

拒马河流域年季月径流量对土地利用变化的响应

徐飞^{1,2,3}, 贾仰文⁴, 牛存稳⁴, 赵玲玲^{1,2,3}

(1. 广东省科学院广州地理研究所, 广东 广州 510070; 2. 广东省遥感与地理信息系统应用重点实验室, 广东 广州 510070; 3. 广东省地理空间信息技术与应用公共实验室, 广东 广州 510070; 4. 中国水利水电科学研究院 流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100038)

摘要: 为探究年、季、月多时间尺度径流量对土地利用变化的响应,以紫荆关水文站以上的拒马河流域为研究对象,构建拒马河流域 WEP-L 分布式水文模型,采用情景模拟分析方法设置 9 类土地利用变化情景定量分析土地利用变化对径流量的影响。结果表明:WEP-L 模型在拒马河流域适用性较好;退耕还林将减少年径流量,并随着森林覆盖率的增加,径流量减少更为剧烈,森林覆盖率每提高 10%,径流量减少 13.10 mm;弃耕撂荒和火灾伐木将使径流量增大;季节径流量对土地利用变化的响应程度呈现夏季 > 秋季 > 冬季 > 春季;月径流量响应结果表现为 6-9 月变化较大,尤其是 7 月份最为剧烈,而 3 和 4 月较小。研究结果对于流域土地利用合理规划具有重要意义。

关键词: 土地利用变化; 径流量; 情景分析; WEP-L 模型; 拒马河流域

中图分类号:TV11; P333

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2021)03-0044-07

Response of annual, seasonal and monthly runoff to the land use change in Juma River Basin

XU Fei^{1,2,3}, JIA Yangwen⁴, NIU Cunwen⁴, ZHAO Lingling^{1,2,3}

(1. Guangzhou Institute of Geography, Guangdong Academy of Sciences, Guangzhou 510070, China; 2. Guangdong Key Laboratory of Remote Sensing and Geographical Information System Application, Guangzhou 510070, China; 3. Guangdong Open Laboratory of Geospatial Information Technology and Application, Guangzhou 510070, China; 4. State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

Abstract: In order to explore the response of annual, seasonal and monthly runoff to the land use change, we chose the Juma River Basin as the study area, and established the WEP-L (water and energy transfer processes in large river basin) model of this basin. With this model, nine scenarios of land use changes were set to quantitatively analyze the influences of land use change on the runoff. The results showed that the WEP-L model was applicable to the runoff simulation of the Juma River Basin. Returning farmland to forest would reduce the annual runoff, and with the increase of forest coverage rate, the runoff decrease would be more significant. When the forest coverage rate increased by 10%, the runoff decreased by 13.10%. However, abandoned land and fire logging would increase the runoff. The response of seasonal runoff to the land use change was summer > autumn > winter > spring. The response of monthly runoff was greater from June to September, especially in July, while lower in March and April. The research results can provide a valuable reference for the planning of land use pattern in this basin.

Key words: land use change; runoff; scenario analysis; WEP-L (water and energy transfer processes in large river basin) model; Juma River Basin

收稿日期:2020-09-24; 修回日期:2021-01-12

基金项目:广东省科学院发展专项资金项目(2020GDASYL-20200103008);中国水利水电科学研究院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-KF202018);国家重点基础研究发展计划项目(2015CB452701);国家自然科学基金项目(41771044)

作者简介:徐飞(1989-),男,江西吉安人,博士,助理研究员,主要从事流域水循环模拟与气候变化研究。

通讯作者:赵玲玲(1980-),女,河南滑县人,博士,研究员,主要从事水文学及水资源研究。

1 研究背景

由于人类无序不良的大规模开发,致使下垫面变化剧烈,并造成诸如水土流失、沙尘暴、洪涝干旱等一系列生态环境问题,严重影响人民群众生产、生活,威胁国家生态安全^[1-3]。为此,1999年四川、陕西、甘肃率先试点国家退耕还林政策,2002年1月10日,国家确定全面启动退耕还林工程。此后,土地利用经历了较大变化,对流域径流也产生了影响^[4-6]。探究土地利用变化对流域径流的影响,对于揭示水循环规律和水资源、土地利用规划管理具有重要意义,因而成为国内外研究热点。

