1995－2016 年三岔河上游土地利用变化对径流的影响

田仁伟，赵翠薇，贺中华，徐志荣

（贵州师范大学 地理与环境科学学院，贵州 贵阳 550025）

摘　要：[目的] 分析 1995—2016 年间黔中水利枢纽工程的水源区——三岔河上游流域降雨、径流以及土地利用变化情况，通过探讨土地利用变化对径流的影响，为预测未来流域水资源变化规律和黔中水利枢纽工程水资源的调配提供一定的参考依据。[方法] 采用常规线性回归和结果模拟来分析降雨和径流的关系，利用土地利用动态变化指标和转移矩阵研究土地利用变化对径流的影响。[结果] 20 a 来三岔河上游降雨和径流总体呈波动下降的趋势，其演变过程划分为两个阶段：1995—2010 年（第一阶段）降雨和径流呈持续下降趋势，2010—2016 年（第二阶段）降雨和径流总体呈波动下降趋势，但径流下降幅度较大。1995 年以来，流域土地利用结构变化比较明显。草地和林地面积增加 5.33％和 3.63％，耕地减少了 6.92％，耕地向草地、林地和建设用地的转换构成土地利用变化的主导过程。除降雨影响外，土地利用变化是造成径流持续减少的主要原因。2010—2016 年，草地和林地分别增加了 19.93％和 5.25％，耕地和未利用土地分别减少 13.93％和 87.97％，表明土地利用变化是造成径流大幅减少的主要原因。此外，黔中水利枢纽工程平寨水库的修建，在一定程度上对径流减少具有重要作用。[结论] 三岔河上游土地利用变化与径流的变化联系紧密，土地利用变化的结果使径流量减少。

关键词：三岔河上游；土地利用变化；径流变化；水源保护

文献标识码：A　　**文章编号**：1000-288X(2019)03-0012-07　　**中图分类号**：S715.3，U412.1^{+}4

文献参数：田仁伟，赵翠薇，贺中华，等. 1995—2016 年三岔河上游土地利用变化对径流的影响[J]. 水土保持通报，2019，39(3)：12-18. DOI：10.13961/j.cnki.stbctb.20190321.002；Tian Renwei，Zhao Cuiwei，He Zhonghua，et al. Impacts of land use changes on streamflow in upper reach of Sancha River basin during 1995—2016[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation，2019，39(3)：12-18.

Impacts of Land Use Changes on Streamflow in Upper Reach of Sancha River Basin During 1995－2016

Tian Renwei，Zhao Cuiwei，He Zhonghua，Xu Zhirong

（*College of Geography and Environmental Sciences，Guizhou Normal University，Guiyang，Guizhou* 550025，*China*）

Abstract：[Objective] This study investigated the rainfall，runoff，land use changes during the period of 1995—2016 in the upper reaches of Sancha river basin，the water source area of the Qianzhong hydraulic project. The impacts of land use change on runoff were explored in order to provide a reference for predicting future changes of the water resources in the basin and the allocation of water resources in Qianzhong hydraulic project. [Methods] The relationship between rainfall and runoff was analyzed by conventional linear regression and result simulation. The impact of land use change on runoff was studied by using the land use dynamic change index and transfer matrix. [Results] The rainfall and runoff in the upper reaches of Sancha river watershed fluctuated and declined during the past 20 years，and the evolution processes could be divided into two stages：1995—2010 (stage Ⅰ) rainfall and runoff showed a downward trend. 2010—2016 (stage Ⅱ) rainfall and runoff showed a downward trend，but the decline of runoff was greater than rainfall. Since 1995，the land use change in the basin was obvious. The area of grassland and woodland increased by

收稿日期：2018-10-18　　**修回日期**：2018-11-12

资助项目：国家自然科学基金重大研究计划专题，国家自然基金委员会—贵州喀斯特科学研究中心联合基金项目“喀斯特筑坝河流水安全与调控对策”(41471032，u1612441)

第一作者：田仁伟(1995—)，男(汉族)，贵州省平塘县人，硕士研究生，主要从事土地利用与生态环境保护方面的研究。E-mail：1290392157@qq.com。

通讯作者：赵翠薇(1968—)，女(汉族)，贵州省大方县人，教授，博士，主要从事土地利用与生态环境保护方面的研究。E-mail：zhaocuiwei@sohu.com。

5.33% and 3.63%, respectively. The cultivated land decreased by 6.92%. The dominant changes in land use types were conversion from cultivated land to forestland, grassland and construction land. In addition to the impact of rainfall, land use change was the major factor affecting the continuous decline of runoff. During the period of 2010—2016, the area of grassland and woodland increased by 19.93% and 5.25%, while the cultivated land and unused land decreased by 13.93% and 87.97%, respectively, indicating that land use change was the main reason for the significant decrease in runoff. In addition, the construction of Pingzhai reservoir in the Qianzhong water control project had an important impact on the reduction of runoff to a certain extent. [Conclusion] Land use change in the upper reaches of the Sancha River was closely related to the changes of runoff, which reduced watershed runoff.

