

土地利用变化对流域水文过程时空分异的影响

——以赣江流域为例

郭强¹ 叶许春¹ 刘佳² 刘福红¹¹

(1. 西南大学 地理科学学院, 重庆 400715;

2. 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】: 土地利用变化引起的水文分量时空变化对认识流域产汇流过程, 优化流域土地利用结构和水资源规划具有重要意义。基于 SWAT 模型, 本研究以赣江流域为例, 结合 1980、2000、2015 年 3 期土地利用数据从水文响应单元的角度, 系统分析了单纯土地利用变化对流域产流、蒸发、入渗以及径流等主要水文过程时空分布的影响。结果表明:1980~2015 年间, 流域内的土地利用变化主要表现为耕地和林地的减少, 城乡建设用地的增加;林地的减少和城乡建设用地的增加是产流增加, 蒸发和入渗减少的主要原因;总体上, 土地利用变化对局部地区水文过程影响较大, 但因土地利用类型之间的相互转化和其影响的叠加, 流域尺度上的综合水文效应明显降低;土地利用变化导致整个赣江流域平均径流量增加了 $2.33 \times 10^8 \text{ m}^3$, 相比较近年来赣江径流的减小幅度其影响十分有限。近年来, 赣江入湖径流量的下降主要是由气候变化和其他人类活动作用特别是流域工农业用水的大幅增长所致。流域水文过程模拟应充分考虑土地利用变化水文效应的时空分异, 注重天然和社会水循环的耦合, 才能更为真实的反映流域水文过程, 更好的为流域土地利用结构优化和水资源的高效管理提供科学依据。

【关键词】: 土地利用变化 SWAT 模型 水文过程 时空分异 赣江流域

【中图分类号】: P334.92 **【文献标识码】:** A **【文章编号】:** 1004-8227 (2020) 12-2747-13

水文过程是指水文要素在时空上的动态变化过程^[1]。流域水文过程可以用来衡量流域整体水资源条件和环境状况, 是当前水文水资源研究的重要内容。近年来, 随着社会经济的快速发展, 人类活动的加剧, 引起土地利用/覆被的强烈变化, 对流域水文过程产生了重要影响^[2]。这种影响不仅体现在改变流域下垫面特征及水分分布状况, 导致水文分量空间变化, 而且也体现在改变流域产汇流过程, 使得径流在时空尺度上重新分配。在人类活动的水文响应研究中, 土地利用/覆被变化 (LUCC) 研究是国际地圈生物圈计划 (IGBP) 的两个核心科学问题之一, 其水文效应研究一直是国内外水文科学研究的热点^[3,4]。

土地利用/覆被变化代表了一种人为的“系统干扰”, 其对水文过程的影响主要是通过影响植被截留、水分蒸散发、下渗和回流等水文过程, 进而影响流域的水文情势和产汇流机制^[5~7]。近年来, 我国土地利用空间格局发生显著变化, 刘纪远等^[8]研究表明 2010~2015 年我国东部地区城市扩张和耕地的面积减少, 变化速率下降, 中西部地区城市扩张和耕地的增加速率加快。由于水文模型具有一定的物理基础, 能够充分考虑流域的空间异质性对水文过程的影响, 在评价土地利用变化的水文效应中得到广泛应

作者简介: 郭强 (1994~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为水文水资源变化及流域水文过程模拟. E-mail: 285648624@qq.com

叶许春 E-mail: yxch2000@swu.edu.cn

基金项目: 中央高校基本科研业务费项目 (XDJK2019B074); 国家自然科学基金项目 (51822906)

用。如, Chanasyk 等^[9]对加拿大阿尔伯塔省南部山麓进行了模拟研究, 结果表明重度放牧导致草场退化, 使得在夏季暴雨时期径流增大。Bekiaris 等^[10]运用 SWAT 模型对瑞典 Ronnea 流域进行研究, 结果表明城市用地增加会导致洪水期径流激增。Viola 等^[11]用 LASH 模型对巴西 Grande 流域不同土地利用变化情境下的径流变化展开研究, 结果表明流域内林地向草地转变使得蒸散发和植被截留同时减少, 致使地表径流的增加。渠勇建等^[12]运用 SWAT 模型对浙江省衢江流域土地利用变化对径流的影响研究表明林地增加、耕地减少, 地表径流将会减少 15%, 水分下渗增加 5.7%, 林区面积增加会带来地下水位的上升。陈昌春等^[13]分析赣江流域土地利用变化对径流的影响, 结果表明建设用地和水浇地增加、林地面积减少会影响径流变化。当前, SWAT 模型中较多采用 SCS-CN 径流曲线法计算地表径流量, 在无资料的小流域径流模拟中得到了广泛应用。SCS-CN 模型根据土壤水文状况模拟产流能力, CN 是唯一的一个参数, 因此 CN 值的选择决定模型的精确度。邓景成等^[14]采用 SCS-CN 模型对黄土区径流曲线进行计算, 结果表明不同的土地利用类型 CN 值的最优计算方法不同。在标准 SCS-CN 模型中初损系数 $\lambda=0.2$, 但土壤状况不同初损量亦存在差异, 针对研究地区特征合理的选择方法计算 λ 值可提高模型拟合度^[15,16]。目前有关土地利用变化的水文响应研究, 大多集中在对径流综合影响方面^[17], 对于引起流域具体水文过程的时空变化研究较少。本文以赣江流域为研究对象, 不同时期土地利用数据为基础, 采用 SWAT (Soiland Water Assessment Tools) 模型^[18]从水文响应单元角度, 定量分析单纯土地利用变化对于赣江流域主要水文过程时空变化的影响, 以期客观认识流域水文过程变异机制, 优化土地利用结构和水资源综合规划提供依据。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

