

闽江流域不同土地利用情景下的径流响应研究

王钰双, 陈芸芝, 卢文芳, 田 扬

(福州大学空间数据挖掘和信息共享教育部重点实验室,
卫星空间信息技术综合应用国家地方联合工程研究中心, 数字中国研究院(福建), 福州 350108)

摘要: 通过构建适用于闽江流域的 SWAT 分布式水文模型, 结合情景设置法, 分别模拟研究区内不同土地利用情景下的径流过程, 以定量分析土地利用变化对流域径流影响。结果表明: (1) 经过参数率定的 SWAT 模型, 率定期和验证期的评价指标 $R^2 > 0.9$, $NSE > 0.8$, $|PBIAS| < 10\%$, 符合模型径流模拟要求, 在闽江流域具有良好的适用性; (2) 相比闽江流域现状土地利用情景, 耕地储备、建设开发情景下流域年均径流量分别增加 12.41%, 22.89%; 植被恢复、分区调控情景下流域年均径流量减少 4.09%, 1.61%, 林地和草地类型能有效减缓地表径流, 减小径流年际变化量, 而耕地、建设用地类型产流作用明显; (3) 结合涵养指数值及丰、枯水期月均径流模拟结果分析, 研究流域内林地和草地类型涵养水源、调节径流功能显著, 耕地和建设用地类型径流调节能力较差, 但前者水源涵养能力相对优于后者; (4) 以“闽西北区合理开发耕地, 保护森林, 闽东北区推广坡度工业”为依据设置的分区调控情景, 既能有效减缓与调节流域径流, 又能保证区域粮食产量与促进经济发展, 实现生态效益与经济效益统一, 为闽江流域科学高效、可持续的土地利用规划提供参考。

关键词: SWAT 模型; 土地利用变化; 径流模拟; 闽江流域

中图分类号: P334+.92 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-2242(2020)06-0030-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2020.06.005

The Hydrological Response to Different Land Use Scenarios in the Minjiang River Basin

WANG Yushuang, CHEN Yunzhi, LU Wenfang, TIAN Yang

(Key Laboratory of Spatial Data Mining and Information Sharing of
Ministry of Education, National & Local Joint Engineering Research Center of Satellite Geospatial
Information Technology, Academy of Digital China (Fujian), Fuzhou University, Fuzhou 350108)

Abstract: In order to quantitatively analyze the impact of land use changes on runoff in the Minjiang River basin, combined with the scenario setting method, SWAT model was constructed to simulate the runoff process under different land use scenarios in this study. The results showed that: (1) The parameterized SWAT model had good applicability to runoff simulation in the Minjiang River Basin with the evaluation indexes $R^2 > 0.9$, $NSE > 0.8$, $|PBIAS| < 10\%$ at calibration and validation periods. (2) When the current land use was set as the reference, the annual runoff increased by 12.41%, 22.89% for the farmland reserve scenario and construction development scenario respectively, and decreased by 4.09%, 1.61% under the vegetation restoration scenario and zoning scenario, indicating that the forestland and grassland had the stronger mitigation effect on the runoff and reduced the inter annual variation of runoff, while farmland and construction land increased the runoff. (3) Combined with the value of conservation index and the simulation results of monthly average runoff in wet reason and dry periods, it was studied that the forestland and grassland had the stronger capacity of reserving water and regulating runoff, while that of farmland and construction land was weak, but the former was better than the latter. (4) Based on the “reasonable development of farmland and protection of forest in the north of West Fujian, and the promotion of ‘slope industry’ in the north of East Fujian”, the

zoning scenario could not only effectively decrease and regulate the runoff of the Minjiang River basin, but also ensure the grain safety and economic development, realize the unity of ecological and economic benefits, and provide reference for the scientific, efficient and sustainable land use planning of the basin.

Keywords: SWAT model; land use change; runoff simulation; Minjiang River basin

土地利用作为人类对自然利用的一种途径^[1],随着社会的发展,土地经营与改造方式不断变化,下垫面粗糙程度及入渗特性也随之改变,对植被截留、地面下渗及地表蒸散等水文过程造成深刻影响,从而导致径流发生变化,流域内水量平衡遭到破坏^[2-3],引发水土流失等一系列生态环境问题^[4]。因此,研究不同土地利用类型的径流响应,科学规划空间布局,对流域内生态环境保护具有重要意义。目前,定量分析土地利用类型对径流影响的常用方法有数理统计法和水文模型法^[5-6],前者计算过程相对简单,数据获取容易,但是忽略了流域空间异质性以及土地利用类型影响水文的作用机理;后者具备强大的物理基础以及长期模拟能力,尤其分布式水文模型能够充分考虑到流域内水文物理过程及空间尺度差异,广泛应用于土地利用的径流响应研究^[7-10]。其中由美国农业部研发的SWAT(Soil and Water Assessment Tool)模型,为研究流域的生态环境建设和水资源综合应用管理提供有力的技术支持^[11-14]。