Keywords: upper Sancha River basin; land use changes; streamflow change; water conservation

随着全球变化研究的深入,土地利用/覆被变化与水文过程的相互作用成为全球生态与环境研究的热点和前沿问题之一[1-2]。土地利用/覆被变化(LUCC)的重要环境效应,是以水文效应的形式而体现[3],LUCC 对流域水量的影响是这一效应最迅速、最直接的表现[4],对流域生态环境具有重要影响[5]。降雨是径流产生的一个必要条件,降雨的多少会直接影响径流的大小,但有降雨不一定能产生径流,下垫面性质是影响径流产生的一个充分不必要条件[6]。土地利用变化引起下垫面性质的改变,会影响地表截留、填洼、下渗、水分蒸发等过程,对径流产生过程有显著影响[7]。不同地类的涵养水源能力差异较大,主要表现为:水域>林地>草地>耕地>建设用地>未利用土地[8]。国内外大多数研究认为植树造林会使年径流减少[9],流域土地利用结构变化对径流的变化具有显著影响[10-13]。

黔中地区因地处两江分水岭河源地带、岩溶地貌发育强烈、水土流失严重、生态环境较为脆弱的山区,山高谷深水源低,雨多水少不易蓄,坡陡土薄涵水弱,水资源开发利用难度大,且水资源时空分配不均,人均水资源量少。作为贵州省经济较发达的地区,用水需求较大,缺水成为限制其发展的首要问题[14]。三岔河上游流域作为黔中水利枢纽工程的水源区,对整个黔中地区水资源的分配起到至关重要的作用,从乌江上游三岔河取水的黔中水利枢纽工程是为解决该地区经济发展用水而建设的重要调水工程,可缓解黔中地区用水紧张问题[15-16]。目前对三岔河上游流域的研究主要有以下几方面:侯文娟等[17]基于 SWAT 模型模拟了乌江三岔河生态系统产流服务及其空间变异特征;张一鸣等[18]对三岔河上游近 50 a 降水径流变化特征进行了研究;侯祎亮等[19]对贵州省三岔河流域水化学特征及其控制因素进行了研究;焦树林等[20]研究了三岔河流域水文特征与化学风化碳汇效应。以上研究多是对三岔河上游流域径流变化或水质状况进行单一研究和分析,在土地利用变化对径流影响方面研究较少,且此项研究对于流域水资源的利用和调配具有较强的现实意义。因此,本文选取黔中水利枢纽工程水源区——三岔河上游流域作为研究区,采用回归分析的方法分析 1995—2016 年三岔河上游流域降雨和径流的演变过程,并结合降雨和径流的结果模拟,探讨降雨和土地利用变化对径流的影响,以期为预测未来流域水资源变化规律和黔中水利枢纽工程水资源的调配提供一定的参考依据。

1　研究区概况

三岔河为乌江南源一级支流,位于 104°18′—106°18′E,26°10′—27°00′N 之间,流域面积 7 264 km^2。三岔河发源于贵州高原西部乌蒙山,流经贵州省毕节地区、六盘水市、安顺市,河流全长 325.6 km,其中流域内 95%为山地和丘陵[21]。流域地势西高东低,海拔在 911～2 330 m 之间,大部分地区属于亚热带季风性湿润气候区,气候湿润温和、雨量充沛,年均降水量为 1 300 mm。三岔河上游流域处在贵州省西北部,位于 104°19′—105°31′E,26°11′—27°00′N 之间,流域面积为 3 754.89 km^2,生态环境较为脆弱,流域土地利用类型主要以林地、耕地、草地以及建设用地为主,其中林地的面积比例较大,其次是耕地和草地,建设用地、未利用土地和水域的面积比例较小。

2　数据与研究方法

2.1　数据来源

土地利用数据来源于《贵州省生态环境十年(2000—2010 年)变化遥感调查与评估》及《贵州省 2016 年生态环境监测》数据,分辨率为 30 m 的数字高程模型数据(DEM)。根据 LUCC 分类系统,将研究区土地利用类型合并为耕地、林地、草地、建设用地、未利用土地和水域 6 个一级地类。

