

基于 SWAT 模型的白马河流域土地利用变化的径流响应^{*}

王 学^{1,2,5} 张祖陆^{2,3**} 宁吉才⁴

(¹中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101; ²山东师范大学人口·资源与环境学院, 济南 250014; ³山东省水土保持与环境保育重点实验室, 临沂师范学院, 山东临沂 276005; ⁴中国科学院烟台海岸带研究所, 山东烟台 264003; ⁵中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要 以 3S 技术为依托, 在对白马河流域土地利用变化进行分析和预测的基础上, 建立了流域 SWAT 模型, 分析了不同土地利用情景下流域径流的响应, 并计算了流域主要土地利用类型对径流深的贡献系数。结果表明: 1987—2017 年, 耕地、居民点及建设用地、有林地、灌木林地和疏林地是流域主要的土地利用类型, 共占流域总面积的 96% 以上, 草地、水域和未利用地所占比例则较小; 在 4 种主要土地利用类型中, 有林地、灌木林地和疏林地、居民点及建设用地对径流深的贡献系数分别为 2.61、0.38 和 0.34 mm · km⁻², 说明三者有促进产流的作用, 而耕地的贡献系数为 -0.11 mm · km⁻², 说明耕地对径流的产生起到一定抑制作用。

关键词 SWAT 模型; CA-Markov 模型; 土地利用; 径流响应; 白马河流域

中图分类号 X522 **文献标识码** A **文章编号** 1000-4890(2013)1-0186-09

Runoff response to land use change in Baimahe basin of China based on SWAT model.

WANG Xue^{1,2,5}, ZHANG Zu-lu^{2,3**}, NING Ji-cai⁴ (¹*Institute of Geographical Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China*; ²*School of Population, Resources and Environment, Shandong Normal University, Jinan 250014, China*; ³*Shandong Key Laboratory of Soil and Water Conservation and Environmental Protection/Linyi University, Linyi 276005, Shandong China*; ⁴*Yantai Institute of Coastal zone Research Chinese Academy of Sciences, Yantai 264003, Shandong China*; ⁵*University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*). *Chinese Journal of Ecology*, 2013, **32**(1): 186–194.

Abstract: By using 3S technology, and based on the analysis and prediction of the land use change in Baimahe basin, a SWAT model was established to study the runoff response of the basin under the scenarios of different land use. In the meantime, the contribution coefficients of the main land use types in the basin to the runoff depth were calculated. From 1987 to 2017, the main land use types in the basin were farmland, construction land, forestland, and shrub land, occupying 96% or more of the total land area, while the grassland, waters, and unused land only had a smaller proportion. The four main land use types had different effects on the runoff depth. The contribution coefficient of forestland, shrub land and construction land to the runoff depth was 2.61, 0.38, and 0.34 mm · km⁻², respectively, implying that these three land use types had positive effects on the runoff depth in this basin. On the contrary, the contribution coefficient of farmland was -0.11 mm · km⁻², implying that farmland had negative effect on the runoff depth.

Key words: SWAT model; CA-Markov model; land use; runoff response; Baimahe basin.

^{*} 山东省水土保持与环境保育重点实验室开放基金项目 (STKF201002) 和国家水体污染控制与治理科技重大专项 (2009ZX07210-007-01) 资助。

^{**} 通讯作者 E-mail: zulzhang@126.com

收稿日期: 2012-08-06 接受日期: 2012-10-19

流域水文过程对土地利用变化的响应研究是当前全球变化和水文学研究的关键问题之一(李丽娟等,2007;Jain *et al.* ,2010)。长时段内,气候变化是影响流域水文过程的主要原因之一(Onstad & Jamieson,1970;Faith *et al.* ,2009);而较短时段内,人口增长、制度变迁、城市化(Li *et al.* ,2010)以及改革开放政策等驱动的流域土地利用变化,必然会对流域水文过程产生较大影响,进而影响流域水量平衡并引发水土流失、土地退化等生态环境问题(高超等,2009)。因此,开展土地利用变化的水文响应研究在促进流域水资源的合理开发与管理、保证流域水资源可持续利用方面(Srinivasan & Arnold,1994;Saleh *et al.* ,2000;Nosetto *et al.* ,2005),均具有重要的意义。以往这方面的研究大多采用试验流域法,或者是采用特征变量的时间序列分析方法,但是这两种方法都存在明显的局限性。20 世纪 70 年代以来,分布式水文模型在流域水文过程的模拟研究方面得到了广泛的应用。其中,由美国农业部(USDA)农业研究中心于 1994 年开发的 SWAT 模型(Soil and Water Assessment Tool),以水量平衡为基本原理,因具有较为简单且适用性强、可实现连续时间模型、降低了空间差异、水文模拟精度较高等优点,在流域土地利用变化的水文效应研究方面

