

抚河流域径流对土地利用变化时空响应

傅春¹ 毛安琪²¹

(1. 南昌大学 管理学院, 江西 南昌 330031;

2. 南昌大学 建筑工程学院, 江西 南昌 330031)

【摘要】: 为了揭示近十几年抚河流域径流对土地利用变化时空响应过程, 通过 2003、2010 和 2017 年三期遥感影像图进行监督分类得到土地利用图, 基于 SWAT 模型, 定量分析和研究土地利用变化对径流的影响。结果表明: (1) 2003~2010 年和 2010~2017 年土地利用变化规律一致, 林地和城镇用地面积不断增加, 其余类型则呈现减少的趋势; (2) SWAT 模型在抚河流域径流模拟中适用性好, 李家渡水文站率定期和验证期结果 R^2 和 E_{ns} 均大于 0.85, 沙子岭水文站除了验证期 E_{ns} 为 0.77 外, R^2 和 E_{ns} 均大于 0.80, 两处站点相对误差 $|Re|$ 均小于 20%; (3) 在气象数据同为 2010~2016 年及其他阈值设置相同的条件下, 仅改变输入的土地利用图, 发现林地面积的增加, 耕地和草地面积的减小导致了 2010 年比 2003 年的多年平均月径流量降低 $0.65\text{m}^3/\text{s}$, 2017 年的多年平均月径流量较 2010 年相比降低 $0.41\text{m}^3/\text{s}$, 后段时期的差异与前者相比较小与林地的增长减缓和城镇用地快速增长有关; (4) 在第一阶段 2003~2010 年和第二阶段 2010~2017 年, 流域内大部分地区径流系数都处于降低状态, 林地和草地面积的增加对径流系数有降低的效果, 而径流系数升高一般是因为耕地、城镇用地面积增加或者林地面积减少导致的。

【关键词】: 土地利用 SWAT 模型 抚河流域 径流

【中图分类号】: F33 **【文献标识码】:** A **【文章编号】:** 1004-8227(2021)02-0342-09

径流是地貌形成的外营力之一, 参与地壳运动、土壤发育、动植物生长和湖泊形成等多种自然运动中。径流量与工农业和环境的变化发展存在着紧密的联系, 对径流产生影响因素的主要是气候、流域下垫面和人类活动^[1~3], 随着社会经济不断的发展, 人类活动愈加频繁, 而人类活动会对气候和下垫面造成重大的变化^[4,5]。

近几十年来国内外学者在土地利用对径流影响的研究领域中取得了十分丰富的研究成果, Tesfa^[6]对 Beressa 流域进行土地利用分析表明, 1984~2015 年间, 农业和住区面积增加, 而未利用地、牧场和森林面积减少, 这使得径流量得到了显著增加; Thanh^[7]以越南西北部大河流域为研究对象, 结果表明, 植被状况对径流有重要影响, 1995~2005 年, 森林大面积向农田和城市转变极大促进了年均径流量的增加, 2005~2015 年森林扩张和土壤保护措施的应用, 导致年均径流量减少。在我国 20 世纪 80 年代, 由于大规模的植树造林的活动, 使得诸多流域出现了径流量下降的情况发生, 归结原因, 林地面积的增加使得径流减小^[8], 陈昌春等^[9]对赣江为研究区域, 在同等气候条件下, 输入 1990 年和 2000 年土地利用图, 得出建设用地的增加和林地的减少导致一定程度上径流增加的结论; 徐苏等^[10]分析了长江流域 1980~2005 年期间土地利用的时空演变及其引起的径流系数的变化, 研究发现, 由于长江流域下游城镇用地的不断扩张, 导致了径流系数增幅达到 25%; 曹隽隽等^[11]对江汉平原 2010 和 1980 年土地利用情景相比, 长江和汉江径流均有所增加, 人类活动尤其是土地利用变化对径流的影响力正逐步加强; 王磊等^[12]在张家口清水河流域设置 5 种土地利用情景模式, 排除干扰因素仅针对某种土地利用类型研究发现, 林地和草地面积与径流量负相关, 而耕

作者简介: 傅春(1966~), 女, 教授, 主要研究方向为水资源的持续利用与管理. E-mail:ccfu@cu.edu.cn

基金项目: 国家社科基金年度项目(18BGL187); 江西省自然科学基金(20181BAB206046)