降雨数据取自流域内 3 个雨量站(二塘、南开、付家寨)和 3 个水文站(向阳、阳长、龙场桥)提供的

1995—2016 年月平均降雨数据。径流量用年径流深表示，数据来源于三岔河上游龙场桥水文站 1995—2016 年的实测月平均径流资料。

2.2 研究方法

2.2.1 研究区范围及水系的提取 采用 ArcGIS Desktop 提供的水文分析工具 Hydrology 进行流域河网水系特征信息的提取，主要的内容包括 DEM 数据填洼、计算水流方向、计算栅格单元累积汇流量、生成流域河网水系 4 方面[22]。具体流程如图 1 所示。

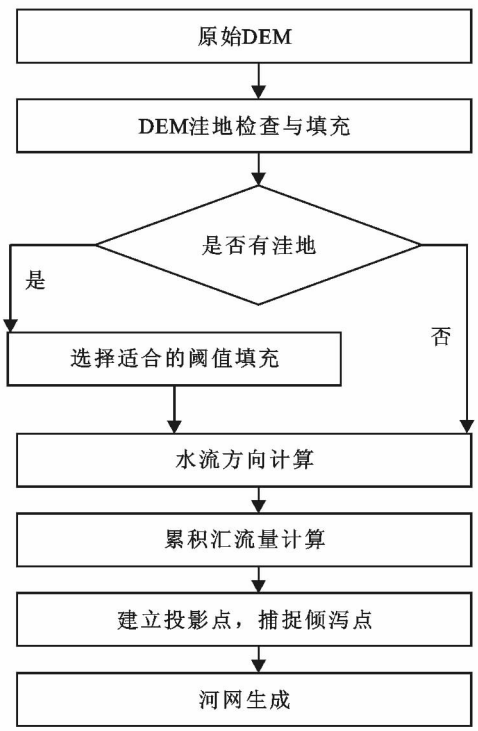


图 1 基于 Hydrology 水文分析工具提取河网水系流程

2.2.2 降雨和径流的回归分析 以黔中水利枢纽平寨水库的修建时间将流域降雨与径流演变过程划分两个阶段，第一阶段(1995—2010 年)，第二阶段(2010—2016 年)。采用一元线性回归方程对降雨和径流进行分析，检验降雨和径流的相关性。具体数学表达式如下：

$$y=a+bx \tag{1}$$

式中：y——年平均径流深(mm)；x——年平均降雨量(mm)。

2.2.3 土地利用动态变化 采用变化量和变化幅度两个土地利用动态指标表征土地变化状况。变化量表示某种土地利用类型在前后两个时期内的面积数量变化的大小，土地利用变化率指某种土地利用类型的变化量占其在研究初期面积的比率，反映土地利用类型变化的剧烈程度[23]。具体的数学表达式为：

$$\Delta S=S_b-S_a \tag{2}$$

$$K=(S_b-S_a)/S_a\times 100\% \tag{3}$$

式中：S_a，S_b——研究初期和末期某种土地利用类型的面积数量(km^2)；ΔS，K——研究时段内某种土地利用类型的变化量和变化率(%)。

2.2.4 土地利用转移矩阵 土地利用转移矩阵是定量研究土地利用类型间相互转化的数量和方向的主要方法，能具体反映土地利用变化的结构特征和各类型间的转移方向[24]。

3 结果与分析

3.1 土地利用变化

流域土地利用类型主要以林地、耕地和草地为主，还有少量水域、建设用地和未利用地，3 种主要土地利用类型面积之和占流域总面积的比例在 4 个时期分别为 97.17%，97.11%，96.91%，95.31%，动态变化不显著(如图 2 所示)。2000—2016 年，流域土地利用结构变化较为显著，其中林地面积占流域总面积在 4 个时期的比例依次是 37.57%，37.97%，38.93%，40.98%，所占比例呈持续上升的趋势；草地面积呈持续上升的趋势，所占比例依次为 20.43%，21.20%，21.52%，22.95%；建设用地所占比例依次为 1.64%，1.70%，1.90%，3.80%，呈持续增加趋势；耕地面积呈持续下降趋势，所占比例依次为 39.17%，37.94%，36.46%，31.38%；水域和未利用地面积所占比例较小，且变化不明显。

