq 0.40$ 时, 一致性一般; 当 $0.41 \leq Kappa \leq 0.60$ 时, 一致性中等; 当 $0.61 \leq Kappa \leq 0.80$ 时, 高度一致; 当 $0.81 \leq Kappa \leq 1.00$ 时, 几乎完全一致。

3 结果与分析

3.1 模型的适用性分析

3.1.1 SWAT 水文模型精度评价

在相同气象条件下, 模型预热期为 1979—1981 年, 1982—1991 年为模型率定期, 1992—2000 年为模型验证期, 分别模拟 1980、2010 年以及其他 4 种土地利用情景的径流变化情况。1995 年土地利用数据用于模型初始构建, 将其他处理好的数据输入模型, 利用 SWAT 辅助开发工具 SWAT-CUP2012 进行模型的校准。

由于开都河上游海拔相对较高, 存在部分永久性冰川雪地, 对径流会产生一定影响, 因此, 本文在对模型进行模拟之前, 首先对模型进行了参数敏感性分析^[31], 借助 SWAT-CUP 中自带的 SUFI-2 算法, 模型最终选

取了12个敏感参数(表1)。

表1 参数敏感性分析

参数	描述	修改方式	参数最优值	敏感性排序
CN2	SCS径流曲线系数	R	-0.20	4
GW_DELAY	地下水的延迟时间	V	588.69	9
GW_REVP	浅层地下水再蒸发系数	V	-0.05	11
ALPHA_BNK	河岸调蓄的基流 α 因子	V	0.57	5
SOL_AWC	土壤可利用水量	R	-0.63	1
SOL_K	土壤饱和渗透系数	R	0.93	3
SOL_BD	土壤干体质量	R	0.59	12
GWQMN	水位阈值	V	0.15	10
CH_N2	主河道曼宁系数	V	0.06	6
CH_K2	有效渗透系数	V	117.52	7
SFTMP	融雪基温	V	-1.01	8
TIMP	降雪气温	V	0.03	2

注 v表示替换(初始值);R表示给参数乘以其百分比。

通过1 000次迭代计算,模型模拟结果如表2所示,模拟结果 R^2 和NSE均在可接受范围内。因此,在开都河上游运用SWAT模型进行径流模拟是可行的,可用于研究土地利用/覆被变化对径流的影响。

表2 SWAT模型模拟月值结果评价

水文站	率定期(1982—1991年)		验证期(1992—2000年)	
	R^2	NSE	R^2	NSE
大山口	0.74	0.73	0.58	0.57

3.1.2 CA-Markov模型验证

为精确地预测开都河上游地区土地利用变化状况,首先针对该流域进行初步模拟精度检验分析。选择1980年和1995年的土地利用数据进行2010年数据模拟,将1980年和1995年土地利用类型图导入IDRISI17.0软件,从1980—1995年土地利用类型图中获得土地利用变化状况,进行土地利用转移面积矩阵和转移概率矩阵分析,制作要素适宜性图集,将转移面积矩阵作为转换规则参与2010年土地利用的模拟与预测。进行2010年数据模拟之前,需要对土地利用进行各类土地利用适宜性图集的制作,选择相关的社会因子、自然因子进行空间化分析,达到当前土地利用类型在下一个状态的适宜性图集^[32-33]。由于开都河上游区域为河流源区,又有大片草原、积雪,人迹较少,因此本文只选取海拔、坡度、距离道路最近、距河流最近等相关地貌和距离因素。利用IDRISI中的collection editor模块将所有适应性图集组合,通过5×5摩尔领域作为CA-Markov模型的滤波参数,迭代周期为年间隔数15,得到2010年土地利用空间分布预测图。将实际2010年土地利用图与模拟的2010年图进行相似度分析,Kappa系数为0.831 0,即此模拟与实际几乎完全一致,因此可运用此模型进行模拟自然状态下变化的2025年土地利用类型图。

