基于子流域土地覆被变化的产流产沙效应模拟

高 杨[1], 陈兴伟[2], 张红梅[3]
(1. 宿州学院 地球科学与工程学院, 安徽 宿州 234000; 2. 福建师范大学 地理科学学院, 福建 福州 350007; 3. 安徽理工大学 地球与环境学院, 安徽 淮南 232001)

摘 要: 应用分布式水文模型 SWAT 进行了晋江西溪流域 1985 和 2001 年两期土地覆被条件下的产流产沙模拟,分别从整个流域尺度和子流域尺度定量分析了不同土地覆被类型的水文效应。结果表明,土地覆被变化对于整个流域产流量影响不大,对产沙量影响显著。不同子流域的产流产沙变化分析结果表明,其他条件相同的情况下,林地相对于其他土地覆被类型具有明显的减水减沙作用,其次是园地,再者是耕地和草地。建设用地在各土地覆被类型中增水增沙作用最为显著。

关键词: 土地覆被变化; SWAT; 子流域; 产流量; 产沙量
文献标识码: A **文章编号**: 1000-288X(2012)04-0075-05 **中图分类号**: S154.1, P333

Simulating Responses of Runoff and Sediment Yield to Land-cover Changes in Sub-basins

GAO Yang[1], CHEN Xing-wei[2], ZHANG Hong-mei[3]
(1. *School of Earth Sciences and Engineering, Suzhou College, Suzhou, Anhui* 234000, *China*;
2. *School of Geographical Sciences, Fujian Normal University, Fuzhou, Fujian* 350007, *China*;
3. *School of Earth and Environment, Anhui University of Science and Technology, Huainan, Anhui* 232001, *China*)

Abstract: In order to evaluate the influences of land-cover changes on surface runoff and sediment yield, two different land-cover data (1985, 2001) in Xixi watershed of Jinjiang Basin were applied to the distributed SWAT (soil and water assessment tool) model. Quantitative results were obtained separately for the whole basin and subbasins. The results show that the effects of land-cover change was little to the runoff yield, while was significant to the sediment yield on the whole basin. Land-cover changes in sub-basins indicated that forest was the most important land use type for decreasing the runoff and sediment yield, orchard is the second, and followed by farmland and grassland. On the contrary, construction land contributed most for the increase of runoff and sediment yield.

Keywords: land-cover changes; SWAT; sub-basins; runoff yield; sediment yield

随人类活动强度日益增大,流域内土地利用方式转变加快,不同土地覆被类型对径流及泥沙形成过程中的水分蒸散发、截留、下渗、产汇流、土壤侵蚀等环节影响各有不同,流域土地覆被变化必然会对流域内产流产沙状况产生影响。SWAT(soil and water assessment tool)模型由美国农业部(USDA)开发,是基于过程的连续性分布式流域水文模型,具有很强的水文物理机制,可用于预测气候、土地利用、管理措施等的变化对流域产水、产沙、非点源污染等过程的长期影响[1],模型引入我国以来应用范围不断扩大,利用该模型进行土地覆被变化的水文响应研究日益增多[2-6],已有研究多是通过假定土地覆被情景去从整个流域尺度分析不同土地覆被类型的水文效应,较少从流域土地覆被实际变化状况且考虑流域内部土地覆被变化的空间分布差异等因素对产流量、产沙量的影响研究。

本研究通过构建晋江西溪流域径流模型 SWAT,分别以整个流域和子流域为研究尺度,比较分析了 1985 年和 2001 年该流域在不同土地覆被下年均流量、产沙量的变化,旨在定量评估不同土地覆被类型对区域产流产沙的影响,为该区域进行有效的水土保持措施提供依据。

收稿日期:2011-09-21 修回日期:2011-10-19
资助项目:福建省自然科学基金计划项目"基于 SWAT 模型的晋江流域径流模拟与生态恢复研究"(D0710007);宿州学院科研平台开放课题项目(2011YKF21)
作者简介:高杨(1979—),男(汉族),安徽省宿州市人,硕士,讲师,研究方向为水资源与水环境。E-mail:szxygy@163.com。

