

袁毓婕, 高学睿, 黄可静, 等. 基于 RHESSys 模型的延河流域水文要素定量模拟[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2023, 21(1): 116-126. YUAN Y J, GAO X R, HUANG K J, et al. Quantitative simulation of hydrological elements based on RHESSys model in Yanhe River basin[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2023, 21(1): 116-126. (in Chinese)

基于 RHESSys 模型的延河流域水文要素定量模拟

袁毓婕¹, 高学睿^{1,2}, 黄可静¹, 姜珊³, 何国华³, 赵西宁^{2,4}

(1. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100; 2. 西北农林科技大学水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100;
3. 中国水利水电科学研究院水资源研究所, 北京 100038; 4. 西北农林科技大学旱区农业水土工程
教育部重点实验室, 陕西 杨凌 712100)

摘要:为量化气候变化和土地利用变化对水文过程的影响, 引入 RHESSys(regional hydro-ecological simulation system)模型对退耕还林(草)工程实施前(P₁时期)和实施后(P₂和 P₃时期)的延河流域水文要素(蒸散发、径流和土壤水)进行模拟, 并基于不同模拟情景量化土地利用变化和气候变化对不同水文要素的影响。结果表明:退耕还林(草)工程实施后, 延河流域蒸散发量呈现显著上升趋势, 径流和土壤水呈现下降趋势, 但趋势并不显著。与 P₁时期(1990—1999年)相比, P₂时期(2000—2009年)由人类活动引起的土地利用变化对蒸散、径流和土壤水变化的贡献率分别为 82.66%、-51.87% 和 -55.13%, 随着退耕还林工程的继续实施, P₃时期(2010—2019年)贡献率下降到 57.64%、-51.63% 和 -52.54%。由此可见, 退耕还林(草)工程实施后, 土地利用变化成为影响流域水文过程的主导因素。该结果对于黄土高原退耕还林(草)工程的实施前景和可持续发展管理有重要意义。

关键词:植被恢复; 气候变化; 蒸散发; 径流; 土壤水; RHESSys 模型

中图分类号: TV213 **文献标志码:** A **DOI:** 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2023.0013

在气候变化和人类活动影响下, 流域水循环过程演变规律发生了深刻变化^[1-5], 准确量化气候和人类活动因子对水文过程各要素的影响是流域水文模拟和水资源管理领域的重要命题。目前区分人类活动和气候变化对水文过程影响的方法主要分为 3 类, 分别是对比流域法、经验公式法和模型模拟法。对比流域法虽然可以有效区分气候变化和人类活动对水文变量的影响^[6], 但这种方法应用的前提条件是两个对比流域具有一定程度的相似性, 流域越大这个前提便越难满足, 因而容易受到限制^[7]。大尺度经验模型已被广泛应用于研究变化环境下流域水量平衡对各种影响因素的响应, 其中最具有代表性的为 Budyko 公式。张建云等^[8]基于 Budyko 公式和弹性系数法分析不同植被变化对径流的影响。Gao 等^[9]利用 Budyko 框架分析降水、潜在蒸散发和实际蒸散发的时空演变, 并量化了黄土高原

植被用水的可持续性, 但这种方法只是概念性的方法, 难以阐述水文过程与影响因素之间相互作用机理。模型模拟法是通过遥感数据驱动水文模型来分析变化环境对水文过程的影响。Gao 等^[10]基于 SWAT 模型, 量化了气候和多种人为因素对径流变化的影响。然而大部分水文模型模拟水文过程时很少考虑植被的动态生长。与其他简单的水文模型相比, RHESSys(regional hydro-ecological simulation system)生态水文模型在原有的水文模型基础上强化了水文过程与植被变化间的联系, 以更基于过程的方式模拟水文过程, 并通过对输入植被多种控制条件实现植被的动态模拟^[11]。因此, 即使在植被变化过程中 RHESSys 也可以较为准确地描述水文过程。

由于黄土高原易侵蚀和区域干旱缺水的特点, 同时加上气候变化和人类活动的影响, 黄土高原已成为全球侵蚀最严重和生态环境最脆弱的地区之

收稿日期: 2022-07-25 修回日期: 2022-11-15 网络出版时间: 2022-11-23

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1430.TV.20221123.0758.002.html>

基金项目: “十四五”国家重点研发计划项目(2021YFD1900701); 流域水循环模拟与调控国家重点实验室开放研究基金项目(IWHR-SKL-KF202101)

作者简介: 袁毓婕(1998—), 女, 山西临汾人, 主要从事流域水循环模拟研究。E-mail: yj06261@163.com

通信作者: 高学睿(1986—), 男, 陕西咸阳人, 副研究员, 博士生导师, 主要从事流域水资源管理及水循环模拟研究。E-mail: gaoxuerui666@163.com

—^[12]。1999 年以来,黄土高原地区开展的退耕还林(草)工程使大量坡耕地变成草地和林地,水土流失问题得到了很大的改善^[13-14]。以往研究^[15]证实,植被恢复可以补充土壤中的水分;但也有研究^[16]认为在干旱半干旱地区,植被恢复会降低土壤含水量和径流量,增加更多的水分蒸发消耗。事实上,受气候变化和流域复杂下垫面改变的影响,流域尺度下的水文要素出现明显改变,具有高度不确定性,定量分析变化环境对黄土高原水文要素影响的研究仍有不足。因此,深入了解黄土高原水文要素变化特征以及对气候变化和人类活动的响应,对于区域退耕还林(草)工程的实施前景和可持续发展管理有重要意义。

基于此,本研究选择退耕还林(草)典型流域-延河流域为研究区域,针对延河流域复杂下垫面条件,引入考虑植被动态生长的 RHESSys 生态水文模型,实现延河流域斑块尺度上的水文过程的模拟,并量化人类活动和气候变化对水文要素的影响,以期对黄土高原水资源规划和管理提供理论支撑。

1 研究区概况和数据来源

1.1 研究区概况

延河地处黄土高原中部,其地理坐标为北纬 $36^{\circ}21' \sim 37^{\circ}19'$,东经 $108^{\circ}38' \sim 110^{\circ}29'$ 。延河全长 286.9 km,流经安塞县、延安市和延长县多地后,最后于延长县汇入黄河,甘谷驿站为流域出口把口站。流域面积为 $7\,725\text{ km}^2$,是黄土高原水土流失最严重的区域之一,也是黄河粗泥沙的主要来源地之一^[17]。延河流域四季温差明显,多年平均气温为 $9\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。流域多年平均降水量为 493 mm,由东南至西北递减,年际变化较大且年内分配不均,夏季(5—10月)降水量占全年约 70%。自 20 世纪 90 年代末实施退耕还林工程后,该区域植被覆盖度提高了约 25%,流域下垫面状况发生显著变化。

1.2 数据来源

数字高程数据(DEM)分辨率为 30 m,来源于地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn/>);土地利用数据采用 1995、2005、2015 年共 3 期土地利用图,分别代表退耕还林前、退耕还林初期和退耕还林中期的土地覆盖状况,来源于中国科学院资源环境科学与数据中心(<https://www.resdc.cn/>),空间分辨率为 30 m;植被类型数据空间分辨率为 1 km,来自中国科学院资源环境科学与数据中心(<http://www.resdc.cn/>);土壤类型分布图来自中国科学院土壤研究所,

