

流域土地利用/覆被变化对水文过程的影响研究进展

史晓亮^{1,3}, 李颖¹, 严登华², 赵凯¹

(1. 中国科学院 东北地理与农业生态研究所, 长春 130102;

2. 中国水利水电科学研究院 水资源研究所, 北京 100038; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要:随着全球变化研究的深入,土地利用/覆被变化(LUCC)与水文过程的相互作用成为全球生态与环境研究的热点和前沿问题。在阐述土地利用/覆被变化对水文过程影响特性的基础上,从 LUCC 对径流影响的研究成果、研究方法,以及模拟尺度等方面概述了 LUCC 对水文过程影响的研究进展。综合分析表明,由于区域气候和地理的差异性,以及研究尺度和方法的不同,特定流域上 LUCC 对水文过程影响的结论难以取得一致。需要考虑多方面因素,正确评价 LUCC 对水文过程的影响,加强生态环境效应研究,为流域土地利用规划和水资源的合理配置提供科学依据。

关键词:土地利用/覆被变化; 水文过程; 径流; 研究方法; 模拟尺度

中图分类号: P343.9; P461

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2013)04-0301-08

Advances in the Impacts of Watershed Land Use/Cover Change on Hydrological Processes

SHI Xiao-liang^{1,3}, LI Ying¹, YAN Deng-hua², ZHAO Kai¹

(1. *Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences,*

Changchun 130102, China; 2. Department of Water Resources, China Institute of Water Resources and

Hydropower Research, Beijing 100038, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: With the in-depth study on global change, the interaction research between land use/cover change and hydrological processes has been the focus of attention and the international frontier of global environmental and ecological research. The influencing characteristics of land use/cover change on hydrological processes was expounded. On the basis, the researches about hydrological response to LUCC were reviewed, including the progress, study methods, and simulation scale. Some conclusions were drawn as follows. Due to different region climatic conditions, geographic locations, study scale and methods, hydrological effect of LUCC in specific basin showed as certain difference. Therefore, various factors need to be considered comprehensively, and the impacts of watershed land use/cover change on hydrological processes should be correctly evaluated. Besides, the eco-environment effect should be strengthened so as to provide scientific evidences for land use planning and rational allocation of water resources.

Key words: land use/cover change; hydrological processes; runoff; study method; simulation scale

近年来,由于全球变化和人类活动的影响,地球上的水循环正在发生变化,世界不同国家或地区正在发生严重的水资源问题和危机。水问题已经成为限制国家和区域可持续发展的关键性因子,水科学问题也成为国际地球科学发展中的一个重要方面^[1]。

随着水问题的日益突出,国际研究计划以及世界

各国的研究重点也在不断变化。国际有关组织实施了一系列国际水科学计划,如 IHP、WCPR、GWSP 等,其目的是从全球、区域和流域不同尺度探讨环境变化(全球变化和人类活动影响)下的水循环及与之关联的资源与环境问题。目前所面临的水科学问题与人类非理性的开发活动密切相关,有研究表明,这

收稿日期:2012-11-08

修回日期:2012-12-28

资助项目:中国科学院重大专项项目(XDA05060400)

作者简介:史晓亮(1985—),男,陕西宝鸡人,博士研究生,主要从事遥感与地理信息系统在水文学中的应用研究。E-mail: shixiaoliang@neigae. ac. cn

通信作者:李颖(1964—),男,吉林辽源人,研究员,主要从事土地变化遥感动态监测及量化空间数字建模研究。E-mail: liying@neigae. ac. cn

