doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.07.032

土地覆被变化对径流量影响的 GSAC 模型分析

白雪峰[1,2]　王　斌[1,2]　戚　颖[1,2]

(1.东北农业大学水利与土木工程学院,哈尔滨 150030;2.农业部农业水资源高效利用重点实验室,哈尔滨 150030)

摘要:针对我国高寒区水文模型研究中基础数据缺乏、现有数据时空分辨率不高、蒸散发和积雪融雪难于定量计算等问题,选择基于栅格的萨克拉门托(GSAC)模型,通过设定不同的土地覆被变化情景,定量分析土地覆被变化对径流量的影响,并推求了宝清站枯水期流量。结果表明:率定参数后的 GSAC 模型在模拟位于寒区的宝清河流域日流量过程中,率定期和验证期的决定系数平均值为 0.732 9,较好地再现了该流域 1997—2001 年逐日的流量过程;退耕还草、还林均会引起年径流量的增大,增幅在 3.09% ~44.85% 之间,且退耕还草对流量的影响更大;退耕还草、还林的坡度与流域出口断面的流量具有负相关性,即坡度越小,流量越大;坡度超过 15°的耕地还草后的平均流量与该区域的生态需水量最为接近。

关键词:水土资源;土地覆被变化;GSAC 模型;生态需水量;宝清流域

中图分类号:P333.1　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2017)07-0257-08

Impacts of Land Cover Change on Runoff Based on Grid-based Sacramento Model

BAI Xuefeng[1,2]　WANG Bin[1,2]　QI Ying[1,2]

(1. *School of Water Conservancy and Civil Engineering*, *Northeast Agricultural University*, *Harbin* 150030, *China*
2. *Key Laboratory of Efficient Utilization of Agricultural Water Resources*, *Harbin* 150030, *China*)

Abstract: In cold region of China, problems exist in the study of hydrological models, including lack of basic data, low spatial and temporal resolution of available data and the difficulty of quantitative calculating evapotranspiration, snow cover and snow melting. In response, grid-based Sacramento (GSAC) model was selected, different land cover change scenarios were set, effects of land cover change on runoff were analyzed quantitatively, and runoff in dry season was predicted. Results showed that in simulating the daily runoff of Baoqing River Watershed in cold region with model which had parameters calibrated, the average determination coefficient was 0.732 9 during the periods of calibration and validation, which well reproduced the daily runoff of this watershed during 1997—2001; returning farmland to grassland or forest can both increase the annual runoff, with the growth rate between 3.09% and 44.85%, and the growth rate of returning farmland to grassland had more influence on runoff; the steepness of land returned to grassland or forest had negative correlation with the runoff at the watershed export section, i.e., the smaller the slope was, the greater the flow was; the average runoff of farmland with steepness over 15° after being returned to grassland was similar with the ecological water demand in this area.

Key words: soil and water resources; land cover change; grid-based Sacramento model; ecological water demand; Baoqing River Watershed

引言

土地利用/覆被变化(Land use/cover change, LUCC)的研究是地球表层科学研究领域中的一个重要内容,是全球变化研究的前沿和热点,其对于生态环境的影响主要包括区域气候[1-3]、大气[4]、土

收稿日期:2016-10-26　修回日期:2016-12-22

基金项目:国家自然科学基金青年科学基金项目(51109037)、农业部农业水资源高效利用重点实验室开放课题项目(2015001、2015003)和黑龙江教育厅科学技术研究项目(12531051)

作者简介:白雪峰(1980—),男,高级实验师,博士,主要从事水土资源高效利用与保护研究,E-mail:baixuefengbisheng@126.com

通信作者:王斌(1976—),男,副教授,博士,主要从事农业节水和水文过程模拟研究,E-mail:wangbin@neau.edu.cn

壤[5-7]、水文[8-11]、生物多样性[12-13]4 方面,而水文效应作为 LUCC 的重要环境效应之一,它的研究对于揭示区域及全球尺度水循环规律、生态安全格局具有重要意义[10],关系到流域生态需水要求及流域生态健康的土地利用方式的选择,因此,近十几年来,针对流域尺度的土地利用/覆被变化对水文影响的研究日渐活跃。

LUCC 水文效应的研究方法主要有试验流域法、特征变量时间序列法及水文模型法,但是由于前 2 种方法存在局限性[14-15],针对水文模型,尤其是分布式水文模型[16]的研究逐渐成为热点。FREEZE 等[17]首先提出了分布式水文模型的概念;ONSTAD 等[18]最早尝试了用水文模型来评估 LUCC 水文影响;GARY 等[19]应用 SWAT 模型、斯皮尔曼等级相关系数法分析了布兰迪万溪流域径流变化与 LUCC 之间的关系;宋轩等[20]应用 SCS 水文模型研究了鲁山县 1992 年和 2006 年期间 LUCC 对径流的影响;GHAFFARI 等[21]利用 SWAT 模型对伊朗 Zanjanrood 流域土地利用变化情况进行模拟,探究其对地表径流的影响;牛最荣等[22]针对清源河小流域利用分类水文模型进行模拟,得到了黄土高原 LUCC 对流域年径流量的影响程度;史晓亮等[10]利用 SWAT 分布式水文模型定量评价了滦河流域 LUCC 的水文效应。

以上研究多以整个流域为研究尺度,同时所用模型对数据要求较高,在黑龙江高寒流域的适用性不强,而且 LUCC 的情景划分较为粗略。本文结合研究区域现有土地状况、国家退耕还林还草政策及坡度要求等多方面因素,设定 8 种不同土地覆被变化情景,以流域的国际地圈生物圈计划(International geosphere - biosphere project, IGBP)土地覆被作为现状对照情景,利用基于栅格的萨克拉门托模型(Grid-based Sacramento model, GSAC 模型)对栅格单元尺度的水文过程汇总得到流域尺度上的水文响应,模拟不同情景下的流域日流量,并对推求的宝清站枯水期流量进行评估,以期为黑龙江省高寒流域提供满足流域生态需水要求和促进流域生态健康的土地利用方式。

