晋江西溪流域土地利用变化的输沙响应

吴慧凤[1,2,3], 陈 莹[1,2,3]

(1. 福建师范大学 地理研究所, 福建 福州 350007; 2. 福建师范大学 湿润亚热带山地生态国家重点实验室培养基地, 福建 福州 350007; 3. 福建省陆地灾害监测评估工程技术研究中心, 福建 福州 350007)

摘 要: [目的] 对晋江西溪流域不同子流域的产沙情况进行模拟与分析,并模拟单一土地利用类型对输沙量的影响,为晋江流域水资源质量改善提供科学支撑。[方法] 构建流域月产沙的 HSPF(hydrological simulation program in fortran)模型,分析实际情况下的产沙情况,模拟园地、耕地和林地 3 种不同极端土地利用情景对流域输沙量的影响。[结果] ①月泥沙的相关系数(R^2)、Nash-Suttcliffe 效率系数(Ens)、相对误差(R_e)在率定期分别为 0.849,0.789 和 −5.720%,在验证期分别为 0.836,0.837 和 10.790%,模型具有较高的精度; ②年平均产沙量较高的地区主要分布在园地和耕地比例相对较高区域; ③从年尺度上看,园地、耕地和林地情景的输沙量与基期相比变化情况分别为 23.56%,20.39%和 −17.42%。从月尺度上看,所有情景在丰水期的输沙量都大于枯水期,其中 5 月和 7 月 3 种土地利用情景的输沙量表现为:耕地>园地>林地,6 月和 8 月 3 种土地利用情景的输沙量表现为:园地>耕地>林地; ④山地茶果园不合理开发和坡耕地比重较大且没有采取合适的水土保持措施是园地和耕地情景年输沙量上升的主要原因,林地遭受破坏且林种结构不合理是林地情景降低输沙量有限的主要原因。[结论] HSPF 模型在流域输沙量模拟中具有较高精度;研究区园地和耕地导致输沙量上升,林地可降低输沙量但降低幅度有限。

关键词: 土地利用变化; HSPF 模型; 输沙量; 西溪流域; 水利资源的管理; 保护与改造

文献标识码: A **文章编号**: 1000-288X(2019)04-0048-06 **中图分类号**: TV213.4

文献参数: 吴慧凤, 陈莹. 晋江西溪流域土地利用变化的输沙响应[J]. 水土保持通报, 2019, 39(4): 48-53. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2019.04.008; Wu Huifeng, Chen Ying. Sediment discharge response to land-use change in Xixi basin of Jinjiang River[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2019, 39(4): 48-53.

Sediment Discharge Response to Land-use Change in Xixi Basin of Jinjiang River

Wu Huifeng[1,2,3], Chen Ying[1,2,3]

(1. *Institue of Geography, Fujian Normal University, Fuzhou, Fujian* 350007, *China*; 2. *State Key Laboratory for Subtropical Mountain Ecology of the Ministry Science and Technology and Fujian Province, Fujian Normal University, Fuzhou, Fujian* 350007, *China*; 3. *Fujian Provincial Engineering Research Center for Monitoring and Assessing Terrestrial Disasters, Fuzhou, Fujian* 350007, *China*)

Abstract: [Objective] The sediment yield of sub-watersheds in the real situation was analyzed, and the impact of single land use type on sediment yield was simulated in the control area of the Anxi hydrological station in the Xixi watershed of Jinjang basin in order to provide scientific support for the management of water resource in the basin. [Methods] HSPF (hydrological simulation program in Fortran) was applied to simulate the sediment discharge under three extreme land use change. [Results] ① R^2, Ens, and R_e were 0.849, 0.789, and −5.720% in the calibration period, respectively, and were 0.836, 0.837, and 10.790% in verification period, respectively, indicating the high precision of HSPF. ② The areas with higher annual average sediment yield are mainly distributed in areas with relatively high proportion of garden and forest. ③ From the perspective of yearly scale, comparing to the measured values in 2006, the sediment discharge increased 23.56% under garden scene, increased 20.39% under cropland scene, decreased 17.42% under forest scene. From the perspective of monthly scale, the sediment discharges of all the scenes during the wet period were greater than that of the dry period. The sediment discharge of the three landuse scene in May and