并在中国土壤数据库下载各类土壤的土壤属性数据(<http://vdb3.soil.csdb.cn/>);日气象数据来源于中国气象数据网(<http://data.cma.cn/>),包括延河流域及周边 8 个气象站点(安塞站、延安站、延长站、靖边站、子长站、延川站、志丹站和甘泉站)1990—2019 年的降水、气温、相对湿度、日照时数、气压、风速等数据;NDVI 数据来源于中国科学院资源环境科学与数据中心(<https://www.resdc.cn/>),空间分辨率为 250 m。

2 研究方法

2.1 RHESSys 模型

RHESSys 模型是用于综合模拟流域内水、碳氮循环的分布式物理机理的生态水文模型。早期版本的 RHESSys 是由 FOREST-BGC 模型(forest ecosystem model)^[18]和 TOPMODEL 模型(semi-distributed hydrological model)^[19]耦合而成的,一般用来模拟森林生态系统中水分、能量和碳氮循环。之后又借鉴了 BIOME-BGC、Century 和 DHSVM(distributed hydrology soil vegetation model)等模型,提高了在不同地表覆盖下的流域生态水文过程模拟效果。RHESSys 模型采用多层嵌套的空间离散单元,即 Basin、Hillslope、Zone、Patch 和 Canopy strata,可以在不同空间、时间尺度上进行模拟。以下部分为水文过程的简要描述,具体的理论详见 Tague 等^[11]。

RHESSys 模型中,在每个计算时段内,穿过冠层的降水落至地表土层储存并依照 Philip 下渗公式^[20]计算下渗的水量。

$$\begin{cases} Q_{\text{infil}} = I t_p + S_p \sqrt{t_d - t_p} + K_{\text{sat}}(t_d - t_p), & t_d > t_p \\ Q_{\text{infil}} = I t_d, & t_d < t_p \end{cases} \quad (1)$$

$$K_{\text{sat}}(z) = K_{\text{sat}_0} \exp\left(-\frac{z}{m}\right) \quad (2)$$

$$S_p = \sqrt{2} K_{\text{sat}_0} 0.76 \varphi_{\text{ae}} \quad (3)$$

$$t_p = K_{\text{sat}_0} 0.76 \varphi_{\text{ae}} \frac{\varnothing - \theta_0}{I(I - K_{\text{sat}_0})} \quad (4)$$

式中: Q_{infil} 为下渗量, m/d; I 表示降水的强度, m/d; t_d 表示降水的历时, d; t_p 表示降水的积水时间; Z 为饱和层深度, m; $K_{\text{sat}}(Z)$ 为饱和导水率, m/d; K_{sat_0} 为湿润峰处饱和导水率, m/d; K_{sat_0} 为表层导水率, m/d; m 为渗透系数随深度的衰减率; S_p 为吸水性, $\text{m}/\sqrt{\text{d}}$; φ_{ae} 为进气压力, m; \varnothing 为孔隙度, %; θ_0 为初始土壤含水量, %。未下渗的积水超过一定量后将形成地表径流。RHESSys 模型中,坡面以及壤中流的使用显式汇流模型-基于 DHSVM 的汇流方法来计算水分在

水平方向上的运移^[21]。饱和流为从 a 单元到 b 单元
的流量 $q(t)_{a,b}$ 可以估计为

$$q(t)_{a,b} = T(t)_{a,b} \tan \beta_{a,b} \omega_{a,b} \quad (5)$$

$$T(t)_{a,b} = \int_{-\infty}^{Z_{sat}} K_{sat_0} \exp \frac{z}{m_s} dz \quad (6)$$

式中： $q(t)_{a,b}$ 为水流由空间单元a流向b的流量，m/d； $\omega_{a,b}$ 为空间单元a与空间单元b的流线宽度，m； $\beta_{a,b}$ 为当地坡度， S 为水分饱和和方缺量； m_s 表示水分传导率的衰减率； Z_{sat} 为饱和深度，m。在上式中，将两个单元的流线宽度视为固定值，对于不规则格网，将交界处格网宽度视为流线宽度。

蒸散发通过标准 Penman-Monteith 公式^[22]估计。模型会对日尺度降雨和非降雨时段的蒸散发分开运算，降水历时为输入数据，不同分层的冠层空气动力阻抗并不相同。

各分层每日的蒸腾量 E 计算公式为

$$E = \min[\theta_l, E_{pot}(v=0; g_s = g_{s,nonvas})(D_{rain}) + E_{pot}(v=\bar{v}; g_s = g_{s,nonvas})(D_{day} - D_{rain})] \quad (7)$$

总蒸腾量 T 计算公式为

$$T = (E_{pot}(v=0; g_s = g_{s,sunlit}) + E_{pot}(v=0; g_s = g_{s,shade})) \cdot (D_{rain}) + (E_{pot}(v=0; g_s = g_{s,sunlit}) + E_{pot}(v=\bar{v}; g_s = g_{s,shade})) \times (D_{day} - D_{rain}) \quad (8)$$

式中： θ_l 为当前时刻截留储量，m； D_{rain} 是日内降水历时，s； D_{day} 为理论日照时长，s； \bar{v} 为平均日水汽亏缺，Pa； g_s 为冠层导度，m/s； $g_{s,shade}$ 和 $g_{s,sunlit}$ 分别为阴面和阳面叶子的冠层导度，m/s； $g_{s,nonvas}$ 为无气孔导度，m/s，采用 Williams 等^[23]的方法计算。

2.2 模型校准与验证

本研究在国家科技资源共享平台 (<http://loess.geodata.cn/>) 获取了延河流域出口站点甘谷驿水文站观测到的月径流观测数据对模型进行校准(1991—1997年)和验证(2008—2012年)。模型的准确性主要利用 Nash Sutcliffe 效率系数 (E_{NS}) 和决定系数 (R^2) 进行评估。 E_{NS} 的取值区间为 [0,1]，越趋近 1 表示模拟程度越好。 R^2 揭示了观测值与模型模拟值之间的线性关系，越接近 1 表示拟合程度越好。当 R^2 和 E_{NS} 均大于 0.6 时，表明 RHESSys模型的模拟结果可接受^[24]。

RHESSys 模型中有 4 个较敏感的参数，在本研究中，模型率定使用蒙特卡罗采样法，生成 500 个规定区间内的随机组合，在模型中对不同组合分别模拟计算。具体参数说明与率定结果见表 1。

表 1 RHESSys 模型率定参数及取值范围

Tab. 1 Parameter description and calibration results of RHESSys model

参数名称	参数说明	最小值	最大值	率定结果
m	水力传导率随深度的衰减系数	0.01	20.00	0.22
K	饱和水力传导系数	0	600	313
g_{w1}	下渗量进入深层地下水的比例	0.001	0.300	0.050
g_{w2}	深层地下水流出比例	0.01	0.90	0.69