1 研究区域概况

挠力河水系位于黑龙江省东北部,是乌苏里江左岸支流(图 1),其上游宝清站位于红兴隆垦区内,在水系东南方向,该站以上集水区面积 3 689 km^2,是挠力河水系中集水面积较大、目前收集到的数据最全的测站,对挠力河水系具有一定的代表性。

选择宝清站以上集水区(以下称宝清流域)作为典型研究流域,宝清流域属中温带湿润半湿润大陆性气候,多年平均气温 3.5℃,夏季温暖多雨,冬季寒冷漫长,多年平均降水量为 518 mm,且年内分布不均,6—9 月份降水量占全年降水量的 72%,7—8 月份降水量占全年的 44%,春季干旱频繁,秋季多洪涝灾害,土地覆被类型主要为落叶针叶林、落叶阔叶林、混交林、有林草地、草地、耕地、城镇与建筑用地、耕地与自然植被镶嵌体 8 种,区内土壤资源有暗棕壤、白浆土、黑土、草甸土、沼泽土、泛滥地土壤、水稻土和风沙盐碱土 8 个类型。

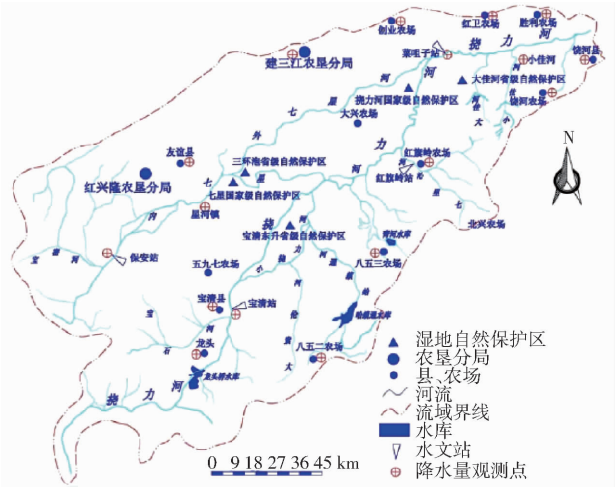

图 1 挠力河流域位置图

Fig. 1 Location map of Naolihe River Watershed

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源

DEM 数据来源于美国国家海洋和大气管理局(NOAA)数据中心,分辨率为 30″。NDVI 采用 NOAA - AVHRR(National Oceanic and Atmospheric Administration - Advanced Very High Resolution Radiometer)的 NDVI 数据,其空间分辨率为 8 km。土地覆被采用 IGBP 数据,分辨率为 30″。气象数据来自宝清气象站,流量和降水量数据摘自《中华人民共和国水文年鉴——黑龙江流域水文资料》第 1 卷第 1 册,由于冬季河道冰封、断流等原因,约在每年 12 月份初至翌年 3、4 月份间,实测流量数据有缺失情况,本文将缺失的数据按零值记。

对收集的雨量站及流量站资料进行整理、分析,发现该资料具有连续性、同步性较差的问题,其降水量、流量、气象数据仅能在 1997—2001 年间同步,故在率定模型参数时,选择 1997—1999 年的数据,在检验模型模拟情况时,应用 2000—2001 年的数据。模型检验与参数固定后,以 1997—2001 年作为土地覆被情景变化的研究时段,需要说明的是由于每年年初的流量极小,对流域诸栅格各种变量的初始值进行处理:设两土层张力水蓄量为凋萎含水量,其他

变量(如冠层截留量、两土层的自由水蓄量等)均设为零。

2.2　模型参数的敏感性分析及率定

2.2.1　模型构建

考虑到我国水文基础数据条件以及北方寒区的产流机制,选择王斌等[23]提出的 GSAC 模型,该模型增加了积雪融雪模块,引入萨克拉门托(Sacramento,SAC)模型概念,构建了适于北方寒区的栅格分布式水文模型(图 2),将该模型应用于土地覆被变化情景下的流量过程模拟,同时与区域生态需水问题进行耦合研究。

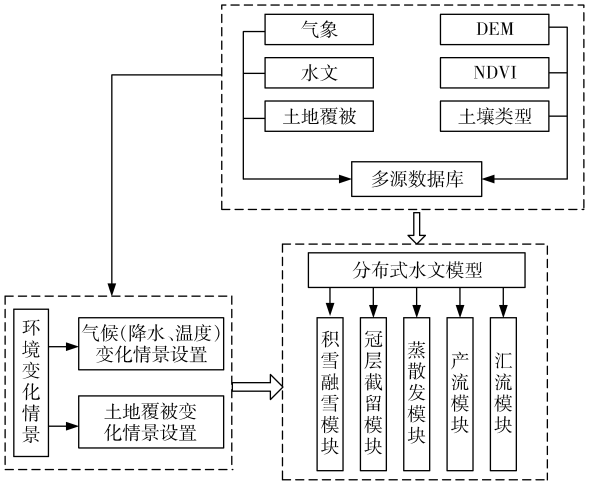

图 2　栅格分布式水文模型结构图

Fig. 2　Structure diagram of grid distributed hydrological model

2.2.2　模型不确定性分析

水文模型的不确定性研究是水文科学研究的重要课题,而模型参数的不确定性分析更是水文模型不确定性研究的重要内容之一[24]。在本文模型的蒸散发模块中,气象、阻抗、辐射等参数均来自国内外相关文献,产流模块的 11 种参数利用 FAO 土壤属性数据推求,由于这些参数均已实现栅格化,与流域每个栅格相匹配,数目也与栅格数相同,每个参数均具有明确的物理意义,属于“确定的”参数;由于这些参数数量庞大,鉴于目前的计算机硬件水平,若对每个参数在流域各栅格下进行不确定性分析是极为困难的。因此,本文的不确定性分析主要对象是采用 Free search(FS)算法率定模型时估算的其他剩余参数,根据实测资料及相关研究[25-26],确定率定参数的变化范围(表 1),其中 T_s 为划分雨雪的温度阈值,M_f 为度日因子,Z_{up4225}、Z_{up4343} 和 Z_{up4429} 为 3 种 FAO 土壤的上层厚度,K_{mus}、X_{mus} 分别为马斯京根法蓄量常数和流量比重因子。

