

# 流域土地利用/覆被变化的水文效应及洪水响应\*

万荣荣<sup>1,2</sup> 杨桂山<sup>1</sup>

(1: 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 南京 210008; 2: 中国科学院研究生院, 北京 100039)

**提 要** 干旱与洪涝灾害已成为全球关心的重大问题。土地利用/覆被变化影响雨水的截留、下渗、蒸发等水文要素及其产汇流过程,并进而影响流域出口断面的流量过程,加大流域洪涝灾害发生的频率和强度。深入研究土地利用/覆被变化对洪涝灾害的影响,对于社会经济可持续发展具有重要意义。通过分析和总结已进行的有关流域土地利用/覆被变化的水文效应及洪水响应研究工作进展,讨论了其研究内容、方法及现有工作的不足之处。

**关键词** 土地利用/覆被变化 水文效应 洪水响应 水文模型 流域

**分类号** P334.92

土地利用/覆被变化(LUCC)和水文循环的生物圈方面(BHAC)是国际地圈生物圈计划(IGBP)的二个核心科学问题。土地利用/覆被变化代表了一种人为的“系统干扰”,是直接或间接影响水文过程的第二个主要边界条件<sup>[1]</sup>。在一定的条件下土地利用/覆被变化和全球变化的其它要素一样,会对水量与水质起到相当的影响,它们可以引起洪涝、干旱、河流与地下水动态变化以及对水质的变化<sup>[2]</sup>。

二十世纪以来,全球洪涝灾害的频率远远高于以往任何时期,由人类活动引起的土地利用/覆被变化是重要的原因之一。土地利用/覆被变化,影响雨水的截留、下渗、蒸发等水文要素及其产汇流过程,并进而影响流域出口断面的流量过程,加大流域洪涝灾害发生的频率和强度。

Calder<sup>[3]</sup>认为,影响水文的主要土地利用/覆被变化是造林和毁林、农业开发的增强、湿地的排水、道路建设以及城镇化等。虽然这些现象和过程发生于从地方到全球所有的空间尺度,但区域和地方尺度是全球变化最重要的来源与驱动力,因此,区域尺度对于进一步理解全球变化的原因和影响及其过程是至关重要的。流域是与水有关的区域尺度研究的最佳单元,因为它代表了水与自然特征、人类水土资源利用相关的物质迁移的自然空间综合体<sup>[1]</sup>。近几十年来,流域土地利用/覆被变化的水文效应与洪水响应越来越成为人们普遍关注的焦点。

## 1 流域土地利用/覆被变化的水文效应及洪水响应研究主要进展

### 1.1 研究方法

自1970年以来,土地利用/覆被变化的水文响应研究由传统的统计分析方法转向水文模型方法。Onstad和Jamieson<sup>[4]</sup>于1970年最先尝试运用水文模型预测土地利用变化对径流的影响。水文模型种类很多,大致分为经验模型、集总式模型和空间分布式模型。经验模型的计算过程无明确的物理法则,在土地利用/覆被变化水文效应研究中应用很少。集总式模型,如HSPF<sup>[5]</sup>、HBV<sup>[6]</sup>、CELTHYM<sup>[7]</sup>、CHARM<sup>[8]</sup>、SCS模型<sup>[9]</sup>等,将整个流域作为一个单元,表现整个流域的有效反应,其致命弱点在于不能处理不同土地利用类型和水文过程的区域差异以及流域参数的变化性。集总式模型适用于土地利用/覆被类型比较单一的小尺度流域,模型参数往往无物理意义,需通过率定求出。基于物理的分布式(或半分布式)模型能明确地反映出空间变异性,在解释和预测土地利用变化的影响上有着重要的应用,如评价不同降雨、气候和土地利用组合的流域响应模