收稿日期: 2019-01-17 **修回日期**: 2019-02-06

资助项目: 国家自然科学基金项目"土地利用变化对流域洪水风险的影响及其不确定性分析"(41301031); 福建省科技厅省属公益类科研专项"晋江流域非一致性洪水风险演变与归因"(2018R1034-3)

第一作者: 吴慧凤(1995—),女(汉族),福建省泉州市人,硕士研究生,主要研究方向为水资源与水环境。E-mail: 305630513@qq.com。

通讯作者: 陈莹(1982—),女(汉族),福建省南平市人,博士,副教授,主要从事水资源与水环境方面的研究。E-mail: chenying_nju@163.com。

July was: cropland > garden > forest, while sediment discharge in June and August was: garden > cropland > forest. ④ The unreasonable development of mountain tea orchard and the large proportion of sloping farmland and the lack of appropriate soil and water conservation measures are the main reasons for the increase of sediment discharge in the garden and cropland. The damage of forest and the unreasonable forest category structure are the reasons for the limited amount of reducing sediment discharge of forest scene. [Conclusion] HSPF has high precision in the simulation of sediment yield in watersheds; Garden plot and cultivated land could result in the increase of sediment yield, and forest land could result in the decrease of sediment yield while its amplitude was limited in the study area.

Keywords: land use change; HSPF model; sediment discharge; the Xixi watershed

输沙量是河流水文特征和地球化学循环的重要参数之一[1]，也是土壤侵蚀过程的一个总体度量[2]。输沙量变化直接影响流域水资源的合理配置、开发与利用，可对流域地貌演变、产流产沙特性及水域生态系统等产生重要影响[3]。输沙量变化的主导影响因素之一是土地利用变化。土地利用变化(如水利工程建设、毁林造林、城市化等)显著改变了下垫面条件，如地表蒸发、土壤水分状况及地表覆被截留量，从而导致输沙量相应发生变化[4]。世界范围内由于土地利用变化引起的输沙量明显增长，给人类生存环境带来诸如土壤侵蚀严重等问题[5]。目前，随着计算机技术和“3S”技术的广泛使用，流域水文水质模型已从经验模型、概念性集总模型发展到基于物理基础的分布式水文模型[6]，从而有效提高了流域尺度的输沙研究。借助水文模型进行情景模拟，能够根据需要设立不同土地利用变化情景，评价其对输沙量的影响[7]。对此国外相关研究起步较早[8]，但近年来国内已有众多学者相继分析农用地[5]、林地[9]、城镇快速扩张区域[10]等与输沙量的关系，并在此基础上探讨土地利用变化下的流域优化管理模式及措施。由于土地利用变化对输沙量影响的复杂性和多样性，相关机理和规律仍是流域水文模拟、流域开发治理研究的薄弱环节[5]。为此，本研究选择福建省泉州市西溪流域为研究区，采用“3S”技术和 HSPF 模型(hydrological simulation program in Fortran)，研究现状情景下不同子流域的产沙情况，并设计不同的极端土地利用情景，定量分析单一土地利用类型对流域输沙量的影响，旨在为晋江流域水资源管理和可持续发展提供科学依据。

1　研究区概况

西溪发源于福建省泉州市安溪县的感德乡达新村，为晋江的正源，经过安溪县和永春县等行政区，属于山区性河流[11]。本研究以安溪水文站控制区为研究区，流域面积 2 450 km^2，并根据其水系特征划分出 54 个子流域(图 1)。该流域地处低纬度带，气候属亚热带海洋性季风气候；地形以山地丘陵为主，坡耕地面积占比较大；植被属中亚热带常绿阔叶林植被带；土壤主要为红壤和砖红壤性红壤，风化壳深厚疏松；降水量丰富且集中在 7—9 月，其间降水量可占全年的 37%～39%；由于降水集中，坡度较大，加上人为活动频繁，因而水土流失分布较广[12]；2006 年研究区建设用地、水域、园地、耕地、林地、草地和未利用地的面积比例分别为 7.77%，1.23%，20.97%，12.25%，55.65%，0.78%和 1.35%。