土地利用变化主要通过影响流域蒸散发和入渗等水循环过程的关键环节,进而影响流域径流量^[7-9]。Ghaffari等^[10]研究表明伊朗Zanjanrood流域牧草地退化为裸地后将增加地表径流。徐静等^[11]研究表明颖河流域增加森林覆被面积将增加流域蒸散发,减少径流,而增加耕地面积则将减少蒸散发,增加径流。1980年后,由于东江流域林地大幅度减少,耕地增加,导致流域径流增加^[12]。在气候条件较好的区域,弃耕撂荒后植被及时恢复,增加了入渗,减少了地表径流;而在干旱地区,植被恢复速度慢,降水后土壤表面易结皮,减少了入渗,增加了地表径流^[13]。周艳春等^[14]以1983年澳大利亚Mcmahons Creek流域发生的森林火灾为案例,运用AWRA-L模型模拟火灾前后的水文过程,分析了森林火灾对径流的影响,相比于火灾前的1974-1982年,火灾发生后,1983-1997年年径流深增加140 mm,而1998-2004年年径流深增加43 mm,说明短期内森林火灾使径流增加明显,而随着森林内植被的不断恢复径流增加量将减少。Tian等^[15]在祁连山的分析表明草地转林地后将减少径流。关于土地利用变化对径流的影响分析基本只针对流域年径流量,较少涉及其对年、季节、月多时间尺度径流量的影响。

紫荆关水文站以上流域(以下称拒马河流域)位于河北省保定市,下游为白洋淀重要生态湿地和雄安新区,流域生态环境良好与否至关重要。拒马河流域内植被情况较差,水土流失严重,2002年后大力实施退耕还林,植被得到有效恢复。此外,拒马河流域为重要水源地,对于白洋淀和雄安新区都起到了重要水源供给和生态屏障作用。为此,本研究以拒马河流域为研究区,基于分布式水文模型WEP-L模型和情景设置的方法,开展土地利用变

化对年、季、月多时间尺度径流量的影响研究,期为水资源管理和土地利用规划提供科学依据。

2 数据来源与研究方法

2.1 研究区概况

拒马河发源于河北省涞源县西北太行山麓,流域范围为114.7°~115.2°E、39.2°~39.7°N,海拔为511~2160 m,呈西高东低,流域面积为1760 km²,主河道长81.5 km,河道纵坡为5.5‰。流域受大陆季风气候影响,年均降水量为600 mm(1965-2015年),全年80%的降水集中于6-9月,年均气温为7.2℃。流域以林地、耕地和草地为主,三者之和占比约为97%。拒马河流域水系、高程及站点分布见图1。

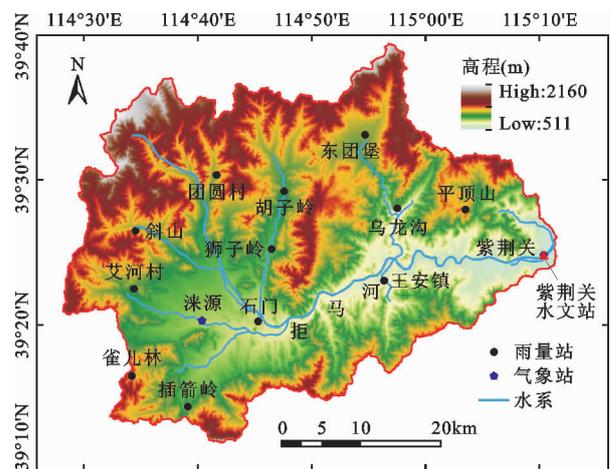


图1 拒马河流域水系、高程及站点分布

2.2 数据来源

本文所使用的数据包括90 m分辨率DEM数据集,2000年土地利用和土壤数据。气象数据(降水、气温、日照时数、相对湿度、平均风速数据)来自研究区2个气象站点和13个雨量站1965-2015年的逐日气象数据,水文数据来自紫荆关水文站1965-2015年的逐月实测径流资料。

2.3 研究方法

2.3.1 WEP-L模型简介 本研究采用水与能量转化过程WEP-L模型(water and energy transfer processes in large river basin model)模拟拒马河流域水文过程。WEP-L模型耦合水循环与能量交换过程,精细模拟输出计算单元内的各类下垫面的水循环和能量过程;以子流域套等高带为计算单元,有效保证了等高带内水量平衡、汇流路径不失真,也提高了模型计算效率。在水文过程模拟中,WEP-L模型采用Penman公式或Penman-Monteith公式计算