赣江流域地处江西省中南部, 是鄱阳湖流域内的第一大水系(图 1), 多年平均入湖水量为 $686 \times 10^8 \text{ m}^3$, 约占鄱阳湖流域总入湖水量的 46%。赣江发源于赣、闽两省界山武夷山脉黄竹岭, 干流全长 758km, 是长江第七大支流。赣江流域面积 80948 km^2 , 占鄱阳湖流域总面积的 50%(图 1), 流域主要支流有章水、梅江、桃江、平江、蜀水、乌江、孤江、袁河、绵河等(图 1)。根据江西省水利厅资料, 赣江流域一般以峡山、峡江和外洲水文控制站为界分为上、中、下游。赣江流域的地貌格局以山地丘陵为主体, 呈由南往北逐渐降低的阶梯状。流域属于亚热带季风气候, 气候温和, 雨量充足, 多年平均气温约为 17.8°C , 多年平均降水量 1600mm。赣江流域南北地跨 4 个纬度, 加之地形地貌影响, 降水时空分布不均, 通常 4~6 月降水量占全年降水总量的 50%, 并且呈现东多西少, 山区多于平原的特点^[13]。流域内土地利用类型有耕地、林地、草地、水域、城乡建设用地和未利用土地, 其中耕地和林地占据主导, 达到 90%以上, 林地占比超过 65%。流域土壤主要为红壤和水稻土。

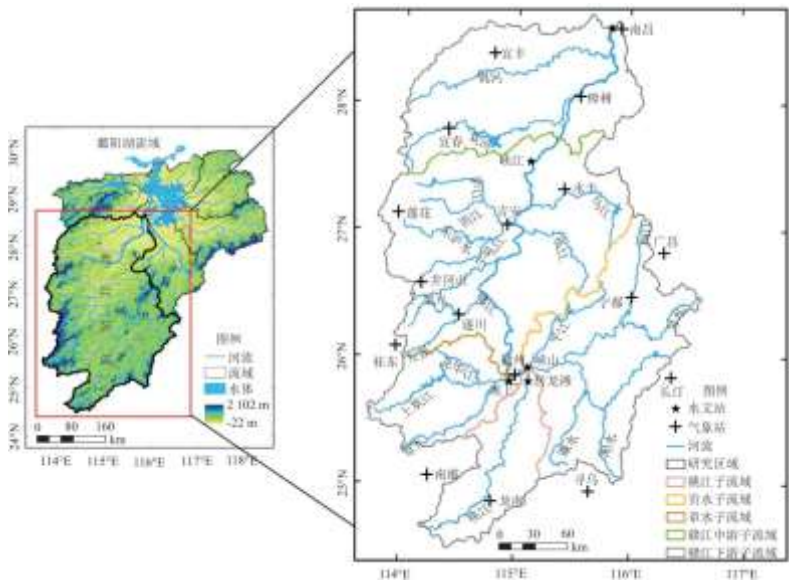


图 1 赣江流域及水文、气象站位置图

1.2 数据来源

赣江流域地形数据 (DEM) 来源于地理空间数据云 (<http://www.gscloud.cn/>), 空间分辨率为 90m。土地利用数据来源于中国科学院西部生态环境数据中心提供的 1980、2000、2015 年 3 期的数据, 比例为 1:10 万。根据第二次全国土地调查土地利用/土地覆盖分类体系, 按照一级类型进行重分类, 将赣江流域土地利用类型分为耕地、林地、草地、水域、城乡建设用地、未利用土地 6 种土地利用类型。土壤数据来源于联合国粮农组织 (FAO) 和国际应用系统分析研究所 (IIASA) 构建的世界和谐土壤数据库 (HWSD) (<http://www.fao.org/>) 中的中国土壤数据库, 比例为 1:100 万。

气象数据来源于中国气象数据网 (<https://data.cma.cn/>) 提供的南昌、宜丰、樟树、宜春、莲花、永丰、吉安、广昌、井冈山、遂川、桂东、宁都、赣州、长汀、南雄、龙南、寻乌等 17 个气象站 (图 1) 1960~2017 年的逐日气象数据, 包括平均降水、日照时数、平均相对湿度、最高和最低气温、平均风速等数据。

水文数据来源于长江水利委员会水文局, 选用赣江流域坝上、居龙滩、峡山、峡江和外洲 5 个水文站 (图 1) 的实测逐日流量数据, 其中坝上站的数据长度为 1953~2003 年, 居龙滩和峡山站为 1957~2003 年, 峡江站为 1957~2010 年, 外洲站为 1953~2017 年。

1.3 土地利用变化强度

为反映流域土地利用变化动态变化, 采用单一土地利用动态变化度 (K) 和综合土地利用动态变化度 (P) 来反映区域单一土地利用类型的变化速度和整体土地利用变化速度^[19]。K 值计算公式如下:

$$K = \frac{U_e - U_0}{U_0} \times \frac{1}{t} \times 100\% \quad (1)$$

式中: U_e 和 U_0 分别指研究研究期末和研究期初的某一土地利用类型的面积数量, m^2 ; t 为研究期初至期末的间隔年数, y 。

P 值的计算公式如下:

$$P = \left[\sum_{ij}^n (\Delta U_{i-j} / U_i) \right] \frac{1}{t} \times 100\% \quad (2)$$

式中: ΔU_{i-j} 为研究期初至期末第 i 类土地利用类型向其他土地利用类型转出的面积之和, m^2 ; U_i 为研究期初第 i 类土地利用类型的面积, m^2 ; t 为研究期初至期末的间隔年数, y 。

1.4 SWAT 模型构建

SWAT 由美国农业部 (United States Department of Agriculture) 综合多个水文模型发展而来, 它能够模拟土地利用对大型复杂流域的水、沉积物和水质的影响^[10], 被广泛用于对流域径流进行长时间序列的模拟研究, 已成为世界应用最为广泛的分布式水文模型之一。SWAT 模型模拟水文过程基于水平衡方程式^[20]:

