

土地利用/覆被变化对径流量影响研究进展

王振海^{1,2}, 李传哲^{2,3}, 于福亮², 徐征和¹, 赵娜娜²

(1. 济南大学 资源与环境学院, 济南 250002; 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; 3. 河海大学 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 南京 210098)

摘要: 土地利用/覆被变化(LUCC)充分体现了人与自然之间相互作用的关系, 特别是LUCC对径流量的影响备受全球的关注。本文总结了LUCC对径流量影响的主要研究方法(对比试验流域法、统计分析法、模型模拟法、分离评判法)和前人的研究工作, 分析了备受关注的森林和城镇化对径流量的影响、气候条件和不同土地利用/覆被类型对径流量和洪水过程的影响评价, 以及量化气候条件和土地利用/覆被对净流量影响贡献率等几个方向研究进展, 并讨论了在研究过程中存在的问题和未来可能的研究趋势。

关键词: LUCC; 径流量; 水文模型

中图分类号: P343 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-1683(2014)01-0088-06

Research Progress on the Impacts of Land Use/ Cover Change on Runoff

WANG Zhen hai^{1,2}, LI Chuan zhe^{2,3}, YU Fu liang², XU Zheng he¹, ZHAO Na na²

(1. College of Resources and Environment, University of Ji nan, Ji nan 250002, China; 2. State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China; 3. State Key Laboratory of Hydrology- Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Land use/ cover change (LUCC) fully reflects the interaction between human and nature, and especially the impacts of LUCC on runoff have received global attention. In this paper, the main research methods (comparative watershed method, statistical analysis method, model simulation method, and separation judgment method) and previous research progress of the impacts of LUCC on runoff were summarized, the impacts of variation of forest and urbanization on runoff were analyzed, the impacts of climate conditions and different land use/ cover types on runoff and flood process were evaluated, the research progresses of quantitative assessment of the contribution rate of the above impacts were introduced, and the existing problems and future research trend of the impacts of LUCC on runoff were discussed.

Key words: LUCC; runoff; hydrological model

人类活动对全球的演变起着不可替代且错综复杂的作用, 土地利用/覆被变化(Land Use/ Cover Change, 简称LUCC)是最能体现这个过程的因素之一^[1-4]。土地利用/覆被的结构和功能与水量平衡、能量平衡联系密切, 是径流量变化的外在动力之一^[5]。植被类型、生长态势、覆盖率、根系深度、叶面积指数、管理经营方式等通过改变流域下垫面水文特征影响地表蒸发、下渗能力、表层覆被的截留量、填挖、径流路径, 进而影响产汇流过程^[7]。因此, LUCC对径流量影响是地下水资源量评价、水质评价、全球碳循环研究、洪水预报、流域规划等工作的重要研究领域, 也是分析水资源、水

环境和水问题政策效应需要考虑的重要因素。在全球LUCC日益剧烈的背景下, 探究LUCC对径流量影响有重要的科学价值和实践指导意义^[7-9]。

1 LUCC对径流量影响的研究方法

1.1 早期研究方法

早期研究LUCC水文效应的方法有流域对比试验法和统计分析方法^[10], 流域对比试验法可以细分为三种, 如表1。受自然条件以及其他客观条件的限制, 早期流域对比试

收稿日期: 2013-07-24 修回日期: 2013-12-03 网络出版时间: 2013-12-17

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/doi/10.3724/SP.J.1201.2014.01092.html>

基金项目: 中国水利水电科学研究院科研专项(1232); 国家国际科技合作专项资助“变化环境下黄河与墨累达令流域水资源利用合作研究”(2013DFG70990); 山东省自然科学基金(ZR2012DL08)

作者简介: 王振海(1988-), 男, 黑龙江庆安人, 硕士研究生, 主要从事水文方面的研究。E-mail: 15311550751@163.com

表1 对比试验流域法分类

Table 1 Classification of comparative watershed methods

名称	条件		方法
	流域数量	地理条件	
相似流域法	2	植被不同, 其他条件相似	选择相同时间段进行对比分析
单一流域法	1	-	选择不同植被且气候条件相似的时期对比分析
控制流域法	2	所有地理条件相似	选择相同时间段进行平行观测, 然后一个流域保持不变, 另一个流域改变植被类型, 进行对比分析

验法被对比实验法代替。对比实验法是根据研究需要, 人工制造不同大小、不同坡度和不同覆被的土槽, 模拟天然流域, 利用室内降雨装置, 进行人工降雨实验。该方法更结合产沙以及水土保持等研究 LUCC 水文效应。例如, 鲁克新等^[11]通过对比实验得出, 相同大小土槽、相同雨强、相同坡度和相同降雨历时, 裸地坡面相对于植被覆盖坡面更易产流、产沙。

