

# 1980—2020年渭河中上游流域土地利用演变及其对径流的影响

张晔<sup>1</sup>, 侯精明<sup>1</sup>, 龚佳辉<sup>1</sup>, 周聂<sup>1</sup>,

韩浩<sup>2</sup>, 张兆安<sup>3</sup>, 高徐军<sup>4</sup>, 刘园<sup>4</sup>, 王剑<sup>5</sup>, 孙继鑫<sup>5</sup>

(1.西安理工大学 省部共建西北旱区生态水利国家重点实验室,

陕西 西安 710048; 2.中国科学院 地球环境研究所 黄土与第四纪地质国家

重点实验室, 陕西 西安 710061; 3.河海大学 江苏 南京 210098; 4.中国电建集团

西北勘测设计研究院有限公司, 陕西 西安 710065; 5.西安航天天绘数据技术有限公司, 陕西 西安 710100)

**摘要:** [目的] 研究渭河中上游流域不同土地利用情景下径流的响应规律, 为渭河中上游流域的发展规划及水资源管理提供科学支撑。[方法] 基于 1980—2020 年土地利用数据, 分析流域 40 a 的土地利用变化特征, 并结合 SWAT 模型, 设置 5 种历史土地利用情景、两种综合土地利用情景和 3 种极端土地利用情景, 探究径流在不同土地利用情境下的响应。[结果] ①流域 40 a 间耕地、水域及未利用土地面积逐渐减小, 林地、草地和居民用地面积逐渐增加。②1980—2020 年共 5 个时期模拟年均径流深分别为 72.24, 72.27, 72.31, 71.86, 72.25 mm, 退耕还林、退耕还草、耕地型、林地型及草地型模拟年均径流深分别为 68.59, 69.70, 72.60, 64.81, 66.82 mm。[结论] 40 a 间土地利用类型的变化对渭河中上游流域径流的影响小于 10%; 退耕还林、退耕还草对径流主要起抑制作用。在 3 个极端土地利用情境下径流大小为: 耕地型 > 草地型 > 林地型, 且耕地型与林地型、草地型情境下的差异明显。

**关键词:** 土地利用; 转移矩阵; 径流; SWAT 模型

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-288X(2022)05-0231-07

**中图分类号:** P333

**文献参数:** 张晔, 侯精明, 龚佳辉, 等. 1980—2020 年渭河中上游流域土地利用演变及其对径流的影响[J]. 水土保持通报, 2022, 42(5): 231-237. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.20220922.002; Zhang Ye, Hou Jingming, Gong Jiahui, et al. Land use evolution and its impact on runoff response in middle and upper reaches of Weihe River basin during 1980—2020 [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022, 42(5): 231-237.

## Land Use Evolution and Its Impact on Runoff Response in Middle and Upper Reaches of Weihe River Basin During 1980—2020

Zhang Ye<sup>1</sup>, Hou Jingming<sup>1</sup>, Gong Jiahui<sup>1</sup>, Zhou Nie<sup>1</sup>,

Han Hao<sup>2</sup>, Zhang Zhaoan<sup>3</sup>, Gao Xujun<sup>4</sup>, Liu Yuan<sup>4</sup>, Wang Jian<sup>5</sup>, Sun Jixin<sup>5</sup>

(1.State Key Laboratory of Ecological Water Resources in Northwest Arid Region,

Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China; 2.State Key Laboratory of Loess and Quaternary Geology, Institute of Earth Environment, Chinese Academy of Sciences, Xi'an, Shaanxi 710061, China;

3.Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China 4.China Northwest Architecture Design And Research Institute Co.Ltd, Xi'an, Shaanxi 710065, China; 5.Xi'an Aerospace Tianhui Data Technology Co., Ltd, Xi'an, Shaanxi 710100, China)

**Abstract:** [Objective] The response law for runoff under different land use scenarios in the middle and upper reaches of the Weihe River was analyzed in order to provide scientific support for development planning and water resource management of the middle and upper reaches of the Weihe River. [Methods] Based on land use data from 1980 to 2020, the characteristics of land use change in the Weihe River basin over the past 40 years were analyzed. the SWAT model was used to set up five historical land use scenarios, two comprehensive land use scenarios, and three extreme land use scenarios in order to determine the response of runoff under

收稿日期: 2022-02-24

修回日期: 2022-04-08

资助项目: 中德合作交流项目“城市洪涝高分辨率数值模拟和预报方法”(M-0427); 国家自然科学基金项目(52079106, 52009104); 陕西省重点研发计划(2021SF-484)

第一作者: 张晔(1998—), 女(汉族), 陕西省西安市人, 硕士研究生, 研究方向为水力学及河流动力学研究。Email: 727623719@qq.com。

通信作者: 侯精明(1982—), 男(汉族), 河北省怀安人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事地表水动力及其伴随过程数值模型研究。Email: jingming.hou@xaut.edu.cn。

different land use scenarios. [Results] ① During the past 40 years, the areas of cultivated land, water, and unused land gradually decreased, while the areas of forest land, grassland, and residential land gradually increased. ② From 1980 to 2020, the simulated annual average runoff depths were 72.24, 72.27, 72.31, 71.86 mm, and 72.25 mm in five periods, respectively. The average annual runoff depths were 68.59 mm, 69.70, 72.60, 64.81, and 66.82 mm, respectively. [Conclusion] The SWAT model had good adaptability for the middle and upper reaches of the Weihe River. The impact of land use type changes on runoff in the middle and upper reaches of the Weihe River was less than 10%. Returning farmland to forest and grassland was mainly responsible for inhibiting runoff. In the three extreme land use scenarios, runoff size followed the order of cultivated land type > grassland type > forest type, and the differences between cultivated land and forestland and grassland were obvious.