地面积与径流量正相关。

目前针对土地利用变化与径流的研究可分为两类，一类是通过设置土地利用情景，比较单一土地利用类型的对径流量的影响，但是缺乏实际土地利用演变对径流影响的探讨；另一类通过研究区域不同时期的土地利用图，来研究土地利用的演变与径流之间的关联，但大部分都受限于土地利用图精度不高，与实际情况有所偏差。本次研究选取抚河流域为研究区域，利用 ENVI5.1 软件对 2003、2010 和 2017 年分辨率为 30m 的遥感影像进行监督分类和后期处理，可以精确得到 3 个时期各种地类的面积，分析近十几年来实际土地利用演变对径流影响，随着经济的发展，该地区土地利用状况发生了较大变化，由于抚河流域在土地利用变化对径流影响的研究资料上十分匮乏，因此本文以土地利用变化的视角对径流量影响加以模拟分析，以期对未来抚河流域的土地规划和水资源的管理利用提供参考依据。

1 研究区域概况

抚河，位于江西省东部，是鄱阳湖水系五河流之一，依据资料记载，抚河河源地点为广昌县驿前镇姚西村， $116^{\circ}14'32.0''\text{E}$, $26^{\circ}33'02.0''\text{N}$, 河源点高程 751.9m。李家渡水文站以上控制流域面积为 15652.2km^2 ，其中流域范围绝大部分集中在抚州市，具体涉及抚州市所有的 11 个县(区)以及南昌市进贤县的小部分(图 1)。

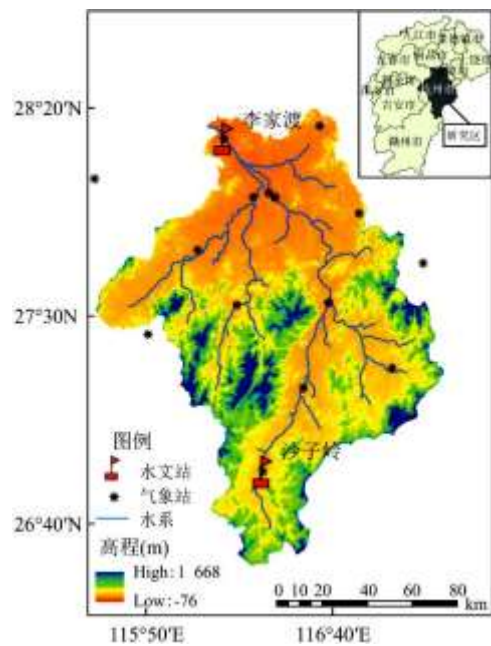


图 1 抚河流域各类站点位置图

流域属中亚热带湿润季风气候区，冬夏长、春秋短，无霜期 274d。多年平均气温 17.8°C 相对湿度 79.2%。多年平均年降水量 1732mm，4~9 月降水量占全年的 67%；降水时空分配不均，东南部降水量多于西北部。

2 数据与研究方法

2.1 土地利用图的制备

根据数据的获取难易程度和研究需求，本次研究选取抚河流域 2003、2010 及 2017 年的遥感影像进行解译，以期达到准确

掌握流域内土地利用变化规律性的目的^[13,14]。本文下载的遥感影像来自于地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn>)通过该网站下载了三期一共 11 幅 30m 网格的遥感影像图, 分别是 2003 年 7 月 30 日的四幅 Landsat7ETM+影像; 2010 年 11 月 06 日的四幅 Landsat7ETM+影像; 2017 年 11 月 01 日三幅的 Landsat8OLI_TIRS 影像, 最好选取 7~11 月气象条件较好的白天。抚河流域遥感图详细信息见表 1。

表 1 抚河流域遥感影像图信息

序号	日期	轨道号	卫星名称	传感器	平均云量
1	2003-07-30	120-41	LANDSAT7	ETM+	1.49
2	2010-11-06	120-41	LANDSAT7	ETM+	0.33
3	2017-11-01	120-41	LANDSAT8	OLI_TIRS	0.04

所获得遥感影像通过 ENVI5.1 软件经过条带去除、辐射定标、大气校正、图像增强和图像融合、剪裁等过程, 根据前人学者的研究, 本次采用最大似然法进行监督分类^[15~17], 将土地利用分为耕地、林地、草地、水域、城镇用地和未利用地 6 种类型, 进行样本选取时, 林地、耕地和草地易混淆, 本次研究使用标准假彩色, 林地一般为暗红色, 起伏较大, 有明显的山脊线, 纹理粗糙, 形状不规则; 耕地一般分布在平原地区, 附近有居民点, 相对集中, 几何特征明显, 通常为规则的长条形和带状, 水浇地呈淡粉色, 旱地淡蓝青色; 草地一般为斑状或者条带状, 形状不规则, 纹理较细, 分布在山地边, 颜色通常粉红色或者红色, 同时结合 NDVI 植被指数图和 Google Earth 进行对比分析, 最后通过 ENVI5.1 提供的混淆矩阵功能对分类精度进行验证, 两次精度分类中总体分类精度 Overall Accuracy 82.6%以上; Kappa 系数 0.81, 精度验证结果相对理想^[18,19]。最终得到了 2003、2010 和 2017 年的土地利用分类图, 见图 2。