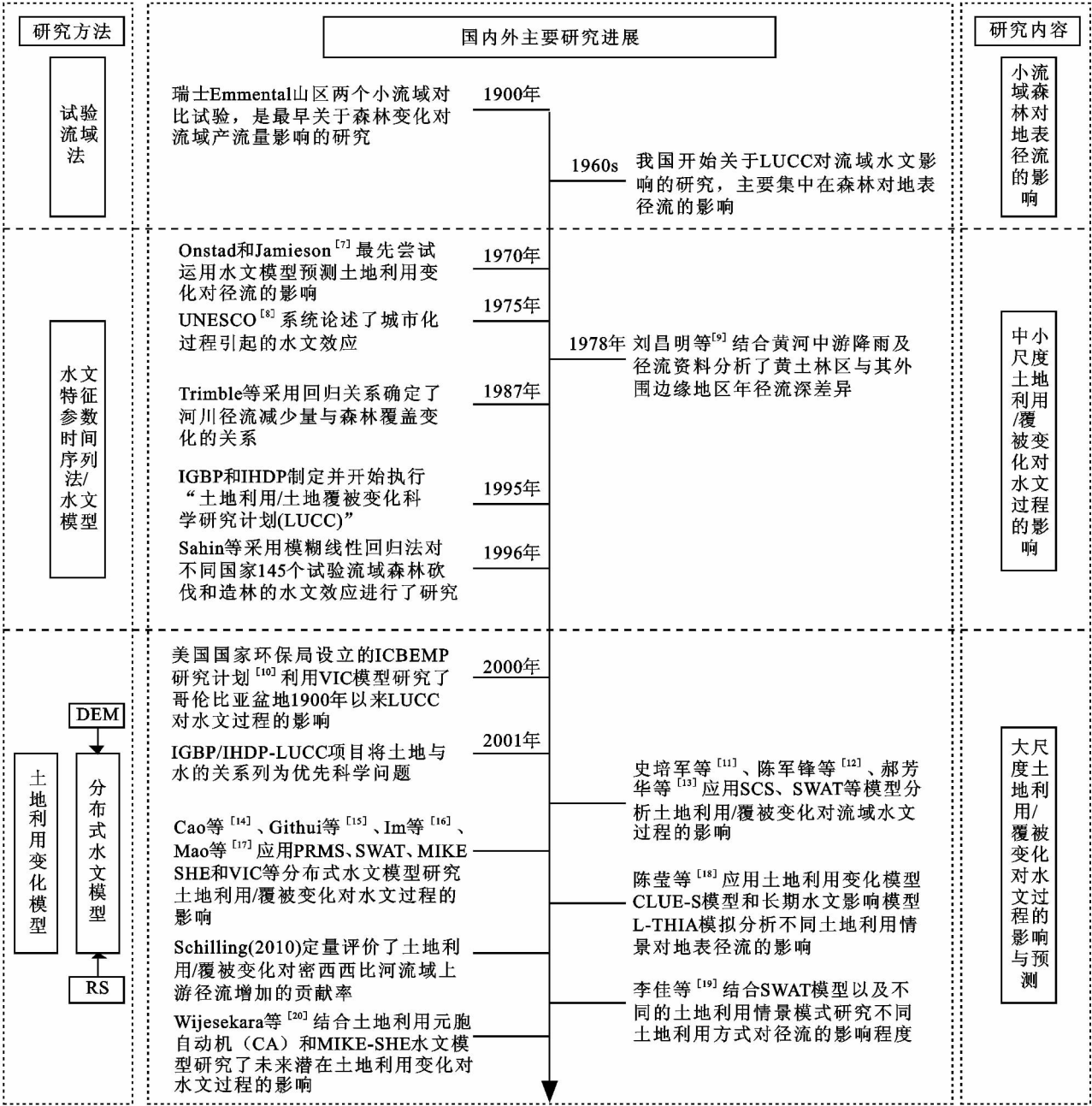


图 2 流域土地利用/覆被变化对水文过程影响的研究回顾

3 流域土地利用 /覆被变化对水文过程的影响研究的主要进展

3.1 流域土地利用/覆被变化对径流的影响

Calder^[21]认为,在区域尺度上影响水文过程的主要土地利用变化是植被变化(如造林和毁林)、农业开发活动以及城市化等。由于径流能够反映整个流域的生态状况,也能用于预测未来土地利用/覆被潜在变化对水文水资源的影响^[22]。因此目前土地利用/覆被变化对水文过程的影响研究多集中在对径流的影响方面。

3.1.1 植被变化对径流的影响

在土地利用/覆被

变化的水文响应研究中,森林的水文效应倍受关注。上世纪 80 年代左右,刘昌明^[9]针对森林对年径流量的影响做了初步分析,黄秉维^[23]也强调不要过分夸大森林的作用,应正确认识森林效应。针对“森林植被的存在能否减少流域年径流量和削减洪峰”等问题,国内外出现了不同甚至相反的观点。

