东南沿海地区小流域土地利用/覆被变化的水文效应

杨 柳[1,2]，陈兴伟[2]，许有鹏[1]，刘梅冰[2]，胡春生[1]

(1. 南京大学 地理与海洋科学学院，江苏 南京 210093；2. 福建师范大学 地理科学学院，福建 福州 350007)

摘 要：[目的] 研究我国东南沿海小流域土地利用/覆被变化的水文效应，为该区水土资源合理配置和可持续发展提供科学依据。[方法] 以东南沿海福建省晋江山美水库集水区为例，运用 SWAT 水文模型。[结果] (1) 研究区土地利用变化表现为林地转向园地和建设用地、耕地转向建设用地的特征。(2) 固定其他条件，将构建的模型 2006 年土地利用数据替换为 1995 年，对比分析发现 2000—2010 年全流域和典型子流域的年径流深增加，洪水期平均径流增加，枯水期径流基本减少。(3) 从全流域空间角度看，径流量均增大，特别是研究区西部地区和东南部地区；同时径流量变率增大，稳性减小。(4) 园地、林地、建设用地和水田是驱动区内水文变化的主要因子。[结论] 研究区土地利用与覆被变化导致“洪水量更大，枯水量更小”的径流变化趋势。河川径流的变化受各地类变化的组合叠加效应影响，这种叠加效应还须进一步研究。

关键词：SWAT 模型；日径流过程模拟；土地利用/覆被变化；水文效应；东南沿海区；小流域

文献标识码：A **文章编号**：1000-288X(2015)02-0070-06 **中图分类号**：

DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2015.02.014

Hydrological Responses to Land Use and Cover Change in a Small Watershed of Southeast China Coast Area

YANG Liu[1,2], CHEN Xingwei[2], XU Youpeng[2], HU Chunsheng[1]

(1. *Geographic and Oceanographic Sciences, Nanjing University, Nanjing, Jiangsu* 210093, *China*; 2. *School of Geographic Sciences, Fujian Normal University, Fuzhou, Fujian* 350007, *China*)

Abstract: [Objective] Studying the hydrological responses to land use and cover change of Southeast China coast in a small watershed, in order to provide references for the rational allocation and sustainable development of water and soil resources. [Methods] The confluence catchment of Jinjiang Shanmei Reservoir in Fujian Province of China, a place located at the southeast coast of China, was selected to illustrate the effects of land use and cover change(LUCC) on hydrological processes by SWAT model. [Results] (1) From 1995 to 2006, the forest land was mainly converted to garden land and construction land, while farm land was mainly transformed to construction land; (2) In the model, if other conditions were fixed, only data of land use in 2006 was replaced with the corresponding input variable in 1995, the runoff could be outputted as contrast: from 2000 to 2010, the annual runoffs in the whole watershed and also in the tributary drainage area consequently increased; and the averaged runoff during flooding increased, while the runoff during rainless period decreased; (3) The runoff volume in the whole watershed increased with an increased variation as contrast with the previous corresponding value; (4) Garden land, forest land, construction land and paddy field were the main driving factors that caused the regional hydrological changes. [Conclusion] Land use and cover change in the study area were found to result in a runoff trend that are “the flood volume is larger, the runoff yield is smaller”. The changes of river runoff was resulted from the combined effects of all types of land use

收稿日期：2014-01-21 **修回日期**：2014-04-12

资助项目：福建省教育厅项目“流域施肥的时空分配对山美水库 N 污染特性的影响”(JB12038)；福建科技厅省属公益类科研院所青年科研项目(2014R1034-4)；国家自然科学基金重点项目(40730635)

第一作者：杨柳(1986—)，女(汉族)，湖南省永州市人，博士研究生，研究方向为水文水资源环境。E-mail:palapalayl2006@126.com。

change. This combination effects need to be further studied.

