

黄土高原中部典型流域植被恢复对径流的影响

杨洁^{1,2} 金继明^{1,2} 邵进³ 王玉宝^{1,2}

(1. 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;
2. 西北农林科技大学中国旱区节水农业研究院, 陕西杨凌 712100;
3. 长江大学资源与环境学院, 武汉 430100)

摘要: 针对黄土高原植被恢复后水文要素变化和水文要素之间关系不明确的问题,以黄土高原中部半湿润型气候的延河流域为研究对象,利用通用陆面模型 CLM5.0,模拟 1980—2018 年土地覆盖变化对流域关键水文要素和水文要素之间关系的影响。结果表明:延河流域耕地面积从 1980 年的 3 277 km² 减少到 2018 年的 2 400 km²,减少了 26.76%,而林地和草地面积分别增加了 244 km² 和 528 km²。土地覆盖变化导致延河流域年径流量和年径流系数明显减小,减幅分别为 12.34% 和 11.46%。土地覆盖变化导致延河流域多年平均月径流量和多年平均月径流系数明显减小,其对丰水季径流量影响较小,对枯水季径流量影响较大,并使年内径流分配趋于集中化。本研究可为黄土高原水资源开发利用及科学管理提供参考。

关键词: 植被恢复; 径流; 径流系数; 延河流域; CLM 模型

中图分类号: P333.5 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2021)05-0258-09 **OSID:** 

Vegetation Restoration and Its Impact on Runoff in Typical Areas of Middle Loess Plateau

YANG Jie^{1,2} JIN Jiming^{1,2} SHAO Jin³ WANG Yubao^{1,2}

(1. Key Laboratory of Agricultural Soil and Water Engineering in Arid Areas, Ministry of Education, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China
2. Institute of Water-saving Agricultural in Arid Areas of China, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China
3. College of Resources and Environment, Yangtze University, Wuhan 430100, China)

Abstract: Since the end of the 1990s, large-scale ecological restoration projects have been implemented in the Loess Plateau, which significantly changed land use types and land cover. These projects enhanced ecosystem service functions and improved soil and water loss to a certain extent. More and more attention has been paid to the impact of these projects on the hydrological processes. The Yanhe River Basin, with a semi-humid climate in the middle of the Loess Plateau, was taken as an example. The community land model (CLM) version 5.0 was used to simulate the impact of land cover changes on key hydrological elements and their relationships in this basin over 1980 through 2018. The results showed that the cultivated area was decreased from 3 277 km² in 1980 to 2 400 km² in 2018, a decrease of 26.76%. Woodland and grassland area was increased by 244 km² and 528 km², respectively. The annual runoff and annual runoff coefficient was decreased significantly due to the change of land cover, which were 12.34% and 11.46%, respectively. The change of land cover also led to the decrease of monthly mean runoff and the coefficient, which had a less influence in the wet season and a larger influence in the dry season, making the annual runoff distribution to be centralized. To guide the rational use of the water resource and build a harmonious ecological environment in the Loess Plateau, understanding the hydrological process and its changing had a great theoretical value and practical significance.

Key words: vegetation restoration; runoff; runoff coefficient; Yanhe River Basin; CLM model

收稿日期: 2021-01-16 修回日期: 2021-02-24
基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFC1507000)和国家自然科学基金项目(91637209)
作者简介: 杨洁(1995—),女,博士生,主要从事土地覆盖变化和水文过程数值模拟研究,E-mail: bbyangjie@foxmail.com
通信作者: 王玉宝(1975—),男,研究员,博士,主要从事农业水资源高效利用研究,E-mail: yubaowang75@gmail.com

0 引言

黄土高原地处中国中部偏北,属于干旱半干旱地区,其生态环境脆弱,是世界上黄土覆盖面积最大的区域^[1-2]。受东亚季风的控制,黄土高原降水主要集中在6—9月^[3]。黄土土质疏松,暴雨冲刷强烈,水土流失严重^[4]。由于长期对土地资源过度开发利用及对森林资源的破坏,导致水土流失越来越严重、生态环境不断恶化、水资源短缺问题日益突出^[5]。因此,自1999年以来,国家在黄土高原实施大规模的生态恢复工程,特别是退耕还林(草)工程,从而逐渐改变了黄土高原下垫面条件^[6]。

延河是黄河中游水土流失最严重的支流之一,水土流失面积超过7 100 km²,占流域总面积的92.71%,尤以上游最为严重。延河流域作为黄土高原半湿润区的典型流域,在实施了一系列生态恢复工程后,流域内林草覆盖率显著增加,延河甘谷驿水文站的年径流量已由20世纪60年代的2.53亿 m³减少到近10年的1.48亿 m³,年均输沙量也随着径流量的减少而减少^[7],在一定程度上改善了流域内的水土流失问题。但是,生态恢复工程在取得重大生态效益的同时,也给流域内的生态水文过程带来一些负面影响。部分地区因忽略当地的自然生态规律或者过度追求经济效益,导致大面积低效、低产林地的出现,同时使赖以生存的水文生态环境恶化^[8]。大面积植被恢复必然导致蒸散耗水量的急剧增加,并且近年来黄土高原气候变暖趋势显著^[9],这些均会进一步加剧水资源短缺的态势。延河流域的农业在很大程度上依赖于雨养,这使农村生活和粮食安全极易受到水资源供应变化的影响。因此,为使生态恢复工程的生态效益最大化,必须因地制宜、科学规划、实时监测调控,实现生态恢复的可持续发展模式^[10]。

生态恢复势必对流域水文过程造成重大影响,这增加了水循环时空分布的复杂性和不确定性,最终影响到水资源的供需问题,对区域内的社会、经济和生态的发展产生诸多影响。生态恢复对水文过程的影响集中体现在对径流的影响上。研究表明,植被在控制土壤侵蚀和涵养水源方面发挥了关键作用,植被对减少地表径流量的贡献超过了气候变化的作用^[11-12]。BANGASH等^[13]研究表明,全球气候变化和生态恢复会加速干旱地区的径流量,进而导致干旱区人类与自然在水资源取用上的潜在冲突。EVARISTO等^[14]研究表明,在潜在蓄水能力高的地区,森林砍伐会增加径流量,而在水资源短缺的地区,植树造林通过影响蒸散量而降低径流量。YIN

等^[15]利用分布式水文模型对泾河流域径流量变化的研究表明,生态恢复是该流域径流量变化的主导因素,其贡献为71%。LIANG等^[16]研究表明,生态恢复占黄土高原径流减少量的62%。地表径流的产生与降水关系密切,降水与径流的关系在一定程度上可以反映流域的产流能力,是量化径流响应的很好方法^[17]。在考虑水文循环过程和产汇流机理的前提下,流域尺度植被恢复与水文变量之间(降水-径流)影响关系的研究较为欠缺。