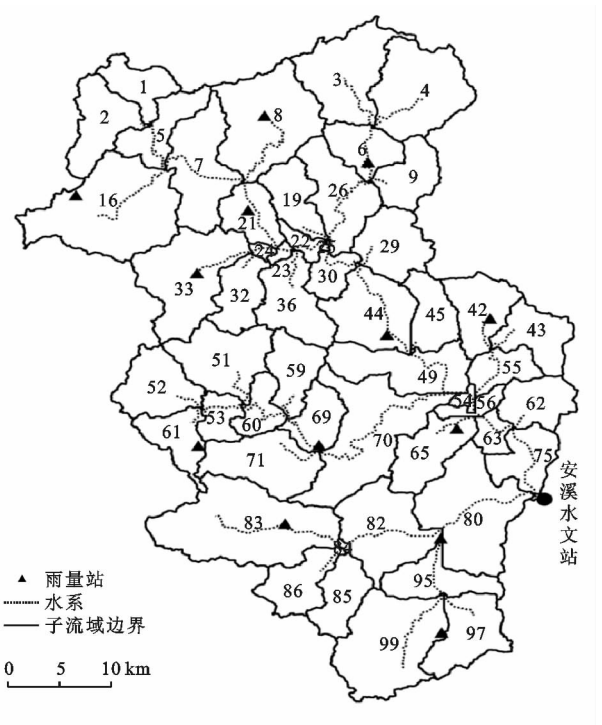


图 1　研究区水文台站和子流域划分

2　研究方法

2.1　HSPF 模型数据准备

HSPF 模型构建所必须的数据主要包括：①流域的数字高程模型(DEM)。来自“中国科学院国际科学数据服务平台”(http://datamiffor.csdb.cn/admin/datademMain/jsp)，空间分辨率为 30 m，用于划分子流域和确定水系；②土地利用数据。解译自研究区 2006

年 TM 遥感影像[13]，其土地利用类型分为耕地、园地、林地、草地、建设用地、水域和未利用地 7 种；③气象数据。包括 2006—2010 年永春和德化两个气象站日最高气温及最低气温、相对湿度和风速，降水、蒸散发、潜在蒸散发、太阳辐射、露点温度、云量，雨量站日降雨量数据，数据来源于福建省气象局，并利用 HSPF 模型的 Jensen PET 方法离散成小时尺度的数据；④径流和泥沙数据。包括 2006—2010 年安溪水文站的日径流和输沙量数据，数据来源于福建省水文局。

2.2 输沙模拟

在 HSPF 模型中，径流模拟是以 Stanford Ⅳ模型为基础，主要包括产流和汇流，其中汇流部分主要通过 RCHRES 模块进行模拟。输沙模拟是在校准好的径流模拟的基础上进行，主要分为两部分：泥沙与土壤基质之间的吸附和分离过程及泥沙在地表的搬迁过程[14]。HSPF 模型考虑了雨滴溅蚀，径流冲刷和泥沙在河道中的输移、淤积和冲蚀过程；透水地面的模拟是在 SEDIMNT 模块中完成，主要包括由降水引起泥沙与土壤基质的分离过程和地表径流对泥沙的搬迁过程[15]；不透水地面对泥沙的模拟是在 SOLIDS 模块中完成，仅涉及地表径流对泥沙的搬迁[15]；河道中泥沙的模拟是在 SEDTRN 模块中进行，主要考虑水流演进中泥沙在河道的传输。泥沙进入河道后，不同粒径（沙粒、粉粒和黏粒）泥沙在河床不同区域沉降，因此沙粒负荷计算采用幂级数函数法，粉沙和黏粒的传输、沉降及冲刷是依据临界剪切应力原理进行计算[14]。