一般认为,在面积较小的集水区和流域,森林植被的存在,植被盖度的增加会减少径流量,并认为其原因在于流域面积较小时,森林蒸腾大量水分起到主要作用^[24]。但也有研究在大尺度流域得到类似的结论^[25],Jackson 等^[26]基于南半球 600 多个观测点的数据研究认为,为固碳而栽种树木后,10 a 之内径流量将大幅度减少,甚至导致溪流干涸。Cao 等^[14]、陈莹

等^[18]、李佳等^[19]、王盛萍等^[27]也得出了类似的结论。其它许多研究在不同的流域,利用不同的研究方法同样得到了植被减少将导致径流量增加的结论^[28-30],这也从反面证明了森林覆盖率增加会减少年径流量的观点。

但也有研究认为,森林植被的存在会增加年径流量^[31]。郝芳华等^[13]在黄河下游支流洛河上游卢氏水文站以上流域的研究表明,森林的存在增加了径流量。王根绪等^[32]的研究等表明,1967年以来,马营河流域上游林草地大规模转为耕地,使流域年均径流量减少了28.12%。

一般认为森林通过乔、灌、草以及枯枝落叶层的截持含蓄、大量蒸腾、土壤渗透和延缓融雪等过程,调节洪水发生过程,削减洪峰流量。但这一作用又与降雨强度与历时、森林类型、林分结构、土壤前期含水量等多种因素有关,随着降水强度的增加和时间的延长,森林的削洪作用也将逐渐减弱^[33],连续性的大雨超过400 mm,森林与洪水的关系不复存在^[34]。因此,森林的削洪作用有一定限度。

由此可见,由于区域气候和地理特征的差异性,以及研究尺度与方法的不同,特定流域上森林植被变化对水文过程的影响较为复杂,难以取得一致性的结论。某一自然条件和不同尺度上得出的结论不具可比性,也不能简单地进行外推。

3.1.2 城市化对径流的影响 城市化作为最典型的土地利用变化过程之一,随着其进程的不断加快,城市周边其它土地利用类型逐渐被开发为城镇用地,导致城市地区不透水层面积增加,下垫面的渗透性、滞水性和热力状况随之发生变化,使得截留、填洼、下渗和蒸发量减少,从而导致地表径流和洪峰流量增加,径流系数增大,显著影响区域水循环过程^[35]。葛怡等^[36]、郑璟等^[37]利用SCS模型研究发现,上海和深圳地区城市化的发展会增加径流系数,径流量趋于增大。UNESCO的研究报告认为城市化过程引起的水文效应中最突出的表现为下渗减少和洪峰流量增大^[8]。

3.1.3 水土保持措施对径流的影响 水土保持措施主要包括以植树造林、种草为主的植被措施、坡面工程措施(包括梯田、反坡梯田、水平阶及鱼鳞坑)、耕作措施和沟道工程措施等^[38],这些措施通过改变流域下垫面条件,从而影响区域的水文过程。一般来说,植树造林和种草等植被措施具有减少年径流量、增加枯水径流和削减洪水的作用^[34],黄河水利委员会绥德水土保持试验站的实测资料表明,当林地盖度为30%,50%,70%时,地表径流将分别减少53%,

86%,94%;而在同样的盖度条件下,草地分别减少地表径流45%,75%,89%^[39]。此外,林草地的空间分布格局也会影响水文效应,草地—林地—坡耕地和林地—草地—坡耕地(由坡顶至坡底)的分布结构,由于在径流的形成区进行了控制,可以相对有效地减少径流量,增强水保效果^[40]。各种坡面工程措施具有类似的水保作用,其中以梯田最为典型。梯田通过改变局地的下垫面条件,不仅具有减少入河径流总量的作用,同时也可以减缓河道泥沙的淤积,在一定的降雨条件下减水减沙作用突出。山西水保所1957—1966年在王家沟流域的观测结果表明,水平梯田10 a平均减水减蚀效益达到92.4%^[41]。总的来说,实施植树种草和梯田等水土保持措施后,下垫面条件发生了变化,增加入渗、蒸散(发)量,对流域年径流量会有不同程度的减少^[42]。但不同地理位置、不同气象条件也可能使不同地区水土保持的水文作用有所差异^[34]。