3.2 土地利用变化分析及情景设计

3.2.1 土地利用变化分析

开都河上游主要以草地为主,林地较少,耕地几乎没有(表3),将1980年和2010年2期土地利用作为SWAT土地利用输入数据,并根据模型提供的土地利用数据库对其进行重新分类。将土地利用类型图按照中国科学院资源环境科学数据中心提供的分类系统分为6类。将1980—2010年各类土地利用类型进行统计分析,草地面积总体上呈减少趋势,利用ArcGIS软件,对2期土地利用类型图进行叠加分析及合成,得到各类土地利用类型变化面积,最后生成土地利用转移矩阵(表4)。由表4可看出,开都河上游土地利用变化主要由草地转为水体和未利用地,其面积分别为106.09 km²和0.5 km²,其中草地向水体转换面积较大,可能是由于1980—2010年,气候变化明显,气温升高,导致冰川、积雪融化,产生大量水体,淹没了原来的草地。耕地和居民用地则持续30 a未发生变化,未利用地向草地转换有2.19 km²。

3.2.2 土地利用情景设计

从表4可以看出,草地呈减少趋势,为了突出分析LUCC对径流的影响,本文在相同气象数据条件下,以2010年为基础情景,设置了以下几种变化情景如图3。

情景1:自然发展情景。根据1980—2010年的土地利用变化,采用模型预测法,假设未来土地利用情况按照自然条件下的变化率变化,利用CA-Markov模型得到未来2025年的土地利用类型图,其中草地呈减少

趋势,其余5种土地利用方式均呈增加趋势。

情景2:规划发展情景。根据巴州“十三五”规划第四章土地利用结构调整与优化布局第一节对于林地和牧草地结构的调整规划,适当增加林地和草地比例。本研究参考胡荣明等^[34]对坡度与土地利用/覆被变化关系的研究,将本研究区内坡度为15°~25°的未利用地变为草地,25°~35°的未利用地变为林地。

情景3:极端草地情景。由于研究区内有中国第二大草原,大力保护并扩大草原面积,积极发展旅游业是该区未来发展的一个重要方向,由此,假设将所有未利用土地全部变为草地。

情景4:极端林地情景。在土地利用变化与水文响应关系的研究中,森林的水文效应受到极大关注,尤其是森林砍伐对水资源的影响。基于此,将开都河上游流域所有未利用土地转变为林地,作为极端土地利用变化情景之一。

表3 1980、2010年及各情景下土地类型占比 %

土地类型	耕地	林地	草地	水体	居民地	未利用土地
1980年	0.01	0.46	62.96	27.69	0.07	8.81
2010年	0.01	0.48	62.86	27.68	0.07	8.90
情景1	0.04	0.82	58.09	30.70	0.10	10.25
情景2	0.01	6.44	64.47	27.68	0.07	1.33
情景3	0.01	0.48	71.76	27.68	0.07	0
情景4	0.01	9.38	62.86	27.68	0.07	0

表4 1980—2010土地利用转移矩阵 km²

土地类型	耕地	林地	草地	水体	居民地	未利用地
耕地	0.64	-	-	-	-	-
林地	-	70.73	-	-	-	-
草地	-	-	11 219.51	30.72	-	2.19
水体	-	-	106.09	4 886.89	-	10.2
居民地	-	-	-	-	4.44	-
未利用地	-	-	0.5	-	-	1 786