统计分析法是针对一个流域或者多个流域, 选择较长时段上反映 LUCC 水文效应的特征参数(如径流系数、径流深、

蒸散发等), 尽量剔除其他因素的作用, 从特征参数的演化趋势上, 评估不同类型土地利用/覆被的水文效应^[12]。该方法简单、易操作, 仅通过简单的数理统计分析, 无法揭示水文响应的物理机制, 而且各个变量之间容易相互影响, 易导致分析结果偏离实际。

1.2 模型模拟法

模型模拟法是根据研究目的, 设定不同模拟情景, 选取一个或者多个模型(水文模型、水文气候预报模型、土地利用变化模型等)耦合, 通过统计、对比、分析、判断 LUCC 对径流量的影响, 或者通过预测未来气候和 LUCC 情况推断未来相应区域径流量的变化情况^[13]。

随着现代 3S 等多种数字技术的不断发展, LUCC 对径流量影响的研究方法也发生了较大的转变, 由传统的流域对比试验法等转向流域水文模型模拟法^[14]。水文模型是对复杂水循环过程的抽象或概化, 能够模拟水循环过程的主要或大部分特征。由于 LUCC 变化涉及因素繁多, 过程错综复杂, 因而以简化和抽象化为特征的各种模型有助于理解和预测 LUCC 对径流量影响。目前, 分布式水文模型 SWAT、VIC、SHE 等得到了广泛应用^[15-17], 常用的水文模型见表 2。

表2 水文模型简介

Table 2 Hydrological models

模型名称	模型简介	主要特点	模型结构
VIC	1994 年开发的大尺度陆面水文模型。经历了从 VIC 2L 到 VIC 3L (1998) 的改进。	主要应用于大尺度范围; 对次洪或日流量的模拟精度不够, 但能满足月尺度变化; 参数大多具有物理意义, 减小了参数的不确定性; 能模拟水量平衡和能量平衡过程。	模型设置一层地表覆盖层、三层土壤层, 考虑了冠层湿部蒸发、植被蒸发和裸土蒸发三类蒸发, 同时考虑了蓄满产流和超渗产流机制以及土壤性质的次网格空间变异性; 坡面汇流采用单位线法, 河网汇流采用线性圣维南方程。
SWAT	1998 年美国农业部农业研究中开发的流域尺度模型。从 SWAT 94.2 到现在的 SWAT 2012, 自开发以来不断的改进, 得到了国际上的认可。	在大、中、小空间尺度范围都可应用; 日尺度流量模拟不理想, 但年尺度和月尺度模拟效果较好; 参数大多具有物理意义, 减小了参数的不确定性; 与 GIS 结合便于空间信息处理, 模型代码可下载, 便于改进提高。	整个模拟过程可以分为两个部分: 子流域模块(产流和坡面汇流部分)和流路演算模块(河道汇流部分)。子流域水文循环过程包括 8 个模块: 水文过程、气象、泥沙、土壤温度、作物生长、营养物质、杀虫剂和农业管理。模型的诸多模块可以单独运行, 也可以组合其中几个模块运行模拟。
SHE	是第一个具有代表性的分布式水文模型, 发表于 1986 年。现有很多版本, 如 MIKE SHE、SHETRAN 等, 且在许多流域得到了检验和应用。	模拟范围可从小的区域到大中型流域; 模型参数具有物理意义, 可以通过测量进行估计; 模型包含了多个模块, 在应用中可以根据不同的需求进行选择; 模型将河道附近地下径流视为壤中流, 远离河道地区的地下径流视为基岩水。	流域划分为网格, 在垂直方向上将每个网格划分成若干个水平层, 通过输入流域属性及降水等数据就可以得到流域的水文响应过程。模型的子模块包括蒸散发、截留、坡面流和河道水流、非饱和流、饱和流、融雪以及河道与含水层之间的交换, 还有一个总体的控制模块。
新安江	由华东水利学院赵人俊等人提出。经历了从二水源到三水源的改进。后期还有考虑不同因素的改进模型。该模型得到了国际教科文组织的认可。	一般在大中型流域比小流域的模拟效果好, 湿润地区比半干旱地区模拟效果好, 在超渗产流区域模拟结果不理想; 模型参数少, 且具有明确的物理意义, 与流域的自然条件关系比较清楚, 易确定。	模型主要包括蒸散发计算、产流量计算、水源划分和汇流计算四个部分。蒸散发计算将土壤分为三层上层蒸发量超过上层含水量时, 下层开始蒸发; 产流量计算根据蓄满产流理论; 产流量先进入自由水蓄水库, 再划分水源; 地表径流直接进入河网进行汇流计算, 壤中流和地下径流分别进入壤中流水库和地下蓄水库, 经过水库消退进入河网。
TOPMODEL	1979 年提出的以地形为基础的半分布式流域水文模型, 已经在水文领域得到了广泛的应用。BTOPMC 模型的每个子流域应用 TOPMODEL 模拟计算。	不能用于大流域(面积大于 1 500 km ²); 模型结构简单, 优选参数少; 存在三个假设: (1) 壤中流始终处于稳定状态, 任何地方单位过水宽度的壤中流速率等于上游来水量; (2) 饱和和地下水的利坡度用地表坡度来近似; (3) 导水率是饱和和地下水水面深度的负指数函数。	降水入渗直接对根带蓄水层进行补偿, 达到饱和后进入下一层。同时, 储存在该层中的水分以一定的速度蒸散发, 一部分面积地下水抬升至地表成为饱和面, 产流发生在这种饱和地表面积或源面积上。认为地形指数相同的栅格产流量相同, 再以面积为权重计算出整个流域的平均产流量, 最后采用类似等流时线的方法将流域水量汇合到流域出口。