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=0}^t (R_{day} - Q_{surf} - E_a - W_{seep} - Q_{gw}) \quad (3)$$

式中: SW_t 为最终土壤含水量, mm; SW_0 为土壤的初始含水量, mm; R_{day} 为第 i 天降水量, mm; Q_{surf} 为地表径流, mm; E_a 为蒸发量, mm; W_{seep} 为入渗水量, mm; Q_{gw} 为地下水回流量, mm。

本文采用 SWAT (2012) 模型从水文响应单元的角度分析土地利用变化对赣江流域产流、蒸发、入渗和径流等水文过程时空变化的影响。模拟过程中, 保证模型中输入的土壤数据和气候数据不变, 利用率定后的 SWAT 模型分别模拟流域 1980、2000、2015 年 3 期土地利用情况下 1960~2015 年的水文过程时空变化特征。

根据赣江流域实际情况, 设置 DEM 生成的最小集水域 (Critical Source Area, CSA) 阈值为 660km^2 , 以此将整个流域划分成 73 个子流域, 流域总面积 82996km^2 , 与赣江流域实际面积 80948km^2 , 误差为 2.53%。根据土地利用类型、土壤类型和坡度的阈值划分各子流域的水文响应单元 (Hydrologic Response Units, HRU), 设置阈值均为 0, SWAT 模型将依据阈值自动生成水文响应单元, 并配置其相应的信息。已有研究表明^[21], 赣江流域径流序列的突变点为 1992 年, 为单纯评价在土地利用变化的情况下流域水文过程的响应, 本研究选择以突变点之前 1980 年的土地利用数据作为 SWAT 的土地利用的输入数据。根据选用的 5 个水文站, 将流域分为赣江下游、赣江中游、章水、贡水和桃江 5 个子流域。

模型采用 SWAT-CUP (2012) 中的 SUIF-2 算法进行参数率定, 设置 1960~1961 年为模型预热期, 1962~1982 年为率定期, 1983~1992 年为验证期。由于 SWAT 参数众多^[22], 本文以图 1 中的 5 个水文站的实测日径流数据为依据, 根据参数的敏感性分析结果, 选择径流曲线系数 (CN2)、基流系数 (ALPHA_BF) 等 10 个参数进行率定。率定过程中, 设定迭代次数为 2000 次, 最终获得参数的范围、最佳值和各水文站的取值如表 1 所示。

表 1 SWAT 模型参数率定及各子流域取值

SWAT-CUP 参数	参数含义	下限	上限	最佳值	坝上	居龙滩	峡山	峡江	外洲
r__CN2.mgt	径流曲线系数	-0.2	0.2	0.19	0.198	0.178	0.181	0.175	0.194
v__ALPHA_BF.gw	基流 α 系数	0	1	0.76	0.775	0.745	0.785	0.795	0.755
v__GW_DELAY.gw	地下水滞后系数	30	450	431	418	439	443	422	414
v__GWQMN.gw	浅层地下水径流系数	0	2	0.49	0.45	0.49	0.53	0.43	0.50
v__ESCO.hru	土壤蒸发补偿系数	0.8	1	0.84	0.865	0.851	0.84	0.853	0.831
r__SOL_AWC(1).sol	土壤有效持水量	-0.2	0.4	-0.03	-0.02	-0.01	-0.02	-0.03	-0.02
r__SOL_K(1).sol	土壤饱和导水率	-0.8	0.8	0.47	0.42	0.51	0.47	0.48	0.53
r__SOL_BD(1).sol	土壤容重	-0.5	0.6	0.28	0.24	0.25	0.28	0.27	0.26
v__SURLAG.bsn	地表径流滞后系数	0	25	18.87	18.87	18.87	18.87	18.87	18.87
v__CANMX.hru	最大冠层截留量	0	10	0.05	0.04	0.05	0.06	0.05	0.04

对于模拟结果,采用相关系数 R^2 、Nash-Sutcliffe 系数 E_{ns} 和相对误差 R_e 等指标进行评价,得到各个水文站在率定期和验证期的适用性评价结果(表 2)。结果表明:各水文站在率定期和验证期的 R^2 和 E_{ns} 值均高于 0.55。其中,率定期峡山和居龙滩站 R^2 和 E_{ns} 均高于 0.80, R_e 的值较为合理且都为正值,表明模拟值略大于实测值;验证期各水文站的 R^2 和 E_{ns} 的均高于 0.58,其中居龙滩站高于 0.80。这一结果表明构建的 SWAT 模型能够较好的重现赣江流域的降雨-径流过程,适用于赣江流域的水文过程模拟。

表 2 率定期与验证期月径流模拟效果评价

站名	率定期(1962~1985)			验证期(1986~1992)		
	R^2	E_{ns}	R_e (%)	R^2	E_{ns}	R_e (%)
外洲	0.72	0.65	12.40	0.71	0.65	14.60
峡江	0.77	0.73	14.90	0.75	0.70	17.10
峡山	0.82	0.80	7.50	0.79	0.76	10.30
坝上	0.76	0.66	15.30	0.73	0.59	17.60
居龙滩	0.85	0.82	18.80	0.84	0.80	19.20