本研究探讨流域尺度径流变化规律,采用通用陆面模型CLM5.0,分析延河流域植被恢复后流域关键水文要素和水文要素之间关系的变化趋势。在准确描述延河流域深厚土层和河道沟道分布的基础上,模拟延河流域在1980年和2018年土地覆盖情景下的水文过程,进而探索大规模植被恢复后径流量和降水-径流关系变化的响应,为决策者和规划者提出流域水资源合理配置与管理策略,为黄土高原生态环境建设提供参考。

1 研究区概况

延河流域地处陕西北部,黄土高原中北部,跨越榆林、延安两市,108°38′~110°29′ E,36°21′~37°19′ N,平均海拔1 213 m,流域面积7 685 km²。延河干流总长286.9 km,属黄河中游一级支流,由西北向东南流经靖边县、志丹县、安塞县、宝塔区和延长县,最后在延长县南河沟乡凉水岸附近注入黄河(图1)。该流域属大陆性气候,为暖温带半湿润向半干旱过渡区,年平均气温8.8~10.2℃,年均降水量为520 mm,根据1979—2018年期间的观测,其中约60%的降水发生在7—9月的汛期(<http://data.cma.cn/>)。延河多年平均径流量为2.89亿 m³,径流模数为36 425 m³/(km²·a)。流域植被区划上属于森林草原地带,目前天然林残存不多,多为人工种植而形成的次生植被和干旱草本植物。流域的总出口水文测站为甘谷驿站,位于陕西省延安市宝塔区甘谷驿镇(109°48′E,36°42′N),其控制面积为5 891 km²,占流域总面积的76.66%。

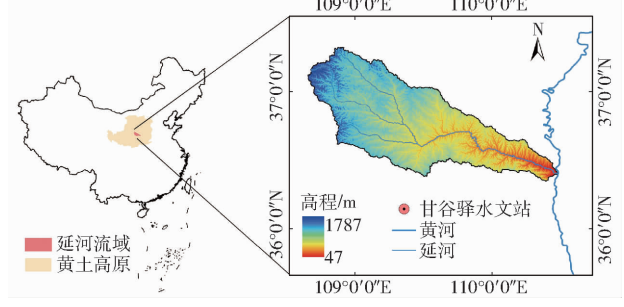


图1 延河流域位置图

Fig. 1 Location map of Yanhe River Basin

2 研究方法

2.1 陆面模型

采用公用陆面模型 CLM5.0^[18]对延河流域水文过程进行模拟。其用于表征空间地表异质性的方法主要通过将格点空间划分为一种窝状的多层次网格结构来处理,能够更好地反映下垫面的真实情况。CLM5.0模型的输入资料主要包括大气驱动数据和陆面信息数据。其中,大气驱动数据包括降水量、气温、风速、比湿、短波辐射、长波辐射和大气压强共7个气象变量;而陆面信息数据主要包括土壤属性和土地覆盖类型等。

大气驱动数据使用中国区域高时空分辨率地面气象要素(ITPCAS)驱动数据集(<http://westdc.westgis.ac.cn/>)。该驱动数据集^[19]是由中国科学院青藏高原研究所开发的一套再分析数据集,其以Princeton再分析资料、GEWEX-SRB辐射资料、GLDAS资料以及TRMM降水数据为背景场,以中国气象观测数据为融合资料制作而成。该数据集时间分辨率为3 h,水平空间分辨率为0.1°,当前覆盖时间段为1979—2018年,满足覆盖研究时段的要求。

土壤质地数据来自于面向陆面模拟的中国土壤数据集(<http://globalchange.bnu.edu.cn/>),其源数据^[20]来源于第二次土壤普查的1:1 000 000中国土壤图和8 595个土壤剖面。数据为栅格格式,空间分辨率为30"。为便于使用CLM模型,土壤数据分为8层,最深到2.3 m。由于最后2层缺测数据过多,所以代入前6层数据,在6层以下的土壤假设在垂直方向上是均质的。

土壤厚度数据是收集和记录已发表的十余篇论文和书籍中延河流域及其附近地区的81个土壤深度。此外,齐嘉华^[21]和王帅帅^[22]分别为黄土高原绘制了2幅土壤深度图。基于数字高程模型(Digital elevation model, DEM)数据,本文建立了包含沟道和河流的模型网格的土壤深度数据。由于基岩的暴露,溪谷和河流的土壤深度假设为0 m^[2]。这些沟壑和河道的高程从分辨率为90 m的DEM数据中获取。利用这些高程与分辨率5 km以下的高程的差异来表示包含沟壑和河流的模型网格中土壤深度。用Cressman方法将上述数据插值到分辨率1 km的网格地图中,得到延河流域较为真实的土壤深度数据。此外,根据深层土壤水文过程模拟的需要,改进后的CLM5.0模型还将土壤分层数据作为模型的输入^[23]。

CLM5.0采用的默认土地覆盖数据为美国地质

勘探局(USGS)基于卫星观测反演的GLCC(Global land cover characterization)全球静态地表数据集资料,其对黄土高原地区土地覆盖描述的区域性差异很大且时效性较差^[24]。本研究所使用的数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心的1:100 000比例尺土地覆盖现状遥感监测数据(<http://www.resdc.cn/>),该数据采用一个分层的土地覆盖分类系统,将全国分为6个一级类(耕地、林地、草地、水域、城乡居民用地和未利用土地),31个二级类,并且经过了野外实地考察验证^[25]。选择了具有代表生态恢复前后时期的两期(1980年和2018年)土地覆盖数据进行分析模拟。此外,将中国1:100 000比例尺土地覆盖现状遥感监测数据的31个二级类型转换成CLM5.0模型所需的18种。通过ArcGIS等软件按照BATS土地分类方式,综合其详细分类指标(气候带等),生成了一套符合模型要求的高精度覆盖数据,实现数据的更新与更高质量处理。

基于建立的CLM5.0模型,本研究采用连续时段(1980—2018年)进行模拟。对基础模拟情景下的CLM模型进行足够长时间(即50年)的预热模拟之后,将其模拟结果作为初始条件继续模拟不同的土地覆盖情景。