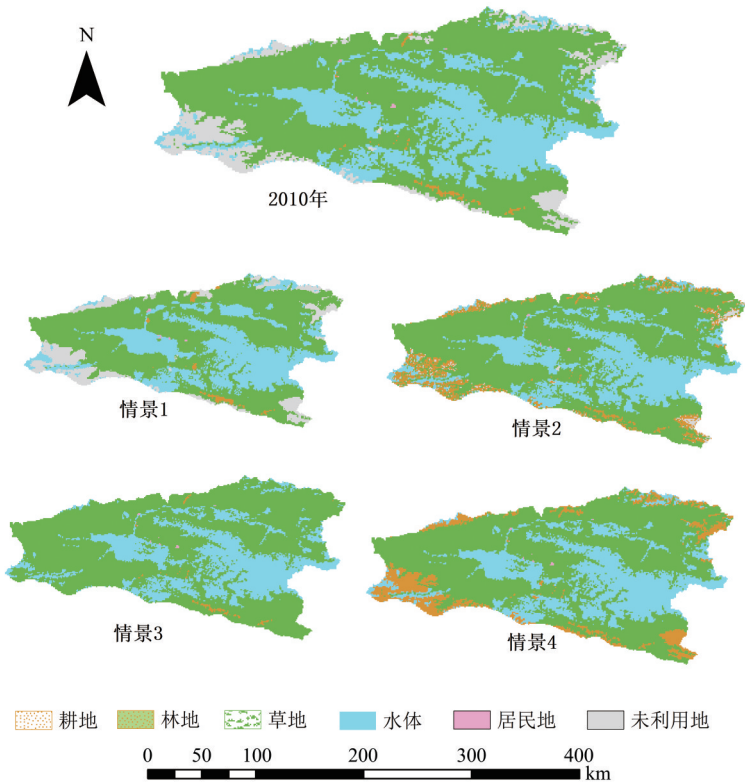


图3 不同情景土地利用类型图

3.3 土地利用变化对径流的影响

为定量分析未来土地利用变化对开都河流域径流的影响,采用固定的气象资料,将设定的土地利用情景方案输入到已验证的SWAT模型中并分析。

3.3.1 不同土地利用情景下的多年均径流对比

基于4种土地利用类型假设情景,驱动SWAT模型模拟得到开都河上游多年平均径流量变化(表5)。对比分析基础情景2010年与各个情景下的多年平均径流量,总体来说,与2010年基础情景相比,所有的情景平均径流量都呈减少趋势,减少速度排序为情景1(自然发展情景)>情景4(极端林地情景)>情景2(规划发展情景)>情景3(极端草地情景)。情景1的平均径流量减少了8.28 m³/s,变化率为-7.43%,究其原因主要是由于模拟的未来土地利用情景中草地面积减少,向耕地、林地及未利用土地转变,导致流域产流能力减弱,因此流域径流量减少,这与过往大量研究得出的林地和耕地具有抑制产流的结论吻合^[18]。在情景2中,多年平均径流量减少了7.88 m³/s,变化率为-7.08%,林地和草地面积同时增加,林地增加明显,草地略微增加,与情景3对比,将所有未利用地转变为草地,其径流量减少程度低于情景2,并且情景4中,所有未利用地变为林地,径流变化较大,减少量达8.23 m³/s,变化率为-7.39%,说明林地对径流的影响最大,林地消耗水资源的量大,在该地区不适宜种植大量林地。通过4个不同假设情景的对比分析发现,其多年平均流量差别略微,原因在于情景假设发生变化的部分主要基于未利用地,事实上整个研究区未利用地的面积仍然相对较小(表3),未利用地在2010年占8.9%,将未利用地转变为其他用地仍然是草地面积占大部分,但相对于所有情景下,将未利用地变为草地是最合理的,并且由情景3结果可知,在这片区域中合理种植草地,对于径流的影响是最小的,此研究结果可为今后如何分配该区域的未利用地提供一定参考。

表5 不同土地利用情景下的径流模拟结果及变化

情景	2010年	情景1	情景2	情景3	情景4
多年平均流量/(m ³ ·s ⁻¹)	111.36	103.08	103.48	103.77	103.13
变化率/%		-7.43	-7.08	-6.82	-7.39

3.3.2 不同土地利用情景下的多月平均径流分析

由于土地利用方式的不同,流域下垫面的状态也会不同,进而1 a内不同阶段的水循环过程也会发生变化,这对流域径流量的分布有显著影响。本文对流域内4种不同情景下的土地利用方式与基础情景2010年作多月平均径流对比分析,将设置的不同土地利用情景模拟月均径流量减去基准情景的月均径流量的差值作为统计变化量(图4)。由图4可知,所有情景相对于基础情景各月均径流的变化与年均径流变化结果相一致,都呈减少趋势。从年内分布整体看,4—9月影响较大,10月—次年3月影响较小。不同情景下月均径流的变化量又有所不同。5—9月的径流变化是最为明显的,该时期,气温升高,降水量充足,融冰融雪量也较大,是河流的丰水期,不同土地利用类型变化对径流的影响相对敏感,7月变化量最大,6月和8月次之,5月和9月再次之。在5—9月中,月均径流变化量结果仍然是情景1>情景4>情景2>情景3,草地退化,林地、耕地及未利用地面积增加,耗水量最大,除了林地对径流会产生滞留影响外,未利用地的增加会导致蒸散发增加,而耕地面积的增加,则会使一部分径流作为灌溉水进入土壤和地下水,这些都对径流起到一定的削减作用。