\* 中国科学院知识创新重要方向性项目(KZCX3-SW-331)资助。

2003-12-25 收稿;2004-02-20 收修稿。万荣荣,女,1977年生,博士研究生,E-mail: wanrongrong@sohu.com

型 PRMS<sup>[10]</sup>, 模拟山区森林流域土地覆被变化水文影响的地形指数模型 (TOPMODEL)<sup>[11]</sup>, 土地利用/覆被变化对暴雨-径流及洪水动态影响的模型 LISFLOOD<sup>[12]</sup>、IPH IV<sup>[13]</sup>、WaSIM-ETH<sup>[14]</sup>、MHYDAS<sup>[15]</sup>, 研究长时期宏观尺度(或大中尺度)流域土地利用/覆被变化水文效应模型 CLASSIC<sup>[16]</sup>、J2000<sup>[17]</sup>、SHETRAN<sup>[18]</sup>、VIC<sup>[19]</sup>等。GIS 和 RS 在 LUCC 和水文循环领域的应用为水文模拟提供了新的研究思路和技术方法, 如 ARC/EGMO<sup>[1]</sup>、SWAT<sup>[20]</sup>、DPHM-RS<sup>[21]</sup>等。

## 1.2 流域土地利用/覆被变化对水文过程的影响

水循环是地球上各种形态的水通过降水、径流、蒸发等环节在大气系统、陆地系统和海洋系统之间不断发生相态转换和周而复始的运动过程。水文领域所关注的陆地系统水分循环发生于地表系统、地下系统和含水层系统。蒸散发、截留、填注、下渗和地表径流是地表系统的重要水文过程,也是流域主要的水量平衡要素,它们主要受到气候因素、地表特征如地形海拔、坡度、坡向、植被、土壤等因素的影响。土地利用导致土地覆被变化,变化的土地覆被状况与近地表面的蒸散发、截留、填注、下渗等水文要素及其产汇流过程密切相关。Bronstert 等<sup>[22]</sup>总结了可能影响地面及近地表水文过程的土地利用变化及与之相关的水文循环要素,其中影响水文过程的最显著的土地利用变化是植被变化(如作物收割、森林砍伐)、农作物耕种和管理实践、城镇下水道及排污系统等。

1.2.1 流域土地利用/覆被变化对蒸散发的影响 Calder<sup>[3]</sup>认为,土地利用对流域水量平衡的最明显的影响在于对蒸散发过程的影响。不同土地利用类型由于不同的植被覆盖、叶面指数、根系深度以及反射率,而具有不同的蒸发速率。蒸散发与叶面积指数之间存在的密切关系受到许多学者关注,通过叶面积指数的变化可定量估算蒸散发量<sup>[23,24]</sup>。Dunn 和 Mackay<sup>[18]</sup>根据实验和文献资料获得 8 种土地利用水文类型的蒸散发参数,研究土地利用变化通过与蒸散发的关联而对水文产生直接的影响。

1.2.2 流域土地利用/覆被变化对截留的影响 尽管普遍认为除了蒸发损失之外,截留损失具有一定意义,但截留的影响只有在小暴雨过程中且仅对地表径流速度产生影响时才表现出来,在大暴雨和洪水事件中是无关紧要的<sup>[3]</sup>。不过,在水量平衡研究中,截留则举足轻重,美国学者<sup>[25]</sup>研究发现树冠拦截 10%~40% 的雨量(一般 10%~20%),因地表植被覆盖的类型和密度、雨强、雨后蒸发等多种因素而异。枯枝落叶层在渗透产生前可以拦截 3~50mm 的雨水,与森林类型有关,一般在 25mm 左右。Dickinson<sup>[16]</sup>认为植被最大截留量等于叶面积指数(LAI)乘以一个特定的存储值。

1.2.3 流域土地利用/覆被变化对填注的影响 降雨时,当雨强超过土壤下渗能力时,净雨开始填注地表洼地,拦蓄的水量称为洼地储蓄量(填注量)。流域地形和土地利用变化影响洼地的面积、深度、容积、数量,从而影响填注量。Wright 给出了部分不透水区和透水区的洼地储蓄容量值<sup>[27]</sup>:大面积硬化区 1.3~3.8mm,扁平屋顶 2.5~7.6mm,陡峭屋顶 1.3~2.5mm;平坦草地 5.1~12.7mm,林区及开敞地 5.1~15.2mm。

1.2.4 流域土地利用/覆被变化对下渗的影响 流域土地利用/覆被变化,如将坡地改梯田、植树造林、蓄水工程建设等将增加水的滞留时间,从而增大下渗量。土壤特征是影响下渗能力最为重要的因素之一,流域土地利用/覆被变化通过对土壤性质的改变而间接影响下渗,如耕作土壤将导致下渗量比自然态土壤高数倍,植物根系将增加土壤孔隙度、改变土壤持水状态<sup>[17]</sup>,从而提高下渗速率,枯枝落叶层减缓渗透速率。城市不透水层的增加导致下渗、土壤水份存储量的下降<sup>[28]</sup>。