2.3 模型的率定和验证

本研究在日产流模型的基础上[16]，参考相关文献中泥沙的 18 个敏感性参数及其相应范围[14]（表 1），通过手动率定的方式，选取相关系数（R^2）、Nash-Suttcliffe 效率系数（Ens）和相对误差（R_e）等评价模型模拟精度，建立西溪流域的月输沙模型。其中，2006—2008 年作为模型的率定期，2009—2010 年作为模型的验证期。R^2，Ens 和 R_e 表达式分别为[14]：

$$R^2=\frac{\left[\sum_{i=1}^{n}(Q_{obi,i}-Q_{obs,ave})(Q_{sim,i}-Q_{sim,ave})\right]^2}{\sum_{i=1}^{n}(Q_{obs,i}-Q_{obs,ave})^2\cdot\sum_{i=1}^{n}(Q_{sim,i}-Q_{sim,ave})^2} \quad (1)$$

$$\mathrm{Ens}=1-\frac{\sum_{i=1}^{n}(Q_{obs,i}-Q_{sim,i})^2}{\sum_{i=1}^{n}(Q_{obs,i}-Q_{obs,ave})^2} \quad (2)$$

$$R_e=\frac{\sum_{i=1}^{n}(Q_{obs,i}-Q_{sim,i})}{\sum_{i=1}^{n}Q_{obs,i}} \quad (3)$$

式中：$Q_{sim,i}$——模拟值；$Q_{obs,i}$——观测值；$Q_{obs,ave}$——观测值的平均值；$Q_{sim,ave}$——模拟值的平均值。R^2，Ens——模拟值与实测值的吻合程度；R_e——模拟值与实测值的偏离程度。通常，R^2 与 Ens 越接近 1，即实测值与模拟值越接近，则模拟效果越好。R^2 与 Ens 表征模拟效果的划分标准为：Ens 或 $R^2>0.9$，优秀；$0.75<$Ens 或 $R^2<0.9$，优良；$0.5<$Ens 或 $R^2<0.75$，良好，Ens 或 $R^2<0.5$，较差[15]。R_e 表征模拟效果的划分标准为：$|R_e|<20\%$，非常好；$20\%<|R_e|<30\%$，好；$30\%<|R_e|<45\%$，差[15]。

表 1 HSPF 模型泥沙参数率定结果

模块	参数	参数含义	经典范围	率定值
PERLND	KRER	泥沙分离系数	0.15～0.45	1～2
	JRER	泥沙分离方程指数	1～3	2.6
	AFFIX①	土壤紧实度影响系数	0.01～0.50	0.001～0.5
	COVER①	土地覆盖中抗侵蚀的百分比	0～0.98	0.88
	NVSI	泥沙搬迁速度	0～20	0.001～5
	KSER	泥沙冲刷方程系数	0.1～10.0	12.0
	JSER	泥沙冲刷方程指数	1～3	1.9
	KGER	泥沙冲蚀方程系数	0～10	0.404 43
	JGER	泥沙冲蚀方程指数	1～5	0.7
IMPLND	KEIM	固定颗粒冲刷方程系数	0.1～10.0	2
	JEIM	固定颗粒冲刷方程指数	1～3	4
	ACCSDP	固定颗粒堆积速度	0～30	0.03
	REMSDP	固定颗粒搬迁速度	0.01～1.00	0.5
RCHRES	KSAND	砂粒运动幂函数系数	>0	2
	EXPSND	砂粒运动幂函数指数	>0	0.2
	TAUCS	河床冲蚀临界切应力	>1 E−10	0.3
	TAUCD	河床起动临界切应力	>1 E−10	0.618 61
	M	泥沙侵蚀度系数	>0	0.01

注：①随土地利用类型变化取值不同。

2.4　极端土地利用变化情景设置

研究区的主要土地利用类型为园地、耕地和林地,三者占流域面积的比例共计 88.87%。因此,本研究设计了三种极端土地利用情景,即保留研究区内的建设用地及水域,将其余土地利用类型分别设置为园地、耕地和林地(表 2)。基于 2006—2010 年的气象资料,移植已率定好的相关泥沙参数值,对不同情景下的月输沙过程进行模拟。

表 2　研究区极端土地利用情景的面积比例　　%

情景设置	建设用地	水域	园地	耕地	林地	草地	未利用地
基期	7.77	1.23	20.97	12.25	55.6%	0.78	1.35
情景 1	7.77	1.23	91.00	0	0	0	0
情景 2	7.77	1.23	0	91.00	0	0	0
情景 3	7.77	1.23	0	0	91.00	0	0

