

诺敏河流域土地利用与覆被变化及其 对水文过程的影响

史晓亮^{1,2}, 李颖¹, 赵凯¹, 章光新¹, 张丹³, 朱红雷^{1,2}

(1. 中国科学院 东北地理与农业生态研究所, 吉林 长春 130012;

2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 黑龙江省齐齐哈尔水文局, 黑龙江 齐齐哈尔 161005)

摘要: 流域土地利用/覆被变化及其水文效应是当前全球变化研究的重要内容。为正确认识大兴安岭森林采伐对水文过程的影响,以诺敏河流域为例,在遥感和地理信息系统技术支持下,结合地形图和卫星遥感影像数据,获取 1954—2005 年诺敏河流域 5 期土地利用/覆被数据,在 GIS 空间分析模块下分析诺敏河流域土地利用/覆被变化过程,并探讨土地利用/覆被变化对水文过程的影响。结果表明,近 50 a 诺敏河流域土地利用方式发生了明显变化,林地和草地分别减少 1 940.1 km² 和 748.99 km²,与林草地的大面积减少相对应,耕地面积增加 2 741.7 km²。自 1998 年实施大兴安岭天然林保护工程以后,林地采伐和耕地开垦速率明显降低;土地利用/覆被变化影响年径流量,林地大规模减少、耕地明显增加的后期土地利用较前期径流量有所增加,且随着降雨的增多,土地利用变化对径流的影响效应随之增强。同一降雨条件下土地利用/覆被变化对径流的影响在生长季具有明显差异。

关键词: 诺敏河流域; 遥感; 土地利用/覆被; 水文过程

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2013)01-0023-06

中图分类号: F301.24

Land Use/Cover Change and Its Effects on Hydrologic Processes in Nuomin River Basin

SHI Xiao-liang^{1,2}, LI Ying¹, ZHAO Kai¹, ZHANG Guang-xin¹, ZHANG Dan³, ZHU Hong-lei^{1,2}

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

Changchun, Jilin 130012, China; 2. University of the Chinese Academy of Sciences,

Beijing 100049, China; 3. Hydrology Bureau of Qiqihaer, Qiqihaer, Heilongjiang 161005, China)

Abstract: Land use/cover change and its effects on hydrologic processes are becoming an important aspect of global change research. In order to understand the effects of deforestation on hydrologic processes in the Daxing'anling area, a five-stage land use/cover data base in the Nuomin River basin since 1954 was established based on remote sensing imagery data and topographic map. With GIS spatial analysis tools, the paper analyzed the land use/cover change characteristics and its effects on hydrologic process. Results indicated that land use changed prominently in the Nuomin River basin during the past five decades. Forest and grassland decreased by 1 940.10 and 748.99 km², respectively, and in contrast, cropland increased by 2 741.7 km². Since the nature forest protection project came into force in the Daxing'anling area in 1998, woodland reduction and farmland reclamation have showed a declined trend. Land use/cover change had effects on annual runoff and runoff increased during the late land use period with decreased forest and more cropland, and the impact of land use/cover change on runoff was strengthened in response to increased rainfall. Besides, the effects of land use/cover change on runoff production were characterized by seasonal fluctuation.

Keywords: Nuomin River basin; remote sensing; land use/cover; hydrologic process

收稿日期: 2011-11-28

修回日期: 2012-04-01

资助项目: 中国科学院知识创新工程重大项目“东北半湿润区农田防护林生态环境效应遥感监测与评价”(KZCX1-YW-08-02-01)

作者简介: 史晓亮(1985—), 男(汉族), 陕西省宝鸡市人, 博士研究生, 主要从事遥感与地理信息系统应用研究。E-mail: shixiaoliang@neigae.ac.cn。

通信作者: 李颖(1964—), 男(满族), 吉林省辽源市人, 博士, 研究员, 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。

人类对地球陆地表面的改变影响着任一尺度下的生物系统,从区域尺度的城市热岛效应和径流模式的改变,到全球尺度的大气环流模式的改变以及长期的物种灭绝^[1]。土地利用/覆被变化则最直接体现和反映了人类活动的影响水平,因此,土地利用/覆被变化是自然和人为过程交叉最为密切的问题^[2],也是当前全球环境变化研究领域倍受关注的核心问题之一^[3-4]。