1 研究区概况及研究方法

1.1 流域概况

晋江西溪流域位于福建省东南部，西溪因位于晋江水系之西而得名，为晋江水系正源，发源于安溪县西北桃舟乡达德坂的梯子岭，由西北流向东南，流经永春县、安溪县和南安市，在双溪口与东溪汇入晋江干流并经泉州湾入海。流程全长 145 km，流域面积 3 101 km^2。选取西溪安溪水文站以上的流域为研究区，集水面积 2 466 km^2，海拔高度约在 50～1500 m，西北部山峰林立，起伏显著，山势陡峭，河谷狭窄、坡度大，平均海拔超过 700 m，东南部地势相对较平缓，平均海拔在 500 m 以下。月平均气温 22～29 ℃，年降水变化在 1 200～1 900 mm，属南亚热带海洋性季风气候，降水丰富，但时空分布不均，自东南向西北递增，年内降水以 7—9 月最为集中，占全年总量的 37%～39%。土壤类型主要有红壤、黄红壤、黄壤和水稻土。土地利用类型以有林地为主，其次是耕地、灌木林地和草地。

1.2 SWAT 模型结构

SWAT 模型通常将研究流域划分为若干个子流域，以考虑流域下垫面和气候因素的时空差异。模型模拟流域水文过程分为水循环的陆面部分（即产流和坡面汇流部分）和水面部分（即河网汇流部分），陆面部分控制着每个子流域内主河道的水、沙、营养物质和其他化学物质等的输入量，水面部分决定水分、泥沙等物质从河网向流域出口的输移过程。

SWAT 模型采用了模块化设计思路，水文循环中的每一个环节有其对应的模块，主要子模型包括水文过程模型、土壤侵蚀模型等。其中水文过程模型采用的水量平衡方程为：

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^{t}(R_{day} - Q_{surf} - E_a - W_{seep} - Q_{gw}) \quad (1)$$

式中：SW_t——最终的土壤含水量（mm）；SW_0——土壤初始含水量（mm）；t——时间步长（d）；R_{day}——第 i 天的降雨量（mm）；Q_{surf}——第 i 天的地表径流（mm）；E_a——第 i 天的蒸发量（mm）；W_{seep}——第 i 天存在土壤剖面底层的渗透量和侧流量（mm）；Q_{gw}——第 i 天地下水含量（mm）。

土壤侵蚀过程采用修正的通用土壤流失方程（MUSLE）进行模拟计算：

$$Y = 11.8(Q_{surf} \cdot pr)^{0.56} \cdot K_{USLE} \cdot C_{USLE} \cdot P_{USLE} \cdot LS_{USLE} \quad (2)$$

式中：Y——土壤侵蚀量（t）；Q_{surf}——地表径流深（mm）；p_r——洪峰径流（m^3/s）；K_{USLE}——土壤侵蚀因子；C_{USLE}——植被覆盖和管理因子；P_{USLE}——保持措施因子；L_{SUSLE}——地形因子。

1.3 基础数据资料

SWAT 模型运行过程中需要输入的数据数量庞大，种类繁多，研究中降水数据来源于区内 15 个雨量站多年逐日实测资料，其他气象资料由区内安溪气象站实测资料获得；地形数据来源于研究区 30 m 精度的 DEM（数字高程模型）；土壤数据采用 1∶50 万的晋江流域上游地区土壤图作为模型输入；两期土地覆被图分别为 1985 和 2001 年福建省土地利用/覆被遥感解译数据。

1.4 研究方法

将 SWAT 模型应用到晋江西溪流域的水文模拟中，利用研究区的 DEM 进行河网的提取并将整个流域划分为 21 个子流域（图 1），通过叠加研究区的土壤图和 1985 年土地覆被图，并输入气象数据和雨量数据进行年、月的产流产沙模拟，用安溪水文站的实测数据进行校准和验证[7-8]。

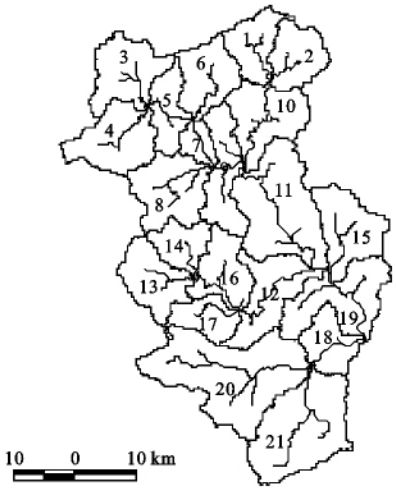


图 1 西溪流域子流域划分图

在利用安溪水文站能提供的实测年、月的流量和输沙量的值进行模型校验过程中，主要选取了 Nash—Sutcliffe 确定性系数（E_{ns}）、回归决定系数（R^2）等指标用于模型参数的适应性评价。产流月模拟验证过程中 E_{ns} 为 0.82，R^2 为 0.87，验证结果表明了模型在研究区产流模拟的适应性较好，月产沙的模拟结果 E_{ns} 为 0.63，R^2 为 0.65，虽未到达产流模拟的效率水平，但模拟精度符合基本要求。为研究不同土地覆被条件下的产流产沙效应，在其他数据输入相同的条件下，用 2001 年的土地覆被数据替代 1985 年数据进行年产流产沙模拟，分析不同覆被条件下产流量、产沙量的差异。为了能更好地反映土地覆被的空间分布差异对流域产流、产沙量的影响，通过对比研