3　结果与讨论

3.1　模型率定与验证

采用 HSPF 模型对研究区月输沙过程进行模拟,并对该流域 2006—2010 年的月输沙量进行率定与验证,模拟结果如图 2 所示。该流域率定期的 R^2 和 Ens分别为 0.849 和 0.789,同时验证期的 R^2 和 Ens 分别为 0.836 和 0.837,均大于 0.75,表示运用该模型对该流域的月输沙量进行模拟达到了优良水平;率定期和验证期的 均小于 20%,相对误差较小(表 3)。

表 3　研究区月输沙量模拟精度

时期	R^2	Ens	R_e
率定期(2006—2008 年)	0.849	0.789	−5.720%
验证期(2009—2010 年)	0.836	0.837	10.790%

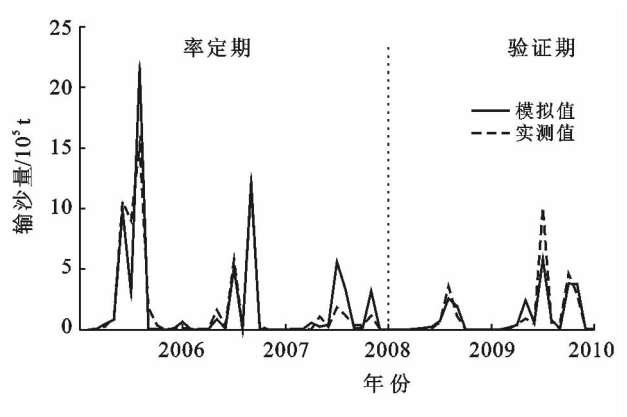


图 2　研究区 2006－2010 年月输沙量模拟值与实测值

3.2　现状情景下各子流域的产沙情况分析

2006—2010 年研究区年平均产沙量较高的地区主要分布在流域中下游的子流域,即 6,26,54,56,63,75,30,44,49,80 号等,主要覆盖安溪县的凤城镇、魁斗镇、剑斗镇、官桥镇和龙门镇,永春县的坑仔口镇及玉斗镇等地区(图 3)。与研究区其他区域相比,上述区域的园地和耕地的比例均相对较高(图 4)。