闽江流域作为福建省重要的生态单元,流域内生态保护区和水源保护区众多,水资源变化直接关系到全省1/3居民的生产生活^[15-16]。此前已有学者^[17-19]采用数理统计法对闽江流域径流的变化做过相关研究,但由于该方法未考虑流域空间异质性问题,研究结果具有局限性,还需进一步结合水文模型法进行综合分析。本文以闽江流域为研究区,基于GIS技术构建适用于闽江流域径流模拟的SWAT模型,并结合情景设置法,定量分析不同土地利用情景下的流域径流变化情况,以期为流域内土地利用的合理规划及水土资源的科学管理提供参考依据。

1 研究区概况

闽江流域位于东经116°23′—119°35′,北纬25°23′—28°16′。闽江作为福建省最大的河流,发源于武夷山脉,流经省内36个县(市),流域面积59 922 km²,约占全省面积的1/2。在南平以上有建溪、富屯溪和沙溪三大主要支流,南平至入海口段为闽江干流,沿途有吉溪、尤溪、古田溪、梅溪、大樟溪等支流汇入,最后流经福州长乐出海(图1)。闽江流域状如扇形,地势由西北向东南倾斜,地形以山地和丘陵为主。土壤以酸性土、人为土最为常见。流域属于亚热带季风气候区,年平均气温17~19℃,年平均降水量1 710 mm。植被类型以常绿阔叶林、针阔混交林为主。

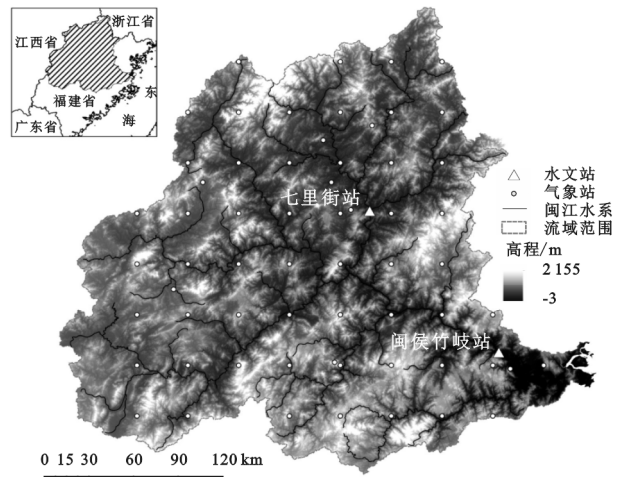


图1 闽江流域地理位置及气象水文站点

2 研究方法

2.1 基础数据

本研究所采用的数据有地形数据、土地利用类型数据、土壤类型数据和气象数据等。

数字高程模型(DEM)数据是由地理空间数据云平台提供下载的30 m分辨率ASTER GDEM V2数据,后期通过ENVI图像处理软件校正拼接而成(图1)。土地利用数据是清华地学系Gong等^[20]开发的2017年10 m分辨率全球地表覆盖产品(FROM-GLC10),经过一系列投影转换、掩膜、重分类等影像处理工作,最终得到闽江流域土地利用类型分布图,并按照SWAT模型要求对土地类型进行对应编码。土壤类型数据是来源于黑河数据中心下载的分辨率为1:1 km的世界土壤数据库HWSD(Harmonized World Soil Database),并结合土壤水特性模型SPAW Hydrology,构建闽江流域土壤属性数据库^[21]。气象数据库是由中国气象数据网提供的闽江流域内1988—2018年福州、邵武、建阳、武夷山、尤溪等8个气象站点的逐日降雨、气温、风速等数据,以及基于CLDAS长序列融合降水数据集^[22]计算的85个站点2008—2018年日降水数据构成。实测径流数据为福建省水文水资源勘测局提供的2008—2018年七里街水文站、闽侯竹岐水文站逐月径流量资料。

2.2 模型构建

首先基于闽江流域DEM数据进行河网提取,考虑到模型运行效率,确定最小集水面积阈值为300 km²,将整个研究区划分为157个子流域。然后通过土地利用类型、土壤类型以及坡度类型阈值的设置完

成闽江流域水文响应单元(HRU)的划分。其中,为保证径流模拟精度,兼顾模型计算代价,对土地利用类型不设最小阈值限定,土壤类型和坡度类型的最小阈值统一设置为 10%。各个 HRU 作为 SWAT 模型模拟的基本单元,独立进行水文过程计算,最终通过河网汇集得到闽江流域的总径流模拟值。

