

土地利用变化对渭河流域水文过程的影响

李烁阳¹, 刘小燕¹, 杨贵羽², 刘奇真³

(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.中国水利水电科学研究院
水资源研究所, 北京 100038; 3.内蒙古金华源环境资源工程咨询有限责任公司, 呼和浩特 010018)

摘 要:为探讨渭河流域土地利用对水文过程的影响,以流域近 35 年土地利用变化为研究对象,通过 SWAT 模型生成子流域为基本研究单元,分析了土地利用变化对水文分量南北变化影响的差异性。结果表明:SWAT 模型可以较好地模拟流域水文过程。近 35 年来土地利用变化不大,由土地利用变化引起的流域蒸散发和地下水补给量呈增加趋势,地表产流量和径流量呈减少趋势。耕地转化为草地、林地时,就整个流域平均水平而言,蒸散发增加了 20.17 mm 和 45.83 mm,地下水补给量增加了 4.14 mm 和 4.97 mm,地表产流量减少了 24.59 mm 和 49.59 mm;转化过程中蒸散发的增加是产流减少的主要原因。在空间响应上,流域中下游水文分量对土地利用变化空间响应敏感程度高于支流和上游。

关键词:土地利用变化; 水文分量; 径流; 水文模型; 渭河流域

中图分类号:F301.24;P343.9

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2021)03-0133-08

Analysis of the Impact of Land Use Change on Runoff in the Weihe River Basin from the Perspective of Hydrologic Factor Variation

LI Shuoyang¹, LIU Xiaoyan¹, YANG Guiyu²

(1.College of Water Conservancy and Civil Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China; 2.Institute of Water Resources, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China; 3.Inner Mongolia Jinhua Yuan Environmental Resources Engineering Consulting Co., Ltd, Hohhot 010018, China)

Abstract:In order to explore the impact of land use change on hydrological processes in the Weihe River Basin, this paper takes land use change in the last 35 years as the research object and subbasins generated by SWAT model as the basic research unit to analyze the difference of the impact of land use change on the north—south variation of hydrological components. The results show that: SWAT model can well simulate the watershed hydrological process; land use has not changed much in the past 35 years; evapotranspiration and groundwater replenishment of the basin have shown the increasing trend due to land use change, while surface production and runoff have shown the decreasing trend. When arable land is converted into grassland and woodland, as far as the average level of the entire basin is concerned, evapotranspiration has increased by 20.17 mm and 45.83 mm, groundwater recharge has increased by 4.14 mm and 4.97 mm, and surface runoff has decreased by 24.59 mm and 49.59 mm. In the conversion process, the increase of evapotranspiration is the main reason for the decrease of runoff production. In terms of spatial response, the hydrological components in the middle and lower reaches of the basin are more sensitive to the spatial response of land use change than the tributaries and the upper reaches.

Keywords:land use change; hydrological component; runoff; hydrological model; Weihe River Basin

流域的水量与能量的平衡一定的程度上受土地利用的影响^[1],土地利用的变化影响或改变了原有流域的水循环过程^[2];在全球气候变化的长时间尺度下,土地利用变化是影响流域水文过程的一个重要因素^[3-4]。而河道径流的大幅波动是流域水文过程发生变化最直观

的体现^[5-6],据相关研究表明,渭河流域河道径流量呈显著减少趋势,自 1980 年以来径流减少量达 35%^[7]。径流量减少是由土地利用变化、气候变化、取用水、水利工程建设等一系列因素综合造成的结果,其中,土地利用变化对径流的影响主要体现在降水再分配的过程^[8],且

收稿日期:2020-05-28

修回日期:2020-06-23

资助项目:博士后基金项目(32830)

第一作者:李烁阳(1991—),男,河北石家庄人,硕士研究生,研究方向为水文与水资源。E-mail:lisy7181@163.com

通信作者:刘小燕(1966—),女,内蒙古乌兰察布人,教授,主要从事水文与水资源研究。E-mail:Liuxy6675@163.com

土地利用的变化也是对水土保持措施,人口城镇化发展的侧面反映,同时通过蒸散发的变化可间接反映出水资源消耗的空间分布。由此,以流域水文过程中的蒸散发、地下水补给量、地表产流量和河道径流量为代表,着重分析土地利用变化引起径流衰减的原因和各水文分量在空间变化的差异性。对流域水资源管理与土地利用规划具有重要的研究意义。

土地利用变化对径流的影响研究的方法主要有:对比分析不同森林植被类型流域的径流变化情况、利用长序列水文要素的统计参数计算土地利用变化对径流的影响、利用遥感与具有物理计算过程的分布式水文模型来研究土地利用变化对区域水资源演变的影响。采用流域对比和数理统计的方式对径流变化进行综合性的概述,由于方法的局限性,较难从空间变化和各水文分量上考虑径流与土地利用变化的响应关系^[9-10]。而分布式水文模型根据水量平衡原理,考虑气候空间分布、土质、土壤和地貌类型等各因素空间分布的差异性,可以对流域复杂水文过程中的各水文分量及其空间分布进行详细的刻画。如 SWAT 模型(Soil and Water Assessment Tool)是 1994 年由美国农业部(USDA)农业研究中心开发的,是基于水量平衡计算具有较强的物理过程的分布式模型^[11-12],可以在不同土地利用情境下对流域径流及其他水文分量进行有效的模拟^[13],目前 SWAT 模型广泛的应用于土地利用变化与水资源的研究中且取得较好的模拟效果。