由于本文模型源于 SAC 模型概念的栅格分布式水文模型,单次模拟的计算量较大,故选用计算耗时相对较小的蒙特卡罗法研究模型的不确定性。根据陈昌军等[27]研究成果,3 000 次循环能够满足对模型输出的不确定性分析要求,因此,在表 1 所示的各种参数变化区间内,利用蒙特卡罗法随机生成 3 000 组参数,将每组作为参数输入构建的模型,从而得到模型的模拟效率,见图 3、图 4。

表 1　率定参数的变化范围

Tab. 1　Range of verificated parameters

参数	T_s/℃	M_f/(mm·℃$^{-1}$·d^{-1})	T_b/℃	Z_{up4225}/mm	Z_{up4343}/mm	Z_{up4429}/mm	K_{mus}/h	X_{mus}
数值范围	0 ~ 6	0 ~ 12	0 ~ 4	0 ~ 2 500	0 ~ 2 500	0 ~ 2 500	18 ~ 28	0 ~ 0.4

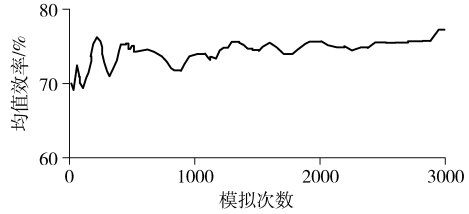

图 3　蒙特卡罗模拟的均值效率

Fig. 3　Mean efficiency of Monte Carlo simulation

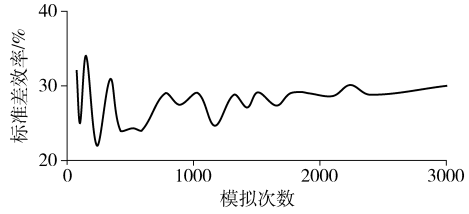

图 4　蒙特卡罗模拟的标准差效率

Fig. 4　Deviation efficiency of Monte Carlo simulation

由图 3、图 4 可以看出,模型在模拟 3 000 次以后,模拟结果的均值效率与标准差效率震荡波动明显减弱,并基本趋于稳定,可以说明该水文模型应用于宝清流域时存在不确定性。

2.2.3　模型参数敏感性分析

为理解模型结构和参数设置的合理性,更好地开展参数率定工作,并为参数提供更为明确的寻优率定空间,需要对参数进行敏感性分析。

在 2.2.1 节中,已明确了需要率定的参数,以 Nash 决定系数 R^2 作为似然判据,其计算式为

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}(Q_{obs,i} - Q_{sim,i})^2}{\sum_{i=1}^{n}(Q_{obs,i} - \overline{Q}_{obs})^2} \tag{1}$$