截留蒸发、土壤蒸发、植被蒸腾和水面蒸发等蒸发项;入渗依据降雨量情况(划分为暴雨期和非暴雨期)分别采用 Green - Ampt 模型或 Richards 方程计算;地表径流暴雨期采用超渗产流模式,非暴雨期采用蓄满产流模式;对山坡斜面土壤层进行了壤中流计算;地下径流按照 BOUSINESSQ 方程进行浅层地下水数值计算;积雪融化过程采用温度指标法^[16-17]。WEP - L 模型参数主要包括土壤饱和导水系数、河床材质渗透系数、含水层厚度、植被参数等^[16-17]。模型输出主要为水循环通量要素(包括降水、蒸发、入渗、径流等),模型原理与详细介绍可参阅文献[17]。

依据收集的地形、水系、土壤、土地利用、气象数据,生成拒马河流域河网水系并划分子流域和等高带计算单元,构建土壤数据库、土地利用和气象数据库,进而构建拒马河流域的 WEP - L 模型。以紫荆关水文站的实测月径流数据对模型进行率定和验证,并选取纳什效率系数(*Nash*)、相对误差(*Re*)和相关系数(*R*)以衡量模型模拟精度^[16]。

2.3.2 情景设置 本文以退耕还林前的 2000 年土地利用为基准。拒马河流域 2000 年土地利用类型分布如图 2 所示。

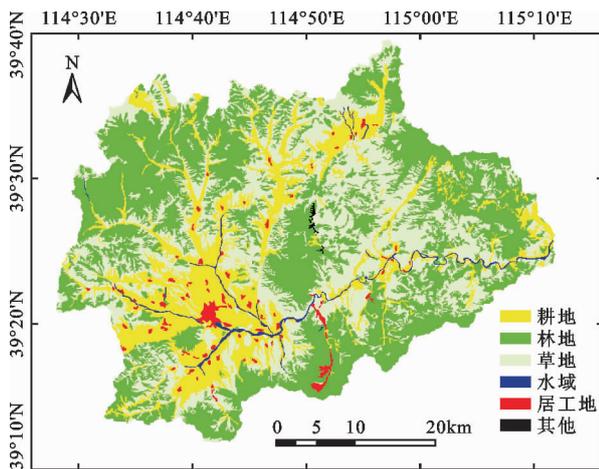


图 2 2000 年拒马河流域土地利用类型分布

2000 年拒马河流域各土地利用类型面积和占比分别为:耕地 362.64 km²(20.44%)、林地 747.29 km²(42.12%)、草地 615.78 km²(34.70%)、水域 20.08 km²(1.13%)、居工地 27.12 km²(1.53%)、其他 1.47 km²(0.08%),区域以林地、草地和耕地为主,三者面积之和占比高达 97.26%。首先厘清耕地分布情况,才能因地制宜实施退耕还林。拒马河流域地处高山峡谷,海拔范围为 511~2 160 m,高程和坡度变化较大。因此,分别按高程和坡度将区

域内耕地面积进行分区统计,如表 1 和 2 所示。按高程分区(表 1),耕地主要位于 1 000 m 以下区域,面积为 238.36 km²,占流域总面积的 13.44%,800~900 m 和 900~1 000 m 两个区间是耕地最为集中的区间,面积分别为 80.14 km²(4.52%)和 99.73 km²(5.62%),而 1 000 m 以上区域耕地面积为 124.27 km²,占流域总面积的 7.00%。按照坡度分区(表 2),6°以下区域,耕地面积为 141.64 km²,占流域总面积的 7.98%,6°~10°、10°~15°和坡度大于 15°的耕地面积分别为 93.25、90.08 和 37.67 km²,占比分别为 5.26%、5.08%和 2.12%,耕地主要集中于坡度小于 15°的区域,并且随着坡度增大,耕地逐渐减少。

表 1 拒马河流域 2000 年不同高程分区耕地面积

高程分区/m	耕地面积/km ²	面积占比/%
<800	58.49	3.30
800~900	80.14	4.52
900~1000	99.73	5.62
1000~1100	41.13	2.32
1100~1200	49.58	2.79
>1200	33.56	1.89

表 2 拒马河流域 2000 年不同坡度分区耕地面积

坡度分区/(°)	耕地面积/km ²	面积占比/%
0~6	141.64	7.98
6~10	93.25	5.26
10~15	90.08	5.08
>15	37.67	2.12