2.2 模型验证及评价

统计分析方法用来验证和评估观测数据与模型的模拟。从地球系统科学数据共享网络(<http://loess.geodata.cn/index.html>)获取了延河流域出口水文站甘谷驿月径流量观测数据,选取人为活动较少时期(1979—1989年)的实测月径流量数据进行CLM5.0模型的验证评估。利用决定系数(R^2)、均方根误差(Root mean square error, RMSE)、纳什系数(Nash sutcliffe model efficiency coefficient, NSE)评价模型的模拟效果。 R^2 越接近1表明模型的模拟值与实测值越吻合,当 R^2 大于0.5时,模拟结果可以接受^[26]。RMSE越接近0表示模型模拟值与实测值的误差越小。NSE统计值范围在 $-\infty \sim 1$ 之间,越接近1表明模型模拟效果越好,当NSE大于0.5时,模拟结果可以接受^[27]。

2.3 径流分配不均匀系数

应用年内分配不均匀系数 C_v (即变异系数)分析评估延河流域径流的年内变化。 C_v 表示年内径流分布的不均匀性, C_v 越大表示径流年内分配越集中,其定义为年内的月径流量均方差与平均值的比值。

2.4 回归分析

采用线性回归分析方法研究土地覆盖和降水变化对径流的影响及相对贡献^[28]。叶面积指数(Leaf

area index, LAI)能综合反映土地覆盖状况和季节变化情况,采用 LAI 作为植被覆盖变化的指标因子。取径流量为因变量,降水量和 LAI 为自变量,通过逐步回归的方法建立多元线性回归分析的径流模型。计算式为

$$Y=aX_1+bX_2+c$$

式中 Y ——多年平均月径流量,mm
 X_1 ——降水量,mm
 X_2 ——叶面积指数
 $a、b、c$ ——模型系数

3 结果与分析

3.1 模型验证

CLM5.0 模型对流域总径流量的模拟具有较好

的验证结果。从时间序列图(图 2a)可以看出,径流量与降水量的变化趋势一致,除了 1981 年汛期径流量的模拟值和实测值存在较大差异,其余时期模拟径流量与实测径流量的变化基本吻合。模型验证期(1979—1989 年)径流量模拟值与实测值的变化趋势有较好的一致性,两者的 R^2 达到了 0.613 9,拟合线的斜率为 0.983 1(图 2b)。此外,模拟值与实测值的 RMSE 达到了 2.1 mm,NSE 达到了 0.54,整体上模拟值与实测值的差异很小,说明 CLM5.0 在验证期的表现可以满足模型需要,模型参数和物理过程在延河流域具有一定的代表性。综上所述,高分辨率的 CLM5.0 模型能够较好地模拟延河流域的径流变化,数值试验结果表明 CLM5.0 模型可以用于土地覆盖变化对延河流域径流量影响的模拟研究。

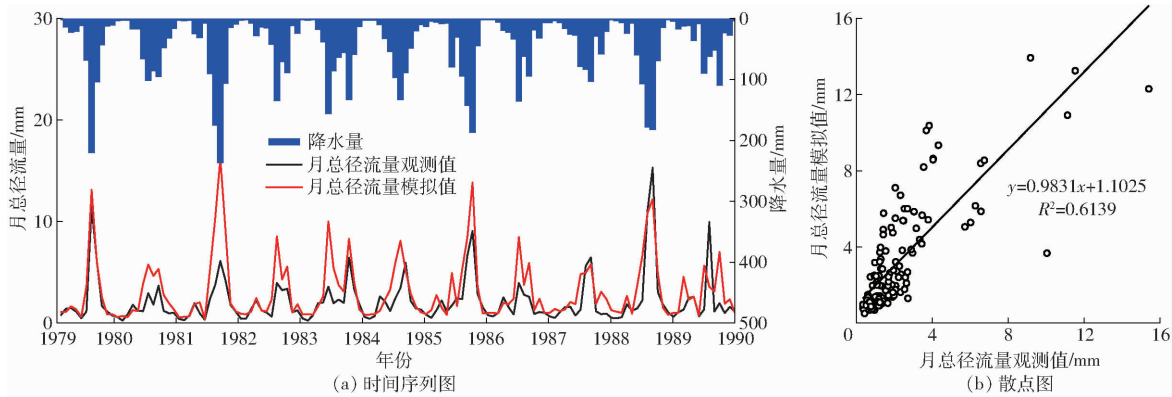


图2 验证期延河流域月总径流量的模拟值与观测值

Fig. 2 Simulated and observed monthly runoff in Yanhe River Basin during verification period

3.2 延河流域生态恢复下的土地覆盖变化

生态恢复通过改变下垫面的状况影响产流、汇流、入渗和蒸发,进而影响流域径流。根据延河流域 1980、2018 年的土地覆盖数据(图 3),延河流域两个时期均以草地和耕地为主要土地覆盖类型,面积总和在 1980 年和 2018 年分别占流域总面积的 88.31%、83.77%(表 1),从变化趋势来看,二者的总量呈减少趋势。草地在 2 个时期内占流域面积的比例最大,分别占 1980 年和 2018 年的 45.67% 和 52.54%;耕地面积次之,分别占 1980 年和 2018 年的 42.64% 和 31.23%;灌木面积分别占 1980 年和 2018 年的 7.31% 和 7.9%;林地在 1980 年和 2018 年占较小比例,分别为 3.71% 和 6.88%。城镇、水体的面积总和在两个时期所占的比例不足 2%,但其中城镇面积增加了 3 倍,是增长速度最快的类型,反映出延河流域城市化进程仍处于扩张的趋势。草地、灌木和林地面积都呈上升趋势,与 1980 年相比,2018 年三者分别增加了 528、45、244 km²,增幅分别为 15.03%、8.01%、85.61%。耕地面积呈下降趋势,面积从 1980 年的 3 277 km²减少到 2018 年的

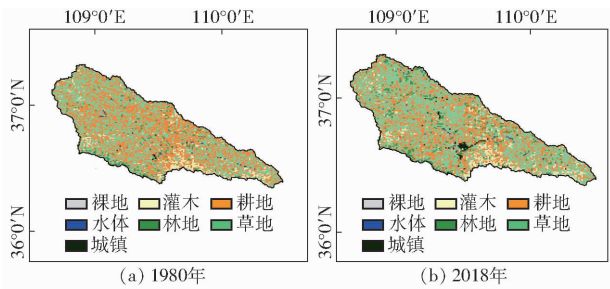


图3 延河流域土地覆盖类型分布图

Fig. 3 Land cover distribution map of Yanhe River Basin

表 1 1980—2018 年延河流域土地覆盖类型面积变化的转移矩阵

Tab.1 Transfer matrix of land cover change area in Yanhe River Basin from 1980 to 2018		km ²						
类型		2018 年						
		裸地	林地	灌木	草地	耕地	城镇	水体
1980 年	裸地	1	0	0	2	1	0	0
	林地	1	90	16	94	76	6	2
	灌木	0	21	247	134	153	5	2
	草地	6	224	122	2 072	1 049	30	7
	耕地	2	189	219	1 717	1 110	31	9
	城镇	0	3	2	7	2	2	2
	水体	0	2	1	12	9	1	4