式中　n——实测和模拟的日流量系列长度

$Q_{obs,i}$——第 i 日实测流量，m^3/s

$Q_{sim,i}$——第 i 日模拟流量，m^3/s

$\overline{Q}_{obs}$——实测流量的均值，m^3/s

敏感性分析结果如图 5 所示。

由图 5 可以看出，这些参数的变化对似然判据的 R^2 影响较大，分布域均存在凸起现象，故存在敏感性。

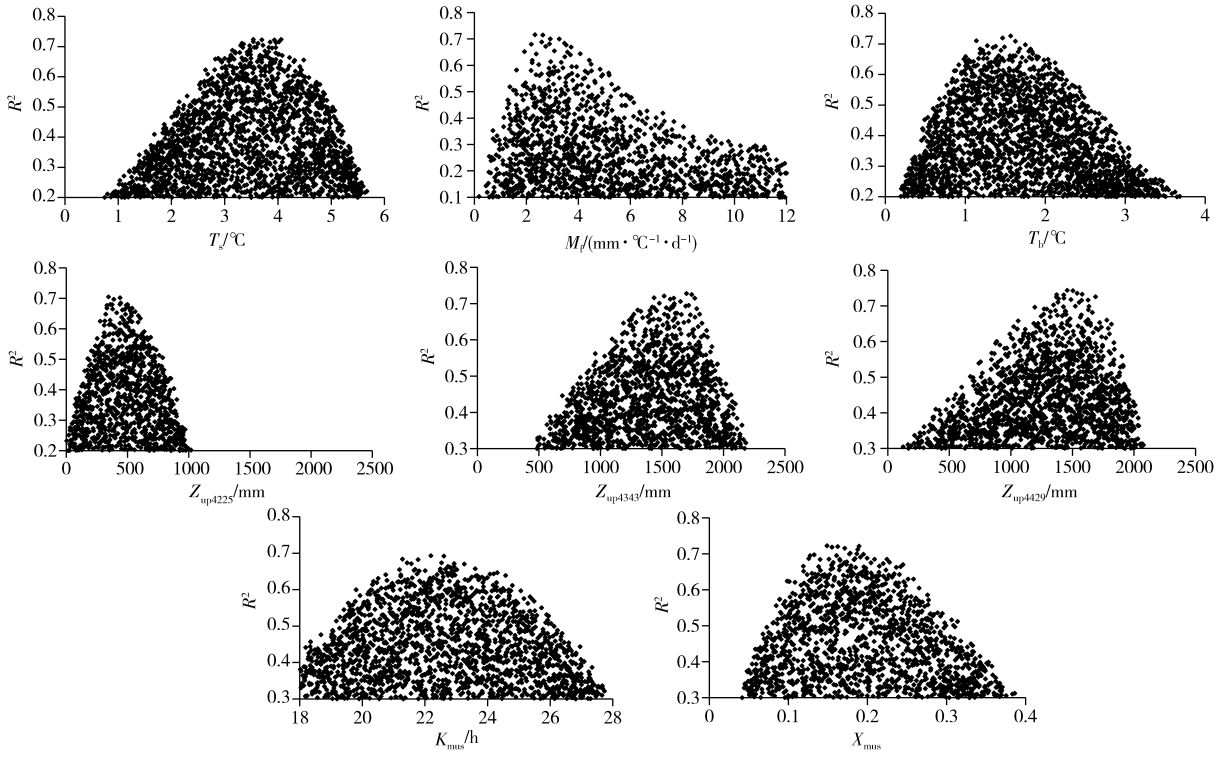

图 5 各参数的似然散点图

Fig. 5 Scatter diagrams of parameters

2.2.4 模型参数的率定

FS 是 PENEV 等[28]提出的一种基于群体的优化算法，与遗传算法（Genetic algorithm）、粒子群算法（Particle swarm optimization）、进化迭代算法（Differential evolution）相比，FS 具有更好的寻优能力。本文以 FS 算法对模型参数进行率定，王斌等[29]已证实利用 FS 算法迭代计算过程简单，需要设置的算法参数较少，在相同的模拟条件下，FS 算法率定的 SAC 模型模拟效果更好。以表 1 各参数的变化范围为寻优区间，采用 FS 算法率定模型参数，结果见表 2。根据参数的率定结果，获得率定期和验证期的流量模拟结果，如图 6、图 7 所示。

表 2 模型主要参数率定结果

Tab. 2 Verification results of main parameters of model

参数	T_s/℃	M_f/(mm·℃$^{-1}$·d^{-1})	T_b/℃	Z_{up4225}/mm	Z_{up4343}/mm	Z_{up4429}/mm	K_{mus}/h	X_{mus}
数值	4.13	2.39	1.25	340	1 800	1 550	22.96	0.12

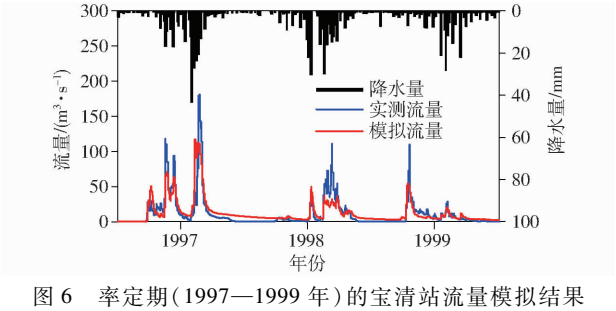

图 6 率定期（1997—1999 年）的宝清站流量模拟结果

Fig. 6 Flow simulation results in regular rate (1997—1999) at Baoqing station

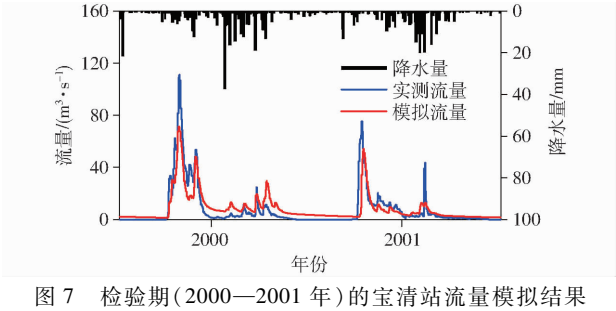

图 7 检验期（2000—2001 年）的宝清站流量模拟结果

Fig. 7 Flow simulation results in in spection period (2000—2001) at Baoqing station

由图 6 和图 7 可以看出，模拟流量与实测流量的符合情况较好，但在流量较大时模拟值与实测值存在偏差，说明应用日步长的降水量、流量和气象数据可以满足大部分情况下的日流量模拟，但由于流域内雨量站点较少，无气象站，雨量站呈线状集中在中下游，难于控制和反映流域的实际降水量及气象状况。

对率定期及验证期的决定系数进行计算，得到率定期 1997—1999 年的决定系数分别为 0.761 9、0.604 4、0.702 7，验证期 2000—2001 年的决定系数分别为 0.784 5、0.528 6，5 年平均的决定系数为 0.732 9，根据水利部颁布的《水文情报预报规范》，除 2001 年外，本文模型在不同年份及连续 5 年的模拟值均达到了乙级精度等级，能较好再现宝清站断面的实测流量过程。因此，可以应用本文构建的模型研究寒区流域流量对土地覆被变化的响应。

3　土地覆被变化情景下的径流量模拟

3.1　土地覆被变化情景设定

对资料进行整理发现，黑龙江省退耕还林的坡度范围大体介于 15° ~ 25°之间，因此本文以 15° ~ 25°的耕地作为土地覆被情景变化研究对象，共设计了 8 种土地覆被/变化情景：①以 IGBP 土地覆被类型及其空间分布代表流域的实际土地覆被情况，记作模拟情景 0。②模拟情景 1：坡度超过 15°的耕地还草。③模拟情景 2：坡度超过 15°的耕地还落叶针叶林。④模拟情景 3：坡度超过 25°的耕地还草。⑤模拟情景 4：坡度超过 25°的耕地还落叶针叶林。⑥模拟情景 5：坡度在 15° ~ 25°间的耕地还草，坡度超过 25°的耕地还落叶针叶林。⑦模拟情景 6：耕地全变为草地。⑧模拟情景 7：耕地全变为针叶林。

3.2　土地利用/覆被变化情景下的径流模拟

应用寒区栅格分布式水文模型对不同情景下各年份径流量进行模拟，结果见表 3 及图 9。

由图 9 可以看出，在 1997—2001 年间，不同土地覆被变化情景下的日流量动态变化过程基本相似，但结合表 3 可以看出，各种情景下的年径流量在数值上相差较大，与对照情景 0 相比，情景 1 ~ 情景 7 的年径流量均呈增大趋势，变化区间为 3.09% ~ 44.85%，其中以耕地全变为草地的情景 6 增幅最大，其次是坡度超过 15°的耕地还草的情景 1，增幅最小的是坡度超过 25°的耕地还落叶针叶林的情景 4。