应用较广(陈军锋和李秀彬,2004)。

白马河流域位于山东省济宁市境内,流经曲阜、兖州、邹城、微山 4 县、市,流域面积约 936.02 km²,在地貌上处于鲁中南丘陵向鲁西南平原的过渡地带,地形起伏较大,是南四湖流域的重要子流域之一(图 1)。流域位于温带大陆性季风气候区,降水多集中在 7—9 月,径流量年内分配不均匀;同时,人类活动作用频繁,流域土地利用/覆被变化也较为明显,这些均对流域径流过程产生了不同程度的影响。本文在对流域 20 多年土地利用变化进行分析和预测的基础上,建立了适合该流域的 SWAT 模型,模拟不同土地利用情景下流域径流的响应,同时,定量计算流域主要的土地利用类型对产流的贡献系数,以期为流域水资源管理及水土保持措施的制定提供依据。

1 数据来源与研究方法

1.1 数据来源与处理

1.1.1 流域 DEM 来自于“中国科学院国际科学数据服务平台”(<http://srtm.csi.cgiar.org>),分辨率为 90m。

1.1.2 土地利用数据 对 1987 年、1997 年和 2007 年 TM 遥感影像进行人工目视解译,得到流域 3 期土地利用图(图 2)。将地表真实感兴趣区与解译结

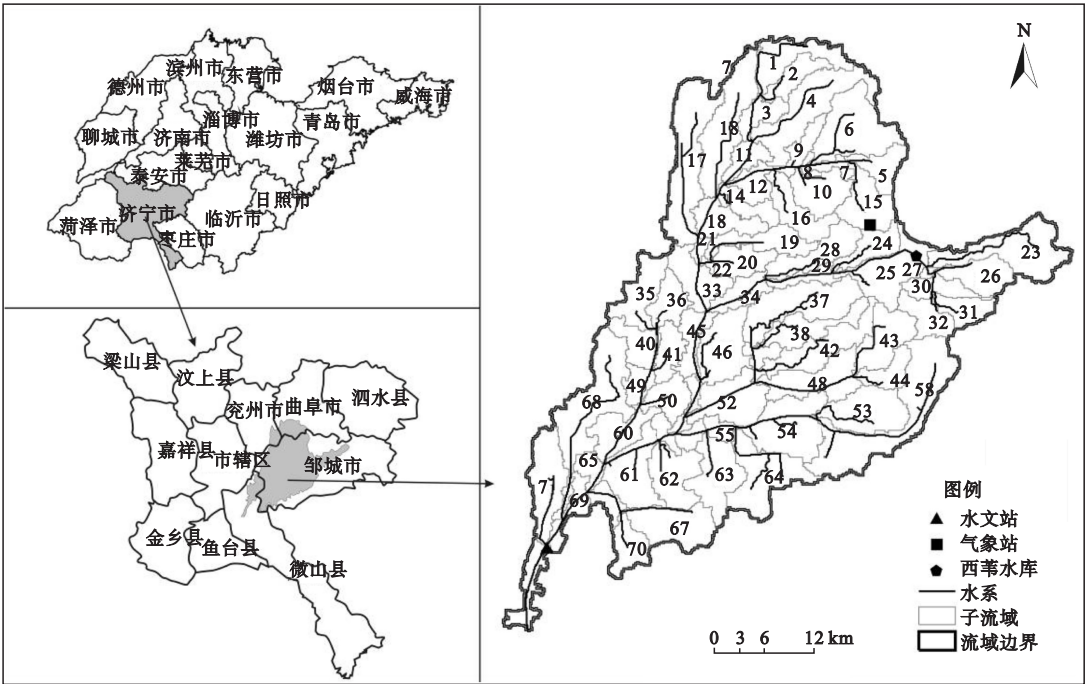


图 1 白马河流域位置示意图
Fig.1 Location of Baimahe basin

居为其周围 5×5 的矩形空间,并确定循环 10 次对 2017 年的土地利用情景进行预测(王学,2012)。

1.2.2 SWAT 模型 SWAT 模型是基于水循环和水量平衡的原理对流域产流过程进行模拟的。模拟过程可分为水循环的陆面部分(即产流和坡面汇流部分)和水循环的水面部分(即河道汇流部分)(王学,2012)。前者又被称为坡面水文过程,控制着每个子流域内主河道的水、沙、营养物质和化学物质等的输入量,其子流域模块可分成水文、气象、泥沙、土壤温度、作物生长、营养物、农药/杀虫剂和农业管理等 8 个模块;后者又称为河道水文过程,主要考虑水、沙、N、P 等营养物质和杀虫剂等 在河网中的输移,包括河道汇流演算和蓄水体(如水库、池塘/湿地等)汇流演算两大部分(Kannan *et al.*, 2007)。SWAT 模型依循下列水量平衡方程:

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^t (R_{day} - Q_{surf} - E_a - W_{deep} - Q_{gw}) \tag{1}$$

式中, SW_t 为土壤最终含水量(mm), SW_0 为在第 i 天时的土壤初始含水量(mm), i 为时间, R_{day} 为第 i 天的降水量(mm), Q_{surf} 为第 i 天的地表径流量(mm), E_a 为第 i 天的地表蒸散发量(mm), W_{deep} 为第 i 天进入地下含水层的水量(mm), Q_{gw} 为第 i 天的逆反回流量(mm)。