1.3 分离评判法

该方法近几年发展起来的, 用于量化不同因素对径流量影响的贡献率, 思路公式如下:

$$\eta_1 = \frac{\bar{Q}_c}{\Delta \bar{Q}} \times 100\% \quad \eta_2 = \frac{\bar{Q}_s}{\Delta \bar{Q}} \times 100\%$$

式中: $\Delta \bar{Q}$ 表示径流量的总变化量 (m^3/s); \bar{Q}_c 表示气候变化

对径流量的影响 (m^3/s); \bar{Q}_s 表示 LUCC 对径流量的影响 (m^3/s); η_1 和 η_2 分别表示气候变化和 LUCC 对径流量影响的贡献率 (%)。

选择不同时期的天然径流量和实测径流量分别做差,或者通过模拟的一些参数运算,求出 \bar{Q}_s 和 \bar{Q}_c 值(即:用流量的变化代表不同因素对径流量的影响),然后运用上述公式求出不同因素对径流量影响的贡献率^[18-19]。水利工程、用水消耗和不同土地利用/覆被类型对径流量影响的贡献率也可以通过上述方法进行量化分析。

2 LUCC 对径流量影响的主要研究方向

2.1 城镇用地对径流量的影响

随着城镇用地的不断扩张,不透水面持续增大,下渗能力减弱^[20],流域径流量不断增大,同时回流速度加快,更容易受短期暴雨影响,洪峰波形变得更加陡尖,增加了防洪规划与减灾措施的难度。

宋轩等^[21]应用 SCS 水文模型,研究了鲁山县 1992 年和 2006 年期间 LUCC 对径流量的影响,结果表明城镇化过程使径流量增加了 7.275 万 m^3 。Gary W. Coutu 等^[22]应用 SWAT 模型和斯皮尔曼等级相关系数法和布兰迪万流域 1992 年和 2000 年两期 LUCC,模拟分析了径流变化和 LUCC 关系,发现城镇化是导致地表径流增加的主要原因。有些学者认为城镇化对径流量的影响不应该一概而论,应从时间尺度上来考虑。郑璟等应用 SCS 水文模型对深圳地区进行了研究,认为总体上城镇化会导致地表径流的增加,但并不适用于城镇化过程的所有阶段,对城镇化 LUCC 的水文响应研究应当针对具体地区、具体时段进行分析。

考虑到城镇化主要是因为地面不透水性而导致净流量激增^[23],因此铺设透水砖等改变地面渗透率的措施得到推广和应用。Barry J. H. 等认为,通过铺设透水砖、给地下管道和雨水渠等添加次生空隙的措施可以增加几个数量级的渗透率^[24]。

2.2 森林对径流量影响

LUCC 对径流量、水量平衡及洪水过程的影响早已引起人们的注意,其中森林对径流量的影响备受关注^[25]。国内外许多专家学者通过实际观测、区域对比试验和模型模拟进行了大量的研究。

目前,就森林对径流量影响的研究主要都集中在特定区域实际观测或模型模拟结果对比分析的研究上。受气候条件、土壤类型、地貌类型、植被种类、茂盛程度、森林密度、前期含水量等众多因素的影响,研究结论的普遍性和可比性差,一般的研究成果只能适用于特定区域和特定时间^[26]。就空间尺度来说,一些学者认为,森林改变气候条件的能力具有一定的局限性,至少不能根本性的改变区域气候条件。但 VanderEnt^[27]指出,从全球角度来看,某个地区的 LUCC (如灌溉、水库建设和森林砍伐等)都能改变蒸发模式,从而潜在地影响较远地区的水资源。就时间尺度来说,Roland^[28]认为,相对于土地利用/覆被“渐变”来说,“骤变”对流域径流量影响更剧烈。野火烧尽一个区域有林地的 26.5%,之后 10 个月内,该流域的暴雨径流量比统计预计值增加了 92%,