**Keywords:** land use; transition matrix; run-off; soil and water assessment tool (SWAT) model

中国自改革开放后快速发展,一方面随城市人口的增加<sup>[1-2]</sup>,城市区域范围不断扩张,导致土地利用发生显著变化<sup>[3]</sup>;另一方面,对森林过度砍伐、毁林造田以及过度垦荒等行为造成草地林地等类型地块不断减少<sup>[4]</sup>,并且严重影响流域生态环境、水文过程,从而导致水土严重流失和极端水文现象频发<sup>[5-8]</sup>,对社会经济发展造成不利影响。

近年来,为改善生态环境和保护水资源,国家实施了以退耕还林为主的生态治理项目,通过退耕还林、还草等措施使得部分流域生态环境及水文过程得到有效改善<sup>[9-10]</sup>,同时使得所治理流域径流发生显著变化。众多学者对治理流域径流变化这一问题进行了深入研究,如袁宇志等<sup>[11]</sup>证明了在流溪河流域,耕地、草地情景下,径流分别增加 2.7% 和 0.5%,林地情景下使得径流减少 0.7%,表明林地对于径流量有着一定的截流能力。林凯荣等<sup>[12]</sup>采用改进的 SCS 月水量平衡模型对东江流域的研究表明,土地利用变化使流域径流量呈增加趋势。史晓亮等<sup>[13]</sup>以滦河流域为研究区域,发现在土地利用类型中林地和草地是导致径流量变化的主要因素,其中林地变化是导致径流量增加的最主要原因之一。韩强等<sup>[14]</sup>对干旱地区塔里木河流域不同土地利用条件下径流量的变化进行仿真模拟及分析,其结果表明产流量的总体趋势为:草地 > 耕地 > 林地。巨鑫慧等<sup>[15]</sup>对于城市化进程加快而导致地表径流发生变化的情况进行研究,随着京津冀城市群地区不透水地表面积急剧增加,径流量呈逐渐增长的趋势,这可能会导致洪涝灾害风险的增加。Lin 等<sup>[16]</sup>基于晋江流域,对日尺度上的径流对土地利用变化的响应做了相关研究,证明在森林减少,农田及城市化面积增加的基础上,日径流量的增长率大于年、月径流量增长率。Khare 等<sup>[17]</sup>应用 SCS-CN 模型分析了印度 Narmada 河径流量在不同土地利用/土地覆盖下的变化,结果表明在研究区域内,由于土地利用的变化,地表径流在 1990—2000 年

增加了 5%,并预估在之后十年增加近一倍。由此可见,不同地区土地利用变化对流域的水文过程有着不同程度的影响,甚至在不同区域呈现出截然不同的效果。

以上研究区域虽然涉及多个地点,但对于渭河中上游流域的研究仍十分有限。又因为近年来渭河中上游流域土地利用发生急剧变化以及气候变化等原因,导致旱涝灾害频发且水土流失严重<sup>[18]</sup>,对关中平原工业用水、农业用水和生活用水产生极大影响。因此,对于渭河中上游流域径流对于土地利用变化响应的研究刻不容缓。本文分析了渭河中上游流域 1980—2020 年土地利用变化[land use/cover change (LUCC)],并采用历史反演法和极端土地利用法,结合 SWAT 模型模拟不同土地利用情境对径流的影响,探究不同情境下径流的响应及极端土地利用对径流的影响,以期为渭河中上游流域的发展规划及水资源管理提供科学支撑。

## 1 研究区概况

渭河是黄河最大的支流,流经甘肃省、宁夏回族自治区和陕西省中部,渭河流域上游地区以丘陵为主,北部中上游横跨黄土高原,中部为黄土沉积地区,关中平原和秦岭南部的河谷漫滩地区受渭河支流的影响<sup>[19-20]</sup>。关中平原地区有 76 个主要城市,总人口 2 200 万,该区域历史上曾发生过多的大洪水,并具有时间短、高径流峰值和高含沙量的特点<sup>[21-22]</sup>。咸阳站以上渭河流域部分位于 33.7°—36.2°N, 104.0°—108.7°E 范围内。流域面积 46 827 km<sup>2</sup>,年平均降水量 566.6 mm<sup>[23]</sup>。一年中的降雨分布差异很大,与春夏秋三季相比,冬季降雨量较少,流域内全年径流分布极不均匀。渭河咸阳站以上流域提供关中平原的生活、农业和工业用水,水土保持措施大多集中在咸阳站以上流域。因此,本文选择咸阳站以上的渭河流域区域作为研究区域(图 1)。



图1 渭河上游流域水文站及气象站分布

## 2 数据来源

本文使用联合国粮食及农业组织 (FAO) 和维也纳国际应用系统研究所 (IIASA) 构建的全球协调世界土壤数据库 (HWSD) 构建研究区域土壤数据库, 该土壤数据是分辨率为 1 000 m 的栅格数据。以渭河中上游流域为界对其进行裁剪, 得到渭河中上游流域土壤类型分布 (图 2)。