建模过程中,首先利用流域 DEM 和实际水系划分分子流域,然后带入重分类后的流域土地利用数据和土壤空间分布数据,进行流域响应单元(HRUs)的划分。其中,土地利用数据采用的是 2007 年的解译结果。HRUs 是拥有相同的土地利用、土壤类型和坡度级别的均质体,也是 SWAT 模型中最基本的运算单元。白马河流域共划分 73 个子流域,386 个 HRUs。模型的计算首先在 HRUs 水平上进行,计算完成后汇总到子流域水平,最后由各个子流域汇总到流域总出口。

表 1 1987—2007 年白马河流域土地利用变化
Table 1 Land use changes from 1987 to 2007 in Baimahe basin

土地利用类型	1987 年		1997 年		2007 年		1987—2007 年 净变化 (km ²)	年变化率 (km ² ·a ⁻¹)
	面积 (km ²)	比例 (%)	面积 (km ²)	比例 (%)	面积 (km ²)	比例 (%)		
耕地	723.77	77.32	704.35	75.24	657.54	70.24	-66.23	-6.02
有林地	64.60	6.90	55.25	5.90	44.31	4.73	-20.29	-1.85
灌木林地和疏林地	35.83	3.83	33.79	3.61	42.81	4.57	6.99	0.64
草地	10.35	1.11	1.83	0.20	2.45	0.26	-7.90	-0.72
居民点及建设用地	83.72	8.94	124.34	13.28	170.48	18.21	86.77	7.89
水域	16.58	1.77	15.33	1.64	16.75	1.79	0.16	0.02
未利用地	1.24	0.13	1.19	0.13	1.75	0.19	0.51	0.05

1.2.3 多目标决策函数法 采用多目标决策方法(潘竟虎等,2010;郑奕等,2010),计算不同土地利用类型对流域径流深的贡献系数。

定义径流深为 $R_x, V_a, V_b, V_c, V_d, \dots$ 等为相应的单位面积(km²)耕地(A_x)、有林地(F_x)、灌木林地和疏林地(W_x)、居民点及建设用地(U_x)等土地利用类型所影响的径流深,单位均为 mm·km⁻²,其中 x 为不同的土地利用情景,如 1987 年、1997 年、2007 年和 2017 年等。年平均径流深 R_x 可以用下式表达:

$$R_x = V_a \times A_x + V_b \times F_x + V_c \times W_x + V_d \times U_x + \dots \tag{2}$$

分别把 n, m, p 和 q 等(m, p 和 q 的意义同 x ,本文分别指 1987 年、1997 年、2007 年和 2017 年)的不同土地利用情景下的径流深数据代入公式(3),建立如下矩阵:

$$\begin{bmatrix} R_m - R_n \\ R_p - R_m \\ R_q - R_p \\ R_q - R_m \\ \dots \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_m - A_n & F_m - F_n & W_m - W_n & U_m - U_n \\ A_p - A_m & F_p - F_m & W_p - W_m & U_p - U_m \\ A_q - A_p & F_q - F_p & W_q - W_p & U_q - U_p \\ A_q - A_m & F_q - F_m & W_q - W_m & U_q - U_m \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \\ V_d \end{bmatrix} \tag{3}$$

对矩阵进行计算,即可得出 $V_a, V_b, V_c, V_d, \dots$ 的值,即为不同土地利用类型对径流深的贡献系数。

2 结果与分析

2.1 流域土地利用变化分析及预测

2.1.1 1987—2007 年流域土地利用变化 根据 2007 年发布的《土地利用现状分类》,并结合流域土地利用的实际,制定了白马河流域的土地利用分类体系,将流域土地利用类型划分为耕地、有林地、灌木林地和疏林地、草地、居民点及建设用地、水域和未利用地 7 大类。对 1987 年、1997 年和 2007 年流域土地利用分类结果进行计算、统计,见表 1。

1987—2007 年白马河流域土地利用类型均以耕地、林地、灌木林地和疏林地和居民点及建设用地为主(表 1),这 4 种土地利用类型均占流域总面积的 96% 以上(1987 年为 96.99%,1997 年为 98.04%,2007 年为 97.76%);而草地、水域和未利用地的面积相对较小,其比例均不足 2%。从各土地利用类型的面积大小来看,均为耕地>居民点及建设用地>林地>灌木林地和疏林地>水域>草地>未利用地。

具体而言,1987—2007 年白马河流域耕地、林地和草地的面积呈下降趋势,分别下降了 66.23、20.29 和 7.90 km²,耕地的降幅最大,减少的耕地主要转变为居民点及建设用地;有林地的降幅次之,2010 年 9 月的实地考察显示,减少的有林地主要转化为灌木林地及疏林地。就年变化率而言,耕地下降的速度最快,为-6.02 km²·a⁻¹;其次为有林地,草地下降的速度最小,仅为-0.72 km²·a⁻¹。灌木林地和疏林地的面积在 1987—1997 年呈微弱下降趋势,在 1997—2007 年则呈显著上升趋势,面积增加了 26.68%,因此,1987—2007 年该土地利用类型的面积总体呈上升趋势,共增加了 6.986 km²。此外,居民点及建设用地、水域和未利用地的面积也均呈上升趋势,其中,居民点及建设用地增幅较大,研究期内共增长了 86.77 km²,年增长速率也最快,为 7.89 km²·a⁻¹,说明流域内该土地利用类型的扩展规模较大,扩展速度较快,这与研究期内,流域城市化进程加快,城镇建设大量占用耕地是分不开的;未利用地面积增加了 0.51 km²,主要是由于流域土地开发利用过程中,废弃土石、灰渣、尾矿的堆积、压占等侵占了大量的耕地和有林地,造成了废弃地面积不断增加,因此,流域内未利用地所占比例虽较小,但年变化率却达到了 0.05 km²·a⁻¹。