高峰径流量增加了 1100%,到达洪峰值的时间减少了 53%。

2.3 不同土地利用/覆被类型对径流量的综合作用

一般不会存在一个地区只有一种土地利用/覆被类型,土地利用/覆被对于径流量的影响都是通过不同土地利用/覆被类型综合作用的结果。通过对比区域不同年的实际土地利用/覆被情况对径流量的影响情况进行综合分析,定性评价某一土地利用/覆被类型在该区域对径流量影响的方向和程度,有助于研究区域的现状评价以及提出未来规划的指导建议。

Carla S. S. Ferreira 等通过模拟降雨实验,认为城镇用地更容易产生地表径流,其次是林地,最后是耕地^[29]。牛最荣等^[30]针对清源河小流域 1980 年和 2000 年土地利用数据,利用分类水文模型进行模拟,结果表明黄土高原 LUCC 对流域年径流量有显著影响。罗巧等^[31]在湘江流域依据实际土地利用规划方案,设定 3 种模拟情景,通过 SWAT 模拟分析发现,增加林地和草地面积将减少径流量,而耕地和建设用地的增加导致径流量增加。

2.4 土地利用/覆被和气候条件对径流量的综合影响

该研究主要侧重以下两个方面。

一方面是研究土地利用/覆被和气候条件分别对径流量影响程度的大小。降雨是产生径流的主要条件,土地利用/覆被是改变径流量不可忽略的影响因素,因此将土地利用/覆被与气候数据相结合,研究对径流量的影响更具有说服力^[32]。李云驹等^[33]应用 SWAT 水文模型在云南省滇池松华坝流域分析了气候条件和 LUCC 对径流量敏感程度,结果表明气候影响大于 LUCC 影响。陈晓宏等^[34]采用多元回归模型对东江流域进行分析研究,认为 LUCC 是影响径流量的主要因素。邱国玉等^[35]应用 SWAT 水文模型分析了 20 世纪 80-90 年代泾河流域径流量变化,发现气候变化和 LUCC 对泾河流域径流量变化的影响程度几乎持平。陈宁等^[36]应用 SWAT 模型对汉江上游丹江口以上流域进行水文模拟,结果表明,仅在干旱季节,径流对 LUCC 最为敏感。需要说明的是,LUCC 对气候条件影响,经常被忽略,同时,研究主要集中在特定的区域,尺度问题至今仍是国际上待解决的问题。

另一方面是预测未来土地利用/覆被和气候变化,并模拟分析未来流域径流量的变化。由于气候条件和 LUCC 受人为因素的影响较大,并且预测结果得不到及时检验^[37],因此就该方向的研究并未得到更多的关注。胡彩虹等^[38]以陆浑水库控制流域为研究对象,采用蒙特卡洛、统计降尺度等方法生成未来气候数据,假定了两种土地利用/覆被类型情景,应用 SWAT 模型进行模拟预测未来径流量的变化情况。王云琪等^[39]采用 SoEun 等对未来土地利用变化进行预测,采用 Canadian、Hadley 两种模型对未来气候变化预测,提出 Trent 流域未来可能的 8 种土地利用与气候变化情景,最后应用分布式水文模型 PRMS 模拟分析,认为该流域未来径流量可能增加。由于径流量变化是受多方面因素影响的,研究区域土壤理化性质、坡度、植被长势等变化趋势均未能预测,并且对径流量变化的预测结果得不到及时验证,仅能对特定的研究区域进行不确定性的推测。

2.5 LUCC对洪水过程的影响

土地利用/覆被对洪水过程影响的研究就是在特定气候条件(暴雨或冰雪急骤融化)下,分析不同土地利用/覆被类型对净流量的影响。洪水的迅猛程度关系到生态环境保护、流域水循环、防洪减灾决策以及社会经济发展等多方面^[40]。洪水对不同土地利用/覆被类型和分布状况的响应以及土地利用/覆被对不同洪水类型的影响程度是持续已久的研究热点。

李建柱等^[41]在大清河水系的紫荆关流域,应用超渗蓄满水文模型模拟1980年和2000年两期洪水变化情况,认为土地利用/覆被对洪水影响的程度取决于洪水量级的大小,洪水量级越大,影响越小。陈瑜等^[42]应用栅格分布式水文模型模拟了白盆珠水库流域9种下垫面情景的3场典型洪水过程,结果表明,森林有坦化洪水过程的作用,其中,靠近河道的林地>远离河道的林地,上游林地>中、下游林地。Yeshewatesfa Hundecha等^[43]应用HBV模型模拟莱茵河流域径流变化,发现相比冬季,城镇化在夏季更容易导致洪峰流量激增。土地利用/覆被对洪水的调蓄作用是毋庸置疑的,但洪水过程是受多方面因素影响的,土壤初始含水量、植被类型、植被生长状况等都是影响洪水的因素,而目前的研究把这些影响因素进行概化,因此该方向的研究还有待于进一步完善。