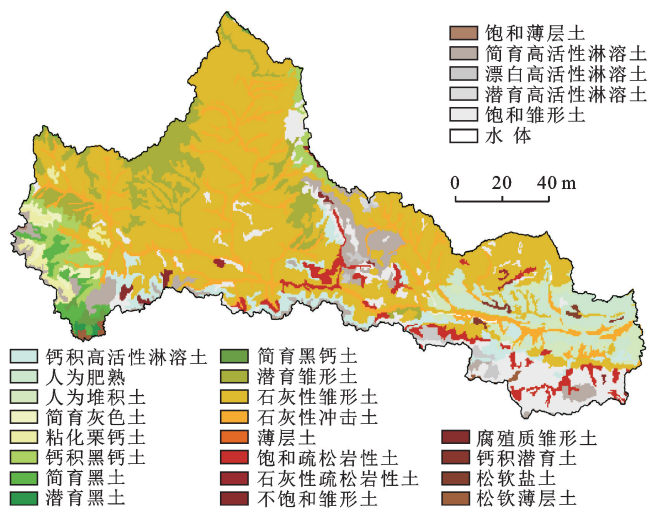


图2 渭河中上游流域土壤类型分布

关于地形数据, 通过地理空间数据云 (<http://www.gscloud.cn/>) 下载分辨率为 30 m 的数字高程模型 (DEM) 数据 (图 3)。气象数据包括从中国气象数据共享网下载的 11 个气象站 2000—2020 年的日降水量、日最高和最低温度以及太阳辐射数据。林家村和咸阳水文站 2000—2020 年的年径流数据来自《黄河流域水文年鉴》。通过地理空间数据云 (<http://www.gscloud.cn/>) 下载 1980, 1990, 2000, 2010, 2020 年 5 个时期研究区域的土地利用数据并对数据进行解译和重分类, 得到研究区域的土地利用状况, 包括耕地、林地、草地、水域、居住用地和未利用地 6

大类, 不同时期的土地利用数据空间分辨率均为 1 000 m (图 4)。

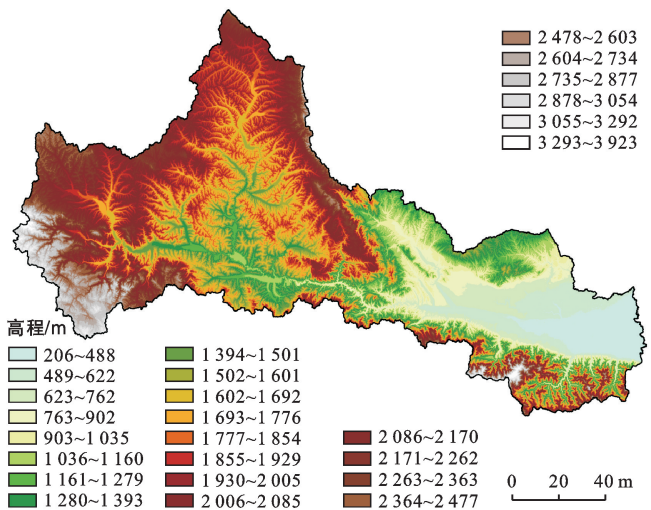


图3 渭河中上游地形分布

## 3 结果与分析

### 3.1 土地利用变化

研究区域土地利用类型主要以耕地、草地和林地为主, 并兼有水域、居民用地和未利用土地。本文将 1980—2020 年共分为 4 个时期进行分析, 使用土地利用类型转换的百分比制作其土地利用转移矩阵见表 1。

在这 4 个时期内, 耕地和未利用土地呈现出先减小后增多, 然后又减小的趋势, 耕地占土地总面积比例分别为: 44.72%, 44.67%, 44.95%, 44.02%, 42.61%, 未利用土地占土地总面积比例分别为: 0.20%, 0.197%, 0.197%, 0.23%, 0.17%; 林地和居民用地在这 4 个时期内逐渐增多, 其占土地总面积比例分别由 1980 年的 16.70%, 2.46% 增加到 2020 年的 17.14%, 3.93%; 草地和水域在这期间呈现出先减小后增多的趋势, 其占土地总面积比例分别由 1980 年的 35.09%, 0.84% 减小到 2000 年的 34.65%, 0.74%, 后又增加到 2020 年的 35.32%, 0.83%。

### 3.2 降雨与径流变化趋势分析

通过线性回归法对 2000—2020 年逐月降雨和径流的变化趋势进行分析 (图 5), 并采用 Mann-Kendall 趋势检验法分别对其进行显著性检验。通过计算, 降雨和径流的线性回归斜率分别为 0.002, 0.001 (均为正), 说明渭河中上游流域在 2000—2020 年降水及径流均呈现出增加趋势。降雨的趋势检验  $Z$  值为 0.88 ( $|Z| < 1.96$ ), 并未通过置信度为 95% 的显著趋势检验, 说明降雨在这 20 a 间的上升趋势并不显著。径流的趋势检验  $Z$  值为 5.55 ( $|Z| > 1.96$ ), 通过显著趋势检验, 置信度为 95%, 说明径流在 2000—2020 年呈现出显著的增加趋势。