在1—3月和11—12月的枯水期,土地利用方式变化对径流的影响表现为情景3>情景2>情景4>情景1,与丰水期结果完全相反,不过各情景之间的差别远小于丰水期,说明这个时期各用地类型改变对径流的影响是相对不敏感的,但仍有些许差别。其中情景3的影响最大,说明这个时期草地对径流的影响要大于林地,草地通过拦截地表径流,进而加大地表径流的下渗量,同时将地表径流转化到土壤中,起到涵养水源的效果,而林地则因季节原因,冠层拦截作用减弱,对水分涵养减低。

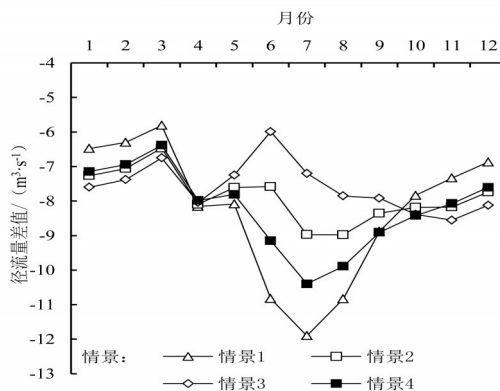


图4 不同土地利用情景下多月均径流量变化

综上所述,从时间分布来看,4—9月影响最大,10—12月次之,1—3月最小;从各情景对比看,情景1的影响随季节变化最大,情景3的影响随季节变化最小,体现了伴随季节转换和水量充沛程度的不同,草地和林地作为该区最主要的调控因子对河流径流的影响变化。对研究区原有草地的减少(情景1)或将未利用地最大程度地开发为林地(情景4),均会引起河流夏季水量较大幅度减少,但若将该区未利用地最大程度开发为草地(情景3),却并不会引起河流水量在全年内的大幅变动,即草地的水源涵养功能对河流可以起到更大的维持作用,并且该研究区处于草地自然保护区,因此可以考虑在未来规划发展中合理开发未利用地为草地。

4 讨论

运用 SWAT 模型可以较好的模拟研究区径流变化,但在模型验证期 R^2 和 NSE 稍偏低,对比模拟整个时段的年均径流量发现 1994、1999 和 2000 年均出现较大径流量,大于 $139.50 \text{ m}^3/\text{s}$,均处于验证阶段,通过查阅相关文献[17,31]发现由于在验证期中包括一个降雨异常高值年(1994 年),异常高值年会使 SWAT 模型模拟降低,并且具有延续性,影响次年模拟值,但是为了保证模拟结果的完整性以及一致性并没有剔除这 2 个异常年份,但总体上模拟精度同样达到接受标准。通过对比各个情景下多年平均径流变化和年内逐月径流变化发现,在年时间尺度上林地对径流影响较大,林地的增加会使得该区域径流大幅度下降,这与以往研究发现林地对涵养水源最强相一致^[2,10,35],但该研究区在枯水期是草地对径流影响最大,此区域草地是对径流最主要的调控因子,该研究区位于海拔较高区域,草地面积最大,原有草地的减少会引起夏季径流较大幅度减少,但若将未利用地最大程度地开发为草地,却不会造成河流水量在全年内的大幅波动。因此该研究区不适宜种植大面积林地,对研究区的原有草地应加大保护力度,谨慎开发。

5 结论

本研究以干旱区典型流域开都河上游为研究区,以土地利用方式改变对河流径流的影响分析为重点,假设不同土地利用情景并驱动构建 SWAT 水文模型从而获得该流域未来土地利用变化影响下的河流径流及变化。

1)开都河流域大山口水文站月径流模拟率定期决定系数 R^2 和纳什效率系数 NSE 分别为 0.74 和 0.73;验证期 R^2 和 NSE 为 0.58 和 0.57,模拟结果可以接受,SWAT 模型可用于此流域开展水文模拟。

2)采用 CA-Markov 模拟 2010 年土地利用图, $Kappa$ 系数达到 0.83,与真实图一致性较高,可用于模拟未来土地利用类型图。研究区现有用地类型主要表现为草地占比最大(62.86%),水体次之(27.68%),以及未利用土地占 8.9%,林地和居民点分别为 0.46%和 0.07%,耕地面积所占比例最少,仅占 0.01%。1980—2010 年土地利用转移矩阵结果显示,在开都河上游区土地利用变化主要表现为草地转换为水体和未利用地,其转换面积分别为 106.09 km^2 和 0.5 km^2 ,耕地和居民用地则持续 30 a 未发生变化,未利用地向草地转换 2.19 km^2 。