2.3 模型参数率定与验证

SWAT 模型进行径流模拟时以大量相关参数为基础,为提高模型的适用性,本文借助 SWAT-CUP 软件在参数敏感性分析的基础上采用 SUFI-2 算法^[23],选取闽江流域七里街、闽侯竹岐 2 个水文站 2008—2018 年实测径流量数据对敏感参数进行率定与验证工作,其中以 2008—2013 作为率定期,2014—2018 作为验证期。并采用决定系数(R^2)、纳什效率系数(NSE)、偏差百分比(PBIAS)共同评估模型模拟效果^[23],计算方法见公式(1)和公式(2)。

$$NSE=1-\frac{\sum_{i=1}^n(Q_m-Q_s)^2}{\sum_{i=1}^n(Q_m-\overline{Q_m})^2}$$
 (1)

$$PBIAS=\frac{\sum_{i=1}^n(Q_m-Q_s)}{\sum_{i=1}^nQ_m}\times 100$$
 (2)

式中: n 为实测月径流量个数; Q_m 为实测径流量值(m^3/s); Q_s 为模型模拟径流量值(m^3/s); $\overline{Q_m}$ 是实测径流量的平均值(m^3/s)。其中 R^2 、NSE 越趋近于 1, PBIAS 越趋近于 0,代表二者拟合的程度越好。

表 1 闽江流域不同情景下的土地利用面积变化

情景	统计指标	林地	耕地	草地	建设用地	裸地	水体
S0(基准情景)	面积/ km^2	50546.77	5026.05	1630.09	1035.57	391.67	660.92
	比例/%	85.25	8.48	2.75	1.75	0.66	1.11
S1(耕地储备情景)	面积/ km^2	25037.93	31626.50	800.79	1035.57	129.37	660.92
	比例/%	42.23	53.34	1.35	1.75	0.22	1.11
S2(建设开发情景)	面积/ km^2	6192.41	5026.05	372.37	46994.89	44.43	660.92
	比例/%	10.44	8.48	0.63	79.26	0.07	1.11
S3(植被恢复情景)	面积/ km^2	50614.35	2716.56	4525.97	773.28	0	660.92
	比例/%	85.37	4.58	7.63	1.30	0	1.11
S4(分区调控情景)	面积/ km^2	51320.68	5176.35	995.61	1131.86	5.3126	660.92
	比例/%	86.56	8.73	1.68	1.91	0.01	1.11

将以上各个情景分别代入校准后的 SWAT 模型,模拟闽江流域 2008—2018 年间不同土地利用情景下的水文径流过程,得到流域径流量,并结合年径流变差系数^[24]和涵养指数^[6],计算不同土地利用情景下流域径流量的年际变化程度,分析土地利用类型变化对流域蓄积水源能力及径流变化稳定性的影响。

$$\beta=\frac{Q_{min}}{Q_{mean}}$$
 式中: β 为涵养指数; Q_{min} 为最枯月径流量(m^3/s);

2.4 土地利用情景设置

为定量研究闽江流域不同土地利用类型的径流响应情况,在模型模拟精度达标的基础上,分别设置 5 种土地利用情景,各情景土地利用面积变化统计见表 1。

(1)以闽江流域土地利用类型现状作为基准情景 S0,方便与其他情景进行对比分析。

(2)根据研究区丘陵山地面积广大,耕地后备资源相对匮乏的情况,为保障粮食安全,设置耕地储备情景 S1:将基准情景中坡度 $<15^\circ$ 的裸地、草地、林地类型转化为耕地类型。

(3)根据福建省海峡西岸经济区城镇化、工业化迅速发展导致人地矛盾突出等情况,设置建设开发情景 S2:将基准情景中坡度 $<25^\circ$ 的林地、裸地、草地类型转化为建设用地类型。

(4)根据研究区内生态保护区和水源保护区众多的特点,为保障当地生态安全,设置植被恢复情景 S3:将基准情景中坡度 $\geq 25^\circ$ 的裸地、耕地、建设用地类型转化为林地类型,坡度 $<25^\circ$ 的裸地类型和坡度介于 $15^\circ\sim 25^\circ$ 的耕地、建设用地类型转化为草地类型。

(5)根据《福建省土地利用总体规划(2006—2020 年)》设计分区调控情景 S4:闽东北区鼓励推广坡度工业,将坡度 $<25^\circ$ 的裸地类型转化为建设用地类型;闽西北区要加大森林资源保护,增加耕地后备资源,将坡度 $>25^\circ$ 的裸地、草地类型转化为林地类型,将坡度 $<15^\circ$ 的裸地类型转化为耕地类型。

Q_{mean} 为年平均径流量(m^3/s)。 β 越大,表示该土地利用类型的水源涵养作用越强,流域径流变化越稳定, $\beta>0.25$,则表明该地区涵养条件较佳^[25]。

$$Cv=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n(k_i-1)^2}{n-1}}$$

式中: Cv 为年径流变差系数; n 为观测年数; k_i 为第 i 年的年径流量与多年平均径流量之间的比值。 Cv 反映了流域历年径流量与多年平均值间的离散程度, Cv 值越大,表明该土地利用情景下流域径流量的年

