

泾河流域土地利用/覆被变化对径流情势的影响

张洪波^{1,2}, 顾磊¹, 孙文博¹, 曹巍¹

(1. 长安大学环境科学与工程学院, 陕西 西安 710054;

2. 长安大学旱区地下水文与生态效应教育部重点实验室, 陕西 西安 710054)

摘要:通过建立泾河流域 SWAT 分布式水文模型,重点模拟分析了河流径流情势对土地利用/覆被变化的响应,对比了不同气候条件及人类活动综合影响下研究区水文过程的变化。结果表明:1996 年以前土地利用/覆被变化是影响水文过程的主要人类活动影响源,径流量年际变化平稳,属有小幅增加的正偏;年内影响以枯水季节为主,年内分配更趋均匀,径流集中度降低,集中期略有滞后,且趋于平稳;土地利用/覆被变化导致流域蒸散发量、冠层和落叶层截留量减小,入渗量增加,河川基流量和地表径流量相应增大,并在时域上耦合形成了水文过程的新变化;1996 年以后,气候条件驱动下泾河年径流量呈现明显的增大趋势,人类活动亦从以土地利用/覆被变化为主转变为以人类水事活动为主的综合影响模式,且人类水事活动超过气候变化和土地利用/覆被变化成为影响水文过程变化的主因。

关键词:径流情势;土地利用/覆被变化;SWAT 模型;泾河流域

中图分类号:P339 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2016)05-0020-08

Influence of land use and land cover changes on runoff regime in Jinghe Basin//ZHANG Hongbo^{1,2}, GU Lei¹, SUN Wenbo¹, CAO Wei¹(1. *School of Environmental Science and Engineering, Chang'an University, Xi'an 710054, China*; 2. *Key Laboratory of Subsurface Hydrology and Ecological Effect in Arid Region of Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710054, China*)

Abstract: In order to analyze the influence of land use and land cover changes on runoff regimes, a distributed hydrological model in the Jinghe Basin was built based on the SWAT model. The synthetic influence of climate change and human activities on the hydrological processes in the study area was also investigated. The results show that, before 1996, land use and land cover changes were the main human activities affecting hydrological processes; under those influences, inter-annual fluctuations of runoff were stable, showing a significant positive skew. At the intra-annual scale, the main influence was runoff in dry seasons, and the flow was more uniformly distributed than before. Meanwhile, the concentration ratio of runoff decreased, and the concentration period lagged and tended to be stable. The analysis of the physical causes of the runoff change indicates that land use and land cover changes lead to decreasing evapotranspiration, a decreasing amount of rainfall intercepted by the canopy and litter layer, and increasing infiltration in the basin, all of which cause the increase of the baseflow and surface runoff in the channel, leading to new variations of hydrological processes. The results also show that the runoff increased after 1996 due to climate change, and the main human activities changed from single land use and land cover type to land use and land cover coupled with other water-related activities. Also water-related activities, rather than climate change and land use and land cover changes, became the principal factor in the variation of hydrological processes.

Key words: runoff regime; land use and land cover change; SWAT model; Jinghe Basin

土地利用/覆被变化(land use and land cover change, LUC)发生的实质是空间和非空间因素的相互作用,包括自然因素和人为因素的影响^[1]。随着社会经济的快速发展,人类活动已成为土地利用/覆被变化的主要驱动因素,并对流域生态系统、河流

水文情势等造成了一定的影响。定量研究土地利用/覆被变化对河流水文情势的影响,对开展当前阶段的区域水资源规划与流域管理具有重要的科学意义。泾河流域位于黄土高原中部,因自然资源的不合理开发利用,流域内植被退化显著,水土流失等问

题较为严重;从 20 世纪 70 年代至今,该流域内土地利用/覆被发生了较大的变化,对流域水循环过程与生态环境产生了一系列扰动^[2]。因此,科学定量土地利用/覆被变化对流域径流情势的影响极为必要。

流域水文模型是模拟流域水文过程和探讨土地利用/覆被变化影响的重要工具,其中,以 SWAT 模型为代表的分布式水文模型代表了流域水文模拟的一个重要发展方向。近年来,SWAT 模型在我国应用广泛,姚苏红等^[3]通过建立 SWAT 模型,对内蒙古闪电河流域径流进行了模拟研究,评价了模型的适用性;杨桂莲等^[4]将 SWAT 模型应用于基流模拟,对比分析了 SWAT 模型基流模拟与业界普遍认可的数字滤波法基流计算的区别,评价了 SWAT 模型地下水模块的适用性;孟现勇等^[5]通过改进 SWAT 模型的融雪模块,更好地模拟了高寒山区的径流过程。除此之外,很多学者尝试通过设置不同情景,如不同气候模式、土地利用情景等来模拟不同条件下的产流状况,以此确定不同因素对径流过程的影响,如邱国玉等^[6]基于 SWAT 模型分别从北方气候和土地利用两方面的变化对泾河径流产生的影响进行了定量评估;冯夏清等^[7]通过 SWAT 模型探讨了不同气候变化情景下乌裕尔河流域的径流演变趋势。

目前有关人类活动对河川径流影响的研究大多专注于土地利用变化对河川年径流量的影响,而缺乏对河川径流情势影响的探索;同时,人类活动影响多指土地利用/覆被变化对水文过程的间接影响,而人类涉水活动的直接影响,如河道取水、库坝蓄水等,或被忽略,或被包含在土地利用/覆被变化中,并未做细致的区分。基于此,笔者通过建立泾河流域的 SWAT 模型,重点模拟不同时期土地利用/覆被变化下的产汇流过程,并着重从年际与年内尺度两个层面分析土地利用/覆被变化对径流的影响,以期更全面科学地评估径流情势对土地利用/覆被变化的响应;同时,对比分析不同气候以及人类活动等条件的变化对水文过程的影响,探索气候变化和人类活动的综合影响,为流域水资源管理提供技术参考。