1.2.5 流域土地利用/覆被变化对径流的影响 土地利用/覆被变化的水文响应研究中,森林水文效应倍受关注<sup>[29-31]</sup>,特别是造林和毁林对水文的影响研究。森林用地的减少将会导致平均径流量的增加似乎已得到科学的证实<sup>[32]</sup>。许多流域的研究<sup>[12,20,33-35]</sup>表明,森林用地转换为耕地(旱作物)、牧草地,会导致河川径流增加,暴雨流量、洪峰流量增加,洪水位上升到达洪峰值的时间减少,洪峰速率增大。尽管有这些研究,关于森林以及其转化为其它用地(如耕地)的影响方面仍然是争议的焦点。在干旱季节水流的影响方面存在着截然相反的观点与证据。多数流域研究表明干旱季节从森林流出的水比从其它类型土地流出的水量小<sup>[36]</sup>,然而在半干旱地区的研究<sup>[37,38]</sup>却有着相反的结论。

Lahmer 等<sup>[11]</sup>和 Klöcking 等人<sup>[39]</sup>的研究表明,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,水文行为的变化只有在多山的河源地区才有表现,干涸的河谷转化为自然湿地,蒸散发量的增加导致流域夏季流量减少<sup>[39]</sup>。

欧洲大尺度流域土地利用变化影响研究结论<sup>[39]</sup>为:土地利用变化主要影响可用水量,对极端洪水事件的影响较小,Eckhardt等<sup>[40]</sup>则认为,为获得显著的土地利用变化水文效应,土地利用变化面积占流域面积的比例取决于土地利用类型及其相关的水文变量。他们经研究表明,土地利用/覆盖类型林地、草地、耕地对于地表径流、地下水补给和河川径流的长期效应方面是十分显著的,草地与林地之间的变化对于河川径流影响的最小变化面积是25%。

### 1.3 流域土地利用/覆被变化对洪涝灾害的影响

洪水是极端水文现象,洪涝灾害的发生发展受气象气候、海洋、水文、下垫面和人类活动等众多要素的作用、牵引和制约。暴雨的时空分布、强度、历时,是重要的气象因素,下垫面的特征对降雨在陆地表面再分配起重要的作用。土地利用/覆被变化是下垫面变化的主要方面,土地利用/覆被变化通过对水文过程的影响而改变直接径流量(产水量),通过改变湖泊、水库的调蓄容量、改变水系微结构等影响流域的蓄泄洪能力。

土地利用/覆被变化的洪水效应研究则主要是通过其对水量平衡的影响,直接或间接地影响降雨-径流关系和产汇流过程,从而对洪水频率产生一定的影响,此类研究主要侧重于气候温和湿润区<sup>[12,16,41-43]</sup>。

1.3.1 土地利用/覆被变化影响暴雨产流过程 土地利用/覆被影响暴雨期间拦截速率、渗透和土壤水的再分布过程,特别是饱和水力传导受到植物根系和气孔的影响<sup>[44]</sup>,极端的例子就是建设用地及道路对地表径流的影响。Brown<sup>[45]</sup>通过不同土地利用实践研究表明,暴雨径流量与不透水层覆盖呈正相关关系。Brun和Band<sup>[45]</sup>的研究结论为:径流系数与土壤饱和度和、不透水面积比率呈二维 Logistic 曲线关系。Dos Reis Castro等<sup>[46]</sup>通过人工降雨实验,研究了不同耕作系统下,不同作物在不同的生长阶段,不同尺度(1m<sup>2</sup>-20km<sup>2</sup>)试验区的土壤渗透系数、径流系数。Van der Ploeg等<sup>[47]</sup>分析 Elbe 河流域 100 年来洪水频率,发现二战后农业机械化、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。