际变化越剧烈,容易引发洪涝灾害,并且对流域内水资源的开发利用造成影响。

3 结果与分析

3.1 模型参数率定与验证

SWAT 模型参数众多,需要在率定与验证过程中对其进行筛选。根据模型运算原理及各参数意义^[26],选取与径流相关的 14 个参数进行全局敏感性分析,结果见表 2。

由表 2 可知,主要影响闽江流域径流模拟的参数有 CN2、CANMX、ESCO、CH_K2、ALPHA_BF 等。其中第 1 敏感参数 CN2 综合反映了研究区土壤渗透性、前期土壤水分条件以及土地利用类型等特征,是影响流域径流模拟的主要参数。降水过程中,植被冠层可减小雨滴的侵蚀能力并截留部分降雨,CANMX 是植被冠层完全成长时的最大截留量,对下渗、地表径流及蒸散发都具有显著影响。ESCO 主要作用于土壤蒸发过程,其值越小,模型可以从下层获得更多的蒸发需水量。CH_K2 代表主河道冲积物的有效渗透系数,对于持续得到地下水补给的常年性河流,其有效渗透系数为 0。基流 α 因子 ALPHA_BF,又叫基流消退系数,是地下水径流对补给量变化响应的直接指标,其值大小与响应速度呈正比关系。由于 SWAT 模型模拟的径流过程应尽可能地接近实际的物理过程,因此在校准期间并非所有的参数都需要进行调整^[27-28],本文选取表 2 中前 10 个敏感参数进行率定。

表 2 参数敏感性分析结果

参数名称	参数	取值范围	最终值	排序
R_CN2	SCS 径流曲线系数	35~98	0.32	1
V_CANMX	最大冠层截留量	0~100	6.12	2
V_ESCO	土壤层蒸发补偿系数	0~1	0.36	3
V_CH_K2	河道有效导水率	-0.01~500	11.38	4
V_ALPHA_BF	基流消退系数	0~1	0.80	5
V_GW_DELAY	地下水延迟系数	0~500	14.10	6
V_REVAPMN	浅层地下水再蒸发系数	0~500	328.25	7
V_GWQMN	浅层地下水基流阈值深	0~5000	973.35	8
V_CH_N2	河道曼宁系数	0.01~0.5	0.36	9
R_SOL_K	饱和水力传导系数	0~2000	0.31	10
V_SURLAG	地表径流滞后时间	0.05~24	1.10	11
R_SOL_AWC	土壤有效持水量	0~1	0.39	12
V_GW_REVAP	地下水再蒸发系数	0.02~0.2	0.03	13
V_RCHRG_DP	深层地下水渗透系数	0~1	0.44	14

注:V_代表分析中对该参数做替换处理;R_代表分析中对该参数做乘(1+%)处理。

图 2 为闽江流域各水文站点逐月径流模拟值与实测值的比较结果,可见模型模拟的逐月径流趋势与实测径流波动趋势大体一致,峰值拟合表现良好。目

前在 SWAT 模型模拟精度的评价标准方面,有研究^[29]表明,当 $R^2 > 0.6$, $NSE > 0.5$, $|PBIAS| \leq 25\%$ 时,模型模拟结果可被接受。根据研究区径流模拟的精度评价指标统计,率定期 2 个水文站径流模拟的 R^2 和 NSE 均高于 0.9,PBIAS 的绝对值低于 10%;验证期 2 个水文站径流模拟的 R^2 均高于 0.9,PBIAS 的绝对值均低于 10%,其中七里街水文站实测数据与模拟数据在数值上匹配程度高于闽侯竹岐水文站,二者 NSE 分别为 0.94,0.83。表明经过参数率定的 SWAT 模型径流模拟精度较高,能够较为真实地反映闽江流域逐月径流过程,可用于后续流域内不同土地利用类型的径流响应研究。

3.2 情景模拟结果分析

根据本文设置的 5 种土地利用情景模式,通过率定好的 SWAT 模型,模拟闽江流域不同土地利用情景下的 2008—2018 年平均径流量,并与基准情景模拟结果进行对比分析(表 3)。