土地利用变化对径流产生影响的同时,流域水文过程也发生着变化。目前,对于径流变化原因的分析主要从土地利用变化与径流变化建立关系分析,而从流域水文过程中各水文分量空间变化差异性的角度揭示土地利用对径流变化原因的分析较少。本文利用 SWAT 模型,以模型生成的子流域为基本单元,在 1980 年、2000 年和 2015 年三期土地利用情境下,分析渭河流域土地利用变化对各区域水文分量空间分布差异性及其入黄径流量的影响,以揭示土地利用演化过程中对径流的影响程度和土地利用变化对水文过程分量南北变化的差异性。本研究对流域土地利用规划和水资源合理利用有重要的参考意义。

1 流域概况与数据来源

1.1 流域概况

渭河发源于甘肃省定西市鸟鼠山,流经甘肃省天水、陕西省宝鸡、咸阳、渭南等地,于陕西省潼关县汇入黄河,是黄河最大的一级支流,全长约 818 km;流域面积约为 13.48 万 km²(图 1)。流域支流较多,水系多成不规则的扇形分布。其中南部支流较多,但支流流程短,

北部支流相对较少,但有两条最大的支流分别为泾河和北洛河,两个支流的流域面积分别占渭河流域面积的 33.7%和 20.0%。渭河流域地形地貌较为复杂,呈现出“西高东低、南北高中部低”的地势,北部主要为黄土高原,南部为秦岭山脉的北坡,中部为肥沃的关中平原。渭河流域地处大陆性季风气候区、干旱和半湿润地区的过渡地带,渭河流域年均气温约为 9.8℃,夏季炎热多雨,降水约为 540 mm,受地形和大气环流等因素的影响,流域降水分布由东南向西北递减,空间差异相对较大^[14]。由于其复杂多样的气候特点和土壤地貌类型,也造成了各区域产汇流差异性也较大。

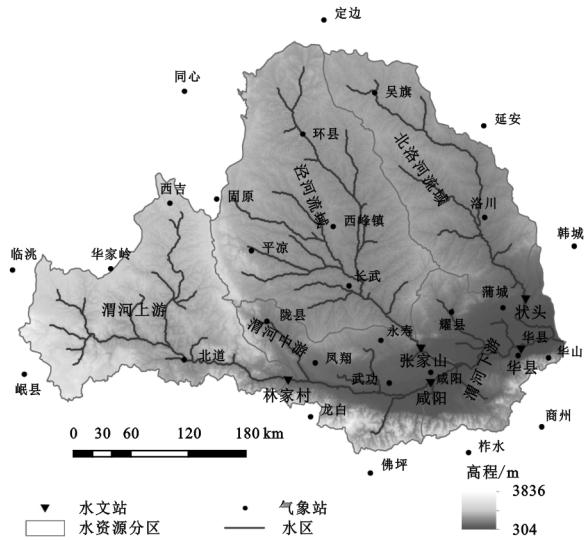


图 1 渭河流域地理位置及水文气象站点分布

1.2 数据来源

通过对流域内及其周边气象站的筛选,选取可以涵盖研究区,且分布较均匀的吴旗、平凉、洛川、长武和华家岭等 29 个站点(图 1)1959—2016 年逐日数据;包含降水、最高气温、最低气温、相对湿度、风速、日照时数的气象数据来源于中国气象数据共享网(<http://cdc.cma.gov.cn>)。流域内状头、张家山、林家村、咸阳和华县 5 个水文站(图 1)1960—2016 年逐月径流资料来源于中国黄河流域水文年鉴。建立 SWAT 模型所需的栅格数据包含数字高程(DEM)、土地利用和土壤数据 HWSO,空间分辨率均为 1 km。DEM 和 HWSO 土壤数据库均中国科学院寒区旱区科学数据中心(<http://westdc.westgis.ac.cn>);1980 年、2000 年和 2015 年三期土地利用数据来源于资源环境数据云平台(<http://www.resdc.cn>)。

1.3 流域径流变化情况

渭河流域径流主要监测水文站有状头站、张家山站、林家村站、咸阳站和华县站,其站点位置及控制范围见图 1。1960—2016 年渭河流域径流量减少趋势,状头站、张家山站、林家村站、咸阳站和华县站 1960—2016 年

控制的不同尺度子流域径流均呈现出显著减少趋势。1960—2016 年各水文站径流减少趋势见图 2,径流平均减少率分别为 9.3,7.3,4.6,2.4,0.9 亿 m³/10 a。

1960—2016 年渭河流域总径流量约 71.28 亿 m³,其中北部泾河张家山站和北洛河状头站径流量占 21.6%和 11.13%,渭河上游林家村站径流占总径流 26.14%,各站径流量占总径流量比例见表 1。

表 1 5 个站的径流分别占总径流的情况

站点	径流量/ 亿 m ³	占比/%	变化 趋势	变化率/ (亿 m ³ /10 a)
渭河华县站	63.35	88.87	减少	9.3
渭河咸阳站	36.82	51.66	减少	7.3
渭河林家村站	18.63	26.14	减少	4.6
泾河张家山站	15.4	21.60	减少	2.4
北洛河状头站	7.93	11.13	减少	0.9

2 建立 SWAT 模型与模型适用性分析

2.1 SWAT 模型构建

SWAT 模型计算的基本单元是水文响应单元 (HRU),根据水量平衡方程,计算各水文分量(降水、实际蒸发、土壤含水量、地表径流、地下水补给量、回流等)在各 HRU 中的相互转化运移,经水系汇流到流域出口以实现流域水文过程的模拟。建模过程中,首先利用数字高程数据 (DEM),将渭河流域划分为 121 个子流域;然后根据土地利用、土壤类型和流域坡度等栅格数据叠加生成了 850 个具有唯一子流域编号、土地利用类型、土壤类型和坡度的最小计算单元 (HRU)。