1 研究区概况与数据

1.1 研究区概况

泾河流域概况如图 1 所示。泾河是渭河最大的支流,黄河的二级支流,发源于宁夏六盘山东麓,流经甘肃省平凉、泾川,并于杨家坪进入陕西长武县,途径政平、亭口、彬县、泾阳,最后于高陵县泾渭镇汇入渭河,全长 455 km。泾河水系较为发达,集水面积大于 1 000 km² 的支流有 11 条,大于 500 km² 的支流有 26 条,各冲刷沟溪则达万条以上。泾河流域面积

45 373 km²,区内地形支离破碎,沟壑纵横,水土流失极其严重,是渭河主要沙源之一。泾河流域处于温带半湿润区向半干旱区的过渡带,其气候类型为典型的温带大陆性气候,冬季干旱少雨,夏季多暴雨。张家山断面以上多年平均降水量为 539.1 mm,多年平均蒸发量(蒸发皿)为 1 135.3 mm,多年平均天然年径流量为 18.7 亿 m³,多年平均输沙量为 2.526 亿 t。

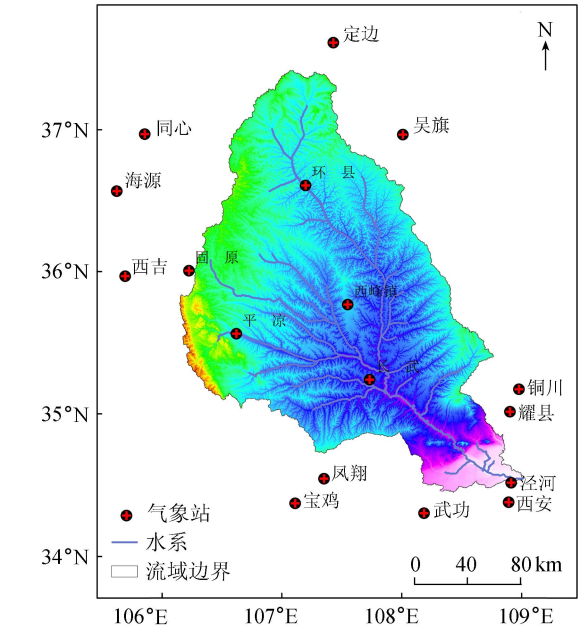


图 1 泾河流域概况及周围气象站分布

泾河流域降水多集中于夏秋季,5—9 月降水量占全年的 72% ~ 86%,年内分布不均;降水的空间分布亦不均匀,大体呈南北向递减。不均衡的降水时空分布增加了区域水资源开发利用的复杂度。

1.2 研究区土地利用/覆被变化

在人类活动和气候变化的影响下,泾河流域的土地利用/覆被条件发生了深刻的改变。表 1 为 20 世纪 70 年代和 1995 年两个时期的各土地利用类型的变化^[8]。由表 1 可知,与 20 世纪 70 年代相比,20 世纪 90 年代的林地与高覆盖度草地面积显著减少,而低覆盖度草地和未利用地面积则有所增加。综合来看,研究区内覆被条件整体呈退化趋势,这对区域的产汇流过程产生了较大的影响。

表 1 研究区土地利用/覆被变化							%
时段	水体	耕地	林地	高覆盖度草地	低覆盖度草地	未利用地	城镇用地
1971—1980 年	0.30	28.00	17.60	17.90	33.20	3.10	0.00
1995 年	0.40	27.20	13.00	15.40	37.00	6.90	0.10

1.3 数据收集与处理

1.3.1 数据资料选取

a. 降水资料。为使模型精度更高,选取泾河流域内及周边共 17 个气象站(图 1)1960—2010 年实测数据建立气象数据库,采用协克里金插值法计算泾河流域

面降水量,统计结果如图2所示。由图2可见,在1960—2010年间,区域降水并无明显趋势性变化。

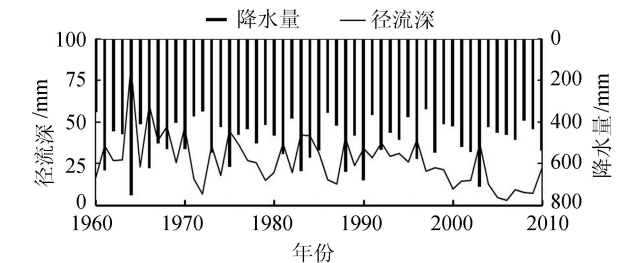


图2 研究区降水量与径流深年际变化

b. 径流资料。选取泾河干流出口站——张家山水文站 1960—2010 年逐日实测流量资料进行变异分析与对比计算。

c. 空间数据。采用 30 m×30 m 分辨率的 DEM 数据 (来源于 shuttle radar topography mission, SRTM), 1:100 万土壤图(来自中国科学院南京土壤研究所提供的土壤类型图)以及 1995 年 1:10 万土地利用图(来源于国家自然科学基金委员会中国西部环境与生态科学数据中心)作为模型空间数据。