由表 3 可知,闽江流域不同土地利用情景下,多年平均径流量与年径流变差系数 C_v 值变化趋势一致,由大到小依次为:S2(建设开发情景)、S1(耕地储备情景)、S0(基准情景)、S4(分区调控情景)、S3(植被恢复情景)。植被恢复情景下,流域年均径流量最小,且 C_v 值较基准情景明显下降,表明林地和草地类型能有效减缓地表径流,且林地大面积的冠层以及复杂的冠幅可以有效截留和蓄积降水、减少蒸发,使得流域径流年际变化稳定。建设开发与耕地储备情景下,大面积林地、草地类型转化为建设用地、耕地类型,使得研究区年均径流量较基准情景分别增加 22.89%,12.41%,加之二者年径流变差系数 C_v 值均上升,表明研究流域径流年际变化程度加剧,不仅不利于闽江流域水资源的利用,而且提高了洪涝灾害的发生概率,有碍于流域可持续发展。分区调控情景中,流域多年平均径流量为 273.73 m^3/s ,与基准情景相比减少约 1.61%, C_v 值同样有所降低,表明经过规划后的闽江流域土地利用类型对减缓径流、稳定径流年际变化具有一定的积极作用;流域上游陡坡地的裸地、草地类型转化为林地类型,提高地表植被覆盖率,有利于坡度上的水土保持,将低缓坡上裸地类型转变为耕地类型,确保流域耕地后备资源,又由于坡度较缓,对地表径流影响小;流域下游部分裸地类型转化为建设用地类型,相较于前者,后者地表阻力增大,使得径流量相对减少。

图 3 为研究流域在不同土地利用情景下 2008—2018 年间月均径流量变化情况模拟结果,发现闽江流域在不同土地利用情景下月均径流变化趋势仍保持一致,均呈先增高后降低走向。其中 3—8 月为丰水期,径流量约占年径流总量的 72.23%,月径流量在