2 结果及分析

2.1 土地利用变化分析

根据土地利用一级类型进行分类,统计得到 1980~2015 年各时期不同土地利用类型面积及所占比例。如表 3 所示,赣江流域内林地和耕地是主要土地利用类型,两者占流域总面积 90%以上,其中林地占比超过 65%,在流域内占绝对优势,水域、城乡建设用地和未利用土地占比均较少。1980~2015 年间研究区内耕地、林地面积呈持续下降趋势,其中耕地占比下降 0.3%,林地占比下降 0.7%。草地占比多年维持在 5%左右。水域面积在 1980~2015 年呈现增加的趋势,所占比例由 1.82%上升至 1.93%,这与流域内兴修水利设施拦河蓄水和退耕还湖有关。城乡建设用地所占比例增加最为突出,由 1980 的 1.56%提升至 2015 年的 2.31%,特别是自 2000 以来,城乡建设用地比例突增,这与流域社会经济的快速发展和城市化的扩张相吻合。

表 3 1980~2015 年各期土地利用类型面积及占比变化表

土地利用类型	1980		2000		2015	
	面积(km ²)	比例(%)	面积(km ²)	比例(%)	面积(km ²)	比例(%)
耕地	21317	25.68	21231	25.58	21014	25.32
林地	54586	65.77	54480	65.64	53959	65.00
草地	4243	5.11	4308	5.19	4493	5.41
水域	1506	1.82	1588	1.91	1605	1.93
城乡建设用地	1291	1.56	1376	1.66	1913	2.31

未利用土地	53	0.06	13	0.02	12	0.02
-------	----	------	----	------	----	------

为综合反映赣江流域土地利用的时空变化特征,将 1980、2000、2015 年 3 期土地利用数据进行顺次空间叠加分析^[23],得到各个时期土地利用类型空间变化(图 2)和转移量(表 4)。综合图 2 和表 4 的结果,可以看出赣江流域发生土地利用类型变化区域整体上呈零散分布状态,2000~2015 年间赣江下游局部区域土地利用变化具有一定集中性。各种土地利用类型之间转化在时空上都具有可逆的变化特征,既有转出也有转入。其中,1980~2000 年土地利用转化面积占整个流域总面积的 1.35%,2000~2015 年占 1.48%,转化量相对较少。空间上,1980~2000 年间,流域内土地利用相互转化主要体现在林地、草地和耕地之间。其中,耕地转变为林地、水域和建设用地面积分别为 157、99 和 72km²;林地转变为耕地和草地的面积最为突出,分别为 207 和 235km²。此外,水域面积在此时间内增加较快,共增加面积 82km²,主要耕地和未利用土地转入而来。耕地向林地和草地的转化主要集中在赣江下游地区,林地向耕地和草地的转化集中在章水子流域,草地向林地和耕地的转化集中在赣江中游子流域。2000~2015 年间,流域内耕地净转出 221km²,林地净转出 519km²。耕地和林地主要转入对象为草地和城乡建设用地,两者分别净增加面积 183 和 539km²。由此可见,2000~2015 年间赣江流域内土地利用变化主要为城市化进程所导致的耕地、林地面积减少和城市建设面积的大幅扩张。城乡建设用地增加集中在南昌、赣州、吉安和宜春等城市及周边区域。

1980~2000 年,赣江流域综合土地利用动态变化度为 4.79%,主要是未利用土地向其他土地利用类型转出的比例较高,其面积由 1980 年的 53km²降低至 2000 年的 13km²,K 值达 75.47%;2000~2015 年,综合土地利用动态变化度为 1.05%。土地利用动态变化度表征人类活动对于区域自然环境的影响较小,且呈现下降的趋势,也表明人类活动和经济社会的发展对流域自然环境的影响在减弱。但各单一土地利用类型的变化呈现另一番景象:耕地、林地和未利用土地面积持续减少,草地、水域和城乡建设用地面积持续增加(图 3)。1980~2000 年林地减少速度由-0.19%增大至 2000~2015 年的-0.96%,面积减少 512km²。城乡建设用地增加速度由 1980~2000 年的 6.58%增大至 2000~2015 年的 39.63,速率增加近 6 倍。

表 4 1980~2015 年土地利用转移矩阵

土地利用类型		耕地	林地	草地	水域	城乡建设用地	未利用土地
1980~2000 年	耕地	20976	157	23	99	72	1
	林地	207	54114	235	10	14	4
	草地	10	188	4041	5	0	0
	水域	30	15	7	145	2	0
	城乡建设用地	1	0	0	0	1291	0
	未利用土地	18	1	4	22	0	8
2000~2015 年	耕地	20833	67	3	27	312	0
	林地	140	53813	309	11	202	0
	草地	38	72	4177	2	18	0
	水域	11	4	1	1563	9	0
	城乡建设用地	0	2	0	2	1372	0