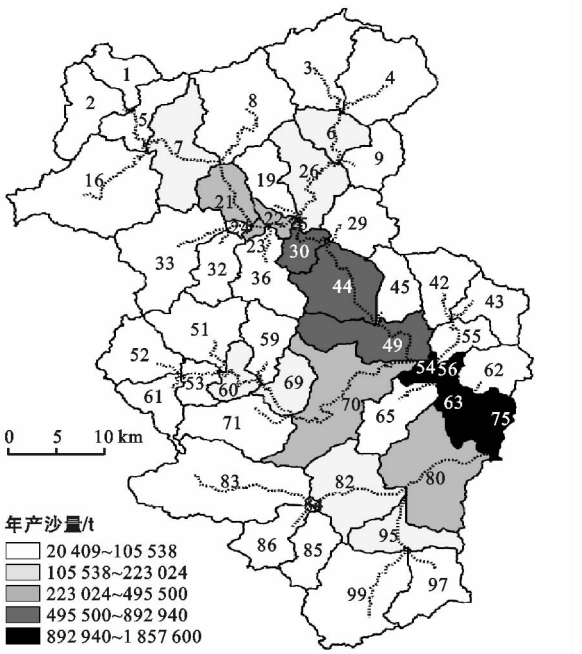


图 3　研究区 2006－2010 年各子流域的年平均产沙量分布

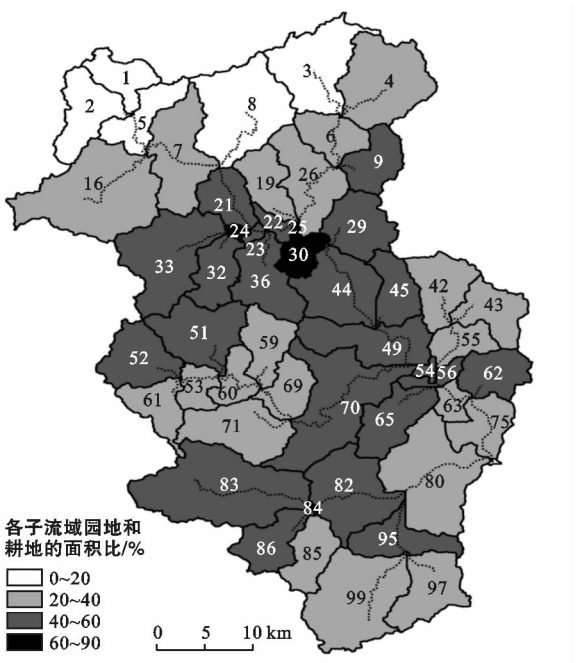


图 4　研究区 2006 年各子流域园地和耕地比例

3.3 不同土地利用变化情景的输沙响应分析

从年尺度上看，与 2006—2010 年基期情境下的输沙量模拟值相比，园地情景的输沙量增加了 23.56%，耕地情景的输沙量增加了 20.39%，林地情景的输沙量减少了 17.42%(表 4 和图 5)。从月尺度上看，所有情景在丰水期(4—10 月)的输沙量都大于枯水期(11 月至次年 3 月)，其中 5 月和 7 月 3 种土地利用情景的输沙量表现为：耕地＞园地＞林地，6 月和 8 月 3 种土地利用情景的输沙量表现为：园地＞耕地＞林地。

表 4 研究区极端土地利用情景 2006－2010 年总输沙量模拟结果

情景设置	情景说明	输沙量/t	变化比例/%
基期	2006 年土地利用类型	9.29E+6	0
情景 1	园地情景	1.15E+7	+23.56
情景 2	耕地情景	1.12E+7	+20.39
情景 3	林地情景	7.67E+6	−17.42

