

# 极端土地覆被情景下的水文响应模拟\*

翟春玲<sup>1,2</sup>, 余钟波<sup>1</sup>, 杨传国<sup>1</sup>, 鞠 琴<sup>1</sup>

(1. 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏南京 210098;  
2. 国网电力科学研究院/南京南瑞集团公司, 江苏南京 210003)

**摘要:**以淮河流域为研究对象,选择分布式水文模型 HMS,结合 GIS 技术,构建了分布式陆面-水文耦合模型(LSX-HMS)。利用实测水文资料进行参数率定和模型验证,确定性系数达 0.791~0.854,表明该耦合模型在淮河流域具有较好的适用性,能进行土地覆被变化下的水文响应研究。采用极端土地利用/覆被法构建了 5 种土地覆被情景,利用 LSX-HMS 模型分析了各情景下的水文过程。结果表明:常绿阔叶林覆被情景下的蒸散发量和径流量变化最为显著,年均蒸散发量增加 5.6%,年均径流深减少 16.7%;草地覆被情景对增加径流量作用较为显著,年均径流深增加 6.9%;在枯水年,草地覆被情景下的土壤含水量变化较为剧烈;对径流量的空间模拟表明:各情景下径流量的空间分布差别较大。研究成果为淮河流域水土资源合理开发利用、调配和管理提供依据。

**关键词:**LSX-HMS 模型;土地覆被情景;淮河流域;水文响应

中图分类号: S715-3 文献标志码: A 文章编号: 0529-6579(2011)04-0127-07

## Modeling of Hydrologic Responses on Extreme Land Cover Scenarios

ZHAI Chunling<sup>1,2</sup>, YU Zhongbo<sup>1</sup>, YANG Chuanguo<sup>1</sup>, JU Qin<sup>1</sup>

(1. State Grid Electric Power Research Institute/Nanjing NARI Group Corporation,  
Nanjing 210003, China;

2. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering,  
Hohai University, Nanjing 210098, China)

**Abstract:** Using the distributed hydrology model system (HMS) and Geographical Information System and the technology of remote sensing for data spatial analysis, a land surface-hydrology coupled model (LSX-HMS) was constructed in the Huaihe river basin. Measured hydrologic data were used to calibrate and validate the model. The Nash-Sutcliffe coefficient for hydrologic simulations ranges from 0.791 to 0.854, indicating that LSX-HMS can be used for studying hydrologic processes responses to land use and cover change (LUCC) in the Huaihe river basin. Five extreme land cover scenarios are constructed with each comprising of one single type of land cover in the Huaihe river basin. The hydrologic processes for each cover scenario are simulated by using LSX-HMS. The simulated results indicate that evergreen broadleaf forest cover scenarios can significantly alter evapotranspiration and streamflow in the studied basin. The annual evapotranspiration increases 5.6% and the annual depth of streamflow decreases 6.7%; the annual depth of streamflow under grass cover scenario increases 6.9%. In dry years, the soil moisture content varies most rapidly under the grass cover scenarios. The modeling of streamflow's spacial distribution with LSX-HMS model shows that there is a great difference under various scenarios. This research

\* 收稿日期: 2010-07-11

基金项目: 国家重点基础研究发展计划基金资助项目(2010CB951101); 国家自然科学基金资助项目(50979022和50679018); 国家自然科学基金会博士点基金资助项目(20100094110003); 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室专项经费资助项目(1069-50986312); 中央高校基本科研业务费资助项目

作者简介: 翟春玲(1985年生),女,研究生; E-mail: zhaichunling1985@yahoo.com.cn

provides a basis for developing, utilizing, allocating and managing water and soil resources in the Huaihe river basin.