3.1.4 农业开发活动对径流的影响 随着社会的不断发展和人口的急剧增长,人类对于粮食的需求日益增加,导致农业用地不断被开垦,并且土地利用的开发强度持续增加,但是耕作措施会使土壤结皮和压实,从而使得土壤入渗速率减小,土壤容重增加^[43]。Costa等^[25]、Githui等^[15]的研究表明,农业用地的增加,降低了入渗和蒸发,从而增加了年径流量。而在我国东北黑土区,由自然土壤—植被系统转化为人工农田生态系统,黑土储水量将减少17.6~30.8%^[44]。总体来说,农业开发活动具有增加径流量和洪峰流量的作用。

3.2 研究方法

目前研究流域土地利用/覆被变化对水文过程影响的方法可归结为三类:试验流域法、水文特征参数时间序列法和流域水文模型模拟法。

土地利用/覆被变化对水文过程的影响研究,早期大都采用试验流域法。该方法有利于揭示植被—土壤—大气相互作用的机理,比较容易获得试验结果。但这一方法仅适用于较小的流域,也不可能找到地理和气象条件完全一致的两个小流域,研究结果难以外推到其它流域,可对比性较差^[45]。而水文特征参数时间序列法通过选择较长时间段上能够反映LUCC水文响应的特征参数,从特征参数的变化趋势上评价LUCC的水文效应^[46]。由于表征水文响应的特征参数计算简单,因此,该方法成为研究LUCC对水文过程影响的一种简单有效的方法,并得到了广泛的应用^[27,47-49],但此方法仅适于下垫面条件比较均匀的流域,并且水文特征参数的变化受气候和LUCC

等多种因素的综合影响,统计时间尺度也会影响评价结果的准确性。

1970年 Onstad 等^[7]最早尝试利用水文模型研究土地利用的水文响应,LUCC的水文效应研究也由传统的统计分析方法转向具有一定物理基础的水文模型方法。至今已有许多水文模型用于LUCC的水文效应研究,包括集总式水文模型,如HBV、SCS、HSPF、CHARM等,半分布式/分布式水文模型,如TOPMODEL、VIC、SHE、SWAT等。由于基于物理基础的分布式模型能够考虑降水等因子和下垫面的空间异质性,并且可以灵活地设置土地利用变化情景,从而有效地模拟不同土地利用情景下的水文响应^[34,50],因而成为土地利用/覆被变化水文效应研究的重要工具^[30,50]。

目前,分布式水文模型主要有两种建模思路和计算方法。第一种是应用数值分析来建立相邻网格单元之间的时空关系,如各种版本的SHE模型、IHDM模型等。该类模型均以1969年Freeze和Harlan发表的“一个具有物理基础数值模拟的水文响应模型的蓝图”作为描述径流过程的基本框架^[51],以质量、能量和动量方程描述自然系统,并考虑各变量参数的空间差异性,参数原则上具有明确的物理意义,可通过实测资料估计,但其结构复杂,计算繁琐,当前很难适用于较大的流域^[52]。第二种建模思路是在每一个网格单元(或子流域)上应用传统的概念性模型来推求净雨,再进行汇流演算,最后求得出口断面流量,如SWAT模型等。该类模型结构与计算过程比较简单,适用于较大的流域。此外还有一类模型基于DEM推求地形空间变化信息,利用地形信息模拟水文响应,最后用统计方法求算流域总出口断面流量。如1979年Beven和Kirkby^[53]提出的以变源产流为基础的TOPMODEL模型。这类模型的优势在于可以反映流域下垫面中影响水文响应的关键因子(地形等)的空间变异性,但却不需要像全分布式模型那样引入大量参数,减小了参数率定带来的不确定性^[54]。