6 月达到最大值;9 月至翌年 2 月为枯水期,最小月径流量出现在 10 月左右。

按照丰水期和枯水期进行汇总统计,得到不同土地情景下多年月均径流量较基准情景变化情况,并计算涵养指数值,结果见表 4。

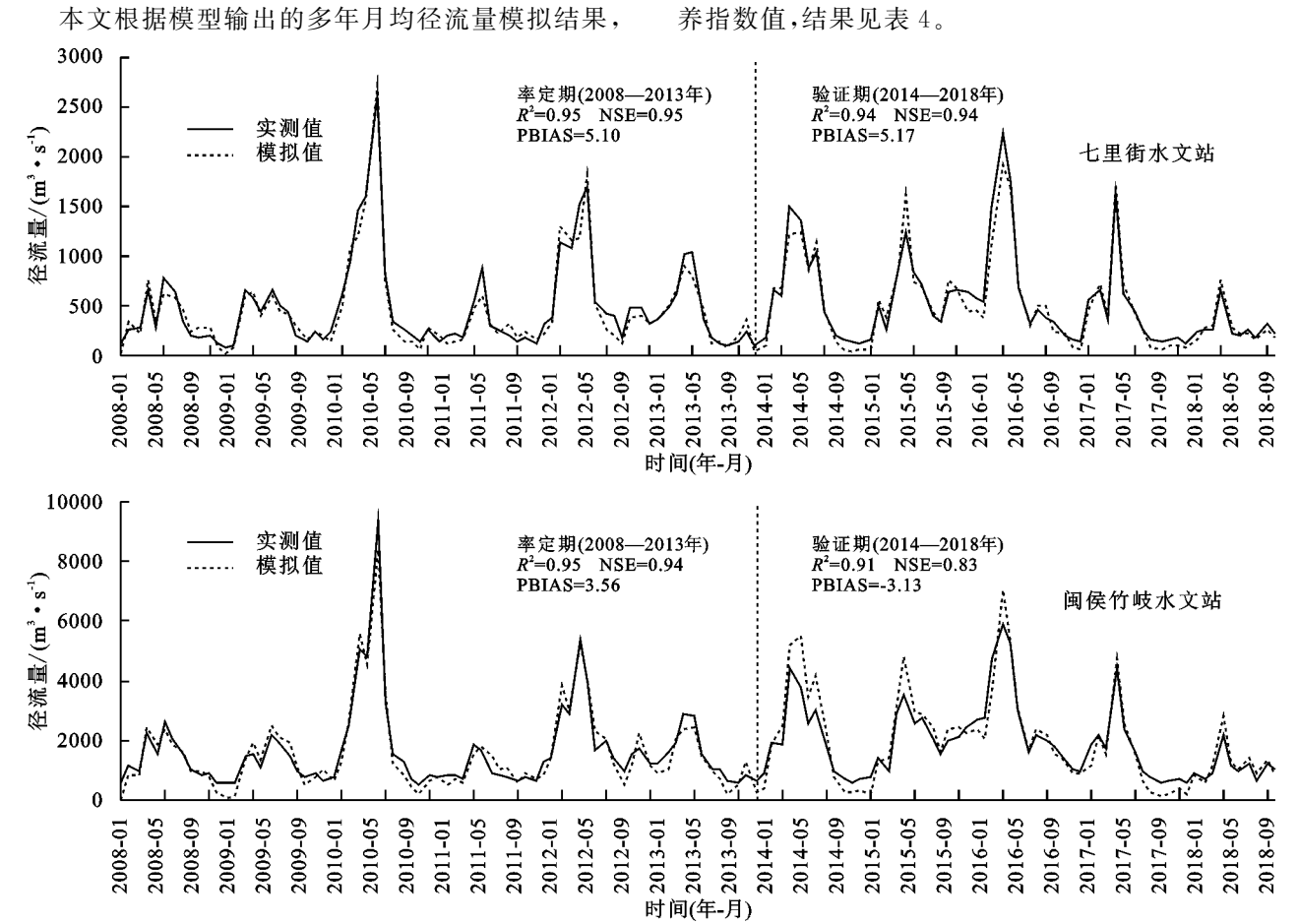


图 2 各水文站月径流模拟值与实测值拟合曲线

情景	S0	S1	S2	S3	S4
年均径流量/($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	278.22	312.74	341.90	266.85	273.73
年径流变差系数 C_v	0.318	0.321	0.324	0.314	0.316
较 S0 年均径流量变化率/%	—	12.41	22.89	-4.09	-1.61

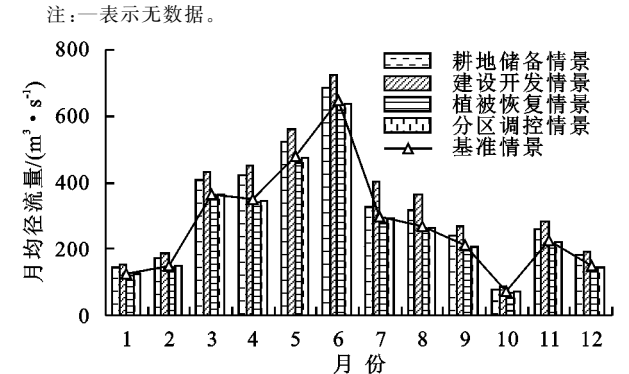


图 3 不同情景下多年月均径流量

由表 4 可知,基准情景下闽江流域的涵养指数值为 0.251,属于水源涵养能力较强地区,初步分析这与流域内林地面积占比高达 85%有关:闽江流域丰水期与雨季重叠^[30],林木发达的根系使得土壤蓬松度提高,地表凋零物阻碍径流,延长入渗时间,从而导致大量雨水下渗,降雨储量增加,以在枯水期间更好

地补给径流。而耕地储备、建设开发情景下,涵养指数值均低于基准情景,丰水期月径流增长量均高于枯水期,反映出耕地和建设用地 2 种土地利用类型对流域径流的调节能力较弱,但前者水源蓄积能力稍强于后者。植被恢复情景下水源涵养指数为 0.255,明显高于基准情景,丰水期月均径流减少量高于枯水期,分别为 16.1、6.6 m^3/s ,表明林地与草地类型的大面积增加,对流域内水源涵养、径流调节作用显著。相较于基准情景,分区调控情景中丰水期内月均径流减少量为 5.5 m^3/s ,枯水期为 3.5 m^3/s ,其值低于丰水期,表明研究流域内土地利用类型的空间布局较为合理,流域水源涵养能力增强,丰水期蓄积的水能够有效补给枯水期径流,从而改善年内径流分布不均状况,使得流域径流变化趋于稳定,因此该规划方案设置相对合理。

4 讨论

目前在流域土地利用类型变化的径流响应相关研究中,对同一土地利用类型面积的增加,能够减缓或加剧流域径流量的问题上还未达成一致。初步分析这种研究结果差异是由于各地区地理特性不同导

致,受当地气候降水、地形地貌等因素影响。就林地、草地而言,郝芳华等^[31]以洛河流域为研究区,通过设置 3 种土地利用情景发现,林地类型比耕地类型产流作用更为明显。郭军庭等^[5]发现,潮河流域草地覆盖

情景中径流增加 4.1%,耕地情景下径流却有所减少。本研究结果发现,林地与草地类型能有效涵养水源、减缓流域径流,这与林炳青^[32]在与闽江流域地理概况相似的晋江流域中的研究结果较为一致。

表 4 设置情景下丰水期与枯水期多年平均径流量变化与涵养指数

情景 设置	涵养 指数	丰水期月均径流量较 S0 变化/(m ³ ·s ⁻¹)							枯水期月均径流量较 S0 变化/(m ³ ·s ⁻¹)						
		3 月	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	平均	9 月	10 月	11 月	12 月	1 月	2 月	平均
基准情景	0.251				0							0			
耕地储备	0.248	44.2	69.3	43.1	37.1	27.6	46.0	44.6	30.2	8.1	35.6	32.4	17.9	22.8	24.5
建设开发	0.245	65.8	99.4	81.2	76.7	106.8	92.8	87.1	56.0	14.1	56.7	43.7	31.4	35.6	40.3
植被恢复	0.255	-5.1	-8.9	-19.0	-32.4	-18.5	-12.9	-16.1	-13.9	-1.6	-6.9	-7.3	-2.5	-7.5	-6.6
分区调控	0.254	-2.4	-3.8	-5.5	-10.6	-5.7	-4.9	-5.5	-6.4	-0.3	-4.7	-6.4	-1.6	-1.7	-3.5

