

# 下垫面变化对流域产汇流影响研究进展

董国强<sup>1,2</sup>, 杨志勇<sup>2</sup>, 于赢东<sup>2</sup>

(1. 东华大学 环境科学与工程学院, 上海 201620;  
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)

**摘要:** 近年来随着人类活动影响的加剧, 流域的下垫面条件发生了显著变化, 改变了流域入渗、蒸散发、径流等水文过程的特征, 对流域的水资源、洪旱都造成了显著影响。为科学合理地开展流域水资源, 下垫面变化对流域产汇流影响成为水文科学研究的热点问题。近年来国内外关于下垫面变化对水循环影响方面的相关研究历程可以划分为萌芽阶段、起步阶段和发展阶段, 现有研究认为, 森林砍伐与草地开垦、农业开发与城镇化建设活动可以增加径流量, 而水土保持措施可以减少径流量, 流域下垫面通过各种景观变化的耦合作用影响河川径流。下垫面变化的水文效应的研究方法主要有流域对比试验法、特征变量时间序列法、水文模型法等, 其中, 流域生态水文模型是生态水文研究的前沿和热点。此外, 多种综合方法越来越多地应用在下垫面变化影响水文效应的研究中, 而“原型观测+数值模型”的研究方法可能会成为一个发展趋势。

**关键词:** 下垫面; 产汇流; 植被变化; 城市化; 水文模型

**中图分类号:** P343.9   **文献标识码:** A   **文章编号:** 1672-1683(2013)03-0111-07

## Research Progress on Effects of Variations of Underlying Surface on Runoff Yield and Concentration in the River Basin

DONG Guo qiang<sup>1,2</sup>, YANG Zhi yong<sup>2</sup>, YU Ying dong<sup>2</sup>

(1. College of Environmental Science and Engineering, Donghua University, Shanghai 201620, China;

2. State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, Chain Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

**Abstract:** With the increasing impacts of human activities, the underlying surface of the river basin has encountered significant variations in recent years, which has changed the characteristics of hydrological processes such as infiltration, evapotranspiration, and runoff, and also caused significant impacts on the water resources, flood, and drought in the river basin. In order to develop the water resources reasonably, the impacts of the variations of underlying surface on the runoff yield and concentration have become a hot topic in the hydrological research. In recent years, the research process of the effects of the variations of underlying surface on the hydrological cycle can be classified into three phases: budding stage, starting stage, and development stage. The current research suggests that deforestation, grassland reclamation, agricultural development, and urbanization can increase runoff, whereas soil and water conservation can reduce runoff, and the coupling effects of landscape change and underlying surface change can impact the runoff. The research methods of the hydrological effects caused by the variations of underlying surface include the comparative test, time series method of characteristic values, and hydrological models, and the ecohydrological model is the frontier and hot issue of ecohydrological research. Moreover, several comprehensive methods have been applied to investigate the hydrological effects caused by the variations of underlying surface, and the research method of "prototype observation plus numerical simulation" is the development trend.

**Key words:** underlying surface; runoff yield and concentration; vegetation changes; urbanization; hydrological model

收稿日期: 2012-10-22    修回日期: 2012-11-13    网络出版时间: 2013-05-18

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20130518.1744.035.html>

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)资助项目(2010CB951102); 国家自然科学基金创新研究群体基金资助项目(51021066); 科技部创新方法工作专项项目(2009IM020100; 2011HM 011000); 中国水利水电科学研究院科研专项(资集1206)

作者简介: 董国强(1987-), 男, 河南内黄县, 硕士研究生, 主要从事气候变化与水资源方面的研究。E-mail: dgqwhr@163.com

通讯作者: 杨志勇(1979-), 男, 湖南常德人, 高级工程师, 主要从事水文水资源、分布式水文模拟, 气候变化对水资源影响等基础研究。

E-mail: yangzy@iwhr.com

随着经济社会的迅速发展,水土保持、植树造林、水利工程、城镇化建设等人类活动对下垫面变化的影响不断加剧。由于人类活动和气候变化改变了下垫面变化,导致流域入渗、蒸散发、径流等水文要素发生一定的变化,从而引起流域产汇流过程的变化。较长时间尺度上,气候变化对水文水资源的影响更加明显,但短期内,土地利用/覆被变化是水文水资源变化的主要驱动要素之一<sup>[1]</sup>。土地利用/覆被变化水文效应研究已成为目前乃至未来几十年全球研究的热点和前沿问题<sup>[2]</sup>。

20 世纪 90 年代以来,有关国际组织实施了一系列国际水科学计划,如 IHP、WCRP、IGBP、CWSP 等,探讨环境变化下的水循环以及相关的资源与环境问题。因此,变化环境(即全球变化和人类活动影响)下的水循环研究是 21 世纪水文科学研究关注的重点<sup>[3]</sup>。产汇流过程是水循环研究的重要内容,同时产汇流理论是水文模拟的基础,因此,进行流域下垫面变化对产汇流过程的影响研究是十分必要的。

本文通过梳理国内外研究成果,从林地、草地、耕地、居工地、景观变化及水土保持措施等方面阐述了下垫面变化对产汇流过程的影响机制,并剖析了各类下垫面变化的水文效应研究方法的优缺点,总结了当前研究存在的问题及未来研究的关键问题。

## 1 相关研究阶段的划分

下垫面变化对水循环的影响研究始于 20 世纪初,主要集中在森林与水相互作用的研究。19 世纪后期,随着人口的增长,许多森林被砍伐。随之产生的一系列后果引起人们的关注,从而开始一系列的科学研究。早期的森林水文研究重点是关注森林的变化(主要是森林砍伐)对森林流域产水量的影响,采用的研究方法是对比流域试验法和流域自身对比法。这类研究最早可追溯到 1900 年瑞士 Emmenal 山区的两个小流域对比实验<sup>[4]</sup>。1909 年,美国设置第一个对比实验流域探讨森林覆被变化对流域产流的影响,并建立水文实验站致力于研究森林水文问题。而这一阶段多数的研究结果表明,森林的开采会导致径流量的增加。