2.1.2 基于 CA-Markov 模型的流域土地利用模拟及预测 为了检验 CA-Markov 模型在白马河流域运用的准确性,首先根据解译得到的 1987 年和 1997 年的土地利用数据,利用 IDRISI Andes 15.0 软件的 Markov 模块计算得到的 1987—1997 年土地利用状态转移概率矩阵,然后运用该软件的 CA-Markov 模块对流域 2007 年的土地利用情景进行模拟,并计算得到反映模拟结果与解译结果的吻合程度的 Kappa 系数,为 0.867,说明 CA-Markov 模型的模拟精度较高,可以作为流域未来土地利用预测的方法。因此,本文以 2007 年的土地利用数据为基期数据,根据

Markov 模块计算得到的 1997—2007 年的状态转移概率矩阵,对流域 2017 年的土地利用情景进行了预测(表 2)。

由表 2 可知,2017 年流域土地利用类型仍以耕地、居民点及建设用地、灌木林地和疏林地、林地为主,各土地利用类型面积所占比例也与 2007 年的相似,均呈现耕地的比例最大,居民点及建筑用地次之,未利用地最小的格局;不同的是,因灌木林地和疏林地面积增幅较大,其所占比例已超过有林地跃居流域第三。2007—2017 年各土地利用类型的变化趋势与 1997—2007 年的基本一致:居民点及建设用地增加的面积最大,为 50.85 km²;灌木林地和疏林地次之,为 0.53 km²;而耕地和有林地有所下降,下降的面积分别为 56.92 和 2.85 km²。

2.2 SWAT 模型模拟结果

SWAT 模型运行过程中涉及到众多影响径流模拟效果的参数。这些参数对模型的影响大小不同,对影响较小且不甚敏感的参数进行率定会增加率定时间,且对优化模型预测效果作用不大(Li *et al.*, 2010)。因此,为了提高 SWAT 模型的模拟速度,须将参数进行简化,选取较为敏感的参数进行率定,然后采取一定措施获得敏感性较高的参数的最优解,带入模型,以获得较好的模拟结果。本文采用由 Beven 和 Binley 于 1992 年提出的 GLUE(Generalized Likelihood Uncertainty Estimation)模型进行 SWAT 模型的参数率定和模型校正(Beven & Binley, 1992)。GLUE 模型可较好地解决 SWAT 模型自带的 SCE(Shuffled Complex Evolution)优化算法参数率定繁琐且收敛速度不理想等问题,并得到使模型模拟效果较好的一系列参数的最优解集合。GLUE 模型最终确定的影响白马河流域径流的敏感性参数及其取值范围见表 3。

表 2 2017 年白马河流域土地利用信息统计
Table 2 Statistics of land use types in 2017 in Baimahe basin

土地利用类型	面积 (km ²)	比例 (%)	2007—2017 年变化率	2007—2017 年净变化
耕地	600.63	64.16	-56.92	-5.17
有林地	41.46	4.43	-2.85	-0.26
灌木林地和疏林地	48.12	5.14	5.31	0.48
草地	3.25	0.35	0.80	0.07
居民点及建筑用地	221.34	23.64	50.85	4.62
水域	19.07	2.04	2.33	0.21
未利用地	2.29	0.24	0.54	0.05

表 3 影响径流的敏感性参数及取值范围
Table 3 Parameters sensitive to runoff and their value ranges

参数名称	含义	最小值	最大值
ALPHA_BF	基流 α 系数	0.01	0.07
SOL_K(1)	第一土壤层饱和水电导率	-0.20	0.80
SFTMP	降雪气温	-0.30	1.00
CN2	土壤湿度 II 下 SCS 径流曲线系数	-0.07	0.90
CH_K2	河道有效水电导率	5.60	12.00
SOL_AWC(1)	第一土壤层有效含水量	0.02	0.40
ALPHA_BNK	河岸储水回流系数	0.00	1.00
CH_N2	主河道曼宁系数值	0.00	0.08
GW_DELAY	地下水滞后系数	34.00	43.00
SOL_BD(1)	第一土壤层含水容重	-0.05	0.06

SWAT 模型模拟效果的评价指标主要有 Nash-Sutcliffe 效率系数 (NS 系数) 和相关系数 (R^2) :

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{o,i} - Q_{m,i})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{o,i} - \bar{Q}_o)^2} \tag{4}$$

$$R^2 = \frac{[\sum_{i=1}^n (Q_{o,i} - \bar{Q}_o)(Q_{m,i} - \bar{Q}_m)]^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{o,i} - \bar{Q}_o)^2 \sum_{i=1}^n (Q_{m,i} - \bar{Q}_m)^2} \tag{5}$$