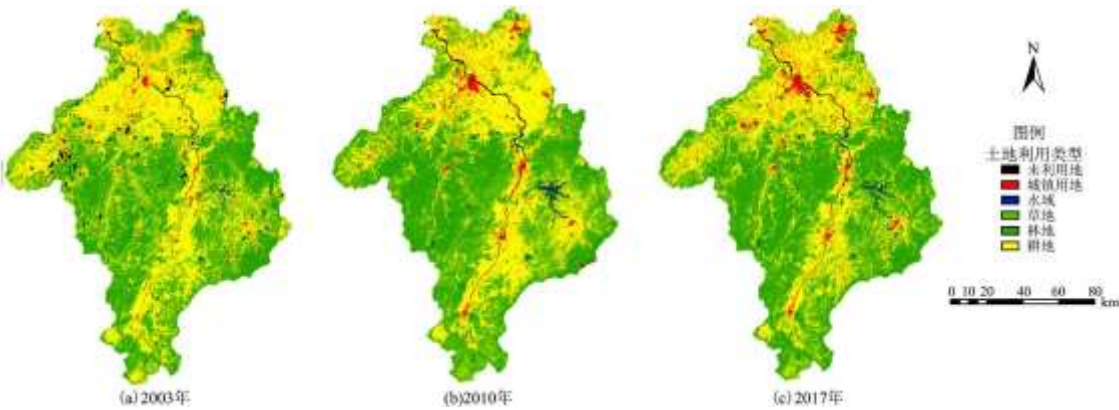


图 2 抚河流域 2003、2010 和 2017 年土地利用类型图

2.2 SWAT 模型的构建

为了达到本次研究目的, SWAT 模型需要的地理空间数据有: 数字高程模型-DEM、土地利用图、土壤图和其他空间数据, 其他空间数据是为了确定流域出、入口位置, 流域内水文、泥沙等水文站的空间位置, 为了准确模拟还需要流域水系图、气象站以及站点的空间位置。除此之外, 模型还需要构建非空间属性的数据库, 模型使用了 7 个数据库来存储有关气象信息、农药信息、土地利用、土壤数据库、植被生长、肥料信息、耕作^[20]。

将数字高程 DEM 输入 SWAT 模型, 将子流域划分阈值设定为 18000, 一共划分为 47 个子流域, 构建气象、土壤数据库, 由于子流域内土地利用类型、土壤类型和坡度的分类繁多, 从计算的效率和目的来考虑, 分别对土地利用、土壤和坡度进行阈值的设定为 0%、20%和 10%^[21, 22], 写入各项数据即可模型运行。所需的数据具体来源以及基本信息如表 2 所示。

表 2 数据来源及基本信息

数据名称	数据来源	基本信息
数字高程模型	地理空间数据云	GDEMDEM 30m 分辨率
土地利用图	地理空间数据云	Landsat8 OIL、Landsat7 EMT+
土壤类型图	HWSO 中国区土壤	-
气象数据	中国气象数据网	2010~2016 年逐日数据
径流	江西省水文局	2012~2016 年逐月数据

3 结果与分析

3.1 抚河流域土地利用变化

利用 ENVI5.1 对各时期的土地利用面积统计分析得表 3, 从表 3 得知, 耕地和林地是抚河流域最主要的用地类型, 2003、2010 和 2017 年分别占流域总面积的 84.1%、87.0%和 89.0%。从各地类的变化情况来看, 首先, 耕地、草地、水域、未利用地面积呈不断下降的趋势, 其中耕地面积减少的幅度最大, 从 2003~2010 年减少了 288.84km², 从 2010~2017 年又减少了 328.67km², 年减少率约-0.78%;其后面积减少幅度较大的是草地, 2003~2010 年间减少了 393.16km², 2010~2017 年间减少了 377.17km², 年减少率约-4.55%;其后未利用地面积的减幅较小, 2003~2010 年间减少了 95.90km², 从 2010~2017 年则减少了 50.43km², 一共减少了 146.33km², 年减少率约-8.14%;最后面积减幅最小的是水体, 从 2003 年到 2017 年一共减少了 13.10km², 年减少率约-0.38%。反之林地和城镇用地的面积一直处于增加的状态, 林地从 2003 年的 5955.14km² 到 2017 年增至 8553.38km², 平均每年增加 671.825km², 年增加率约为 1.23%;城镇用地的面积同样从 2003 年 418.83km² 到 2017 年 622.44km², 平均每年增加 13.57km², 年增长率约为 2.87%。