通过对宝清流域的径流量模拟发现，在相同的退耕面积下，退耕还草引起的流量增幅更大，故退耕还草比退耕还林对流量的影响大；从流域地形角度看，退耕还草、还林的坡度越小，流域出口断面的流量越大，这是因为当选取较小坡度时，更多的耕地被置换为草地或落叶针叶林。

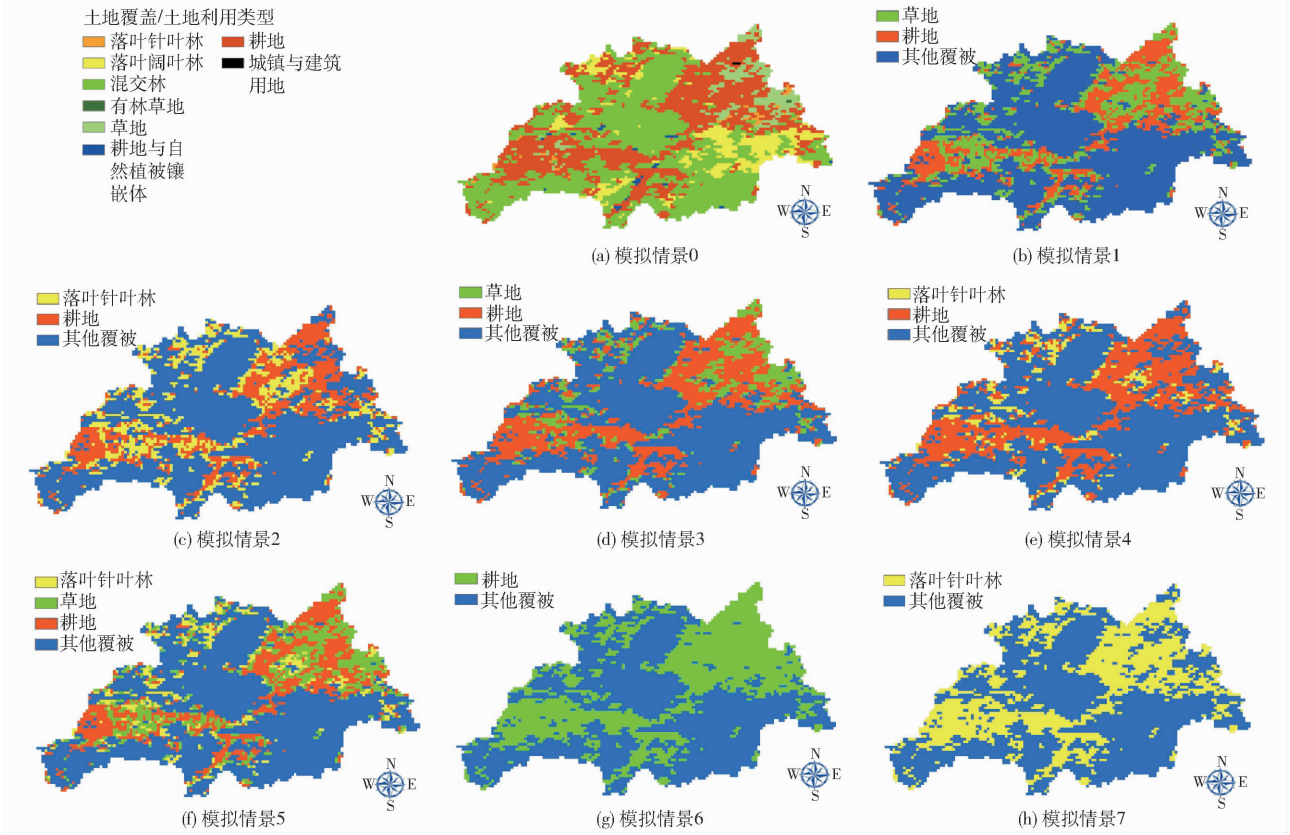

图 8　土地利用/覆被变化模拟情景图

Fig. 8　Scenario simulation results of land use/cover change

表 3 不同土地覆被变化情景下的宝清站年径流量模拟值

Tab. 3 Flow simulation results in different land cover change scenarios at Baoqing station m^3

模拟情景	1997 年	1998 年	1999 年	2000 年	2001 年	平均值
情景 0	$6.358\,5\times10^8$	$3.040\,7\times10^8$	$2.194\,0\times10^8$	$3.497\,0\times10^8$	$1.765\,5\times10^8$	$3.371\,1\times10^8$
情景 1	$6.853\,0\times10^8$	$3.838\,7\times10^8$	$2.890\,9\times10^8$	$4.389\,1\times10^8$	$2.369\,8\times10^8$	$4.068\,3\times10^8$
情景 2	$6.438\,4\times10^8$	$3.156\,7\times10^8$	$2.419\,1\times10^8$	$3.912\,7\times10^8$	$1.814\,6\times10^8$	$3.548\,3\times10^8$
情景 3	$6.506\,3\times10^8$	$3.371\,6\times10^8$	$2.538\,6\times10^8$	$4.024\,1\times10^8$	$2.029\,3\times10^8$	$3.694\,0\times10^8$
情景 4	$6.330\,5\times10^8$	$3.086\,2\times10^8$	$2.338\,8\times10^8$	$3.827\,9\times10^8$	$1.793\,8\times10^8$	$3.475\,4\times10^8$
情景 5	$6.677\,2\times10^8$	$3.553\,3\times10^8$	$2.691\,1\times10^8$	$4.192\,9\times10^8$	$2.134\,2\times10^8$	$3.849\,7\times10^8$
情景 6	$7.584\,1\times10^8$	$4.871\,7\times10^8$	$3.620\,0\times10^8$	$5.216\,7\times10^8$	$3.122\,5\times10^8$	$4.883\,0\times10^8$
情景 7	$6.656\,0\times10^8$	$3.304\,0\times10^8$	$2.572\,1\times10^8$	$4.079\,3\times10^8$	$1.880\,4\times10^8$	$3.698\,4\times10^8$