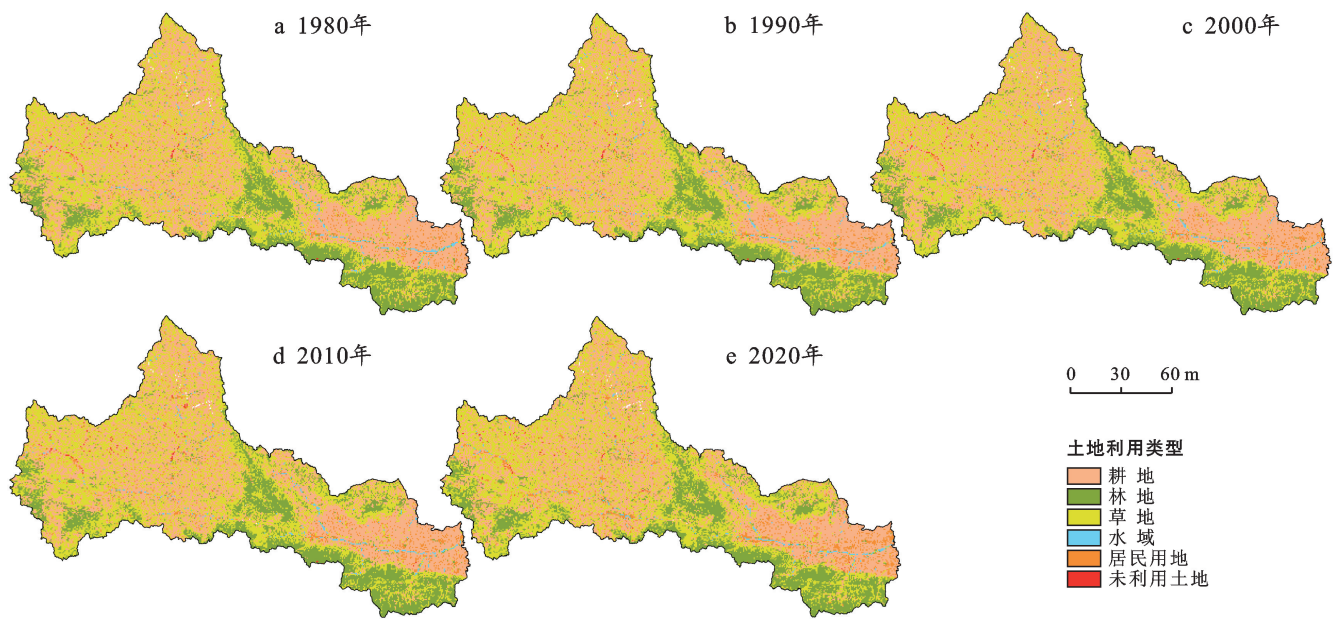


图 4 渭河中上游流域 1980—2020 年土地利用类型变化趋势

表 1 1980—2020 年渭河中上游流域土地利用转移矩阵 %

类 型	1980—1990 年						1990—2000 年					
	耕 地	林 地	草 地	水 域	居民用地	未利用土地	耕 地	林 地	草 地	水 域	居民用地	未利用土地
耕 地	99.69	0.01	0.06	0.08	0.16	0	99.474	0.029	0.068	0.015	0.414	0
林 地	0.013	99.815	0.16	0.012	0	0	0.01	99.9	0.03	0.03	0.03	0
草 地	0.092	0.103	99.781	0.024	0	0	1.294	0.061	98.621	0.012	0.012	0
水 域	7.46	0.5	2.57	89.47	0	0	7.13	0	1.35	91.52	0	0
居民用地	0	0	0	0	100	0	0	0	0	0	100	0
未利用土地	1.05	0	1.06	0	0	97.89	0	0	0	0	0	100

类 型	2000—2010 年						2010—2020 年					
	耕 地	林 地	草 地	水 域	居民用地	未利用土地	耕 地	林 地	草 地	水 域	居民用地	未利用土地
耕 地	97.85	0.29	1.13	0.16	0.5	0.07	59.043	4.552	29.414	1.083	5.732	0.176
林 地	0	99.466	0.432	0.026	0.076	0	10.956	60.843	27.253	0.206	0.709	0.033
草 地	0.063	0.2	99.682	0.018	0.025	0.012	35.11	13.64	48.73	0.43	1.91	0.18
水 域	1.16	0	0.28	98.56	0	0	53.26	5.05	18.86	11.75	11.06	0.02
居民用地	0	0	0.16	0	99.84	0	62.389	2.731	15.045	2.123	17.448	0.264
未利用土地	0	0	0	0	0	100	47.99	4.13	33.36	3.46	3.14	7.92

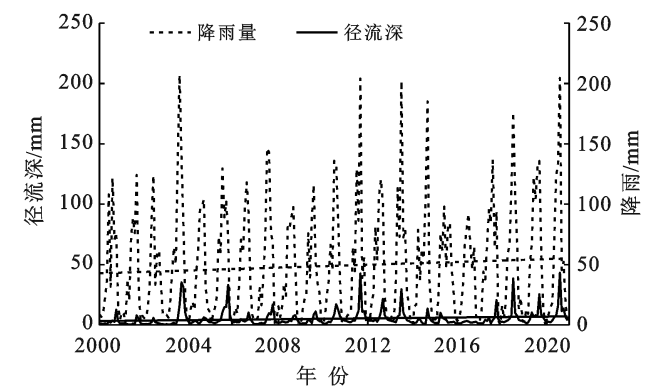


图 5 2000—2020 年渭河中上游流域降雨和径流变化趋势

降雨和径流的线性回归分析结果显示其在 0.05 的水平下,斜率 0.09,相关系数  $R=0.63>r_{0.05}(n-2)=0.12$ ,表明降雨和径流有显著的线性回归关系,降雨是影响径流的主要因素之一。其线性回归方程如公式(1)所示,其中  $x,y$  分别为降雨量与径流深。

$$y=0.75+0.09x \tag{1}$$

根据上式,对径流进行模拟及分析,2000 年 1 月实测降雨为 8.745 mm,通过公式(1)计算所得 1 月径流深为 1.537 mm,而实测径流深为 0.909 mm。模拟值与实测值相差 0.628 mm,说明径流不仅仅受到降雨的影响。综上所述,虽然降雨是影响径流变化的主



