

基于 SWAT 模型的诺敏河流域径流对土地利用/覆被变化的响应模拟研究

史晓亮¹, 李颖², 杨志勇³

(1. 西安科技大学 测绘科学与技术学院, 陕西 西安 710054; 2. 中国科学院 东北地理与农业生态研究所, 吉林 长春 130102; 3. 中国水利水电科学研究院 水资源研究所, 北京 100038)

摘要: 土地利用/覆被变化直接反映了人类活动的影响程度,对于流域水文循环过程影响显著。本文以诺敏河流域为研究区,基于 1976 和 2000 年两期土地利用数据,结合 SWAT 模型定量评价了径流对土地利用/覆被变化的响应。研究表明:SWAT 模型可以较好地模拟诺敏河流域的月径流变化过程,在研究区具有一定的适用性;相对于 1976 年的土地利用条件,2000 年土地利用变化主要表现为林地和草地面积减小,耕地面积增加。1976-2000 年间诺敏河流域土地利用变化导致年均地表径流增加了 17.78%,且空间差异显著,尤其是下游的莫力达瓦达斡尔族自治旗和阿荣旗等地地表径流增加趋势更为明显,增加幅度超过 20 mm。模拟研究对于诺敏河流域合理规划土地利用格局具有重要意义。

关键词: 土地利用/覆被变化; 水文响应; SWAT 模型; 诺敏河流域

中图分类号: S157.2

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2016)01-0065-05

Response of runoff on land use/cover change in Nuomin river basin based on SWAT model

SHI Xiaoliang¹, LI Ying², YANG Zhiyong³

(1. College of Geomatics, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China;

2. Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130102, China;

3. Department of Water Resources, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

Abstract: The land use/cover change (LUCC) directly represents the influence degree of human activities, and has quite significant effect on the watershed hydrological cycle. Taking Nuomin River Basin as the study area, the paper quantitatively evaluated the response of runoff on land use/cover change by applying the land use data in 1976 and 2000 and combining with the distributed hydrological model, Soil and Water Assessment Tool (SWAT). The results showed that SWAT model is able to better simulate the monthly flows and has certain applicability in the Nuomin river basin; the land use/cover changes mainly showed the decrease of forestry and grassland, and the increase of farmland in 2000 compared with that in 1976, which led to the increase of 17.78% of average annual surface runoff, which also brought the significant spatial variatio, especially in the downstream of basin including Moridawa Daghur Autonomous Banner and Arong Banne, the increase volume is over 20mm. The study has practical significance for the reasonable plan of land use pattern in Nuomin river basin.

Key words: land use/cover change; hydrological response; SWAT model; Nuomin river basin

土地利用/覆被变化(LUCC)对流域水文循环过程影响显著^[1],进而对生态环境、社会经济可持

续发展等方面产生重要影响。因此,研究水文过程对土地利用/覆被变化的响应,对于揭示区域水循环

收稿日期:2015-08-14; 修回日期:2015-10-10

基金项目:国家自然科学基金项目(51409204);陕西省教育厅科学研究计划项目(15JK1473);西安科技大学博士启动基金项目(2014QDJ039)

作者简介:史晓亮(1985-),男,陕西宝鸡人,博士,讲师,主要从事遥感与地理信息系统在水文学中的应用研究。

通讯作者:李颖(1964-),男,吉林辽源人,博士,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。

规律等具有重要意义^[2],并已成为全球生态与环境研究的热点问题^[3]。

流域水文过程对土地利用/覆被变化的响应研究以往主要采用试验流域或水文特征参数时间序列法,但是这两种方法均存在明显的局限性^[4-5]。1970s以来,LUCC的水文响应研究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^[6],尤其是具有物理基础,且能够考虑下垫面和降水等因子空间异质性的分布式水文模型,已成为目前研究土地利用/覆被变化水文响应的重要方法^[7-8]。

SWAT(Soil and Water Assessment Tool)是由美国农业部农业研究服务中心(USDA-ARS)于1990s开发的具有一定物理基础的分布式水文模型^[9],目前已被国内外学者广泛应用于流域水文过程模拟,以及水文过程对土地利用/覆被变化的响应研究^[10]。Cao Wenzhi等^[11]认为相对于新西兰 Motueka 河流域土地利用覆盖现状,最大松树覆盖情况下,基于 SWAT 模型模拟的产水量和基流将会有所减少。李佳等^[12]基于 SWAT 模型模拟了长江源流域土地利用/覆被变化对径流的影响后认为,林地和草地面积增加,将会导致径流减少,而沙地和裸地面积增加则会使径流增加。依热下提·卡米力等^[13]分析了潘家口水库流域土地利用变化对流域径流过程的影响后认为,耕地减少、林地和草地面积增加将导致多年平均径流减少11%。一般研究认为森林植被的存在,植被盖度的增加会减少径流量,但是郝芳华等^[14]在洛河上游卢氏水文站以上流域的模拟表明森林的存在会导致径流量的增加。由此可见,由于区域气候特征、地理位置,以及研究方法等多种因素的综合影响,特定流域上 LUCC 的水文过程响应结论难以取得一致^[10],因此有必要开展大量典型区域的实例研究。