进入 20 世纪 50 年代以后,随着“流域模型”概念的提出,人们开始把水循环过程作为一个完整的系统来研究。1970 年 Onstad 和 Jamieson<sup>[5]</sup>首先尝试利用水文模型模拟土地利用变化对径流影响,标志着下垫面变化对水循环影响的研究由萌芽时代开始向起步阶段过渡。此后,土地利用/覆被变化的水循环影响研究由传统的统计分析方法转向基于物理机制的水文模型方法。这一时期,森林植被变化对流域产水量影响的研究达到高潮,并致力于下垫面变化影响径流形成机制的研究,也更加注重对水循环过程的研究。同时,城市化引起的土地利用变化对水循环过程的影响也受到关注,一般采用单位线法对其进行分析。

20 世纪 90 年代初,土地利用/土地覆盖变化(LUCC)被国际地圈生物圈计划(IGBP)与国际全球环境变化人文因素计划(IHDP)作为核心计划之一联合发起以后,迅速引起许多学者的兴趣与关注,特别是与人类活动密切相关的土地利用/土地覆盖变化的水文效应越来越受重视。随着地理信息系统(GIS)、全球定位系统(GPS)及卫星遥感技术(RS)在水

文学中的应用和分布式水文模型的迅速发展,下垫面变化的水循环影响研究进入到一个新的发展阶段,人们开始综合利用以上几种方法研究土地利用/土地覆盖变化的水文效应,如水文模型与统计学方法相结合的方法、模型耦合法、模型对比法等。总结过去 100 多年来下垫面变化对水循环影响研究所走过的历程,可以将其划分为萌芽阶段、起步阶段和发展阶段(见表 1、图 1)。

表 1 下垫面变化对水循环影响研究的发展历程阶段划分情况

Table 1 The development stages of studies of the effects of underlying surface changes on the hydrological cycle

历程	时间	划分依据	实践需求	主要研究方法	研究尺度	研究重点
萌芽阶段	20 世纪初至 60 年代	1900 年,瑞士 Emmenal 山区的两个小流域对比实验	森林砍伐引起一系列后果(洪水等)	试验流域法	小流域、较小空间尺度	森林的变化(主要是森林砍伐)对森林流域产水量的影响
起步阶段	20 世纪 70 年代至 80 年代	1970 年, Onstad 和 Jamieson <sup>[5]</sup> 首先尝试利用水文模型模拟土地利用变化对径流影响	注重径流形成机制及水循环过程研究	特征量时序法	空间异质性不大的流域、较长时间尺度	从特征参数的变化趋势上评估土地利用/覆被变化的水文效应
发展阶段	20 世纪 90 年代	1992 年,土地利用/土地覆盖变化(LUCC)作为核心计划之一被联合发起	变化环境下流域生态水文过程演变的影响机制	水文模型法和综合法	中大尺度流域	对水文效应的变化进行机理性的解释

## 2 下垫面变化对流域产汇流影响机制现状研究

人类活动改变了下垫面状况、局地气候,从而直接或间接地影响降雨径流关系和产汇流过程。影响水循环过程的土地利用/覆被变化过程,在区域尺度上主要包括植被变化(如毁林和造林、草地开垦等)、农业开发活动(如农田开垦、作物耕种和管理方式等)、城镇化建设等<sup>[6]</sup>;从全球尺度而言,植被变化是最主要的驱动因素<sup>[7]</sup>。本文主要从林地、草地、耕地、居工地、景观变化及水土保持等方面阐述不同下垫面变化对流域产汇流过程的影响机制。

### 2.1 毁林造林与草地开垦

森林植被对水量的影响可分为林冠截流、枯枝落叶层截持水、林地土壤水分入渗及贮水、林地蒸发散等方面。森林对产汇流过程的影响是通过影响降水与蒸散发来进行的。一般认为森林具有比其他植被更大的蒸腾量,并且森林冠层与枯落物具有截持损失功能,因此森林减少是流域产水量增加的最主要原因。

Bari 等<sup>[9]</sup>分析了由于土地利用变化引起的年径流变化,结果表明,森林植被蒸散发的增加可导致径流的减少。Naik 和 Jay<sup>[10]</sup>对哥伦比亚 1879 年-1928 年的实测径流进行还原后