**Key words:** LSX-HMS model; land cover scenario; Huaihe river basin; hydrologic responses

近年来,水文科学研究面临新的挑战,即变化环境下的水资源形成和演变规律问题。它是国际地学领域积极鼓励的创新科研课题<sup>[1]</sup>。而土地利用/覆被变化是变化环境的一个重要表现,从而研究土地利用/覆被变化下的水文响应成为当前研究的重点和热点。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>[2]</sup>。土地覆被变化对水文过程的影响主要表现在对水文循环过程和水量水质的改变上<sup>[3]</sup>。土地覆被变化通过改变地表蒸散发、土壤水分状况及地表覆被的截留量,进而对流域的水量平衡产生影响<sup>[4]</sup>。

土地覆被变化对流域水文循环影响的研究方法可归结为流域对比试验法、水文特征参数法和流域水文模型模拟法 3 类<sup>[5]</sup>。21 世纪以来,“基于 DEM 的分布式水文模型”逐步发展起来,并成为当今水文学界研究的热点<sup>[1]</sup>。因此,研究土地覆被变化的水文效应更多的采用水文模型模拟法。袁飞<sup>[6]</sup>将考虑植被影响的新安江模型应用于汉江流域土地覆被变化的水文效应研究,研究结果表明:在汉江汉中站集水区域植树造林将可能增加流域年均蒸散发量,减少流域径流量;马杏,许建初<sup>[7]</sup>等利用 SWAT 模型模拟了四期不同土地利用方式下流域的水文响应,模拟结果表明:流域森林覆被面积增加 44%,年径流量减少 2.0%,年蒸散发量增加 4.8%;Hundecha 和 Bardossy<sup>[8]</sup>应用 HBV 模型

模拟了莱茵河 95 个小流域的各种土地利用覆被情景下的水文响应,得出的结论为:若整个流域为森林覆被,则洪峰流量减少,且低峰流量减少更多,峰现时间滞后;杨传国等<sup>[9]</sup>采用 LSX-HMS 模型对淮河流域大尺度土地利用变化的水文响应进行了评估,结果表明:混合林覆被情景下的洪峰流量比耕地覆被小  $400 \text{ m}^3/\text{s}$ ,植树造林可以减少洪涝灾害的发生。

本研究以淮河流域为例,选择具有物理基础的流域分布式水文模型(HMS),并结合 GIS 空间分析技术,构建分布式陆面-水文耦合模型(LSX-HMS),探讨淮河流域 LUCC 的水文效应,利用实测的气象和水文资料检验 LSX-HMS 模型在该流域的适用性。论文的研究成果为淮河蚌埠以上区域的水土资源合理开发利用、调配和管理提供依据。

## 1 研究区概况与数据来源

### 1.1 研究区概况

淮河流域位于东经  $111^{\circ}55' - 121^{\circ}25'$ ,北纬  $30^{\circ}55' - 36^{\circ}36'$ ,蚌埠以上地区为论文主要研究区域。该区域内西部、西南部为山区、丘陵区,其余为平原。研究区域西部为伏牛山、桐柏山区,高程通常在  $200 \sim 500 \text{ m}$  (85 黄海高程,下同)之间,南部大别山区高程高达  $300 \sim 1774 \text{ m}$ 。山体延伸部分形成丘陵区,西部较南部高,两者高程大概分别在  $100 \sim 200$  和  $50 \sim 100 \text{ m}$  之间。除山区、丘陵和平原外,区域内还有为数众多的湖泊、洼地分布。研究区水系及雨量站如图 1 所示。蚌埠以上集水面

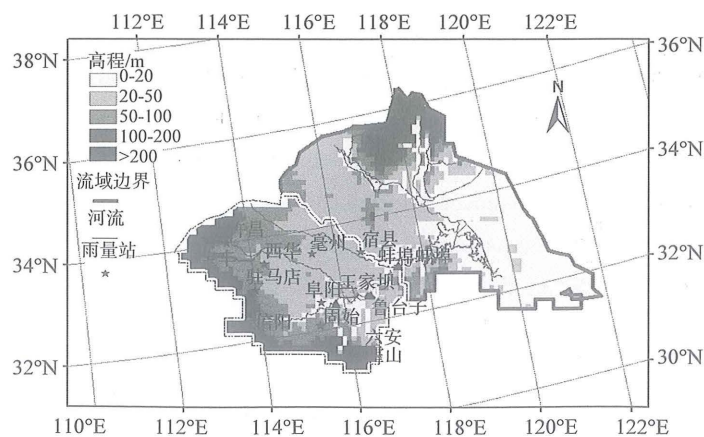


图 1 研究区水系及雨量站

Fig. 1 Flow network and precipitation stations in the Huahe river basin

积为 12.13 万 km<sup>2</sup>，蚌埠水文站做为检验站点。

淮河流域地处我国东部南北气候过渡地带，属温带湿润季风气候区。区域日照时间长，光热资源丰富，气候温和，年平均气温为 11~16℃，多年平均降水量约为 888 mm。降水量年内分布不均，降水季节集中，6~8 月雨量占年降水量的 60% 左右。