要因素之一,但其他因素对径流变化也有一定程度上的影响,主要体现为受人类活动影响的土地利用变化对径流的影响。

3.3 模型建立

根据获得的 2000—2020 年气象资料、土壤数据及 2020 年土地利用数据建立渭河中上游流域 SWAT 模型。考虑到渭河流域的实际情况并结合相关文献<sup>[24]</sup>,本文设置土地利用阈值为 10%,土壤面积阈值为 15%,坡度阈值为 10%。采用 SWAT-CUP 软件中的拉丁超立方体抽样方法(Sufi)进行模型参数优选及率定,结合流域出口咸阳站 2000—2020 年逐月实测径流量分别对 2003—2013 年和 2014—2020 年进行校准和验证(其中 2000—2002 年作为模型预热期)。运用纳什效率系数(NSE)和判定系数  $R^2$  作为评价模型的标准,通常  $NSE>0.5$ , $R^2>0.6$  时<sup>[25]</sup>,认为模型模拟效果较好,其模型评价结果见表 2。本文所建立的 SWAT 模型率定期及验证期的 NSE 值分别达到 0.70,0.67, $R^2$  值分别达到 0.74,0.86,均大于评价标准。实测值与模拟值对比情况见图 6,其径流与降水也有着良好的一致性,当降水量较大时,流量也明显较大,在率定期和验证期中,模拟值与实测值拟合程度均较高,模型表现良好。

表 2 渭河中上游流域 SWAT 模型模拟结果评价				
项 目	率定期		验证期	
	NSE	$R^2$	NSE	$R^2$
2020 年	0.70	0.74	0.67	0.86

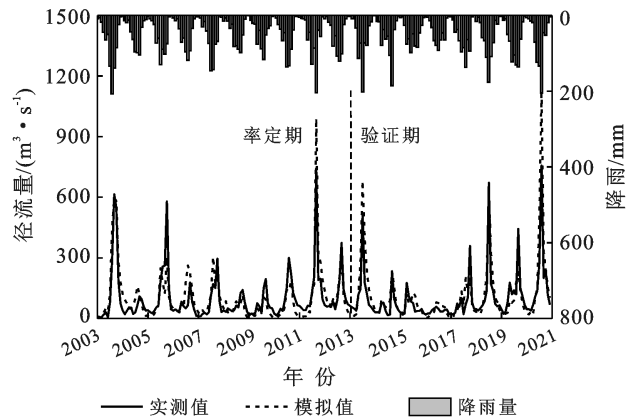


图 6 渭河中上游流域 SWAT 模型实测值与模拟值比较

3.4 径流对土地利用变化的响应

3.4.1 情景设置 由土地利用转移矩阵可以看出,在一个时期内多种土地利用类型相互转化影响着径流,但渭河流域在 1980—2010 年共 4 个时期内,其土地

利用变化小于 15%,从而无法有效说明径流在单一土地利用类型下的响应关系。为了解决这个问题,本文构建两种综合土地利用情景,并采用极端土地利用法构建 3 种极端土地利用类型情景。由土地利用变化分析可知,研究区域内主要土地利用类型为耕地、林地和草地,在 1980—2020 年共 5 个时期内这 3 种土地利用类型面积之和均占流域总面积的 90% 以上。因此,本文将流域内所有土地利用类型转化为单一耕地、林地、草地,构建了 3 种渭河流域极端土地利用情景即耕地型、林地型、草地型,其模拟结果可为未来土地利用规划提供一定的参考。由于这 3 种极端土地利用情景无法在现实土地利用规划中实现,本文结合研究区域水土保持现状及未来的工作趋势,以最近一期土地利用数据(Landuse 2020)为基础,将现有全部耕地分别转化为林地、草地,构建退耕还林、退耕还草两种综合土地利用情景,主要情景设置见表 3。

表 3 渭河中上游流域土地利用变化情景设置		
情 景	情景说明	情景变化
情景 1	耕地型	所有土地利用类型转化为耕地
情景 2	林地型	所有土地利用类型转化为林地
情景 3	草地型	所有土地利用类型转化为草地
情景 4	退耕还林	现有耕地转化为林地
情景 5	退耕还草	现有耕地转化为草地

3.4.2 径流对土地利用变化的响应 结合渭河中上游流域 5 期土地利用变化情况发现,耕地在总流域面积的比例逐渐减小,反映了渭河中上游流域水土保持工作的初步成效。径流变化是在气候变化和人类活动共同作用下发生改变的,气候变化包括降雨、温度、风速等,人类活动包括土地利用变化、水土保持措施等。

为了定量分析径流在土地利用变化下的响应,基于历史反演法采用 2000—2020 年气象数据库、2020 年土壤数据库不变,由于 1980—2000 年土地利用变化不大,因此仅对 1980,2000,2010 年这 3 种情境进行模拟比较分析。在原模型的基础上,将上述 3 种土地利用情景加载到 SWAT 模型中替换 2020 年土地利用数据。运行模型可得不同土地利用情景下 2014—2020 年年均径流深,与 1980 年土地利用情境下的模拟年均径流深对比(表 4)。与 1980 年土地利用情景下的模拟年均径流深对比,2000,2020 年情境下均呈增加趋势。①渭河中上游流域水土保持政策取得了一定的效果;②研究区域内居民用地不断增

加,城镇不透水下垫面随之增加,进而导致地表径流逐渐增多。自 2000 年以来,中国大力加强水土保持综合治理力度,大量开展退耕还林、还草工程,林地、草地面积随之增加,植被覆盖度增加。再者一些水利工程如修建堤坝、引水灌溉以及兴建水库等致使地表水长时间地停留,进而使得蒸散发量较大(表 5),因此可能会导致 2010 年情境下径流减少。1980—2020 年