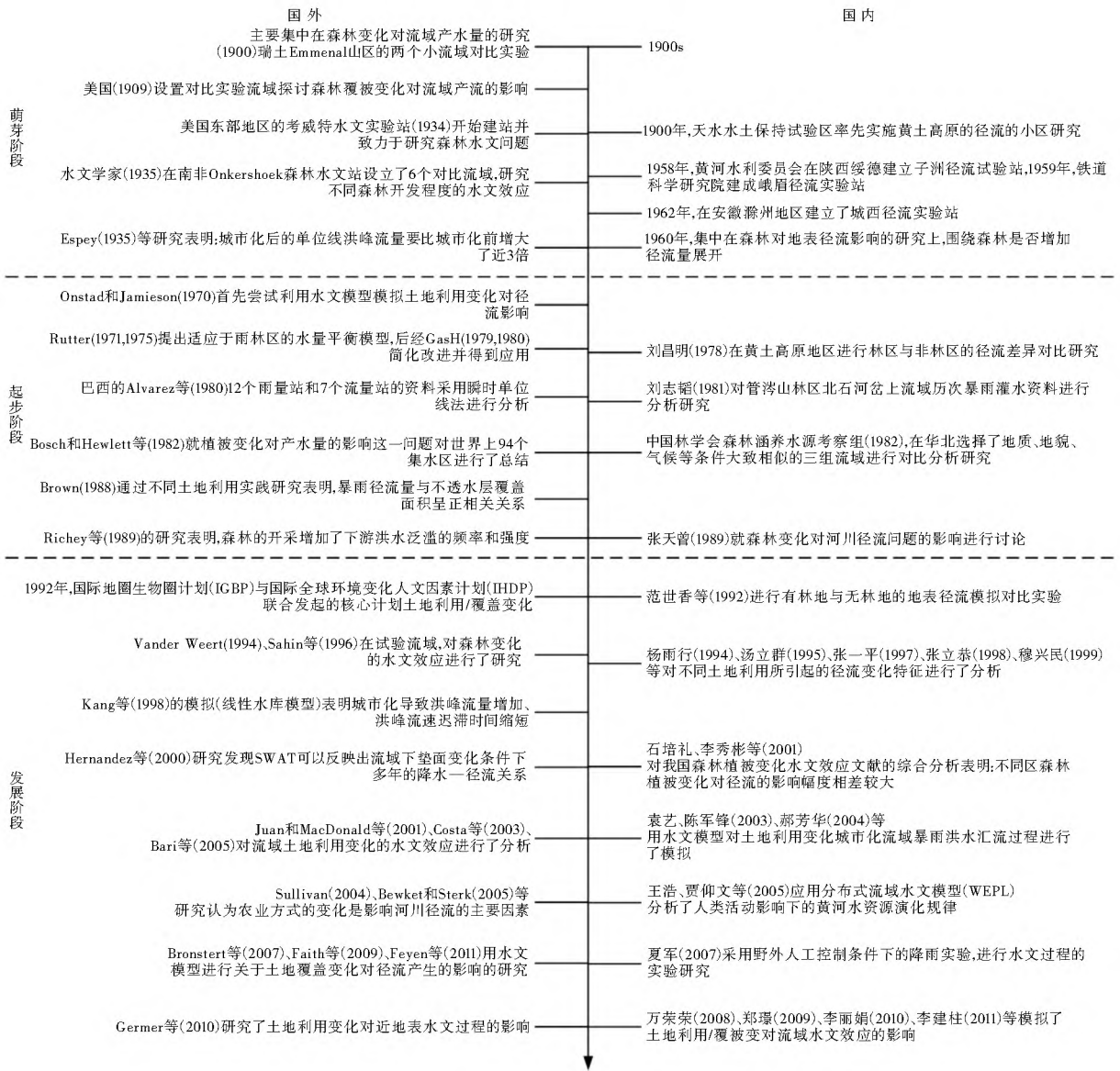


图1 下垫面变化对水循环影响的国内外研究对比

Fig. 1 Comparison of the national and international research progresses of the impacts of underlying surface changes on the hydrological cycle

得到天然径流过程,发现开垦森林造成蒸散发减少,从而导致年径流有所增加。邓慧平等<sup>[11]</sup>对梭磨河流域的日径流过程模拟表明,随着流域有林地面积和冠层最大截流量的增加,地表径流、地表以下径流、总径流均减少。杨宏伟等<sup>[12]</sup>探讨了典型流域土地利用变化对地表径流的影响,研究认为林地面积的增加可导致年径流量减少。

在国内,石培礼等<sup>[13]</sup>对我国森林植被变化水文效应文献的综合分析表明:不同地区森林植被变化对径流的影响幅度相差较大,但在除长江中上游外的其他地区,森林砍伐或火灾会降低林木的蒸散发,增加河川径流。范世香等<sup>[14]</sup>在长白山森林生态系统定位站森林水文模拟实验室,进行有林地与无林地的地表径流模拟对比实验,得出了森林能减少径流量、调节径流过程的结论。李毅等<sup>[15-16]</sup>通过室内人工降雨试验研究,同样指出植被有增加入渗率、减小径流系数、明显降低径流流速等作用。

但是,森林与水的关系极其复杂,不同自然地理环境或相同自然地理环境下不同结构类型的森林对大气降水的

截留、林内降雨的再分配、地表径流、地下径流以及对蒸散发产生的影响不尽相同,由此而造成了水分大循环、小循环和水量平衡的时空格局与过程的差异<sup>[17]</sup>。因此,关于森林植被与径流的关系,虽然大多数认为森林的存在会减少年径流量,但是不能一概而论。郝芳华等<sup>[18]</sup>对黄河下游支流洛河,在其上游卢氏水文站以上流域进行产流模拟表明:森林的存在增加了径流量,降雨量的增大能弱化下垫面对产流量的影响。

草地能在一定的条件下通过改变水分在蒸发、渗透、径流和地下水间的分配,从而影响产汇流过程。草地枯落物通过对降水的吸纳,使地表径流减少,并增加对土壤水的补给。黄明斌等<sup>[9]</sup>研究发现在郁闭度相同的情况下,自然草地小流域的径流量大于森林小流域,蒸散量小于森林小流域。虽然林地对产汇流过程的影响问题仍存在争议,需进一步研究,但是草地明显有增加入渗率、减少径流量、降低径流流速等作用。

## 2.2 农业开发活动与城镇化建设

理论上,农作物把土壤水和地下水散发到大气中去,既改变了土壤水和地下水的状况,也改变了小气候的状况,从

而促进了水循环。开荒、坡地改梯田、扩大灌溉面积以及旱地改水田等农业措施,不同程度地拦蓄和耗用了地面径流,增加地面水下渗机会,使洪水过程平缓。灌溉活动使地下水和土壤水得到大量的补充,土壤水分蒸发显著增加,因此提高了局地降水概率,从而使流域水循环发生改变。

然而,随着社会的快速发展和人口的迅猛增长,农业用地不断得到扩展,同时土地利用的开发强度也不断增加,极大地破坏了土壤结构,促使土壤压实和结皮,从而使入渗速率和土壤蓄水量有所降低<sup>[20]</sup>。Van der Ploeg 等<sup>[21]</sup>分析 Ebe 河流域 100 年来洪水频率,发现农业机械化、土壤集约式耕作导致土壤物理性质的退化是雨季农业用地产生的地表径流增加的主要原因。Costa 等<sup>[22]</sup>对托坎廷斯河流域(面积  $76.7 \times 10^4 \text{ km}^2$ )土地利用变化的水文效应进行了分析,结果表明,农业用地的增加,降低了入渗和蒸发,从而增加了年均流量。谢高地等<sup>[23]</sup>研究发现泾河流域河川径流量减少的主要原因在于景观结构中农耕地景观比例的增大。总体来说,普遍观点认为:农业开发活动具有增加年径流量和洪峰流量的作用。