2.3 水文要素变化的贡献率计算

一般来说，流域的水文要素变化受气候和人类活动支配。对于延河流域，在 2000 年以前流域受人为活动影响较小，因此本研究将未退耕还林时期 P_1 时期 (1990—1999 年) 设定为基准期，退耕还林初期 P_2 时期 (2000—2009 年) 和退耕还林中期 P_3 时期 (2010—2019 年) 为变化期。确定基准期和变化期后，通过比较 9 种情景下的 RHESSys 模型输出结果，量化植被恢复对流域水文要素的影响。具体情景设定见表 2。

表 2 9 种对比情景设定方案

Tab. 2 Nine scenarios setting for comparison

情景	LUCC	气候	
S_{11}	L_{P1}	C_{P1}	
S_1	S_{12}	L_{P1}	C_{P2}
S_{13}	L_{P1}	C_{P3}	
S_{21}	L_{P2}	C_{P1}	
S_2	S_{22}	L_{P2}	C_{P2}
S_{23}	L_{P2}	C_{P3}	
S_{31}	L_{P3}	C_{P1}	
S_3	S_{32}	L_{P3}	C_{P2}
S_{33}	L_{P3}	C_{P3}	

注： S_1 情景为退耕还林(草)工程实施前(1990—1999年)的土地利用条件下的情景； S_2 情景为退耕还林(草)工程实施初期(2000—2009年)的土地利用条件下的情景； S_3 情景为退耕还林(草)工程实施中期(2010—2019年)的土地利用条件下的情景。

那么,相对于基准期,在变化期观测到的水文要素变化可表示为

$$|\Delta E| = |\Delta E_c| + |\Delta E_l| \quad (9)$$

式中: ΔE 为相对于基准期的变化期中水文要素变化量,mm; ΔE_c 为气候变化引起的水文要素变化量,mm; ΔE_l 为土地利用转变引起的水文要素变化量,mm。那么,气候和土地利用变化对水文要素变化量的相对贡献率可表示为

$$C_c = \frac{E_c}{|\Delta E|} \quad (10)$$

$$C_l = \frac{E_l}{|\Delta E|} \quad (11)$$

式中: C_c 和 C_l 为气候要素和土地利用变化对水文要素变化量的相对贡献率,%。

基于上述设计情景,气候要素和土地利用变化对水文要素变化量的相对贡献率计算见表3。

表3 气候变化和人类活动对不同时期水文要素变化的贡献率

Tab. 3 Contribution of climate change and human activities to hydrological factors in different periods

时期	P ₂ (2000—2019年)	P ₃ (2010—2019年)
ΔE_c	$E_{S_{22}} - E_{S_{21}}$	$E_{S_{33}} - E_{S_{31}}$
ΔE_l	$E_{S_{21}} - E_{S_{11}}$	$E_{S_{31}} - E_{S_{11}}$
C_c	$\frac{E_{S_{22}} - E_{S_{21}}}{ E_{S_{22}} - E_{S_{21}} + E_{S_{21}} - E_{S_{11}} }$	$\frac{E_{S_{33}} - E_{S_{31}}}{ E_{S_{33}} - E_{S_{31}} + E_{S_{31}} - E_{S_{11}} }$
C_l	$\frac{E_{S_{21}} - E_{S_{11}}}{ E_{S_{22}} - E_{S_{21}} + E_{S_{21}} - E_{S_{11}} }$	$\frac{E_{S_{31}} - E_{S_{11}}}{ E_{S_{33}} - E_{S_{31}} + E_{S_{31}} - E_{S_{11}} }$

3 结果与分析

3.1 模型率定和验证

如图1所示,在月尺度上,RHESSys模型在校准期和验证期的 E_{NS} 分别为0.71和0.70, R^2 分别为0.82和0.79,结果表明模型对径流的变化模拟良好,模拟值和实测值较为接近,具有一定可靠性,可以认为RHESSys模型可用于延河流域的水文分析。

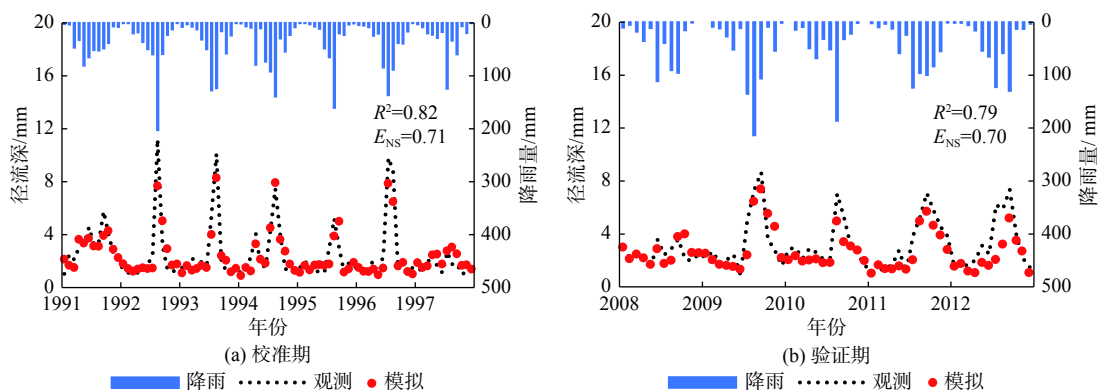


图1 校准期和验证期延河流域月径流的模拟值与观测值

Fig. 1 Simulation and observation of monthly runoff in Yanhe River basin during calibration and validation periods

3.2 气候及下垫面变化特征

3.2.1 气候变化特征

如图2和图3所示:流域气温变化不显著,增加速率为 $0.01\text{ }^{\circ}\text{C/a}$,平均值为 $10.84\text{ }^{\circ}\text{C}$,并呈现自东南向西北递减的趋势。虽然延河流域在1990—2019年气温呈现上升趋势,但这种变化并不显著,并且气温升高会间接影响流域水文过程。流域降水量显著增加,增加速率为 4.8 mm/a ,平均值为 493.90 mm 。受地形影响,空间上呈现东南向西北递减,下游多上游少的特点。总体而言,在退耕还林(草)工程实施之后,整个延河流域的湿化程度越

来越高。

3.2.2 土地利用变化特征

土地利用具有自然属性和社会属性,其利用方式的变化也会对自然生态环境和人类活动产生一定的影响。土地利用变化通过改变下垫面状况影响区域的蒸散、入渗和产流,进而影响流域的水文过程。

如图4和表4所示:延河流域主要的土地利用类型为耕地和草地,两者的总面积均占流域面积的80%以上。1995—2015年,耕地的面积为下降趋势,占比从43.70%减少到32.05%,而草地、灌木和林地

的面积均增加,增加比例分别为 6.94%、1.64% 和 2.78%,草地的增加比例最大,其次为林地。具体来看,耕地从 1995 年至 2015 年减少了 1 030.63 km²,主要流向草地、林地和灌木,转移量分别为 743.82、191.21 和 72.49 km²,也有部分草地、林地和灌木流向耕地,但转移量较小,在同时考虑其他土地利