### 1.2 数据来源

本研究所需要的数据包括地形、植被和土壤等模型参数数据和降雨等水文气象数据。其中，地形数据采用全球 1 km 分辨率的 HYDRO1K DEM 数据库；植被数据采用 Dorman-Sellers 参数化方案<sup>[10]</sup>，该方案给定植被类型年内每个月份的生物物理特征值，包括叶面积指数 (LAI)、植被覆盖系数、根系长度、叶面传导系数、叶面反照率、叶面角、植被高度等，该数据总共

分 12 种植被类型 (见表 1)，目前淮河流域的主要地表覆盖类型较为单一，以耕地为主；土壤数据根据 GENESIS 2°×2° 的土壤质地数据库采用距离权重方法插值得到，并分别对海洋或水体格点进行了单独设定，土壤质地数据包括 0~4.25 m 共 6 层的砂土含量和粘土含量，用于合理确定各种土壤水力学参数<sup>[11]</sup>，淮河流域沙土含量较少，粘土所占比例较大；降雨资料采用淮河流域蚌埠水文站 1980-1987 年实测日降雨资料进行时间解集得到，地表气温、比湿等气象驱动变量均来自同期的 NCEP/NCAR 再分析数据库。

## 2 研究模型构建

### 2.1 陆面-水文耦合模型简介

陆面-水文耦合模型 LSX-HMS 是 Yu 和 Schwartz 等<sup>[12]</sup>在开发了一个具有物理基础的分布式参数水文模型 (Basin-Scale Hydrologic Model, BSHM) 的基础上，进一步研制了适用于大型流域、区域甚至大陆尺度的分布式水文模型，实现了与 GENESIS GCM 中的陆面模式 LSX 的耦合<sup>[13]</sup>，建立了陆面水

文耦合模型系统 (LSX-HMS) 并成功应用于北美大陆区域多个流域。国内，杨传国<sup>[14]</sup>在淮河流域进行了陆面水文过程耦合模拟研究及其应用；鞠琴<sup>[15]</sup>应用该模型进行了长江流域气候变化及水循环响应研究；刘德东<sup>[16]</sup>将耦合模型应用于长江流域古气候水文模拟理论研究。

表 1 Dorman-Sellers 植被分类

Table 1 Dorman-Sellers vegetation categories

植被类型	名称	植被类型	名称
0	海洋或无值	7	常绿地被植物
1	阔叶常绿林	8	常绿阔叶灌木
2	阔叶季节林	9	稀疏阔叶灌木
3	混合林	10	苔藓地衣
4	针叶常绿林	11	裸地
5	针叶季节林	12	耕地
6	稀疏阔叶林		

### 2.2 数字流域构建

本研究采用 1 km×1 km 网格单元对淮河流域进行空间离散。采用 ZB 算法进行大尺度网格 DEM 数据的生成和流域信息提取<sup>[17-18]</sup>，生成 10 km 网格尺度的 DEM 数据，该方法与网格平均法相比，避免了生成的大尺度 DEM 数据通常无法保证提取连续水系和流域边界的合理性。研究区的流域数字水文特征信息如图 2 所示。

### 2.3 参数率定和模型验证

本研究采用人工试错法进行参数率定，并选择了确定性系数 CE 和径流深相对误差 R 两个指标来检验耦合模型在淮河流域的流量模拟精度。

确定性系数 CE 和径流深相对误差 R 的计算公式如下：

$$CE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - Q_{cal,i})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - \bar{Q}_{obs})^2}$$