在流域尺度上,由人类土地利用方式的改变而产生的土地覆被变化,深刻地改变了地表的性质,如粗糙度、反射率,影响了水热通量的其他物理性质,也必将在各种尺度上影响冠层截留、入渗、地表径流等水文过程^[5],改变水循环的空间格局,加速水循环要素时空分异的复杂性和不确定性,最终导致水资源供需关系发生变化,从而对流域生态、环境以及社会经济发展等产生显著影响。因此,流域土地利用变化及其对水文过程的影响研究就成为广泛涉及流域水资源规划管理以及可持续发展等领域的核心问题。

近年来,有关流域土地利用/覆被变化对水文过程影响的研究结果出现了不同甚至截然相反的观点。多数研究认为流域森林的减少将导致径流量的增加^[6-8],但也有研究得出相反的结论。郝芳华等^[9]对黄河下游支流洛河上游卢氏水文站以上流域的模拟结果表明,森林的存在增加了径流量;王根绪等^[10]在河西走廊中部的马营河流域的研究表明,自 1967 年以来,上游林草地大规模转化为耕地,使流域年均径流量减少 28.12%。由此可见,随着流域尺度的扩展,特定流域上土地利用/覆被变化的水文响应研究更为复杂,其结论难以取得一致^[11],某一自然条件和不同尺度上得出的结论不能简单的外推^[12]。因此,需要开展大量典型区域的实例研究,寻求建立土地利用/覆被变化对流域水文过程影响的一般性理论体系^[10]。

大兴安岭是中国最重要的林业基地之一,也是东北和华北地区生态安全的天然屏障。新中国成立以来,经过几十年的大规模采伐和开发,大兴安岭地区森林蓄积量锐减,进而影响到该地区的生态环境安全和可持续发展,尤其是在 1998 年嫩江流域出现历史上罕见的特大洪灾之后,森林的水文效应更是受到广泛重视,因此,迫切需要研究大兴安岭地区水文过程与土地利用/覆被变化的关系。目前该地区相关研究不多,本文以嫩江上游诺敏河流域为例,在研究诺敏河流域近 50 a 土地利用/覆被时空变化特征的基础上,分析土地利用变化对水文过程的影响,以期为该区土地利用规划管理和生态恢复提供依据。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

诺敏河位于大兴安岭中段东坡,是嫩江右岸 7 条 1 级支流之一,发源于大兴安岭支脉伊勒呼里山南麓,河长 467 km,在内蒙古呼伦贝尔市莫力达瓦达斡尔族自治旗尼尔基镇附近分两支岔注入嫩江^[13]。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,冬季寒冷漫长,春季干旱多风,夏季炎热多雨,秋季较短。多年平均气温 -1.2°C 左右,无霜期 132 d,历年最高气温 40.1°C ,最低气温 -35.4°C 。流域内降雨量年际、年内变化较大,降雨年内分配极不均匀,雨季多集中在 7—8 月,多年平均降雨量约 480 mm。主要土壤类型为黑土、针叶林土、暗棕壤、腐殖质沼泽土。

流域面积 $26\,315\text{ km}^2$,多年平均径流量约 $4.57\times 10^9\text{ m}^3$,多年平均流量 $145\text{ m}^3/\text{s}$,主要支流有毕拉河和格尼河。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 $25\,230\text{ km}^2$,是本文研究的主要区域。

1.2 研究方法

1.2.1 土地利用数据获取方法 诺敏河流域土地利用/覆被数据集时间跨度为 1954—2005 年,包括 5 个时间点,即 1954,1976,1986,2000 和 2005 年。1954 年采用某测绘局编制的第一代 1:10 万地形图;1976 年采用 Landsat MSS 影像,分辨率为 80 m;1986,2000 和 2005 年采用 Landsat TM 影像,分辨率为 30 m。

在全国资源环境遥感时空信息平台的土地资源专题数据详细标准的基础上^[14],结合区域特点,将诺敏河流域土地利用/覆被划分为耕地、林地、草地、水域、城乡工矿用地、沼泽地和未利用地 7 种类型。