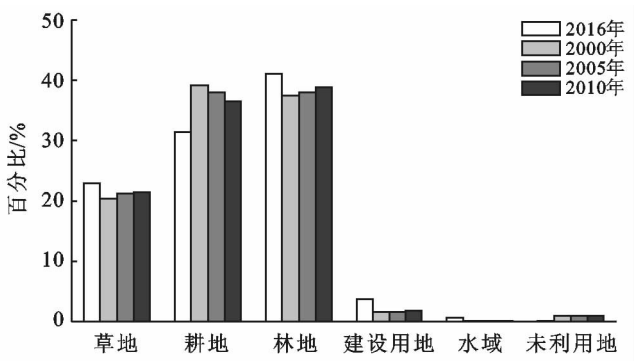


图 2 三岔河上游 2000－2016 年土地利用结构变化特征

流域土地利用的转移矩阵如表 1 所示。2000—2005 年，土地利用变化趋势主要是耕地向草地、林地、建设用地分别转移了 28.98，15.09，2.04 km^2，转移率为 1.97%，1.03%，0.14%。2005—2010 年，草地向林地转移了 9.38 km^2；耕地向草地、林地和建设用地分别转移了 21.32，26.96，7.64 km^2，转移率分别为 1.50%，1.87%，0.54%。2010—2016 年，土地利用变化的主要趋势是草地分别向耕地、林地和建设

用地转移了 194.65,294.40,38.05 km²,转移率为 24.09%,36.38%,4.71%;耕地向草地、林地和建设用地分别转移了 304.76,330.41,48.14 km²,转移率为 22.26%,24.13%,3.52%;林地向草地、耕地和建设用地转移了 259.34,283.63,22.5 km²,转移率为 17.74%,19.40%,1.54%。

表 1　2000—2016 年三岔河上游土地利用类型面积转移矩阵　　km²

项 目	土地利用类型	草地	耕地	建设用地	林地	水域	未利用土地	总 计
2000—2005 年面积	草 地	767.14						767.14
	耕 地	28.98	1 424.69	2.04	15.09			1 470.81
	建设用地			61.61				61.61
	林 地				1 410.63			1 410.63
	水 域					7.55		7.55
	未利用土地						37.15	37.15
	小 计	796.12	1 424.69	63.65	1 425.72	7.55	37.15	3 754.89
2005—2010 年面积	草 地	786.73			9.39			796.12
	耕 地	21.32	1 369.05	7.64	26.69			1 424.69
	建设用地			63.65				63.65
	林地				1 425.72			1 425.72
	水 域					7.55		7.55
	未利用土地						37.15	37.15
	小 计	808.05	1 369.05	71.29	1 461.80	7.55	37.15	3 754.89
2010—2016 年面积	草 地	274.58	194.65	38.05	294.40	6.37		808.05
	耕 地	304.76	674.86	48.14	330.41	10.88		1 369.05
	建设用地	11.16	18.30	26.38	14.53	0.92		71.29
	林 地	259.34	283.63	22.50	891.89	4.44		1 461.80
	水 域	1.19	1.40	0.20	0.97	3.79		7.55
	未利用土地	10.67	5.51	7.33	6.41	1.27	5.96	37.15
	小 计	861.70	1 178.35	142.60	1 538.61	27.67	5.96	3 754.89

3.2　降雨与径流的变化趋势分析

1995—2016 年,三岔河上游流域年平均降雨量为 1 088.40 mm,年平均径流深为 911.45 mm。其中,年平均降雨量是根据流域内 3 个雨量站和 3 个水文站提供的 1995—2016 年月平均降雨数据计算而得,年平均径流深用龙场桥水文站实测月平均径流资料计算而得。

利用 Mann-Kendall 秩次相关法来检验年径流和降水的变化趋势[25]。Mann-Kendall 法的统计量 τ 和标准化变量 U 的计算公式为:

$$\tau=\frac{4P}{n(n-1)} \tag{4}$$

$$\mathrm{var}(\tau)=\frac{2(2n+9)}{9n(n-1)} \tag{5}$$

$$U=\frac{\tau}{\sqrt{\mathrm{var}(\tau)}} \tag{6}$$

式中:P——$x_1,x_2,\cdots,x_n$ 系列中所有对偶值$(x_i,x_j,j>i)$中 $x_i<x_j$ 出现的次数;n——系列长度。通过一元线性法来诊断降雨和径流的变化趋势,通过计算,年降雨线性系数 $U_P=-7.7238$,年径流线性系数 $U_Q=-21.033\,8$,所以三岔河上游流域整个时间序列的年径流和降水均呈下降趋势。取显著性水平 $a=0.05$,则相应的检验临界值 $U_{(0.05,2)}=1.96$,由于 $|U_P|=1.778<U_{(0.05,2)}=1.96$,说明年降雨下降趋势不显著,$|U_Q|=3.185>U_{(0.05,2)}=1.96$,说明年降雨的下降趋势较为显著(图 3)。从二者的多年距平百分率变化情况看(图 3),二者的波动情况不一致,年径流的波动幅度大于年降水的波动幅度。可见,降雨是引起径流变化的主要因素,但其他因素在一定程度上对径流的变化造成一定的影响,主要表现为人类活动影响下的土地利用变化对径流产生的影响。

根据平寨水库的修建时间,将流域降雨和径流的演变过程划分为两个阶段,对第一阶段(1995—2010)年和第二阶段(2010—2016)年的降雨和径流进行回归分析,结果显示,1995—2010 年,降雨和径流存在显著的线性回归关系,表明降雨是径流形成的主要原因;2010—2016 年间,降雨和径流之间的显著性降低,表明降水对径流的影响作用下降。

根据表 2 的方程,进行显著性检验后,对径流进行假设与模拟,假设在两个时期内降雨量均为 1 200 mm,运用表 2 的回归方程进行模拟,所得出两个时期

的 y 值分别为1 097.534 mm和 875.561 mm，实测值分别为 1 055.4 mm 和 794.07 mm，模拟值与实测值之间具有一定的差距，说明除了降雨对径流的影响外，还有其他因子对径流有影响，主要表现为：人类活动影响下的土地利用结构变化在一定程度上对径流的变化产生影响，以及黔中水利枢纽工程平寨水库的修建对流域水量平衡的调节作用对径流变化带来的影响。

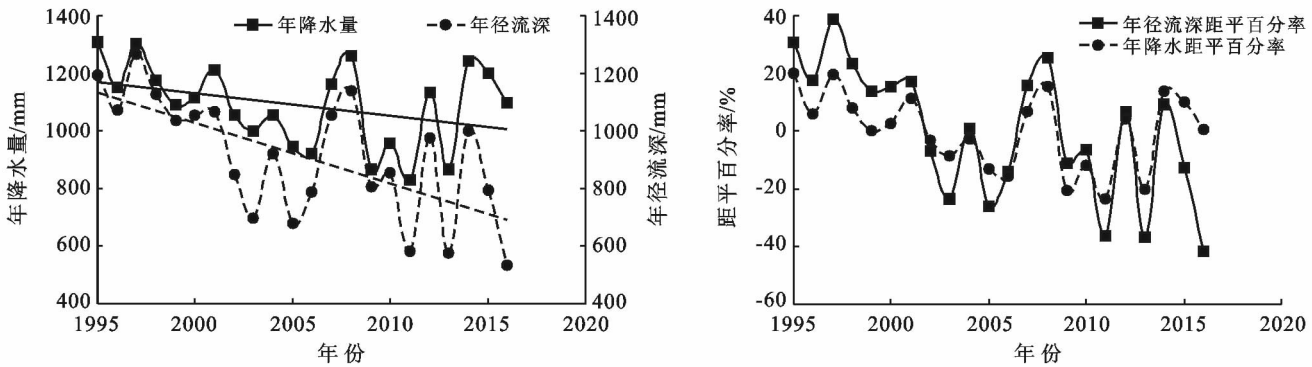


图 3 1995－2016 年降雨和径流的变化趋势

表 2 降雨和径流之间的回归方程

年 份	回归方程	变量解释	相关检验 R
1995—2010	$y=1.2x-342.466$	y，x 分别为年平均径流量和降雨量	$R=0.917^{**}$
2010—216	$y=0.772x-50.839$	y，x 分别为年平均径流量和降雨量	$R=0.641$

注：* * 表示在 0.01 水平(双侧)显著相关。

3.3 土地利用变化对径流的影响

根据 2000 年、2005 年、2010 年和 2016 年 4 期的土地利用动态变化指标和转移矩阵(表 1 和表 3)，分析土地利用变化对径流的影响，分析结果如下。