城市化中人工陆面的建设改变了城市下垫面性质,不透水的硬化地面增加而植被、土壤减少,从而引起产汇流特性的变化。产流方面由于硬化地面阻碍了雨水的下渗,径流系数增大,地表径流量增加;汇流方面表现为汇流时间缩短,峰量增高,峰值出现时间提前。Kang 等<sup>[24]</sup>的模拟表明,城市化导致洪峰流量增加,洪峰滞时缩短。Bums 等<sup>[25]</sup>对美国纽约市附近 Croton 河 3 个试验流域(集水面积约为  $0.38 \sim 0.56 \text{ km}^2$ ,分别代表高度城市化区域、中等城市化区域和未开发区域)的 27 场雨洪资料进行了分析,结果表明随着城市化的不断发展,洪峰流量不断增加,洪水退水时间将减少。White 和 Greer<sup>[26]</sup>探讨了 California 地区城市化的水文效应,认为随着城市化程度的加剧,每日平均和最小流量、旱季径流和洪峰流量都有显著的增加趋势。

许多学者对国内城市化发展迅速的城市也作了大量研究。葛怡等<sup>[27]</sup>对上海市区的研究表明,城市化大幅增加了径流系数。史培军等<sup>[28]</sup>对深圳市土地利用变化对城市水文过程影响的研究表明:随着土地利用向着城市化方向发展,最大洪峰流量到来的时间提前,退水时间加快。郑璟等<sup>[29]</sup>以深圳市布吉河为例,研究了长时期城市土地利用变化对流域水文的影响,认为建设用地的增加导致了流域蒸发量、土壤水含量和地下径流深度都有不同程度的减少,而地表径流则有大幅增加。

总体而言,城市化导致了截流量和渗透量的下降,蒸发量造成的损失增加,径流发生的速度更快,但不同地区城市化发展的程度不同,表现出的水文效应也有所不同。此外,城市化造成的“热岛效应”和“雨岛效应”,也会增加城市降水,促进蒸散发,进而影响城市径流。

## 2.3 水土保持措施

水土保持措施通过改变微地形、地表覆被和土壤特性等边界条件,影响降水的分配、蒸散发和径流的产生机制,从而影响了流域的水文水资源过程。水土保持措施包括工程措施(如坡面工程中的梯田、反坡梯田、水平阶及鱼鳞坑等及沟

道工程中的坝库等)、植被措施(如植树造林及种草等)和水土保持耕作措施等。

一般认为,水土保持措施通过改变下垫面变化,使入渗、蒸散(发)有所增加,而相应地减少河川径流量与洪峰流量。穆兴民<sup>[30]</sup>等通过建立降水-径流统计模型分析了人工草、林及梯田、淤坝等对流域径流量的变化,得出与之相似的结论。仇亚琴等<sup>[31]</sup>应用具有物理机制的分布式水文模拟模型(WEP-L),模拟了不同下垫面变化情景下的水循环过程,结果发现:水保措施增加了植被的蒸腾量,相应减少了地表径流和地下径流的水平循环分量。总之,水土保持措施不仅增大了植被覆盖度,而且改变了土壤结构,使土壤孔隙率提高,在一定程度上增强了下渗能力和蓄水能力,从而使径流量减小。

## 2.4 土地利用景观格局变化

流域的景观格局变化通过改变地形、地表覆被和土壤特性等边界条件,影响降水的分配、蒸散发,进而影响了流域径流的产生机制。流域土地覆被变化与流域径流量的关系复杂,并非单一的覆被类型变化起主导作用,而是各种变化耦合作用影响了河流径流<sup>[32]</sup>。

Germer 等<sup>[33]</sup>通过对亚马逊流域中森林和草地进行现场测量及对比分析,研究了土地利用变化对近地表水文过程的影响,结果表明,森林采伐变为草地,会改变径流形成的机制,增加径流量。Lahmer 等<sup>[34]</sup>和 Klocking 等<sup>[35]</sup>人则认为:耕地转化为草地、干旱的草场或草甸草地,对于大中尺度流域及其子流域的水文行为均未引起明显变化,原因在于气候温和的自然条件下这几种土地利用模式相似,水文行为只有在多山的河源区才有表现;而干涸的河谷转化为自然湿地,造成蒸散发量的增加会导致流域夏季流量减少。Bewket 和 Sterk<sup>[36]</sup>曾对埃塞俄比亚丘陵地带西北部典型流域进行了研究,发现引起河川径流减小的原因是天然植被的破坏、过渡放牧、农田的不断增加、桉树作物的大量种植等。Calder<sup>[37]</sup>认为将热带湿润常绿林(热带雨林)改变为草地或农田后,由于截留损失减少,径流将大量增加;在年的尺度上,热带雨林将所有的净辐射量转变为蒸发,而任何其它形式的土地利用不可能产生更高的蒸发,因此将雨林改变为其它形式的土地利用将引起年径流量的增加。

王根绪等<sup>[38]</sup>以河西走廊中部的马营河流域为例,建立了基于降水和耕地面积两种因素的径流过程统计模拟模型,分析了 1967 年-2000 年土地利用变化对河流径流的影响,结果表明,由于流域土地利用变化,尤其是上游林草地大规模转为耕地,使流域年均径流量减少 28.12%,基流量减少 35.32%。李丽娟等<sup>[39]</sup>采用了特征变量时间序列法和降水-径流模型对陕西大理河流域的土地利用/覆被变化水文效应进行了研究,发现近 10 年来,耕地和草地面积有所减少,而林地和建设用地面积持续增加;流域年径流和月径流演化过程均表现出明显的下降趋势。综上所述,大流域宏观尺度上的景观格局的变化对产汇流过程的影响比较复杂,是各种景观类型变化相互耦合作用的结果。

## 3 下垫面变化影响水文效应的主要研究方法

### 3.1 对比流域试验

早期的研究大都采用对比流域试验的方法,包括:控制

流域法、单独流域法、平行流域法和多数并列流域法等。这些研究存在研究周期长、可对比性差的问题,这是因为寻找两个地理和气象条件完全相同的流域是不可能的,即使是同一个流域前后对比的两个标准期里,各种条件也不相同,而且各项指标测量方法的可靠性以及测量的精度和误差都有可能影响最终的结论<sup>[40]</sup>。因此对比流域试验只适合集水面积较小的流域(100 km<sup>2</sup> 以下),不适用于探讨大流域的土地利用/覆被变化的水文效应<sup>[41]</sup>。对比流域试验的优点是排除了观测期间气候变异所产生的误差,有利于揭示植被-土壤-大气相互作用的机理。