2.2 模型适用性分析

根据相关研究^[7,15]表明,渭河流域径流变化的突变点出现在 1970 年和 1991 年左右,在 1970 年以前径流的变化相对较平稳且相对处于丰水期^[7],可以认为 1970 年之前径流过程受人类活动影响较少。据 Kannan 等^[16]认为在进行 SWAT 模型率定验证时应选择径流较平稳的时期。因此,选择 1960—1965 年为参数率定期,1966—1970 年为模型验证期。采用“先支流再干流、先上游再下游”的方式对渭河流域状头、张家山、林家村、咸阳和华县水文站逐月径流进行参数率定和模型模拟验证。利用 Nash-Sutcliffe 效率系数^[17] (E_{NS})、决定性系数^[16] (R^2)和相对误差^[18] (R_e),对模型的适用性进行评价。水文站模拟效果图和模拟适用性分析见图 3 和表 2 所示。根据模拟效果可知,各站的 E_{NS} 和 R^2 均在 0.5 以上,个别站达 0.8 以上,各站模拟相对误差在 25%以下,大多数站点的相对误差均在 15%以下,模拟效果达到要求^[19]。SWAT 模型在渭河流域具有较好的适用性且能够反映不同区域流域产汇流的差异性,可以用于模拟土地利用变化的研究。

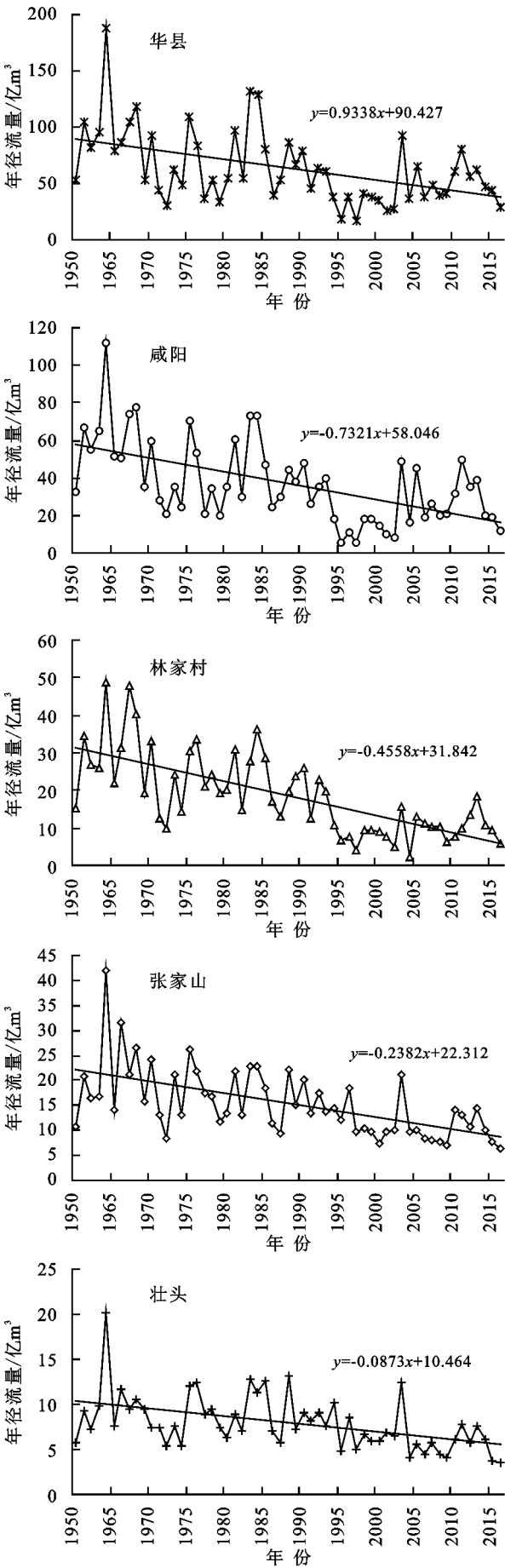


图 2 1960—2016 年渭河流域各水文站径流演变规律

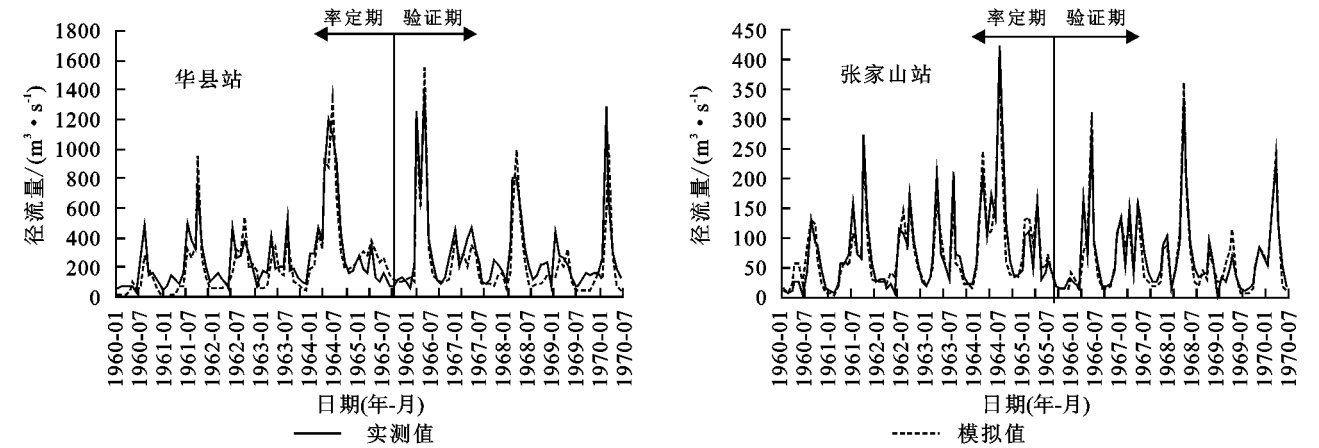


图 3 渭河流域各水文站月径流模拟效果校验

表 2 SWAT 模型模拟效果评价

水文站	率定期			验证期		
	R^2	E_{NS}	$R_e/\%$	R^2	E_{NS}	$R_e/\%$
华县站	0.87	0.88	2.2	0.89	0.87	-1.3
咸阳站	0.82	0.81	10.1	0.92	0.89	7.8
林家村站	0.68	0.64	11.6	0.81	0.73	23.7
张家山站	0.8	0.76	10.9	0.81	0.74	19.8
状头站	0.75	0.74	6.0	0.61	0.57	21.8