本文以 2000 年土地利用为基准,通过情景假设的方式,按照高程和坡度设置耕地转换情景,将 2000 年土地利用进行转换为相应情景下的土地利用类型,如表 3 所示。依照高程分区,设置 3 种不同高程区域的耕地转换为林地的退耕还林情景(情景 1、2、3),即将海拔高于 1 000、900 和 800 m 区域的耕地转换为林地,转换后的森林覆盖率从目前的 42.12% 依次提高至 49.13%、54.75% 和 59.27%;依据坡度分区,设置 3 种不同坡度区域的耕地转换为林地的退耕还林情景(情景 4、5、6),即分别将坡度大于 15°、10°和 6°区域的耕地转换为林地,转换后的森林覆盖率分别提高至 44.24%、49.42% 和 54.58%;情景 7 为所有耕地转为林地的极端情景,该情景为高程分区和坡度分区耕地转林地的共同极

端情景,转后森林覆盖率达 62.56%。同时设置两种极端情景,即所有耕地转为裸地和所有林地转为裸地,以分别描述弃耕撂荒和火灾伐木的极端不利情况。高程分区和坡度分区情景分别从高程和坡度的角度,从高海拔向低海拔依次进行耕地向林地转换,从陡坡向缓坡逐步进行退耕还林,相比之前文献中所提的所有耕地转为林地和人为假设一定百分比的耕地转为林地,要更为合理和实际,在实际实施过程中更容易操作,更具现实科学意义。极端土地利用情景,能排除其他要素干扰,有利于确定单一土地利用类型的水文效应^[18]。因此,本文设置 3 种极端情景,即所有耕地转为林地、所有耕地转为裸地和所有林地转为裸地。虽然 3 种极端情景在现实中完全实现的可能性微乎其微,拒马河流域地处拒马河上游,是白洋淀重要水源区,对于白洋淀乃至雄安新区具有重要的生态屏障作用,随着大力实施退耕还林政策和白洋淀生态环境保护,所有耕地转为林地的

极端退耕还林情景(情景 7),在未来有可能发生。所有耕地转为裸地(情景 8)的设置主要是考虑目前国家山区普遍存在的农村劳动力向城镇流转,大量耕地被弃耕撂荒,耕地不再耕种逐渐变为裸地。所有林地转为裸地(情景 9)的设置主要是考虑如森林火灾、滥砍滥伐等不良现象,并且流域呈暖干趋势^[19],利于森林火灾的发生。极端弃耕撂荒和极端火灾伐木的情景设置和分析,有助于了解弃耕撂荒、火灾伐木所带来的最不利局面,为森林管理、土地利用规划提供参考。

3 结果分析

3.1 模型率定与验证

基于紫荆关水文站逐月实测径流量,选取 1965-1990 年为率定期,1991-2015 年为验证期,率定期和验证期的月平均流量模拟值与实测值如图 3 所示,拒马河流域 WEP-L 模型评价如表 4 所示。

表 3 拒马河流域土地利用变化情景设置

分类	名称	情景描述	转换面积比例/%	转后森林覆盖率/%	备注
高程分区	情景 1	海拔 1000 m 以上区域耕地转为林地	7.01	49.13	退耕还林
	情景 2	海拔 900 m 以上区域耕地转为林地	12.63	54.75	退耕还林
	情景 3	海拔 800 m 以上区域耕地转为林地	17.15	59.27	退耕还林
	情景 4	坡度大于 15°的区域耕地转为林地	2.12	44.24	退耕还林
坡度分区	情景 5	坡度大于 10°的区域耕地转为林地	7.20	49.42	退耕还林
	情景 6	坡度大于 6°的区域耕地转为林地	12.46	54.58	退耕还林
	情景 7	所有耕地转为林地	20.44	62.56	退耕还林
极端情景	情景 8	所有耕地转为裸地	20.44	42.12	弃耕撂荒
	情景 9	所有林地转为裸地	42.12	0.00	火灾伐木