研究土地利用/覆被与洪水产生机制间的关系,有利于采取有效措施防洪减灾。Naef等<sup>[48]</sup>为了估计土地利用变化对暴雨径流的可能影响,对德国 Rheinland Pfalz 州的中尺度流域进行了通过土地利用变化来降低暴雨径流的潜力评价。根据不同的主导产流过程(DRP)对流域进行空间划分,根据每一单元的产流特点(土壤质地、渗透性),确定利于减少产流的土地利用变化方向,从而达到降低、延缓暴雨径流的目的。

1.3.2 土地利用/覆被变化影响汇流过程 土地利用/覆被变化影响地表的粗糙程度,进而控制地表径流的速率和洪泛区水流的速度。土地利用/覆被变化还会影响地表容蓄水量和行洪路径,进而影响洪水演进的路径和速度。

自然流域经土地利用变化后,雨水向河网水系汇集的路径改变,从而影响汇流时间。对城镇而言,暴雨水流通过下水道排出,不一定经最陡坡面。Campana<sup>[131]</sup>分析了巴西 25 个城市化流域的情况,假定下水道与街道平行,得出暴雨在城镇化后与城镇化之前流经的距离呈线性回归关系,在此基础上,通过对不同发展程度的城市汇水时间的估计,建立了城市不透水面积与城市汇水时间之间的关系。Kang 等的模拟表明城市化导致洪峰流量增加、洪峰流速迟滞时间缩短<sup>[49]</sup>。

城市排水系统的改进导致地下水补给和基流量的减少,增加径流量、暴雨流速、洪峰流量和洪水频率<sup>[50]</sup>。Moussa等<sup>[15]</sup>将法国南部的 Roujan 流域实际的灌溉沟渠系统与 DEM 自动提取的河网进行洪水演进模拟,结果表明水位曲线、迟滞时间、径流总量和洪峰流量受到耕作方式和人工沟渠系统的影响。Gumbo等<sup>[51]</sup>则采用类似的方法,评价城市化流域暴雨排水网络的有效性。

湖泊围垦,圈圩筑堤<sup>[52]</sup>,减少流域调蓄水面面积,导致汛期河湖水位急剧升高,高水持续时间增长,从而增加洪涝灾害风险。据河海大学<sup>[53]</sup>对太湖流域的研究结果,若以 1991 年典型实况工作标准,建国以来围垦 528.22km<sup>2</sup> 水面导致太湖水位抬高 9-14cm。

## 2 讨论与展望

### 2.1 基于水文过程响应研究的土地利用/覆被分类

在流域土地利用/覆被变化水文响应研究中,对土地利用类型尚无统一的分类系统,现有的分类大多根据所选择的水文模型需要、并结合流域的实际情况,这样不同的流域之间没有可比性,大大影响了研究的可信度。因此,需根据各种土地利用类型的水文特点,综合评价各类土地利用变化对流域水量平衡、水循环、洪涝灾害的影响,定量区分其贡献率,从而建立一个统一的分类体系。

### 2.2 水文模型的选择

对于土地利用/覆被影响研究,水文模型必须是基于过程的,也就是说模型要体现径流的产生机制,模型结构与参数要体现地表状况对不同产流机制的影响。运用的模型是空间分布的、时间动态的,因为径流产生过程在流域内是不均衡的。尽管人们认为基于过程的空间分布式水文模型是研究环境变化对洪水影响的有利工具,但必须强调的是这些模型仍有缺陷,这是因为水文模拟具有高度的不确定性。这些不确定性是由于没有足够数量和高质量的数据;子区域的时间异质性;对于物理表象和随机过程的特征缺乏足够的认识,特别是极端降雨阶段(过程不确定性)、模型结构的简化(模型不确定性)等。对于参数较少的模型,或对于基于过程的模型,必须进行系统、综合的不确定性分析,如 Eckhardt 等<sup>[40]</sup>采用 Monte Carlo 模拟法测定不同土地覆被下的模型响应的不确定度,对模型响应概率进行显著性检验,从而评价模型是否适于土地利用变化水文效应研究。

由于模型结构、参数、算法的差异,模型的运用范围有一定的局限性,因此需解决模型的推广问题。具模块化结构的水文模型潜力很大,如 Niehoff 等<sup>[14]</sup>将原先用于气候变化水文响应研究的 WaSiM - ETH 模型进行改进,增加了一个与土地利用特征相关的产流模块,模拟了莱茵河流域土地利用变化的水文响应。