关于模型数据和参数问题,由于水文循环过程的高度非线性 and 复杂性,导致分布式水文模型需要大量的观测数据或水文过程参数,不仅包括气象、DEM、土壤、植被等自然环境要素数据,而且需要复杂的人工取水、水库径流调节、农业灌溉等人类活动数据,从而使得某些区域/流域建模所需的与水文过程尺度相匹配的观测数据很难满足分布式水文模拟的需求。Seyfried和Wilcox^[55]就曾认为,物理基础模型的缺点之一是较集总式模型需要更多的输入资料,从而导致参数化和检验的工作量大大加大。

理论上,分布式水文模型的参数可以通过实测或者其它方式获取。但在实际建模过程中,大量参数并不能由实测物理量确定,这就需要利用实测流量等数据率定网格或者子流域尺度上的有效参数值,由之得出合理的流域尺度上的模拟结果^[54]。但是参数率定过程复杂,并且水文模拟和预测的参数估计都是点估计,结合拟合程度检验模型,并不能够降低不确定性的区间预测^[56]。因此近年来水文模拟中的不确定性问题越来越受到重视,主要研究方法有SUFI-2(sequential uncertainty fitting)、GLUE(Generalized Likelihood Uncertainty Estimation)、BaRE(Bayesian Recursive Estimation)、ParaSol(parameter solution)等。在参数优选方面,启发式算法和进化算法,如基因算法(GA)、SCE-UA等有效的全局参数率定方法已经取代了局部寻优的方法,而今后的发展趋势是采用多目标全局优化技术^[56],从而降低参数估计的不确定性。

由于LUCC水文效应的各种研究方法均存在局限性,近年来出现了多种综合方法,如水文模型与统计学方法相结合的方法、模型耦合法以及模型对比法等。

3.3 模拟尺度

Bloschl和Sivapalan^[57]将水文尺度划分为过程尺度、观测尺度和模拟尺度。随着水文模型在LUCC与水文过程的相互作用研究中的广泛应用,研究并确定合适的模拟尺度就显得愈加重要。理论上,模拟尺度应尽量与过程尺度吻合,但是受到模拟水平的限制,实际很难达到,需要通过尺度转换弥补这种缺陷^[58]。

分布式水文模拟方法是尺度转换的途径之一^[59]。分布式水文模型通过将流域离散化,寻找一种临界单元考虑其内部的地形、土壤和降雨空间分布的一致性,在这些离散单元中建立陆面过程与水文响应的关系。但是通常这些单元的分辨率大于输入数据的空间分辨率,使得每个计算单元中的参数值会存在一定程度的集总,而参数的集总对模拟结果有一定影响^[60]。

FitzHugh等^[60]研究认为,径流模拟结果对子流域划分数目的敏感性较小。郝芳华等^[61]、张雪松等^[62]、Jha等^[63]、Muleta等^[64]得到了类似的结论。但是上述研究大多是在年和月尺度得出的结果,而Kumar等^[65]认为子流域划分数量会显著影响日水文过程模拟结果。因此可以认为,在年和月尺度上,不同流域离散化水平下的径流模拟精度无明显差别,然而日径流模拟结果受到子流域划分层次的影响。

尽管许多研究认为,子流域划分水平对径流的影响较小,但同时也存在合理的子流域划分水平,当超出此水平时可能会使模拟精度降低^[66],或产生过多面积较小且狭长的子流域,导致模型对水文过程的不真实模拟^[67]。Romanowicz 等^[66]认为 SWAT 模型中合理的最小集水面积为模型推荐值的 60%,也有研究认为应该为流域面积的 4%^[68]。

在不同的研究尺度下,分布式水文模拟尺度均会对模拟结果产生不同程度的影响,从而导致土地利用/覆被变化对水文过程影响结果的差异。需要针对具体的区域特征确定合理的子流域划分水平,减小分布式水文模拟的不确定性,从而准确评价土地利用/覆被变化对水文过程的影响。