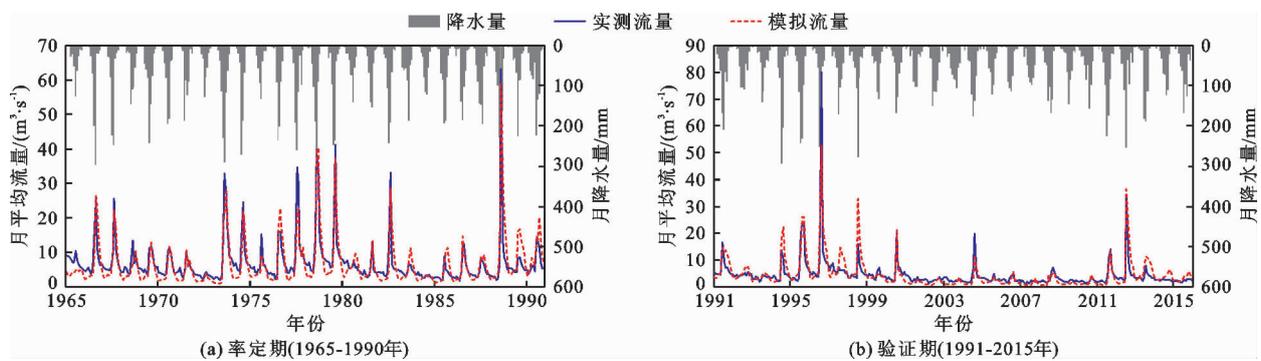


图 3 模型率定期(1965-1990 年)和验证期(1991-2015 年)月平均流量模拟值与实测值

从图 3 可以看出,WEP-L 模型模拟径流量与实测径流量吻合度较高。从表 4 可以看出,率定期 Nash、Re 和 R 分别为 0.74、-6.1% 和 0.88;在验证

期,Nash、Re 和 R 分别为 0.71、2.9% 和 0.85。无论率定期还是验证期,Nash 高于 0.70,Re 低于 10%,R 不小于 0.85,说明 WEP-L 模型在拒马河流域径

流模拟中有较好的适用性,可用于拒马河流域土地利用情景变化对径流量影响分析。

表4 拒马河流域 WEP-L 模型月径流模拟率定和验证结果评价

评价指标	率定期 (1965-1990年)	验证期 (1991-2015年)
Nash	0.74	0.71
Re/%	-6.10	2.90
R	0.88	0.85

3.2 年径流响应

以2000年LUCC土地利用计算结果为基准,拒马河流域1965-2015年多年平均径流深为93.81 mm。依据9种不同土地利用变化的情景,模拟分析1965-2015年各情景的水文过程,其中年尺度径流响应结果如表5所示。

表5 拒马河流域年径流量对土地利用变化的响应

情景	多年径流深均值/ mm	变化量/ mm	变化率/ %
情景1	88.76	-5.05	-5.38
情景2	84.38	-9.43	-10.05
情景3	79.01	-14.80	-15.77
情景4	92.71	-1.10	-1.17
情景5	88.78	-5.03	-5.36
情景6	82.14	-11.67	-12.44
情景7	66.11	-27.70	-29.52
情景8	100.35	6.54	6.97
情景9	142.96	49.15	52.39

从表5可以看出,3个高程分区的退耕还林情景(情景1、2、3)多年平均径流深分别为88.76、84.38、79.01 mm,相比基准情景分别减少了5.05、9.43、14.80 mm,变化率分别为-5.38%、-10.05%、-15.77%。3个坡度分区的退耕还林情景(情景4、5、6)以及极端退耕还林情景(情景7),多年平均径流深分别为92.71、88.78、82.14和66.11 mm,变化率分别为-1.17%、-5.36%、-12.44%和-29.52%。

实施退耕还林将减少径流量,并且随着耕地转换

为林地面积的增加,径流减少量不断增大,如情景7极端退耕还林情况(耕地转换率为20.44%),径流变化率最为剧烈,高程分区的结果表明年径流变化率:情景3>情景2>情景1,3个高程分区情景的耕地转换林地面积比率分别为17.15%、12.63%、7.01%,而坡度分区的年径流变化率呈现:情景6>情景5>情景4,3个坡度分区情景的耕地转换林地面积比率分别为12.46%、7.20%、2.12%。

极端弃耕撂荒情景(情景8)1965-2015年多年平均径流深为100.35 mm,比基准情景增加6.54 mm,变化率为6.97%。极端火灾伐木情景(情景9)1965-2015年多年平均径流深为142.96 mm,比基准情景增加49.15 mm,变化率为52.39%。说明耕地转裸地和林地转裸地都将增加径流量,相比耕地转裸地的情况,林地变裸地,径流变化更为剧烈。因为,极端弃耕撂荒转换面积比例为20.44%,引起的径流变化率为6.97%,单位转换面积比例的径流变化率为0.34%,而极端火灾伐木转换面积比例为42.12%,径流变化率为52.39%,单位转换面积比例的径流变化率为1.24%,是前者的3.6倍。

将7种退耕还林情景(情景1~7)耕地转换后的森林覆盖率与径流变化量、径流量变化率的关系绘制成图,如图4所示。

图4显示,随着森林覆盖率的增加,径流量显著减少($p=0.004$),森林覆盖率每提高10%,径流量减少13.10 mm(图4(a));随着森林覆盖率的增加,径流量变化率减小,森林覆盖率每提高10%,径流量变化率减小13.97%,即随着森林覆盖率的提高,径流量减少更为剧烈(图4(b))。