3 结果与分析

3.1 土地利用变化与情景设定

3.1.1 土地利用变化 根据渭河流域 1980 年、2000 年、2015 年三期土地利用空间分布,流域内土地利用

类型以耕地、草地和林地为主,三者之和占总面积的 95% 以上,其中耕地面积占总面积的 40% 以上,草地占 35% 以上,林地占 15% 以上。对比 1980 年、2000 年、2015 年三期土地利用变化(表 3);耕地呈现出先增加后减少的趋势,2015 年耕地面积较 1980 年减少约 1961 km²;草地和林地呈现出先减少后增加的趋势,增加出现在 2000—2015 年,林地增加量远大于前 20 a 减少量。居民地和工业用地面积呈现增加趋势且随着年代推移增加的面积越大,2015 年比 1980 年居民地增加 1139 km²,工业用地增加了 206 km²。土地利用变化的形态直观的反映了区域城镇化、工业化的发展和我国实施退耕还林还草措施和 90 年代以来生态环境恢复与保护的国家策略。

表 3 1980 年以来渭河流域土地利用变化特征

年份	耕地	草地	林地	居民地	工业	湿地	水域	裸地
1980—2000 年	81	-176	-184	387	21	-28	-61	-40
2000—2015 年	-2042	133	701	752	285	-2	115	59
1980—2015 年	-1961	-43	517	1139	306	-30	54	19

在空间上,为了凸显土地利用变化区域,将三期土地利用变化图在 GIS 中进行叠加,可以直观的显示出土地利用在空间上的变化(图 4)。根据 GIS 叠加计算结果显示,1980—2000 年变化区域面积占流域总面积的 1.47%,2000—2015 年变化区域面积占 2.42%,1980—2015 年变化区域面积占 3.56%。

3.1.2 情景设定 本文以 1980 年、2000 年和 2015 年为代表,分析近 35 a 土地利用变化对径流及各区域水文过程的影响的差异性。然而近 35 a 土地利用变化是各土地类型互相转化的综合反映,以 SWAT 模型生成的子流域为基本单元较难分离出某一土地利用类型转化对径流及其他水文分量的影响。由此设立 3 种单一的土地利用情景(表 4),分析土地利用类型互相转化对不同区域水文分量变化差异性的影响。为未来土地利用规划及流域水土资源配置提供一定的借鉴。

3.2 近 35 a 土地利用变化对径流的影响情况

流域出口断面径流发生变化同时流域水文过程也发生着变化,本文以土地利用变化为研究变量,分析土地利用变化对水文过程影响的空间差异性。着重分析蒸散发(ET)、地下水补给量(PREC)和地表产流量(SURQ);蒸散发是流域水资源消耗的主要因素之一;由于土地利用变化对地表的产流机制具有一定的影响,SURQ 地表产流量是由降水引起的地表产生径流并汇入河道的水量。土地利用、植被类型的变化对产汇流过程中的植被的截留、地表产水系数等具有一定的影响,地表水流停留时间和降水入渗发生变化,进而对水分穿过根区底部到达浅水面有一定的影响,PREC 地下水补给量是指根区底部的渗透水量,即水分离开根区底部到达浅层含水层的水量。

3.2.1 近 35 a 土地利用变化对水文分量及入黄径流量影响 在 1980 年、2000 年和 2015 年土地利用情境下

的各水文分量见图 5,相对于 L_2 和 L_1 情景,在 L_3 情境下全流域蒸散发分别增加 0.39 mm 和 0.57 mm;地表产流量减少了 0.2 mm 和 0.66 mm;地下水补给量分别增加了 0.01 mm 和 0.03 mm。同时,比较 2000 年和 1980 年下垫面的变化也呈现出相似的特征。近 35 a 流域蒸散发和地下水补给的增加,地表产流量的减少,这与近些年城镇化和工业化发展水平的推进、退耕还林还草、

植树造林和一些水土保持措施息息相关。

结合土地利用变化和水文分量变化分析,由于土地利用的变化量较小,水文分量变化并不明显。在水文分量发生变化背景下,分析可以综合体现水文分量发生变化的渭河流域径流量(入黄流量)。结果见图 5,2015 年土地利用情景相比于 2000 年、1980 年情景,径流分别减少了 0.51 亿 m^3 、0.76 亿 m^3 。