大兴安岭是我国东北和华北地区生态安全的天然屏障,但是由于人类大规模的开发活动,导致该地区森林蓄积量锐减,从而影响到该地区的生态环境安全。因此,有必要在大兴安岭地区分析研究水文过程与土地利用/覆被变化的响应关系,但是目前该地区相关研究不多。本文以嫩江上游诺敏河流域为研究对象,基于 SWAT 分布式水文模型研究诺敏河流域径流对土地利用/覆被变化的响应特征,旨在为流域水土资源的合理开发利用,以及全球变化条件下典型区域的水循环研究提供科学参考。

1 研究区概况

诺敏河发源于大兴安岭支脉伊勒呼里山南麓,

在内蒙古自治区呼伦贝尔市莫力达瓦达斡尔族自治县尼尔基镇附近注入嫩江。诺敏河全长 467 km,流域面积 26 315 km²,主要支流有毕拉河和格尼河。在距离河口 42 km 处设有古城子水文站,断面以上河长 398 km,集水面积 25 230 km²,是本文的主要研究区域(图 1)。

诺敏河流域地处中高纬度,欧亚大陆东岸,属寒温带大陆性气候,多年平均气温 - 1.2℃,春季干旱多风,夏季炎热多雨,冬季寒冷漫长。受大陆性季风影响,流域内降水量年际、年内变化较大,降水年内分配极不均匀,雨季多集中在 7-8 月。流域多年平均径流量约 457 亿 m³,平均流量 145 m³/s^[15]。

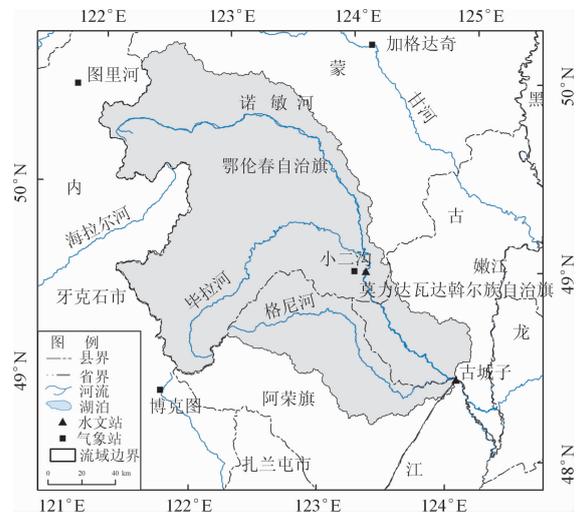


图 1 研究区位置与气象水文站点分布图

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源与处理

构建 SWAT 模型所需的气象数据采用流域内及周边的图里河、小二沟、博克图、加格达奇 4 个气象站 1968-2010 年的逐日降水、相对湿度、最高和最低气温、日照时数和平均风速(图 1),以上数据来源于中国气象科学数据共享服务网(<http://cdc.nmic.cn>)。由于研究区内各气象站点均无逐日太阳辐射观测数据,因此本研究基于站点位置和日照时数的模拟方法,估算得到了 1968-2010 年各气象站点的逐日太阳辐射值^[16]。水文数据选取诺敏河干流上的小二沟和古城子 2 个水文站 1968-2000 年的径流数据用于对模型进行率定和验证(图 2)。

模型构建所用的 DEM(Digital Elevation Model)为 SRTM(Shuttle Radar Topography Mission)数据,空间分辨率为 90m,数据来源于中国科学院计算机网络信息中心地理空间数据云(<http://www.gscloud.net>)。

cn)。土地利用数据采用的是 1976 和 2000 年的 1:10 万数据,来源于中国科学院东北地理与农业生态研究所,数据精度达到 90% 以上^[15]。土壤类型空间分布数据根据 1:100 万土壤图矢量化获得,并通过查阅内蒙古土种志^[17],结合 SPAW 软件计算等方法获取相关土壤物理属性参数^[18]。