1.3.2 资料的合理性与代表性审查

a. 率定期与验证期。通过对张家山站各月径流实测序列的水文变异诊断,发现各月径流的变异点虽有不同,但均发生在 1996 年之后,加之降水无趋势性变化,说明 1996 年以前人类活动虽对张家山站以上径流有影响,但并不显著,可认为 1996 年以前人类取用水活动并未发生大规模的变化,径流情势改变应主要受土地利用/覆被变化影响。同时,对张家山站上游的调查显示泾河流域内大型河道取用水工程如张家山渠首水库、西郊水库等均于 1996 年后兴建运行,故可认为 1996 年之前土地利用/覆被变化是影响研究区径流情势变化的主要因素。因此,选取 1987—1995 年作为模型校准、验证期。

b. 模拟期的代表性。模拟期的代表性是研究结果是否可信、是否具有普遍意义的关键,1971—2005 年包含完整的丰枯变化,且径流量均值与长系列基本一致,说明该时段具有较好的代表性。

2 研究方法

2.1 SWAT 模型

SWAT(soil and water assessment tool)模型于 20 世纪 90 年代初由美国农业部(USDA)农业研究局(ARS)融合了 CREAMSS 模型、EPIC 模型、GLEAMS 模型的主要特征,在 SWRRB 模型基础上,结合 ROTO 模型开发而成^[9-13],其工作原理为:通过 DEM 数据提取流域河网水系,将研究流域划分为多个子流域,并结合土地利用类型和土壤类型数据,将子流

域划分为不同的水文响应单元 HRUs;通过建立气象数据库,模拟各水文单元水分循环及其定量转化关系,进行汇总演算后,得到流域的水平衡关系。模型建立和应用流程分别如图 3、图 4 所示。

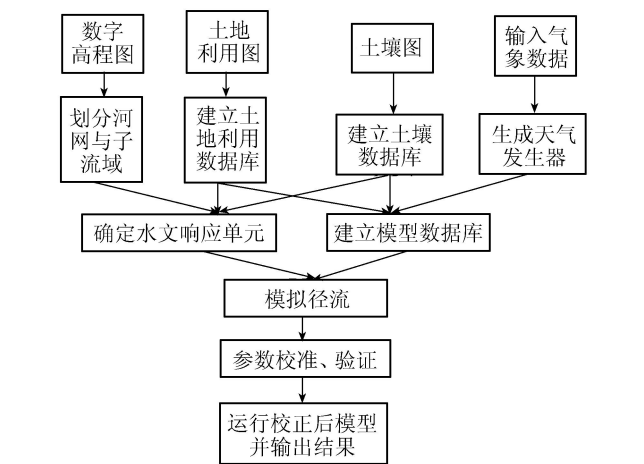


图3 SWAT 模型建立流程

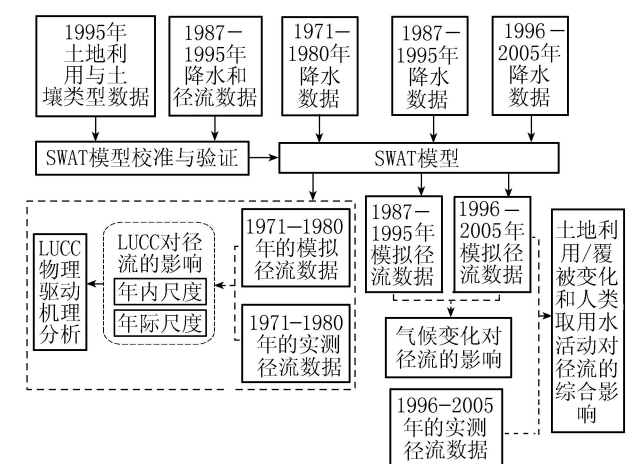


图4 基于 SWAT 的土地利用/覆被变化影响分析

2.2 径流情势评价指标

为全面分析土地利用/覆被变化对径流情势的影响,选取多年平均径流量,各月平均径流量,春、夏、秋、冬四季径流量,汛期、非汛期径流量,径流年内集中度与集中期,径流年际变差系数与偏态系数以及径流系数共 24 个指标,分别从径流量的年际演变情势和年内分配特性两个层面对土地利用/覆被变化对水文情势的影响展开评估。

把一年内所有月的径流量看作向量,月径流量的大小作为该月径流矢量的模,即径向距离;所处的月份作为径流矢量的方向,用圆周(把圆周的度数 360°作为 1 年天数 365 d,则 1 d 相当于 0.986 3°)方位来表示,将一年中各月径流矢量求和,合矢量模与年径流的比值为年径流集中度 C_D ,合矢量方向为年径流集中期 C_p ^[14-15],计算公式如下:

$$C_D = \frac{\sqrt{R_x^2 + R_y^2}}{R} \quad (1)$$

$$C_p = \arctan \frac{R_x}{R_y} \quad (2)$$

$$R_x = \sum_{i=1}^{12} r_i \sin \theta_i \quad (3)$$

$$R_y = \sum_{i=1}^{12} r_i \cos \theta_i \quad (4)$$

式中: R 为年径流量,亿 m^3 ; R_x 、 R_y 分别为 12 个月的分量之和所构成的水平、垂直分量,亿 m^3 ; r_i 为第 i 月的径流量,亿 m^3 ; θ_i 为第 i 月径流的矢量角度, $i=1,2,\dots,12$ 。 C_D 可以很好地表达径流年内的集中程度,当全年径流集中于某一月, C_D 取最大值,为 1;当各月径流量相等, C_D 取最小值,为 0。 C_D 值越大,表征径流的年内分配越不均匀。 C_p 则主要反映最大径流量的出现时间。