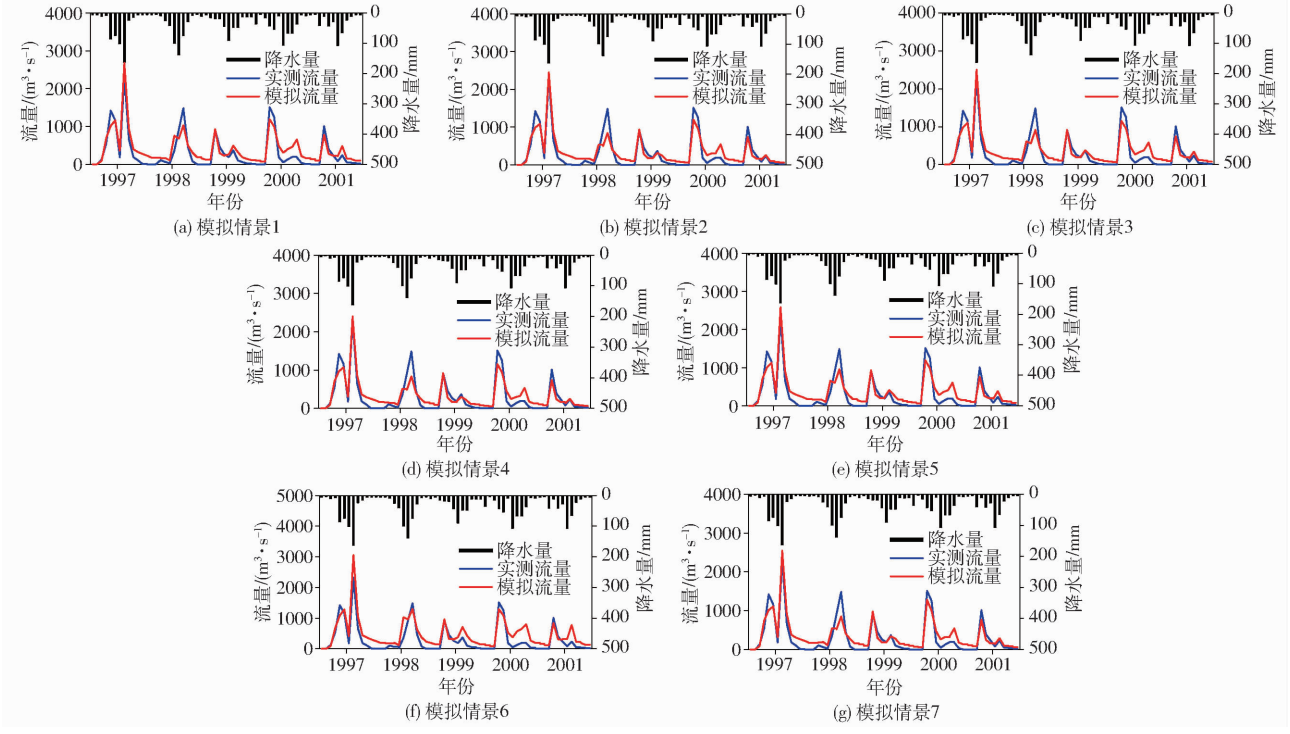

图 9 不同土地覆被变化情景下的宝清站流量模拟对比

Fig. 9 Comparisons of flow simulation results in different land cover change scenarios at Baoqing station

3.3 适宜于流域水资源发展的土地覆被方式

根据 3.2 节可知,情景 6 对径流量的影响最大,但现实中无法实现,因为研究流域为三江平原的主要粮食产区,耕地仍将为该地区土地利用的主要方式之一,在现实社会生产实践中,考虑到人类生产生活的实际需要,耕地作为一种基础的生产资源,不宜将其全部转换为其他土地覆被类型,因此,情景 6 仅作为本文中模拟条件处理下的数值,对研究有一定参考作用。在遵循国家退耕还林、还草等政策法规条件下,情景 1 是一种可取的、能够促使流域径流量增大的土地利用模式。在其他土地覆被模式不变的情况下,减少一部分耕地面积,增加一部分草地面积,不仅有利于流域的水资源发展,对当地的生态环境以及畜牧业的发展也起到相应的促进作用。综上,适宜于流域水资源发展的土地覆被方式如表 4 所示。

表 4 适宜流域水资源发展的土地覆被方式

Tab. 4 Land cover types suitable for development of water resources

土地覆被代码	土地覆被名称	占流域面积比例/%
3	落叶针叶林	0.96
4	落叶阔叶林	10.60
5	混交林	45.75
8	有林草地	0.05
10	草地	20.26
12	耕地	21.70
13	城镇与建筑用地	0.05
14	耕地与自然植被镶嵌体	0.63

3.4 适用于生态需(用)水量的土地覆被方式

R2CROSS 法是以曼宁方程为基础,并假设浅滩作为最临界的河流栖息地类型,而能保护浅滩栖息地也必将可以保护其他的水生栖息。Tennant 法是水文指标法中应用较广泛的方法,计算简单,有河流

生态试验作基础，对生态基流的计算具有很强的适用性，一旦建立了流量与水生生态系统之间的关系，需要的数据就相对较少，也不需要进行大量的野外工作，可以在生态资料缺乏的地区使用[30]。

采用 R2CROSS 法计算挠力河、七星河、倭肯河、安邦河及八虎力河生态流量平均占各条河流平均流量的 27.8%，接近 30%，对应采用 Tennant 法计算平均流量 30% 的情况，Tennant 法指出流量为年平均天然流量 30% 的情况，水生生物拥有非常好的生长条件。