3)基于 4 种不同土地利用情景的径流模拟分析表明,相较于基准年(2010 年),预测年(2025 年)的年均径流量均表现为减少,减少程度丰水季表现为情景 1(自然发展情景) > 情景 4(极端林地情景) > 情景 2(规划发展情景) > 情景 3(极端草地情景),而枯水季则完全相反;从其季节分配来看,各类土地类型在夏季对径流影响最大,冬季影响最小。

参考文献:

- [1] 谢平, 窦明, 朱勇, 等. 流域水文模型—气候变化和土地利用/覆被变化的水文水资源效应[M]. 北京: 科学出版社, 2010: 8-12.
- [2] 李晓娟. 基于 SWAT 模型的沔河流域土地利用变化对径流的影响[D]. 西安: 西北大学, 2018: 1-4.
- [3] 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.
- [4] 金鑫, 陈琼, 金彦香. 土地利用/覆被数据精度对流域水文过程模拟的影响研究[J]. 灌溉排水学报, 2018, 37(2): 108-115.
- [5] SAJIKUMAR N, REMYA R S. Impact of land cover and land use change on runoff characteristics[J]. Journal of Environmental Management, 2015, 161: 460-468.
- [6] 石培礼, 李文华. 森林植被变化对水文过程和径流的影响效应[J]. 自然资源学报, 2001, 16(5): 481-487.

- [7] 张蕾娜,李秀彬. 云州水库流域土地利用变化水文效应的特征参数分析[J]. 地学前缘,2003, 10(3), 178.
- [8] 李娜,王修贵,罗强,等. 基于 SWAT 和 CLUE-S 模型的不同土地利用方式对排涝模数的影响[J]. 灌溉排水学报,2019, 38(2): 76-83.
- [9] 史晓亮,杨志勇,严登华,等. 滦河流域土地利用/覆被变化的水文响应[J]. 水科学进展,2014, 25(1): 21-27.
- [10] 冯宝平,梁行,曾灼. 基于 SWAT 模型的济南南部山区土地利用优化研究[J]. 灌溉排水学报,2018, 37(5): 121-128.
- [11] LAURENT A, TUSHAR S, MANASHI P. et al. Streamflow Response to Potential Land Use and Climate Changes in the James River Watershed, Upper Midwest United States[J]. Journal of Hydrology: Regional Studies, 2017, 14: 150-166.
- [12] DENG Z M, ZHANG X, DAN L, et al. Simulation of Land Use/Land Cover Change and Its Effects on the Hydrological Characteristics of the Upper Reaches of the Hanjiang Basin[J]. Environmental Earth Science, 2015, 73: 1 119-1 132.
- [13] ZANG C, LIU J, GERTEN D, et al. Influence of Human Activities and Climate Variability on Green and Blue Water Provision in the Heihe River Basin, NW China[J]. Journal of Water & Climate Change,2015, 6(4): 800-815.
- [14] 邱国玉,尹婧,熊育久,等. 北方干旱化和土地利用变化对泾河流域径流的影响[J]. 自然资源学报, 2008, 23(2): 211-218.
- [15] XU C C, ZHAO J, DENG H J, et al. Scenario-based Runoff Prediction for the Kaidu River Basin of the Tianshan Mountains[J]. Northwest China Environment Earth Science, 2016, 75: 1 126.
- [16] 王莉. 基于 SWAT 模型的气候变化对水资源影响研究:以开都河为例[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2012.
- [17] 何旦旦. 基于统计降尺度—SWAT 水文模型的开都河流域未来气候预估与径流模拟[D]. 乌鲁木齐:新疆大学, 2018.
- [18] 韩强,薛联青,刘远洪,等. 塔里木河中上游土地利用变化的径流响应[J]. 干旱区地理, 2017, 40(6): 1 165-1 170.
- [19] 权瑞松. 基于情景模拟的上海市土地利用变化预测及其水文效应[J]. 自然资源学报, 2018, 33(9): 1 552-1 562.
- [20] 王中根,刘昌明,黄友波. SWAT 模型的原理、结构及应用研究[J]. 地理科学进展,2003, 22(1): 79-86.
- [21] 张东,张万昌,朱利,等. SWAT 分布式流域水文物理模型的改进及应用研究[J]. 地理科学, 2005, 25(4): 434-439.
- [22] SANTHI C, ARNOLD J G, WILLIAMS J R, et al. Validation of the Swat Model on a Large River Basin With Point and Nonpoint Sources[J]. Journal of the American Water Resources Association, 2001, 37(5): 20.
- [23] 徐宗学. 水文模型[M]. 北京: 科学出版社, 2009: 343-384.
- [24] KIDANE W, BOGALE G. Effect of Land Use Land Cover Dynamics on Hydrological Response of Watershed: Case Study of Tekeze Dam Watershed, Northern Ethiopia[J]. International Soil and Water Conservation Research, 2017, 5: 1-16.
- [25] NASH J E, SUTCLIFFE R M. River Flow Forecasting through Conceptual Models Part 1—A Discussion of Principles[J]. Journal of Hydrology, 1970, 10(3): 282-290.
- [26] FAN F L, WENG Q H, YUN P, et al. Land Use and Land Cover Change in Guangzhou, China, from 1998 to 2003, Based on Landsat TM/ETM+ Imagery[J]. Sensors, 2007, 7(7): 125-136.
- [27] 杨国清,刘耀林,吴志峰. 基于 CA-Markov 模型的土地利用格局变化研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2007, 32(5): 414-418.
- [28] 岳东霞,杨超,江宝骅,等. 基于 CA-Markov 模型的石羊河流域生态承载力时空格局预测[J]. 生态学报, 2019, 39(6): 1-11.
- [29] COHEN J. A Coefficient agreement for nominal data[J]. Educational and Psychological, 1960, 2(1): 37-46.
- [30] 布仁仓,常禹,胡远满,等. 基于 Kappa 系数的景观变化测度:以辽宁省中部城市群为例[J]. 生态学报, 2003, 25(4): 778-784.
- [31] 白淑英,王莉,史建桥,等. 基于 SWAT 模型的开都河流域径流模拟[J]. 干旱区资源与环境,2013, 27(9), 79-84.
- [32] 王友生,余新晓,贺康宁,等. 基于 CA-Markov 模型的藉河流域土地利用变化动态模拟[J]. 农业工程学报,2011, 27(12): 330-337.
- [33] SOPHIA S R, NDAMBUKI J M. Accuracy Assessment of Land Use/Land Cover Classification Using Remote Sensing and GIS[J]. International Journal of Geosciences, 2017, 8(4): 611-622.
- [34] 胡荣明,李锐,郭斌,等. 坡度对土地里/覆被变化的影响研究[J]. 水土保持通报, 2011, 31(6): 203-206.
- [35] 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, 2017: 39-58.