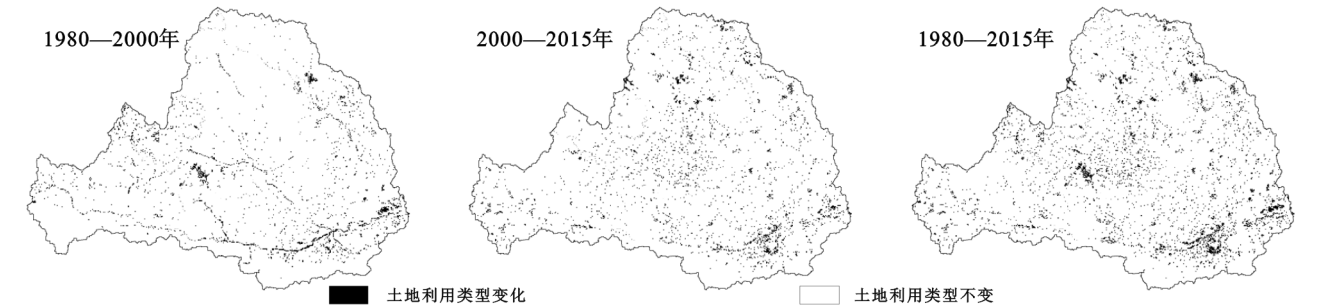


图 4 土地利用类型空间变化

表 4 不同土地利用情景设置

情景	情景说明	备注	情景	情景说明	备注
L_1	1980 年	近 35a 变化情景	L_4	全部耕地	单一 变化情景
L_2	2000 年		L_5	全部草地	
L_3	2015 年		L_6	全部林地	

3.2.2 近 35 a 土地利用变化对水文分量空间差异性的影响 以 SWAT 模型划分的 121 个子流域和流域水资源的 5 个分区(北洛河流域、泾河流域、渭河上游、渭河中游和渭河下游)为基本单元,分析近 35 a 由土地利用变化引起流域水文分量的空间变化(图 6)。(1) 蒸散发空间变化 2015 年土地利用与 1980 年相比蒸散发空间变化集中表现为渭河中游和下游区域蒸散发变化相对较大,分别增长 2.295 mm 和 1.719 mm;而北洛河流域却呈现出蒸散发减少的态

势,较 1980 年蒸散发减少了 0.063 mm。(2) 地下水补给量空间变化在土地利用变化过程中,渭河流域北部和西部(即北洛河流域、泾河流域和渭河上游)地下水补给量呈现出减少的趋势,而流域中游和下游呈现出增加趋势。2015 年土地利用相比于 1980 年,渭河中游和下游地下水补给量分别增加了 0.466 mm 和 0.213 mm,北洛河流域、泾河流域和渭河上游分别减少了 0.076 mm,0.044 mm 和 0.0126 mm。(3) 地表产流量空间变化 2015 年土地利用情境下相对于 1980 年全流域地表产流量均呈减少趋势,渭河中游和下游地表产流减少量较大,渭河中游地表产流量减少最大,减少了 2.867 mm;渭河下游地表产流减少量次之,减少量为 1.959 mm,北洛河流域、泾河流域和渭河上游地表产流量变化较小,其变化量小于 0.01 mm。

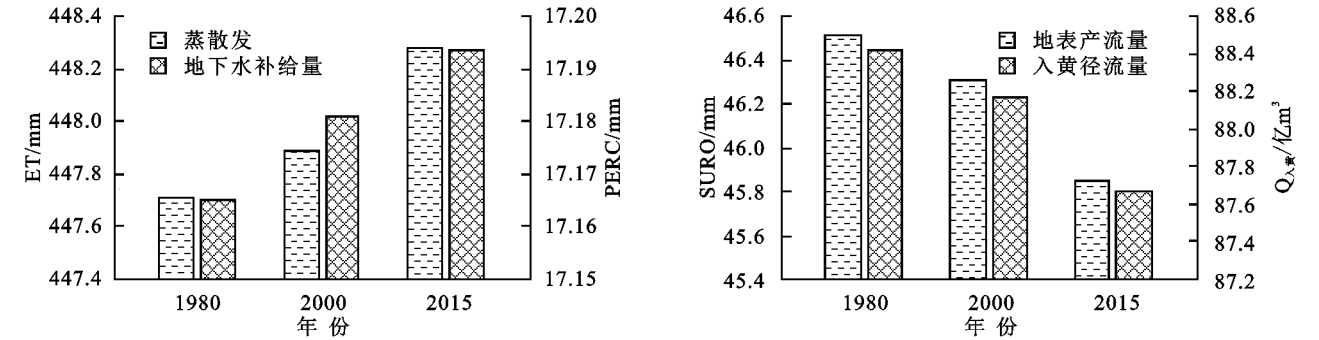


图 5 近 35 a 土地利用变化对流域入黄径流及其他水文分量的影响

3.3 单一土地利用下的径流响应

3.3.1 单一土地利用转化对渭河流域径流量影响 单一土地利用变化情境下的水文分量(蒸散发、地下水补给量和地表产流量)。比较 L_6 情景与 L_4 , L_5 可见,对整个流域平均水平而言,流域耕地转化为草地和林地,蒸散发增加了 20.17 mm 和 45.83 mm,地下水补给量增加了 4.14 mm 和 4.97 mm,地表产流量

减少了 24.59 mm 和 49.81 mm;林草地具有较好水源涵养能力,可以增加地下水补给量,但减少地表产流量,对地表产流有较强的调蓄作用。

结合在单一土地利用变化条件下整体的流域水文分量情况,模拟入黄径流量的变化(图 7),以分析单一的土地利用变化对流域河道径流的影响。由全部耕地(L_1)情景转化为全部草地(L_2)情景和全部林地(L_3)情景入黄流量