式中, $Q_{o,i}$ 为实测值, $Q_{m,i}$ 为模拟值, \bar{Q}_o 为实测值的平均值。一般而言, NS 系数 >0.5 且 $R^2 >0.6$, 即可认为模拟取得了显著效果。

Kannan 等(2007)研究认为, 应选择径流较平稳的时期进行 SWAT 模型的校正和验证。分析白马河流域出口处水文站的实测径流数据(1970—2000 年), 1986—1995 年年均径流量的变化相对较平稳, 最终选择 1991—1995 年为模型校正期, 1996—2000

年为模型验证期。首先将 1991—1995 年的实测年径流数据带入 GLUE 模型, 并根据径流参数的相对敏感性, 不断调整参数的取值范围, 以求达到较好的模拟效果; 然后带入 1991—1995 年的逐月径流数据对参数进行微调, 使得模拟效果达到最优; 最后带入 1996—2000 年的实测逐月径流数据对校正好的模型进行验证。最终得到的校正期和验证期模型的模拟效果见图 4、图 5 和表 4。

根据图 4, 校正期各年的模拟结果与实测结果均较为吻合, 说明模型对逐年径流的模拟效果较好; 根据图 5, 校正期逐月径流的模拟效果总体优于验证期, 这可能与校正期的年径流量普遍大于验证期有关。

陈军锋等(2004)研究认为, 根据 NS 系数和相关系数 R^2 可将 SWAT 模型的模拟效果划分为由优到劣的甲、乙、丙、丁 4 个等级: ≥ 0.9 为甲等; $0.7 \sim 0.9$ 为乙等; $0.5 \sim 0.69$ 为丙等; <0.5 为丁等。从表 4 可以看出, 模型在校正期和验证期的模拟结果均

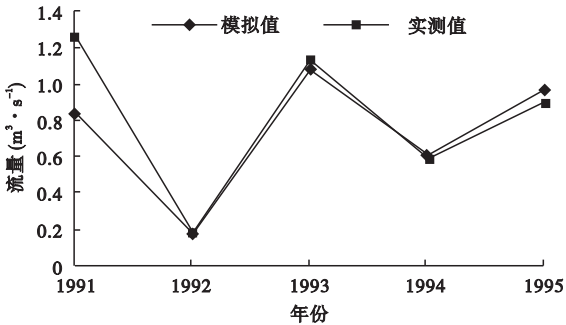


图 4 校正期(1991—1995 年)模拟与实测逐年径流数据对比
Fig. 4 Comparison of simulated and observed yearly runoff data during calibration (1991—1995)

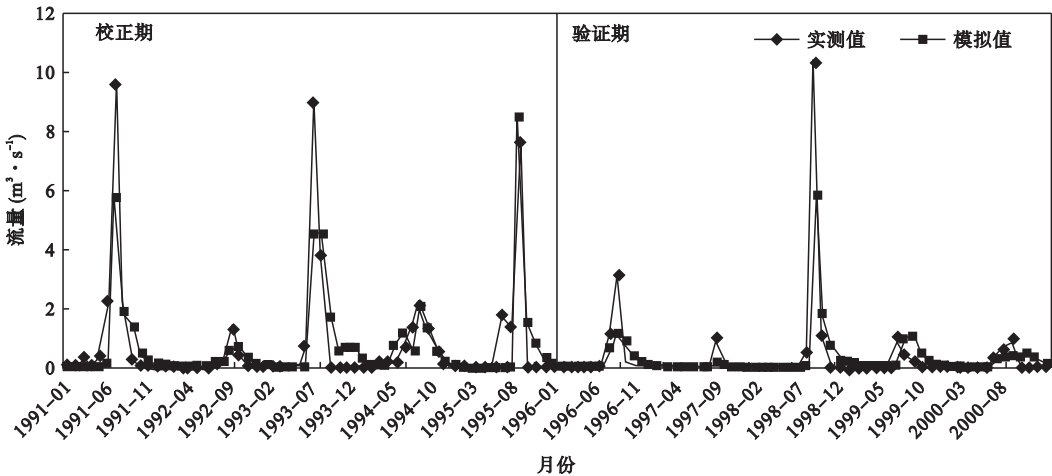


图 5 校正期与验证期模拟与实测逐月径流数据对比
Fig. 5 Comparison of stimulated and observed monthly data during calibration and validation

表 4 校正期和验证期流域 SWAT 模型模拟效果
Table 4 Calibration and validation results of SWAT model

	NS 系数	等级	R^2	等级
校正期	0.77	乙等	0.79	乙等
验证期	0.74	乙等	0.75	乙等

达到了乙等以上的标准,且 NS 系数和 R^2 的值均高于 0.7,说明 SWAT 模型对白马河流域径流的模拟精度较高,模型在白马河流域是适用的。

2.3 不同土地利用类型对流域产流影响的定量分析

2.3.1 不同土地利用情景的产流模拟 将 1987 年、1997 年、2007 年和 2017 年的土地利用情景分别带入校正好的 SWAT 模型,并对模型的输出结果进行统计分析,得到不同土地利用情景下流域 1986—2000 年时段内逐年径流深的平均模拟结果(图 6)。