2.2 模型模拟与检验

基于 SWAT 模型的流域划分功能,最小集水面积阈值取 300 km²,将诺敏河流域划分为 40 个子流域。水文响应单元(HRU)的生成采用优势土地利用/土壤类型的方法,土地利用和土壤阈值均设置为 10%,在率定期和验证期分别生成 204 和 197 个 HRU。径流模拟采用 SCS 径流曲线数法,蒸散发计算采用 Penman - Monteith 公式,河道演算采用“Variable Storage”法。

根据 1968 - 2000 年的水文气象数据对模型进行率定和验证,其中 1968 - 1970 年作为模型的预热期,选取 1971 - 1990 年小二沟和古城子水文站月径流数据对模型进行参数率定(1976 年土地利用数据);利用率定后的参数,应用 1991 - 2000 年水文气象数据对模型进行验证(2000 年土地利用数据)。采用相关系数 (R^2)、Nash - Sutcliffe 效率系数 (E_{ns}) 和相对误差 (R_e) 3 个指标作为衡量模型效率的标准。一般认为, R^2 越高, E_{ns} 越大, $|R_e|$ 越小,表明模拟效果越好。当 $R^2 > 0.6$, $E_{ns} > 0.5$, $|R_e| < 15\%$, 三者率在率定和验证期均符合上述要求后,可认为模型在研究区适用^[19-21]。

3 结果与分析

3.1 SWAT 模型月径流模拟精度评价

各水文站月径流模拟的评价结果如表 1 所示。在率定期,小二沟和古城子水文站 R^2 和 E_{ns} 均大于 0.7,模型对月径流变化趋势的模拟效果较好。月径流模拟值略大于实测值,但相对误差较小,满足模拟精度要求。在验证期, R^2 和 E_{ns} 提高到 0.8 以上,月径流拟合结果较好。尽管各水文站模拟值均小于实测值,相对误差 R_e 为负值,但 $|R_e|$ 没有超过 15%。从图 2 古城子水文站月径流模拟值和实测值对比结果来看,经过校验的 SWAT 模型可以较好地模拟诺敏河流域的月径流变化趋势,能够应用于研究区径流对土地利用/覆被变化的响应模拟。

3.2 1976 - 2000 年间诺敏河流域土地利用时空变化

诺敏河流域主要的土地利用类型为林地、草地、

耕地和未利用地中的沼泽地(表 2),其中林地是诺敏河流域的主导景观,在 1976 和 2000 年林地占整个流域总面积的比例分别达到了 73.5% 和 67.0%。但是 1976 - 2000 年间,随着人类活动影响的不断加剧,林地和草地面积大幅度减少,分别减少了 1634.2 和 348.36 km²。而在地势平坦、交通相对便利的下游地区,大范围适宜开垦的林草地和沼泽地被开垦为耕地,因此耕地占总面积的比例从 3.17% 增加到 10.94%,面积净增加了 1 959.87 km²。

表 1 SWAT 模型月径流模拟结果评价

水文站	率定期(1971 - 1990)			验证期(1991 - 2000)		
	R^2	E_{ns}	R_e	R^2	E_{ns}	R_e
小二沟	0.77	0.72	5.75	0.85	0.85	-4.79
古城子	0.81	0.77	2.58	0.87	0.85	-10.74

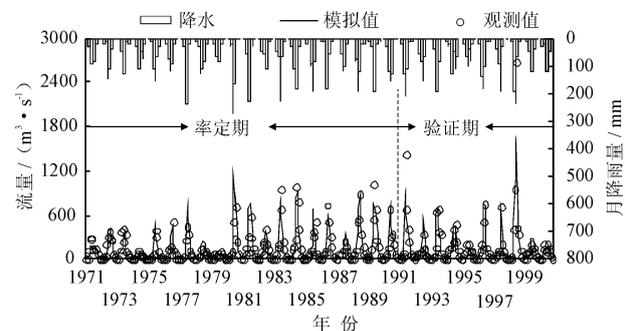


图 2 古城子水文站月径流模拟值和实测值对比

从表 2 可以看出,自 1976 年以来,诺敏河流域土地利用的显著变化过程主要表现在林地、草地和耕地的相互转化上。显著增加的耕地主要来源于林地,约 1 356.07 km² 的林地转变为耕地,另有 593.04 km² 的草地被开垦为耕地。此外,279.6 km² 的林地砍伐后恢复为草地,但是由于草地被开垦为耕地,或者转变为其他类型的面积较大,因此草地面积整体减少。