2 400 km²,约减少 26.76%。此外,由于气候变化等因素,水体面积呈减少趋势,表明延河流域河流调蓄功能衰退。

为了全面了解流域土地覆盖结构和面积的变化,利用土地覆盖转移矩阵(表 1)定量研究土地覆盖类型间的转化量和转化方向。在 1980—2018 年期间,裸地、林地、灌木、草地和城镇的转入面积超过转出面积,而耕地则相反。土地覆盖类型的转移主要发生在耕地、林地和草地之间。耕地面积的减少主要是由于部分耕地转变成草地、灌木和林地,转出面积分别为 1 717、219、189 km²,分别占 1980 年耕地面积的 52.40%、6.68%、5.77%,由此导致了草地、灌木和林地面积的增加。由此可见,退耕还林(草)等生态恢复工程在延河流域成效显著。此外,1980—2018 年期间部分草地、灌木和林地也发生了转变,其中草地转出主要以林地、灌木和耕地为主,转出面积分别为 224、122、1 049 km²,占 1980 年草地的 6.38%、3.48%、29.89%。灌木转出主要以草地和耕地为主,转出面积分别为 247、153 km²,占 1980 年灌木的 43.95% 和 27.22%。林地转出主要以草地和耕地为主,转出面积分别为 94、76 km²,占 1980 年林地的 32.98% 和 26.67%。

3.3 生态恢复对年径流的调节效应

由于大规模植被恢复工程的影响,流域下垫面情况发生改变,必然导致自然水文循环过程发生变化。如图 4 所示,由于模型的气象驱动数据一致(即气象条件未发生变化),两次模拟产生的年径流量随时间变化趋势一致。随着林地和草地面积的增加,地表径流量随之减小。1980—2018 年流域年降水量呈上升趋势但趋势不显著($P > 0.05$),增幅为 2.39 mm/a。流域年径流量也呈上升趋势,1980 年土地覆盖情景下径流量呈上升趋势且趋势显著($P < 0.01$),增幅为 0.48 mm/a;2018 年土地覆盖情景下径流量呈上升趋势且趋势显著($P < 0.05$),增幅为 0.30 mm/a。2018 年土地覆盖情景下较 1980 年土地覆盖情景下的年地表径流量减少了 0.18 mm,减幅为 12.34%,说明植被恢复工程有减少流域产流的作用。计算延河流域 39 年来降水量与径流量的变异系数,分别为 0.22 和 0.28。这表明径流量的变化除了受降水的影响,还受到了人类活动的影响。

通过分析植被恢复工程前后不同土地覆盖情景下的年降水量与年径流量关系(图 5),年降水量与年径流量呈较强的线性关系,反映了流域的产流能力相对稳定。1980 年和 2018 年土地覆盖情景下年降水量与年径流量的决定系数 R^2 分别为 0.86 和 0.83,均大于 0.80,这表明退耕还林(草)前虽然人

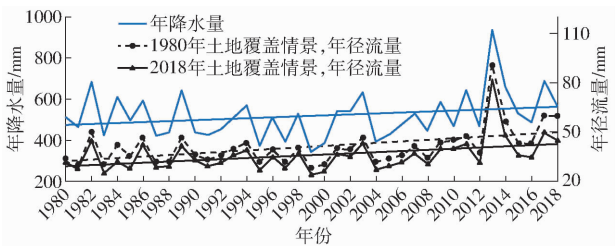


图 4 1980—2018 年延河流域模拟年径流量变化曲线
Fig. 4 Simulated runoff in Yanhe River Basin from 1980 to 2018

工修建梯田,但面积和强度有限,对径流过程的影响相对较小,径流过程主要受降水的影响。2000 年之后,开始大规模实施退耕还林(草)措施,人类活动加强,使得 2018 年土地覆盖情景下的年降水量与年径流量决定系数下降。对年降水量与年径流量进行单回归分析,发现年降水量与年径流量有很好的线性关系,线性回归模型达到极显著水平($P < 0.01$)。1980 年土地覆盖情景下,降水对径流变化的贡献率为 92.2%。2018 年土地覆盖情景下,降水对径流变化的贡献率为 90.5%,较 1980 年土地覆盖情景下降了 1.7 个百分点,这与之前结论一致。总体来看,降水仍是流域径流变化的主要影响因素,但人类活动对流域径流变化的影响在逐渐增强。

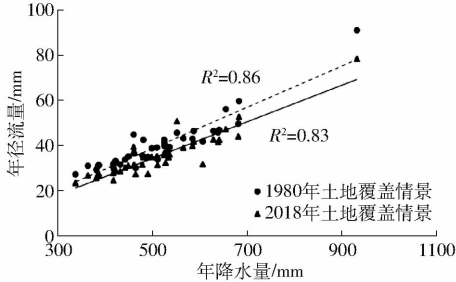


图 5 1980—2018 年延河流域年降水量与年径流量的关系

Fig. 5 Relationship between annual precipitation and runoff in Yanhe River Basin from 1980 to 2018

年径流系数虽然可能具有较大的年际变化率,但它反映了流域在一定时期内的平均产水能力。在相同的气象条件下,降水量不变,径流系数的变化主要由地表径流的变化决定。两种土地覆盖情景下的年径流系数都低于 0.1(图 6)。2018 年地表覆盖情景下的年平均径流系数为 0.068,较 1980 年地表覆盖情景下的年平均径流系数(0.077)低,平均降幅为 11.46%,这表明延河流域产流能力下降,即植被恢复工程使降水转化成径流的能力下降。草地的下垫面条件比较稳定且面积随时间变化是增加的,这可能是导致延河流域年径流系数小且稳定的原因。作物生长需要大量的水,但是延河流域的水资源短缺问题严重(年平均降水量 400 ~ 500 mm,年蒸散发