根据图 6,土地利用情景不同,流域逐年径流深的变化趋势大致相似(表 5):1986—1991 年时段内,流域年径流深均呈显著的上升趋势,表现为 1987→2017 年,各趋势线方程的一次项系数均为正值,且相关系数 R^2 均大于 0.7;1992—2000 年时段内,流域年径流深均波动较大,但总体呈微弱的下降趋势,表现为 1987→2017 年,各趋势线方程的一次项系数均为负值,但相关系数 R^2 的值较小。

不同的土地利用情景之间,流域逐年径流深的大小呈现有规律的变化,具体表现为:1987→2007

年,流域逐年径流深普遍呈显著下降趋势,各情景下 1986—2000 年时段内的流域年平均径流深分别为 129.10、119.98 和 115.86 mm;2007→2017 年,径流深变化出现逆转,呈较大规模的上升趋势,1986—2000 年时段内的流域年平均径流深由 115.86 mm 上升至 134.15 mm,变化了 15.8%。因此,2017 年情景下的流域年径流深最高,高于 1987 年、1997 年和 2007 年情景下的径流深。此外,土地利用情景不同,1986—2000 年时段内流域年径流深的变异系数也不同:1987—2017,变异系数分别为 8.65%、8.21%、8.00% 和 8.96%。由此可见,白马河流域的土地利用变化不仅对流域径流深的大小产生影响,还在一定程度上影响了流域径流深的年际分布。

2.3.2 不同土地利用类型对径流量的贡献系数计算 为进一步分析白马河流域主要土地利用类型的面积变化对流域径流深大小的影响程度,采用多目标决策方法,计算主要土地利用类型对流域径流量的贡献系数。

前已述及,白马河流域土地利用类型以耕地、有林地、灌木林地和疏林地、居民点及建设用地为主,这 4 种土地利用类型占流域总面积的 96% 以上,其年际变化也较为明显,对流域产流的影响相对较大;而草地、水域和未利用地的面积相对较小,其比

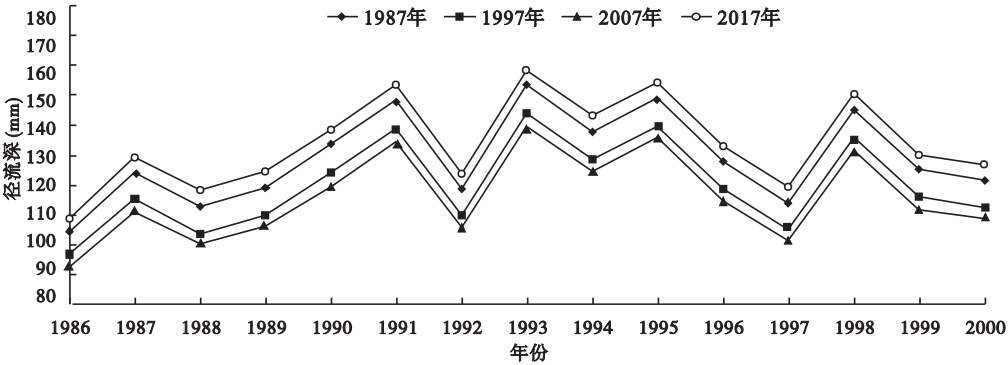


图 6 不同土地利用情景下的逐年径流深
Fig. 6 Annual runoff depth under different land use scenarios

表 5 不同土地利用情景下逐年径流深的变化趋势
Table 5 Changes of annual runoff depth under different land use scenarios

年份	1987 年	1997 年	2007 年	2017 年
1986—1991	趋势线方程 $y = 7.24x + 98.49$ R^2 0.76	趋势线方程 $y = 6.95x + 90.53$ R^2 0.75	趋势线方程 $y = 6.86x + 86.69$ R^2 0.75	趋势线方程 $y = 7.35x + 103.08$ R^2 0.77
1992—2000	趋势线方程 $y = -1.55x + 140.35$ R^2 0.09	趋势线方程 $y = -1.55x + 131.14$ R^2 0.09	趋势线方程 $y = -1.52x + 126.90$ R^2 0.09	趋势线方程 $y = 1.51x + 145.28$ R^2 0.09

表 6 土地利用类型对径流深的贡献系数
Table 6 Coefficients of different land use types on runoff depth

土地利用类型	贡献系数 V	$\Delta_{1987-1997}$	$\Delta_{1997-2007}$	$\Delta_{2007-2017}$
耕地	-0.11	2.14	5.15	6.26
有林地	2.61	-24.41	-28.56	-7.44
灌木林地和疏林地	0.38	-0.77	3.43	2.02
居民点及建设用地	0.34	13.81	15.69	17.29

$\Delta_{1987-1997}$ 、 $\Delta_{1997-2007}$ 和 $\Delta_{2007-2017}$ 分别为 1987—1997 年、1997—2007 年和 2007—2017 年各土地利用类型面积的总变化造成的径流深的总变化(mm)。