用流向的情况下,最终耕地的面积减少了 899.31 km²,草地和林地的面积分别增加了 535.80 km² 和 214.32 km²。值得注意的是,除了耕地的面积在减少外,水域的面积也在减少,可能表明退耕还林(草)对径流的负面效应。总体而言,退耕还林(草)工程的实施改善了延河流域生态环境现状。

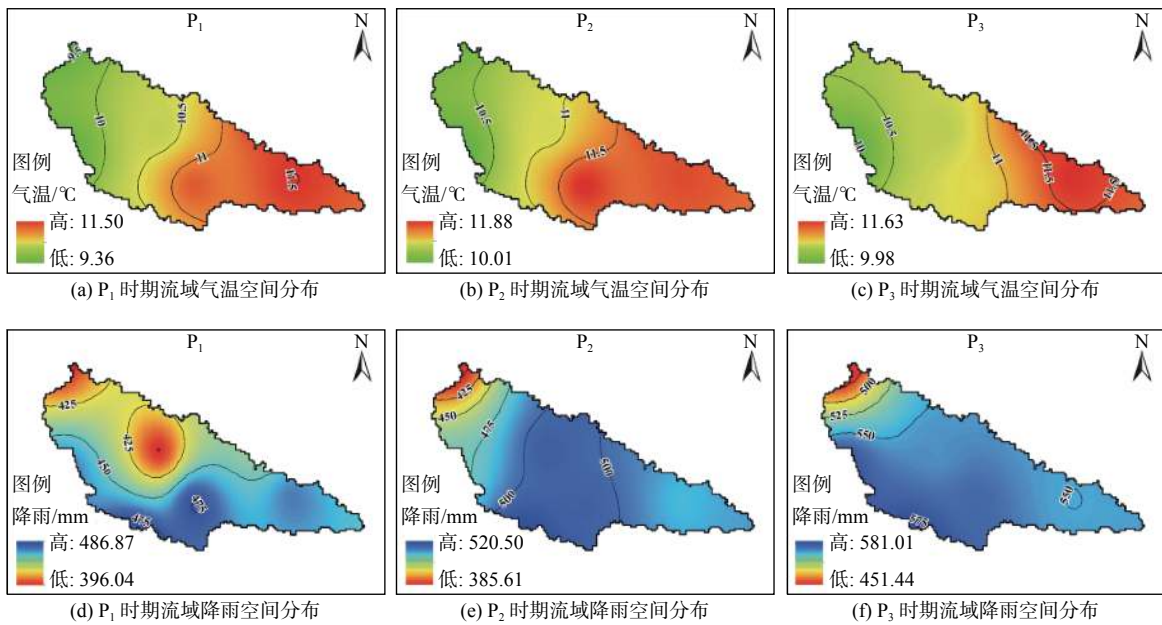


图 2 延河流域 P₁(1990—1999 年)、P₂(2000—2009 年) 和 P₃(2010—2019 年) 时期气温和降水空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of temperature and precipitation in P₁ (1990-1999), P₂ (2000-2009) and P₃ (2010-2019) periods in Yanhe River basin

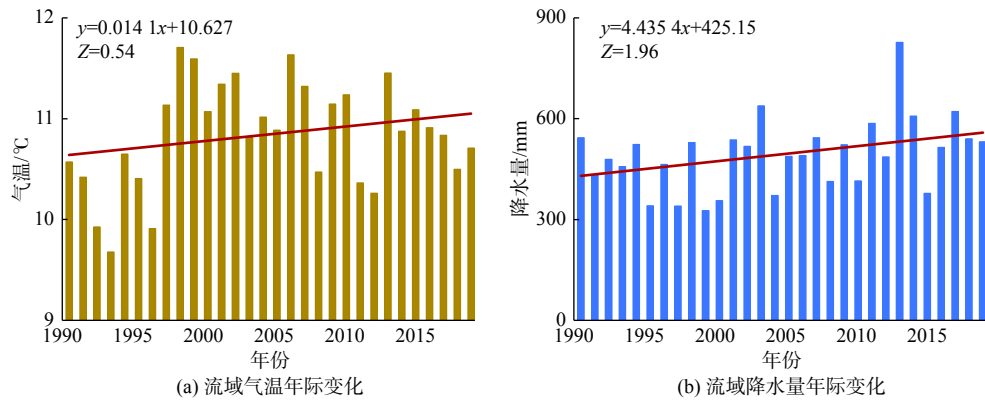


图 3 1990—2019 年延河流域气温和降水年际变化

Fig. 3 Interannual variation of temperature and precipitation in Yanhe River basin from 1990 to 2019

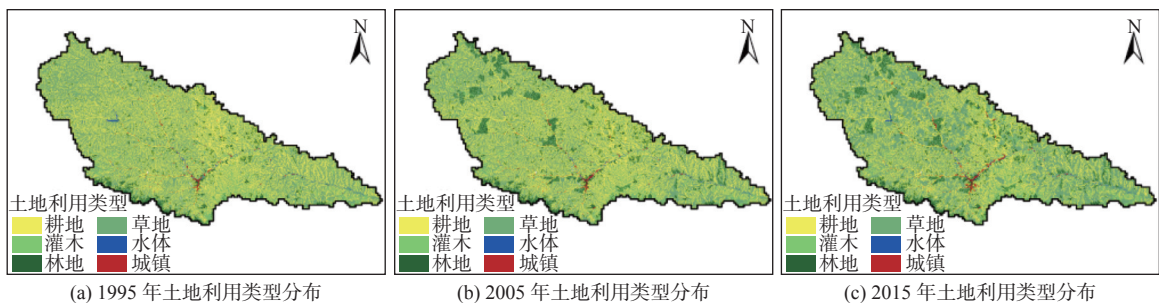


图 4 延河流域 1995、2000 和 2015 年土地利用类型分布

Fig. 4 Land use type distribution of Yanhe River basin in 1995,2000 and 2015

表 4 延河流域 1995—2015 年土地转移矩阵

Tab. 4 Land transfer matrix of Yanhe River basin from 1995 to 2015

单位: km²

土地利用	2015年						减少量
	草地	耕地	灌木	林地	城镇	水体	
1995年							
草地	3 248.43	108.21	84.05	34.67	6.30		233.23
耕地	743.82	2 344.92	72.49	191.21	19.96	3.15	1 030.63
灌木	11.56	13.66	469.61	6.30			31.52
林地	9.46	5.25	2.10	277.36	1.05		17.86
城镇	2.10				36.77		2.10
水体	2.10	4.20			1.05	24.16	7.35
增加量	769.03	131.32	158.64	232.18	28.37	3.15	
净变化量	535.80	-899.31	127.12	214.32	26.26	-4.20	

3.3 水文要素时空演变

各水文要素的空间分布变化见图 5。1990—1999 年,流域南部植被覆盖条件较好,与其他区域相比,该区域的蒸散较高,径流较低;2000—2009 年,流域东南部和西北部的植被得到初步恢复,从而在一定程度上影响了水文要素空间分布格局的改变;