土地利用/覆被数据获取流程如下:将 1:100 000 地形图扫描输入计算机,进行投影处理。将 2000 年 Landsat TM 影像与地形图进行配准,在经过大气辐射校正、几何校正、假彩色合成和图像增强等预处理基础上,根据不同土地利用/覆被类型的影像色调、纹理等特征,建立相应的遥感解译标志,在 ArcMap 9.3 软件环境下,进行人机交互式判读解译,并查错修改和拼接,得到 2000 年土地利用/覆被数据,将其作为本底数据。在此基础上,将 1986 年和 2005 年 Landsat TM 影像分别与 2000 年遥感影像进行纠正,分别提取相邻 2 个时段各土地利用类型发生变化的图斑,获得不同时段土地利用动态数据,通过处理得到 1986 年和 2005 年的土地利用/覆被数据。1976 年土地利用数据的获取是在 2000 年 TM 影像

解译的基础上,通过对比 1976 年 MSS 与 2000 年 TM 影像,解译出动态图斑,再通过 2000 年的本底数据与动态图斑结合,得到 1976 年 MSS 影像的解译结果。此方法通过分辨率较高的 TM 影像对 MSS 影像上的信息具有的一定的提示和补充作用,不但能使疏漏的可能性降低,而且能提高信息提取精度。基于地形图的土地利用信息提取,按照地形图地物类型与土地利用/覆被类型的对照对 1954 年地形图数字化,生成矢量数据,根据土地利用/覆被分类系统进行合并归纳,并结合 1976 年的土地利用/覆被数据,对差异性图斑进行土地利用/覆被动态变化判读,生成土地利用动态变化数据,然后通过对比 1976 年土地利用/覆被数据更新,生成 1954 年土地利用数据,具体提取方法参考《东北地区土地利用/覆被时空特征分析》^[15]。尽管各期土地利用/覆被数据所用数据源的空间分辨率不同,但对不同的数据源采取上述相应的处理方法,实现了解译结果在空间上的相互匹配。借助 1950 年代航空遥感相片对 1950 年代土地利用/覆被数据进行抽样检验,整体判对率达到 91%。1976,1986 和 2000 年解译结果通过土地利用详查图进行验证,整体精度超过 90%。对于 2005 年的土地利用/覆被解译数据,通过在 Google Earth 的历史高精度影像上选取验证点的方式进行精度评价,其中,耕地、城乡工矿用地和水域的解译精度在 94% 以上,林地、沼泽地、草地和未利用地的解译精度分别为 91%,88%,87%和 92%。

1.2.2 土地利用动态度 在自然和人为因素的影响下,区域内各种土地利用类型的数量在不同时间段变

化的幅度和速度是不同的,而且存在空间差异^[16],土地利用动态度可以定量描述区域土地利用变化的速度,真实地反映区域土地利用/覆被中土地利用类型的变化程度。本文引用下述模型进行分析^[17]:

$$K = \frac{U_a - U_b}{U_a} \times \frac{1}{T} \times 100\% \quad (1)$$

式中:K——研究时段内某一土地利用类型动态度; U_a, U_b ——研究期开始和结束时某一土地利用类型的数量; T ——研究时段。

1.2.3 降雨径流数据获取与处理 流域水文气象数据选取 1957—2005 年的数据。水文数据采用古城子水文站实测径流数据,来源于齐齐哈尔水文局。降雨数据来源于中国气象科学数据共享服务网(<http://cdc.cma.gov.cn>)的年值和月值数据集。根据研究区内及周边地区小二沟、图里河、博克图、富裕、扎兰屯 5 个气象站的数据,以泰森多边形面积作为权重值来计算流域降雨量。

2 诺敏河流域土地利用与覆被格局时空变化分析

2.1 1954 年以来诺敏河流域土地利用与覆被动态变化过程

土地利用类型的数量变化反映在不同类型面积总量的变化上,通过分析土地利用/覆被类型的总量变化,可以掌握土地利用变化总趋势及其结构变化特征^[16]。通过对 5 期土地利用/覆被空间数据进行统计和对比分析,获取到 1954—2005 年诺敏河流域土地利用/覆被变化的总体情况(表 1)。

表 1 1954—2005 年不同时期诺敏河流域土地利用与覆被面积变化

km²

年份	耕地	林地	草地	水域	城乡工矿用地	沼泽地	未利用地
1954	29.05	18 885.33	1 649.86	100.31	7.02	4 558.24	0.64
1976	800.96	18 549.02	1 288.50	99.85	39.33	4 452.15	0.64
1986	2 321.07	17 277.28	997.84	100.63	79.15	4 443.97	10.51
2000	2 760.83	16 914.83	940.14	100.63	79.15	4 424.36	10.51
2005	2 770.75	16 945.23	900.87	105.93	80.35	4 416.80	10.51