	未利用土地	0	0	0	0	0	12
--	-------	---	---	---	---	---	----

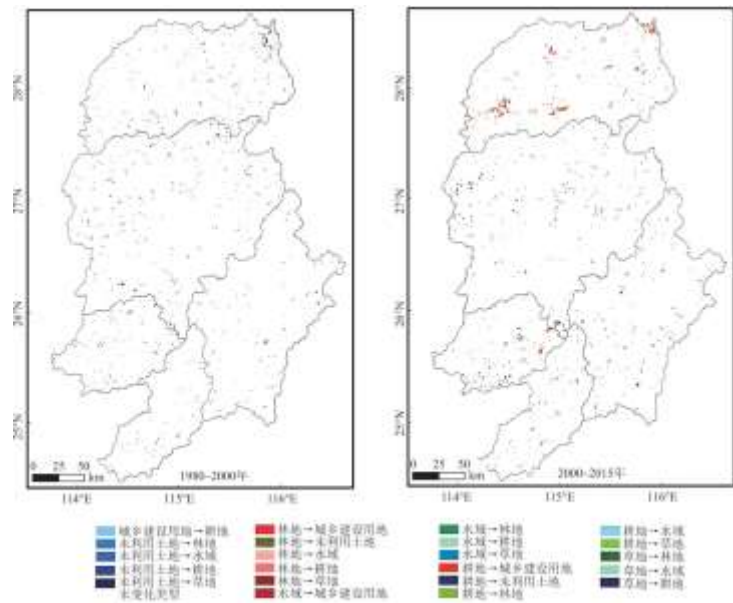


图 2 1980～2015 年土地利用空间变化图

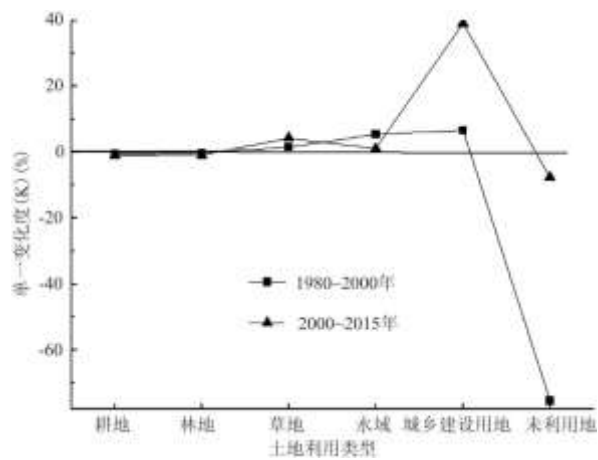


图 3 不同时期单一土地利用类型动态变化度

2.2 土地利用变化对流域产流的影响

采用率定后的 SWAT 模型模拟 1980 年土地利用情况下不同土地利用类型的产流, 结果显示各土地利用类型多年平均产流依次为: 草地 614.53mm、城乡建设用地 612.43mm、未利用土地 596.74mm、耕地 588.38mm、林地 381.07mm 和水域 0mm。以此为基础, 模拟得到其他 2 期不同土地利用情况下的流域产流量及其空间变化。图 4 显示了 1980~2000、2000~2015 年 2 个时段流域多年平均产流空间变化。结合图 2 和图 4 可以得出: 1980~2015 年间, 产流减少主要为林地和水域的转入, 产流增加主要为城乡建设用地和草地的增加。1980~2000 年间, 耕地向林地和草地的转化, 分别使相应地块产流减少 0~100 和 100~300mm 左右, 主要发生在赣江中游南部。水域向林地、城乡建设用地转化分别使相应地块产流增加了 300~500 和 500~610mm 左右, 主要发生在河流沿岸,

水域转出面积较小,仅占全流域面积的 0.06%。就平均情况而言,整个流域土地利用变化使相应地块产流增加 14.49mm。2000~2015 年间林地、草地和水域向城乡建设用地转化使相应地块产流增加了 100~300、0~100 和 500~610mm,主要发生在赣江下游城市集中区,转化面积占全流域 0.65%。耕地向水域转化使相应地块产流减少了 500~610mm 左右;草地向林地的转化使相应地块的产流减少了 100~300mm 左右,主要发生在章水与赣江中游交界处。期间,整个流域土地利用变化使相应地块产流增加 7.43mm。耕地、林地、草地、水域、城乡建设用地和未利用土地转入对产流变化的贡献分别为:212.87、-38.22、259.23、-516.59、212.19 和 34.77mm。

就不同区间来看,各子流域在 3 期不同土地利用情景下的多年平均产流均有变化,但总体相差不大。如表 5 所示,以 1980 年土地利用为基准,桃江、章水、贡水以及赣江下游等区域的产流均呈先下降后增加的特点,赣江中游地区一直呈缓慢增加的趋势。就赣江全流域而言,流域产流也是先下降后增加,2000~2015 年相对 1980~2000 年,土地利用变化使整个流域产流增加 2.88mm。通过前面的分析,可以知道流域产流的增加主要林地减少和城乡建设用地的增加引起的。

表 5 不同时期土地利用情境下各子流域多年平均产流、蒸发及入渗变化统计结果

子流域		桃江	章水	贡水	赣江中游	赣江下游	全流域
1980	产流	410.97	437.33	442.49	480.19	558.46	474.07
	蒸发	1004.77	977.12	994.45	972.42	952.96	978.34
	入渗	142.03	157.82	142.38	156.09	178.55	154.86
2000	产流	410.97	437.21	442.57	480.55	554.33	473.12
	蒸发	1004.57	977.29	994.28	972.23	951.31	977.96
	入渗	141.90	157.68	142.03	155.91	188.56	156.19
2015	产流	412.49	441.42	442.70	481.62	557.49	476.95
	蒸发	1002.98	974.11	994.37	971.33	949.22	976.90
	入渗	141.60	154.96	141.76	154.03	183.70	154.35