图 2 淮河流域数字水文特征信息图

Fig. 2 Information of hydrologic features in the Huaihe river basin: (a) Flow direction (b) flow accumulation (c) stream network

$$R = \left[ \frac{\sum_{i=1}^n Q_{cal,i} - \sum_{i=1}^n Q_{obs,i}}{\sum_{i=1}^n Q_{obs,i}} \right] \times 100\%$$

式中,  $Q_{obs}$  为实测流量系列 ( $m^3/s$ );  $\bar{Q}_{obs}$  为实测流量系列的均值 ( $m^3/s$ );  $Q_{cal}$  为计算流量系列 ( $m^3/s$ );  $n$  为流量系列的长度。

1980 - 1983 年作为模型的率定期, 土地覆被状况采用 Dorman-Sellers 参数化方案, 目前淮河流域的主要地表覆盖类型较为单一, 以耕地为主。在此土地利用状况的基础上, 用 1984 - 1987 年的实测降雨资料和流域出口断面日径流资料对模型进行验证。表 2 为淮河流域蚌埠水文站逐日径流模拟结果及精度统计。确定性系数分别为 0.854 和 0.791, 径流深相对误差分别为 4.65% 和 -5.33%。率定期与验证期模拟日径流过程与实测过程基本吻合 (图 3), 除了率定期洪峰高水段模拟峰现时间较实测稍有提前外, 低水段模拟与实测洪峰基本一致。总体上, 率定期和验证期模拟流量过程与实测流量过程相比, 无论是径流过程, 还是径流幅度, 模拟结果与实测资料相一致。由此可见, 本研究所构建的耦合模型具有较高的精度, 在淮河流域具有较好的适用性, 能够用于下一步土地覆被变化的水文效应研究。

表 2 淮河流域蚌埠水文站逐日径流模拟结果及精度统计  
Table 2 Results and accuracy statistics of daily stream flow at Bengbu station

项目	$Q_{cal}/mm$	$Q_{obs}/mm$	CE	R/%
率定期	284.0	271.3	0.854	4.65
验证期	259.5	274.1	0.791	-5.33

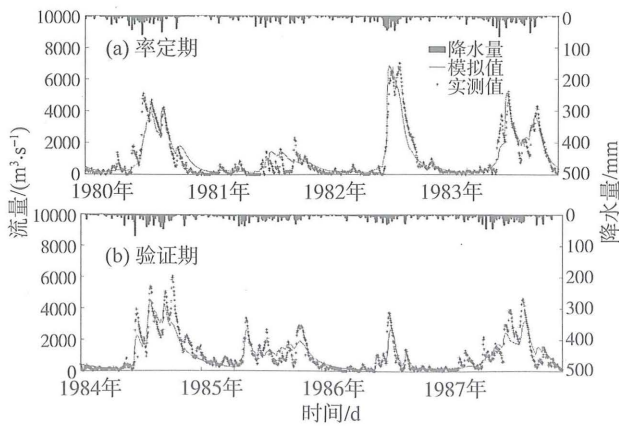


图 3 淮河流域实测与模拟逐日流量过程比较:  
(a) 率定期 (b) 验证期

Fig. 3 Comparison of daily flow between observation and simulation in the Huaihe river basin:  
(a) calibration period (b) validation period

### 3 土地覆被变化的水文效应模拟

通常, 研究土地利用/覆被变化的水文效应需要构建土地利用/覆被变化情景, 本研究采用极端土地利用/覆被法构建淮河流域土地覆被变化情景, 构建的 5 种极端土地覆被情景分别为: S1: 100% 的耕地; S2: 100% 的常绿针叶林; S3: 100% 的常绿阔叶林 S4: 100% 的混合林; S5: 100% 的草地。其中第一种为淮河流域当前土地利用现状。运用构建的耦合模型分析不同覆被情景下的蒸散发、土壤含水量和径流量的变化规律。极端土地覆被情景分析能够排除其他要素的干扰, 有利于确定单一土地利用类型的水文效应。