到工程实施中期,由于流域中南部城市区域的扩大,东南部的土壤水和径流与前一时期相比反而增加。总的来说,延河流域蒸散、径流和土壤水在空间上呈现出明显的空间异质性,且这种空间分布易受土地利用格局的影响。

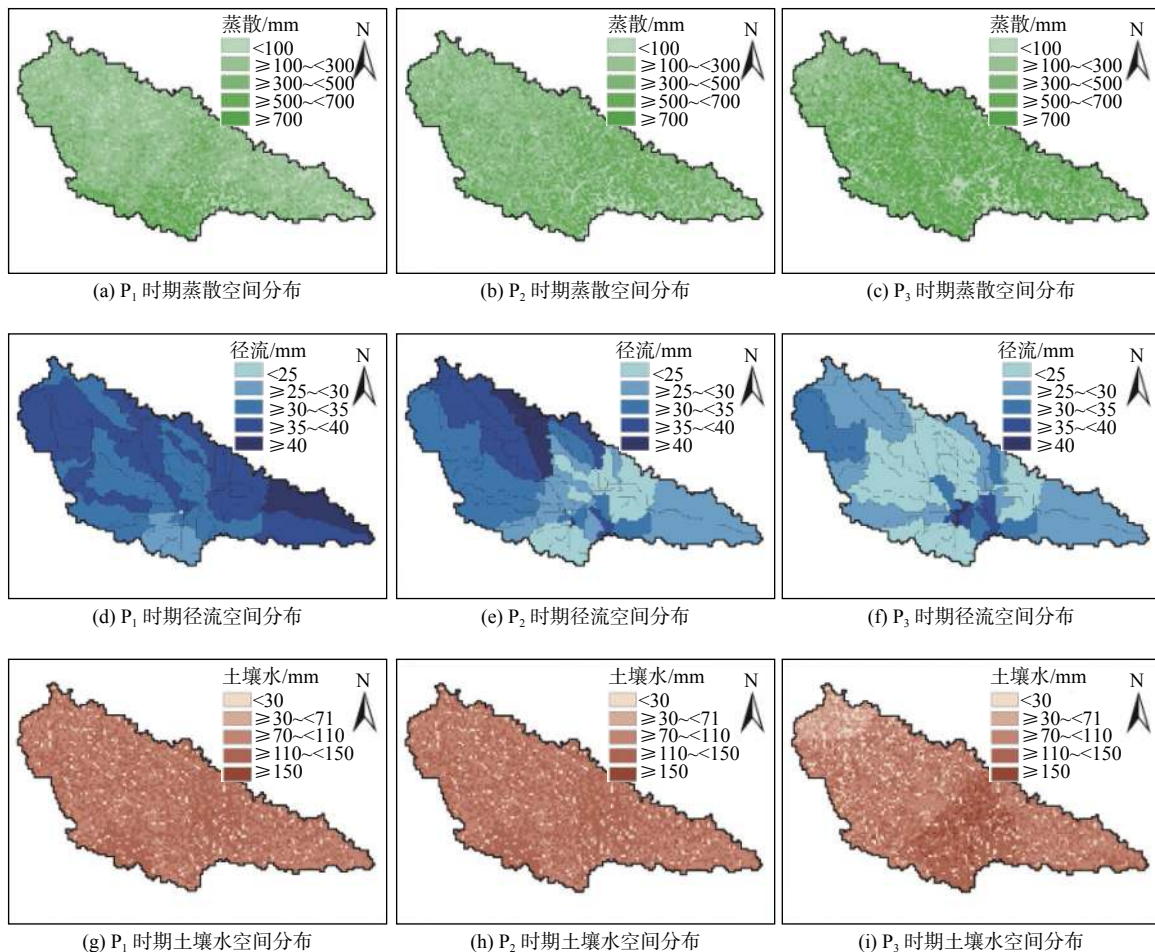
图 5 P₁(1990—1999 年)、P₂(2000—2009 年) 和 P₃(2010—2019 年) 时期蒸散、径流和土壤水空间分布特征Fig. 5 Spatial distribution of evapotranspiration, runoff and soil water in P₁(1990-1999), P₂(2000-2009) and P₃(2010-2019)

图 6 为延河流域各水文要素随时间变化规律, 并通过 M-K 趋势检验法检验其变化的显著性^[25-26]。1990—2019 年延河流域年平均蒸散发量呈显著上升趋势 ($Z=6.24$), 增长速率为 6.14 mm/a, 变化范围为 248.98 ~ 415.07 mm。与蒸散发变化规律相反, 研究期内流域平均地表径流量约为 29.78 mm, 与蒸散发相比呈下降趋势, 但这种趋势并不显著 ($Z=-1.17$)。

在退耕还林(草)工程之前, 地表径流量均值为 30.7 mm, 在退耕还林工程实施后, 地表径流量范围为 19.8 ~ 56.4 mm, 并且以 0.11 mm/a 的速率下降。此外, 土壤水在工程未实施前的 115.73 mm 上升至工程实施初期的 117.30 mm, 但随着工程的继续实施, 植被耗水增多, 土壤水减少, 总体上呈现下降趋势 ($Z=-0.39$)。

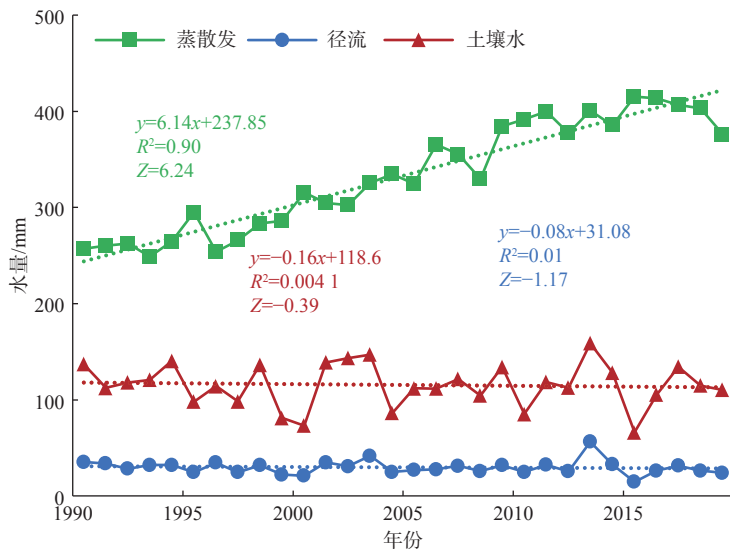


图 6 1990—2019 年蒸散发、径流和土壤水的年际变化

Fig. 6 Interannual variations of evapotranspiration, runoff, and soil water from 1990 to 2019

为了更清晰地了解蒸散发、径流和土壤水三者之间的关系, 绘制了三者之间的相对比例图, 具体见图 7。

改善, 虽然在一定程度上能够减轻较高温度的影响, 但也产生了较多的植被用水量, 减少流域可用水量。因此, 为了明确流域水文过程变化的主导因素, 必须分离各种因素对水文要素的影响, 以针对主导因素制定管理策略。