模型参数率定与验证需区分自然变化(如气候变化)与人为活动(土地利用、耕作方式、引水工程等)影响结果。对于短期水文影响研究,由于气候变化不明显,可以忽略不计,但对于长期水文影响研究中,需考虑气候变化的影响,进一步探讨土地利用变化对水文的影响的贡献率。近年的研究已考虑到了气候变化与土地利用变化对水文影响的定性比较<sup>[1,54]</sup>,缺乏定量化的分析。

我国流域土地利用/覆被变化水文效应方面的研究工作是在近几年才开始的,在深度和广度上与国外的研究存在很大差距。今后可在以下几个方面做深入工作:由于新安江模型及其改进<sup>[55-57]</sup>在我国湿润区、半干旱区半湿润区及干旱区的水文模拟均有着广泛的应用<sup>[58-60]</sup>,因而可运用新安江模型研究流域土地利用/覆被变化水文影响与洪水响应;借鉴国外经验,如 LISFLOOD - FLOODPLAIN<sup>[61]</sup>,在遥感和 GIS 技术支持下探讨我国湿润平原河网地区分布式水文模型的构建。

### 2.3 空间尺度界定

降雨 - 径流是非线性关系,与尺度有关。土地利用对洪水径流影响模拟依赖于降雨强度、研究区面积和模型设计的尺度。因此,模型中的相关过程依赖于尺度。所以需要选择适当时间、空间尺度的水文(洪水)模拟模型。大流域由于不同的土地利用、地质地貌、土壤类型呈镶嵌式,这种空间变异性与降雨模式的时空差异,往往减弱了整个流域的水文响应,造成“中和效应”<sup>[20,39]</sup>。Qian<sup>[62]</sup>未能检测出中国一大流域(727km<sup>2</sup>)森林面积减少30%的河川流量变化。泰国的 Nam Pong 流域(12100km<sup>2</sup>)近30年森林覆盖率从80%降至27%,也有类似的结果<sup>[6]</sup>。

不同尺度影响各单一过程的主导因素是变化的,由于不同尺度上的模型或参数不匹配,尺度间的转换存在难点。大多数小尺度的模型为了特定的关键问题研究而设计的,反映了研究的核心问题,所以常常忽视某些要素,即模拟时运用简化的算法。小尺度模型应用于大流域的尺度转换存在的主要限制因素是大尺度数据精确性与有效性的降低掩盖了流域环境参数异质性的增强。水文变量尺度转换问题需通过研究不同尺度上水文过程的统计自相似性问题<sup>[63]</sup>、利用分形理论定量描述时空尺度函数的变异率等途径得到解决。

### 2.4 研究意义与前景

研究土地利用/覆被变化对产、蓄、排水和行洪的影响,定量区分不同土地利用类型变化的水文效应及

其对洪水形成和加剧的影响强度具有重要的意义。干旱、半干旱地区水资源短缺,区域供水不足,探讨土地利用/覆被变化的水文响应,可为干旱管理、灌溉规划、开发供水提供有效途径。气候湿润区洪涝灾害频繁,结合土地利用/覆被变化趋势分析,估算不同土地利用格局背景和不同防洪规划工程组合的减灾效果,提出河湖水系格局调整与土地利用优化方案。

土地利用/覆被变化水文效应与洪水响应研究在方法上,将重点向基于 GIS、RS 的分布式物理模型方向发展;在研究内容上,将更加重视揭示土地利用/覆被变化对水文与洪水影响的过程与机理,而不是仅仅关注其影响结果;在时空尺度上,由于不同时空尺度的水文循环机理不同,目前只能针对不同的研究目标选择不同时空尺度的水文模型,不同尺度水文信息转换问题将是未来该领域研究的重点走向。