#### 3.1 对蒸散发的影响

对淮河流域各土地覆被情景下 1980 - 1987 年年蒸散发量进行统计。5 种土地覆被情景下的 8 a 平均年蒸散发量分别为: 639.9、660.6、674.6、643.3 和 629.6 mm。森林类覆被 (常绿针叶林、常绿阔叶林和混合林) 年均蒸散发量较土地覆被现状分别增加了 20.7、35.7 和 3.4 mm; 草地覆被年均蒸散发较土地覆被现状减少了 10.3 mm。常绿阔叶林对增加蒸散发量的作用最为显著, 使年均蒸散发量增加 5.6%; 草地覆被使得淮河流域的年均蒸散发量减少 1.6%。

图 4 为丰、平和枯水年 (1984 - 1986 年) 各土地覆被情景下流域月蒸散发过程。各土地覆被情景下流域总的蒸散发均表现为夏季和初秋大, 其他季节小, 这主要是因为淮河蚌埠以上流域年内降水主要集中在 5 - 10 月, 此时土壤蓄水量较大, 能够为土壤蒸发和植被蒸腾提供足够的水源, 此外同时期的温度较高、太阳辐射强度较大, 并且植被长势较好, 致使植被冠层能够吸收充沛的有效辐射能量。各土地覆被情景下的蒸散发损失差异较明显, 总的表现为森林类覆被 (常绿针叶林、常绿阔叶林和混合林) 的蒸散发量大, 土地覆被现状 (耕地) 居中, 草地覆被最小。这是因为森林类覆被的根系较低矮覆被根系深, 叶面积指数 LAI 也较高, 所以森林类覆被能够汲取更多的土壤水分和吸收更多的冠层净辐射用于蒸腾。枯水年总的蒸散发量较丰水年和平水年低, 森林类覆被情景最为显著。

#### 3.2 对径流的影响

将淮河流域 1980 - 1987 年各土地覆被情景下的日流量系列按从大到小进行排序, 并进行流量频率分析计算, 各情景下日径流频率曲线见图 5。对

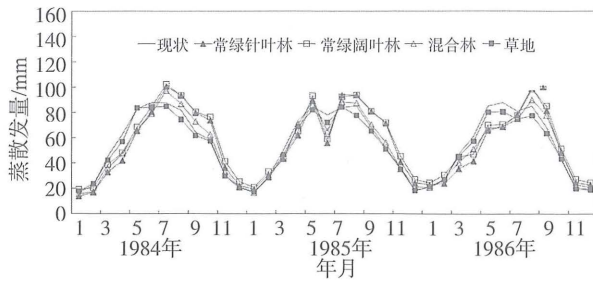


图 4 各覆被情景下逐月蒸散发比较

Fig. 4 Comparison of monthly evapotranspiration processes under different land cover scenarios

于频率为 1% 的日流量，森林类覆被情景（常绿针叶林、常绿阔叶林和混合林）较土地覆被现状情景分别减少了 789.5、880.4 和 589  $m^3/s$ ，即分别减少 14.4%、16.1% 和 10.9%；对于频率为 10% 的日流量，森林类覆被情景（常绿针叶林、常绿阔叶林和混合林）较土地覆被现状情景分别减少了 417.5、459.8 和 294.8  $m^3/s$ ，即分别减少 16.1%、17.7% 和 11.4%。

土地覆被情景的变化对流域日径流的影响依赖于各土地覆被类型的土壤蓄水量，由于森林类覆被的根系深度往往大于草地覆被和耕地覆被的根系深度，因此森林覆被的土壤自由水蓄水量通常大于草地覆被和耕地覆被。一般，土壤自由蓄水量越大，则地表径流越少，壤中流和地下径流越多，所以雨季森林覆被的地表径流占径流总量的比例大多比草地覆被和耕地覆被低，从而表现为暴雨期间草地覆被的洪峰流量一般高于森林覆被。在枯水期，土地覆被变化对淮河流域的日流量影响不明显。因为枯水季节降水较少，土壤缺水，各土地覆被的蒸散发均受土壤供水量限制，蒸散发量的差异较小。