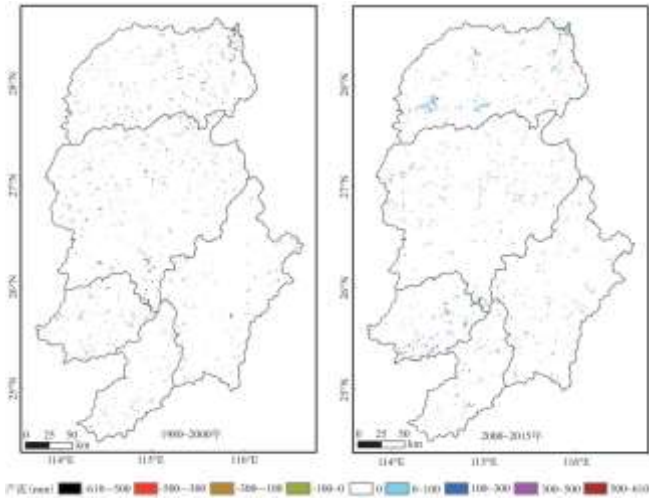


图 4 流域多年平均产流量空间变化图

2.3 土地利用变化对流域蒸发的影响

基于 1980 年土地利用数据,模型模拟得到不同土地利用类型多年平均蒸发依次为:水域 1097.74mm、林地 1064.94mm、草地 876.75mm、耕地 854.99mm、城乡建设用地 696.04mm、未利用土地 441.21mm。图 5 显示了 1980~2000 和 2000~2015 年间流域土地利用变化导致多年平均蒸发空间变化模拟结果。由图 2 和图 5 可以得出:1980~2015 年间,流域蒸发增加主要是由耕地转出和水域转入,水域和林地转出则是蒸发减少的主要原因,其中蒸发的增加主要发生在赣江中游南部和赣江下游北部,蒸发的减少发生在章水和赣江下游中部区域。1980~2000 年间,林地和草地向水域转化,使相应地块的蒸发分别增加了 100~200 和 200~400mm 左右。林地向城乡建设用地转化,蒸发减少了 400~700mm 左右。整个流域土地利用转化导致蒸发平均增加 1.89mm。2000~2015 年间,耕地向水域转化,使相应地块蒸发增加了 200~400mm 左右,草地向林地转化导致蒸发增加了 100~200mm 左右,主要发生在贡水子流域。耕地、林地和水域向城乡建设用地转化,相应地块的蒸发分别减少了 100~200、200~400 和 400~700mm 左右,主要发生在赣江下游城市集中区。总体上,土地利用变化使整个流域蒸发平均减少 15.84mm。耕地、林地、草地、水域、城乡建设用地和未利用土地的蒸发变化分别是:-105.88、224.92、-75.68、330.19、-352.19 和-319.44mm。表 5 中各子流域在不同土地利用情景下的多年平均蒸发,结果表明:1980~2000 年桃江、赣江中游和赣江下游蒸发下降,章水和贡水子流域蒸发变化微弱。综合分析这种变化主要是林地转入所致,桃江流域蒸发最大是由于该区域林地覆盖率最高。2000~2015 年间,5 个子流域蒸发均呈下降趋势,这一时期城乡建设用地的大幅增加是导致流域蒸发减小的主要原因。

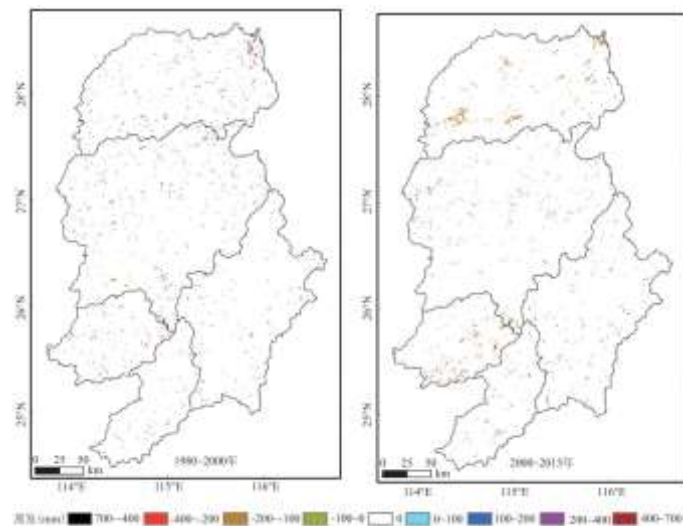


图 5 流域多年平均蒸发量空间变化图

2.4 土地利用变化对流域入渗的影响

以 1980 年土地利用为基准,模型模拟出各土地利用多年平均入渗依次为:林地 77.77mm、草地 56.14mm、耕地 19.06mm、未利用土地 17.61mm、城乡建设用地 9.09mm、水域 0mm。图 6 显示了 1980~2000 年和 2000~2015 年多年平均入渗量空间差异。综合分析图 2 和图 6 可以得出:1980~2000 年间,林地转出是入渗减少的主要原因,林地向草地和城乡建设用地转化分别使入渗减少了 10~30 和 50~80mm,主要发生在贡水和桃江南部。土地利用变化使整个流域平均入渗减少 2.84mm。2000~2015 年间,流域入渗增加主要是林地转入和水域转出,其中草地和城乡建设用地向林地转化,使相应地块入渗分别增加了 10~30 和 50~80mm 左右,转化面积占流域总面积 0.1%;水域向耕地、草地和建设用地转化使相应地块的入渗分别增加了 10~30、50~80 和 0~10mm,水域转化面积占比为 0.03%。整个流域土地利用变化使得入渗平均减少 1.48mm。耕地、林地、草地、水域、城乡建设用地和未利用土

地的转入对入渗的影响分别为:-19.14、56.67、27.27、-41.08、-28.37 和-22.81mm。

根据表 5 的统计结果,可以看出赣江全流域下渗呈先上升后下降的特点。其中桃江子流域下渗 2015 年较 1980 年减少 0.43mm,章水减少 2.86mm,贡水减少 0.62mm,赣江中游减少 2.06mm,赣江下游增加 5.15mm。结合不同时期的土地利用变化,可知 1980~2000 年赣江下游下渗的增加是由于退耕还林政策的实施,使得流域内林地有一定的回升,而 2000~2015 年下渗减少主要归因于流域内城乡建设用地的快速增加。