### 参 考 文 献

- 1 Lahmer W, Pfützner B & Becker A. Assessment of land use and climate change impacts on the Mesoscale. *Physics and Chemistry of the Earth*, 2001, 26: 565 - 575
- 2 Rogers P. Hydrology and water quality. In: Meyer W B and Turner B L II eds. *Changes in land use and land cover: A global perspective*. Cambridge: Cambridge University Press, 1994: 231 - 258
- 3 Calder I R. Hydrologic effects of land-use change. Chapter 13. In: Maidment D R ed. *Handbook of hydrology*. New York: McGraw - Hill, 1993: 50
- 4 Onstad C A, Jamieson D G. Modelling the effects of land use modifications on runoff. *Water Resource Research*, 1970, 6(5): 1287 - 1295
- 5 Brun S E, Band L E. Simulating runoff behavior in an urbanizing watershed. *Computers, Environment and Urban Systems*, 2000, 24: 5 - 22
- 6 Wilk J, Andersson L, Plermkamon V. Hydrological impacts of forest conversion to agriculture in a large river basin in northeast Thailand. *Hydrological Processes*, 2001, 15: 2729 - 2748
- 7 Choi J-Y, Engel B A, Chung H W. Daily streamflow modelling and assessment based on the curve-number technique. *Hydrological Processes*, 2002, 16: 3131 - 3150
- 8 陈军锋, 张 明. 梭磨河流域气候波动和土地覆被变化对径流影响的模拟研究. *地理研究*, 2003, 22(1): 73 - 78
- 9 张建云, 何 惠. 应用地理信息进行无资料地区流域水文模拟研究. *水科学进展*, 1998, 9(4): 345 - 350
- 10 Legesse D, Vallet-Coulomb C, Gasse F. Hydrological response of a catchment to climate and land use changes in Tropical Africa: case study South Central Ethiopia. *Journal of Hydrology*, 2003, 275: 67 - 85
- 11 邓慧平, 李秀彬, 陈军锋等. 流域土地覆被变化水文效应模拟——以长江上游源头区梭磨河为例. *地理学报*, 2003, 58(1): 53 - 62
- 12 De Roo A P J, Ddijk M, Schmuck G, et al. Assessing the effects of land use changes on floods in the Meuse and Oder catchment. *Physics and Chemistry of the Earth (B)*, 2001, 26: 593 - 599
- 13 Campana N A, Tucci C E M. Predicting floods from urban development scenarios: case study of the Dilúvio Basin, Porto Alegre, Brazil. *Urban Water*, 2001, 3: 113 - 124
- 14 Niehoff D, Feitsch U, Bronstert A. Land-use impacts on storm-runoff generation: scenarios of land-use change and simulation of hydrological response in a meso-scale catchment in SW-Germany. *Journal of Hydrology*, 2002, 267: 80 - 93
- 15 Moussa R, Voltz M, Andrieux P. Effects of the spatial organization of agricultural management on the hydrological behaviour of a farmed catchment during flood. *Hydrological Processes*, 2002, 16: 393 - 412
- 16 Crooks S, Davies H. Assessment of land use change in the Thames catchment and its effect on the flood regime of the river. *Physics and Chemistry of the Earth (B)*, 2001, 26: 583 - 591
- 17 Krause P. Quantifying the impact of land use changes on the water balance of large catchments using the J2000 model. *Physics and Chemistry of the Earth*, 2002, 27: 663 - 673
- 18 Dunn S M, Mackay R. Spatial variation in evapotranspiration and the influence of land use on catchment hydrology. *Journal of Hydrology*, 1995, 171: 49 - 73
- 19 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). *Hydrological Processes*, 2000, 14: 867 - 885
- 20 Fohrer N, Haverkamp S, Eckhardt K, Frede H-G. Hydrologic response to land use changes on the catchment scale. *Physics and Chemistry of the Earth (B)*, 2001, 26: 577 - 582
- 21 Biftu G F, Gan T Y. Semi-distributed, physically based, hydrologic modeling of the Paddle River Basin, Alberta, using remotely sensed data. *Journal of Hydrology*, 2001, 244: 137 - 156