(1) 2000—2016 年径流总体呈波动下降的趋势。1995—2010 年，流域土地利用类型主要以林地、耕地和草地为主，3 种土地类型面积之和分别占 3 个时期流域总面积的 97.17%，97.11%，95.31%，土地利用结构变化较为明显，主要变化趋势为林地和草地面积增加，耕地面积逐渐减少，导致流域降雨截留能力增强，产流能力降低，是除降雨对径流的影响外造成径流持续减少的主要原因。2010—2016 年，流域土地利用结构变化明显，主要表现为林地和草地的增加，耕地和未利用地的减少，表明生态环境得到改善，水源涵养能力得到增强，是使径流大幅减少的主要原因。此外，黔中水利枢纽工程平寨水库的修建对地表径流有较强的拦蓄和调节水作用，在一定程度上造成径流减少。

表 3 不同时期土地利用类型变化量与变化率

土地利用类型	2000—2005 年		2005—2010 年		2010—2016 年	
	变化量/km²	变化率/%	变化量/km²	变化率/%	变化量/km²	变化率/%
草 地	27.98	3.78	11.93	1.50	136.77	6.64
耕 地	－46.12	－3.14	－55.64	－3.91	－190.7	－13.93
建设用地	2.04	3.32	7.64	12.00	－5.85	100.03
林 地	15.09	1.07	36.08	2.53	76.81	5.25
水 域	0	0	0	0	20.12	266.49
未利用土地	0	0	0	0	－31.19	－83.97

(2) 2000—2005 年间，降雨和径流呈持续下降的趋势，径流从 1 194.00 mm 下降到 676.59 mm，变化幅度较降雨要大，为 517.41 mm。流域内土地利用变化的主要趋势是草地和林地面积增加，变化量分别为 27.98，15.09 km²，变化率为 3.78%和 1.07%；耕地面积减少 46.12 km²，变化率为－3.14%；建设用地增加了 2.04 km²，变化率为 1.64%。耕地向草地、林地和建设用地的转换是流域内土地利用变化的主导过程，转移量分别为 28.98，15.09，2.04 km²，转移率为 1.97%，1.03%，0.14%。土地利用结构的变化使

流域对降雨的截留作用加强,特别是林地和草地的增加,削弱流域产流能力,导致径流持续下降。2005—2010 年间,降雨和径流总体呈波动下降趋势,两者变化幅度都较大,降雨和径流分别 864.07～1 259.00 mm 和 676.59～1 142.30 mm 之间变化,但径流的变化更为显著,变化幅度较降雨要大,为 465.71 mm。期间流域草地和林地面积分别增加 11.93,36.08 km^2,变化率为 1.5%,2.53%;耕地面积减少 55.64 km^2,变化率为 -3.91%;建设用地面积增加7.64 km^2,变化率为 12%。耕地向草地、林地和建设用地的转化构成流域土地利用变化的主导过程,转移量分别 21.32,26.69,7.64 km^2,转移率分别为 1.50%,1.87%,0.54%;草地向林地转移了 9.39km^2,转移率 1.18%。由此可知,流域建设用地面积的大幅增加,导致地表不透水面面积的扩大,一方面增强流域的产流能力,另一方面削弱地表对降雨的截留作用及水源涵养能力,导致径流变化幅度增大。

2010—2016 年间,降雨和径流的变化趋势基本一致,总体呈下降趋势,降雨在 831.15～1 241.40 mm 之间变化,径流在 531.33～997.70 mm 之间波动变化,变化较为显著,下降幅度较降雨要大,为 466.37 mm。期间流域土地利用结构变化较为明显,主要表现为:草地和林地面积分别增加 136.77 km^2 和 79.71 km^2,变化率为 16.93%和 5.25%;建设用地增加 71.31 km^2,变化率为 100.03%;耕地减少 190.70 km^2,变化率为 -13.93%;未利用土地减少了 31.19 km^2,变化率为 -83.97%。草地向耕地、林地、建设用地和水域的转化和耕地向草地、林地、建设用地和水域的转化以及林地向草地、耕地、建设用地和水域的转化构成流域土地利用变化的主导过程。林地、草地面积的持续增加以及未利用地的减少,表明流域土地利用结构变化状况逐渐转好,生态环境质量得到提高,对降水的截留作用及对水源的涵养作用进一步增强,导致产流能力下降,流域土地利用变化是除降雨对径流的影响外,造成径流大幅减少的主要原因。此外,黔中水利枢纽工程平寨水库的修建:一方面使流域水域面积增加 20.12 km^2,流域水源涵养作用得到增强;另一方面,水库的修建具有较好拦蓄地表径流和调节水量平衡的作用,丰水期防止极端径流的出现,降低洪涝灾害的风险,平水期为下游地区提供灌溉水源,枯水期可以起到涵养水源和储存水量的作用,在一定程度上对径流减少具有重要影响。另外,水库的修建和生态环境的改善对流域水量的调节和水源的净化具有重要意义。