3.3 季节径流响应

图5为拒马河流域季节径流量对不同土地利用变化的响应程度,即9种不同土地利用变化情景1965-2015年四季径流深平均值相对基准情景季节径流多年平均值的變化率(以3-5月,6-8月,9-11月和12-翌年2月划分春、夏、秋、冬四季)。

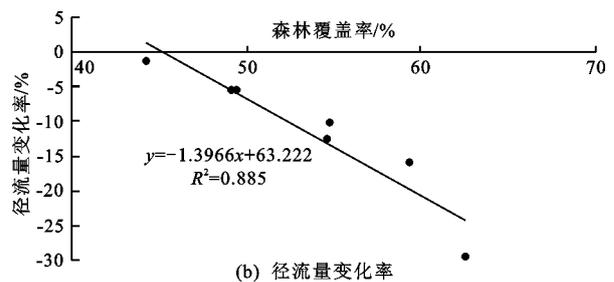
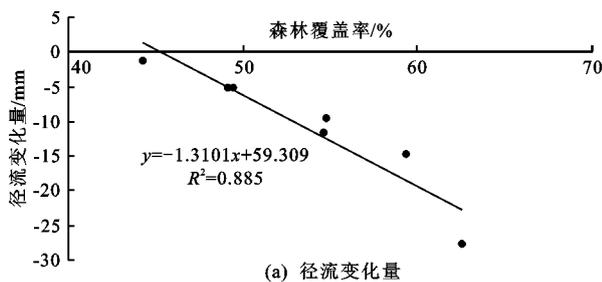


图4 拒马河流域森林覆盖率对径流量的影响

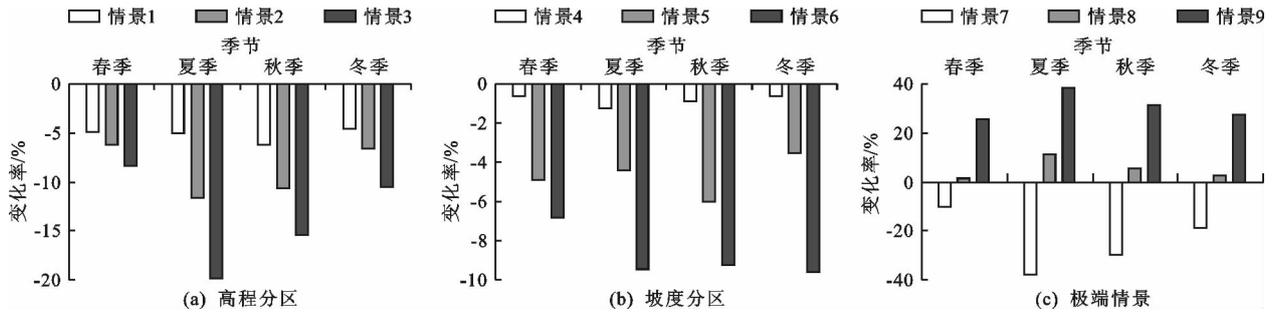


图 5 拒马河流域季节径流量对不同土地利用变化的响应程度

由图 5 可以看出,退耕还林各情景(情景 1~7)均减少了季节径流量,弃耕撂荒和火灾伐木情景将增大径流量。不同季节的径流量对土地利用变化的响应呈现出一定的差异,具体表现为夏季径流量响应程度最高,其次是秋季和冬季,而春季响应程度最低。

3.4 月径流响应

图 6 为拒马河流域月径流量对不同土地利用变化的响应程度,即 9 种不同土地利用变化情景 1965-2015 年 1-12 月径流深平均值相对基准情景各月径流量多年平均值的变化率。