量接近 1 000 mm)。在耕地面积大的延河流域,径流系数相对较低。

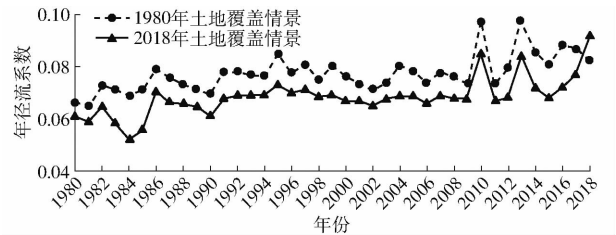


图6 1980—2018年延河流域年径流系数变化曲线

Fig.6 Annual runoff coefficient in Yanhe River Basin from 1980 to 2018

3.4 生态恢复对月径流的调节效应

延河流域属于大陆性季风气候区,降水是影响径流的主要因素,受降水年内季节性变化的影响,径流的年内分布极不均匀,汛期集中在5—9月,该时段径流量几乎占全年径流量的70%以上,春夏多雨易洪,秋冬少雨多旱。由图7可以看出,延河流域的降水量与径流量年内波动变化趋势基本一致,且峰值都出现在7月,降水量峰值为120 mm,2018年土地覆盖情景和1980年土地覆盖情景下径流量分别为7.56、7.95 mm。降水量的年内分配是严格的单峰函数,而径流量为双峰函数,除了丰水季的峰值之外,在2月还出现一个小峰。延河流域冬季气温较低,土层冻结成为不透水的冻土层,下渗明显减少,在春季气温回升后,大量的融雪及融冰进入河道,形成了2月的春汛期。夏汛主要是由于流域内降水所致,这一时期的降水比较频繁,径流量明显大于春汛。2018年土地覆盖情景下的月径流量相较于1980年土地覆盖情景下的月径流量普遍偏小,月均径流量减少了17.35%,春、夏汛峰值则分别减少了27.42%和3.45%。

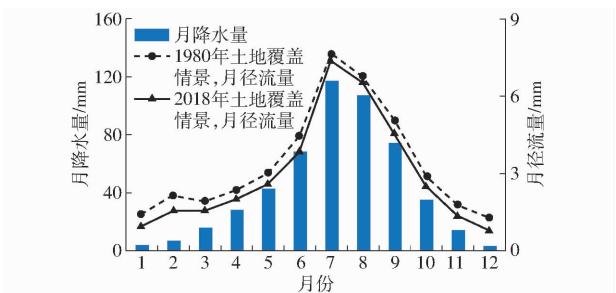


图7 延河流域多年平均月径流量和月降水量

Fig.7 Perennial average monthly runoff and precipitation in Yanhe River Basin

进一步分析延河流域径流的年内分布情况(图8),1980年和2018年土地覆盖情景下径流的年内分配不均匀系数为1.27和1.35,径流的分配极不均匀,集中性强,受季节影响大。不均匀系数的增大表明延河流域年内径流有集中化的趋势,这是

由于流域内大规模的退耕还林(草)工程的实施,植被的耗水和截留增加了流域的储水能力,但是丰水季集中的暴雨使得植被的作用受限,从而使得年内径流过程集中化,不利于延河流域水资源的开发利用。

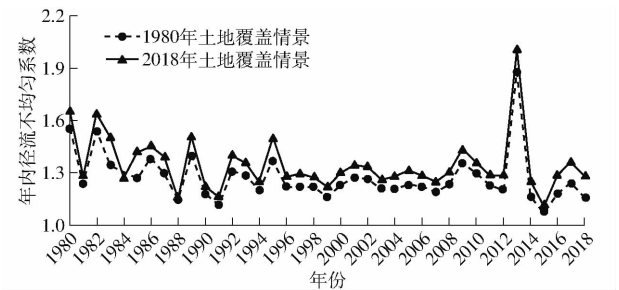


图8 延河流域1980—2018年年内径流不均匀系数变化曲线

Fig.8 Uneven coefficient of runoff in Yanhe River Basin from 1980 to 2018

进一步计算了各月的平均径流系数(图9)发现,4—10月径流系数无显著差别,曲线基本重合,这是由于这个时段的降水量远高于径流量。12月一次年2月的径流系数大于0.2,且明显大于其他月份。即在相同降水条件下,枯水季的产流效率更高。这是由于枯水季的降水量少,地下水对径流的补给作用增强。土地覆盖变化后,径流系数呈下降趋势,在枯水季12月一次年2月的径流系数平均下降0.10(约29.5%),在丰水季5—9月径流系数平均下降0.01(约8.72%)。这表明,土地覆盖变化在降水多的丰水季对径流的影响较少,在降水少的枯水季的影响大。

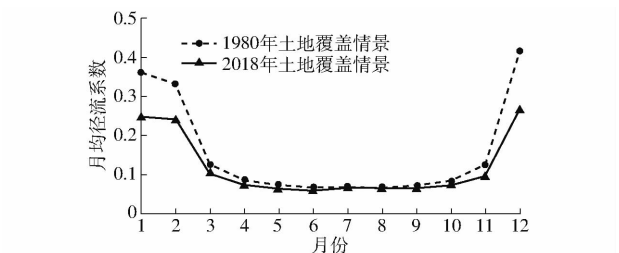


图9 1980—2018年延河流域月均径流系数变化曲线

Fig.9 Monthly mean runoff coefficient in Yanhe River Basin from 1980 to 2018

延河流域年内降水量和径流量有明显的季节性分配,通过建立逐步多元线性回归模型,计算得到延河流域土地覆盖类型和枯水季(11月一次年2月)和丰水季(5—9月)多年平均降水量及多年平均径流量之间的多元线性回归方程(表2)。结果发现线性模型达极显著水平($P < 0.01$),说明模型的回归效果显著,且所选变量与径流量都相关。线性模型中各因变量的回归系数都显著,不为零,说明上述系数都能解释径流量的变化。降水量与径流量呈正相

表 2 延河流域枯水季和丰水季的多元线性回归方程及贡献率

Tab.2 Multiple linear regression equation and contribution in Yanhe River Basin in dry season and wet season					
土地覆盖情景	时段	线性模型	R^2	贡献率/%	
				降水量	土地覆盖类型
1980 年	枯水季	$Y = 0.070X_1 - 10.645X_2 + 3.162$	0.34	78.02 **	21.98 *
	丰水季	$Y = 0.073X_1 - 1.158X_2 + 0.276$	0.93	92.66 **	7.34 **
2018 年	枯水季	$Y = 0.072X_1 - 13.973X_2 + 3.361$	0.46	75.18 **	24.82 **
	丰水季	$Y = 0.073X_1 - 1.340X_2 + 1.043$	0.94	92.00 **	8.00 **