4　结 论

1995—2016 年,三岔河上游流域降雨和径流总体呈现出波动下降的趋势。1995—2005 年(第一阶段)流域年降雨和径流呈持续下降的趋势,径流的下降幅度比降雨大,从 1 194.00 mm 下降到 676.59 mm,下降幅度为 517.41 mm,期间流域土地利用结构变化较为明显,草地和林地分别增加了 3.78%,1.07%,耕地减少 3.14%,除受降雨对径流影响外,土地利用变化是导致径流持续减少的主要原因。2005—2010 年径流呈波动下降趋势,变化幅度较降雨要大,为 465.71 mm,期间建设用地增加了 12%,是造成径流大幅变化的主要原因。2010—2016 年(第二阶段)降雨与径流的变化总体呈下降趋势,径流在 531.33～997.70 mm 之间波动,且变化幅度较降雨要大,为 466.37 mm,期间流域土地利用结构变化较为明显,草地和林地分别增加了 19.93%,5.25%,耕地和未利用土地分别减少 13.93%,87.97%,表明流域态环境逐渐改善,对降雨的截留作用增强,导致径流大幅减少。此外,黔中水利枢纽工程平寨水库的修建对径流具有较强的调节作用,在一定程度上对径流减少具有重要作用。

基于降雨和径流演变的回归分析模拟试验,结合土地利用动态变化指标和转移矩阵,定性和定量研究土地利用变化对径流的影响,其结果具有一定的参考意义。但由于水文过程的复杂性,所涉及的因素较多,研究所选取降雨和土地利用变化两个影响因子,虽然在一定时间段上能定性和定量分析土地利用结构变化对径流所产生的影响,但在预测未来土地利用状况对径流的影响上存在一定的难度,需要进一步的完善。

[参 考 文 献]

[1] 李丽娟,姜德娟,李九一,等. 土地利用/覆被变化的水文效应研究进展[J]. 自然资源学报,2007,22(2):211-224.

[2] 史晓亮,李颖,严登华,等. 流域土地利用/覆被变化对水文过程的影响研究进展[J]. 水土保持研究, 2013,20(4):301-308.

[3] Schulze R E. Modeling hydrological responses to land use and climate change: A southern African perspective [J]. AMBIO, 2000,29(1):12-22.

[4] Calder I R. Hydrologic effects of land-use change[C] Maidment D R. Handbook of Hydrology. New York: McGraw-Hill,1993:50.

[5] 刘正茂,吕宪国,夏广亮,等. 近 50 年挠力河流域上游径流深变化过程及其驱动机制研究[J]. 水文,2011,31(3):44-50.

[6] 王根绪,张钰,刘桂民,等. 马营河流域 1967—2000 年土

地利用变化对河流径流的影响[J]. 中国科学(D 辑:地球科学),2005(7):671-681.

[7] 夏军,谈戈. 全球变化与水文科学新的进展与挑战[J]. 资源科学,2002,24(3):1-7.

[8] 田义超,梁铭忠,吴彬. 北部湾沿海地区土地利用动态模拟与水源涵养服务能力估算:以广西钦州市为例[J]. 云南地理环境研究,2013,25(5):69-78.

[9] Sun Ning, Li Xiubin. A summary of the effects of afforestation and deforestation on annual water yields[C]// International Geosciences and Remote Sensing Symposium, Seoul, Korea 25-29 July 2005.

[10] 孙宁,李秀彬,李子君,等. 潮河上游土地利用/覆被变化对年径流影响模拟[J]. 北京林业大学学报,2008,30(S2):22-30.

[11] 陈雅琳,常学礼,崔步礼. 山东半岛典型流域土地利用变化对径流的影响分析[J]. 水土保持研究,2007,13(5):104-107.

[12] 叶宝莹,张养贞,张树文,等. 嫩江流域土地覆被变化对径流量的影响分析[J]. 水土保持通报,2003,23(2):15-18.

[13] 贾静,石晓丽. 土地利用/覆被变化对区域径流的影响:以秦皇岛地区为例[J]. 地理与地理信息科学,2017,33(2):108-114,127.

[14] 戴明宏,张军以,王腊春,等. 岩溶地区土地利用/覆被变化的水文效应研究进展[J]. 生态科学,2015,34(3):189-196.

[15] 孟碟. 黔中水利枢纽工程水资源调配与经济核算研究[D]. 天津:天津大学,2013.