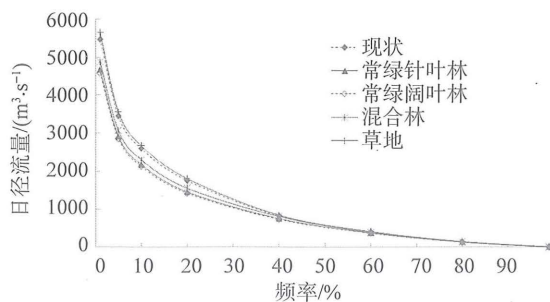


图 5 各土地覆被情景下日径流量频率曲线比较

Fig. 5 Frequency curves of daily stream flow under different land cover scenarios

图 6 为淮河流域各土地覆被情景下 1980 -

1987 年 8 a 年均日径流过程比较。各情景下平均日径流深分别为 259.4、230.4、216.2、246.6 和 277.4 mm。其中，由于森林类覆被的蒸散发损失较大，森林类覆被（常绿针叶林、常绿阔叶林和混合林）的年均径流深较土地覆被现状分别减少 29、43.2 和 12.8 mm，即分别减少了 11.2%、16.7% 和 4.9%；草地覆被情景的年均径流深较土地覆被现状情景增加了 18 mm，即增加了 6.9%。由此，如在淮河蚌埠以上流域植树造林将使年径流量减少，减少洪涝灾害的发生；如将土地覆被情景转化为草地覆被将增大径流量，加大洪涝灾害的发生。

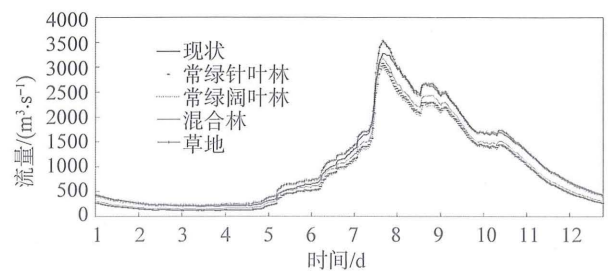


图 6 各土地覆被情景下逐日流量过程比较

Fig. 6 Comparison of daily flow under different land cover scenarios

为了更好的研究土地覆被变化对径流量的影响，模型对淮河蚌埠以上区域的日径流空间分布进行了模拟，见图 7。从图 7 可以看出，1984 年各土地覆被情景的日径流量明显大于 1986 年，原因是 1984 年作为丰水年降水量较多，而 1986 年降水量较少，是枯水年；各土地覆被情景下的日径流量均表现为上游小，中下游大，且丰水年与枯水年相一致。

在丰水期，草地覆被情景下的日径流空间分布与土地覆被现状相近；各土地覆被情景下的日径流空间分布在流域中上游差异性较小，径流量大部分在 400  $m^3/s$  以下，而在流域下游，森林类覆被情景下日径流空间分布与土地覆被现状差异性较大，其日径流明显小于现状覆被，尤其是常绿阔叶林覆被情景下流域大部分栅格日径流在 900  $m^3/s$  以下，而土地覆被现状情景下的日径流量在 1 000  $m^3/s$  以上。

与丰水年相比，枯水年各土地覆被情景下的日径流均较小，且其空间分布存在较大的差异性；其中，草地覆被情景下日径流的空间分布与土地覆被现状情景相近，流域中上游径流量在 0 ~ 200  $m^3/s$  之间，下游径流量在 500 ~ 700  $m^3/s$  之间；森林类覆被情景下日径流较土地覆被现状情景小，中上游径流量几乎为 0，下游径流量在 500  $m^3/s$  以下。