4 存在不足及研究展望

土地利用/覆被变化对水文过程的影响研究已取得较大进展,但仍存在许多不足有待解决:① 由于有地域特性差异,以及研究方法的不同而导致流域 LUCC 对水文过程的影响存在差异,研究结果不具有可比性。需要在相同的研究尺度和方法下开展大量典型区域的实例研究,正确评价土地利用/覆被变化对水文过程的影响;② 目前主要通过水文站实测流量来率定和验证分布式水文模型的有效性,但参数等效性问题在分布式水文模型中仍然没有得到很好地解决。如何结合遥感技术为分布式水文模型提供可信度较高的水文过程关键变量的空间反演结果还需进一步研究;③ 需根据研究区域的特点和研究目的,选取合适的研究方法,而多种方法的集成和耦合仍有待深入;④ 土地利用/覆被变化对水文过程的影响研究较多,但水文过程的生态效应研究相对较少。

在今后土地利用/覆被变化对水文过程的影响研究中,有必要从空间格局上研究 LUCC 对流域水文过程的影响机制,而不是仅仅关注土地利用类型变化的影响结果。并且在全球洪涝和干旱等极端天气频发的背景下,有必要加强土地利用变化对极值水文事件的影响,以及生态环境效应方面的研究;在研究方法上,基于物理机制的分布式水文模型与 GIS 和 RS 技术更加紧密地结合应用,提高对遥感数据的利用以及 GIS 功能的耦合程度将会是重要的研究方向。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] Vorosmarty C J, Green P, Salisbury J, et al. Global water resources: vulnerability from climate change and population growth[J]. Science, 2000, 289(5477): 284-288.
- [3] Lahmer W, Pfützner B, Becker A. Assessment of land use and climate change impacts on the mesoscale[J]. Physics and Chemistry of the Earth, 2001, 26(7/8): 565-575.
- [4] 杨久春,张树文. 近 50 年来呼伦湖水系土地利用/覆被变化及其生态环境效应[J]. 干旱区资源与环境, 2009, 23(2): 41-46.
- [5] DeFries R, Eshleman K N. Land-use change and hydrologic processes: a major focus for the future[J]. Hydrological Processes, 2004, 18(11): 2183-2186.
- [6] 夏军,左其亭. 国际水文科学研究的新进展[J]. 地球科学进展, 2006, 21(3): 256-261.
- [7] Onstad C A, Jamieson D G. Modeling the effects of land use modifications on runoff[J]. Water Resources Research, 1970, 6(5): 1287-1295.
- [8] Unesco. Hydrological effects of urbanization[R]. Studies and Reports in Hydrology 18, Paris, France, 1974.
- [9] 刘昌明,钟骏襄. 黄土高原森林对年径流影响的初步分析[J]. 地理学报, 1978(2): 12-16.
- [10] Matheussen B, Kirschbaum R L, Goodman I A, et al. Effects of land cover change on streamflow in the interior Columbia River Basin (USA and Canada) [J]. Hydrological Processes, 2000, 14(5): 867-885.
- [11] 史培军,袁艺,陈晋. 深圳市土地利用变化对流域径流的影响[J]. 生态学报, 2001, 21(7): 1041-1050.
- [12] 陈军锋,李秀彬. 土地覆被变化的水文响应模拟研究[J]. 应用生态学报, 2004, 15(5): 833-836.
- [13] 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.
- [14] Cao W Z, Bowden W B, Davie T, et al. Modeling impacts of land cover change on critical water resources in the Motueka river catchment, New Zealand[J]. Water Resources Management, 2009, 23(1): 137-151.
- [15] Githui F, Mutua F, Bauwens W. Estimating the impacts of land-cover change on runoff using the soil and water assessment tool (SWAT): case study of Nzoia catchment, Kenya[J]. Hydrological Sciences Journal, 2009, 54(5): 899-908.
- [16] Im S, Kim H, Kim C, et al. Assessing the impacts of land use changes on watershed hydrology using MIKE SHE[J]. Environmental Geology, 2009, 57(1): 231-239.
- [17] Mao D, Keith A C. Impacts of land-use change on hydrologic responses in the Great Lakes region[J]. Journal of Hydrology, 2009, 374(1/2): 71-82.
- [18] 陈莹,许有鹏,尹义星. 基于土地利用/覆被情景分析的长期水文效应研究:以西苕溪流域为例[J]. 自然资源