Keywords: SWAT model; daily runoff process simulation; land use and cover change; hydrological responses; Southeast China coastal area; small watershed

土地利用/覆被变化(LUCC)对径流过程影响是当前人们关注的热点问题。SWAT 模型因为其输入输出方便,数据获取相对容易,可模拟长时间序列变化等优势[1]被广泛应用于 LUCC 水文效应研究中。在 SWAT 日径流模拟研究中,李慧[2]等在玛纳斯流域得出该模型适用于冰雪融水区的日径流模拟;李丽娇[3]、黄清华[4]等日径流模拟研究表明雨季径流量年际变化趋势与降雨量的年际变化一致,丰水年份的模型效率较高,其次为平水年和枯水年;李占玲[5]在黑河运用 WASMOD 模型与 SWAT 模型进行日径流模拟,比较两种模型的优劣等等。由此可见,目前 SWAT 在日径流模拟的分析研究涉及多方面,但还鲜有在日尺度模拟基础上进行 LUCC 水文响应的研究。另外,从空间上看,已有日径流模拟的研究多集中于北方地区的黄河、海河流域以及南方地区长江流域,在东南沿海诸河流域的研究较为少见[6]。而我国东南沿海地区以中小流域为主,多独流入海,以东南沿海小流域为研究对象,具有一定的典型性[7]。本研究应用 SWAT 模型,构建山美水库集水区日径流分布式水文模型,分析研究区土地利用面积、地类转移情况,继而研究 LUCC 下时间(年径流、洪水期日径流和枯水期日径流)和空间(径流系数等值线)尺度上的水文响应情况。

1　研究区概况

山美水库集水区地理位置在 25°32′—25°9′N,118°3′—118°30′E 之间,位于福建晋江东溪中游,集水面积 1 023 km^2。区内多山地和丘陵,海拔约在 40～1 360 m 之间。气候属亚热带海洋性季风气候,年均温约为 20.9 ℃;年日照时数约为 1 800～2 200 h,年降雨量约为 1 600 mm[8]。区内降水量年际变化大,少雨年份降水量不及多雨年份 1/2。土壤类型有红壤、赤红壤、黄壤、水稻土和石质土等,其中硅铝质红壤、渗育水稻土、铝硅质红壤占 78.2%,为区内主要土壤类型。

2　数据来源与研究方法

2.1　数据来源

模型输入数据包括空间数据和水文气象数据。空间数据有土壤、DEM 和土地利用数据。其中土壤资料来源于福建省 1∶50 万数字化土壤数据;DEM 来自国际科学数据中心的 SRTM 数据(分辨率为 30 m×30 m);土地利用数据通过对研究区 2006 年和 1995 年 TM 遥感影像进行目视解译获得。水文数据采用 2000—2010 年研究区的逐日入库流量进行模型率定和验证,气象数据采用永春和德化 2 个气象站 2000—2010 年的逐日最高、最低气温,风速,相对湿度以及 16 个雨量站的逐日降水数据。

2.2　研究方法

2.2.1　SWAT 模型　SWAT(soil and water assessment tool)模型是美国农业部农业研究所(USDA-ARS)[9]开发的运行以日为时间步长,可进行连续长时段模拟计算的分布式流域水文模型,目前已经在不同地区得到广泛应用,本研究选用该模型对研究区的日径流过程进行模拟。模型用 2000—2005 年的逐日入库流量进行率定,2006—2010 年日流量数据进行验证,寻求晋江东溪流域山美水库集水区径流模型的最优参数,构建该地区日尺度径流模拟的 SWAT 模型[6]。地表径流计算选用径流曲线数方法(SCS runoff curve number),河道汇流过程采用马斯京根法(Muskingum)进行演算。子流域划分基于数字高程模型,采用"burn-in"算法。水文响应单元划分采用优势地面覆盖/优势土壤类型方法,阈值设为 5/10。此外,为评价模型的模拟精度,选用 Nash—Suttcliffe 效率系数[10](Ens)和确定性系数(R^2)进行表征。

2.2.2　土地利用数据解译与变化分析　首先对研究区 1995 年和 2006 年同时段 TM 影像进行几何校正,再结合研究区实际与模型的需要,将土地利用类型划分为 8 类,包括水田(RICE)、旱地(WWHT)、林地(FRST)、园地(ORCD)、草地(RNGE)、未利用地(SWRN)、水域(WATR)和建设用地(URMD)。为提高解译精度,通过两种方法进行验证:一是在研究区中选取 52 个典型样点,野外利用手持 GPS 定位,实地确定目标位置的土地利用类型,通过反复修正建立起适合研究区的解译标志。二是按行政单位将整个永春县 2006 年 LUCC 情况解译,与权威部门土地利用各地类面积数据进行比对,调整解译标志,修正解译结果。解译完成后用 ArcGIS 9.3 对数据进行拓扑检查,用 Arcview 空间分析模块分析研究区 1995—2006 年土地利用变化情况。