3 泾河流域 SWAT 模型

对 1971—2005 年的径流过程进行模拟。选取张家山水文站月径流数据对流域径流模拟结果进行校准。模型率定与验证时期需要一个径流变化相对稳定的时间段,而 1987 年之前的流域土地利用/覆被变化较大,1996 年后研究流域出现了大规模的人类涉水活动,径流数据扰动强烈,这些时段的数据都不宜用作模型率定与验证。因此选取 1987—1992 年作为模型率定期,模拟尺度为月,并选取相关系数 R^2 、相对误差 E 、均方根误差 R_e 等 3 个指标用于评价模型适用性^[16-17]。同时选取 1993—1995 年作为模型验证期。

3.1 泾河流域土地利用类型与土壤类型重分类

由于调查的土地利用与土壤类型与 SWAT 模型要求不一致,因此需要进行重分类。图 5、图 6 分别为泾河流域重分类后的土地利用与土壤类型图,

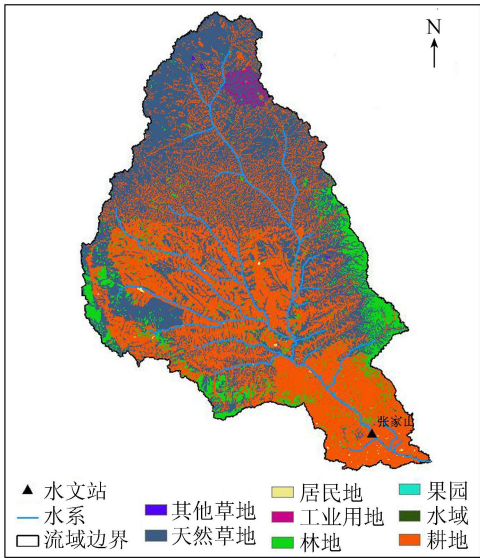


图 5 泾河流域土地利用分类

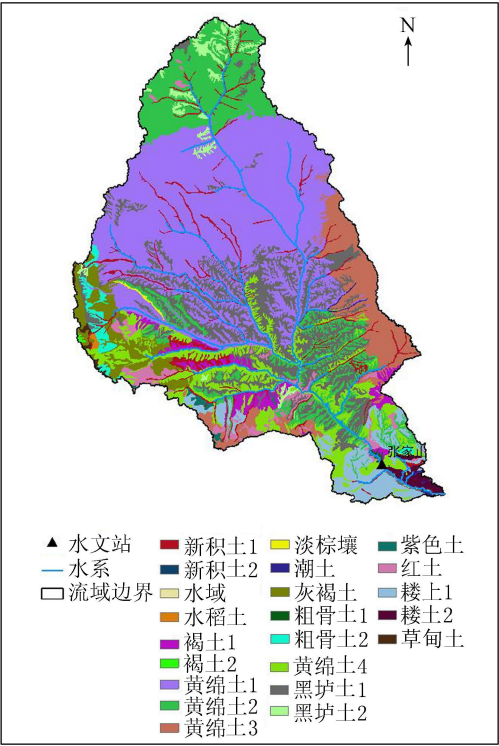


图 6 泾河流域土壤类型分类

其中土地利用类型为 8 种,土壤类型为 22 种。土地利用数据主要是依据 SWAT 模型代码逐一归类获得;而土壤数据则通过查阅相关资料,将其分为 14 个大类,即水域、水稻土、新积土、淡棕壤、潮土、灰褐土、糙骨土、紫色土、红土、糙土、草甸土、褐土、黄绵土以及黑垆土。对于面积较大且复杂的大类,则将其划为不同子类,如新积土、糙骨土、糙土、褐土、黑垆土均包含了两个子类;而对于最为普遍的黄绵土,本文则将其划为 4 个子类。计算所需参数后,建立相关的基础数据库。

3.2 模型参数校准及验证

数据库建立与参数初设完毕,即可进行径流模拟验证,模拟结果如图 7 所示。由图 7 可知模型模拟径流与实测径流较为吻合,降水的丰枯变化与径流的丰枯变化基本一致。

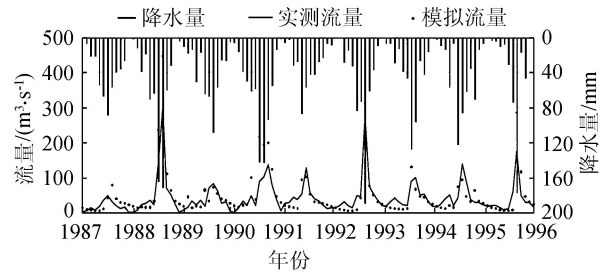


图 7 张家山站 1987—1995 年径流模拟

从模型校准期与验证期的误差分析结果(表 2)看,模型校准期相对误差 E 为 15.8%,相关系数 R^2 达到 0.91,均方根误差 R_e 仅为 $32.87 \text{ m}^3/\text{s}$,表明模拟效果

较好;而在模型验证期, E 和 R^2 分别为 1.6% 和 0.81, 误差也在可接受范围内,故可认为该模型可以使用。

表 2 径流模拟效果评价			
模拟时段	$E/\%$	$R_e/(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	R^2
模型校准期	15.8	32.87	0.91
模型验证期	1.6	34.18	0.81

4 土地利用/覆被变化对径流情势的影响

在 1971—1980 年实测气象条件下,模拟 20 世纪 90 年代土地利用/覆被变化条件下的产汇流过程,将其与 1971—1980 年实测径流对比,分析研究区土地利用/覆被变化(不包含人类涉水活动)对径流情势的影响。