注: ** 表示达到极显著水平 ($P < 0.01$), * 表示达到显著水平 ($P < 0.05$)。

关,且是径流量变化的主要影响因素,土地覆盖类型与径流量呈负相关。在年内的不同时段,降水量和土地覆盖类型对径流量变化的贡献存在较大差异。在丰水季,线性模型的决定系数均大于 0.90。在 1980 年土地覆盖情景下,降水量能解释 92.66% 的径流量变化,土地覆盖类型能解释 7.34% 的径流量变化,而在 2018 年土地覆盖情景下,降水量的贡献率下降了 0.66 个百分点,土地覆盖类型的贡献率上升了 0.66 个百分点。在枯水季,线性模型的决定系数均小于 0.5。在 1980 年土地覆盖情景下,降水量能解释 78.02% 的径流量变化,土地覆盖类型能解释 21.98% 的径流量变化,而在 2018 年土地覆盖情景下,降水量的贡献率下降了 2.84 个百分点,土地覆盖类型的贡献率上升了 2.84 个百分点。植被恢复后,土地覆盖类型的贡献率都是上升的,降水量的贡献率都是下降的,且土地覆盖类型和降水量贡献率的变化量在枯水季明显大于丰水季。这说明土地覆盖类型变化对径流模拟具有重要意义。

土地覆盖对降水-径流关系有着重要的影响。月径流系数一般随月降水量的增加先减小后趋于稳定(图 10)。当月降水量很小时,月径流系数非常大,随着月降水量的增加,月径流系数随之减少,当月降水量超过一定值时,月径流系数达到一个相对稳定的状态。因为延河流域土壤含水率往往较低,当降水量很小时,大部分的降水会补充土壤水分,导致地表径流量的增加速度不及降水。然而,随着月降水量的增加,超渗产流开始增加,地表径流量的增加速度开始加快。当降水量继续增加,由于月降水量与月入渗量的稳定关系导致了径流系数趋于稳定。与退耕还林(草)前相比,退耕还林(草)工程实施后植被覆盖增加,导致了下垫面粗糙度的增加和土壤结构得到改善,这些变化增强了土壤抵抗暴雨侵蚀的能力和瞬时入渗强度,超渗产流很难产生。因此,退耕还林(草)工程实施后月径流系数与月降水量的相关性曲线更低,趋于稳定时的月径流系数由于植被覆盖的增加而降低,月降水量也由于植被覆盖的增加而降低。

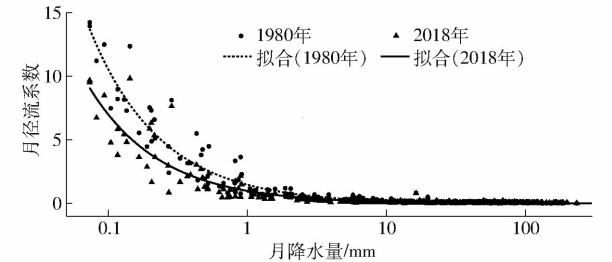


图 10 延河流域月降水量与月径流系数的关系

Fig. 10 Relationship between monthly precipitation and runoff coefficient in Yanhe River Basin

4 讨论

延河流域水资源短缺问题严重,开展生态恢复与径流关系研究,对于充分认识延河流域植被与径流的互馈作用机制,明确植被恢复未来发展方向具有重要意义。延河流域作为典型的黄土沟壑区,降水主要消耗于植被截留、入渗及形成径流。自 20 世纪 90 年代末以来,随着中国政府开始实施退耕还林(草)工程,植被覆盖面积开始迅速增加。本研究初步阐明了延河流域植被恢复对径流的影响,为探究黄土深厚和地形复杂的黄土高原地区的径流响应提供依据。

延河流域造林植草后,树皮碎屑和叶枯落物的积累可以显著增加土壤表面粗糙度、减缓径流速度、增加入渗、加剧蒸发^[29]。因此,地表径流量和洪峰流量在植被恢复后明显减少,这与前人在挠力河流域和黄河流域研究结果一致^[30-31]。延河流域植被恢复后年降水量对年径流量变化的贡献率分别为 92.2% 和 90.5%,虽然贡献率有所下降但降水仍然是径流的主要影响因素,这与 ZHAO 等^[32]在渭河流域和赵阳等^[33]在罗玉沟流域的结论一致,结果表明降水是径流的主要影响因素。而与 LIANG 等^[16]在窟野河和无定河流域的结论相反,这 2 个流域人类活动是径流的主要影响因素。这是由于黄土高原北部气候干燥、降水量少,需要大量的降水来补充土壤水分,才能检测到径流的变化。在黄土高原南部,植被覆盖度较高,地形陡

峭,降水量多,因此黄土高原南部的流域对于降水的敏感性更强。

在 11 月至次年 2 月的枯水季节,此时降水量很小或者没有降水,随着植被恢复导致的林草面积增加,植被吸收和拦截水分的能力增强,增加了土壤抗暴雨侵蚀的能力、瞬时入渗强度和流域的储水能力,所以径流量显著减少,平均减幅为 29.65%。其中降水是径流变化的主要影响因素,贡献率达到了 75% 以上,这与枯水季降水量少,补给径流的方式主要是地下水有关。植被恢复后,降水的贡献率有所下降,而土地覆盖的贡献率随之上升。而在 5 月至 9 月的丰水季节,降水强度较大,无论土地覆盖类型如何转变,土壤入渗率都很容易达到饱和,易产生超渗产流(延河流域最重要的产流方式)^[17],此时地表径流量在植被恢复后的变化不明显,平均减幅为 8.72%。其中降水仍是径流变化的主要影响因素,贡献率达到了 90% 以上,这与丰水季降水量多、降水强度大有关。植被恢复后,降水和土地覆盖的变化幅度明显小于枯水季。这与前人的研究一致,林草地面积的增加能够增加对降水的拦截作用和蒸发作用而减少径流系数已经得到验证^[34],SRIWONGSITANON 等^[35]和 CAMACHO 等^[36]的研究表明,当降水强度超过一定值时,植被对地表径流的截流能力减弱。

本研究在探索生态恢复对径流的影响上,未考虑深层根系的作用。深层土壤储水在植被覆盖变化水文过程中的作用巨大^[14],不同植被的根系在垂直方向上的分布差异较大^[37],它在不同深度的土壤水分的耗损和下渗过程中扮演着重要角色^[38],影响着整个水文过程。由于在进行直接和详细的测量方面存在重大困难^[39],CLM5.0 模型多关注浅层 2~3 m 土壤水分变化,所以关于深层土壤水分对流域径流变化的贡献尚未分析,这将成为下一步的研究方向。

5 结论

(1) 基于真实下垫面情况构建的 CLM5.0 模型可以较好地描述水循环过程变量的实际情况,对延河流域的降水-径流过程获得了较高的模拟精度。

(2) 生态恢复工程前后延河流域的土地覆盖发生了显著变化。20 世纪 80 年代和 21 世纪 10 年代末,土地覆盖主要以草地为主,耕地次之。土地覆盖类型的转移主要发生在耕地、林地和草地之间,1980 年耕地的 52.40% 和 5.77% 转换成了 2018 年的草地和林地,由此导致草地和林地面积的增加。土地覆盖变化深刻影响着延河流域的水文过程。