2.2.3 日径流时空响应分析 构建研究区SWAT日径流模型，固定其它条件，仅将土地利用数据替换为1995年数据，得出水文响应的模型用以探讨土地利用/覆被变化后年径流和日径流响应情况。日径流变化主要从洪水径流变化和枯水径流变化两方面进行分析，其中，洪水径流变化选用最大1 d和连续5 d最大的径流深进行研究，选取后者主要是由于本流域洪水过程一般在5 d之内，而枯水径流变化通过常用的最小1 d和连续7 d最小的径流深进行分析。同时考虑到整个流域LUCC的叠加效应和复杂性，可能会对分析结果造成影响，为进一步研究土地利用/覆被变化强烈区域的水文效应，研究在37个子流域中遴选出林地转化园地的面积最大子流域（第26号子流域，记为S_{26}）作为典型子流域，进一步分析研究区典型日径流变化。

空间响应部分的分析，首先计算出37个子流域各地类面积净变化量与年径流深变化量，再运用ArcGIS 9.3地统计分析模块，采用普通克里格方法，对研究区两期土地利用下的37个子流域径流系数进行插值，得出全流域的径流系数等值线，结果须通过该方法的精度评价检验。

3 结果与分析

3.1 土地利用/覆被变化

研究区林地面积最大，占总面积的65%以上；园地和水田为主要地类，分别占8%以上，其余地类面积较小（表1）。由表1可知，1995—2006年，各地类变化程度表现为林地＞园地＞建设用地＞旱地＞水田＞未利用地＞水域＞草地，其中林地减少面积占总减少面积的92.31%，而园地增加面积则占总增加面积的73.43%。此外，建设用地的增加是另外一个重要特征，其增加面积占总增加面积的13.83%。

表1 研究区不同土地利用类型面积及其变化

土地利用类型		水田	旱地	林地	园地	草地	建设用地	水域	未利用地	总面积
1995年	面积/km²	89.43	29.98	723.34	93.94	8.25	41.92	23.27	8.53	1 018.67
	比例/%	8.78	2.94	71.01	9.22	0.81	4.12	2.29	0.84	100
2006年	面积/km²	85.2	35.01	663.21	141.77	8.29	50.94	22.49	11.78	1 018.67
	比例/%	8.36	3.44	65.11	13.92	0.81	5	2.21	1.16	100
变化量/km²		−4.23	5.03	−60.13	47.83	0.03	9.01	−0.78	3.24	—
变化率/%		−4.73	16.77	−8.31	50.91	0.40	21.50	−3.37	38.01	—

为获取研究区土地利用变化除数量以外的隐含信息，通过转移矩阵和累计百分比分析研究区各地类空间转移情况，发现研究区最显著的转变为林地向园地的转化，其次是耕地、园地和林地之间的相互转化，而第3层次地类相互转化的变化率在3%～1%之间，变化率合计达15.055%，共有7种地类之间的相互转化；第4层次的地类相互转化有27种之多，但转化量很小，变化面积总和不超过整个变化面积的5%。

3.2 径流模拟

SWAT模型对山美水库集水区流域日尺度的径流过程模拟效果良好，其中在率定期内Ens和R^2分别为0.85和0.86；验证期内Ens和R^2分别为0.86和0.87。从整个径流模拟期内的流量过程线来看，模拟效率评价结果也较好，Ens和R^2均达到了0.85，模拟与实测流量过程线吻合良好，区内径流对于降水的响应强烈（图1）。分析表明，基于SWAT构建的日尺度径流模型在研究区的适应性较好，为进一步分析土地利用/覆被变化水文响应奠定了坚实基础。