例均不足 2%,这 3 种土地利用类型本身对流域产流的影响也相对较小,因此,本文仅计算耕地、有林地、灌木林地和疏林地、居民点及建设用地这 4 种土地利用类型对流域产流的贡献系数。

利用 MATLAB,计算得到耕地、有林地、灌木林地和疏林地、居民点及建设用地等 4 种土地利用类型对径流深的贡献系数 V_a 、 V_b 、 V_c 和 V_d 分别为 -0.11、2.61、0.38 和 0.34 mm·km⁻²(表 6)。

4 种主要土地利用类型对流域径流量的贡献系数按绝对值从大到小依次为有林地、灌木林地和疏林地、居民点及建设用地、耕地(表 6);这表明,就单位不同土地利用类型对流域产流的贡献力而言,有林地>灌木林地和疏林地>居民点及建设用地>耕地。

具体而言,有林地的贡献系数为 2.61 mm·km⁻²,说明有林地具有促进产流的作用,这可能因其多位于山地丘陵区的坡地处。相同情况下,坡度越大,产流量越大,加之土层较薄且土壤欠肥沃,植被覆盖率较低、林木密度较小且植被叶面积指数较小,地面枯枝落叶层和腐殖质层浅薄,相比耕地等其他用地难以对坡面径流产生较好的拦蓄作用;同时,白马河流域位于温带季风气候区,降水多集中于夏季且多大到暴雨,一般而言,雨强越大,产流量越大(肖连刚和刘前进,2010),因此有林地区域降水易直接形成径流,下渗相对较小。研究时段内,1987—2007 年有林地面积持续减少,被灌木林地和疏林地以及耕地所占据,造成了径流深的不断减少;而到 2017 年,由林地面积缩小所造成的径流深仍会持续下降。

灌木林地和疏林地单位面积的变化对径流深的贡献为 0.38 mm·km⁻²,说明灌木林地和疏林地也会促进流域径流增加。因灌木林地和疏林地大多位于流域山地丘陵等海拔较高的地区,长势较差,且植被覆盖率较低;相对于其他土地利用类型,其降水时的下渗较少,因此面积增加,流域坡面径流也相对增

大。从时间上来看,1987—1997 年,灌木林地和疏林地面积减小,对径流减小具有一定的贡献作用;1997—2007 年其面积增加则促进了径流的产生;而到 2017 年,灌木林地和疏林地面积持续增加,由其影响的径流深也会相应增加。

居民点及建设用地的贡献系数为 0.34 mm·km⁻²,说明该种土地利用类型在改变地表和地下径流的过程中是发挥正效应的。这是因为村镇道路、基础设施等硬化路面面积增加,减少了地表水的下渗,降水易形成地表径流,从而增加了流域的径流深。研究时段内,居民点及建设用地面积变化最大,呈不断上升趋势,由此造成的径流深也在不断增加。

耕地对径流深的贡献系数最小,为 -0.11 mm·km⁻²。显然,耕地面积变化与径流深的变化是相反的,即耕地面积的扩大会导致径流深减小,而耕地面积缩小,径流深则呈上升趋势。究其原因,主要是耕地地面平缓,易于降水的下渗;同时人类的爬犁、翻耕等耕作活动也在很大程度上促进了下渗过程,抑制了降水向径流的转化。在研究时段内,耕地面积不断缩小,由其造成了径流深逐渐增加;而耕地下降幅度的不断增加,由其影响的径流深的增幅也逐年增大。

3 讨 论

20 世纪 80 年代以来,白马河流域的主要土地利用类型为耕地、有林地、灌木林地和疏林地、居民点及建设用地。利用 SWAT 模型定量分析流域主要土地利用类型对径流深的影响程度,结果表明:有林地、灌木林地和疏林地、居民点及建设用地变化均有促进产流的作用,三者对径流深的贡献系数分别为 2.61、0.38 和 0.34 mm·km⁻²;而耕地对径流的产生起抑制作用,其贡献系数为-0.11 mm·km⁻²。

针对林地与径流的关系问题,国内外学者虽多有涉及,但目前学术界还没有统一定论。李文华等(2001)认为,森林与水的关系极其复杂,森林对径流量的影响因地域、森林类型以及森林管理方式等因素的不同而存在差异;华北土石山区林地植被覆盖率增加会导致流域径流深增加(刘昌明和于静洁,1989);此外,金栋梁(1989)、郝芳华等(2004)分别通过对长江流域和黄河下游大面积森林流域的分析,均得出森林植被覆盖率高有利于流域年径流深增加的结论。本文的研究结果与上述学者关于林地促进径流产生的论断是一致的。

本文定量计算了不同土地利用类型对流域径流深的影响,对于土地利用变化水文效应的研究具有一定意义。因流域土壤、气象等数据的时空精度的限制,加之采用的多目标决策分析法仅将不同土地利用类型与径流深之间的关系假定为线性关系,研究存在一定的局限性。今后的研究应在数据精度和研究方法方面多做工作。除了土地利用变化对径流产生影响外,气候对径流的影响也不容忽视,如何定量分析气候和土地利用变化对白马河流域径流的影响,也是需要进一步探讨的问题。