年均径流深变化小于 10%,说明在这段时期内土地利用的变化对径流的影响并不十分显著。

表 4 1980—2020 年渭河中上游流域年均径流深变化

项 目	1980 年	2000 年	2010 年	2020 年
径流深/mm	72.24	72.31	71.86	72.25
较 1980 年变化/%	—	0.10	−0.52	0.03

表 5 不同土地利用情境下渭河中上游流域模拟年均实际蒸散发

年 份	1980 年	1990 年	2000 年	2010 年	2020 年
年均实际蒸散发量/mm	14 261.93	14 251.62	14 245.50	14 257.04	14 221.22
土地利用情景	退耕还林	退耕还草	耕地型	林地型	草地型
年均实际蒸散发量/mm	14 370.20	14 317.20	14 273.75	14 561.13	14 478.13

进一步了解渭河中上游流域主要土地利用类型对径流的影响,分别对两种综合土地利用情景和 3 种极端土地利用情景进行模拟,其模拟结果见图 7。由图 7 可以看出,模拟径流深与实测径流深在趋势上具有较好的一致性,且与降水量呈现出正相关关系,说明所用模型在渭河中上游流域表现良好。

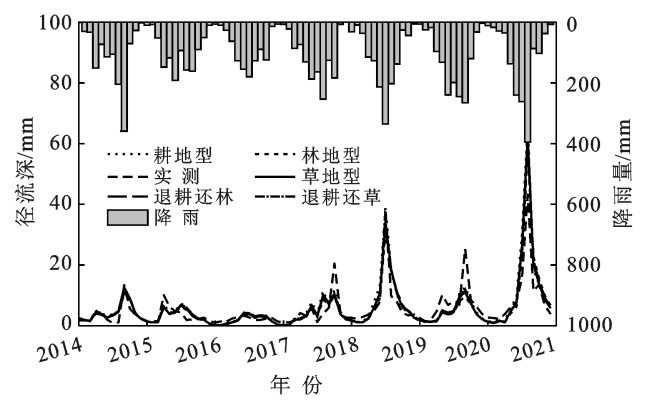


图 7 渭河中上游流域 5 种情境下模拟径流深与实测径流深对比

退耕还林、还草两种综合土地利用情景是在 2020 年情景的基础上建立的,因此将这两种模拟径流深与 2020 年情景下模拟径流深进行比较分析。这两种综合土地利用情境下模拟径流深见表 6,其较 2020 年的变化见图 8。这两种情境下径流深变化均大多为负值,说明退耕还林、退耕还草对径流主要起抑制作用。这个结果初步证明,在渭河中上游流域,林地、草地均会导致径流的减小。因此,在未来渭河中上游流域水土保持政策实施时,不仅仅需要考虑生态效应,还应该考虑其对径流的影响。

项 目	退耕还林	退耕还草	耕地型	林地型	草地型
径流深/mm	68.59	69.70	72.60	64.81	66.82

为进一步探究耕地、林地及草地 3 种极端土地利用情境下径流的响应,模拟得到 3 种极端土地利用情境下径流深的变化。这 3 种极端土地利用情景下模拟径流深见表 6,其较 2020 年情景的变化见图 8。林地型、草地型情境下, $\Delta R$  大多为负值,说明单一林地及草地使径流呈减少趋势;在耕地型情景下, $\Delta R$  大多为正值,说明耕地使得径流呈现出增加趋势。结果表明在渭河中上游流域,3 个极端土地利用情境下产流量大小为:耕地型>草地型>林地型,而耕地与林地、草地情境下的径流相差明显,林地与草地情境下径流相差不是特别明显。分析其原因可能是因为耕地的土壤较林地、草地更为密实,因此其入渗率较低,致使其地下径流较小,而地表径流较林地、草地更多。其次,林地的植被覆盖度较草地更大,且其植被根系深、叶面截留雨水等均会使径流呈下降趋势。

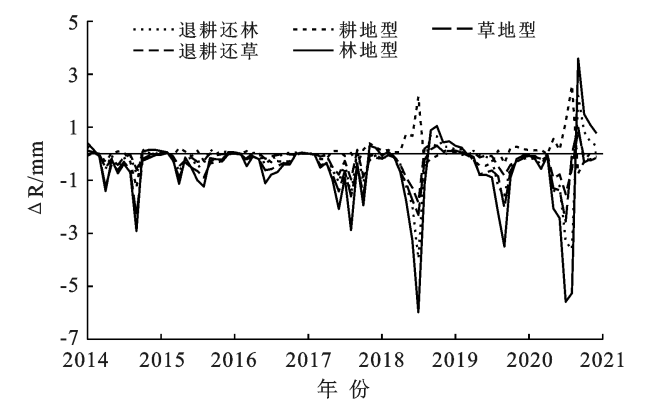


图 8 渭河中上游流域 5 种情境下径流深变化

渭河中上游流域径流在年内分配极不均衡,四季存在明显差异,因此进行径流在年内分布的研究是十分有必要的。本文通过模拟所得退耕还林、退耕还草、耕地型、林地型、草地型共 5 种土地利用情境下的月径流过程,将其转换为季均径流深并与 2020 年情