4.1 对径流年际变化的影响

对比 1971—1980 年 SWAT 模型模拟径流与实测径流过程,并统计相关参数,如年平均流量、年际变差系数、偏态系数以及径流系数等,对比分析主要

体现土地利用/覆被变化下径流情势的改变,部分结果如图 8 所示。由图 8(a)可知,土地利用/覆被变化对径流的年际变化影响是客观存在的,与实测径流相比,模拟径流大 18%。纵观整个模拟期,实测年径流量的变差系数和偏态系数分别为 0.45 和 0.29,年径流波动起伏较大,但在均值两侧分布较为对称。土地利用/覆被变化后,模拟径流的变差系数和偏态系数变为 0.41 和 0.62,可见土地利用/覆被变化导致径流在年际变化上更趋于平缓,且正偏显著。

同时,统计结果显示,1971—1980 年实测年平均流量为 $36.30 \text{ m}^3/\text{s}$,而模拟年平均流量为 $43.33 \text{ m}^3/\text{s}$,大于实测值,这表明土地利用/覆被变化整体上对径流有“增量”影响。

4.2 对径流年内分配特征的影响

4.2.1 季节分布影响

统计 1971—1980 年春、夏、秋、冬四季及汛期、非汛期的实测与模拟径流量,结果如图 9 所示。

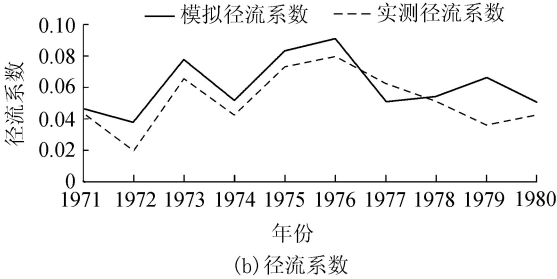
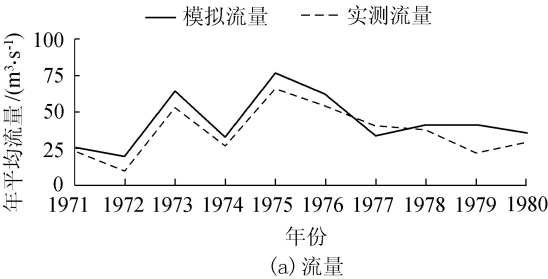


图 8 张家山站实测与模拟径流的年际变化

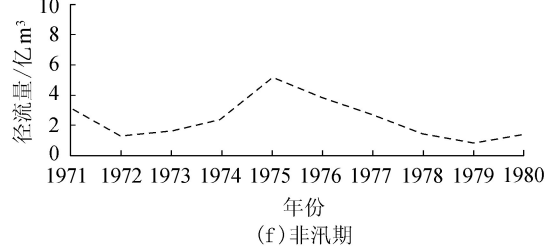
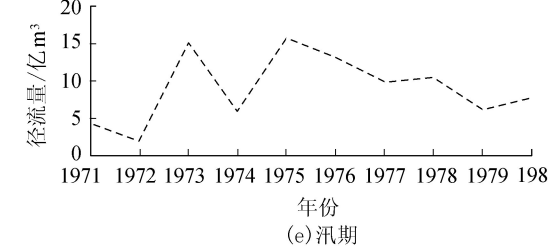
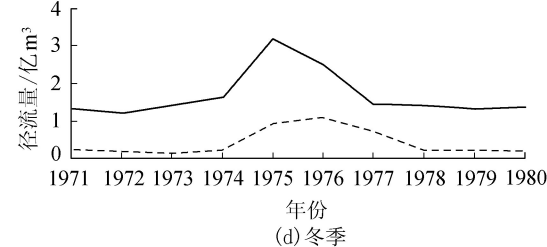
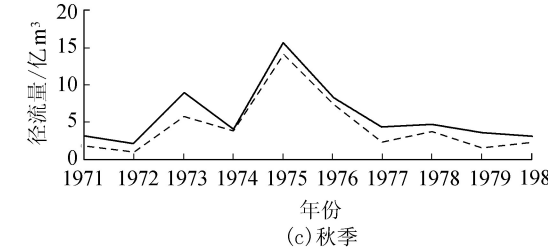
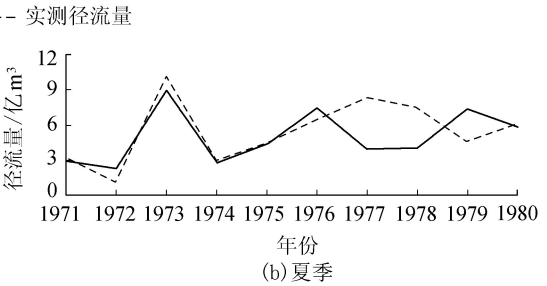
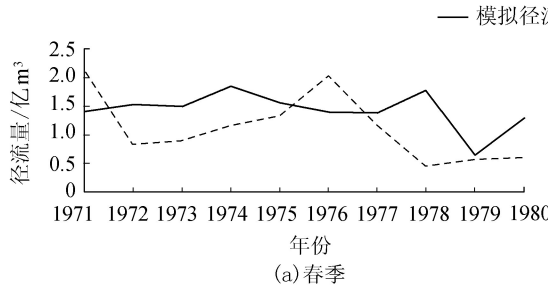