### 3.2 特征变量时间序列

特征变量时间序列法选择较长时段上反映土地利用/覆被变化水文效应的特征参数(如径流系数、年径流变差系数、径流年内分配不均匀系数、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,评估土地利用/覆被变化的水文效应<sup>[42]</sup>。虽然特征变量时间序列法具有很多优点,但它仅适合下垫面变化比较均匀、降水和土地利用空间差异不大的流域,而且这种方法缺乏机理机制方面的基础,只能对土地利用/覆被变化的水文效应进行简单描述<sup>[43]</sup>。其缺点是不能将气候变化所产生的径流变化从实测流量系列中分离,从而增加土地利用/覆被变化对水文影响研究的不确定性。

### 3.3 水文模型

自1970年以来,水文模型的发展经历了由经验模型到集总式模型的发展过程。随着GIS和RS的广泛应用,又呈现向分布式水文模型发展的趋势。在水循环的过程中,影响降雨径流形成的气候和下垫面因子均呈现空间分布不均匀性,分布式水文模型能够充分考虑流域下垫面空间分布不均匀性,能有效地模拟人类活动和下垫面因素变化对流域水循环过程的影响,在研究人类活动影响方面具有独特的优越性<sup>[44]</sup>。

流域生态水文模型是全球变化下流域生态水文响应研究的重要工具,是生态水文研究的前沿和热点。流域生态水文模型一方面要充分描述植被与水文过程相互作用和互为反馈机制,另一方面要精确刻画流域的空间异质性<sup>[45]</sup>;可以耦合生态过程与水文过程,从机理上认识水文过程,同时,分布式生态水文模型的研制也为尺度转换提供了一个可行的方法。

但是,水文模型的选择依赖于获取资料的详细程度、时间和经费的限制,更重要的是取决于资料的可用性。此外,模型参数和输入数据较多,往往导致模型比较复杂,可能造成模拟结果误差较大<sup>[46]</sup>。目前,利用水文模型模拟手段研究下垫面变化对流域产汇流的影响,越来越受到国内外学者的关注。Bronstert等<sup>[47]</sup>采用WASIM-ETH模型模拟了Rhine河流域不同土地利用类型的降雨径流过程。欧春平等<sup>[48]</sup>利用SWAT模型定量解析土地利用/覆被变化对蒸发、径流等水循环要素的影响。

由于单一方法的局限性,多种综合方法也更多地应用在下垫面变化影响水文效应的研究中,如水文模型与统计方法相结合、模型耦合法和模型对比法等。万荣荣等<sup>[49]</sup>利用

HEG-HMS模型,采用历史反演法模拟了不同土地利用情景下对洪水水文要素的影响程度。周瑜佳等<sup>[50]</sup>应用SWAT和TOPMODEL模型,对赣江流域的源头一梅江流域20年内的植被变化所造成的生态水文响应做出了模拟研究。虽然综合法能够弥补单一方法的不足,较好地模拟出下垫面变化的水文效应,但是其需要的数据资料量大,操作也相对比较复杂。

表2 几种流域下垫面变化水文效应研究方法的优缺点比较

方法	优点	缺点
原型观测	排除了观测期间气候变异所产生的误差,有利于揭示植被-土壤-大气相互作用的机理	研究周期长,可对比性差,较大尺度流域上操作难度大
水文统计	剔除其他因素的作用,计算比较简单、物理意义明确	缺乏机理机制方面的基础,不能将气候变化所产生的径流变化从实测流量系列中分离
水文模拟	比较准确的刻画流域的水文效应,能对水文效应的变化进行机理性的解释	依赖于获取资料的限制,模型参数和输入数据较多,比较复杂
生态水文模拟	在不同的时空尺度上揭示不同环境条件下植物与水的相互作用关系	技术不成熟,发展不完善,应用不广泛
集成方法	弥补上述几种方法的不足,较好地模拟土地利用/覆被变化的水文效应	需要的数据资料量大,操作相对比较复杂

## 4 结论与讨论

下垫面变化对水循环的影响研究始于20世纪初,主要集中在森林与水相互作用的研究。到目前为止,根据其发展历程可以将其划分为萌芽阶段、起步阶段和发展阶段,并会更加注重下垫面变化对水循环影响的过程和机理研究。林地、草地、耕地、居工地以及水保措施主要是通过改变截留、入渗等降水的重新分配过程及蒸散发状况,进而影响产汇流过程。而土地利用景观格局的变化并非是单一的覆被类型变化起主导作用,而是各种变化耦合作用影响了径流。

对于土地利用/覆被变化水文效应研究,早期的流域对比试验法适用于较小流域;特征变量时间序列法适用于下垫面变化比较均匀、降水量和土地利用空间差异不大的流域;基于物理机制的水文模型法能够比较准确的刻画流域的水文效应,能对水文效应的变化进行机理性的解释。其中,流域生态水文模型是生态水文研究的前沿和热点。由于单一方法的局限性,多种综合方法也更多地应用在下垫面变化影响水文效应的研究中。同时,也不能忽视野外原型观测实验在现代水文水资源研究中的重要作用,“原型观测+数值模型”相结合的技术途径可能是一个发展趋势。此外,未来变化环境下,用分布式水文模型来预测下垫面变化对水文水资源效应的影响是一个新的趋势和发展方向。

下垫面变化对水循环的影响已成为国际前沿领域问题。

过去一段时期的研究已取得了很大的进展,但同时仍然存在许多问题亟待解决和研究。例如,如何量化区分气候变化与下垫面变化对水循环的影响;研究尺度、研究区域、研究对象、研究环境及研究方法等条件的差异性,使下垫面变化对水循环影响的研究结论存在不一致性;以及加强 GIS、RS 等现代技术的结合与基于物理机制的分布式水文模型的应用等。这些都是未来研究的关键问题及研究方向。