表 3 抚河流域 2003~2017 年土地利用变化面积统计

土地类型	2003 年面积 (km ²)	2010 年面积 (km ²)	2017 年面积 (km ²)	2003~2010 年 变化量(km ²)	2010~2017 年 变化量(km ²)	2003~2017 年 变化量(km ²)
未利用地	210.40	114.50	64.07	-95.90	-50.43	-146.33
城镇用地	418.83	476.10	622.44	57.27	146.34	203.61
水域	249.74	243.77	236.64	-5.97	-7.13	-13.10
草地	1608.36	1215.20	838.04	-393.16	-377.17	-770.32
林地	7209.74	7936.32	8553.38	726.59	617.06	1343.65

耕地	5955.14	5666.30	5337.62	-288.84	-328.67	-617.52
----	---------	---------	---------	---------	---------	---------

总体情况来看,在耕地、草地、水域和未利用地这四种用地面积减少的地类中,耕地面积减少幅度最大,一共减少了 617.52km²;而未利用地则是面积减少率最大,达到-8.14%。反观面积增加的林地和城镇用地,城镇用地的增加率最高,为 2.87%。耕地、草地的减少和林地的增加绝大部分的原因是由于地方政府不断加强巩固退耕还林政策,使得抚河流域在 2018 年的森林覆盖率达到 66.14%。而城镇用地面积的不断攀升则是由于经济不断发展的原因,抚河流域的城镇化率目前是 49.81%,已经连续三年超过了江西省平均水平^[23]。

3.2 SWAT 模型的率定与验证

SWAT 模型模拟的结果和真实数据不可避免会产生偏差,为了提高模型的适用性,在对模型进行率定和验证工作之前,首先对 SWAT 模型参数敏感性分析^[24~26],主要使用 SWAT-CUP 来实现,敏感性分析结果敏感参数从大到小分别是:CN2、ALPHA_BNK、CH_N2、CANMX、CH_K2、GW_DELAY、ESCO。

本次研究采用了流域内两个水文站,分别是上游的沙子岭水文站和流域总出口断面李家渡水文站作为模型适用性评价水文站点,率定顺序遵循先上游后下游,模型以 2010~2011 年为预热期,2012~2014 年率定期,最后 2015~2016 作为验证期,本次选取了 3 个评价指标对模型进行适用性判定,分别是相对误差 Re、决定系数 R² 和 E_{NS} 系数,其公式如下:

$$Re = \frac{\sum_{i=1}^n (Q_p - Q_0)}{\sum_{i=1}^n (Q_0)} \times 100\% \quad (1)$$

$$R^2 = \frac{[\sum_{i=1}^n (Q_0 - \overline{Q_0})(Q_p - \overline{Q_p})]^2}{\sum_{i=1}^n (Q_0 - \overline{Q_0})^2 \sum_{i=1}^n (Q_p - \overline{Q_p})^2} \quad (2)$$

式中:Q_p为模拟值;Q₀为实测值;Q_p为多年平均模拟值;Q₀为多年平均实测值,n表示实测数据的个数。Re说明模拟值与实测值的相对误差,若Re值为正值,说明模型模拟值偏大,反之说明模型模拟值偏小,若Re=0,说明模拟结果与实测值相吻合;R²用来进一步用于实测值与模拟值之间的吻合程度,R²越接近1,吻合程度越高;E_{NS}越接近1表示模拟状态最好,若E_{NS}为负值,则说明模型平均模拟值比直接使用实测平均值可信度低。一般认为模型相对误差|Re|<20%,决定系数R²>0.6,且E_{NS}>0.5表示模型适用于该流域^[27,28]。

率定期间根据敏感性参数分析结果使用 SWAT-CUP 每次 500 次进行迭代,直到获取满意结果,将参数带回 SWAT 模型中。图 3 和图 4 分别为李家渡水文站和沙子岭水文站率定期、验证期的模拟结果,表 4 是率定期和验证期的具体模拟评价结果,李家渡水文站率定期和验证期结果 R² 和 E_{NS} 分别是 0.92、0.87 和 0.88、0.94,沙子岭水文站率定期和验证期结果 R² 和 E_{NS} 分别是 0.90、0.94 和 0.80、0.77,两处水文站率定期和验证期的相对误差|Re|均小于 20%,具体各水文站评价结果见表 4。李家渡水文站模拟结果比沙子岭水文站模拟结果更好,总体来说模拟结果数值均较高,达到了模型评价最低要求,表明该模型在抚河流域适用性较好。