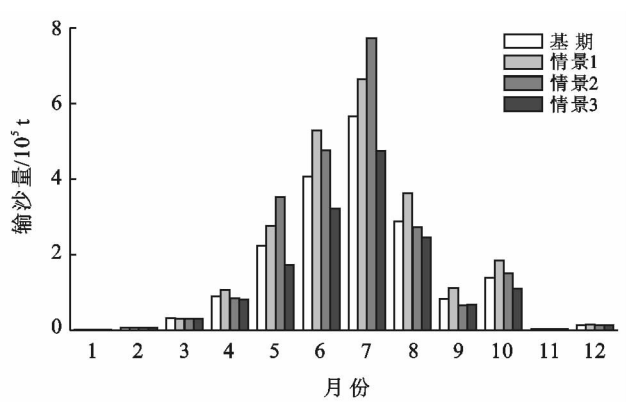


图 5 研究区 2006－2010 年极端土地利用情景的月输沙量变化

3.4 土地利用变化对输沙量影响的原因

研究区内安溪县和永春县占流域面积的 74.39%，是该流域的主要行政区。由于研究区的海洋性季风气候明显，温暖湿润、雨量充沛，水热资源丰富，两地广泛种植水稻、茶叶和芦柑等作物，耕地和园地的比重较大。已有研究发现，安溪县 2007 年和 2012 年园地水土流失率最大，分别为 50.29%和 55.87%。山地茶果园不合理开发是水土流失的主要原因，尤以新开垦的茶果园为主[17]。近年来，安溪县山地新建茶园普遍存在机械开挖建园、超坡度开垦、一垦到顶、“三面光”清耕作业及缺乏有效的水土保持措施等问题，使其幼龄茶园广泛种植[18]。陈小英等[19]表明，幼龄茶园年土壤流失量可达 4 500 t/km² 以上，土壤侵蚀强度为中度甚至极强烈[20]。①在耕地情景方面。本研究结果表明耕地面积增加导致年输沙量上升。研究区坡耕地(6°～25°)面积占耕地面积的 55.50%，其中坡耕地(15°～25°)占耕地面积的 24.04%，且多采取顺坡开垦方式，没有采取合适的水土保持措施，因而产生较大的输沙量，这一结果与林文娇和陈兴伟在晋江流域东溪流域的研究结果较为一致。并且该文献的结果表明耕地是造成土壤侵蚀的主要因素之一[21]。②在林地情景方面。本研究表明林地情景导致年输沙量减少，但仅减少 17.42%。已有学者[22]研究表明，输沙量随森林覆盖率的增大呈下降趋势，森林覆盖率分别增加到46.98%，68.12%和 89.8%时，输沙量可分别减小 18.73%，68.40%和 76.98%。长期以来重伐轻抚，过度砍伐，造成大量原生植被遭到破坏，天然阔叶林减少，代之以次生林和人工林，幼林比重明显偏大，林种结构上针叶林比重过大，森林涵养水源能力明显下降，削弱了森林调节径流的能力[23]。吴彩莲[24]研究安溪县官桥镇林地针叶化发现，马尾松纯林地土壤保持量最小，比阔叶林地多流失土壤7 442.7 t/(km² · a)。因此，即使部分区域森林覆盖率较高，但由于树种结构不合理以及人为干扰，土壤裸露程度较高，易造成中度甚至强烈以上的水土流失[25]。由于研究区位于东南沿海，丰水期的降水量占全年的 77.41%，且丰水期也是台风多发时期，高强度降水使其土壤侵蚀较为严重，从而导致高输沙量[26]。5 月和 7 月耕地情景下的输沙量大于园地，6 月和 8 月则反之，这一原因还需进一步深入研究。

4 结 论

本研究基于 HSPF 模型构建了西溪流域产沙模型，分析实际情况下的产沙情况，再通过设置 3 种极端土地利用情景，定量分析了园地、耕地和林地情景下流域的输沙量。结果表明，HSPF 模型在流域输沙量模拟中具有较高精度；年平均产沙量较高的地区主要分布在园地和耕地比例相对较高区域；从年尺度上看，园地和耕地情景均导致年输沙量上升，而林地情景导致年输沙量下降，但减少的幅度相对较小。从月尺度上看，所有情景在丰水期的输沙量都大于枯水期；山地茶果园不合理开发和坡耕地比重较大且没有采取合适的水土保持措施分别是园地和耕地情景年输沙量上升的主要原因，林地遭受破坏且林种结构不合理是林地情景降低输沙量有限的主要原因。

[参 考 文 献]