3.3 土地利用/覆被变化的水文时空响应

3.3.1 时间响应分析 研究区土地利用变化的水文响应从时间尺度（表2）来看，年径流深增加，日径流变化中，最大1 d和连续5 d最大径流均明显增加，增幅达3%以上，即洪水期的日径流增加；同时值得注意的是最小1d枯水径流出现了最大幅度的增加，变化率达到8.18%，只有连续7 d最小径流变化量表现为减小，但变化率非常小，仅为0.21%，几乎可忽略不计。

可见，全流域尺度下，洪水期和枯水期日径流深均出现了较大幅度的增加。典型子流域的分析表明，S_{26}洪水径流平均增加5.54%，枯水径流平均减少12.84%，呈现出“洪水量更大，枯水量更小”的两极化变化趋势，与全流域尺度下的日径流变化存在一定的差异。这种差异是由于全流域各地类之间的相互转化较子流域的变化更复杂，水文响应中正负效应相互抵消情况严重。另外，降水中心的空间变化对径流的影响[11]也是不容忽视的因素。

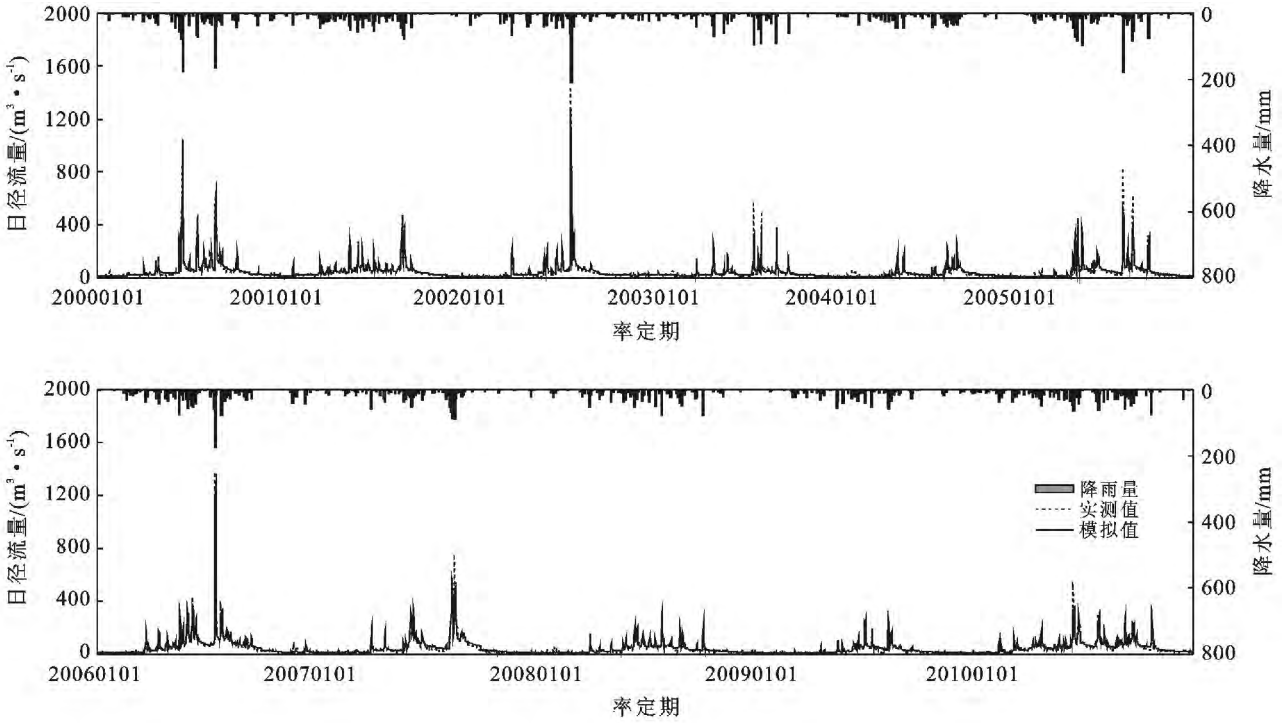


图 1　研究区日径流实测值与模拟值

表 2　研究区洪水期和枯水期土地利用变化的水文响应

研究区域	项 目	年径流深	洪水期(4—10 月)		枯水期(11 月至翌年 3 月)	
			最大 1 d	连续 5 d 最大	最小 1 d	连续 7 d 最小
全流域	1995 年	1 436.81	50.57	295.98	0.73	9.54
	2006 年	1 470.08	52.23	301.69	0.79	9.52
	变化量	33.27	1.66	5.71	0.06	−0.02
	变化率/%	2.32	3.29	4.22	8.18	−0.21
典型子流域(S_{26})	1995 年	1 104.94	84.20	35.18	0.06	0.07
	2006 年	1 133.99	89.71	36.77	0.05	0.06
	变化量	29.05	5.51	1.60	−0.01	−0.01