(3) 土地覆盖变化导致延河流域年径流量和年径流系数明显减小。延河流域年径流量与年降水量基本保持同步变化,但流域年径流量的年际变幅明显大于年降水量。植被恢复工程实施前后,延河流域年径流量的平均下降幅度为 12.34%,年平均径流系数平均下降幅度为 11.46%。通过线性回归分析,植被恢复前后年降水对年径流变化的贡献率分别为 92.2%、90.5%。虽然植被覆盖变化能通过流域土壤表面粗糙度的增加、径流速度的减缓、入渗的增加、蒸发的加剧实现对流域年径流和年降水贡献率的削减,但降水仍是影响径流的最主要因素。

(4) 土地覆盖变化对丰水季径流影响较小,对枯水季径流影响较大,并使年内径流分配区域集中化。植被恢复工程实施前后,延河流域径流量和径流系数在丰水季的平均下降幅度为 8.72%,在枯水季的平均下降幅度为 29.5%。通过线性回归分析,植被恢复后,降水对径流的贡献率均有所下降,土地覆盖对径流的贡献率均有所上升;枯水季贡献率的变化幅度明显高于丰水季。虽然植被覆盖变化能通过增加下垫面粗糙度和改善土壤结构使超渗产流更难产生,从而导致径流量的下降,但在降水强度较大的丰水季,植被的作用受限使径流量下降不明显。

参 考 文 献

- [1] FU B, WANG S, LIU Y, et al. Hydrogeomorphic ecosystem responses to natural and anthropogenic changes in the Loess Plateau of China[J]. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 2016, 45(1): 223–243.
- [2] ZHU Y, JIA X, SHAO M. Loess thickness variations across the Loess Plateau of China[J]. Surveys in Geophysics, 2018, 39(4): 715–727.
- [3] ZHANG J, GAO G, FU B, et al. A universal multifractal approach to assessment of spatiotemporal extreme precipitation over the Loess Plateau of China[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2020, 24(2): 809–826.
- [4] WANG Y, SHAO M. Spatial variability of soil physical properties in a region of the Loess Plateau of China subject to wind and water erosion[J]. Land Degradation & Development, 2013, 24(3): 296–304.
- [5] XIAO J, WANG L, DENG L, et al. Characteristics, sources, water quality and health risk assessment of trace elements in river water and well water in the Chinese Loess Plateau[J]. Science of the Total Environment, 2018, 650(2): 2004–2012.
- [6] 高学睿, 闫程晟, 王玉宝, 等. 黄土高原典型区雨水资源化潜力模拟与评价[J/OL]. 农业机械学报, 2020, 51(1): 275–283. GAO Xuerui, YAN Chengsheng, WANG Yubao, et al. Simulation and evaluation of rainwater harvesting potential in typical areas of Loess Plateau[J/OL]. Transactions of The Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(1): 275–283.

- http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20200130&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2020.01.030. (in Chinese)
- [7] 秦伟, 朱清科, 张宇清, 等. 陕北黄土区生态修复过程中植物群落物种多样性变化[J]. 应用生态学报, 2009, 20(2): 403–409.
- [8] FENG X, FU B, PIAO S, et al. Revegetation in China's Loess Plateau is approaching sustainable water resource limits[J]. Nature Climate Change, 2016, 6(11): 1019–1022.
- [9] 王国庆, 张建云, 贺瑞敏, 等. 黄河中游气温变化趋势及其对蒸发能力的影响[J]. 水资源与水工程学报, 2007, 18(4): 32–36.
- WANG Guoqing, ZHANG Jianyun, HE Ruimin, et al. Trends of temperature change in middle of Yellow River and its impact to the evaporation potential[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2007, 18(4): 32–36. (in Chinese)
- [10] ZHAO M, GERUO A, ZHANG J, et al. Ecological restoration impact on total terrestrial water storage[J]. Nature Sustainability, 2020, 4(1): 56–62.
- [11] FAN X, MA Z, YANG Q, et al. Land use/land cover changes and regional climate over the Loess Plateau during 2001–2009. Part II: interrelationship from observations[J]. Climatic Change, 2015, 129(3–4): 441–455.
- [12] WANG S, FU B, PIAO S, et al. Reduced sediment transport in the Yellow River due to anthropogenic changes[J]. Nature Geoscience, 2015, 9(1): 38–41.
- [13] BANGASH R F, PASSUELLO A, SANCHEZ-CANALES M, et al. Ecosystem services in Mediterranean river basin: climate change impact on water provisioning and erosion control[J]. Science of the Total Environment, 2013, 458(1): 246–255.
- [14] EVARISTO J, MCDONNELL J J. Global analysis of streamflow response to forest management[J]. Nature, 2019, 570(7762): 455–461.
- [15] YIN J, HE F, XIONG Y J, et al. Effects of land use/land cover and climate changes on surface runoff in a semi-humid and semi-arid transition zone in Northwest China[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2017, 21(1): 183–196.
- [16] LIANG W, BAI D, WANG F, et al. Quantifying the impacts of climate change and ecological restoration on streamflow changes based on a Budyko hydrological model in China's Loess Plateau[J]. Water Resources Research, 2015, 51(8): 6500–6519.
- [17] MIAO C Y, ZHENG H Y, JIAO J Y, et al. The changing relationship between rainfall and surface runoff on the Loess Plateau, China[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2020, 125(8): e2019JD032053.
- [18] LAWRENCE D, FISHER R, KOVEN C, et al. Technical description of version 5.0 of the community land model (CLM) [M]. Boulder: National Center for Atmospheric Research (NCAR), 2018.
- [19] HE J, YANG K, TANG W, et al. The first high-resolution meteorological forcing dataset for land process studies over China [J]. Scientific Data, 2020, 7(25): 1–11.
- [20] SHANGGUAN W, DAI Y, LIU B, et al. A China dataset of soil properties for land surface modeling[J]. Journal of Advances in Modeling Earth Systems, 2013, 5(2): 212–224.
- [21] 齐矗华. 黄土高原侵蚀地貌与水土流失关系[M]. 西安: 陕西人民教育出版社, 1991.
- [22] 王帅帅. 陕北黄土工程地质研究[D]. 西安: 长安大学, 2016.
- WANG Shuaishuai. Study on geological engineering of loess in North Shaanxi[D]. Xi'an: Chang'an University, 2016. (in Chinese)
- [23] SHAO J, SI B, JIN J. Extreme precipitation years and their occurrence frequency regulate long-term groundwater recharge and transit time[J]. Vadose Zone Journal, 2018, 17(1): 1–9.
- [24] 陈海山, 李兴, 华文剑. 近20年中国土地利用变化影响区域气候的数值模拟[J]. 大气科学, 2015, 39(2): 357–369.
- CHEN Haishan, LI Xing, HUA Wenjian. Numerical simulation of the impact of land use/land cover change over China on regional climates during the last 20 years[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2015, 39(2): 357–369. (in Chinese)
- [25] 冉有华, 李新, 卢玲. 四种常用的全球1 km土地覆盖数据中国区域的精度评价[J]. 冰川冻土, 2009, 31(3): 490–500.
- [26] BENAMAN J, SHOEMAKER C A, HAITH D A. Calibration and validation of soil and water assessment tool on an agricultural watershed in upstate New York[J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2005, 10(5): 363–374.
- [27] 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.
- [28] 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, 557–558: 331–342.
- [29] SHAO Q, TRAYLEN A, ZHANG L. Nonparametric method for estimating the effects of climatic and catchment characteristics on mean annual evapotranspiration[J]. Water Resources Research, 2012, 48(3): W03517.
- [30] 宫兴龙, 付强, 王斌, 等. 土地利用方式变化对水循环过程响应机制研究[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(2): 252–259.
- GONG Xinglong, FU Qiang, WANG Bin, et al. Mechanism of response of land use change to water cycle process[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(2): 252–259. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180232&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2018.02.032. (in Chinese)