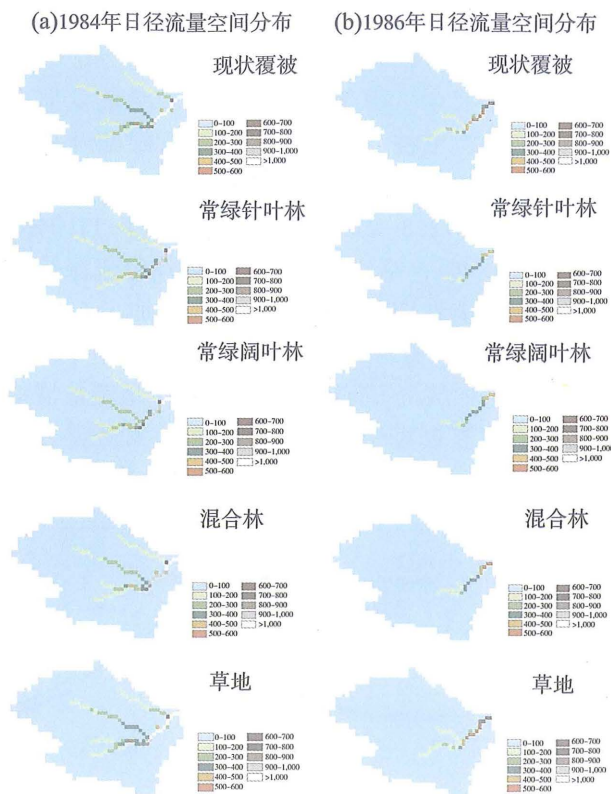


图7 各土地覆被情景下日径流量空间分布比较

Fig. 7 Special distribution of daily stream flow under different land cover scenarios

### 3.3 对土壤含水量的影响

各土地覆被情景下丰水年和枯水年逐日土壤含水量的模拟结果如图8所示。模拟计算的土壤含水量为淮河流域地表以下5 cm处的土壤含水量。

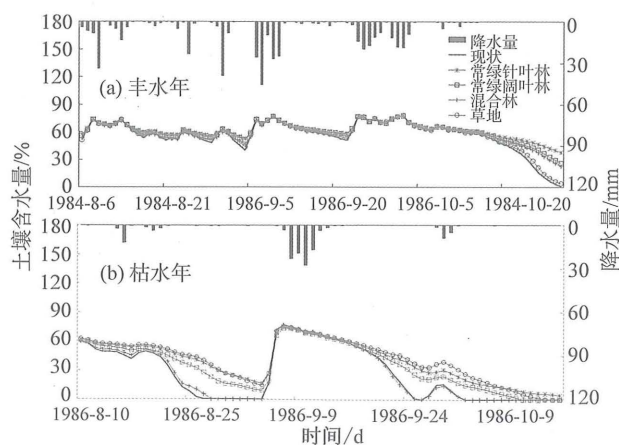


图8 各土地覆被情景下丰水年和枯水年逐日土壤含水量比较

Fig. 8 Comparison of daily soil moisture processes under different land cover scenarios: (a) wet year; (b) dry year

从图上可以看出, 降水量直接影响各土地覆被

情景下的土壤含水量, 具体表现为: ① 丰水年各土地覆被情景下的土壤含水量高于枯水年, 且丰水年土壤含水量较长时间处于饱和状态; ② 丰水期各土地覆被情景的土壤含水量较高, 降水过后则逐渐降低, 其变化过程与降水过程保持一致; ③ 丰水期各土地覆被情景下的土壤含水量差异性较小; 枯水期草地覆被土壤含水量变化与土地覆被现状相近, 变化均较剧烈, 其原因为: 一方面草地和耕地覆被对降水的截留能力较差, 一旦降水发生, 浅表层土壤含水量迅速增加; 另一方面, 草地和耕地覆被的土壤蓄水能力较弱, 降水过后, 由于蒸散发等损失, 浅表层土壤含水量将迅速减少。

## 4 结论

本研究以淮河流域为研究对象, 选择具有物理基础的流域分布式水文模型(HMS), 并结合GIS空间分析技术, 构建分布式陆面-水文耦合模型(LSX-HMS), 探讨淮河流域土地覆被变化的水文效应。研究主要得到以下结论:

1) 利用1980-1987年实测水文资料对LSX-HMS耦合模型进行参数率定和模型验证, 确定性系数达0.791~0.854, 计算流量过程与实测流量过程吻合较好, 无论是径流过程, 还是径流幅度, 模拟结果与实测资料相一致。由此可见, LSX-HMS在淮河流域具有很高的精度和准确性, 能够进一步研究土地覆被变化的水文效应。

2) 采用极端土地利用/覆被法构建5种极端土地覆被情景, 应用构建的LSX-HMS模型分析了变化情景下流域径流、蒸散发和土壤含水量的变化规律。模拟结果表明: 常绿阔叶林覆被情景对蒸散发量和径流量的影响较为显著, 年均蒸散发量增加5.6%, 年均径流深减少16.7%; 草地覆被情景对增加径流量作用显著, 年均径流深增加6.9%。在枯水年, 草地覆被情景下的土壤含水量变化较为剧烈。