图 9 张家山站四季及汛期、非汛期模拟与实测径流量

土地利用/覆被变化后,夏秋两季径流量的变化相对较小,而冬春两季变化较大,尤其是冬季径流显著增大。从图 9 可以看出,冬季实测径流与模拟径流的变化趋势基本一致,但量值差别较为明显,模拟值大约是实测值的 4 倍;而春、秋季差别次之,模拟径流量分别比实测径流量大 27% 和 31%。夏季模拟径流则较实测径流略小,应该是土地利用/覆被变化引发的产流系数变小所致。

从汛期与非汛期径流的差异看,汛期模拟径流量比实测径流量略大(增幅 6%);而非汛期模拟径流量显著大于实测径流量(增幅 80%)。可见,土地利用/覆被变化使得区域的产汇流过程发生改变。

4.2.2 集中度与集中期

根据式(1)~(4)计算得到实测与模拟径流的集中度与集中期如图 10 所示。由图 10(a)可知,张家山站年内实测径流分布较为集中,集中度在 0.33~0.78 之间。土地利用/覆被变化后,径流集中度明显减小,多年平均值从 0.61 缩减为 0.47。这主要与土地利用方式变化后,枯季水量显著增加有关。由图 10(b)可知,模拟径流与实测径流的集中期相差不大,但略有滞后。实测径流集中期主要分布于 7 月下旬至 9 月,8 月较为集中,占统计年数的 40%,从分布形态看,集中期分布较为均匀,7 月、9 月各占 30%。而模拟径流的集中期总体拖后,集中期分布于 8—10 月,其中 8 月仍为主集中期,约占统

计年份的 50%,9 月次之,占 40%。总体来看,模拟径流相对实测径流,集中期更为集中,时域上的波动幅度更小。

4.2.3 月尺度径流变化

1971—1980 年实测与模拟月径流深对比如表 3 所示。由表 3 可知,除个别月份(如 4—7 月)模拟值略小于实测值外,其余各月模拟值均大于实测值。相差幅度最大的月份为 1 月和 12 月,模拟值是实测值的 5 倍以上。此外,模拟与实测径流的波动范围上也有明显差别,可见土地利用/覆被变化不仅影响月径流量的大小,对月径流的年内波动亦有扰动。

表 3 1971—1980 年实测与模拟月径流深对比 mm

项目	1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	6 月
模拟径流深	1.14	0.76	0.61	0.89	1.57	0.67
实际径流深	0.17	0.40	0.53	0.55	1.32	0.69

项目	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月
模拟径流深	4.05	6.04	6.07	3.87	2.52	1.70
实际径流深	5.46	5.66	4.68	2.97	1.83	0.32

4.3 物理成因分析

由前面的分析可知,泾河流域土地利用/覆被变化,导致张家山站控制流域的地表产流量和径流总量均有增加。基于区域水循环的物理机制(图 11),可认为林地、高覆盖草地向地覆盖草地、未利用土地的转化,会导致流域内蒸散发和冠层截留及草地枯落物截留量减小及入渗量增加,进而使地表径流与基流量有所增加,这与文献[18-20]的研究结论基本一致。

为了进一步剖析土地利用/覆被变化对流域水文机制的影响,应用滤波法^[21]切割 1971—1980 年的模拟与实测径流序列,得到两者的基流演变过程。分割结果显示,模拟的冬季基流明显大于实测径流,差值达 0.7966 亿 m³,为实测基流的 4.38 倍;春季基流也有差别,差值为 0.0744 亿 m³,约为实测基流的 29%;夏秋二季基流量相差不大,且呈一定程度减小。通过对基流时域变化的分析,发现基流与降水峰值存在大约 3 个月的时滞,故认为冬季基流的增加应该主要受到汛期降水对地下水补给的增大所影响。从汛期与非汛期来看,模拟的非汛期基流显著大于实测值,从 0.7727 亿 m³ 增至 1.7526 亿 m³;汛期基流则有一定程度减小,这一变化与季节变化的结果基本一致。

综合以上分析,研究区的土地利用/覆被变化后,年地表径流和基流均呈增大趋势(地表径流量增幅为 2%,基流增幅为 0.5%),年径流量有所增大,且年际变化趋于平缓。从年内分布看,丰水季节径流受地表产流增大的影响,呈现小幅增加;枯水季