2.6 气候条件和LUCC对径流量影响的贡献率

气候条件和土地利用/覆被条件是影响净流量变化的主要因素。最初这方面的研究多是定性分析,而近年来定量分析气候条件和LUCC对径流量影响已经成为一个趋势。郭军庭等^[19]在北京密云山水库上游潮河流域,运用分离变量法,量化分析气候变异和LUCC对1961年-2009年的径流量显著减少的贡献率分别为43.9%和56.1%;涂新军等^[44]根据东江流域1956年-2009年气象资料和水文资料,通过对比降水和径流年内分配特征指标的阶段变化差异,得出水利工程水量调节、LUCC、用水消耗和气候变化对东江径流分配特征的影响贡献率分别约为-33.5%、-9%、4.5%和1%;赵阳等^[18]结合AWY模型和分离变量法对潮白河流域1956年-2010年径流量的减少进行了分析,得出气候变化对潮河、白河流域年径流减少贡献率分别为59.3%和93.5%,土地利用变化贡献率分别为40.7%和6.5%。目前该方面的研究相对较少。

3 展望

LUCC作为径流的一个驱动力是在特定的时空体系中加以辨析的,在研究LUCC对径流的影响时应遵循时空尺度观念,只有在连续的尺度序列上对其考察和研究,才能把握它们的内在规律,有助于LUCC对径流量影响机理的研究。因此,空间尺度大小的选择、向下或向上转换,以及时间尺度、空间尺度和数据指标体系的统一、连续数据的准备和应用将成为未来研究的热点和难点。

从研究的主要工具和手段来看,第一,许多水文模型的参数是依据国外地理条件而设定的,国内的数据需要转化或者寻找其他途径,这必将影响到模型模拟精度;第二,目前已有的分布式水文模型大多没有结合我国土地资源分类系统;

第三,流域出口径流量一直是模型参数率定和检验的标准,但相对于整个大流域来说,仅凭一个出口径流量来检验是不够的^[45-46];第四,相同的模型用于相同的流域时,模型的参数及模型的效果也会有很大的差别。因此,水文模型在研究LUCC对径流量影响中还需不断发展和完善。

现有土地利用/覆被分类不规范、不统一,有待于细分^[47]。例如,不同类型的植被有着不同的水文水资源效应,即使同一种植被,不同的茂盛程度、树龄、生长季节等对于径流量也有不同的影响程度;不同的作物种类、耕种措施、叶面积指数等对径流的影响也存在很大差异。因此根据土地利用/覆被的水文特征和径流影响因子对LUCC进行详细分类研究,进行数据平台建设,为相关研究提供统一、规范的数据支持。

受科学认知水平、财力、时间和精力等方面的限制,很多研究只能在离散或单一的尺度上进行,无法揭示影响过程中部分影响因子的时空变化信息,弱化了对机制和机理性研究的论据支持和研究成果的可信度,因此,就LUCC对径流量影响的机理性研究有待于加强。

在研究内容上,量化LUCC和气候条件对径流量的影响已然成为一个趋势,但研究方法没有形成一个普遍的共识,量化过程过于粗糙,还需进行完善。

参考文献(References):

- [1] David, Jankowska, Grant, et al. Space Versus Place in Complex Human - natural Systems: Spatial and Multilevel Models of Tropical Land Use and Cover Change (LUCC) in Guatemala [J]. *Ecological Modelling*, 2012, 229: 64-75.
- [2] M H ROMERO-RUIZ, S G A FLANTUA, K TANSEY, et al. Landscape Transformations in Savannas of Northern South America: Land Use/ Cover Changes since 1987 in the Llanos Orientales of Colombia [J]. *Applied Geography*, 2012, 32: 766-776.
- [3] KALNAY Eugenia, CAI Ming. Impact of Urbanization and Land use Change on Climate [J]. *Nature*, 2003, 423(6939): 528-531.
- [4] H TEMESGEN, J NYSSSEN. Ecological Succession and Land Use Changes in a Lake Retreat Area [J]. *Journal of Arid Environments* 2013, 91: 53-60.
- [5] 林凯荣, 何艳虎, 陈晓宏. 土地利用变化对东江流域径流量的影响 [J]. *水力发电学报*, 2012, 31(4): 44-48. (LIN Karong, HE Yair hu, CHEN Xiaohong. Impact of Land Use Change on the Runoff in Dongjiang Basin [J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2012, 31(4): 44-48. (in Chinese))
- [6] 石龙宇, 卢新, 崔胜辉. 土地变化的生态效应研究进展 [J]. *中国土地科学*, 2008, 22(4): 73-79. (SHI Longyu, LU Xin, CUI Shenghui. Research Progress on Ecological Effects of Land Change [J]. *China Land Science*, 2008, 22(4): 73-79. (in Chinese))
- [7] LIU Mingliang, TIAN Hanqin, CHEN Guangsheng, et al. Effects of Land use and Land cover Change on Evapotranspiration and Water Yield in China during 1900-2000 [J]. *JAWRA*, 2008, 44(5): 1193-1207.
- [8] 周祖昊, 仇亚琴, 贾仰文, 等. 变化环境下渭河流域水资源演变规律分析 [J]. *水文*, 2009, 29(1): 21-25. (ZHOU Zuhao, QIU