- 22 Bronstert A, Niehoff D, Bürger G. Effects of climate and land-use change on storm runoff generation: present knowledge and modelling capabilities. *Hydrological Processes*, 2002, **16**: 509 – 529
- 23 Kondoh A. Relationship between the Global Vegetation Index and the evapotranspirations derived from climatological estimation methods. *J of the Japan Society of Photogrammetry and Remote Sensing*, 1995, **34**: 2
- 24 Hasegawa I, Mitomi Y, Nakayama Y, et al. Land cover analysis using multi seasonal NOAA AVHRR mosaicked image for hydrological applications. *Adv Space Res*, 1998, **22**(5): 677 – 680
- 25 WSC, Trent University. Impact of land use changes on water budget. In: Water budget analysis on a watershed basis. Queen' s Printer for Ontario, 2000( [http://www.trentu.ca/wsc/PDFfiles/WBA09\\_impact\\_landuse.pdf](http://www.trentu.ca/wsc/PDFfiles/WBA09_impact_landuse.pdf))
- 26 Dickinson R E. Modelling evapotranspiration for three-dimensional global climate models. In: Hansen J E, Takahasi T. Eds. Climate Processes and Climate Sensitivity Geophysical Monograph Series 29, Washington. 1984
- 27 Singh V P. Hydrology system, watershed modeling. New Jersey: Prentice Hall Inc, 1988
- 28 Schuler T, Claytor R. Impervious cover as an urban stream indicator and a watershed management tool. In: Roesner L A ed. Effects of Watershed development and management in aquatic ecosystems: Proceedings of an engineering workshop. New York: ASCE, 1997: 513 – 529
- 29 Zhu Yaomei, Yu Yiannian. Parameters for evaluation water circulation environment. *Hydrological Processes*, 1988, **2**: 285
- 30 Bosch J M, Hewlett J D. A review of catchment experiments to determine the effect of vegetation changes on water yield and evapotranspiration. *Journal of Hydrology*, 1982, **55**: 3 – 23
- 31 Keppler E T, Ziemer R R. Logging effects on stream flow: water yield and summer low flows at caspar creek in Northwestern California. *Water Resources Research*, 1990, **26**(7): 1669 – 1679
- 32 Bruijnzell L A. (De)forestation and dry season flow in the tropics: a closer look. *J Trop For Sci*, 1989, **1**(3): 229 – 243
- 33 Calder I R, Hall R L, Bastable H G. The impact of land use change on water resources in sub-Saharan Africa: a modeling study of Lake Malawi. *Journal of Hydrology*, 1995, **170**: 123 – 135
- 34 Schulze R E. Modelling hydrological responses to land use and climate change: a Southern African perspective. *Ambio*, 2000, **29**(1): 12 – 22
- 35 Scott D F, Schulze R E. The hydrological effects of a wildfire in a eucalypt afforested catchment. *South African Forestry J*, 1992, **160**: 67 – 78
- 36 Edwards K A. The water balance of the Mbeya experimental catchments. In: Blackie J R, Edwards K A, Clarke R T. eds. Hydrological Research in East Africa. *East Afr Agric For J*, 1979, **43**(Special Issue): 231 – 247
- 37 Sandström K. Forests and water-Friends or foes. Hydrological implications of deforestation and land degradation in semi – arid Tanzania. Ph. D. dissertation. University of Linköping, Linköping, Sweden
- 38 Tiffen M, Mortimore M, Gichuki F. More people, less erosion. Environmental Recovery in Kenya. Wiley, Chichester, 1994
- 39 Klöcking B, Haberlandt U. Impact of land use changes on water dynamics – a case study in temperate meso and macroscale river basins. *Physics and Chemistry of the Earth*, 2002, **27**: 619 – 629
- 40 Eckhardt K, Breuer L, Frede H-G. Parameter uncertainty and the significance of simulated land use change effects. *Journal of Hydrology*, 2003, **273**: 164 – 176
- 41 史培军, 袁 艺, 陈 晋. 深圳市土地利用变化对流域径流的影响. *生态学报*, 2001, **21**(7): 1041 – 1049
- 42 袁 艺, 史培军. 土地利用对流域降雨 – 径流关系的影响——SCS模型在深圳市的应用. *北京师范大学学报(自然科学版)*, 2001, **37**(1): 131 – 136
- 43 Weng Q. Modeling urban growth effects on surface runoff with the integration of remote sensing and GIS. *Environmental Management*, 2001, **28**(6): 737 – 748
- 44 Ragab R, Cooper J D. Variability of unsaturated zone water transport parameters: implications for hydrological modelling: I. in situ measurements. *Journal of Hydrology*, 1993, **148**: 109 – 131
- 45 Brown R G. Effects of precipitation and land use on storm runoff. *Water Resources Bulletin*, 1988, **24**: 421 – 425
- 46 Dos Reis Castro N M, Auzet A-V, Chevallier P, et al. Land use change effects on runoff and erosion from plot to catchment scale on the basaltic plateau of Southern Brazil. *Hydrological Processes*, 1999, **13**: 1621 – 1628
- 47 Van Der Ploeg R R, Schweigert P. Elbe River flood peaks and postwar agricultural land use in East Germany. *Naturwissenschaften*, 2001, **88**: 522 – 525
- 48 Naef F, Scherrer S, Weiler M. A process based assessment of the potential to reduce flood runoff by land use change. *Journal of Hydrology*, 2002, **267**: 74 – 79
- 49 Kang S, Park J I, Singh V. Effect of urbanization on runoff characteristics of the On-Cheon Stream watershed in Pusan, Korea. *Hydrological Processes*, 1998, **25**: 351 – 363