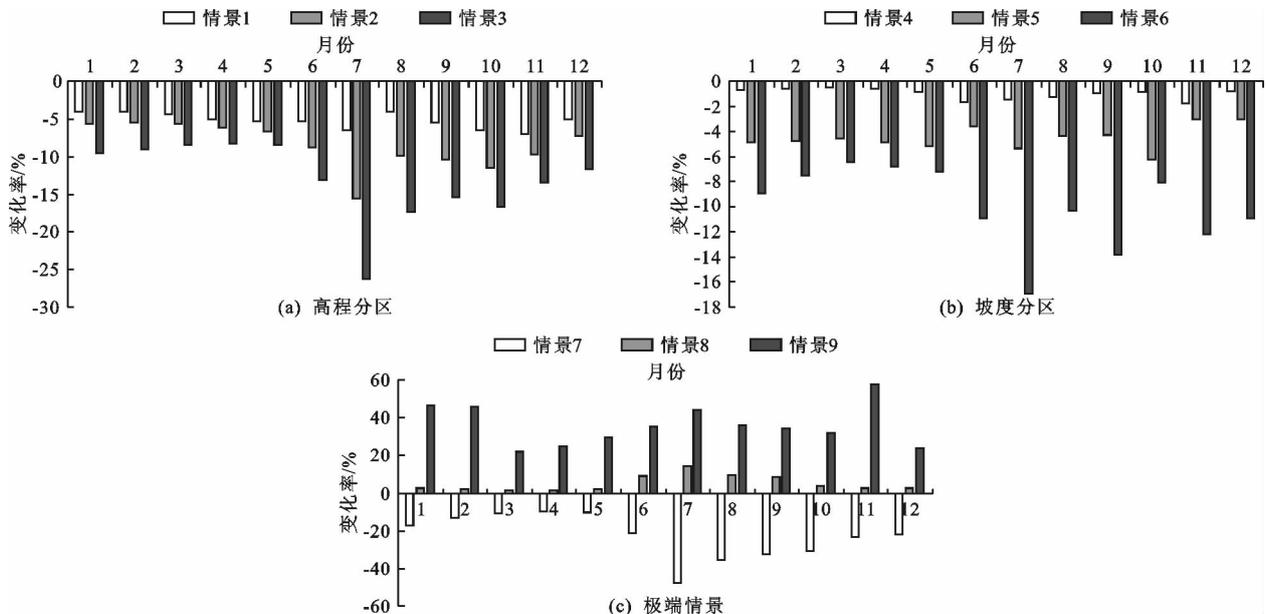


图 6 拒马河流域月径流量对不同土地利用变化的响应程度

由图 6 可以看出,退耕还林情景(情景 1~7)减少了月径流量,弃耕撂荒和火灾伐木情景将增大径流量。不同月份的径流量对土地利用变化的响应程度具有一定差异,具体表现为 6-9 月径流量响应程度较高,尤其是 7 月份最高,而 3 和 4 月较低。

4 讨 论

拒马河流域年、季、月径流量对土地利用变化的响应结果表明,退耕还林将减少径流量,弃耕撂荒和火灾伐木将使径流量增大,该结果与前人研究结果一致^[20-22]。退耕还林情景四季径流量响应程度表现为夏季>秋季>冬季>春季,这主要是夏季降水较多,空气湿度大,气温高,土壤水分充足,植被长势较好,故林地蒸散发比耕地大;此外,林地相比耕地

的叶面积指数也更高,拥有更深的根系层,能够吸收更多的土壤水分以供蒸散发,因而耕地转林地后径流量减少;秋季降水、气温、空气湿度等仅次于夏季,而且该时期植被相对较好,因此蒸散发较大,径流量较少;冬季气温低于 0℃,区域降水以降雪形式发生,该时期耕地基本处于休耕状态,而林地特别是常绿林种仍具降水截留作用,降落至地面的雨雪由于林地土壤比耕地通透性更强而入渗更多,从而使得径流量更少;春季气温回升,径流大多来源于冰雪融化和部分土壤水,该部分水在林地和耕地中的差异不大,所以导致耕地转换为林地时,春季径流量变化率最小。弃耕撂荒和火灾伐木情景将增加径流量,这主要是耕地和林地转为裸地后,减少了降雨截留、蒸散发,并且裸地降水后易结皮,导致入渗减少,从

而增加了径流量。

总体来看,耕地转林地后,使得径流量减少,夏季减少最为剧烈,其中又以7月为甚,而春季变化率最小,这说明退耕还林有削弱洪峰流量、保水保土、改善生态环境的作用,而春季灌溉需水高峰时变化率较小,不致因径流减少过多而严重影响耕作。弃耕撂荒和火灾伐木将增加径流量,尤其夏季,这也意味着将增加水土流失和洪峰的风险。尽管退耕还林将削弱洪峰流量、保水保土、改善生态环境,但也将减少径流量,这不利于下游地区的水资源利用。如何既削弱洪峰流量、保水保土、改善生态环境,同时也满足供水要求,实现利弊的平衡,应依据面积和空间位置等确定适宜的森林覆盖率,同时采取有效的森林管理,如减少树木种植密度,选择种植节水树种等,同时也要高度防范森林火灾和森林砍伐。