#### 参考文献(References):

- [1] 李昌峰,高俊峰,曹慧. 土地利用变化对水资源影响研究的现状和趋势[J]. 土壤, 2002, 34(4): 191-205. (LI Changfeng, GAO Junfeng, CAO Hui. Current Situation and Tendency of Research on Impacts of Land Use Changes on Water Resource [J]. Solis, 2002, 34(4): 191-205. (in Chinese))
- [2] DeFries R, Eshleman K N. Land use change and hydrologic processes: A major focus for the future [J]. Hydrological Processes, 2004, (18): 2183-2186.
- [3] 夏军,谈戈. 全球变化与水文科学新的进展与挑战[J]. 资源科学, 2002, 24(3): 1-7. (XIA Jun, TAN Ge. Hydrological Science Towards Global Change: Progress and Challenge [J]. Resources Science, 2002, 24(3): 1-7. (in Chinese))
- [4] Whitehead P G, Robinson M. Experimental basin studies — An international and historical perspective of forest impacts [J]. Journal of Hydrology, 1993, 145: 217-230.
- [5] Onstad C A, Jamieson D G. Modelling the Effects of Land Use Modifications on Runoff [J]. Water Resources Research, 1970, 6(5): 1287-1295.
- [6] Bronstert A, Niehoff D, Buerger G. Effects of climate and land use change on storm runoff generation: Present knowledge and modeling capabilities [J]. Hydrological Processes, 2002, (16): 509-529.
- [7] 李丽娟,姜德娟,李九一,等. 土地利用/覆被变化的水文效应研究进展[J]. 自然资源学报, 2007, 22(2): 211-224. (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): 211-224 (in Chinese))
- [8] Bewket W, Sterk G. Dynamics in land cover and its effect on stream flow in the Chemoga watershed, Blue Nile basin, Ethiopia [J]. Hydrological Process, 2005, 19: 445-458.
- [9] Bari M A, Smettem K R J, Sivapalan M. Understanding changes in annual runoff following land use changes: A systematic data based approach [J]. Hydrological Processes, 2005, 19(13): 2463-2479.
- [10] Naik P K, Jay D A. Estimation of Columbia River virgin flow: 1879 to 1928 [J]. Hydrological Processes, 2005, 19(9): 1807-1824.
- [11] 邓慧平,李秀彬,陈军锋,等. 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, 25(1): 53-62. (DENG Hui ping, LI Xiubin, CHEN Junfeng, et al. Simulation of Hydrological Response to Land Cover Changes in the Suomo Basin [J]. Acta Geographica Sinica, 2003, 25(1): 53-62. (in Chinese))
- [12] 杨宏伟,许崇育. 东江流域典型子流域土地利用/覆被变化对地表径流影响[J]. 湖泊科学, 2011, 23(6): 991-996. (YANG Hongwei, XU Chongyu. Effect of LU CC on Runoff of Three Representative Watersheds in Dongjiang River Basin [J]. Journal of Lake Sciences, 2011, 23(6): 991-996. (in Chinese))
- [13] 石培礼,李文华. 森林植被变化对水文过程和径流的影响效应[J]. 自然资源学报, 2001, 16(5): 481-487. (SHI Peili, LI Weihua. Influence of Forest Cover Change on Hydrological Process and Watershed Runoff [J]. Journal of Natural Resources, 2001, 16(5): 481-487. (in Chinese))
- [14] 范世香,裴铁播,牛丽华,等. 森林对地表径流影响的模拟实验初探[J]. 水科学进展, 1993, 4(3): 179-182. (FAN Shixiang, PEI Tiejie, NIU Lihua, et al. Simulation Experiment for the Effects of Forest on Surface Runoff [J]. Advances In Water Science, 1993, 4(3): 179-182. (in Chinese))
- [15] 李毅,邵明安. 草地覆盖坡面流水动力参数的室内降雨试验[J]. 农业工程学报, 2008, 24(10): 1-5. (LI Yi, SHAO Mingan. Hydrodynamic Parameters of Overland Flow during Laboratory Rainfall Experiments under Grass Coverage [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2008, 24(10): 1-5. (in Chinese))
- [16] 宋维峰,余新晓,张颖. 坡度和刺槐覆盖对黄土坡面产流产沙影响的模拟降雨研究[J]. 中国水土保持科学, 2008, 6(2): 15-18. (SONG Weifeng, YU Xiniao, ZHANG Ying. Effects of Slope Grade and Cover of Robinia Pseudacacia on Runoff and Soil Loss from Loess Slopes under Simulated Rainfall [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2008, 6(2): 15-18. (in Chinese))
- [17] 李文华,何永涛,杨丽韞. 森林对径流影响研究的回顾与展望[J]. 自然资源学报, 2001, 16(5): 398-406. (LI Weihua, HE Yongtao, YANG Liyun. A Summary and Perspective of Forest Vegetation Impacts on Water Yield [J]. Journal of Natural Resources, 2001, 16(5): 398-406. (in Chinese))
- [18] 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. (HAO Fanghua, CHEN Liqun, LIU Changming, et al. Impact of Land Use Change on Runoff and Sediment Yield [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2004, 18(3): 5-8. (in Chinese))
- [19] 黄明斌,康绍忠,李玉山. 黄土高原沟壑区森林和草地小流域水文行为的比较研究[J]. 自然资源学报, 1999, 14(3): 226-231. (HUANG Mingbin, KANG Shaoshong, LI Yushan. A Comparison of Hydrological Behaviors of Forest and Grassland Watersheds in Gully Region of the Loess Plateau [J]. Journal of Natural Resources, 1999, 14(3): 226-231. (in Chinese))
- [20] De Roo A P J. Modelling surface runoff and soil erosion in catchments using geographical information systems [R]. Netherlands: Utrecht, 1993.
- [21] Van der Ploeg R R, Schweigert P. Elbe River flood peaks and postwar agricultural land use in East Germany [J]. Natruwissenschaften, 2001, 88: 522-525.
- [22] Maros Heil Costa, Aurelie Botta A Cardille. Effects of large scale changes in land cover on the discharge of the Tocantins River, Southeastern Amazonia [J]. Journal of Hydrology, 2003, 28(3): 206-217.
- [23] 谢高地,甄霖,陈操操,等. 流域宏观尺度降雨-景观-径流变化的相互作用[J]. 资源科学, 2007, 29(2): 156-163. (XIE Gaodi,