本研究发现,依据《福建省土地利用总体规划(2006—2020 年)》设计的闽江流域分区调控情景,既可以有效减缓流域径流、改善年内径流分布,又能稳定径流年际变化,降低流域洪涝灾害发生概率,为流域可持续发展奠定生态基础,因此可考虑在闽江流域后期土地利用格局调整中延续该方案,以期为闽江流域土地利用发展规划提供参考。

此外,由于流域气象站与水文站实测数据较少,本文在水文参数的率定工作上存在一定的不确定性,望在后续的研究中获取到更多的流域水文站点实测径流数据,以完善闽江流域水文分布式模型,将其更好地应用于流域水文及污染物研究中。

5 结论

(1)闽江流域 SWAT 模型率定过程中,CN2、CANMX、ESCO、CH_K2、ALPHA_BF 等水文参数对流域内径流的产生最为敏感,率定期和验证期的评价指标 $R^2>0.9$, $NSE>0.8$ 且 $|PBIAS|<10\%$,符合模型径流模拟要求,表明该模型适用于闽江流域径流模拟工作。

(2)不同土地利用情景下,闽江流域多年平均径流量与年径流变差系数 C_v 值变化趋势一致,由大到小依次为:建设开发、耕地储备、基准情景、分区调控、植被恢复,说明林地和草地类型能有效减缓地表径流,稳定流域径流年际变化,耕地、建设用地类型产流作用明显。

(3)结合涵养指数,闽江流域多年月均径流量模拟结果表明,林地和草地类型涵养水源、调节径流作用较为显著;耕地、建设用地类型径流调节能力较差,但耕地水源涵养能力相对要优于建设用地。

(4)相较于基准情景,分区调控情景中,闽江流域年均径流量、 C_v 值降低,枯水期月均径流减少量为 $3.5\text{ m}^3/\text{s}$,低于丰水期减少的 $5.5\text{ m}^3/\text{s}$,涵养指数值增加,表明该土地利用规划方案既能有效减缓流域径流,改善年内径流分布不均状况,稳定径流年际变化,

又保证了区域粮食产量,推动工业经济发展,实现生态效益与经济效益两者协调共赢,为闽江流域科学高效、可持续的土地利用发展格局提供参考依据。

参考文献:

[1] 肖文魁.我国土地利用研究进展概述及展望[J].农业与技术,2019(11):37-39.

[2] Sananda K, Deepak K, Arun M. Past, present and future land use changes and their impact on water balance [J].Journal of Environmental Management,2017,197: 582-596.

[3] Zhou D P, Xu Z X, Yao W Y, et al. Assessing the effects of changes in land use and climate on runoff and sediment yields from a watershed in the Loess Plateau of China[J].Science of the Total Environment,2016,544:238-250.

[4] 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):130-134.

[5] 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.

[6] 李云翊.基于 SWAT 模型的抚河上游流域土地利用变化情景下的水文响应研究[D].南昌:南昌大学,2018.

[7] Chotpantarat S, Boonkaewwan S. Impacts of land-use changes on watershed discharge and water quality in a large intensive agricultural area in Thailand[J].Hydrological Siences Journal,2018,63(9/12):1386-1407.

[8] 秦文静,王云琦,王彬,等.土地利用和气候变化对王家桥小流域径流的影响[J].水文,2019,39(2):51-56.

[9] 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.

[10] 王学,张祖陆,宁吉才.基于 SWAT 模型的白马河流域土地利用变化的径流响应[J].生态学杂志,2013,32 (1):186-194.

[11] Golmar G, Ramesh R, Trevor D, et al. Predicting the temporal variation of flow contributing areas using SWAT[J].Journal of Hydrology,2017,547:375-386.

[12] 杨凯杰,吕昌河.SWAT 模型应用与不确定性综述[J].