表 1 的结果表明,从 1954—1976 年,诺敏河流域土地利用/覆被变化显著。耕地面积由 29.05 km² 急剧增加到 800.96 km²,平均每年增加 35.09 km²,其动态度高达 120.78%,是各种土地利用类型中动态变化最显著的。城乡工矿用地在 22 a 增加 32.31 km²,尽管变化总量不大,但由于 1954 年初始面积较少,因此动态度也达到 20.93%。林地面积由 18 885.33 km² 下降到 18 549.02 km²,平均每年减少

15.29 km²。草地则由 1954 年的 1 649.86 km² 缩减到 1 288.5 km²,在 22 a 间共减少 361.36 km²。沼泽地 22 a 间减少 106.09 km²,年均减少 4.82 km²。由于水域和未利用地所占面积比重极少,因此动态变化不明显。建国初期,随着大兴安岭林区的开发,以及大量林业工人的涌入,林地被大规模采伐。而为满足林业工人的生活需要,大量农田在此期间不断被开垦,尤其是在地势平坦、交通相对方便的流域下游地

区,大量适宜开垦的林草地和沼泽地被开垦成耕地。

在 1976—1986 年的 10 a, 诺敏河流域的土地利用/覆被变化依然显著。耕地面积持续增加,在 1976 年的基础上,耕地面积共计增加了 1 520.11 km², 平均每年增加 152.01 km²。城乡工矿用地也增加 39.82 km²。在此期间,林地和草地面积则分别减少 1 271.74 km² 和 290.66 km²。与 1954—1976 年相比,耕地的开垦,以及林地和草地减少的速度明显增加。这是由于改革开放以后,随着农林业机械化程度的不断提高与交通条件的便利,使许多开发初期不便开发的地区得到了进一步开垦。

1986—2000 年诺敏河流域各土地利用类型的变化趋势为:耕地持续增加,共计增长 439.76 km²;林地和草地面积仍然大规模减少;城乡工矿用地、水域和未利用地的面积没有变化。分析其原因,1998 年 8 月以来,随着大兴安岭天然林保护工程的实施,大兴安岭林管局大量林业工人下岗,部分地区人口甚至出现负增长的情况,另外,由于部分居民点为零散分布,在遥感影像上较难解译获取。

随着大兴安岭天然林保护工程的实施,2000—2005 年,耕地平均每年增加 1.98 km²,相对于前几个时期,耕地开垦速度明显放缓。与此同时,林地面积

略有增加,相对于 2000 年,林地增加 30.4 km²,大兴安岭天然林保护工程初见成效。而草地面积则减少 39.27 km²,其中大多被开垦为耕地。其他土地利用类型面积变化较小。相对于其他时期,2000—2005 年各土地利用类型变化并不显著。

通过对整个研究时段的土地利用数据统计分析表明,诺敏河流域主要的土地利用类型为林地、草地、耕地和沼泽地,其中林地是诺敏河流域的主导景观。但自 1954 年以来,诺敏河流域林草地面积大幅度减少,分别减少 1 940.1 km² 和 748.99 km²。与林草地大面积减少相对应,耕地呈现大面积增加的趋势,1954—2005 年,耕地占土地总面积的比例从 0.12% 增加到 10.98%,面积增加 2 741.7 km²。而从不同时期各土地利用/覆被类型动态度的变化情况可以看出(表 2),由于林草地在 1954 年所占面积比重较大,尽管整个研究时段林草地面积减少显著,但是动态变化并不明显;而耕地在 1954—2005 年间变化最为显著,动态度达到了 185.05%。尽管城乡工矿用地和未利用地变化总量不大,但由于 1954 年初始面积较少,因此在整个研究时段动态度也分别达到 20.49% 和 30.38%。其他土地利用/覆被类型动态变化不明显。

表 2 1954—2005 年不同时期诺敏河流域土地利用与覆被动态度

%

时段	耕地	林地	草地	水域	城乡工矿用地	沼泽地	未利用地
1954—1976 年	120.78	-0.08	-1.00	-0.02	20.93	-0.11	0.00
1976—1986 年	18.98	-0.69	-2.26	0.08	10.12	-0.02	154.95
1986—2000 年	1.35	-0.15	-0.41	0.00	0.00	-0.03	0.00
2000—2005 年	0.07	0.00	-0.44	5.23	1.92	0.00	0.00
1954—2005 年	185.05	-0.20	-0.89	0.11	20.49	-0.06	30.38