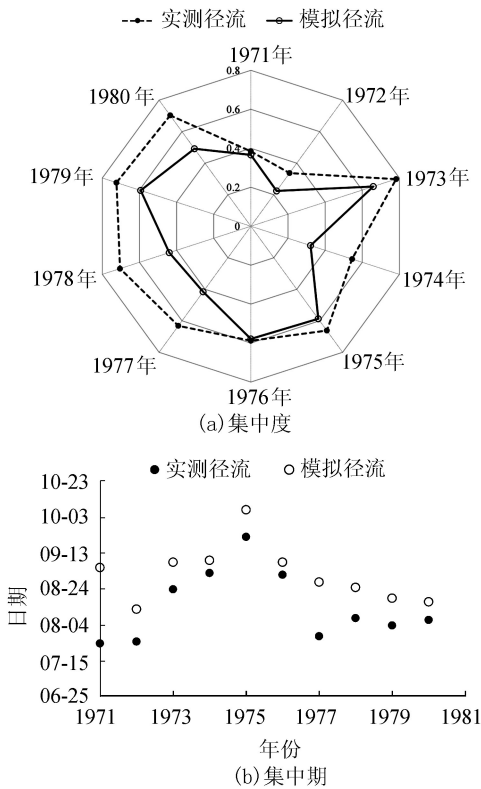


图 10 模拟与实测径流集中度及集中期

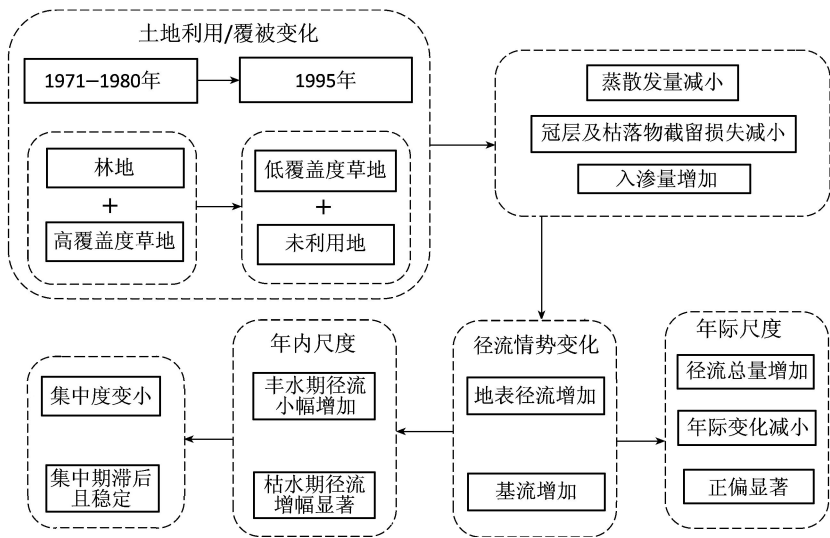


图 11 土地利用/覆被变化影响的物理成因分析

节径流受基流增大的影响,增幅显著。两者变化导致径流的集中度减小,集中期偏后且趋于稳定。

5 气候变化和人类活动对径流的综合影响

水文过程受气候变化和人类活动的联合影响,在不同时期呈现不同的趋势变化和波动规律^[22-23]。其中,影响水文过程的人类活动主要包括两大类,即土地利用/覆被变化和人类涉水活动。人类涉水活动对水文过程产生直接影响,包括取水活动等导致的径流“减量”变化以及污水排放等导致的径流“增量”变化,而土地利用/覆被变化指通过影响产流和汇流改变水文过程,其亦包括“减量”和“增量”两种模式。以下通过对比分析的方式,简要探讨气候变化和人类活动对研究区径流的综合影响,包括:①设定气候条件不同(1987—1995 年与 1996—2005 年两个时间段的降水条件),土地利用/覆被条件相同(20 世纪 90 年代),人类涉水活动无变化(或变化不显著),旨在评价两个时间段气候变化对径流量的影响;②设定气候条件相同(1996—2005 年的降水条件),土地利用/覆被条件不同(1995—2005 年变化中的土地利用/覆被条件),人类取水活动不同(无变化对比人类涉水活动强烈),旨在通过模拟径流与实测径流的对比,反映土地利用/覆被变化和人类涉水活动的综合影响。

基于 20 世纪 90 年代土地利用/覆被条件不同因素对径流的影响统计结果如表 4 所示。1996—2005 年,气候变化使径流深增加 9.20 mm,人类活动则导致径流深减小 18.76 mm,人类活动对泾河流域的径流影响更为显著。从人类活动的类型上看,1996 年之前以土地利用/覆被变化为主导,影响程度相对较小,而之后人类涉水活动发挥主要作用,并超过气候变化,成为影响水文过程变化的关键因素。

表 4 不同因素对径流的影响

时段	实测径流深/mm	模拟径流深/mm	影响因素	影响值/mm
1971—1980 年	25.98	30.5	土地利用/覆被变化	4.52
1996—2005 年	20.94	39.7	土地利用/覆被变化和人类涉水活动	18.76
1987—1995 年	30.50		气候变化	9.20
1996—2005 年		39.7		

6 结 论

a. SWAT 模型可用于泾河流域月尺度的径流模拟,且具有较好的模拟精度。

b. 由林地、高覆盖草地向低覆盖草地、未利用地的转变,将使泾河流域蒸散发量、冠层和落叶层截留量减小,入渗量增加,进而导致河川基流量和地表径流量增大。

c. 土地利用/覆被变化后,受到地表产流和基流增加的共同影响,泾河径流量呈小幅增加,年际变化更为平稳,正偏显著。年内变化差异显著,枯水季节径流受基流变化影响,显著增加,丰水季节变动不大;集中度整体变小,年内分配更趋均匀;集中期略有滞后,且趋于平稳,且主要集中于 8 月和 9 月。

d. 人类活动对泾河流域的径流影响更为显著。1996 年之前人类活动以土地利用/覆被变化为主导,影响程度相对较小,而之后人类涉水活动发挥主要作用,并超过气候变化和土地利用/覆被变化,成为影响水文过程变化的关键因素。

参考文献:

[1] WILLIM B M. Changes in land use and land cover: a global perspective[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1994.
 [2] 杨丽,谢高地,甄霖,等. 泾河流域土地利用格局的时空