[1] 李志强，齐述华，刘旗福，等. 1981—2013 年桃江流域径流与泥沙模拟研究[J]. 水土保持通报，2018，38(1)：203-

207,213.
[2] 郭小云,刘志辉,姚俊强,等.天山北坡中小流域输沙量变化及其影响因素:以呼图壁河流域为例[J].水土保持研究,2016,23(1):145-149.
[3] 王昱,连运涛,范严伟,等.黑河流域上游水沙变化特征及成因分析[J].水土保持通报,2018,38(2):1-7.
[4] 刘惠英.赣江上游章水流域水沙变化的驱动力分析[J].长江流域资源与环境,2018,27(3):615-623.
[5] 张晓明,曹文洪,余新晓,等.黄土丘陵沟壑区典型流域径流输沙对土地利用/覆被变化的响应[J].应用生态学报,2009,20(1):121-127.
[6] 余钟波.流域分布式水文学原理及应用[M].北京:科学出版社,2008.
[7] 韩莉,刘素芳,黄民生,等.基于 HSPF 模型的流域水文水质模拟研究进展[J].华东师范大学学报:自然科学版,2015,2015(2):40-47.
[8] Ficklin D L, Luo Yuzhou, Luedeling E, et al. Climate change sensitivity assessment of a highly agricultural watershed using SWAT [J]. Journal of Hydrology, 2009,374(1):16-29.
[9] Liu Z, Tong S T Y. Using HSPF to model the hydrologic and water quality impacts of riparian land-use change in a small watershed [J]. Journal of Environmental Informatics, 2011,17(1):1-14.
[10] Zhou Feng, Xu Youpeng, Chen Ying, et al. Hydrological response to urbanization at different spatio-temporal scales simulated by coupling of CLUE-S and the SWAT model in the Yangtze River Delta region [J]. Journal of Hydrology, 2013,485(485):113-125.
[11] 荣琨,陈兴伟,刘梅冰,等.晋江西溪流域土地利用变化对非点源污染影响的 SWAT 模拟[J].农业环境科学学报,2009,28(7):1488-1493.
[12] 王林,张明旭,陈兴伟.基于 SWAT 模型的晋江西溪流域径流模拟[J].亚热带资源与环境学报,2007,2(1):28-33.
[13] 杨柳.泉州山美水库集水区土地利用与覆被变化的水文响应[D].福建 福州:福建师范大学,2013.
[14] 李燕.基于 HSPF 模型的水文水质过程模拟研究[D].江苏 南京:南京农业大学,2013.
[15] 罗川,李兆富,席庆,等. HSPF 模型水文水质参数敏感性分析[J].农业环境科学学报,2014,33(10):1995-2002.
[16] 杨博,陈莹,陈兴伟,等.基于 PEST 的 HSPF 模型径流模拟优化[J].中国水土保持科学,2018,16(2):9-16.
[17] 汪水前.福建省安溪县水土流失动态监测变化分析及防治建议[J].亚热带水土保持,2014,26(2):35-38.
[18] 林道华.浅谈福建省泉州市山地茶果园水土流失防治对策[J].亚热带水土保持,2014,26(2):25-27.
[19] 陈小英,查轩,陈世发.山地茶园水土流失及生态调控措施研究[J].水土保持研究,2009,16(1):51-54.
[20] 颜沧波.泉州市果茶园土壤侵蚀原因及防治对策[J].亚热带水土保持,1999(3):23-25,52.
[21] 林文娇,陈兴伟.山美水库集水区植被恢复效应的 SWAT 模拟[J].水资源与水工程学报,2008,19(6):81-83.
[22] 唐丽霞.黄土高原清水河流域土地利用/气候变异对径流泥沙的影响[D].北京:北京林业大学,2009.
[23] 谢建华.浅谈福建省中央苏区县水土流失综合治理:以建宁县大南小流域为例[J].亚热带水土保持,2011,23(3):41-44.
[24] 吴彩莲,查轩.福建省土地利用/覆被变化对区域生态环境影响研究[J].水土保持通报,2004,24(6):41-44.
[25] 何绍浪,何小武,李凤英,等.南方红壤区林下水土流失成因及其治理措施[J].中国水土保持,2017(3):16-19.
[26] 周曼.南方红壤区强度开发小流域泥沙来源分析[D].福建 福州:福建农林大学,2018.

(上接第 47 页)

[13] 毕华兴,张建军.适用于测钎法的土壤侵蚀最低模数阈值探讨[J].中国水土保持科学,2016(5):119-122.
[14] 熊康宁,李晋,龙明忠.典型喀斯特石漠化治理区水土流失特征与关键问题[J].地理学报,2012,67(7):878-888.
[15] 赵晓丽,张增祥,刘斌,等.基于遥感和 GIS 的全国土壤侵蚀动态监测方法研究[J].水土保持通报,2002,22(4):29-32.
[16] 李智广,杨胜天,高云飞,严慕绥,曾红娟.土壤侵蚀遥感监测方法及其思考[J].中国水土保持科学,2008,6(3):7-12.
[17] 李恩.浅议水土流失监测与调查方法[J].水土保持应用技术,2006(6):19-20.
[18] 席有.坡度影响土壤侵蚀的研究[J].中国水土保持,1993(4):19-21.
[19] 刘青泉,陈力,李家春.坡度对坡面土壤侵蚀的影响分析[J].应用数学和力学,2001,22(5):449-457.
[20] Dai Nagamatsu, Osamu M. Soil disturbance regime in relation to micro-scale landforms and its effects on vegetation structure in a hilly area in Japan[J]. Plant Ecology, 1997,133(2):191-200.
[21] 武文波,姬翠翠,李晓松等.影响土壤水蚀的环境因子分析[J].中国水土保持,2010(5):36-38.