2.2 1954 年以来诺敏河流域土地利用与覆被空间变化过程

为从空间上分析 1954 年以来诺敏河流域的土地利用变化过程,本研究通过将相邻 2 个时期的土地利用/覆被数据叠加,并根据研究区的具体情况,将各种土地利用类型间相互转化关系归纳为耕地开垦、城乡工矿用地扩张、林地和草地增加等转换类型。

1954—1976 年,林草地向耕地的转变是主要的土地利用变化过程,在此期间,林地采伐和耕地开垦主要集中在流域下游地势平坦地区。随着机械化程度的提高,在 1976—1986 年,森林采伐和耕地开垦速度明显加快,整个研究流域 8.89% 的土地利用类型发生转变,耕地开垦占有土地利用变化过程的 66.7%,是该时期最主要的土地利用变化类型,并且

耕地开垦也逐渐向流域中上游地区转移。1986—2000 年,河流两岸的林地持续被开垦为耕地,但是随着 1998 年大兴安岭天然林保护工程的实施,2000—2005 年该地区林地采伐和耕地开垦的速率明显降低,土地利用变化较小,且为零散分布。

3 土地利用与覆被变化对水文过程的影响分析

3.1 诺敏河流域土地利用与覆被变化对年径流的影响

从表 1 可以看出,诺敏河流域土地利用变化主要发生在 1990s 之前,尤其是 1976—1986 年,流域下游大量林草地被开垦为耕地。本文选择 1957—1986 年(前期)和 1987—2005(后期)2 个时段分析土地利用/覆被变化对水文过程的影响。

自 1957 年以来, 诺敏河流域年均降雨和径流变化剧烈(图 1), 整体呈现递增趋势, 但径流变化更为明显。为有效分析土地利用变化对水文动态的影响, 分别对土地利用 2 个时段的降雨—径流进行回归分析, 比较同一降雨条件下的径流差异。图 2 表示诺敏河流域两期土地利用的降雨径流关系图, 拟合 1957—1986 年降雨—径流关系数据得到式(2), 拟合 1987—2005 年降雨—径流关系数据得到式(3)。