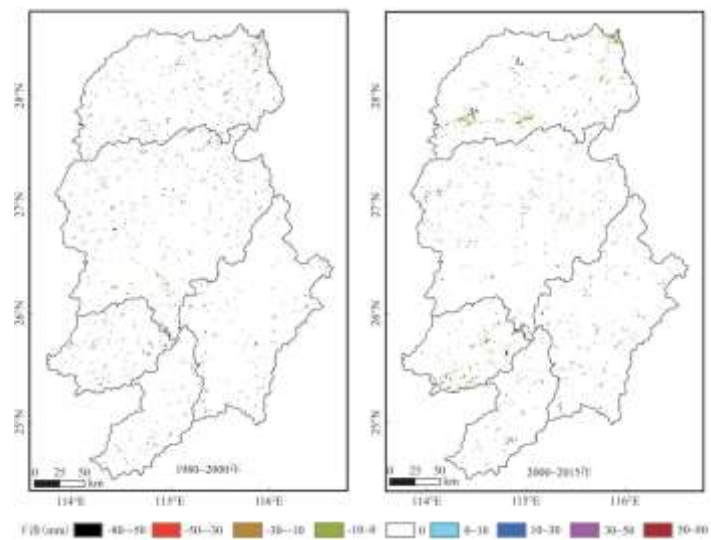


图 6 流域多年平均入渗量空间变化图

2.5 土地利用变化对径流的影响

地表植被具有涵养水土、调节河川径流的重要功能,是维护流域生态平衡的屏障。模型模拟得出各子流域在 3 期不同土地利用情况下 1980~2015 年间多年平均径流量及其变化率(表 6)。由表可知,赣江流域坝上、峡山、峡江和外洲在 2000 年土地利用情境下的径流量相较 1980 土地利用情景下的径流分别减少 0.09×10^8 、 1.35×10^8 、 0.82×10^8 、 $1.14\times10^8\text{m}^3$,只有居龙滩站增加 $0.17\times10^8\text{m}^3$;2015 年土地利用情景相较于 2000 年,流域 5 个水文站的径流均呈增加,分别增加居龙滩($0.15\times10^8\text{m}^3$)、坝上($0.81\times10^8\text{m}^3$)、峡山($0.7\times10^8\text{m}^3$)、峡江($2.42\times10^8\text{m}^3$)和外洲($3.47\times10^8\text{m}^3$)。其中居龙滩、坝上、峡江和外洲 4 个水文站在 2015 年土地利用情景下的径流量较 1980 年土地利用情境下的径流量分别增加了 0.33%、0.73%、0.28%、0.31%,只有上游的峡山站径流量减小了-0.25%。由此可见,土地利用变化对径流的影响存在一定的空间差异,章水子流域的径流量对出土地利用变化最为敏感。

表 6 各期土地利用情境下各水文站点多年平均径流量及变化率

子流域-站点	多年平均径流量($\times10^8\text{m}^3$)			变化率(%)
	1980	2000	2015	1980~2015
桃江-居龙滩	96.91	97.08	97.23	0.33
章水-坝上	97.74	97.65	98.46	0.73
贡水-峡山	260.05	258.70	259.40	-0.25

赣江中游-峡江	566.96	566.14	568.56	0.28
赣江下游-外洲	743.16	742.02	745.49	0.31

径流是流域产流、蒸发、下渗等水文过程综合作用的结果,并受到各种人类活动干扰的影响。从实测数据来看,赣江入湖控制站—外洲站的入湖径流量由 1980~2000 年 $710.99 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ 降低至 2000~2017 年的 $626.32 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$,年平均入湖流量减少了 $84.67 \times 10^8 \text{ m}^3$,减少幅度达 11.91%。与此相对,模拟结果表明 1980~2015 年因为土地利用变化导致整个赣江流域平均径流量增加了 $2.33 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。由此可见,单纯的土地利用变化对赣江入湖径流量的影响十分有限。近年来,赣江入湖径流量的下降在很大程度上是由气候变化和其他人类活动作用特别是流域工农业用水的大幅增长所致。Ye 等^[24]的研究表明,总体上鄱阳湖入湖河流各子流域径流量的下降主要是由气候变化作用引起,人类活动对水资源的开发利用起到重要的辅助作用。特别是,2000 后伴随着社会经济的快速增长,流域水资源开发利用强度不断增加,人类活动造成的河川径流量下降作用也在不断增大。图 7 显示的江西省历年用水量变化过程,在近 20 年来呈现明显的波动上升趋势,其中 2017 年用水量比 1997 年增加了 $28.35 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。毫无疑问,这种不断增长的用水需求对流域水资源量变化和地表河流水文过程的影响十分突出。因此,流域水文过程模拟应注重天然和社会水循环二者耦合,才能更为真实的反映流域水文过程,为流域水资源的高效管理和人类活动提供更好的科学依据。

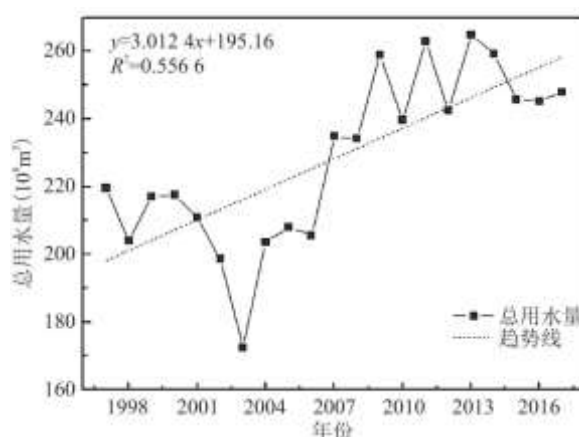


图 7 江西省 1997~2017 年用水总量变化图

3 结论

本研究以赣江流域为例,通过构建 SWAT 模型,采用 1980、2000 和 2015 年 3 期土地利用数据,模拟分析了土地利用变化对流域主要水文过程时空变化的影响,获得以下结论:

(1) 基于 1980、2000 和 2015 年 3 期土地利用数据,可知 1980~2015 年间研究区内耕地、林地面积呈持续下降趋势,草地占比多年维持在 5%左右,发生土地利用类型变化的区域整体上呈零散分布状态,2000~2015 年间赣江下游局部区域的土地利用变化具有一定的集中性。流域土地利用变化存在时空差异,1980~2000 年间主要为林地、耕地和草地之间的相互转化,转化面积占流域总面积的 1.35%,综合土地利用动态变化度为 4.79。2000~2015 年间主要为林地的减少和城市用地的增加,转化面积占流域总面积 1.48%,综合土地利用动态变化度为 1.05%。1980~2015 年间,流域土地利用转化的面积占流域总面积均较小,且转化的速率呈下降趋势,表明人类活动对自然环境的影响减弱。