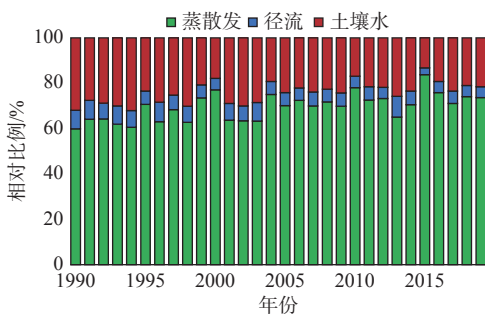


图 7 蒸散发、径流和土壤水的相对比例

Fig. 7 Relative proportions of evapotranspiration, runoff and soil water

蒸散发所占比例呈现上升趋势, 从 1990 年的 59.2% 上升至 2015 年的 83.7%, 与此同时, 径流和土壤水所占比例虽有一定的波动, 但总体呈现下降的趋势, 尤其在 2015 年, 径流和土壤水所占比例仅占总水量的 3.0% 和 13.3%。一方面, 虽然延河流域的降水呈现微弱上升趋势, 但伴随着气温的升高, 高蒸散发引起干旱的影响大于降水增加的影响, 导致土壤水分和径流由于蒸散发量的增加而减少。另一方面, 在植被恢复工程的影响下, 流域植被覆盖状况得到

3.4 流域水文要素变化的量化分析

3.4.1 不同情景下的水文要素对比

由图 8 所示, 3 种情景下的蒸散发均呈现上升的趋势, 但 S_3 情景的蒸散发均值为 363.0 mm, 高于 S_2 和 S_1 情景的 341.4 mm 和 282.9 mm, 表明植被恢复和气候对蒸散的影响均是正向的。同理, 在径流变化中, 与同一年份相比, 植被恢复程度最好的 S_3 情景的径流要低于植被恢复程度较差的 S_2 和 S_1 情景的径流, 说明植被恢复可能造成了径流减少; 而伴随着降水增多, 在时间序列上, 3 种情景的径流呈现一定的上升趋势。在土壤水变化方面, S_2 情景在一些年份的土壤水高于 S_1 情景, 这可能是由于退耕还林工程的实施, 在水土保持方面初见成效, 但随着植被恢复工程的继续, 最终 S_3 情景下土壤水消耗最为严重。

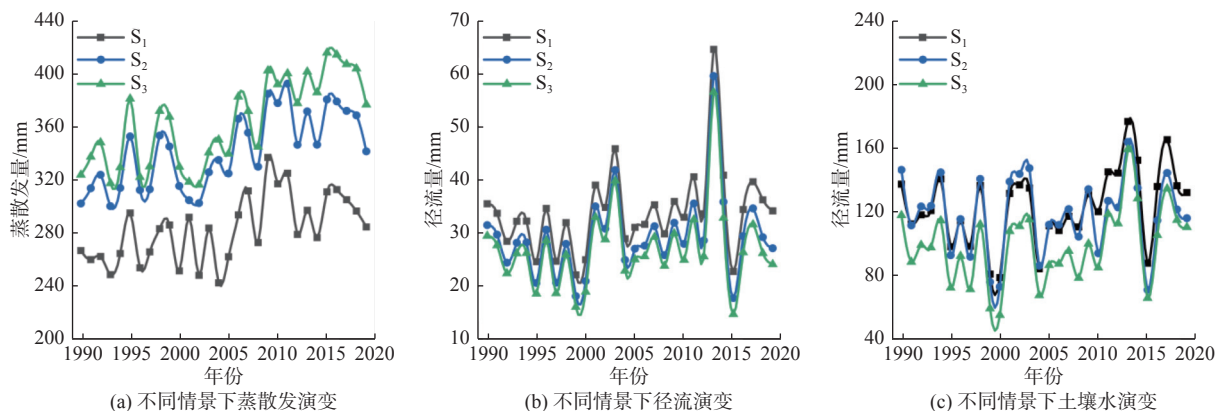


图8 不同情景下的水文要素演变

Fig. 8 Evolution of hydrological elements under different scenarios

3.4.2 水文要素变化的影响因素分析

本研究主要关注气候和土地利用变化这两个因素。需要指出,土地利用变化是影响黄土高原流域水文过程的主要因素。如表5所示,在退耕还林初期和中期,土地利用变化导致的蒸散发量分别增加54.10 mm和73.86 mm,贡献率为82.66%和57.64%,

土地利用变化对径流减少的贡献率分别为51.87%和51.63%,对土壤水减少的贡献率分别为55.13%和52.54%。由此可见,在气候变化背景下,延河流域土地利用变化对各水文要素的贡献率虽有一定程度下降,但仍占主导地位。

表5 气候变化和人类活动对延河流域水文要素变化的贡献率

Tab. 5 Contribution of climate change and human activities to hydrological factors in Yanhe River basin

水文要素	退耕还林初期(2000—2009年)				退耕还林中后期(2010—2019年)			
	ΔE_c /mm	ΔE_l /mm	C_c /%	C_l /%	ΔE_c /mm	ΔE_l /mm	C_c /%	C_l /%
蒸散发	11.35	54.10	17.34	82.66	54.28	73.86	42.36	57.64
径流	3.71	-4.01	48.13	-51.87	5.64	-6.02	48.37	-51.63
土壤水	0.70	-0.86	44.87	-55.13	20.86	-23.09	47.46	-52.54

注:贡献率符号的正/负表明该水文要素趋于增加/减少的方向。

4 结论与讨论

本文在分析1990—2019年延河流域气候变化和下垫面变化的基础上,利用RHESSys生态水文模型对该流域水文要素时空演变规律进行解析,并量化土地利用和气候变化对主要水文过程要素的贡献率。结果表明:RHESSys模型在延河流域适用性良好,校准期和验证期的 E_{NS} 分别为0.71和0.70, R^2 分别为0.82和0.79。1990—2019年,延河流域气温和降水量呈增加趋势,增加速率分别为 $0.01^\circ\text{C}/\text{a}$ 和 $4.77\text{ mm}/\text{a}$;土地利用以耕地、草地和林地为主,但耕地的面积减少了 899.31 km^2 ,草地和林地的面积分别增加了 535.80 km^2 和 214.32 km^2 。研究期内,延河流域实际蒸散发呈现显著上升趋势,上升速率为 $6.13\text{ mm}/\text{a}$,而径流和土壤水呈现不显著的下降趋势。与1990—1999年基准期相比,退耕还林初期(2000—2009年),土地利用变化是影响延

河流域蒸散发、径流和土壤水的主要因素,其贡献率分别为82.66%、-51.87%和-55.13%;退耕还林中后期(2010—2019年),土地利用变化对上述水文要素的贡献率均略有下降,但仍占主导地位。