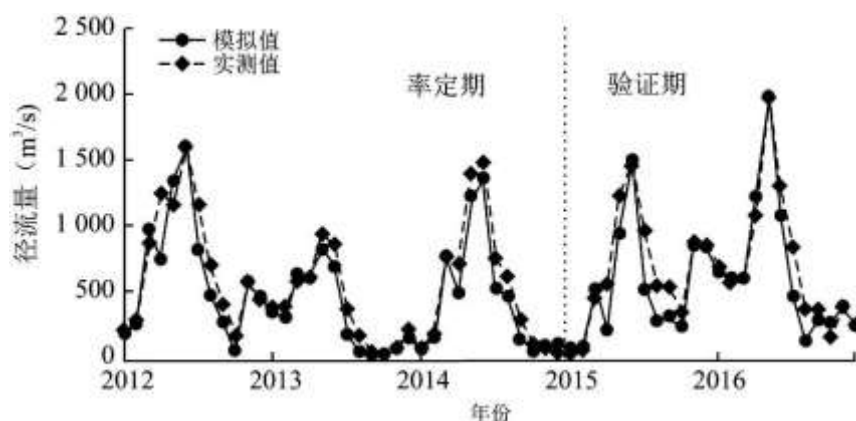


图3 李家渡水文站率定期和验证期月径流模拟结果

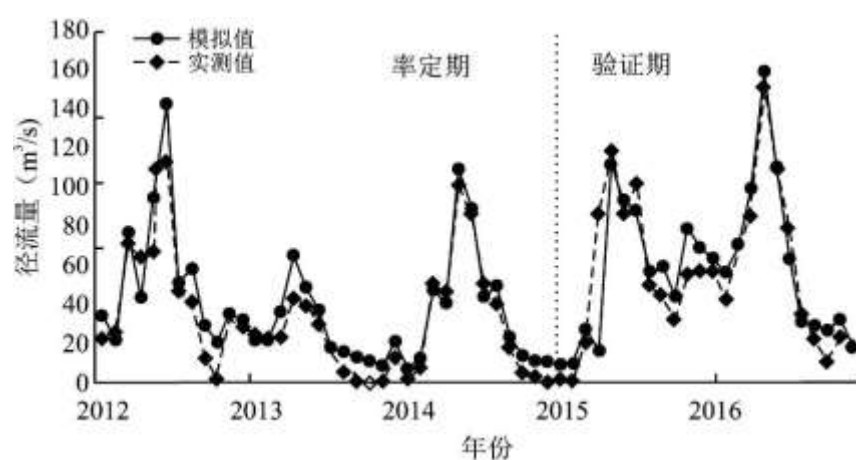


图4 沙子岭水文站率定期和验证期月径流模拟结果

表4 各水文站月径流模拟结果评价表

水文站名称	模拟时期	Re	R ²	E _{NS}
李家渡	2012~2014 年(率定期)	16.41%	0.92	0.87
	2015~2016 年(验证期)	15.13%	0.88	0.94
沙子岭	2012~2014 年(率定期)	-17.67%	0.90	0.94
	2015~2016 年(验证期)	-4.49%	0.80	0.77

3.3 土地利用变化对径流时间尺度响应

为了分析土地利用变化对径流的响应,需要对径流进行模拟,首先将 2017 年的土地利用图载入 SWAT 模型中进行率定和验证,然后再次输入 2003、2010 和 2017 年的土地利用图,同时保持输入其他气象等输入数据和阈值设置不变,剔除模型计算误差影响,得到不同时期多年平均各月径流量(图 5)。

从时间尺度来分析,通过图 5 可以得知,年内降雨量的变化与径流量的波动有着明显的正相关,三期土地利用情景下月径流量变化情况一致,均呈现先升后降的趋势,其中 3~8 月的径流量较大,占全年径流量的 75%左右,其余月份径流量相对较小,5 月达到月径流量的最大值,随后月份径流量逐渐减弱,10 月处于月径流量的最小值,11 月又开始有所回升。