究区每一个子流域内不同土地覆被下的产流及产沙量差异,计算产流产沙量变化较大的子流域内部的土地覆被变化,并应用于子流域内不同土地覆被下的水文效应分析。

2　结果与分析

2.1　流域尺度下产流产沙模拟结果与影响分析

由表 1 可以看出,相同气象条件下两期土地覆被下的年均流量模拟值变化不大,与 1985 年土地覆被条件下的年均流量相比,2001 年土地覆被条件下的年均流量增加了 0.11 m^3/s,表明 1985—2001 年的土地覆被变化对流域总产流量影响不大,而产沙变化较为显著,流域 2001 年土地覆被下的多年平均输沙量较 1985 年土地覆被下的多年平均输沙量表现出了大幅度的提高,增加了 4.67×10^5 t 吨,变化率高达 19.58%。表明 1985—2001 年的土地覆被变化对流域产沙产生了较大影响。

表 1　西溪流域不同覆被条件下年均流量及输沙量

项 目	1985 年	2001 年	变化量	变化率/%
年均流量模拟值/($m^3\cdot s^{-1}$)	87.19	87.30	0.11	0.13
年均输沙量模拟值/t	2 397 571	2 864 571	467 000	19.58

不同土地覆被类型增减状况如图 2 所示。由图 2 可以看出,林地、耕地和草地都有不同幅度的减少,而园地和建设用地有所增加,林地减少面积最大,面积增多最大的土地类型是园地。

由于在不同覆被下流域总产流量变化不大,且流域内土地利用类型多样,增减不同,较难从整个流域的角度判断具体某种土地覆被类型的变化对流域最终的产流结果产生影响。而产沙在土地覆被变化下变化幅度比较大,可以初步得出是由于林地的大幅减少和园地的大幅增加所致,相关调查研究[9-10]也显示出研究区由于毁林发展园地造成的水土流失严重,园地的增沙效应明显大于林地。其他土地利用类型的产流产沙效应需要从小尺度的子流域进行分析。

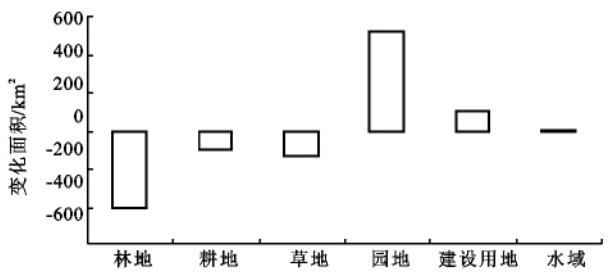


图 2　西溪流域土地覆被类型变化

2.2　子流域尺度下的产流产沙模拟结果与影响分析

子流域尺度下 1985 和 2001 年两期土地覆被下年均产流产沙量的变化情况详见表 2。流域内土地覆被变化空间分布差异较大,使各子流域产流产沙量变化差异也较大,产流产沙量在不同子流域既有增加也有减少,其变化趋势基本一致,但产沙量的变化幅度明显大于产流量,分别选取产流及产沙变化较大的子流域进行土地覆被变化的水文响应分析。

表 2　各子流域两期土地覆被条件下产流产沙量变化

子流域编号	产流变化量/mm	产沙变化量/($t\cdot km^{-2}$)	产流变化率/%	产沙变化率/%
1	3.87	23.19	0.33	292.32
2	6.90	13.75	0.59	116.73
3	3.17	−0.39	0.29	−9.04
4	11.53	7.14	1.11	363.31
5	6.29	2.19	0.60	22.88
6	10.41	2.74	1.02	31.38
7	6.25	2.35	0.61	63.87
8	6.84	31.67	0.67	388.45
9	18.50	4.22	1.78	120.52
10	10.07	5.64	1.10	125.23
11	5.53	12.33	0.51	157.88
12	−2.40	−8.32	−0.22	−58.22
13	0.77	44.15	0.06	333.80
14	19.12	89.39	1.60	1 655.06
15	−10.46	−8.36	−0.90	−65.21
16	8.13	−0.22	0.75	−2.88
17	−1.12	−2.79	−0.11	−65.20
18	−2.19	−54.60	−0.23	−84.92
19	−15.18	−6.70	−1.53	−53.14
20	−4.03	−5.62	−0.37	−64.69
21	−10.79	−8.13	−1.15	−89.64