	变化率/%	2.63	6.55	4.53	−12.22	−13.45

当研究区地表植被郁闭度降低,地表覆被和冠层最大截流量减少,地表植被最大截流量的减少,使得降水转为径流的量增加,年径流深增加,日径流深在洪水期增加,枯水期基本减少。

事实上,在其他流域的研究[12-14]得出相似结论,建设用地增加导致不透水面积增加,造成入渗减少,洪峰流量增大,径流系数增大。叶宝莹[15]以泥鳅河和科洛河流域为例的分析得出,林地、耕地面积的减少导致地表径流增加。有关梭磨河[16]的研究也表明地表覆被和冠层最大截流量的增加,导致径流深减少,洪水期和枯水期径流深均减少,且枯水期减少幅度小。

3.3.2　空间响应分析　选用普通克里格[17]插值,并通过该方法的 4 个参数对插值结果进行精度评价。评价结果(表 3)显示,插值结果符合研究区径流系数的克里格最优参数模型标准。且研究结果与林文娇[18]在山美库区以上集水区的插值数值上相近;等值线布局的不同,与研究时段和插值方法不同有关。研究区空间上,土地利用变化下的水文响应结果如图 2 所示。

根据图 2 可知,两期土地利用下径流系数的差异体现为 2006 年土地利用覆被下径流系数大于 1995 年,表明 2006 年土地利用/覆被变化后,山美水库集水区降水量中有更多水量变成径流,而其余耗损于植物截留、填洼、入渗和蒸发的水量相应减少,这恰好验证了研究区林地减少、建设用地增加的现状。此外,从等值线分布来看,2006 年径流系数等值线比 1995 年等值线更密集,特别是西部地区和东南部地区,这说明研究区土地利用/覆被变化后,径流系数变率增大、稳定性下降。

表 3 普通克里格插值结果精度评价

参数	标准平均值	均方根预测误差	平均标准误差	标准均方根预测误差
数值	0.012 81	0.020 81	0.019 14	1.084
最优	最接近于 0	最小	最接近均方根预测误差	最接近于 1