$$Y_1 = 0.0005X_1^{2.0406} \quad (R^2 = 0.4786) \quad (2)$$

$$Y_2 = 0.0002X_2^{2.2018} \quad (R^2 = 0.8429) \quad (3)$$

式中: X_1, X_2 ——年均降雨量(mm); Y_1, Y_2 ——年均径流深(mm)。

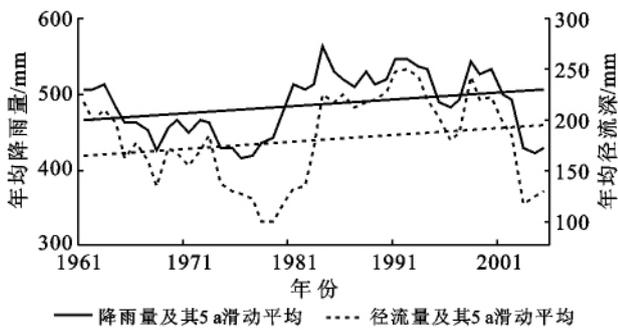


图 1 诺敏河流域降雨和径流过程变化趋势

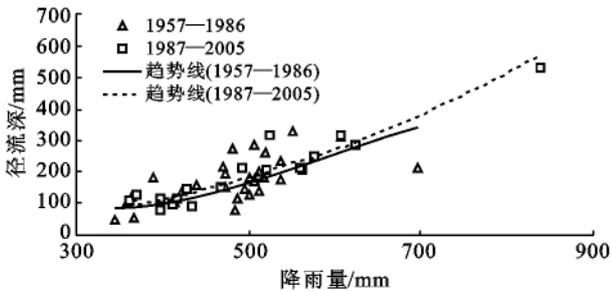


图 2 诺敏河流域年降雨—径流深关系

从式(2),(3)可以看出, 流域降雨与径流之间不具有显著的线性关系, 降雨是构成径流的主要因素但还有其他因素对径流也起着重要作用, 而且由于前期土地利用变化显著, 降雨径流的相关性明显低于后期。从图 2 中趋势线的斜率可以看出, 诺敏河流域后期土地利用较前期径流量增加, 即森林覆被率低、耕地面积较大的土地利用较植被条件较好的土地利用年产流量增加。根据式(2),(3)分别预测得到整个研究时段逐年同一降雨条件下的不同径流深, 结果表明根据式(3)得到的预测值较根据式(2)得到的预测值增加 2.6%~18.4%。尽管存在其他因素影响流域径流过程, 但本文利用不同时期降雨径流拟合经验模型分别预测模拟在同一降雨情况下的径流变化情况, 基本剔除了降雨因素的影响。研究结果表明, 相同降雨条件

下, 土地利用后期的降雨产流量较土地利用前期的产流量有所增加。比较前后 2 个时段径流随降雨的变化率, 后期土地利用随降雨增加径流增加较快。同时, 由图 2 所示, 2 曲线在降雨量 < 294 mm 处相交, 随降雨量增大, 2 曲线分离较远, 表明研究区随降雨的增加, 土地利用/覆被对径流的影响效应增强。

3.2 诺敏河流域土地利用变化对月径流的影响

图 3 表示不同土地利用时期多年月均降雨量和径流变化。图 3 显示, 在不同时期月均降雨量变化较小的情况下, 土地利用后期的径流量, 尤其是夏季汛期的径流明显大于前期。进一步对 2 期土地利用的月降雨径流进行回归拟合, 其中 1987—2005 年数据拟合效果较好, 拟合方程如下:

$$H = 0.3218P^{1.0487} \quad (R^2 = 0.913) \quad (4)$$

式中: H ——多年平均月径流深(mm); P ——多年平均月降雨量(mm)。

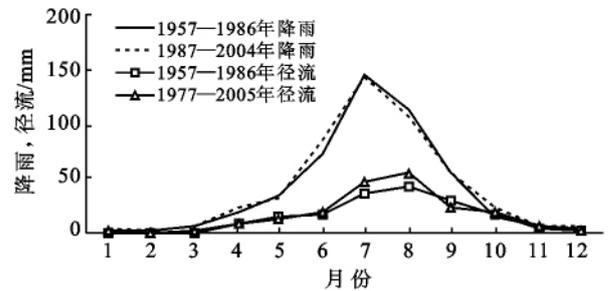


图 3 诺敏河流域降雨与径流月变化

由于降雨变化的影响, 流域前、后期产流量不具有直接可比性。为分析土地利用变化对产流量的影响, 并减小降雨因素的影响, 采用式(4)计算 1957—1986 年平均各月降雨相应的预测径流量, 获得同一降雨、不同土地利用覆被条件下的对比径流量。图 4 为 1957—1986 年月均累积降雨、实测和预测径流分布图。

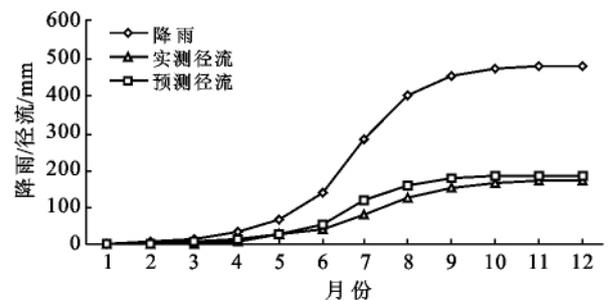


图 4 诺敏河流域 1957—1986 年累积降雨—径流年内分布

从图 4 中可以看出, 总体上径流与降雨变化趋势一致。各月产流量在 1—5 月无明显差别, 而 6—10 月预测值比观测值有所增加, 尤其在 7—9 月的夏季汛期, 土地利用变化对径流量影响更加显著。而 10

月以后曲线基本平行,表明该阶段土地利用变化对径流影响较小。因此,可以认为诺敏河流域土地利用,尤其是森林植被的变化对径流的影响在生长季表现明显,这与相关研究结论相似^[18-19]。

4 结论

(1) 在 20 世纪 50 年代初,诺敏河流域以林地、沼泽地和草地为主要景观类型,其中林地占流域面积的 74%,是该流域的主导景观。但是经过 50 a 的土地开发利用,大面积林草地被垦殖为耕地,耕地面积剧增 2 741.7 km²,占整个研究流域的面积比例由 20 世纪 50 年代的 0.12% 急剧增加到 10.98%,动态变化最为显著。而林地和草地则分别减少 1 940.1 km² 和 748.99 km²。