- Yan qin, JIA Yang-wen, et al. Evolution Law of Water Resources in Weihe River Basin Based on Dualistic Water Resources Evolution Model[J]. Hydrology, 2009, 29(1): 21-25. (in Chinese)
- [9] LIU J Y, DENG X Z. Progress of the Research Methodologies on the Temporal and Spatial Process of LUCC[J]. Chinese Science Bulletin, 2010, 55(3): 1-9.
- [10] 王永磊, 李振, 景雪, 等. 均匀降雨条件下不同下垫面产汇流特性试验研究[J]. 中国农村水利水电, 2012, 2: 38-41. (WANG Yong-lei, LI Zhen, JING Xue, et al. Research on Runoff producing and Flow Concentration Characteristics of Different Underlying Surfaces under Uniform Rainfall Conditions[J]. China Rural Water and Hydropower, 2012, 2: 38-41. (in Chinese))
- [11] 鲁克新, 李占斌, 张霞, 等. 室内模拟降雨条件下径流侵蚀产沙试验研究[J]. 水土保持学报, 2011, 2(2): 6-10. (LU Ke-xin, LI Zhan-bin, ZHANG Xia, et al. Experimental Study on Law of Runoff Erosion Sediment Yield under Indoor Simulated Rainfall Condition[J]. 2011, 2(2): 6-10. (in Chinese))
- [12] 史晓亮, 李颖, 赵凯, 等. 诺敏河流域土地利用与覆被变化及其对水文过程的影响[J]. 水土保持通报, 2013, 33(1): 23-28. (SHI Xiaoliang, LI Ying, ZHAO Kai, et al. Nuomin Watershed Land Use and Land Cover Change and Its Impact on Hydrological Processes[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2009, 7(1): 83-87. (in Chinese))
- [13] 欧春平, 夏军, 王中根, 等. LUCC 对 SWAT 模型水循环模拟结果的影响研究——以海河流域为例[J]. 水力发电学报, 2009, 28(4): 124-129. (OU Chunping, XIA Jun, WANG Zhong-gen, et al. LUCC Influence on SWAT Hydrological Simulation a Case Study of Haihe River Basin[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2009, 28(4): 124-129. (in Chinese))
- [14] 李丽娟, 姜德娟, 李九一, 等. LUCC 的水文效应研究进展[J]. 自然资源学报, 2007, 22(2): 211-223. (LI Lijuan, JIANG Dejuan, LI Jiuyi, et al. Advances in Hydrological Response to Land Use/Land Cover Change [J]. Journal of Natural Resources, 2007, 22(2): 211-223. (in Chinese))
- [15] 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. (LUO Qiao, WANG Keling, WANG Qixue. Using SWAT to Simulate Runoff under Different Land Use Scenarios in Xiangjiang River Basin [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2011, 19(6): 1431-1436. (in Chinese))
- [16] Tracy J BAKER, Scott N MILLER. Using the Soil and Water Assessment Tool (SWAT) to Assess Land Use Impact on Water Resources in an East African Watershed[J]. Journal of Hydrology, 2013, 486: 100-111.
- [17] Kari L Vigerstol, Juliann E Aukema. A Comparison of Tools for Modeling Freshwater Ecosystem Services[J]. Journal of Environmental Management, 2011; 92(10): 2403-2409.
- [18] 赵阳, 余新晓, 郑江坤, 等. 气候和土地利用变化对潮白河流域径流变化的定量影响[J]. 农业工程学报, 2012, 28(22): 252-260. (ZHAO Yang, YU Xin-xiao, ZHENG Jiang-kun, et al. Quantitative Effects of Climate Variations and Land use Changes on Annual Streamflow in Chaobai River Basin[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(22): 252-260. (in Chinese))