(2) 赣江流域不同土地利用类型的对应的产流量、蒸发量和入渗量差异巨大。模型模拟的各土地利用类型多年平均产流量在

0~614.53mm 之间,多年平均蒸发量在 441.21~1097.74mm 之间,多年平均入渗量在 0~77.77mm 之间。尽管如此,因土地利用类型之间的相互转化和其影响的叠加,流域尺度上的综合水文效应大大降低,不同时期土地利用变化导致流域产流量、蒸发量和入渗量相差不大。

(3)赣江外洲站实测入湖径流量由 1980~1999 年 $710.99 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ 降低至 2000~2017 年的 $626.32 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$,年平均入湖流量减少 $84.67 \times 10^8 \text{ m}^3$,减少幅度达 11.91%。与此同时,1980~2015 年因土地利用变化导致整个赣江流域平均径流量增加了 $2.33 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。由于土地利用转化的面积占流域总面积的比例较小,因此单纯的土地利用变化对赣江入湖径流量变化的影响十分有限。近年来,赣江入湖径流量的下降在很大程度上是由气候变化和其他人类活动作用特别是流域工农业用水的大幅增长所致。流域水文过程模拟应将天然和社会水循环二者耦合,才能更为真实的反映流域水文过程,为流域水资源的管理和人类活动提供更好的科学依据。

参考文献:

- [1]BHATT D, MALL R K. Surface water resources, climate change and simulation modeling[J]. Aquatic Procedia, 2015, 4: 730-738.
- [2]CROLEY T E II, HE C S. Distributed parameter large basin runoff model. I: Model development[J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2005, 10(3): 173-181.
- [3]TANG X G, LI H P, XU X B, et al. Changing land use and its impact on the habitat suitability for wintering Anseriformes in China's Poyang Lake region[J]. Science of the Total Environment, 2016, 557-558: 296-306.
- [4]王强, 许有鹏, 高斌, 等. 西苕溪流域径流对土地利用变化的空间响应分析[J]. 自然资源学报, 2017, 32(4): 632-641.
- [5]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, 393.
- [6]刘睿, 夏军. 气候变化和人类活动对淮河上游径流影响分析[J]. 人民黄河, 2013, 35(9): 30-33.
- [7]KUNDU S, KHARE D, MONDAL A. Past, present and future land use changes and their impact on water balance[J]. Journal of Environmental Management, 2017, 197: 582-596.
- [8]刘纪远, 宁佳, 匡文慧, 等. 2010-2015 年中国土地利用变化的时空格局与新特征[J]. 地理学报, 2018, 73(5): 789-802.
- [9]CHANASYK D S, MAPFUMO E, WILLMS W. Quantification and simulation of surface runoff from fescue grassland watersheds[J]. Agricultural Water Management, 2003, 59(2): 137-153.
- [10]I G BEKIARIS, I N PANAGOPOULOS, M A MIMIKOU. Application of the SWAT(Soil and water assessment tool) model in the Ronnea catchment of Sweden[J]. GlobalNest International Journal, 2005, 7(3): 313-322.
- [11]VIOLA M R, MELLO C R, BESKOW S, et al. Impacts of land-use changes on the hydrology of the grande river basin headwaters, southeastern Brazil[J]. Water Resources Management, 2014, 28(13): 4537-4550.
- [12]渠勇建, 成向荣, 虞木奎, 等. 基于 SWAT 模型的衢江流域土地利用变化径流模拟研究[J]. 水土保持研究, 2019, 26(1):

- [13]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.
- [14]邓景成,高鹏,穆兴民,等.黄土区 SCS-CN 模型径流曲线数计算方法研究[J].人民黄河,2018,40(4):9-14,18.
- [15]尹鑫卫,李晓玲,康燕霞,等.基于 SCS-CN 模型的沟垄微型集雨系统径流预测[J].生态学杂志,2015,34(12):3502-3508.
- [16]王瑾杰,丁建丽,张喆,等.奎屯河流域春季融雪期 SCS-CN 模型参数取值方法[J].生态学报,2017,37(13):4456-4465.
- [17]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.
- [18]ARNOLD J G, SRINIVASAN R, MUTTIAH R S, et al. Large area hydrologic modeling and assessment part I: Model development[J]. Journal of the American Water Resources Association, 1998, 34(1):73-89.
- [19]徐羽,钟业喜,冯兴华,等.江西省土地利用变化及其对人类活动的响应[J].水土保持研究,2017,24(1):181-186,193.
- [20]YE X C, ZHANG Q, VINEY N R. The effect of soil data resolution on hydrological processes modeling in a large humid watershed[J]. Hydrological Processes. 2011, 25(1):130-140.
- [21]叶许春,张奇,刘健,等.气候变化和人类活动对鄱阳湖流域径流变化的影响研究[J].冰川冻土,2009,31(5):835-842.
- [22]魏丹,刘智勇,李小冰. SWAT 模型及 SUFI-2 算法在秃尾河上游流域径流模拟中的应用[J].干旱地区农业研究,2012,30(6):200-206.
- [23]刘瑞,朱道林.基于转移矩阵的土地利用变化信息挖掘方法探讨[J].资源科学,2010,32(8):1544-1550.
- [24]YE, X C, ZHANG Q, LIU J, et al. Distinguishing the relative impacts of climate change and human activities on variation of streamflow in the Poyang Lake catchment, China[J]. Journal of Hydrology, 2013, 494:83-95.