分别减少了 27.31,60.95 亿 m^3 ,由全部草地(L_2)情景转化为全部林地(L_3)情景入黄流量减少 33.64 亿 m^3 。

通过以上对流域水文分量及入黄径流量的分析,各水文分量在土地利用转化过程中,具有一定的关联

性,对于流域的土地利用规划不应该单一的强调某一分量的最大极值化,而应对流域土地利用进行综合规划以实现蒸散发、地下水补给量、地表产流量和径流量等分量最优化情景。

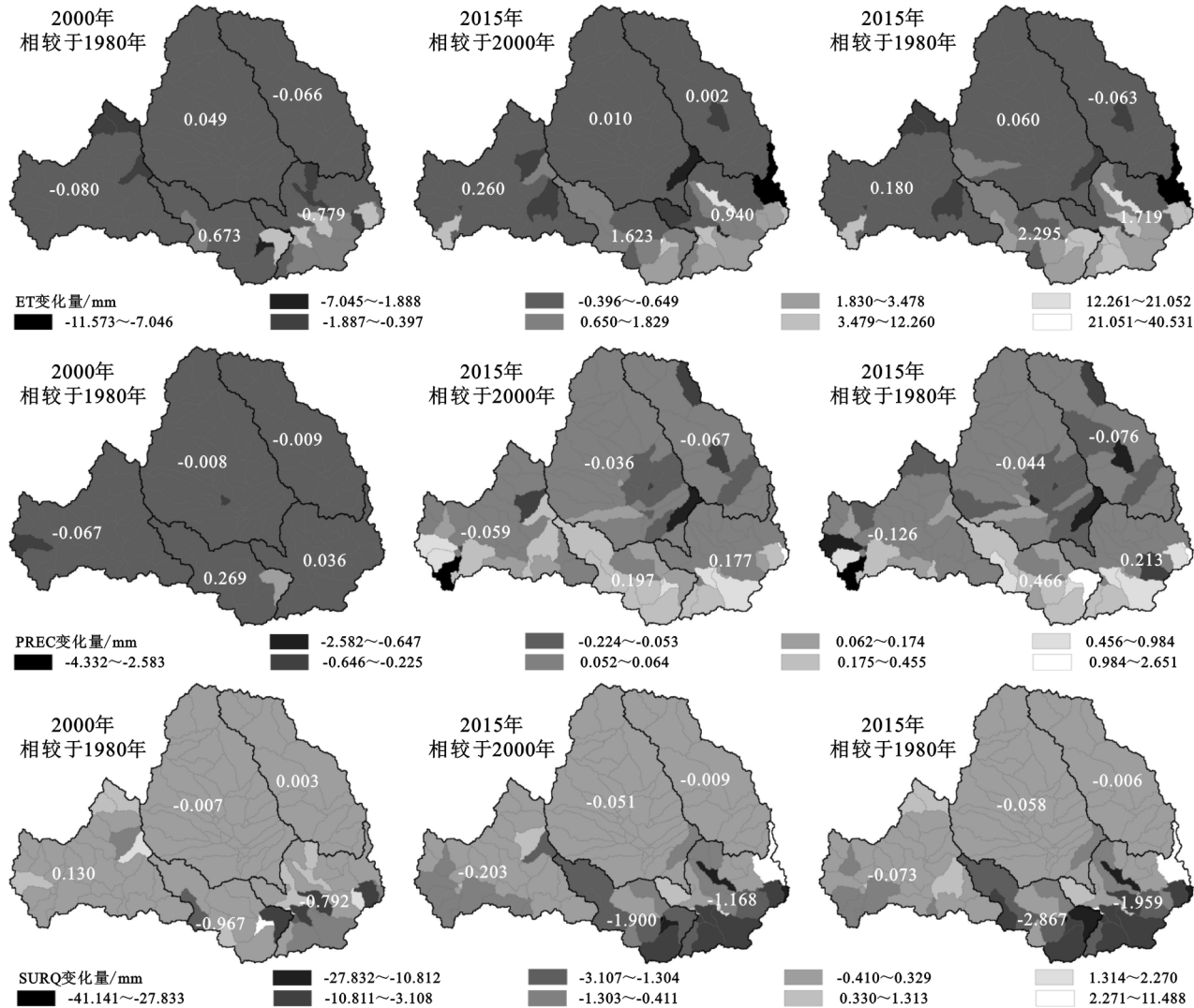


图 6 土地利用变化对水文分量空间变化的影响

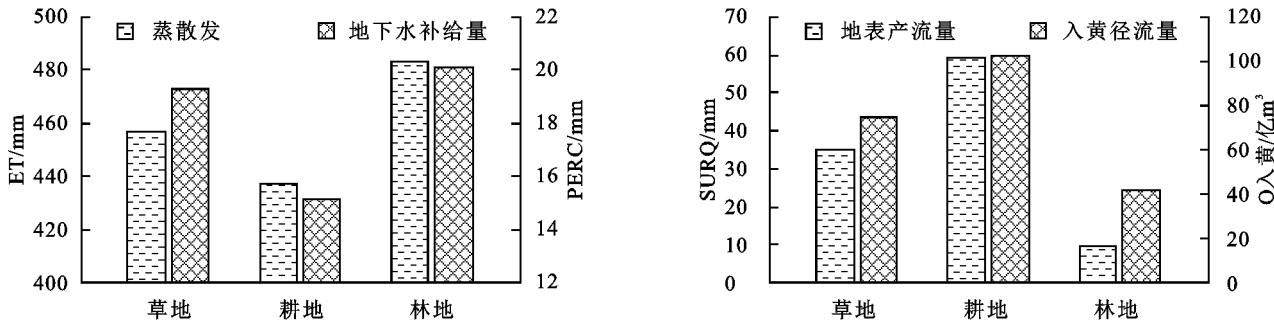


图 7 单一土地利用变化对流域水文分量影响

3.3.2 在空间变化差异性上土地利用转化对水文分量的影响 渭河流域地处大陆性季风气候区、干旱地区和湿润地区的过渡地带,西高东低,土壤、地貌类型复杂多变,由南向北为秦岭北坡、关中盆地以及黄土高原,相应的气候条件(流域降水分布由东南向西北