然而,Lian等^[27]采用SWAT模型定量研究气候因素和人类活动对延河径流变化的影响,发现气候变化导致流域径流量减少65.64%,而土地利用变化导致径流增加34.36%。上述研究与本文研究结论差异较大,其原因可能有:SWAT模型考虑的是静态植被条件,对于植被变化与水文过程的联系考虑不够细致,因此其研究结果与本文使用的考虑动态植被的RHESSys模型的模拟结果可能存在一定差异;降水数据不确定性也是造成结论不一致的可能原因。本研究虽采用了延河流域及周边8个站点的降水数据,但仍然难以充分刻画研究区降水的空间异质性。以往研究^[28-30]显示,干旱半干旱地区的降

水量趋于增加时,土地利用变化对径流的贡献率往往高于气候变化因素,这与本文的结果一致。需要指出的是,虽然 RHESSys 模型对流域的生态水文过程考虑得较为全面,但参数众多且计算复杂,客观上增加了模拟结果的不确定性。后续研究有必要采用多模型进行对比分析,提升模拟精度,对于理解该地区生态水文过程机制具有重要意义。

参考文献:

- [1] 涂安国,李英,聂小飞,等. 鄱阳湖流域参考作物蒸散量变化特征及其归因分析[J]. *生态环境学报*, 2017, 26(2): 211-218. DOI: [10.16258/j.cnki.1674-5906.2017.02.005](https://doi.org/10.16258/j.cnki.1674-5906.2017.02.005).
- [2] 周启鸣,李剑锋,崔爱红,等. 中亚干旱区陆地水资源评估方法与挑战[J]. *水文*, 2021, 41(1): 15-21, 72. DOI: [10.19797/j.cnki.1000-0852.20201221](https://doi.org/10.19797/j.cnki.1000-0852.20201221).
- [3] 史培军,王爱慧,孙福宝,等. 全球变化人口与经济系统风险形成机制及评估研究[J]. *地球科学进展*, 2016, 31(8): 775-781. DOI: [10.11867/j.issn.1001-8166.2016.08.0775](https://doi.org/10.11867/j.issn.1001-8166.2016.08.0775).
- [4] 杨大文,徐宗学,李哲,等. 水文学研究进展与展望[J]. *地理科学进展*, 2018, 37(1): 36-45. DOI: [10.18306/dlkxjz.2018.01.005](https://doi.org/10.18306/dlkxjz.2018.01.005).
- [5] GAO G, FU B, WANG S, et al. Determining the hydrological responses to climate variability and land use/cover change in the Loess Plateau with the Budyko framework[J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 557: 331-342. DOI: [10.1016/j.scitotenv.2016.03.019](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.03.019).
- [6] BOSCH J M, HEWLETT J D. A review of catchment experiments to determine the effect of vegetation changes on water yield and evapotranspiration[J]. *Journal of Hydrology*, 1982, 55(1): 3-23. DOI: [10.1016/0022-1694\(82\)90117-2](https://doi.org/10.1016/0022-1694(82)90117-2).
- [7] 霍文博,李致家,李巧玲. 半湿润流域水文模型比较与集合预报[J]. *湖泊科学*, 2017, 29(6): 215-225. DOI: [10.18307/2017.0621](https://doi.org/10.18307/2017.0621).
- [8] 张建云,张成凤,鲍振鑫,等. 黄淮海流域植被覆盖变化对径流的影响[J]. *水科学进展*, 2021, 32(6): 813-823. DOI: [10.14042/j.cnki.32.1309.2021.06.001](https://doi.org/10.14042/j.cnki.32.1309.2021.06.001).
- [9] GAO X R, SUN M, ZHAO Q, et al. Actual ET modelling based on the Budyko framework and the sustainability of vegetation water use in the Loess Plateau[J]. *Science of The Total Environment*, 2017, 579: 1550-1559. DOI: [10.1016/j.scitotenv.2016.11.163](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.11.163).
- [10] GAO X R, YAN C S, WANG Y B, et al. Attribution analysis of climatic and multiple anthropogenic causes of runoff change in the Loess Plateau: A case study of the Jing River basin[J]. *Land Degradation & Development*, 2020, 31(13): 1622-1640. DOI: [10.1002/ldr.3557](https://doi.org/10.1002/ldr.3557).
- [11] TAGUE C L, BAND L E. RHESSys: Regional hydro-ecologic simulation system: An object-oriented approach to spatially distributed modeling of carbon, water, and nutrient cycling[J]. *Earth Interact*, 2004, 8(19): 1-42. DOI: [10.1175/1087-3562\(2004\)82.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1087-3562(2004)82.0.CO;2).
- [12] 朱青,周自翔,刘婷,等. 黄土高原植被恢复与生态系统土壤保持服务价值增益研究: 以延河流域为例[J]. *生态学报*, 2021, 41(7): 2557-2570. DOI: [10.5846/stxb202006121531](https://doi.org/10.5846/stxb202006121531).
- [13] 庞启航,毕忠飞,樊晓华,等. 新时期黄土高原水土流失治理存在问题与对策[J]. *人民黄河*, 2022, 44(S1): 73-74. DOI: [10.3969/j.issn.1000-1379.2022.S1.029](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-1379.2022.S1.029).
- [14] 贾云飞,李云飞,范天程,等. 基于长时间序列NDVI的黄土高原延河流域及其沟壑区植被覆盖变化分析[J]. *水土保持研究*, 2022, 29(4): 240-247. DOI: [10.13869/j.cnki.rswc.2022.04.003](https://doi.org/10.13869/j.cnki.rswc.2022.04.003).
- [15] 孙杰,田浩,范跃新,等. 长汀红壤侵蚀退化地植被恢复对土壤团聚体有机碳含量及分布的影响[J]. *福建师范大学学报(自然科学版)*, 2017, 33(3): 87-94. DOI: [10.12046/j.issn.1000-5277.2017.03.013](https://doi.org/10.12046/j.issn.1000-5277.2017.03.013).
- [16] 朱亮,刘景涛,张玉玺,等. 基于水循环分析的水资源乘数效应评价: 以黄河上游北川河流域为例[J]. *地学前缘*, 2022, 29(3): 263-270. DOI: [10.13745/j.esf.sf.2022.1.27](https://doi.org/10.13745/j.esf.sf.2022.1.27).
- [17] 王壮壮,张立伟,李旭谱,等. 流域生态系统服务热点与冷点时空格局特征[J]. *生态学报*, 2019, 39(3): 823-834. DOI: [10.5846/stxb201804180886](https://doi.org/10.5846/stxb201804180886).
- [18] RUNNING S W, COUGHLAN J C. A general model of forest ecosystem processes for regional applications I: Hydrologic balance, canopy gas exchange and primary production processes[J]. *Ecological Modelling*, 1988, 42(2): 125-154. DOI: [10.1016/0304-3800\(88\)90112-3](https://doi.org/10.1016/0304-3800(88)90112-3).
- [19] BEVEN K J, KIRKBY M J. A physically based, variable contributing area model of basin hydrology/Un modèle à base physique de zone d'appel variable de l'hydrologie du bassin versant[J]. *Hydrological Sciences Journal*, 1979, 24(1): 43-69. DOI: [10.1080/02626667909491834](https://doi.org/10.1080/02626667909491834).