境下季均径流深进行对比。如图 9 所示,整体上,季均径流深变化率为:林地型>草地型>退耕还林>退耕还草>耕地型,而在春季和夏季变化最大。

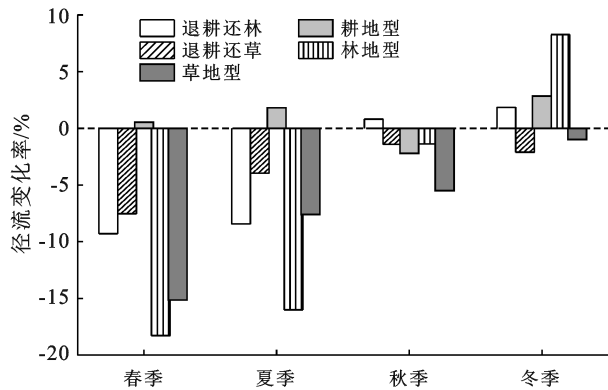


图 9 渭河中上游流域不同情境下季均径流变化

春季除在耕地型情景下径流增加 0.54% 外,在其余情境下分别减小 9.30%, 7.54%, 18.28%, 15.15%。夏季渭河正处于雨季,是一年中径流最大的时期,其变化趋势大致与春季相同,在耕地型情景下径流增加 1.80%,其余情境下分别减小 8.43%, 3.97%, 16.00%, 7.60%,较春季变化较小。秋季径流较夏季有所减小,但整体上仍为一年中第二大的时期,其变化与春季、夏季相比相差巨大。在这个时期,耕地型、退耕还草、林地型、草地型情景下径流分别减小 2.32%, 1.41%, 1.39%, 5.50%,而退耕还林情景下径流增加 0.81%。冬季渭河降水较少,流域处于枯水期,仅在退耕还草、草地型两个情境下分别减小 2.11%, 0.99%,在退耕还林、耕地型、林地型情景下分别增加 1.85%, 2.84%, 8.26%。

综上所述,退耕还林对于春夏两季的径流有削减作用,秋冬两季径流呈增加趋势;退耕还草则在一年四季中均对径流产生削减作用;在研究流域土地利用均为耕地时,除秋季外,春夏冬 3 季径流均会增加;在林地型情境下,除冬季径流增加,其余径流均呈减小趋势,特别是春夏两季,径流减小幅度最大;草地型情境下,4 个季节的径流均减小,在冬季影响最小。

不同类型的土地利用情况所对应的水汽蒸发速率存在较大差异,因此土地利用改变将会对流域年均蒸发量造成一定影响<sup>[26]</sup>。通过 SWAT 模型模拟所得不同土地利用情景下渭河中上游流域年均实际蒸散发见表 5。

## 4 结论

本文对渭河中上游流域 1980—2020 年土地利用变化进行分析,并根据区域气象、土壤及多种情境

下土地利用数据建立 SWAT 模型,对渭河中上游流域径流在不同土地利用情境下的响应进行模拟。

(1) 与 1980 年的土地利用情况相比,2020 年的耕地、水域及未利用土地分别减小 1 038, 3.13, 13.45 km<sup>2</sup>, 林地、草地、居民用地分别增加 181.29, 67.47, 684.81 km<sup>2</sup>。

(2) 本文所建立的 SWAT 模型在渭河中上游流域适应性良好,率定期和验证期的 NSE 分别为 0.70, 0.67,  $R^2$  分别为 0.74, 0.86, 均满足评价标准。模拟所得渭河中上游流域 1980—2020 年共 5 个时期模拟年均径流深分别为 72.24, 72.27, 72.31, 71.86, 72.25 mm, 退耕还林、退耕还草、耕地型、林地型及草地型模拟年均径流深分别为 68.59, 69.70, 72.60, 64.81, 66.82 mm。结果表明 40 a 间年均径流深变化小于 10%,说明在这段时期内土地利用的变化对径流的影响并不显著;退耕还林、还草两种情境下模拟径流深较 2020 年情境下模拟径流深均呈现出减小趋势,说明退耕还林、退耕还草对径流主要起抑制作用;在林地型、草地型情境下,  $\Delta R$  大多为负值,说明单一林地及草地使径流呈减少趋势;在耕地型情景下,  $\Delta R$  大多为正值,说明耕地使得径流呈现出增加趋势。在 3 个极端土地利用情境下径流大小为:耕地型>草地型>林地型,且耕地型与林地型、草地型情境下的差异明显。

本文仅考虑土地利用类型变化下径流的响应,而气候变化和人类活动共同作用下径流的响应需进一步进行研究。

## [ 参 考 文 献 ]

- [1] 周一星,曹广忠.改革开放 20 年来的中国城市化进程[J].城市规划,1999,23(12):8-13.
- [2] 于涛方.中国城市人口流动增长的空间类型及影响因素[J].中国人口科学,2012(4):47-58.
- [3] 摆万奇,赵士洞.土地利用变化驱动力系统分析[J].资源科学,2001,23(3):39-41.
- [4] 李瑜琴,赵景波.过度放牧对生态环境的影响与控制对策[J].中国沙漠,2005,25(3):404-408.
- [5] 郭旭东,陈利顶,傅伯杰.土地利用/土地覆被变化对区域生态环境的影响[J].环境科学进展,1999(6):66-75.
- [6] 万荣荣,杨桂山.流域土地利用/覆被变化的水文效应及洪水响应[J].湖泊科学,2004,16(3):258-264.
- [7] 李丽娟,姜德娟,李九一,等.土地利用/覆被变化的水文效应研究进展[J].自然资源学报,2007,22(2):211-224.
- [8] 彭珂珊.九八洪涝灾害的深层次原因系统分析[J].青海民族学院学报,1999,25(1):92-96.
- [9] 景可,焦菊英.水土保持措施与效益评价研究:以陕北安塞县为例[J].水土保持研究,2011,18(1):132-136.