本文进一步以平均斑块面积为评价指标,在子流域尺度上分析了诺敏河流域景观格局破碎化程度的空间分布特征(图 3)。从图 3 中可以看出,随着流域中上游地区大面积林草地的开垦和退化过程的不断加剧,流域大部分地区平均斑块面积均表现出不同程度的减小趋势,反映出该地区土地利用破碎化特征明显。尤其在流域中游的内蒙古自治区牙克石市的西北地区,以及上游的鄂伦春自治旗的西南部等地景观格局破碎化趋势尤为明显。而上游鄂伦春自治旗的部分地区、中游阿荣旗的北部,以及下游莫力达瓦达斡尔自治旗的南部等地平均斑块面积略有增加,土地利用状况有所改善。

表2 1976-2000年间诺敏河流域土地利用类型转移矩阵

km²

土地利用类型	2000年						
	耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地	总计
耕地	748.76	6.07	7.80	0.00	19.42	18.91	800.96
林地	1365.07	16854.55	279.60	0.89	1.69	47.22	18549.02
草地	593.04	4.95	608.40	0.65	20.56	60.90	1288.50
水域	0.03	0.09	0.02	98.97	0.00	0.73	99.84
建设用地	1.25	0.00	0.08	0.00	36.63	1.35	39.31
未利用地	52.68	49.16	44.24	0.11	0.84	4305.75	4452.78
总计	2760.83	16914.82	940.14	100.62	79.14	4434.86	25230.41
净变化	1959.87	-1634.20	-348.36	0.78	39.83	-17.92	

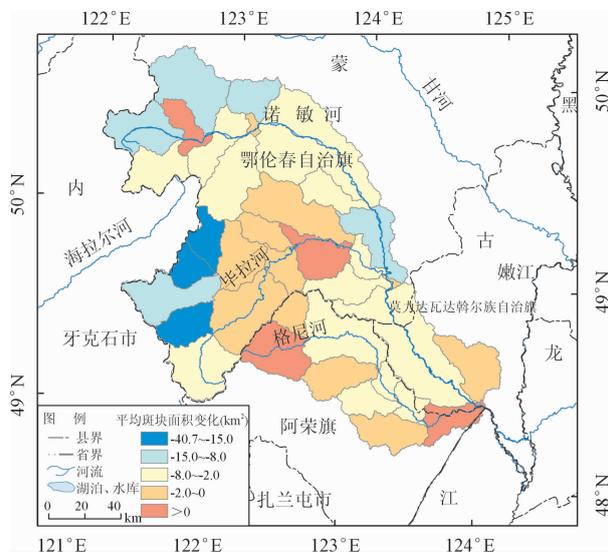


图3 诺敏河流域景观破碎化程度变化空间分布

3.3 诺敏河流域径流对土地利用/覆被变化的响应

利用已经过校验的 SWAT 模型,以及 1976 和 2000 年两期土地利用数据,分别模拟诺敏河流域 1971-2010 年的水文过程,得到两期土地利用条件下的主要水文过程分量,进而分析流域径流对土地利用/覆被变化的响应特征。

相对于林草地,耕地的下层土壤相对紧实,入渗率较低,从而增加了土壤保水性,使得降水在土壤剖面能够更快的饱和^[10]。此外,相对于耕地,林地通过冠层截留部分降水,使得地表径流显著较少^[22]。因此,相对于 1976 年土地利用状况,2000 年土地利用输入条件下流域年均地表径流增加了 17.78%。同时林草地具有涵养水源的作用,以及建设用地不透水层的影响,因此,以林草地减少,耕地和建设用地增加的土地利用变化过程导致壤中流和地下径流分别降低 6.45% 和 6.31%,从而使得流域总径流量

略有减小。

3.4 诺敏河流域年均地表径流变化的空间分布特征

本文以子流域为分析单元,分别计算了 1976 和 2000 年两期土地利用实际状况下 1971-2010 年的年均地表径流,得到研究区两期土地利用实际状况下年均地表径流变化的空间分布,进一步从空间尺度上分析诺敏河流域径流对土地利用/覆被变化的响应(图 4)。