[16] 杨秀才. 黔中水利枢纽工程存在的问题及运行管理对策[J]. 现代农业科技,2010(20):273-274.

[17] 侯文娟,高江波,戴尔阜,等. 基于 SWAT 模型模拟乌江三岔河生态系统产流服务及其空间变异[J]. 地理学报,2018,73(7):1268-1282.

[18] 张一鸣,田雨,雷晓辉,等. 三岔河上游近 50 年降水径流变化特征分析[J]. 水文,2016,36(5): 79-84.

[19] 侯祎亮,安艳玲,吴起鑫,等. 贵州省三岔河流域水化学特征及其控制因素[J]. 长江流域资源与环境,2016,25(7):1121-1128.

[20] 焦树林,刘丽,孙婷,等. 三岔河流域水文特征与化学风化碳汇效应[J]. 地理研究,2013,32(6):1025-1032.

[21] 焦树林,罗福家,梁虹,等. 乌江源区阳长流域化学侵蚀作用的碳汇效应[J]. 水土保持学报,2012,26(5):44-47.

[22] 李毅,石豫川,王平,等. 基于 DEM 的吉太曲流域水文信息分析[J]. 人民黄河,2015,37(9):32-34,37.

[23] 吴琳娜,杨胜天,刘晓燕,等. 1976 年以来北洛河流域土地利用变化对人类活动程度的响应[J]. 地理学报,2014,69(1):54-63.

[24] 刘纪远,匡文慧,张增祥,等. 20 世纪 80 年代末以来中国土地利用变化的基本特征与空间格局[J]. 地理学报,2014,69(1):3-14.

[25] 李丽娟,郑红星. 华北典型河流年径流演变规律及其驱动力分析:以潮白河为例[J]. 地理学报,2000,55(3):309-317.

(上接第 11 页)

[12] 韦杰,鲍玉海,金慧芳,等. 三峡库区坡耕地有限顺坡耕作模式及减蚀效应[J]. 灌溉排水学报,2012,31(6):45-48.

[13] 倪九派,魏朝富,高明,等. 三峡库区坡耕地土壤养分流失的实验研究[J]. 水土保持学报,2008,22(5):38-42.

[14] 史东梅,蒋光毅,蒋平,等. 土壤侵蚀因素对紫色丘陵区坡耕地耕层质量影响[J]. 农业工程学报,2017,33(13):270-279.

[15] 周洋,姜敏,李梦雨,等. 湘中丘陵区紫色土坡耕地水土保持措施效益的试验研究[J]. 水土保持学报,2017,31(6):134-138.

[16] Williams J R, Renard K G, Dyke P T. EPIC: a new method for assessing erosion's effect on soil productivity [J]. Journal of Soil & Water Conservation, 1983,38(5):381-383.

[17] 姜坤,秦海龙,卢瑛,等. 广东省不同母质发育土壤颗粒分布的分形维数特征[J]. 水土保持学报,2016,30(6):319-324.

[18] Wang Li, Shi Zhihua, Wang Junguang, et al. Rainfall kinetic energy controlling erosion processes and sediment sorting on steep hillslopes: A case study of clay loam soil from the Loess Plateau, China[J]. Journal of Hydrology, 2014,512:168-176.

[19] Slattery M C, Burt T P. Particle size characteristics of suspended sediment in hillslope runoff and stream flow [J]. Earth Surface Processes & Landforms, 2015,22(8):705-719.

[20] 郑良勇,李占斌,李鹏,等. 坡面侵蚀泥沙来源立体分布研究[J]. 水土保持学报,2012,26(3):58-61.

[21] 史东梅,陈正发,蒋光毅,等. 紫色丘陵区几种土壤可蚀性 K 值估算方法的比较[J]. 北京林业大学学报,2012,34(1):32-38.

[22] He Xiubin, Bao Yuhai, Nan Hongwei, et al. Tillage pedogenesis of purple soils in southwestern China[J]. Journal of Mountain Science, 2009,6(2):205-210.

[23] 袁勇,高华端,孙泉忠. 黔中喀斯特地区不同地类土壤侵蚀研究[J]. 中国水土保持,2010(6):50-51.

[24] 翟子宁,王克勤,苏备,等. 松华坝水源区不同土地利用类型土壤可蚀性研究[J]. 西南林业大学学报,2016,36(5):118-124.

[25] 许晓鸿,隋媛媛,张瑜,等. 东北丘陵漫岗区坡耕地土壤抗蚀性研究[J]. 水土保持通报,2012,32(4):32-35.