- 50 Tenenbaum D. Distributed hydrological modeling of urbanizing ecosystems: Investigating the impact of urbanization pattern in Baltimore, Maryland, USA. (<http://www.enpc.fr/cereve/HomePages/thevenot/www-jes-2002/Tenenbaum-Paper-2002.pdf>)
- 51 Gumbo B, Munyamba N, Sithole G, et al. Coupling of digital elevation model and rainfall-runoff Model in storm drainage network design. *Physics and Chemistry of the Earth*, 2002, 27: 755 - 764
- 52 高俊峰, 韩昌来. 太湖地区的圩及其对洪涝的影响. *湖泊科学*, 1999, 11(2): 105 - 109
- 53 梁瑞驹. '91 太湖洪涝灾害. 南京: 河海大学出版社, 1991: 100 - 111
- 54 Lørup J K, Refsgaard J C, Mazvimavi D. Assessing the effect of land use change on catchment runoff by combined use of statistical tests and hydrological modelling: case studies from Zimbabwe. *Journal of Hydrology*, 1998, 205: 147 - 163
- 55 赵人俊. 流域水文模拟——新安江模型与陕北模型. 北京: 水利电力出版社, 1984: 106 - 130
- 56 赵人俊. 水文预报文集. 北京: 水利电力出版社, 1994: 120 - 145
- 57 李致家, 孔祥光, 张初旺. 对新安江模型的改进. *水文*, 1998, (4): 19 - 23
- 58 夏自强. 自然地理信息与确定性水文模型参数关系分析. *河海大学学报*, 1998, 26(1): 33 - 38
- 59 姜 彤, 许朋柱, 曹文清. 太湖地区西苕溪流域水文模型的设计. *地理科学*, 1997, 17(2): 150 - 157
- 60 鄢建强. 华北地区流域月降水径流模型比较研究. *水科学进展*, 1998, 9(3): 282 - 288
- 61 De Roo A P J, Schmuck G, Perdigao V, et al. The influence of historic land use change and future planned land use scenarios on floods in the Oder catchment. *Physics and Chemistry of the Earth*, 2003, 28: 1291 - 1300
- 62 Qian W C. Effects of deforestation on flood characteristics with particular reference to Hainan Island, China. *International Association of Hydrological Sciences Publication*, 1983, 140: 249 - 258
- 63 陈 喜, 陈水勤. 水文过程中的尺度问题. 见: 刘昌明主编. 21 世纪中国水文科学研究的新问题新技术和新方法. 北京: 科学出版社, 2001: 28 - 37

## Progress in the Hydrological Impact and Flood Response of Watershed Land Use and Land Cover Change

WAN Rongrong<sup>1,2</sup> & YANG Guishan<sup>1</sup>

(1: Nanjing Institute of Geography & Limnology, CAS, Nanjing 210008, P. R. China;

2: Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, P. R. China)

### Abstract

Drought and flood have been important issues around the world. Land use and land cover change influence hydrological factors such as interception, infiltration and evapotranspiration, the progress of water generation and concentration, then affect the discharge at the watershed outlet, and then influence the frequency and degree of flood. Taking this kind of study is of important significance for sustainable development of society and economy. The progress in the hydrological impact and flood response of watershed land use and land cover change is analyzed and summarized, and the study contents, methods and deficiencies are discussed.

**Keywords:** Land use/land cover change; hydrological impact; flood response; hydrological model; watershed