- ZHEN Lin, CHENG Cao cao, et al. The Changes and Their Interactions of Precipitation Landscape Runoff in Jinghe Watershed[J]. Resources Science, 2007, 29(2): 156-163. (in Chinese)
- [24] Kang I S, Park J I. Effect of urbanization on runoff characteristics of the Orrcheon Stream watershed in Pusan, Korea[J]. Hydrological Processes, 1998, 25: 351-363.
- [25] Burns D, Vitvar T, McDonnell J, Hassett J, et al. Effects of suburban development on runoff generation in the Croton River basin, New York, USA[J]. Journal of Hydrology, 2005, 311: 266-281.
- [26] White M D, Greer K A. The effects of watershed urbanization on the stream hydrology and riparian vegetation of Los Peñasquitos Creek, California[J]. Landscape and Urban Planning, 2006, 74: 125-138.
- [27] 葛怡, 史培军, 周俊华, 等. 土地利用变化驱动下的上海市水灾灾情模拟[J]. 自然灾害学报, 2003, 12(3): 25-30. (GE Yi, SHI Peijun, ZHOU Junhua, et al. Simulation of Flood Disaster Scenario under Driving Action of Land Use Change in Urban of Shanghai[J]. Journal of Natural Disasters, 2003, 12(3): 25-30. (in Chinese))
- [28] 史培军, 江源, 王静爱, 等. 土地利用/覆盖变化与生态安全响应机制[M]. 北京: 科学出版社, 2004. (SHI Peijun, JIANG Yuan, WANG Jing'ai, et al. Land Use/Cover Change and Ecological Security Response Mechanism [M]. Beijing: Science Press, 2004. (in Chinese))
- [29] 郑璟, 方伟华, 史培军, 等. 快速城市化地区土地利用变化对流域水文过程影响的模拟研究: 以深圳市布吉河流域为例[J]. 自然资源学报, 2009, 24(9): 1561-1572. (ZHENG Jing, FANG Weihua, SHI Peijun, et al. Modeling the Impacts of Land Use Change on Hydrological Processes in Fast Urbanizing Region: A Case Study of the Buji Watershed in Shenzhen City, China[J]. Journal of Natural Resources, 2009, 24(9): 1561-1572. (in Chinese))
- [30] 穆兴民, 李靖, 王飞, 等. 基于水土保持的流域降水-径流统计模型及其应用[J]. 水利学报, 2004, (5): 122-128. (MU Xingmin, LI Jing, WANG Fei, et al. Rainfall-runoff Statistical Hydrological Model Based on Soil and Water Conservation Practices[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2004, (5): 122-128. (in Chinese))
- [31] 仇亚琴, 王水生, 贾仰文, 等. 汾河流域水土保持措施水文水资源效应初析[J]. 自然资源学报, 2006, 21(1): 24-30. (QIU Yaqin, WANG Shuisheng, JIA Yangwen, et al. Preliminary Analysis of Hydrological and Water Resources Effects under the Impact of Water and Soil Conservation Engineering in Fenhe River Basin[J]. Journal of Natural Resources, 2006, 21(1): 24-30. (in Chinese))
- [32] 叶宝莹, 张养贞, 张熟文, 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. (YE Baoying, ZHANG Yangzhen, ZHANG Shuwen, et al. Effect of Landcover Change in Nenjiang Watershed on Runoff Volume [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2003, 23(2): 15-18. (in Chinese))
- [33] Sonja Germer, Christopher Neill, Alex V. Krusche, Helmut Elsenbeer. Influence of land use change on near surface hydrological processes: Undisturbed forest to pasture[J]. Journal of Hydrology, 2010, 380: 473-480.
- [34] Lahmer W, Pflutzner B, Becker A. Assessment of land use and climate change impacts on Mesoscale[J]. Physics and Chemistry of the Earth, 2001, 26: 565-575.
- [35] Klocking B, Haberland U. Impact of land use changes on water dynamics a case study in temperate meso and macroscale river basins[J]. Physics and Chemistry of the Earth, 2002, 27: 619-629.
- [36] Bewket W, Sterk G. Dynamics in land cover and its effect on stream flow in the Chemoga watershed, Blue Nile basin, Ethiopia[J]. Hydrological Processes, 2005, 19(2): 445-458.
- [37] Calder I R. Land use impacts on water resources[A]. Background Paper No. 1. In Land-water Linkages in Rural Watersheds[C]. Electronic Workshop, FAO: Rome, 18 September-27 October, 2000.
- [38] 王根绪, 张珏, 刘桂民, 等. 马营河流域 1967-2000 年土地利用变化对河流径流的影响[J]. 中国科学 D 辑, 2005, 35(7): 671-681. (WANG Genxu, ZHANG Yu, LIU Guimin, et al. Impacts of Land Use Changes on Runoff from 1967 to 2000 in the Mayinghe River Basin[J]. Science in China (Series D), 2005, 35(7): 671-681. (in Chinese))
- [39] 李丽娟, 姜德娟, 杨俊伟, 等. 陕西大理河流域土地利用/覆被变化的水文效应[J]. 地理研究, 2010, 29(7): 1233-1243. (LI Lijuan, JIANG Dejuan, YANG Junwei, et al. Study on Hydrological Response to Land Use and Land Cover Change in Dali River Basin, Shaanxi Province[J]. Geographical Research, 2010, 29(7): 1233-1243. (in Chinese))
- [40] 陈军锋, 李秀彬. 森林植被变化对流域水文影响的争论[J]. 自然资源学报, 2001, 16(5): 474-480. (CHEN Junfeng, LI Xiubin. The Impact of Forest Change on Watershed Hydrology Discussing Some Controversies on Forest Hydrology[J]. Journal of Natural Resources, 2001, 16(5): 474-480. (in Chinese))
- [41] 魏晓华, 李文华, 周国逸, 等. 森林与径流关系——一致性和复杂性[J]. 自然资源学报, 2005, 20(5): 761-770. (WEI Xiaohua, LI Weihua, ZHOU Guoyi, et al. Forests and Streamflow-consistence and Complexity[J]. Journal of Natural Resources, 2005, 20(5): 761-770. (in Chinese))
- [42] 李秀彬. 土地覆被变化的水文水资源效应研究——社会需求与科学问题[A]. 中国地理学会自然地理专业委员会. 土地覆被变化及其环境效应论文集[C]. 北京: 星球地图出版社, 2002. 1-6. (LI Xiubin. Study on Effect of Land Cover Change on Hydrology and Water Resources Society Demand and Scientific Issue[A]. In: Commission on Physical Geography of GSC. Papers on Land Cover Change and Its Environmental Effects[C]. Beijing: Celestial Body Map Press, 2002. 1-6. (in Chinese))
- [43] 张蕾娜, 李秀彬. 用水文特征参数变化表征人类活动的水文效应初探——以云南水库流域为例[J]. 资源科学, 2004, 26(2): 62-67. (ZHANG Leina, LI Xiubin. Assessing Hydrological Effects of Human Activities by Hydrological Characteristic Parameters: A Case Study in the Yunzhou Reservoir Basin [J]. Resources Sciences, 2004, 26(2): 62-67. (in Chinese))
- [44] 冯燕. 变化条件下小理河流域产汇流特性研究[D]. 南京: 河海大学, 2007. (FENG Yan. Study on Runoff Generation and Concentration Characteristics in Xiaolihe Basin under Condition Changing [D]. Nanjing: Hohai University, 2007. (in Chinese))