参考文献

- 陈军锋,李秀彬. 2004. 土地覆被变化的水文响应模拟研究. *应用生态学报*, **15**(5): 833-836.
- 陈军锋,李秀彬,张明. 2004. 模型模拟梭磨河流域气候波动和土地覆被变化对流域水文的影响. *中国科学 D 辑: 地球科学*, **34**(7): 668-674.
- 高超,翟建青,陶辉,等. 2009. 巢湖流域土地利用/覆被变化的水文效应研究. *自然资源学报*, **24**(10): 1794-1802.
- 郝芳华,陈利群,刘昌明,等. 2004. 土地利用变化对产流和产沙的影响分析. *水土保持学报*, **18**(3): 5-8.
- 金栋梁. 1989. 森林对水文要素的影响. *人民长江*, (1): 28-35.
- 李丽娟,姜得娟,李九一,等. 2007. 土地利用/覆被变化的水文效应研究进展. *自然资源学报*, **22**(2): 212-224.
- 李文华,何永涛,杨丽韞. 2001. 森林对径流影响研究的回顾与展望. *自然资源学报*, **16**(5): 398-406.
- 刘昌明,于静洁. 1989. 森林拦蓄洪水的作用——以黄土高原林区为例//中国林学会森林水文与流域治理专业委员会. 全国森林水文学术讨论会文集. 北京:测绘出版社: 84-90.
- 潘竞虎,石培基,赵锐锋. 2010. 基于 LP-MCDM-CA 模型的土地利用结构优化研究——以天水市为例. *山地学报*, **28**(4): 407-414.
- 王中根,刘昌明,吴险峰. 2003. 基于 DEM 的分布式水文模型研究综述. *自然资源学报*, **18**(2): 168-173.
- 王学,张祖陆,张超. 2011. 基于 CA-Markov 模型的白马河流域土地利用景观格局变化及预测研究. *水电能源科学*, **29**(12): 111-115.
- 王学. 2012. 基于 SWAT 模型的白马河流域土地利用/覆被变化的水文效应研究(硕士学位论文). 济南:山东师范大学.
- 魏怀斌,张占庞,杨金鹏. 2007. SWAT 模型土壤数据库建立方法. *水利水电技术*, **38**(6): 15-18.
- 肖连刚,刘前进. 2010. 人工降水条件下鲁中南丘陵地区产流过程研究. *人民黄河*, **32**(10): 111-113.
- 张东,张万昌. 2004. SWAT 2000 气象模拟器的随机模拟原理、验证及改进. *资源科学*, **26**(4): 28-36.
- 张旭昇,孙继成,魏国孝,等. 2010. 改进的马斯京根法在渭河洪水演算中的应用. *人民黄河*, **32**(11): 36-38.
- 郑奕,魏文寿,崔彩霞. 2010. 新疆焉耆盆地水资源承载力研究. *中国人口·资源与环境*, **20**(11): 60-65.
- Beven K, Binley A. 1992. The future of distributed models-model calibration and uncertainty prediction. *Hydrological Processes*, **6**: 279-298.
- Faith G, Wilson G, Francis M, et al. 2009. Climate change impact on SWAT simulated stream flow in western Kenya. *International Journal of Climatology*, **29**: 1823-1834.
- Jain SK, Tyagi J, Singh V. 2010. Simulation of runoff and sediment yield for a Himalayan watershed using SWAT model. *Journal of Water Resource and Protection*, **2**: 267-281.
- Kannan K, White SM, Worrall F, et al. 2007. Sensitivity analysis and identification of the best evapotranspiration and runoff options for hydrological modeling in SWAT 2000. *Journal of Hydrology*, **332**: 456-466.
- Liu XH, Andersson C. 2004. Assessing the impact of temporal dynamics on land-use change modeling. *Computers, Environment and Urban Systems*, **28**: 107-124.
- Li CB, Qi JG, Feng ZD, et al. 2010. Parameters optimization based on the combination of localization and auto-calibration of SWAT model in a small watershed in Chinese Loess Plateau. *Frontiers of Earth Science in China*, **4**: 296-310.
- Nosetto MD, Jobbagy EG, Paruelo JM. 2005. Land-use change and water losses: The case of grassland afforestation across a soil textural gradient in central Argentina. *Global Change Biology*, **11**: 1101-1117.
- Onstad CA, Jamieson DG. 1970. Modelling the effects of land use modifications on runoff. *Water Resources Research*, **6**: 1287-1295.
- Saleh A, Arnold JG, Gassman PW, et al. 2000. Application of SWAT for the upper north Bosque River Watershed. *Transactions of the ASABE*, **43**: 1077-1087.
- Srinivasan R, Arnold JG. 1994. Integration of a basin-scale water quality model with GIS. *Journal of the American Water Resources Association*, **30**: 453-462.

作者简介 王学,女,1989年生,博士研究生,主要从事土地利用变化与水环境分析等方面的研究。E-mail: wangx.12b@igsrr.ac.cn

责任编辑 张敏