递减)、土壤、地貌类型南北差异性较大^[20-21],引起的南北产汇流类型具有一定的差异^[20,22];即使相同的土地利用类型转化也会造成水文分量在空间上变化的不同。由此,对单一土地利用变化情景下水文分量的空间变化进行分析(图 8),旨在分析水文分量对土

地利用类型转化的空间响应关系。

进一步比较蒸发和地下水补给量可更加明晰的剖析由土地利用变化导致流域径流量变化的原因。由耕地转化为林地或草地,蒸散发(流域水平衡分项中的消耗量)呈现林地>草地>耕地。然而在区域降水量东南多西部少的背景下,对于北部降水量较小、土壤含水量较低的黄土区域,随着植被类型的变化,降水一方面被林草地植被截留消耗,另一方面蓄存于土壤非饱和带被蒸发和植物消耗,而导致地

表径流量下降。对于中南部,降水量较为丰富,土壤含水量相对较高,在林草地对降水产流的滞留作用下,降水在地表滞留时间较长,地下水补给量较多;同时林草地植被盖度远大于耕地,随着植被盖度的增加蒸发量也呈现增加;在二者的共同作用下,区域的径流量必然减少。总体上,流域北部(降水较少区域)由土地利用变化引起径流减少的原因主要为蒸发与植物消耗,而中南部为降水滞留时间延长地下水补给量增加。

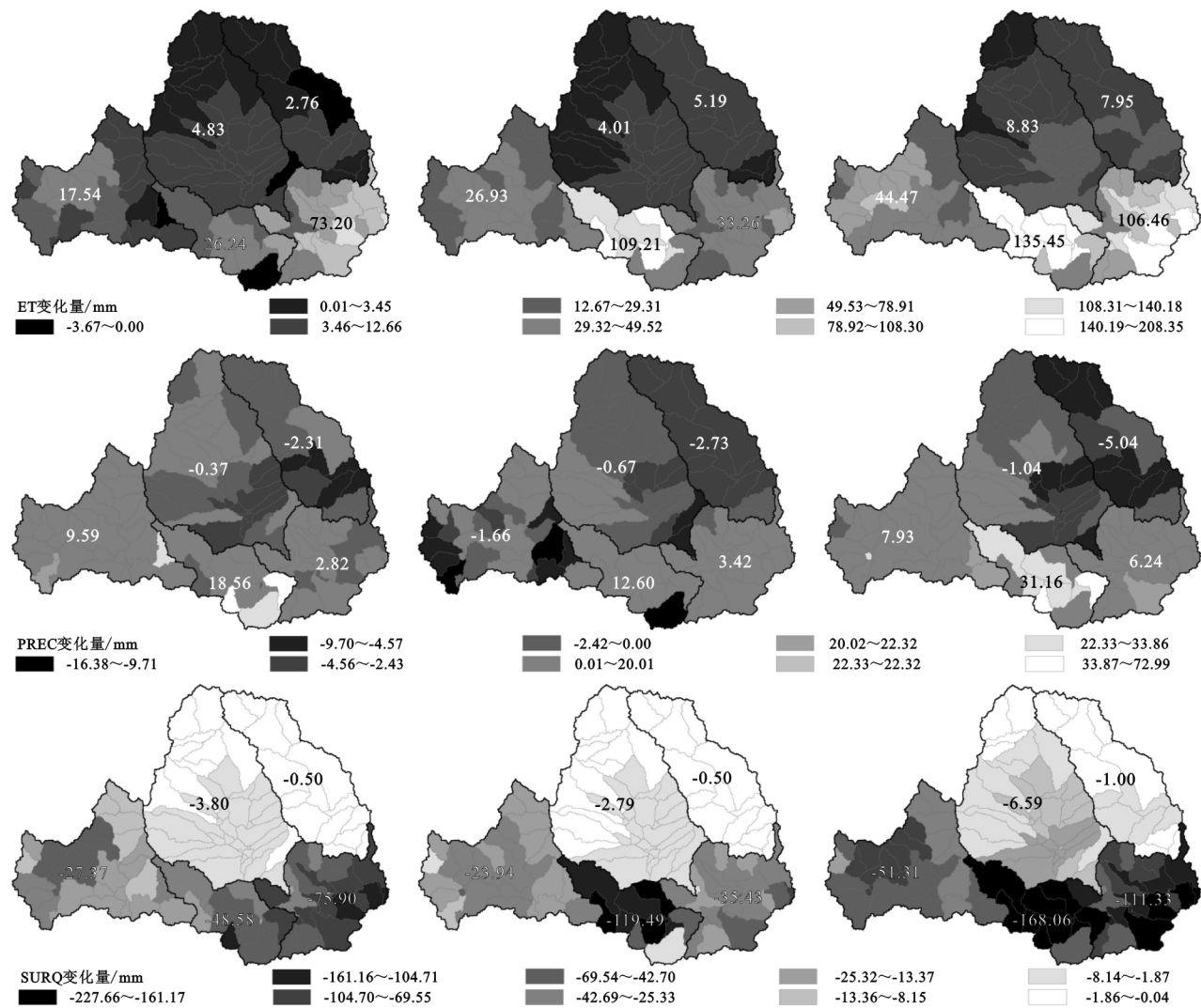


图 8 单一土地利用变化对水文分量空间变化的影响

就地下水补给量(PREC)的空间变化而言,其空间变化特征为北部为减少态势,而中南部(关中平原与秦岭北坡)为增加态势。其原因在于地表产流量林地<草地<耕地,在流域北部地区降水量较少,虽然降水产流会被林草地滞留,但林地草地对水资源的消耗本身较大,降水多用于植物自身生长而吸收,进而较少水量可以穿过根区,因此北部地下水补给量(PREC)变少。