- 学报,2009,24(2):351-359.
- [19] 李佳,张小咏,杨艳昭. 基于 SWAT 模型的长江源土地利用/土地覆被情景变化对径流影响研究[J]. 水土保持研究,2012,19(3):119-124.
- [20] Wijesekera G N, Gupta A, Valeo C, et al. Assessing the impact of future land-use changes on hydrological processes in the Elbow River watershed in southern Alberta, Canada[J]. *Journal of Hydrology*, 2012, 412/413:220-232.
- [21] Calder I R. Hydrologic Effects of Land-use Change[C]// Maidment D R. *Handbook of hydrolog.* McGraw-Hill, New York, 1993:50.
- [22] 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.
- [23] 黄秉维. 确切地估计森林的作用[J]. 地理知识, 1981(1):1-5.
- [24] 周晓峰,赵惠勋,孙慧珍. 正确评价森林水文效应[J]. 自然资源学报,2001,16(5):420-426.
- [25] Costa M H, Botta A, Cardille J A. Effects of large-scale changes in land cover on the discharge of the Tocantins River, Southeastern Amazonia[J]. *Journal of Hydrology*, 2003, 283(1/4):206-217.
- [26] Jackson R B, Jobbagy E G, Avissar R, et al. Trading water for carbon with biological carbon sequestration[J]. *Science*, 2005, 310(5756):1944-1947.
- [27] 王盛萍,张志强,孙阁,等. 黄土高原流域土地利用变化水文动态响应:以甘肃天水吕二沟流域为例[J]. 北京林业大学学报,2006,28(1):48-54.
- [28] Siriwardena L, Finlayson B L, McMahon T A. The impact of land use change on catchment hydrology in large catchments: the Comet River, Central Queensland, Australia [J]. *Journal of Hydrology*, 2006, 326(1/4):199-214.
- [29] Zhang Y K, Schilling K E. Increasing streamflow and baseflow in Mississippi River since the 1940s: effect of land use change[J]. *Journal of Hydrology*, 2006, 324(1/4):412-422.
- [30] Wang S F, Kang S Z, Zhang L, et al. Modeling hydrological response to different land-use and climate change scenarios in the Zamu River basin of northwest China [J]. *Hydrological Processes*, 2008, 22(14):2502-2510.
- [31] 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.
- [32] 王根绪,张钰,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:地球科学,2005,35(7):671-681.
- [33] Olang L O, Furst J. Effects of land cover change on flood peak discharges and runoff volumes: model estimates for the Nyando River Basin, Kenya[J]. *Hydrological Processes*, 2011, 25(1):80-89.
- [34] 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.
- [35] 冉茂玉. 论城市化的水文效应[J]. 四川师范大学学报:自然科学版,2000,23(4):436-439.
- [36] 葛怡,史培军,周俊华,等. 土地利用变化驱动下的上海市区水灾灾情模拟[J]. 自然灾害学报,2003,12(3):25-30.
- [37] 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):1560-1572.
- [38] 黄奕龙,傅伯杰,陈利顶. 黄土高原水土保持建设的环境效应[J]. 水土保持学报,2003,17(1):29-32.
- [39] 景可,郑粉莉. 黄土高原水土保持对地表水资源的影响[J]. 水土保持研究,2004,11(4):11-12,73.
- [40] 傅伯杰,陈利顶,马克明. 黄土丘陵小流域土地利用变化对生态环境的影响[J]. 地理学报,1999,54(3):241-246.
- [41] 姚云峰,王礼先. 水平梯田减蚀作用分析[J]. 中国水土保持,1992(12):40-41.
- [42] 何长高,董增川,石景元,等. 水土保持的水文效应分布式模拟[J]. 水科学进展,2009,20(4):584-589.
- [43] Ankeny M D, Kaspar T C, Horton R. Characterization of tillage and traffic effects on unconfined infiltration measurements[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1990, 54(3):837-840.
- [44] 韩晓增,王守宇,宋春雨,等. 土地利用/覆盖变化对黑土生态环境的影响[J]. 地理科学,2005,25(2):203-208.
- [45] 姚允龙,吕宪国,王蕾. 流域土地利用/覆被变化水文效应研究的方法评述[J]. 湿地科学,2009,7(1):83-88.
- [46] 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:以云州水库流域为例[J]. 资源科学,2004,26(2):62-67.
- [47] 邓慧平,李秀彬,张明,等. 气候与地表覆被变化对梭磨河流域水文影响的分析[J]. 地理科学,2001,21(6):493-497.
- [48] 张晓明,余新晓,武思宏,等. 黄土丘陵沟壑区典型流域土地利用/土地覆被变化水文动态响应[J]. 生态学报,2007,27(2):414-423.
- [49] 朱丽,秦富仓,姚云峰. 华北土石山区土地利用/土地覆被变化的水文响应研究:以张家口云州水库流域为例[J]. 水土保持研究,2009,16(6):224-228.
- [50] 徐宗学,程磊. 分布式水文模型研究与应用进展[J]. 水利学报,2010,41(9):1009-1017.
- [51] Freeze R A, Harlan R L. Buleprint for a physically-