- of Hyporheic Processes on Streambed Vertical Hydraulic Conductivity in Three Rivers of Nebraska[J]. *Geophysical Research Letters*, 2007, 34, L07409. doi: 10.1029/2007GL029254.
- [20] SONG Jir xi, CHEN Xurr hong, CHENG Cheng. Observation of Bioturbation and Hyporheic Flux in Streambeds[J]. *Frontiers of Environmental Science and Engineer in China*, 2010, 4(3): 340-348.
- [21] Levy J, Birck M D, Mutiti S, et al. The Impact of Storm Events on a Riverbed System and Its Hydraulic Conductivity at a Site of Induced Infiltration[J]. *Journal of Environmental Management*, 2011, 92: 1960-1971.
- [22] Velickovic B. Colmation as one of the Processes in Interaction between the Groundwater and Surface Water[J]. *Architecture and Civil Engineering*, 2005, 3(2): 165-172.
- [23] Fleckenstein J H, Krause S, Hannah D M, et al. Groundwater surface Water Interactions: New Methods and Models to Improve Understanding of Processes and Dynamics[J]. *Advances in Water Resources*, 2010, 33: 129-1295.
- [24] Fenoglio S, Bo T, Malacarne G, et al. Effects of Clogging on Stream Macroinvertebrates: an Experimental Approach[J]. *Limnological Ecology and Management of Inland Waters*, 2007, 37(2): 186-192.
- [25] 宋进喜, CHEN Xurr hong, CHENG Cheng, 等. 美国内布拉斯加州埃儿克霍恩河河床沉积物渗透系数深度变化特征[J]. *科学通报*, 2009, 54(24): 3892-3899. (SONG Jir xi, CHEN Xurr hong, CHENG Cheng, et al. Nebraska Elkhart HuoEnHe Riverbed Sediment Depth of Coefficient of Permeability Variation Characteristics[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2009, 54(24): 3892-3899. (in Chinese))
- [26] Blaschke A P, Steiner K H, Schmalfluss R, et al. Clogging Processes in Hyporheic Interstices of an Impounded River, the Danube at Vienna, Austria[J]. *International Review of Hydrobiology*, 2003, 88(3-4): 397-413.
- [27] Mutiti S, Jonathan L. Using Temperature Modeling to Investigate the Temporal Variability of Riverbed Hydraulic Conductivity During Storm Events[J]. *Journal of Hydrology*, 2010, 388(3-4): 32-334.
- [28] Sengschmitt D, Battin T J. Linking Sediment Biofilms, Hydrodynamics, and Riverbed Clogging: Evidence from a Large River[J]. *Microbiology Ecology*, 1999, 37: 185-196.
- [29] Nogaro G, Mermillod Blondin F, Francois Carcaillet F, et al. Invertebrate Bioturbation Can Reduce the Clogging of Sediment: An Experimental Study Using Infiltration Sediment Columns[J]. *Freshwater Biology*, 2006, 51(8): 1458-1473.

(上接第 117 页)

- [45] 陈腊娇, 朱阿兴, 秦承志, 等. 流域生态水文模型研究进展[J]. *地理科学进展*, 2011, 30(5): 535-544. (CHEN Lar jiao, ZHU A-xing, QIN Cheng zhi, et al. Review of Ecological Hydrological Models of Watershed Scale[J]. *Progress in Geography*, 2011, 30(5): 535-544. (in Chinese))
- [46] 熊立华, 郭生练, 田向荣. 基于 DEM 的分布式流域水文模型及应用[J]. *水科学进展*, 2004, 15(4): 517-520. (XIONG Lihua, GUO Shenglian, TIAN Xiang-rong. DEM-based Distributed Hydrological Model and Its Application[J]. *Advances In Water Science*, 2004, 15(4): 517-520. (in Chinese))
- [47] Bronstert A, Bardossy A, Bismuth C, et al. Multi-scale modeling of land use change and river training effects on floods in the Rhine basin[J]. *River Research and Applications*, 2007, 23: 1102-1125.
- [48] 欧春平, 夏军, 王中根, 等. 土地利用/覆被变化对 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 Chur ping, 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))
- [49] 万荣荣, 杨桂山, 李恒鹏. 流域土地利用/覆被变化的洪水响应—以太湖上游西苕溪流域为例[J]. *自然灾害学报*, 2008, 17(3): 10-15. (WAN Rong rong, YANG Gui-shan, LI Heng peng. Flood Response to Land use and Land cover Change: a Case Study of Xitiao Rivulet Basin in Upper Reach of Taihu Lake[J]. *Journal of Natural Disasters*, 2008, 17(3): 10-15. (in Chinese))
- [50] 周瑜佳, 袁飞, 任立良, 等. 赣江上游土地覆被变化的水文响应研究[J]. *水电能源科学*, 2012, 30(4): 12-15. (ZHOU Yujia, YUAN Fei, REN Liliang, et al. Hydrologic Responses of Land Cover Change in Upper Reaches of Ganjiang River[J]. *Water Resources and Power*, 2012, 30(4): 12-15. (in Chinese))