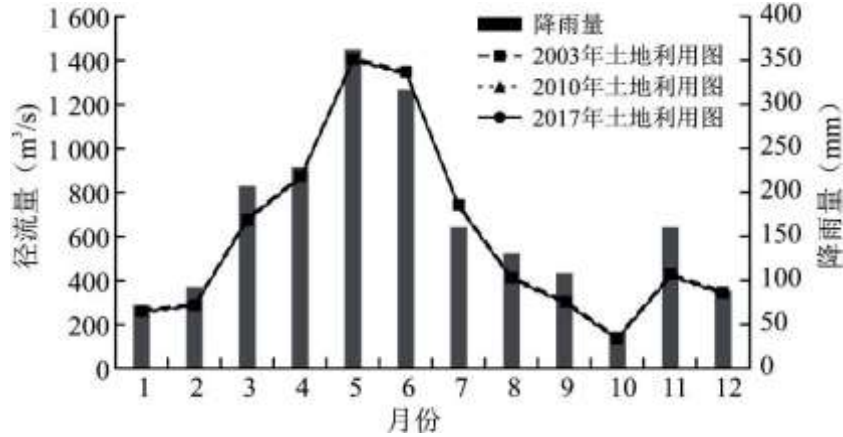


图 5 三期土地利用情景下月径流模拟结果

在模拟年分内,抚河流域多年平均月径流量在 $600.92\text{m}^3/\text{s}$ 上下,2010 情景年比 2003 情景年的多年平均月径流量降低 $0.65\text{m}^3/\text{s}$,2017 情景年的多年平均月径流量较 2010 情景年相比降低 $0.41\text{m}^3/\text{s}$,这说明土地利用的变化与径流是相关联的,其中耕地、林地和草地面积占流域总面积 90%以上,根据土地利用变化情况,由于林地面积的增加,耕地和草地面积的减小导致了月径流量的减小,而 2010~2017 年较 2003~2010 年的多年平均月径流量差异减小,是因为后一段时期林地的增长减缓和城镇用地快速增长有关。

3.4 土地利用变化对径流空间尺度响应

基于 SWAT 的模拟结果,用多年平均径流系数来分析抚河流域空间尺度下径流特点,径流系数公式如下。

$$\alpha = \frac{R}{P} \quad (4)$$

式中: α 表示径流系数; R 表示流域多年径流深, mm; P 表示流域多年平均降雨量, mm。

径流系数受多种因素影响,综合反映了降雨量与径流量之间的关系比例,径流系数越大,则表示降雨不易被土壤吸收^[29],城市地区径流系数最高可达到 0.8 以上,城区一般很容易发生内涝。抚河流域平均径流系数在 0.61 左右,从图 6 可知,抚河下游地区的 1、7、8 和 13 号子流域东南部的 24、27、30、31 和 35 号子流域径流系数较高在 0.666 以上,其中 1 号子流域的径流系数甚至达到 0.75,抚河下游是由于径流量较大导致径流系数偏高,而流域东南部的南城县的洪门水库也会使得该地区径流系数偏高。

图 7 显示了两个时间段流域空间上径流系数的变化幅度,土地利用的变化导致了径流系数的变化,在第一阶段 2003~2010 年,抚河流域大部分地区的径流系数处于减少的状态,降幅在 0.00%~2.00%,所有子流域中 17 号子流域的降幅最为明显,达到了 1.90%,流域北部的 2、4 和 5 号子流域径流系数增幅较多,在 0.41%~1.00%之间;第二阶段 2010~2017 年,径流系数变大的地区较上一阶段开始增多,多集中在抚河的西边,增幅一般在 0.00%~0.72%范围内,其中 10、12 和 20 号子流域的增幅最大,

反之 9 号子流域降幅在此阶段最大，达到 0.85%，降幅在 0.86%~0.00%之间，总体来看，第二阶段无论是增幅还是降幅都比第一阶段幅度小。

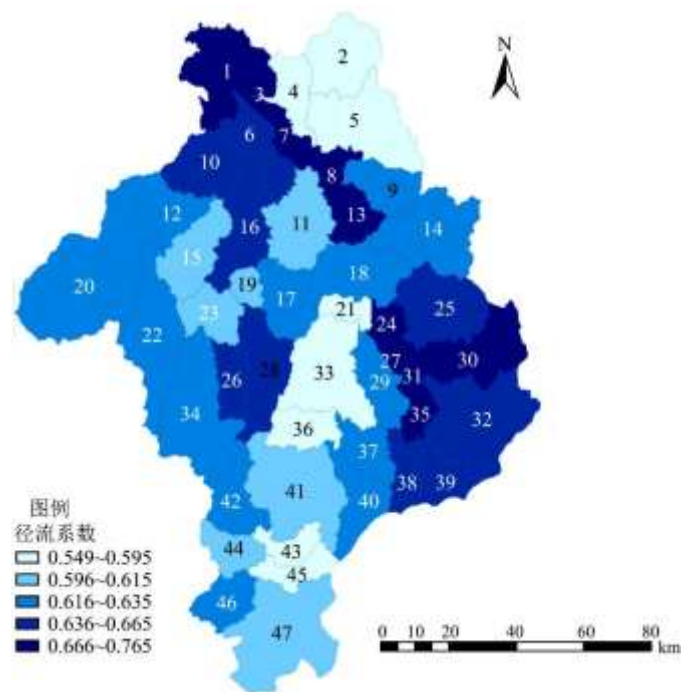


图 6 抚河流域平均径流系数

以第一阶段径流系数降幅最大的 17 号子流域、第二阶段增幅最大的 12 号子流域和径流系数先增后降的 2 号子流域进行土地利用变化分析，未利用地和水域由于占比很小可忽略，径流系数升高一般是因为耕地、城镇用地面积增加或者林地面积减少导致的，而林地和草地面积的增加对径流系数有降低的效果。林地可以起到保水、蓄水的作用，城镇用地不透水地面使得地表会快速形成径流，综合来看，林地、草地可以起到保水、蓄水的作用；城镇用地不透水地面难以吸收降雨，使得地表会快速形成径流；耕地会导致土壤结构受到破坏，土壤渗水量增加，径流量也相应增加。