- [20] PHILIP J R. The theory of infiltration: 4 sorptivity and algebraic infiltration equations[J]. *Soil Science*, 1957, 84(3): 257-264. DOI: [10.1097/00010694-200606001-00009](https://doi.org/10.1097/00010694-200606001-00009).
- [21] WIGMOSTA M S, VAIL L W, LETTRNMAIER D P. A distributed hydrology-vegetation model for complex terrain[J]. *Water Resour Res*, 1994, 30(6): 1665-1679. DOI: [10.1029/94WR00436](https://doi.org/10.1029/94WR00436).
- [22] MONTEITH J L. Evaporation and environment[J]. *Symposia of the Society for Experimental Biology*, 1965, 19: 205-234. DOI: [10.2307/2332794](https://doi.org/10.2307/2332794).
- [23] WILLIAMS T G, FLANAGAN L B. Effect of changes in water content on photosynthesis, transpiration and discrimination against ^{13}C and $\text{C}^{18}\text{O}^{16}\text{O}$ in *Pleurozium* and *Sphagnum*[J]. *Oecologia*, 1996, 108(1): 38-46. DOI: [10.1007/bf00333212](https://doi.org/10.1007/bf00333212).
- [24] SUN M, YAN C, ZHAO N, et al. Evaluating the long-term ecohydrological suitability of restoration efforts in a typical watershed of the Loess Plateau[J]. *Hydrological Processes*, 2021, 35(9): e14362. DOI: [10.1002/hyp.14362](https://doi.org/10.1002/hyp.14362).
- [25] HAMED K H, RAMACHANDRA R A. A modified Mann-Kendall trend test for autocorrelated data[J]. *Journal of Hydrology*, 1998, 204(1): 182-196. DOI: [10.1016/S0022-1694\(97\)00125-X](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(97)00125-X).
- [26] DONALD H, MOHAMED A, ELNUR H. Detection of hydrologic trends and variability[J]. *Journal of Hydrology*, 2002, 55: 107-122. DOI: [10.1016/S0022-1694\(01\)00514-5](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(01)00514-5).
- [27] LIAN Y, SUN M, WANG J, et al. Quantitative impacts of climate change and human activities on the runoff evolution process in the Yanhe River basin[J]. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 2021, 122: 102998. DOI: [10.1016/j.pce.2021.102998](https://doi.org/10.1016/j.pce.2021.102998).
- [28] YANG Z, ZHANG Q, HAO X. Evapotranspiration trend and its relationship with precipitation over the Loess Plateau during the last three decades[J]. *Advances in Meteorology*, 2016, 2016: 6809749. DOI: [10.1155/2016/6809749](https://doi.org/10.1155/2016/6809749).
- [29] MA Z, YAN N, WU B, et al. Variation in actual evapotranspiration following changes in climate and vegetation cover during an ecological restoration period (2000-2015) in the Loess Plateau, China[J]. *Science of The Total Environment*, 2019, 689: 534-545. DOI: [10.1016/j.scitotenv.2019.06.155](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.06.155).
- [30] 张宝庆, 邵蕊, 赵西宁, 等. 大规模植被恢复对黄土高原生态水文过程的影响[J]. *应用基础与工程科学学报*, 2020, 28(3): 594-606. DOI: [10.16058/j.issn.1005-0930.2020.03.008](https://doi.org/10.16058/j.issn.1005-0930.2020.03.008).

Quantitative simulation of hydrological elements based on RHESSys model in Yanhe River basin

YUAN Yujie¹, GAO Xuerui^{1,2}, HUANG Kejing¹, JIANG Shan³, HE Guohua³, ZHAO Xining^{2,4}

(1. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling 712100, China; 2. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling 712100, China; 3. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China; 4. Key Laboratory of Agricultural Soil and Water Engineering in Arid and Semiarid Areas of Ministry of Education, Northwest A&F University, Yanglin 712100, China)

Abstract: Since the last century, the global water cycle processes have been constantly changing, and it is generally believed that the main factors causing this change are climate change and human activities. The impact of this change on the fragile ecological environment of the Loess Plateau is more prominent. In order to improve the ecological environment of the Loess Plateau, the government has implemented a series of ecological construction with planting trees and grasses as the main measures since the last century, especially the implementation of the Grain for Green Project, which has increased the vegetation cover of the region by about 25%, the underlying surface conditions of the basin have changed significantly, and under the joint influence of climate change, the mechanism and characteristics of runoff have changed significantly, the uncertainty of hydrological processes has increased significantly. Therefore, distinguishing the effects between climate change and human activities on hydrological processes is significant importance to understand hydrological changes and to achieve sustainable water resources management in the future.

At present, there are three methods to distinguish the impacts of human activities and climate change on

hydrological processes, which are the comparative watershed, the empirical equation and the model simulation. The first two-methods have some limitations (high similarity requirement between two watersheds and difficulty in elaborating the interaction mechanism between hydrological processes and influencing factors), the model simulation method, which analyzes the effects of changing environments on hydrological processes through hydrological models driven by remote sensing data, has been widely used worldwide. Based on this, the typical basin of the Grain for Green project - the Yanhe River basin was selected as the study area. In view of the complex underlying surface conditions of the Yanhe River basin, the ecological hydrological model RHESSys that considering the dynamic growth of vegetation was used to simulate the hydrological elements (evapotranspiration, runoff and soil moisture) of the Yanhe River basin before and after Grain for Green Project, and the impacts of human activities and climate change on different hydrological elements were quantified based on different simulation scenarios.

The results showed that from 1990 to 2019, the temperature and precipitation in the Yanhe River basin showed an increasing trend, with an increase rate of $0.01\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{a}$ and $4.44\text{ mm}/\text{a}$, respectively, and gradually increased from northwest to southeast in space. The land use characteristics of the basin were the transfer of farmland to other types of land. Considering other land use flows, the final area of farmland decreases by 899.31 km^2 , while the area of grassland and forestland increases by 535.80 km^2 and 214.32 km^2 , respectively. In terms of changes in hydrological elements, the actual evapotranspiration in the basin showed a significant upward trend with an increasing rate of $6.13\text{mm}/\text{a}$ after the implementation of the Grain for Green Project, while the runoff and soil water showed a downward trend, but this trend was not significant. Compared with the base period (1990-1999), the contribution rate of land use change caused by human activities to evapotranspiration, runoff and soil water change in P_2 period (2000-2009) was 82.66% , -51.87% and -55.13% , respectively. With the continuous implementation of the Grain for Green Project, the contribution rate of land use change decreased to 57.64% , -51.63% and -52.54% in P_3 period (2010-2019).

It can be seen that the contribution of land use change to hydrological elements in the Yanhe River basin decreased after the implementation of the Grain for Green Project, but land use change was still the main influencing factor of hydrological elements. This study is critical to the implementation prospect and sustainable development management of the Grain for Green Project on the Loess Plateau, and can provide theoretical support for water resources planning and management in the Loess Plateau.

Key words: vegetation restoration; climate change; evapotranspiration; runoff; soil water; RHESSys model