在渭河流域降水东南多西北少的空间分布背景下,当耕地转化为草地、林地或草地转化为林地时,流域蒸散发、地下水补给量和地表产流量的变化幅度均呈现

出:干流区域大于支流区域、中下游区域大于上游区域的变化特点;虽然南北相同土地利用变化,但是水文分量对土地利用变化呈现出来响应的敏感程度不同,中下游水文分量变化对土地利用变化更为敏感。

4 结论

(1) 建立渭河流域的 SWAT 模型,以华县、咸阳、林家村、张家山和状头 5 个水文站的月径流量对模型进行参数率定和适用性分析;结果显示:评价各站模拟效果的 NS、 R^2 和 R_e 均满足模拟要求,构建的

渭河流域 SWAT 模型可很好的反映不同区域产汇流的差异性且具有较好的模拟效果,可以用于模拟土地利用变化的研究。

(2) 渭河流域主要土地利用类型为耕地、草地和林地,占总面积的 95% 以上。耕地呈先增加后减少的趋势,草地和林地均呈先减少后增加的趋势。2015 年土地利用情况与 1980 年相比耕地约减少 1961 km²,草地减少 43 km²,林地增加 517 km²。利用 ArcGIS 叠加三期土地利用分析,变化区域面积占比不足流域总面积的 5%。

(3) 在气候条件不变的情况下,定量分析水文分量与土地利用变化的响应关系,发现由土地利用变化引起的流域蒸散发和地下水补给量呈增加趋势,地表产流量减少趋势。以流域水文过程中水文分量变化角度,全面的揭示了渭河流域径流变化的原因及各区域水文分量变化的差异性。

(4) 由耕地转化为草地、林地,蒸散发增加了 20.17 mm 和 45.83 mm,地下水补给量增加了 4.14 mm 和 4.97 mm,地表产流量减少了 24.59 mm 和 49.59 mm;在转化过程中蒸散发的增加是产流减少的主要原因。在空间响应上,流域中下游水文分量对土地利用变化空间响应敏感程度高于支流和上游;流域北部(降水较少区域)由土地利用变化引起径流减少的原因主要为蒸发与植物消耗,中南部径流减少的原因主要为林地增加降水滞留时间增加地下水补给量。

参考文献:

- [1] 李锐,杨勤科,温仲明,等.区域土地利用变化环境效应研究综述[J].水土保持通报,2002,22(2):65-70.
- [2] 夏露,宋孝玉,符娜,等.黄土高原沟壑区绿水对土地利用和气候变化的响应研究:以南小河流域为例[J].水利学报,2017,48(6):678-688.
- [3] 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.
- [4] 董磊华,熊立华,于坤霞,等.气候变化与人类活动对水文影响的研究进展[J].水科学进展,2012,23(2):278-285.
- [5] Zuo D, Xu Z, Peng D, et al. Simulating spatiotemporal variability of blue and green water resources availability with uncertainty analysis[J]. Hydrological Processes, 2015,29(8):1942-1955.
- [6] 段利民,李玮,刘廷玺,等.半干旱草原型流域径流变化特征及其影响因子定量分析[J].干旱区资源与环境,2017,31(10):125-130.
- [7] Chang J, Wang Y, Istanbuluoglu E, et al. Impact of climate change and human activities on runoff in the Weihe River Basin, China[J]. Quaternary International, 2015,380:169-179.
- [8] 王云霓,王晓江,高孝威,等.内蒙古大青山典型森林植被水文功能研究[J].干旱区资源与环境,2018,32(10):191-196.
- [9] Song W, Deng X, Yuan Y, et al. Impacts of land-use change on valued ecosystem service in rapidly urbanized North China Plain[J]. Ecological Modelling, 2015,318:245-253.
- [10] 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.
- [11] Easton Z M, Fuka D R, Walter M T, et al. Re-conceptualizing the soil and water assessment tool (SWAT) model to predict runoff from variable source areas[J]. Journal of Hydrology, 2008,348(3):279-291.
- [12] Tripathi M P, Panda R K, Raghuvanshi N S. Identification and Prioritisation of Critical Sub-watersheds for Soil Conservation Management using the SWAT Model [J]. Biosystems Engineering, 2003,85(3):365-379.
- [13] 梁小军,江洪,王可,等.基于 SWAT 模型的岷江上游干旱河谷区水文特征情景模拟研究[J].干旱区资源与环境,2010,24(8):79-84.
- [14] 张东,宋献方,张应华,等.基于 CRU 格点数据集的近百年渭河流域降水变化[J].干旱区资源与环境,2018,32(2):142-148.
- [15] 李斌,解建仓,胡彦华,等.1961—2013 年渭河流域降水与径流变化特征[J].南水北调与水利科技,2017,15(2):29-36.
- [16] Kannan N, White S M, Worrall F, et al. Sensitivity analysis and identification of the best evapotranspiration and runoff options for hydrological modelling in SWAT-2000[J]. Journal of Hydrology, 2007,332(3):456-466.
- [17] Nash J E, Sutcliffe J V. River flow forecasting through conceptual models part I: A discussion of principles[J]. Journal of Hydrology, 1970,10(3):282-290.
- [18] 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.
- [19] Moriasi D N, Arnold J G, Van Liew M W, et al. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations[J]. Transactions of the Asabe, 2007,50(3):885-900.
- [20] 李烁阳.渭河流域水文气象要素演变特征及径流演变归因分析[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2019.
- [21] 赵安周,朱秀芳,刘宪锋,等.1965—2013 年渭河流域降水时空变化分析[J].自然资源学报,2015,30(11):1896-1909.
- [22] Li Y, Chang J, Wang Y, et al. Spatiotemporal impacts of climate, land cover change and direct human activities on runoff variations in the Wei River Basin, China [J]. Water 2016,8(6), 220, <https://doi.org/10.3390/w8060220>.