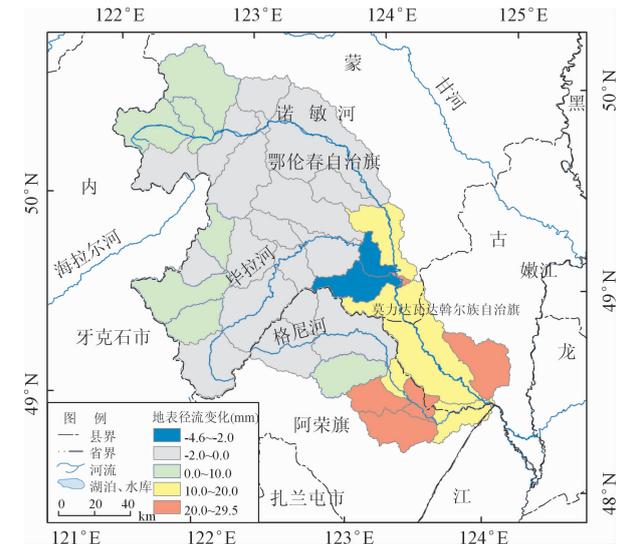


图4 诺敏河流域年均地表径流变化空间分布

从图 4 可以看出,诺敏河流域土地利用/覆被变化过程导致年均地表径流变化空间差异显著。其中流域中上游的鄂伦春自治旗、牙克石市,以及阿荣旗北部等地的年均地表径流有所下降。尽管地表径流减小地区占流域总面积的比例达到 57.9%,但减小幅度均小于 4.6 mm,变化并不显著。而除此之外的流域其它地区,林草地向耕地的转变使得年均地表径流均有所增加。尤其是流域下游的莫力达瓦达斡

尔族自治旗,以及阿荣旗东部等地区,由于土地利用开发活动速度较快,导致该地区地表径流增加更为显著,增加幅度甚至超过 20 mm,从而增加了流域发生洪灾的风险。

4 结论与讨论

本文利用诺敏河流域 1976 和 2000 年土地利用现状数据,应用 SWAT 分布式水文模型进行了径流对土地利用/覆被变化的响应模拟,在对模拟结果分析的基础上得到以下结论:

(1) 基于 SWAT 模型的诺敏河流域径流模拟结果达到了模拟精度的要求,表明应用 SWAT 模型进行诺敏河流域的径流模拟是可行的,适用于研究区径流对土地利用/覆被变化的响应研究。

(2) 诺敏河流域主要的土地利用类型为林地、草地和耕地。但是 1976-2000 年间,由于人类开发活动的不断加剧,流域林草地面积急剧减少,而耕地增加显著,从而导致流域年均地表径流增加了 17.78%。

(3) 诺敏河流域年均地表径流变化空间差异显著,尤其是流域下游的莫力达瓦达斡尔族自治旗,以及阿荣旗东部等地区,地表径流增加更为显著,增加幅度超过 20 mm。

参考文献:

- [1] 徐静,任立良,刘晓帆,等. 老哈河流域土地覆被变化水文响应模拟研究[J]. 资源科学, 2011, 33(6): 1099 - 1105.
- [2] Foley J A, Defries R, Asner G P, et al. Global consequences of land use [J]. Science, 2005, 309(5734): 570 - 574.
- [3] Defries R, Eshleman K N. Land-use change and hydrologic process: a major focus for the future [J]. Hydrological Process, 2004, 18(11): 2183 - 2186.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] Wang Sufen, Kang Shaozhong, Zhang Lu, et al. Modelling hydrological response to different land - use and climate change scenarios in the Zamu River basin of northwest Chi-

- na [J]. Hydrological Processes, 2008, 22(14): 2502 - 2510.
- [9] Arnold J G, Srinivasan R, Muttiah R S, et al. Large area hydrologic modeling and assessment (part I): model development [J]. Journal of American Water Resources Association, 1998, 34(1): 73 - 89.
- [10] Githui F, Mutua F, Bauwens S 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.
- [11] Cao Wenzhi, Bowden W B, Davie T, et al. Modelling 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.
- [12] 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.
- [13] 依热下提·卡米力,李建柱,冯平. 潘家口水库流域土地利用变化的水文响应分析[J]. 水资源与水工程学报, 2015, 26(1): 47 - 51.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 童成立,张文菊,汤阳,等. 逐日太阳辐射的模拟计算[J]. 中国农业气象, 2005, 26(3): 165 - 169.
- [17] 赵俊寿. 中国内蒙古土种志[M]. 北京: 中国农业出版社, 1994.
- [18] 史晓亮,杨志勇,严登华,等. 滦河流域土地利用/覆被变化的水文响应研究[J]. 水科学进展, 2014, 25(1): 21 - 27.
- [19] 庞靖鹏,刘昌明,徐宗学. 密云水库流域土地利用变化对产流和产沙的影响[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2010, 46(3): 290 - 299.
- [20] Vitré M, Jauneau A, Knox J P, et al. 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.
- [21] 张利平,曾思栋,王任超,等. 气候变化对滦河流域水文循环的影响及模拟[J]. 资源科学, 2011, 33(5): 966 - 974.
- [22] Weber A, Fohrer N, Moller D. Long-term land use changes in a mesoscale watershed due to socio - economic factors-effects on landscape structures and functions [J]. Ecological Modelling, 2001, 140(1-2): 125 - 140.