(下转第 246 页)



- [10] 赖夏华,赵小敏,郭熙,等.农村宅基地使用权流转价格评估研究[J].土壤通报,2018,49(5):1054-1059.
- [11] 高鑫,解建仓,汪妮,等.基于物元分析与替代市场法的水资源价值量核算研究[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2012,40(5):224-230.
- [12] 付光辉,刘友兆,祖跃升,等.区域土地整理综合效益测算:以徐州市贾汪区为例[J].资源科学,2007,29(3):25-30.
- [13] 鄂施璇,宋戈.东北区县域耕地资源非市场价值测算及其空间分布[J].经济地理,2015,35(6):149-153.
- [14] 赵鸿雁,陈英,裴婷婷,等.土地整治的生态系统服务价值评估:参数优化与实证[J].干旱区研究,2020,37(2):514-522.
- [15] 张乐勤,荣慧芳,曹先河.两种森林生态系统价值评估方法实证评述[J].水土保持通报,2011,31(1):169-174.
- [16] 谢高地,张彩霞,张昌顺,等.中国生态系统服务的价值[J].资源科学,2015,37(9):1740-1746.
- [17] 苏浩,吴次芳.基于“三生”功能的黑土区耕地资源价值影响因素分析:以黑龙江省克山县为例[J].中国土地科学,2020,34(9):77-85.
- [18] Blomendahl B H, Perrin R K, Johnson B B. The impact of ethanol plants on surrounding farmland values: A case study [J]. Land Economics, 2011, 87(2): 223-232.
- [19] 望晓东,魏玲.耕地生态价值支付意愿的影响因素实证研究:基于武汉市的实地调查[J].生态经济,2015,31(8):121-124.
- [20] 易忠君,杨小雄,苏夏.耕地资源的价值构成及制约因素:广西个案[J].重庆社会科学,2010(2):49-52.
- [21] 刘利花,刘向华,杨洁.粮食安全视角下的耕地生态补偿标准研究[J].学习与实践,2020(8):38-47.
- [22] 陈秋滢,张伟康,杨国永.广东省耕地多功能空间分异及权衡与协同关系[J].江苏农业科学,2021,49(13):212-218.
- [23] 李恒哲,郭年冬,陈召亚,等.县域耕地资源价值综合评价及动态分析:以河北省黄骅市为例[J].土壤通报,2015,46(6):1334-1340.
- [24] 蔡运龙,霍雅勤.中国耕地价值重建方法与案例研究[J].地理学报,2006,61(10):1084-1092.
- [25] 吴泽斌,阮维明.中国各省份耕地资源社会价值及省际差异研究[J].统计与决策,2016(3):125-128.
- [26] 仝德,罗圳英,冯长春.国家级贫困县政策的减贫效应及其空间异质性[J].经济地理,2021,41(11):176-184.
- [27] 耿甜伟,陈海,张行,等.基于 GWR 的陕西省生态系统服务价值时空演变特征及影响因素分析[J].自然资源学报,2020,35(7):1714-1727.
- [28] 赵益祯,曹建农,张晓栋,等.宝塔区土地利用的地形梯度效应与空间格局[J].干旱区地理,2020,43(5):1307-1315.
- [29] 王晓瑜.县域耕地资源价值空间分布差异特征及其形成机制:以湖北省团风县为例[D].湖北 武汉:中国地质大学,2017.

(上接第 237 页)

- [10] 许炯心,孙季.无定河水土保持措施减沙效益的临界现象及其意义[J].水科学进展,2006,17(5):610-615.
- [11] 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.
- [12] 林凯荣,何艳虎,陈晓宏.土地利用变化对东江流域径流量的影响[J].水力发电学报,2012,31(4):44-48.
- [13] 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.
- [14] 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):1165-1170.
- [15] 巨鑫慧,高肖,李伟峰,等.京津冀城市群土地利用变化对地表径流的影响[J].生态学报,2020,40(4):1413-1423.
- [16] Lin Bingqing, Chen Xingwei, Yao Huaxia, et al. Analyses of landuse change impacts on catchment runoff using different time indicators based on SWAT model [J]. Ecological Indicators, 2015, 58: 55-63.
- [17] Khare D, Patra D, Mondal A, et al. Impact of land-use/land cover change on run-off in a catchment of Narmada River in India [J]. Applied Geomatics, 2015, 7(1):23-35.
- [18] 李景宜.陕西渭河流域主要环境问题及其治理[J].干旱区研究,2011,28(6):967-973.
- [19] 袁超.渭河流域主要河流水文干旱特性研究[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2008.
- [20] 林金辉.基于 GIS 的数字化渭河流域地理特性研究[D].陕西 西安:西安建筑科技大学,2007.
- [21] 张艳玲.陕西省渭河流域水文特性分析[J].西北水资源与水工程,2002,13(2):62-64.
- [22] 赵俊侠,王宏,马勇,等.1990—1996 年渭河流域水沙变化原因初步分析[J].水土保持学报,2001,15(S2):136-139.
- [23] 刘闻,曹明明,刘琪,等.1951—2012 年渭河流域降水频次变化特征分析[J].干旱区地理,2015,38(1):18-24.
- [24] 葛志楠,郝洁,鞠琴,等.渭河流域土地利用变化对径流的影响[J].人民黄河,2020,42(6):7-12.
- [25] Schuol J, Abbaspour K C, Srinivasan R, et al. Estimation of freshwater availability in the West African sub-continent using the SWAT hydrologic model [J]. Journal of Hydrology, 2008, 352(1/2):30-49.
- [26] 陈耀亮.干旱区内陆河流域土地利用/土地覆被变化及其对蒸散发的影响[D].浙江 杭州:浙江大学,2018.