5 结论

本研究以拒马河流域为研究区,基于 WEP-L 模型和情景设置分析了年、季、月多时间尺度的径流量对土地利用变化的响应。结果表明:

(1) WEP-L 模型在拒马河流域适用性较好,可用模型模拟流域径流。

(2) 退耕还林将减少径流量,并随着森林覆盖率的增加,径流量减少更为剧烈,森林覆盖率每提高10%,径流量将减少13.10 mm。弃耕撂荒和火灾伐木将使径流量增大。

(3) 退耕还林、弃耕撂荒和火灾伐木情景的季节径流量响应程度呈现夏季>秋季>冬季>春季。月径流量响应结果表现为6-9月变化较大,尤其是7月份最为剧烈,而3和4月较低。

参考文献:

- [1] 邱国玉,尹婧,熊育久,等.北方干旱化和土地利用变化对径河流域径流的影响[J].自然资源学报,2008,23(2):211-218.
- [2] 王未,张永勇.黄河流域径流情势区域变化特征分析[J].水资源与水工程学报,2020,31(3):59-65.
- [3] 郝振纯,苏振宽.土地利用变化对海河流域典型区域的径流影响[J].水科学进展,2015,26(4):491-499.
- [4] 赵阳,余新晓,郑江坤,等.气候和土地利用变化对潮白河流域径流变化的定量影响[J].农业工程学报,2012,28(22):252-260.
- [5] 王少丽,臧敏,王亚娟,等.降水和下垫面对流域径流量影响的定量研究[J].水资源与水工程学报,2019,30(6):1-5.
- [6] 聂超,倪福全,邓玉,等.岷沱江流域径流对气候和土地利用变化的响应[J].水资源与水工程学报,2020,31(3):110-118.
- [7] 郭军庭,张志强,王盛萍,等.应用 SWAT 模型研究潮河流域土地利用和气候变化对径流的影响[J].生态学报,2014,34(6):1559-1567.
- [8] 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.
- [9] YACHONGTOU B,梁婕,曾光明,等.基于 SWAT 模型的浏阳河流域径流对土地利用和气候变化的协同响应[J].水资源与水工程学报,2019,30(2):88-94.
- [10] GHAFARI G, KEESSTRA S, GHODOUSI J, et al. SWAT-simulated hydrological impact of land-use change in the Zanjanrood basin, Northwest Iran[J]. Hydrological Processes, 2010, 24(7): 892-903.
- [11] 徐静,华健,闫中月.土地覆被变化对河源区小流域径流模拟影响分析研究[J].南京大学学报(自然科学),2016,52(1):142-148.
- [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] LI Shengfa, LI Xiubin. Global understanding of farmland abandonment: A review and prospects[J]. Journal of Geographical Sciences, 2017, 27(9): 1123-1150.
- [14] 周艳春,张永强,许士国.森林火灾对典型小流域径流影响模拟[J].水科学进展,2013,24(2):190-196.
- [15] TIAN Fei, LÜ Yihe, FU Bojie, et al. Effects of ecological engineering on water balance under two different vegetation scenarios in the Qilian Mountain, northwestern China[J]. Journal of Hydrology: Regional Studies, 2016, 5: 324-335.
- [16] 徐飞,贾仰文,牛存稳,等.五台山清水河流域植被垂直带水循环过程研究[J].水利学报,2019,50(9):1155-1164.
- [17] 贾仰文,王浩,倪广恒,等.分布式流域水文模型原理与实践[M].北京:中国水利水电出版社,2005.
- [18] 翟春玲,余钟波,杨传国,等.极端土地覆被情景下的水文响应模拟[J].中山大学学报(自然科学版),2011,50(4):127-133.
- [19] XU Xiangyu, YANG Dawen, YANG Hanbo, et al. Attribution analysis based on the Budyko hypothesis for detecting the dominant cause of runoff decline in Haihe basin[J]. Journal of Hydrology, 2014, 510: 530-540.
- [20] 王博威,李建柱,冯平.土地利用变化对潘家口水库控制流域径流影响[J].水利学报,2018,49(3):379-386.
- [21] 祖拜代·木依布拉,师庆东,普拉提·莫合塔尔,等.基于 SWAT 模型的乌鲁木齐河上游土地利用和气候变化对径流的影响[J].生态学报,2018,38(14):5149-5157.
- [22] NOLAN R H, LANE P N, BENYON R G, et al. Trends in evapotranspiration and streamflow following wildfire in resprouting eucalypt forests[J]. Journal of Hydrology, 2015, 524: 614-624.