- 水土保持学报, 2018, 32(1): 17-24, 31.
- [13] 李帅, 魏虹, 刘媛, 等. 气候与土地利用变化下宁夏清水河流域径流模拟[J]. 生态学报, 2017, 37(4): 1252-1260.
- [14] He Y, Song J X, Hu Y Y, et al. Impacts of different weather conditions and landuse change on runoff variations in the Beiluo River Watershed, China[J]. Sustainable Cities and Society, 2019, 50: 101674.
- [15] 程学宁, 汤云, 卢毅敏. 基于多元统计分析的闽江水质时空变化特征[J]. 水资源与水工程学报, 2016, 27(6): 89-94.
- [16] 王跃峰. 闽江流域降水径流时序变化特征与洪旱事件识别[D]. 福建: 福建师范大学, 2014.
- [17] 郭晓英, 陈兴伟, 陈莹, 等. 气候变化与人类活动对闽江流域径流变化的影响[J]. 中国水土保持科学, 2016, 14(2): 88-94.
- [18] 陈莹, 陈兴伟, 尹义星. 1960—2006 年闽江流域径流演变特征[J]. 自然资源学报, 2011, 26(8): 1401-1411.
- [19] 王跃峰, 陈莹, 陈兴伟. 基于 TFPW-MK 法的闽江流域径流趋势研究[J]. 中国水土保持科学, 2013, 11(5): 96-102.
- [20] Gong P, Li X C, Zhang W. 40-Year (1978—2017) human settlement changes in China reflected by impervious surfaces from satellite remote sensing[J]. Science Bulletin, 2019, 64(11): 756-763.
- [21] 姜晓峰, 王立, 马放, 等. SWAT 模型土壤数据库的本土化构建方法研究[J]. 中国给水排水, 2014, 30(11): 135-138.
- [22] 孙帅, 师春香, 潘畅, 等. CLDAS 长序列融合降水在中国区域的适应性评估[A]. 中国气象学会. 第 34 届中国气象学会年会 S20 气象数据: 深度应用和标准化论文集[C]. 中国气象学会, 2017: 101.
- [23] Jeff A, Daniel M, Philip G, et al. SWAT: Model use, calibration, and validation[J]. Transactions of the Asabe, 2012, 55(4): 1491-1508.
- [24] 季学武, 王俊. 水文分析计算与水资源评价[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2008.
- [25] 林怡彤. 基于 SWAT 模型的土地利用变化对流域径流的影响研究[D]. 南宁: 广西大学, 2018.
- [26] Abbaspour K C, Rouholahnejad E, Vaghefi S, et al. A continental scale hydrology and water quality model for Europe: Calibration and uncertainty of a high-resolution large-scale SWAT model[J]. Journal of Hydrology, 2015, 524: 733-752.
- [27] White K, Chaubey I. Sensitivity analysis, calibration, and validations for a multisite and multivariable SWAT model[J]. Journal of the American Water Resources Association, 2005, 41(5): 1077-1089.
- [28] 罗巧, 王克林, 王勤学. 基于 SWAT 模型的湘江流域土地利用变化情景的径流模拟研究[J]. 中国生态农业学报, 2011, 19(6): 1431-1436.
- [29] Moriasi D, Arnold J, VanLiew M, et al. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations[J]. Transactions of the Asabe, 2007, 50(3): 885-900.
- [30] 张章新. 闽江流域水文特性分析[J]. 水文, 2000, 20(6): 55-58.
- [31] 郝芳华, 陈利群, 刘昌明, 等. 土地利用变化对产流和产沙的影响分析[J]. 水土保持学报, 2004, 18(3): 5-8.
- [32] 林炳青. 流域景观格局变化对不同时间尺度径流影响的 SWAT 模型分析[D]. 福建: 福建师范大学, 2014.
- (上接第 29 页)
- [20] 黄凯旋, 刘扬, 董晓健, 等. 基于土地利用变化的三峡库区(湖北段)土壤侵蚀消长研究[J]. 水土保持研究, 2020, 27(1): 1-6, 20.
- [21] 朱林富, 谢世友, 杨华, 等. 基于 MODIS EVI 的重庆植被覆盖变化的地形效应[J]. 自然资源学报, 2017, 32(12): 2023-2033.
- [22] 张园, 袁凤辉, 王安志, 等. 2001—2018 年长白山自然保护区生长季 NDVI 变化特征及其对气候变化的响应[J]. 应用生态学报, 2020, 31(4): 1213-1222.
- [23] 庄大方, 刘纪远. 中国土地利用程度的区域分异模型研究[J]. 自然资源学报, 1997, 12(2): 10-16.
- [24] 普拉提·莫合塔尔, 海米提·依米提. 土地利用变化下的生态系统服务敏感性研究: 以克里雅绿洲为例[J]. 自然资源学报, 2014, 29(11): 1849-1858.
- [25] 刘永强, 龙花楼, 李加林. 长江中游经济带土地利用转型及其生态服务功能交叉敏感性研究[J]. 地理研究, 2018, 37(5): 1009-1022.
- [26] 柳冬青, 巩杰, 张金茜, 等. 甘肃白龙江流域生态系统土壤保持功能时空变异及其影响因子[J]. 水土保持研究, 2018, 25(4): 98-103.
- [27] 方广玲, 香宝, 赵卫, 等. 基于 GIS 和 RUSLE 的拉萨河流域土壤侵蚀研究[J]. 水土保持学报, 2015, 29(3): 6-12.
- [28] 吴盛海. 2016 年重庆市水土保持公报[M]. 重庆: 重庆市水利局, 2016: 2-3.
- [29] 冉凤维, 罗志军, 吴佳平, 等. 鄱阳湖地区生态系统服务权衡与协同关系的时空格局[J]. 应用生态学报, 2019, 30(3): 995-1004.