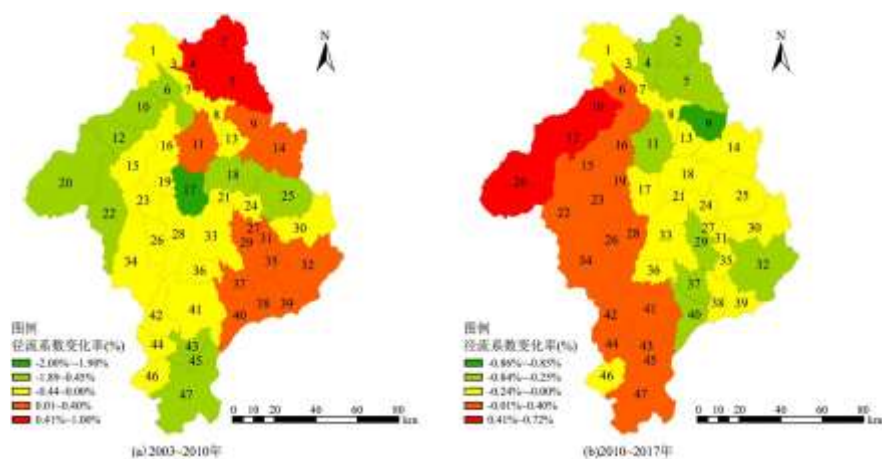


图 7 2003~2017 年径流系数变幅图

4 讨论与结论

4.1 讨论

实验结果表明,李家渡和沙子岭水文站两处率定结果都比较好,其中李家渡水文站率定期和验证期结果 R^2 和 E_{NS} 均在 0.85 以上,此次建构的 SWAT 模型在抚河流域有良好的适用性。由于模型输入参数众多,可以改变其中的输入数据比如气候、土地利用等方面的专项性详细分析,因此,研究土地利用变化对径流产生的影响需要更精确的土地利用栅格图达到目的,本文以 Landsat7 ETM+和 Landsat8 OLI_TIRS 遥感影像进行遥感解译,可以得到 30m 的栅格数据图,较以往 1km 栅格数据更为精准。2003~2010 年与 2010~2017 年六类土地利用类型变化较为稳定,由于“退耕还林”和环境保护意识的加强,使得林地面积在不断上升,而随着经济的高速发展,特别在 2010~2017 年这一时期,城镇用地得到了快速的扩张。

土地利用的变化使得在 2003~2017 年间,径流量一直处于降低的状态,从径流的空间响应结果分析,林地、草地由于有保水蓄水的作用,对径流量有降低的作用,径流系数也随之降低,而耕地和城镇用地的增加使径流量增多,导致径流系数增大,本次土地利用变化对径流的影响实验结果与王磊^[12]、郝振纯^[30]等一致,强降雨可能会导致径流系数偏高的地区发生洪涝灾害,需注意防范^[10]。

4.2 结论

(1)根据遥感解译结果,2003~2010 年和 2010~2017 年土地利用变化一致,综合情况来看,林地和城镇用地面积不断增加,其余类型则呈现减少的趋势,其中未利用地减少得最快,为-69.55%,增长率最快的是城镇用地,达到了 48.61%。

(2)SWAT 模型在抚河流域径流模拟中适用性好,李家渡水文站率定期和验证期结果 R^2 和 E_{NS} 均大于 0.85,沙子岭水文站除了验证期 ENS 为 0.77 外, R^2 和 E_{NS} 均大于 0.80,两处站点相对误差 $|Re|$ 均小于 20%。

(3)在气象数据同为 2010~2016 年及其他阈值设置相同的条件下,仅改变输入的土地利用图,林地面积的增加,耕地和草地面积的减小导致了 2010 情景年比 2003 情景年的多年平均月径流量降低 $0.65\text{m}^3/\text{s}$,2017 情景年的多年平均月径流量较 2010 情景年相比降低 $0.41\text{m}^3/\text{s}$,后段时期的差异较前者小与林地的增长减缓和城镇用地快速增长有关。

(4)第一阶段 2003~2010 年和第二阶段 2010~2017 年,流域内大部分地区径流系数都处于降低状态,林地和草地面积的增加对径流系数有降低的效果,而径流系数升高一般是因为耕地、城镇用地面积增加或者林地面积减少导致的。

参考文献:

[1]WANG Y J,LIU Z H,YAO J Q,et al.Effect of climate and land use change in Ebinur Lake Basin during the past five decades on hydrology and water resources[J].Water Resources,2017,44(2).