[12] 洪明,赵经华,马英杰,等. 干旱绿洲区枣园冠层微环境调控效应[J]. 干旱地区农业研究, 2016, 34(1):16–22.
HONG Ming, ZHAO Jinghua, MA Yingjie, et al. Micro environmental regulation effect of red jujube trees' canopy in arid oasis region[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2016, 34(1):16–22. (in Chinese)

[13] 申晓晶,李王成. 宁夏老压砂地枣树不同水分条件下的光合特性研究[J]. 节水灌溉, 2015(5):12–15,19.
SHEN Xiaojing, LI Wangcheng. Research on photosynthetic characteristics of jujube planted in gravel-covering land under different moisture in Ningxia[J]. Water Saving Irrigation,2015(5):12–15,19. (in Chinese)

[14] 谢连杰. 冬小麦生育中后期光合源分布及不同茎生叶光合性能研究[D]. 泰安:山东农业大学, 2008.

[15] 滕小锱,赵凤君,韩锦,等. 黑杨无性系日 CO₂固定总量的测定及与苗木生产潜势的相关性研究[J]. 河北林果研究, 2005(1):21–25,43.
TENG Xiaonuo, ZHAO Fengjun, HAN Jin, et al. A correlation research on determination of the daily fixed CO₂ gross in black Italian poplar clone and nursery stock production potentiality [J]. Hebei Journal of Forestry and Orchard Research, 2005(1): 21–25,43. (in Chinese)

[16] 张海辉,张珍,张斯威,等. 黄瓜初花期光合速率主要影响因素分析与模型构建[J/OL]. 农业机械学报,2017, 48(6): 242–248.
ZHANG Haihui, ZHANG Zhen, ZHANG Siwei, et al. Analysis of main influencing factors and modeling of photosynthetic rate for cucumber at initial flowering stage[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(6): 242–248. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170631&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.06.031. (in Chinese)

[17] 赵超,刘晓嘉,才燕,等. 空气湿度对对开蕨组培苗光合特性的影响[J]. 东北林业大学学报, 2014, 42(9):111–115.
ZHAO Chao, LIU Xiaojia, CAI Yan, et al. Effects of air humidity on photosynthetic characteristics of *Phyllitis japonica* tissue culture seedlings[J]. Journal of Northeast Forestry University,2014, 42(9):111–115. (in Chinese)

[18] SU Peixi, LIU Xinmin. Photosynthetic characteristics of linze jujube in conditions of high temperature and irradiation[J]. Scientia Horticulturae, 2004, 104(3):339–350.

[19] 刘思,王志磊,张军翔. 葡萄行内覆盖对园区微域生态环境及果实品质的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2019, 47(6):73–79,88.
LIU Si, WANG Zhilei, ZHANG Junxiang. Effects of within-row mulching on soil microsites in vineyard and fruit quality[J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2019, 47(6):73–79,88. (in Chinese)

[20] 王紫寒,张伟,关利平,等. 避雨栽培对泽香葡萄微环境和果实品质的影响[J]. 中外葡萄与葡萄酒, 2015(3):14–17.
WANG Zihan, ZHANG Wei, GUAN Liping, et al. Effects of rain-shelter cultivation on the microclimate and fruit quality of Zexiang(*V. vinifera* L)[J]. Sino-Overseas Grapevine & Wine, 2015(3):14–17. (in Chinese)

(上接第 266 页)

[31] GU C, MU X, GAO P, et al. Changes in runoff and sediment load in the three parts of the Yellow River basin, in response to climate change and human activities[J]. Hydrological Processes, 2018, 33(4): 585–601.

[32] ZHAO G, MU X, TIAN P, et al. Climate changes and their impacts on water resources in semiarid regions: a case study of the Wei River basin, China[J]. Hydrological Processes, 2012, 27(26): 3852–3863.

[33] 赵阳,余新晓. 黄土丘陵沟壑区典型流域气候和土地利用变化对径流泥沙产量的影响[J]. 北京林业大学学报, 2013, 35(3): 39–45.
ZHAO Yang, YU Xinxiao. Effects of climate variation and land use change on runoff-sediment yield in typical watershed of loess hilly-gully region[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2013, 35(3): 39–45. (in Chinese)

[34] DWARAKISH G S, GANASRI B P, DE STEFANO L. Impact of land use change on hydrological systems: a review of current modeling approaches[J]. Cogent Geoscience, 2015, 1(1): 1115691.

[35] SRIWONGSITANON N, TAESOMBAT S W. Effects of land cover on runoff coefficient[J]. Journal of Hydrology, 2011, 410(3–4):226–238.

[36] CAMACHO S V V, SAREIVA O A M L, WENNINGER J W, et al. Understanding runoff processes in a semi-arid environment through isotope and hydrochemical hydrograph separations[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2015, 19(1): 4183–4199.

[37] YU Y, WEI W, CHEN L, et al. Responses of vertical soil moisture to rainfall pulses and land uses in a typical loess hilly area, China[J]. Solid Earth, 2015, 6(2): 595–608.

[38] YANG Y, XIAO P, FENG X, et al. Accuracy assessment of seven global land cover datasets over China[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2017, 125: 156–173.

[39] LI H, SI B, LI M. Rooting depth controls potential groundwater recharge on hillslopes[J]. Journal of Hydrology, 2018, 564(7): 164–174.