3) 在空间分布上, 各土地覆被情景的日径流量均表现为上游较小, 中下游较大, 且丰水年与枯水年相一致; 土地覆被变化对流域下游雨季径流量空间分布影响较大, 对于流域中上游的雨季径流量的空间分布影响较小; 而枯水季节, 流域中上游各土地覆被情景下的日径流量空间分布存在较大的差异性。

本文的研究成果为淮河流域变化环境下的水文过程演变规律及水土资源合理开发利用、调配和管理提供科学依据。但本次研究工作还是存在一些不

足,有待在今后的工作中进一步研究和完善,例如完善模型结构;选择更加有效的土地覆被情景构建方法;如何构建更加合理的土地覆被变化情景。

#### 参考文献:

- [1] 左其亭,王中根. 现代水文学[M]. 郑州:黄河水利出版社,2002.
- [2] 万荣荣,杨桂山. 流域土地利用/覆被变化的水文效应及洪水响应[J]. 湖泊科学,2004,16(3):258-264.
- [3] VOROSMARTY C J, GREEN P, SALISBURY J, et al. Vulnerability from climate change and population growth Science[J]. Global water resources, 2000, 289: 284-288.
- [4] 姚琴,雷玉平,李红军,等. 气候与土地覆被变化下的水文响应模拟——以太行上八一水库流域为例[J]. 节水灌溉,2008(3):19-23.
- [5] 姚允龙,吕宪国,王蕾,等. 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.
- [6] 袁飞. 考虑植被影响的水文过程模拟研究[D]. 南京:河海大学,2006.
- [7] 马杏,李建初,董秀莹,等. 西庄流域土地覆被变化及其水文响应模拟研究[J]. 2008,28(4):70-76.
- [8] HUNDECHA Y, BARDOSSY A. Modeling of the effect of land use changes on the runoff generation of a river basin through parameter regionalization of a watershed model, Journal of Hydrology, 2004, 292: 281-295.
- [9] YANG Chuanguo, YU Zhongbo, HAO Zhenchun, et al. Evaluation of hydrological responses to land use change at large scale[C]//International Conference on Environmental Science and Information Application Technology, 2009: 336-337.
- [10] DORMAN J L, SELLERS P J. A global climatology of albedo, roughness length and stomatal resistance for atmospheric general circulation models as represented by the Simple Biosphere Model (SiB) [J]. J Appl Meteorol, 1989, 28: 833-855.
- [11] COSBY B J, HORNBERGER G M, CLAPP R, et al. A statistical exploration of the relationships of soil moisture characteristics to the physical properties of soils [J]. Water Resour Res, 1984, 20: 682-690.
- [12] YU Z, SCHWARTZ F W. Application of integrated Basin-Scale Hydrologic Model to simulate surface water and ground-water interactions in Big Darby Creek Watershed, Ohio [J]. Journal of American Water Resources Association, 1998, 34(2): 409-425.
- [13] POLLARD D, THOMPSON S L. Use of a land-surface-transfer scheme (LSX) in a global climate model (GENESIS): The response to doubling stomatal resistance [J]. Global and Planetary Change (MECCA special issue), 1995, 10: 129-161.
- [14] 杨传国. 区域陆面-水文耦合模拟研究与应用[D]. 南京:河海大学,2009.
- [15] 鞠琴. 长江流域气候变化及水循环影响研究[D]. 南京:河海大学博士论文,2009.
- [16] 刘德东. 古气候水文模拟理论研究——以长江流域为例[D]. 南京:河海大学,2009.
- [17] YU Z, GUO Y, VOORTMAN J, et al. Streamflow simulation using Geographical Information System with a distributed approach [J]. Journal of American Water Resources Association, 2001, 37: 957-971.
- [18] 杨传国,余钟波,林朝晖,等. 大尺度分布式水文模型数字流域提取方法研究[J]. 地理科学进展, 2007, 26(1): 68-76.