[2]郑思远,王飞儿,俞洁,等.水文响应单元划分对 SWAT 模型总氮模拟效果的影响[J].农业环境科学学报,2019,38(6):1305-1311.

[3]刘春蓁,占车生,夏军,等.关于气候变化与人类活动对径流影响研究的评述[J].水利学报,2014,45(4):379-385,93.

[4]王彦君,王随继,苏腾.降水和人类活动对松花江径流量变化的贡献率[J].自然资源学报,2015,30(2):304-314.

-
- [5]张利平,李凌程,夏军,等.气候波动和人类活动对滦河流域径流变化的定量影响分析[J].自然资源学报,2015,30(4):664-672.
- [6]TESFA W O,DEEPAK K,S K TRIPATHI.Modeling runoff-sediment response to land use/land cover changes using integrated GIS and SWAT model in the Beressa watershed[J].Environmental Earth Sciences,2017,76(16).
- [7]THANH S N,DUY B NG,PRASAD S R.Effect of land use change on runoff and sediment yield in Da River Basin of Hoa Binh Province,Northwest Vietnam[J].Journal of Mountain Science,2015,12(4).
- [8]刘闻.基于 SWAT 模型的水文模拟及径流响应分析[D].西北大学,2014.
- [9]陈昌春,张余庆,项瑛,等.土地利用变化对赣江流域径流的影响研究[J].自然资源学报,2014,29(10):1758-1769.
- [10]徐苏,张永勇,窦明,等.长江流域土地利用时空变化特征及其径流效应[J].地理科学进展,2017,36(4):426-436.
- [11]曹隽隽,周勇,吴宜进,等.江汉平原土地利用演变对区域径流量影响[J].长江流域资源与环境,2013,22(5):610-617.
- [12]王磊,刘亭亭,谢建治.基于 SWAT 模型的张家口清水河流域土地利用情景变化对径流影响研究[J].水土保持研究,2019,26(4):245-251.
- [13]朱会义,李秀彬.关于区域土地利用变化指数模型方法的讨论[J].地理学报,2003(5):643-650.
- [14]张春华,李修楠,吴孟泉等.基于 Landsat 8 OLI 数据与面向对象分类的昆崙山地区土地覆盖信息提取[J].地理科学,2018,38(11):1904-1913.
- [15]章恒,王世新,周艺等.多源遥感影像红树林信息提取方法比较[J].湿地科学,2015,13(2):145-152.
- [16]张馨元,陈菁,许静波,等.基于 ENVI 的大纵湖流域土地利用变化及其对水质影响研究[J].节水灌溉,2019(2):96-101,6.
- [17]汪滨,张志强.黄土高原典型流域退耕还林土地利用变化及其合理性评价[J].农业工程学报,2017,33(7):235-245,16.
- [18]信志红,王宁,李峰,等.基于 Landsat 的黄河口地区土地利用类型研究[J].中国农业资源与区划,2018,39(1):99-105.
- [19]黄勇梅,石荧原,冯桃辉,等.澎溪河流域土地利用对非点源污染时空分布影响[J].人民长江,2017,48(11):40-45.
- [20]赖格英,吴敦银,钟业喜,等.SWAT 模型的开发与应用进展[J].河海大学学报(自然科学版),2012,40(3):243-251.
- [21]胡连伍,王学军,罗定贵,等.不同子流域划分对流域径流、泥沙、营养物模拟的影响——丰乐河流域个例研究[J].水科学进展,2007(2):235-240.
- [22]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.

-
- [23]江西省统计局. 江西省统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2018:12-126.
- [24]杨军军, 高小红, 李其江, 等. 湟水流域 SWAT 模型构建及参数不确定性分析[J]. 水土保持研究, 2013, 20(1):82-88, 3.
- [25]樊琨, 马孝义, 李忠娟, 等. SWAT 模型参数校准方法对比研究[J]. 中国农村水利水电, 2015(4):77-81.
- [26]姜婧婧, 杜鹏飞. SWAT 模型流域划分方法在平原灌区的改进及应用[J/OL]. 清华大学学报(自然科学版):1-7 [2019-08-26]. <https://doi.org/10.16511/j.cnki.qhdxxb.2019.22.033>.
- [27]裴亮, 陈晨. 基于 SWAT 模型的细河流域土地利用/覆被变化对径流影响的研究[J]. 测绘与空间地理信息, 2017, 40(11):157-161, 64.
- [28]窦小东, 黄玮, 易琦, 等. LUCC 及气候变化对李仙江流域径流的影响[J]. 长江流域资源与环境, 2019, 28(6):1481-1490.
- [29]石扬旭, 张友静, 李鑫川, 等. 流域下垫面特征对多年平均径流系数的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2017, 45(12):138-147, 54.
- [30]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.