采用 Tennant 法流量为平均流量 30% 情况下的生态流量为 0.78 m^3/s。由 GSAC 模型模拟的不同土地覆被变化情景下的枯水期流量结果见表 5，为比较方便，同时将实测枯水期流量一并列入表中。

表 5　宝清站实测及不同土地覆被变化情景下的流量

Tab. 5　Measured and simulated flows in different land cover change scenarios at Baoqing station

m^3/s

变化情景	实测	情景 1	情景 2	情景 3	情景 4	情景 5	情景 6	情景 7
平均流量	0.62	0.81	0.69	0.72	0.68	0.77	0.96	0.73

由表 5 可以看出，与前文的年径流量变化趋势相似，在枯水期各种模拟情景下的流量均高于实测流量，其中模拟情景 1（坡度超过 15°的耕地还草）和情景 6（耕地全变为草地）对应的流量均超过 Tennant 法（30%）估算的生态需水量。考虑到情景 6 只是作为一种模拟情景，现实中很难实现，因此，情景 1 所代表的土地覆被情况更适合宝清河流域生态需水发展要求。

综上所述，情景 1 既符合该流域水资源发展的情况，又可以满足该流域的生态用水需求，故确定情景 1 为本地区较为适宜的土地覆被方式。

4　结论

（1）率定参数后的 GSAC 模型在模拟位于寒区的宝清河流域日流量过程中，率定期和验证期的决定系数 5 年平均值为 0.732 9，较好地再现了该流域 1997—2001 年逐日的流量过程，说明选择的 GSAC 模型在该流域具有较好的适用性。

（2）退耕还草、还林均会引起年径流量的增大，与对照组相比，增幅在 3.09% ~44.85% 之间，且退耕还草对流量的影响更大，还草、还林的坡度与流域出口断面的流量具有负相关性，即坡度越小，流量越大，这是因为当选取较小坡度时，更多的耕地被置换为草地或落叶针叶林。

（3）模拟的各种情景下，平均年径流量在数值上相差较大。在相同的退耕面积下，对于宝清流域而言，退耕还草比退耕还林对流量的影响大。其中情景 6 模拟的平均年径流量最大，考虑到现实意义，在遵循国家退耕还林、还草等政策法规条件下，情景 1 是一种可取的、能够促使流域径流量增大的土地利用模式。在其他土地利用/覆被模式不变的情况下，减少一部分耕地面积，增加一部分草地面积，不仅有利于流域的水资源发展，对当地的生态环境以及畜牧业的发展也会起到相应的促进作用。

（4）利用 GSAC 模型对不同土地覆被变化的情景进行径流量模拟，推求宝清站枯水期流量，结果表明情景 1 的平均流量满足该区域的生态需水量，说明该模拟效果适宜该地区的生态发展。

参　考　文　献

1　刘廷祥. 东北地区农林交错带土地利用变化及其对区域气温影响模拟研究[D]. 长春：中国科学院研究生院，2012.

2　翟俊，邵全琴，刘纪远. 内蒙古高原土地利用/覆被变化对气温变化的影响分析[J]. 自然资源学报，2014，29(6)：967－978.
ZHAI Jun，SHAO Quanqin，LIU Jiyuan. Impact analysis of climate change from land use/cover change in Inner Mongolia Plateau [J]. Journal of Natural Resources，2014，29(6)：967－978.（in Chinese）

3　朱雅莉，张庆国，周晓飞. 土地利用/覆被变化对区域气候的影响研究[J]. 安徽农学通报，2012，18(8)：76－78.
ZHU Yali，ZHANG Qingguo，ZHOU Xiaofei. Research on the impacts of land use/cover change on regional climate[J]. Anhui Agricultural Science Bulletin，2012，18(8)：76－78.（in Chinese）

4　张润森，濮励杰，刘振. 土地利用/覆被变化的大气环境效应研究进展[J]. 地域研究与开发，2013，32(4)：123－128.
ZHANG Runsen，PU Lijie，LIU Zhen. Advances in research on atmospheric environment effects of land use and land cover change [J]. Areal Research and Development，2013，32(4)：123－128.（in Chinese）

5　孙倩，塔西甫拉提·特依拜，丁建丽，等. 干旱区典型绿洲土地利用/覆被变化及其对土壤盐渍化的效应研究——以新疆沙雅县为例[J]. 地理科学进展，2012，31(9)：1212－1223.
SUN Qian，TASHPOLAT Tiyip，DING Jianli，et al. Study on land use/cover changes and soil salinization in dry areas：a case study of Shaya County in Xinjiang[J]. Progress in Geography，2012，31(9)：1212－1223.（in Chinese）

6　朱连奇，许叔明，陈沛云. 山区土地利用/覆被变化对土壤侵蚀的影响[J]. 地理研究，2003，22(4)：432－438.
ZHU Lianqi，XU Shuming，CHEN Peiyun. Study on the impact of land use/land cover change on soil erosion in mountainous areas [J]. Geographical Research，2003，22(4)：432－438.（in Chinese）

7　曾宏达，杜紫贤，杨玉盛，等. 城市沿江土地覆被变化对土壤有机碳和轻组有机碳的影响[J]. 应用生态学报，2010，21(3)：701－706.
ZENG Hongda，DU Zixian，YANG Yusheng，et al. Effects of land cover change on soil organic carbon and light fraction organic carb on at river banks of Fuzhou urban area[J]. Chinese Journal of Applied Ecology，2010，21(3)：701－706.（in Chinese）

8 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.
SHI Xiaoliang, LI Ying, ZHAO Kai, et al. Land use/cover change and its effects on hydrologic processes in Nuomin River Basin [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2013,33(1):23 - 28. (in Chinese)

9 史晓亮,李颖,严登华,等. 流域土地利用/覆被变化对水文过程的影响研究进展[J]. 水土保持研究,2013,20(4):301 - 308.
SHI Xiaoliang, LI Ying, YAN Denghua, et al. Advances in the impacts of watershed land use/cover change on hydrological processes[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2013,20(4):301 - 308. (in Chinese)