2.2.1　子流域产流变化分析　第 4,9,14 号子流域年径流深增加较大,分别增加了 11.53,18.50 和 19.12 mm;第 15,19,21 号子流域年径流深减少较大,分别减少了 10.46,15.18 和 10.79 mm。提取产流量增减幅度相对较大的这 6 个子流域的两期土地利用数据(表 3),根据各子流域土地覆被变化特征分析不同土地利用类型的水文效应。

由表 3 可以看出:(1) 产流量增加较大的 4,9,14 号这 3 个子流域的林地面积都有较大幅度的减少,分别减少了 62.48,32.65 和 26.79 km^2,其他土地覆被类型面积基本都是增加。第 15 和 21 号子流域林地面积分别增加 3.55 和 17.86 km^2,导致子流域产流量减少,说明林地的减少会使流域产流量增加,林地相对于其他土地覆被类型减水效应突出。(2) 第 14 号子流域的径流量增加最大,也是所有子流域中变幅

最大的。其流域内林地的面积虽有减少，但减少面积小于第4和9子流域，耕地和草地的变化也不大。与其他子流域显著不同的是建设用地增加了11.08 km^2，且该子流域总面积也相对较小，使其对该子流域土地覆被构成的改变起到了重要作用，得出建设用地的增水效应相对其他土地覆被类型显著。(3) 第15，19，21这3个子流域土地覆被变化的共同特点是林地面积的变化幅度相对较小，园地面积有大幅度的增加，耕地和草地不同程度的减少，说明园地相对于耕地和草地的减水效应较为明显。

表3 产流量变化较大子流域土地覆被变化 km^2

覆被类型	产流增加较大子流域土地覆被变化			产流减少较大子流域土地覆被变化		
	4号	9号	14号	15号	19号	21号
林地	−62.48	−32.65	−26.79	3.55	−9.24	17.86
耕地	23.19	18.57	3.29	−15.64	−16.48	−52.54
草地	32.35		−11.03	−21.39	−22.00	−42.25
园地	6.94	14.08	23.45	33.47	47.72	76.93
建设用地			11.08			

2.2.2 子流域产沙变化分析 第8，13和14号子流域产沙增加最明显，单位面积产沙增加量分别为31.67，44.15和89.39 t/km^2，变化率分别为3.88，3.34和16.55倍。第15，18和21号子流域产沙减少相对明显，产沙量分别减少了8.36，54.60和8.13 t/km^2，变化率分别为0.65，0.85和0.90倍。这6个子流域的两期土地覆被变化情况详见表4。根据各子流域土地覆被变化特征分析不同土地利用类型的产沙效应。

表4 产沙量变化较大子流域土地覆被变化 km^2

覆被类型	产沙增加量较大子流域			产沙减少量较大子流域		
	8号	13号	14号	15号	18号	21号
林地	−33.53	−16.84	−26.79	3.55	−7.97	17.86
耕地	−2.89	−9.73	3.29	−15.64	−8.66	−52.54
草地		−25.65	−11.03	−21.39	−4.40	−42.25
园地	19.09	36.95	23.45	33.47	25.36	76.93
建设用地	17.33	15.27	11.08		−4.34	

由表4可以看出：(1) 第8，13和14号子流域的共同特征是园地、建设用地面积增加，其他土地覆被类型均有不同程度的减小。尤以林地减少面积最大，分别减少33.53，16.84和36.79 km^2，说明林地相对于其他土地覆被类型减沙作用明显。对比产沙量减少的子流域，其园地也表现为普遍增加，表明第8，13和14号子流域主要是由于建设用地的增加引起产沙增加，说明在各种土地覆被类型中建设用地的增沙作用最为显著。(2) 第15，18和21号子流域土地覆被变化的共同特征是园地面积有程度的增加，分别增加了33.47，25.36和76.93 km^2，林地和建设用地面积变化幅度不大，耕地和草地的面积有所减少，其中耕地减少幅度较大，得出产沙作用耕地大于草地，草地大于园地。结合产沙量减少子流域变化率要比产沙量增大子流域变化率小的多，进一步说明林地的减沙作用和建设用地的增沙作用远大于其他土地覆被类型。