- [19] 郭军庭, 张志强, 王盛萍, 等. 气候和土地利用变化对潮河流域产流产沙的影响[J]. 农业工程学报, 2012, 28(14): 236-243. (GUO Juntong, ZHANG Zhi-qiang, WANG Sheng-ping, et al. Effects of Climate and Land Use Changes on Stream Flow and Sediment Yield in Chaohe River Basin[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(14): 236-243. (in Chinese))
- [20] LEE J, PAK G. Effects of Land Use Change and Water Reuse Options on Urban Water Cycle[J]. Journal of Environment Sciences, 2010, 22(6): 923-928.
- [21] 宋轩, 王本芬, 杜丽平, 等. 鲁山县土地利用变化对地表径流的影响[J]. 河南农业科学, 2008, (4): 57-60. (SONG Xuan, WANG Benfen, DU Liping, et al. Effect of Land Use Change on Surface Runoff in Lushan County[J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2008, (4): 57-60. (in Chinese))
- [22] Gary W Coutu, Carmen Vega. Impacts of Land Use Changes on Runoff Generation in the East Branch of the Brandywine Creek Watershed using a GIS-BASED Hydrologic Model [J]. Middle States Geographer, 2007, 40: 142-149.
- [23] 饶玲丽, 曹建新, 郝增韬. 透水砖发展状况及其推广建议[J]. 砖瓦世界, 2011, (3): 31-33. (RAO Lingli, CAO Jianxin, HAO Zengtao. Development and Promotion of Permeable Brick Suggestions[J]. Brick & Tile World, 2011, (3): 31-33. (in Chinese))
- [24] BARRY JH, JOHN M. Hydrogeological Impacts of Urbanization [J]. Environmental & Engineering Geoscience, 2012, 18: 3-24.
- [25] 刘珉, 吴志祥. 森林生态系统水循环研究概述[J]. 热带农业工程, 2012, 36(1): 13-20. (LIU Min, WU Zhi-xiang. Review of Hydrologic Cycle of Forest Ecosystem[J]. Tropical Agricultural Engineering, 2012, 36(1): 13-20. (in Chinese))
- [26] 王波, 张洪江, 杜士才, 等. 三峡库区天然次生林凋落物森林水文效应研究[J]. 水土保持通报, 2009, 3: 83-87. (WANG Bo, ZHANG Hong-jiang, DU Shicai, et al. Forest Hydrological Effects of Litter Layer Under Different Natural Secondary Forest in Three Gorges Reservoir Area[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2009, 3: 83-87. (in Chinese))
- [27] 熊永兰. 土地利用变化影响陆地水循环[J]. 地球科学进展, 2011, 26(7): 694-685. (XIONG Yong-lan. Land Use Change Influence Continental Water Cycle [J]. Advances in Earth Science, 2011, 26(7): 694-685. (in Chinese))
- [28] ROLAND E, SCHULZ E. Modelling Hydrological Responses to Land Use and Climate Change: A Southern African Perspective[J]. Ambio, 2000, 29(1): 13-17.
- [29] Carla S S Ferreira, Antonio J D Ferreira, Rosalinda L Pato, et al. Rainfall runoff erosion Relationships Study for Different Land Uses in a Suburban Area[J]. Zeitschrift für Geomorphologie, 2012, 56(3): 5-20.
- [30] 牛最荣, 赵文智, 刘进琪, 等. 甘肃渭河流域土地利用及覆被变化对径流的影响研究[J]. 水利水电技术, 2012, 43(4): 5-10. (NIU Zuirong, ZHAO Wen-zhi, LIU Jinqi, et al. Study on Impact from Change of Land use and Land cover on Runoff in