Influence of Future Land Use Change on Runoff in the Upper Reaches of Kaidu River Based on SWAT Model

LUO Yingxue, XU Changchun*, YANG Qiuping, YANG Yuanyuan, ZHANG Jinxia

(Xinjiang University, Urumqi 830046, China)

Abstract: **【Objective】**Revealing the change of watershed runoff under the change of land use has important practical significance for the planning and rational utilization of water resources in the basin. **【Method】**Taking the upper reaches of the Kaidu River as the research object, this paper used the distributed hydrological model SWAT as a tool, and used the CA-Markov model prediction method, the local land use planning requirements and the extreme land use scenario method to set up 2025 land use scenarios. These include natural development scenarios, planned development scenarios, extreme grassland scenarios and extreme forestland scenarios. **【Result】**① The SWAT model constructed was statistically acceptable calibration period ($R^2=0.74$, $NSE=0.73$) and validation period ($R^2=0.58$, $NSE=0.57$). ② The Kappa coefficient of the 2010 land use type map simulated by the CA-Markov model was 0.83, which was highly accurate and can be used to predict the land use type in 2025. The change of land use type from 1980 to 2010 was mainly reflected in the conversion of grassland area into water body and unused land. The conversion area was 106.09 km² and 0.5 km² respectively. ③ Compared with the base year (2010), the annual average runoff under each land use scenario is reduced, the natural development scenario was the fastest, and the extreme grassland scenario was the slowest; From the perspective of the wet season and the dry season, the monthly average runoff changes in each of the two periods are completely opposite. In terms of seasonal distribution, the land use types have the greatest impact on runoff changes in summer and less in winter. **【Conclusion】** Grassland in this area was the most important regulation factor for runoff. The reduction of original grassland will cause a large decrease in summer runoff. For unused land, it can be considered as grassland.

Key words: land use; SWAT model; CA-Markov model; runoff simulation; Kaidu river

责任编辑:白芳芳