- based, digitally-simulated hydrological response model [J]. *Journal of Hydrology*, 1969, 9(3): 237-258.
- [52] 王中根, 刘昌明, 左其亭, 等. 基于 DEM 的分布式水文模型构建方法[J]. *地理科学进展*, 2002, 21(5): 430-439.
- [53] Beven K J, Kirkby M J. A physically based variable contributing model of basin hydrology[J]. *Hydrological Sciences Bulletin*, 1979, 24(1): 43-69.
- [54] 张金存, 芮孝芳. 分布式水文模型构建理论与方法述评[J]. *水科学进展*, 2007, 18(2): 286-292.
- [55] Seyfried M S, Wilcox B P. Scale and the nature of spatial variability: field examples having implications for hydrologic modeling [J]. *Water Resources Research*, 1995, 31(1): 173-184.
- [56] 沈冰, 黄领梅, 李怀恩. 水文模拟研究评述[J]. *西安理工大学学报*, 2004, 20(4): 351-355.
- [57] Blöschl G, Sivapalan M. Scale issues in hydrological modeling: a review [J]. *Hydrological Processes*, 1995, 9(3/4): 251-290.
- [58] 任立良, 刘新仁, 郝振纯. 水文尺度若干问题述评[J]. *水科学进展*, 1996, 7(增刊): 87-99.
- [59] 刘建梅, 裴铁璠. 水文尺度转换研究进展[J]. *应用生态学报*, 2003, 14(12): 2305-2310.
- [60] FitzHugh T W, Mackay D S. Impacts of input parameter spatial aggregation on an agricultural nonpoint source pollution model[J]. *Journal of Hydrology*, 2000, 236(1/2): 35-53.
- [61] 郝芳华, 张雪松, 程红光, 等. 分布式水文模型亚流域合理划分水平刍议[J]. *水土保持学报*, 2003, 17(4): 75-78.
- [62] 张雪松, 郝芳华, 程红光, 等. 亚流域划分对分布式水文模型模拟结果的影响[J]. *水利学报*, 2004, 35(7): 119-123.
- [63] Jha M, Gassman P W, Secchi S, et al. Effects of watershed subdivision on SWAT flow, sediments and nutrient predictions [J]. *Journal of American Water Resources Association*, 2004, 40(3): 811-825.
- [64] Muleta M K, Nicklow J W, Bekele E G. Sensitivity of a distributed watershed simulation to spatial scale [J]. *Journal of Hydrologic Engineering*, 2007, 12(2): 163-172.
- [65] Kumar S, Merwade V. Impact of watershed subdivision and soil data resolution on SWAT model calibration and parameter uncertainty [J]. *Journal of the American Water Resources Association*, 2009, 45(5): 1179-1196.
- [66] Romanowicz A A, Vanclooster M, Rounsevell M, et al. Sensitivity of the SWAT model to the soil and land use data parametrisation: a case study in the Thyle catchment, Belgium [J]. *Ecological Modeling*, 2005, 187(1): 27-39.
- [67] 胡连伍, 王学军, 罗定贵, 等. 不同子流域划分对流域径流、泥沙、营养物模拟的影响[J]. *水科学进展*, 2007, 18(2): 235-240.
- [68] Arabi M, ovidaraju R S, antush M M, et al. Role of watershed subdivision on modeling the effectiveness of best management practices with SWAT [J]. *Journal of the American Water Resources Association*, 2006, 42(2): 513-528.