10 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[J]. 水科学进展,2014, 25(1):21 - 27.
SHI Xiaoliang, YANG Zhiyong, YAN Denghua, et al. On hydrological response to land-use/cover change in Luanhe river basin [J]. Advances in Water Science, 2014, 25(1):21 - 27. (in Chinese)

11 王莺,张雷,王劲松. 洮河流域土地利用/覆被变化的水文过程响应[J]. 冰川冻土,2016, 38(1):200 - 210.
WANG Ying, ZHANG Lei, WANG Jinsong. Response of the hydrological process to land-use/cover change in Taohe River basin [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2016, 38(1):200 - 210. (in Chinese)

12 赵国松,刘纪远,匡文慧,等. 1990—2010 年中国土地利用变化对生物多样性保护重点区域的扰动[J]. 地理学报,2014, 69(11):1640 - 1650.
ZHAO Guosong, LIU Jiyuan, KUANG Wenhui, et al. Disturbance impacts of land use change on biodiversity conservation priority areas across China during 1990—2010[J]. Acta Geographica Sinica, 2014,69(11):1640 - 1650. (in Chinese)

13 吴建国,吕佳佳. 土地利用变化对生物多样性的影响[J]. 生态环境,2008,17(3):1276 - 1281.
WU Jianguo, LÜ Jiajia. Effects of land use change on the biodiversity[J]. Ecology and Environment,2008,17(3):1276 - 1281. (in Chinese)

14 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.

15 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.
PANG Jingpeng, LIU Changming, XU Zongxue. Impact of landuse change on runoff and sediment yield in the Miyun reservoir catchment[J]. Journal of Beijing Normal University: Natural Science, 2010, 46(3): 290 - 299. (in Chinese)

16 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.
XU Zongxue, CHENG Lei. Progress on studies and applications of the distributed hydrological models[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2010,41(9):1009 - 1017. (in Chinese)

17 FREEZE R A, HARLAN R L. Bleprint for a physically-based digital hydrological response model[J]. Journal of Hydrology, 1969,9(3): 237 - 258.

18 ONSTAD C A, JAMIESON D G. Modelling the effects of land use modifications on runoff[J]. Water Resources Research,1970, 6(5):1287 - 1295.

19 GARY W C, CARMEN V. Impacts of land use changes on runoff generation in the east branch of the Brandywine Creek Watershed using a GIS-based hydrologic model [J]. Middle States Geographer,2007,40: 142 - 149.

20 宋轩,王本芬,杜丽平,等. 鲁山县土地利用变化对地表径流的影响[J]. 河南农业科学,2008(4): 57 - 60.
SONG Xuan, WANG Benfen, DU Liping, et al. Effect of land use change on surface runoff in Lushan County[J]. Journal of Agricultural Sciences, 2008(4): 57 - 60. (in Chinese)

21 CHAFFARI G, KEESSTRA S, GHODOUSI J, et al. SWAT-simulated hudrological impact of land-use change in the Zanjanrood Basin, Northwest Iran [J]. Hydrological Processes, 2010, 24(7): 73 - 89.

22 牛最荣,赵文智,刘进琪,等. 甘肃渭河流域土地利用及覆被变化对径流的影响研究[J]. 水利水电技术,2012,43(4): 5 - 10.
NIU Zuirong, ZHAO Wenzhi, LIU Jinqi, et al. Study on impact from change of land-use and land-cover on runoff in Weihe River Basin in Gansu Province[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2012,43(4): 5 - 10. (in Chinese)

23 王斌, 王贵作, 黄金柏, 等. 栅格分布式水文模型在高寒区日流量模拟中的应用[J]. 水力发电学报, 2013, 32(6): 36 - 42.
WANG Bin, WANG Guizuo, HUANG Jinbai, et al. Distributed hydrological model based on grid and its application to daily runoff simulation for high-cold region[J]. Journal of Hydroelectric Engineering,2013,32(6): 36 - 42. (in Chinese)

24 舒畅,刘苏峡,莫兴国,等. 新安江模型参数的不确定性分析[J]. 地理研究,2008,27(2): 343 - 352.
SHU Chang, LIU Suxia, MO Xingguo, et al. Uncertainty analysis of Xinanjiang model parameter[J]. Geographical Research, 2008,27(2): 343 - 352. (in Chinese)

25 HOCK R. Temperature index melt modelling in mountain areas[J]. Journal of Hydrology, 2003, 282(1 - 4):104 - 115.

26 BORMANNK J, EVANS J P, MCCABE M F. Constraining snowmelt in a temperature-index model using simulated snow densities [J]. Journal of Hydrology, 2014, 517(2): 652 - 667.

27 陈昌军,郑雄伟,张卫飞. 三种水文模型不确定性分析方法比较[J]. 水文,2012, 32(2): 16 - 20.
CHEN Changjun, ZHENG Xiongwei, ZHANG Weifei. Comparison of three methods for uncertainty analysis of hydrologic models [J]. Journal of China Hydrology, 2012, 32(2): 16 - 20. (in Chinese)

28 PENEV K, LITTLEFAIR G. Free search—a comparative analysis[J]. Information Sciences, 2005, 172(1 - 2): 173 - 193.

29 王斌, 黄金柏, 宫兴龙, 等. Free Search 算法率定的 Sacramento 模型在东北寒旱区的应用[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(6): 171 - 177. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20160622&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.06.022.
WANG Bin, HUANG Jinbai, GONG Xinglong, et al. Application of Sacramento model calibrated by Free Search algorithm in clod and arid region of Northeast China[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(6): 171 - 177. (in Chinese)

30 徐淑琴, 苏鑫, 王莉莉, 等. 水文变异条件下水库生态调度研究[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(4):146 - 154, 381. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20160420&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.04.020.
XU Shuqin, SU Xin, WANG Lili, et al. Reservoir ecological operation under condition of hydrological variability [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(4):146 - 154, 381. (in Chinese)