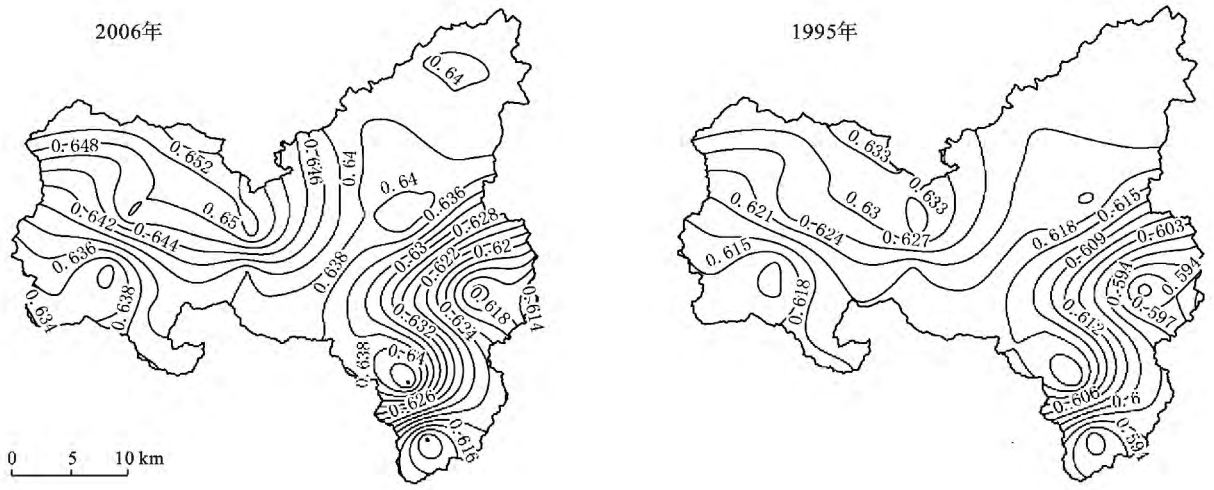


图 2 研究区径流系数等值线图

3.3.3 径流变化影响因子分析 径流的变化从来都不是单一地类影响所致。因各地类变化并不相互独立，单个变量包含信息较片面，而相关分析只能区分出各地类对研究区径流变化的正负效应，不能确定其影响程度。所以，为进一步识别研究区径流量变化的主要影响因子，对各地类变化做主成分分析，结合主成分载荷矩阵，确定各地类变化对区内径流变化的影响程度，进而识别出主要影响因子。

主成分分析结果表明，4 个主成分可以解释 81.97%的地类变化信息，第 1 到第 4 主成分的贡献率依次为 31.02%，21.20%，16.89 和 12.86%。由载荷矩阵(表 4)可知，园地、林地、建设用地和水田是影响区内水文变化的主要因素，草地虽然与主成分具有较高的相关系数，但其总面积很小，因此影响也相对较小。

表 4 主成分载荷矩阵

项 目	水田	旱地	林地	园地	草地	建设用地	水域	未利用地
成分 1	−0.53	0.07	−0.62	0.86	0.76	0.56	0.38	−0.23
主成分 2	0.75	0.23	−0.61	−0.08	0.41	−0.65	0.33	0.03
主成分 3	−0.2	0.46	0.42	−0.2	0.01	−0.18	0.59	−0.71
主成分 4	−0.23	0.83	0	−0.15	0.15	0.05	−0.22	0.45

4 结 论

(1) LUCC 分析得出，在全流域园地、建设用地增加，林地减少，并以林地转为园地为主，即研究区的地表覆被和冠层最大截留量减少。这样的变化导致时间水文响应上，年径流深无论全流域或子流域均增加；全流域在日尺度的洪水期和枯水期日径流深一致增加；对典型子流域(S_{26})的研究发现，洪水期日径流深增加，而枯水期研究区土壤下渗量增加，导致径流深减少，枯水径流减少。体现子流域洪水与枯水径流深变化的不一致性，呈现出“洪水量更大，枯水量更小”的特点。

(2) 空间水文响应分析得出，同一地点 2006 年土地利用下的径流系数大于 1995 年土地利用下的径流系数，且前者较后者等值线更为密集。这与研究区研究期内林地减少，建设用地的增加密不可分，表明降水量中耗损的水量减少，形成的径流更多；研究区土地利用/覆被变化后，径流系数变率大，不似从前稳定。

(3) 研究期内，研究区径流时空变化的主要影响因子为园地、林地、建设用地和水田的变化。土地利用/覆被变化与流域径流量的关系，绝非某一种土地利用类型的变化能阐述清楚，而是由各种地类变化的组合叠加效应作用于河川径流。这种叠加效应还须进一步研究并加以揭示。

[参 考 文 献]

[1] Neitsch S L, Arnold J G, Kiniry J R, et al. Soil and water assessment tool theoretical documentation version 2009[R]. Texas: Texas Water Resources Institute, 2011.

[2] 李慧,雷晓云,包安明,等. 基于 SWAT 模型的山区日径流模拟在玛纳斯河流域的应用[J]. 干旱区研究,2010,27(5):686-690.

[3] 李丽娇,薛丽娟,张奇. 基于 SWAT 的西苕溪流域降雨—径流关系及水量平衡分析[J]. 水土保持通报,2008,28(5):81-85.

[4] 黄清华,张万昌. SWAT 模型参数敏感性分析及应用[J]. 干旱区地理,2010(1):8-15.

[5] 李占玲,徐宗学. 黑河流域上游山区径流模拟及模型评估[J]. 北京师范大学学报:自然科学版,2010(3):344-349.

[6] 杨柳,刘梅冰,陈莹,等. 山美水库集水区径流模拟的日尺度 SWAT 模型[J]. 南水北调与水利科技,2013,11(S1):3-5.