综上可知，土地覆被变化对产流和产沙的影响在变化趋势上具有一致性。但从影响的显著性方面看，产沙对土地覆被变化的响应明显要强于产流，由土地覆被变化引起的产沙变化量远大于产流变化量，分析其原因是径流的产生主要来自于降水，而泥沙的来源则就来自于土地，土地覆被的变化对产沙变化的影响更为直接。

从流域内不同覆被类型产流产沙效应来看，林地相比于其他覆被类型的减水减沙作用最为突出，建设用地的增水增沙效应在各土地覆被类型中最为显著。森林的存在对流域径流量是起到增加还是减少的作用一直存在争议，但得出结论较多的是森林植被的存在减少了产流量[11-13]，模拟结果与其是相一致的。建设用地的增加使下垫面的渗透性和滞水性发生改变，降水后下垫面截留、下渗以及填洼水量减少，汇流的速度加快，使径流总量增加显著。根据研究区土地覆被次一级的分类，发现增加建设用地中较多的是农村

居民点,这种增加多是缺乏规划管理的,破坏了当地的植被及土层结构等,使其更易于发生水土流失,模拟结果也与多数研究[14]所得出的流域产沙量随着流域植被覆盖度的增大而减小的结论一致。在其他土地类型中,模拟结果显示园地的减水减沙效应强于耕地和草地。研究区内增加的园地类型基本是以茶园为主,相关研究表明茶园有增大地表径流、加快水土流失的作用[9],但其增水增沙效应都是相对林地而言的,与模拟结果并不矛盾。

3　结 论

利用 SWAT 模型进行晋江西溪流域土地覆被变化的水文响应研究,在径流、泥沙模拟结果表明模型适应性较好的基础上,采用相同气象条件,进行 1985 和 2001 年两期土地覆被状况下的水文模拟,根据土地覆被类型的变化进行产流产沙效应的分析,表明 SWAT 模型能较好地应用于整个流域及其内部子流域土地覆被变化下的水文效应研究。在整个流域尺度下,土地覆被变化对于流域产流量变化影响不大,对产沙量影响显著,但难以判定不同土地覆被类型的产流产沙差异。分析流域内子流域尺度下的土地覆被变化的产流、产沙差异,林地相比于其他覆被类型的减水减沙作用最为突出,建设用地的增水增沙效应在各土地覆被类型中最为显著,在其他土地类型中,园地的减水减沙效应要强于耕地和草地。

[参 考 文 献]

[1] Neitsch S L, Arnold J G. Soil and water assessment tool theoretical documentation [M]. version 2005. Texas: Grassland, Soil and Water Research Laboratory, Agricultural Reseach Service, 2005.

[2] 董铭,史正涛,李滨勇,等. 松华坝水源区不同 LUCC 情境下地表径流深变化初步研究[J]. 遥感技术与应用,2009,24(5):643-647.

[3] 王艳君,吕宏军,施雅风,等. 城市化流域的土地利用变化对水文过程的影响:以秦淮河流域为例[J]. 自然资源学报,2009,24(1):30-36.

[4] 王韶伟. 土地利用/土地覆被变化的水文效应模拟[J]. 人民黄河,2010,32(5):24-26.

[5] 卢爱刚,索安宁,张镭. 基于 SWAT 模型的黄土高原典型区水土流失格局模拟评价[J]. 水土保持研究,2011,18(2):57-61,65.

[6] 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.

[7] 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.

[8] 王林,陈兴伟. 基于 SWAT 模型的晋江西溪流域产沙模拟[J]. 福建师范大学学报:自然科学版,2008,24(3):93-97.

[9] 庄秀琴. 安溪县茶园水土流失监测分析及防治对策[J]. 亚热带水土保持,2006,18(3):69-71.

[10] 吕联合. 泉州市山地茶园水土流失现状及主要防治措施[J]. 亚热带水土保持,2009,21(2):32-34.

[11] 宫渊波,陈林武,张健,等. 嘉陵江上游低山暴雨区植被恢复对沟道产流的影响研究[J]. 水土保持学报,2009,23(4):1-5.

[12] 刘世荣. 中国森林生态系统水文生态功能规律[M]. 北京:中国林业出版社,1996.

[13] 陈军锋,裴铁璠,陶向新,等. 河流两侧坡面非对称采伐森林对流域暴雨—径流过程的影响[J]. 应用生态学报,2000,11(2):210-214.

[14] 徐宪立,马克明,傅伯杰,等. 植被与水土流失关系研究进展[J]. 生态学报,2006,26(9):3137-3143.