- 变化分析[J]. 资源科学,2005,27(4): 26-32. (YANG Li,XIE Gaodi,ZHEN Lin, et al. Spatio-temporal changes of land use in Jinghe Watershed[J]. Resources Science, 2005,27(4): 26-32. (in Chinese))
- [3] 姚苏红,朱仲元,张圣微,等. 基于 SWAT 模型的内蒙古闪电河流域径流模拟研究[J]. 干旱区资源与环境, 2013,27(1): 175-180. (YAO Suhong,ZHU Zhongyuan,ZHANG Shengwei, et al. Using SWAT model to simulate the discharge of the River Shandianhe in Inner Mongolia [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2013,27(1): 175-180. (in Chinese))
- [4] 杨桂莲,郝芳华,刘昌明,等. 基于 SWAT 模型的基流估算及评价:以洛河流域为例[J]. 地理科学进展,2003, 22(5): 463-471. (YANG Guilian,HAO Fanghua,LIU Changming, et al. The study on baseflow estimation and assessment in SWAT: Luohe Basin as an example [J]. Progress in Geography, 2003, 22(5): 463-471. (in Chinese))
- [5] 孟现勇,吉晓楠,刘志辉,等. SWAT 模型融雪模块的改进与应用[J]. 自然资源学报,2014,29(3): 528-539. (MENG Xianyong,JI Xiaonan,LIU Zhihui, et al. Research on improvement and application of snowmelt module in SWAT[J]. Journal of Natural Resources, 2014,29(3): 528-539. (in Chinese))
- [6] 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. (QIU Guoyu,YIN Jing,XIONG Yujiu, et al. Studies on the effects of climatic warming:drying trend and land use change on the runoff in the Jinghe River Basin[J]. Journal of Natural Resources, 2008, 23(2): 211-218. (in Chinese))
- [7] 冯夏清,章光新,尹雄锐. 基于 SWAT 模型的乌裕尔河流域气候变化的水文响应[J]. 地理科学进展,2010,29(7): 827-832. (FENG Xiaqing,ZHANG Guangxin,YIN Xiongwei. Study on the hydrological response to climate change in Wuyur River Basin based on the SWAT model [J]. Progress in Geography, 2010,29(7): 827-832. (in Chinese))
- [8] 谢芳,邱国玉,尹婧,等. 泾河流域 40 年的土地利用/覆盖变化分区对比研究[J]. 自然资源学报,2009,24(8): 1354-1365. (XIE Fang,QIU Guoyu,YIN Jing, et al. Comparison of land use/land cover change in three sections of the Jinghe River Basin between the 1970s and 2006 [J]. Journal of Natural Resources, 2009, 24(8): 1354-1365. (in Chinese))
- [9] 王学. 基于 SWAT 模型的白马河流域土地利用/覆被变化的水文效应研究[D]. 济南: 山东师范大学,2012.
- [10] 李成六. 基于 SWAT 模型的石羊河流域上游山区径流模拟研究[D]. 兰州: 兰州大学,2011.
- [11] 李小冰. 基于 SWAT 模型的秃尾河流域径流模拟研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学,2010.
- [12] 刘健. 渭河流域非点源氮污染分布式模拟研究[D]. 西安: 西安理工大学,2008.
- [13] 刘闻. 基于 SWAT 模型的水文模拟及径流响应分析:以渭河流域关中段为例[D]. 西安: 西北大学,2014.
- [14] 刘贤赵,李嘉竹,宿庆,等. 基于集中度与集中期的径流年内分配研究[J]. 地理科学,2007,27(6): 791-795. (LIU Xianzhao,LI Jiazhao,SU Qing, et al. Inter-annual runoff distribution based on degree and time of concentration for rivers [J]. Scientia Geographica Sinica, 2007,27(6): 791-795. (in Chinese))
- [15] 李艳,陈晓宏,张鹏飞. 北江流域径流序列年内分配特征及其趋势分析[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2007,46(5): 113-116. (LI Yan,CHEN Xiaohong,ZHANG Pengfei. Research on annual distribution and its trends of runoff in Beijiang River, Guangdong [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 2007,46(5): 113-116. (in Chinese))
- [16] 薛晨. 基于 SWAT 模型的产流产沙模拟与模型参数不确定性分析[D]. 北京: 华北电力大学,2011.
- [17] 胥彦玲. 基于土地利用/覆被变化的陕西黑河流域非点源污染研究[D]. 西安: 西安理工大学,2007.
- [18] 陈莹,许友鹏,尹义星. 基于土地利用/覆被情景分析的长期水文效应研究:以西苕溪流域为例[J]. 自然资源学报,2009,24(2): 351-359. (CHEN Ying,XU Youpeng,YIN Yixing. Simulation of the hydrologic response to land use and land cover changes scenarios: a case study of Xitiaoxi Basin [J]. Journal of Natural Resources, 2009,24(2): 351-359. (in Chinese))
- [19] 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.
- [20] 余新晓,张满良,信忠保,等. 黄土高原多尺度流域环境演变下的水文生态响应[M]. 北京: 科学出版社,2011.
- [21] 豆林,黄明斌. 自动基流分割方法在黄土区流域的应用研究[J]. 水土保持通报,2010,30(3): 107-111. (DOU Lin,HUANG Mingbin. Applied study of baseflow separation methods in watersheds of Loess Plateau [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2010, 30(3): 107-111. (in Chinese))
- [22] 王国庆,张建云,贺瑞敏. 环境变化对黄河中游汾河径流情势的影响研究[J]. 水科学进展,2006,17(6): 853-858. (WANG Guoqing,ZHANG Jianyun,HE Ruimin. Impacts of environmental change on runoff in Fenhe River Basin of the Middle Yellow River [J]. Advances In Water Science, 2006,17(6): 853-858. (in Chinese))
- [23] 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. (ZHANG Jianyun,WANG Guoqing,HE Ruimin, et al. Variation trends of runoffs in the Middle Yellow River Basin and its response to climate change [J]. Advances in Water Science, 2009,20(2): 153-158. (in Chinese))

(收稿日期:2015-09-08 编辑:郑孝宇)