[7] 许有鹏,葛小平,张立峰,等. 东南沿海中小流域平原区洪水淹没模拟[J]. 地理研究,2005,24(1):38-45.

[8] 福建师范大学地理系《福建自然地理》编写组. 福建自然地理[M]. 福州:福建人民出版社,1987:64-131.

[9] 赖格英,吴敦银,钟业喜,等. SWAT 模型的开发与应用进展[J]. 河海大学学报:自然科学版,2012,40(3):243-251.

[10] Nash J E, Sutcliffe J V. River flow forecasting through conceptual models(part I): A discussion of principles [J]. Journal of hydrology, 1970, 10(3): 282-290.

[11] 林木生,陈兴伟,陈莹. 晋江西溪流域洪水与暴雨时空分布特征的相关分析[J]. 资源科学,2011,33(12):2226-2231.

[12] Bhaduri B L. A geographic information system-based model of the long-term impact of land use change on nonpoint-source pollution at a watershed scale[D]. West Lafayette: Purdue University, 1998.

[13] 陈莹,许有鹏,陈兴伟. 长江三角洲地区中小流域未来城镇化的水文效应[J]. 资源科学,2011(1):64-69.

[14] 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.

[15] 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.

[16] 邓慧平,李秀彬. 流域土地覆被变化水文效应的模拟:以长江上游源头区梭磨河为例[J]. 地理学报,2003,58(1):53-62.

[17] 汤国安. 杨昕. ArcGIS 地理信息系统空间分析实验教程[M]. 北京:科学出版社,2006:401-408.

[18] 林文娇. 晋江东溪流域农业非点源污染模拟分析[D]. 福建 福州:福建师范大学,2009.

(上接第 69 页)

[11] 石春娜. 我国森林质量的社会经济影响因素研究[D]. 北京:北京林业大学,2010:1-149.

[12] 林同龙. 杉木人工林近自然经营技术的应用效果研究[J]. 中南林业科技大学学报,2012,32(3):11-16.

[13] 张象君,王庆成,王石磊,等. 小兴安岭落叶松人工纯林近自然化改造对林下植物多样性的影响[J]. 林业科学,2011,47(1):6-14.

[14] 林平,刘勇,李国雷,等. 间伐强度对华北落叶松人工林植被物种多样性的影响[J]. 中国农学通报,2006,22(8):158-161.

[15] 李瑞霞,闵建刚,彭婷婷,等. 间伐对马尾松人工林植被物种多样性的影响[J]. 西北农林科技大学学报:自然科学版,2013,41(3):61-68.

[16] 梁文俊. 华北土石山区典型林分健康经营技术基础研究[D]. 北京:北京林业大学,2013:1-152.

[17] 郭峰,陈丽华,汲文宪,等. 北沟林场天然次生林植物群落结构及物种多样性研究[J]. 水土保持通报,2013,33(2):124-134.

[18] 马克平,黄建辉,于顺利,等. 北京东灵山地区植物群落多样性的研究(Ⅱ):丰富度、均匀度和物种多样性指数[J]. 生态学报,1995,15(3):268-277.

[19] 张金屯. 数量生态学[M]. 北京:科学出版社,2011:77-97.

[20] 马履一,李春义,王希群,等. 不同强度间伐对北京山区油松生长及其林下植物多样性的影响[J]. 林业科学,2007,43(5):1-9.

[21] 任立忠,罗菊春,李新彬,等. 抚育采伐对山杨次生林植物多样性影响的研究[J]. 北京林业大学学报,2000,22(4):14-17.

[22] 于立忠,朱教君,孔祥文,等. 人为干扰(间伐)对红松人工林林下植物多样性的影响[J]. 生态学报,2006,26(11):3757-3764.

[23] 王祖华,李瑞霞,王晓杰,等. 间伐对杉木人工林林下植被多样性及生物量的影响[J]. 生态环境学报,2010,19(12):2778-2782.

[24] 王凯,马履一,贾忠奎,等. 不同林龄油松人工林林下植物对不同间伐强度的短期影响[J]. 东北林业大学学报,2013,41(10):1-9.