- Weihe River Basin in Gansu Province[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2012, 43(4): 5-10. (in Chinese)
- [31] 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. (LUO Qiao, WANG Ke lin, WANG Qin xue. Using SWAT to Simulate Runoff under Different Land Use Scenarios in Xiangjiang River Basin[J]. Chinese Journal of Eco Agriculture, 2011, 19(6): 1431-1436. (in Chinese))
- [32] 杨霞. 水文下垫面对河川径流的影响分析[J]. 水资源与水工程学报, 2008, 19(1): 100-103. (YANG Xia. Analysis on Influence of the Hydrologic Lower Bedding Course upon the River Runoff[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2008, 19(1): 100-103. (in Chinese))
- [33] 李云驹, 潘剑君, 许建初, 等. 气候和土地利用变化对松华坝流域水资源的相对作用研究[J]. 南京农业大学学报, 2012, 35(1): 80-86. (LI Yun ju, PAN Jian jun, XU Jian chu, et al. Relative Impacts of Climate and Land Use Changes on Water Resource in Songhuaba Watershed[J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 2012, 35(1): 80-86. (in Chinese))
- [34] 陈晓宏, 王兆礼. 东江流域土地利用变化对水资源的影响[J]. 北京师范大学学报, 2010, 46(3): 311-316. (CHEN Xiaohong, WANG Zhaoli. Land Use Change and Its Impact on Water Resources in East River Basin[J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2010, 46(3): 311-316. (in Chinese))
- [35] 邱国玉, 尹婧, 熊育久, 等. 北方干旱化和土地利用变化对泾河流域径流的影响[J]. 自然资源学报, 2008, 23(2): 211-217. (QIU Guoyu, YIN Jing, XIONG Yujiu, et al. Studies on the Effects of Climatic Warming-drying Trend and Land Use Change on the Runoff in the Jinghe River Basin[J]. Journal of Natural Resources, 2008, 23(2): 211-217. (in Chinese))
- [36] 陈宁, 赵红莉, 蒋云钟. 汉江上游不同气候情景下土地利用变化对径流的影响研究[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2010, 46(3): 366-370. (CHEN Ning, ZHAO Hongli, JIANG Yunzhong. Effects of Land Use Changes on Runoff in the upper Stream of the HAN River Basin in Different Climate Scenarios[J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2010, 46(3): 366-370. (in Chinese))
- [37] Aurlien Letourneau, Peter H Verburg, Elke Stehfest. A Land use Systems Approach to Represent Land use Dynamics at Continental and Global Scales[J]. Environmental Modelling & Software, 2012, 33: 61-79.
- [38] 胡彩虹, 刘丽娜, 吴泽宁, 等. 未来气候情景下覆被变化对径流量的影响[J]. 人民黄河, 2012, 34(1): 19-21. (HU Cairong, LIU Lina, WU Zening, et al. Effect of Land Cover Change to Runoff Under Future Climate Scenarios[J]. Yellow River, 2012, 34(1): 19-21. (in Chinese))
- [39] 王云琦, 齐实, 孙阁, 等. 气候与土地利用变化对流域水资源的影响——以美国北卡罗莱纳州 Trent 流域为例[J]. 水科学进展, 2011, 22(1): 51-57. (WANG Yunqi, QI Shi, SUN Ge, et al. Impacts of Climate and Land Use Change on Water Resources in a Watershed: A Case Study on the Trent River basin in North Carolina, USA[J]. Advances in Water Science, 2011, 22(1): 51-57. (in Chinese))
- [40] WAN Yanhua, LUO Dan, GUO Yong. Urban Flood Control Strategy Based on New Relationship of Human and Flood[J]. Ecological Economy, 2010, 6: 187-194.
- [41] 李建柱, 冯平. 紫荆关流域下垫面变化对洪水的影响[J]. 地理研究, 2011, 30(5): 922-930. (LI Jianzhu, FENG Ping. The Effects of Underlying Surface Change on Floods in Zijingguan Watershed[J]. Geographical Research, 2011, 30(5): 922-930. (in Chinese))
- [42] 陈瑜, 黄锋华, 孔次芬. 白盆珠水库流域下垫面变化的洪水响应研究[J]. 长江科学院院报, 2011, 28(8): 1-4. (CHEN Yu, HUANG Fenghua, KONG Cifen. Flood Response Caused by Underlying Surface Change in Baipenzhu Reservoir Basin[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2011, 28(8): 1-4. (in Chinese))
- [43] Yeshewatesfa Hundecha, Andra sBardossy. Modeling of the Effect of Land Use Changes on the Runoff Generation of a River Basin through Parameter Regionalization of a Watershed Model[J]. Journal of Hydrology, 2004, 292: 281-295.
- [44] 林凯荣, 何艳虎, 陈晓宏. 气候变化及人类活动对东江流域径流影响的贡献分解研究[J]. 水力学报, 2012, 43(11): 1312-1320. (LIN Kaorong, HE Yanhu, CHEN Xiaohong. Identifying the Quantitative Effect of Climate Change and Human Activity on Runoff in the Dongjiang River Basin[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2012, 43(11): 1312-1320. (in Chinese))
- [45] 胡彩虹, 王金. 流域产汇流模型及水文模型[M]. 郑州: 黄河水利出版社. 2010. (HU Cairong, WANG Jin. Rainfall-runoff Models and Hydrological Models[M]. Zhengzhou: The Yellow River Water Conservancy Press. 2010.)
- [46] 徐宗学. 水文模型[M]. 北京: 科学出版社. 2009. (XU Zongxue. Hydrological Model[M]. Beijing: Science Press. 2010. (in Chinese))
- [47] LIU J Y, DENG X Z. Progress of the Research Methodologies on the Temporal and Spatial Process of LUCC[J]. Physical Chemistry. 2010, 55(3): 1-9.

(上接第 72 页)

- 1991, 3(2): 43-50. (in Chinese))
- [14] 黄成彦, 孔昭宸, 浦庆余, 等. 颐和园昆明湖 3500 余年沉积物研究[M]. 北京: 海洋出版社, 1996: 111-117. (HUANG Chengyan, KONG Zhaochen, PU Qingyu, et al. Summer Palace Kunming Lake in 3500 Years of Sediment Research[M]. Beijing: China Ocean Press, 1996: 111-117. (in Chinese))
- [15] 金章东, 沈吉, 王苏民, 等. 岱海的“中世纪暖期”[J]. 湖泊科学. 2002, 15(3): 209-216. (JIN Zhangdong, SHEN Ji, WANG Sumin, et al. The Medieval Warm Period in the Daihai Area[J]. Journal of Lake Sciences. 2002, 15(3): 209-216. (in Chinese))