(2) 土地利用变化过程分析结果表明,诺敏河流域土地利用变化的空间格局明显。从 1954 年以来,林草地向耕地的转变是主要的土地利用变化过程。随着机械化程度的提高,林地采伐和耕地开垦活动呈现由下游逐渐向中上游地区移动的趋势,但随着 1998 年大兴安岭天然林保护工程的实施,诺敏河流域耕地开垦速率呈现明显放缓趋势,而且林地面积略有增加。

(3) 诺敏河流域土地利用结构发生的明显变化对年径流量产生了影响,后期土地利用较前期森林植被较好时期的产流能力有所提高。随着降雨的增多,土地利用变化对径流的影响效应随之增强,并且土地利用/覆被对流域径流的影响在生长季具有明显差异。

本文基于诺敏河流域长时间序列水文观测和土地利用/覆被数据,运用回归拟合方法分析了土地利用/覆被变化对水文过程的影响,研究了大兴安岭地区典型流域森林采伐开发活动对水文过程的影响,但只是对土地利用/覆被变化的水文动态响应进行简单的描述,缺乏机理机制方面的深入研究。因此,需要进一步利用分布式水文模型,由流域土地利用/覆被变化对水文过程造成的结果研究转向对水文过程影响的过程和机理的揭示,在不同空间位置上研究土地利用对水文过程的影响程度,从而为流域合理的土地利用开发和管理提供更具针对性的参考。

[参 考 文 献]

- [1] DeFries R, Eshleman K N. Land-use change and hydrologic process: A major focus for the future [J]. *Hydrological Processes*, 2004, 18(11): 2183-2186.
- [2] 李秀彬. 全球环境变化研究的核心领域: 土地利用/土地覆被变化的国际研究动向 [J]. *地理学报*, 1996, 51(6): 553-558.
- [3] 刘纪远, 刘明亮, 庄大方, 等. 中国近期土地利用变化的空间格局分析 [J]. *中国科学: 地球科学*, 2002, 32(12): 1031-1040.
- [4] 黄方, 刘湘南, 刘权, 等. 辽河中下游流域土地利用变化及其生态环境效应 [J]. *水土保持通报*, 2004, 24(6): 18-21.
- [5] 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.
- [6] Zhang Youkuan, 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.
- [7] 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 China [J]. *Hydrological Processes*, 2008, 22(14): 2502-2510.
- [8] Mao Dazhi, Keith A C. Impacts of landuse change on hydrologic responses in the Great Lakes region [J]. *Journal of Hydrology*, 2009, 374(1/2): 71-82.
- [9] 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.
- [10] 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: 地球科学*, 2005, 35(7): 671-681.
- [11] 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.
- [12] 黄奕龙, 傅伯杰, 陈利顶. 生态水文过程研究进展 [J]. *生态学报*, 2003, 23(3): 580-587.
- [13] 杨悦奉, 张俊海, 张岚. 诺敏河流域水力资源梯级开发前景展望 [J]. *东北水利水电*, 2006, 24(259): 5-6.
- [14] 刘纪远, 张增祥, 庄大方, 等. 20 世纪 90 年代中国土地利用变化遥感信息时空分析 [M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- [15] 张树文, 张养贞, 李颖, 等. 东北地区土地利用/覆被时空特征分析 [M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- [16] 宋开山, 刘殿伟, 王宗明, 等. 1954 年以来三江平原土地利用变化及驱动力 [J]. *地理学报*, 2008, 63(1): 93-104.
- [17] 刘纪远, 布和敖斯尔. 中国土地利用变化现代过程时空特征的研究: 基于卫星遥感数据 [J]. *第四纪研究*, 2000, 20(3): 229-239.
- [18] Hornbeck J W, Martin C W, Eagar C. Summary of water yield experiments at Hubbard Brook experimental forest, new Hampshire [J]. *Canadian Journal of Forestry Research*, 1997, 27(12): 2043-2052.
- [19] 张晓明, 曹文洪, 余新晓, 等. 黄土丘陵沟壑区典型流域土地利用/覆被变化的径流调节效应 [J]. *水利学报*, 2009, 40(6): 641-650.