

SWAT 模型灵敏性分析模块在中尺度流域的应用 ——以密云县红门川流域为例

朱 丽^{1,2}, 秦富仓², 姚云峰², 张丽娟^{2,3}, 余新晓⁴

(1. 包头师范学院 资源与环境学院, 内蒙古 包头 014030; 2. 内蒙古农业大学 生态环境学院, 呼和浩特 010019; 3. 锡林郭勒盟水土保持工作站, 内蒙古 锡林郭勒 026000; 4. 水土保持与荒漠化防治教育部重点实验室, 北京林业大学 水土保持学院, 北京 100083)

摘 要: SWAT 模型是基于水文过程的、具有很强物理机制的流域分布式水文模型。基于 AVSWAT2005 模型灵敏性分析模块, 在典型中尺度流域——北京密云县红门川流域应用与验证。通过灵敏性分析, 得到影响该流域产流模拟结果精度的主要参数因子, SCS 径流曲线系数(CN₂)、土壤可利用水量(SOL_AWC)、基流 α 系数(ALPHA_BF)的影响是显著的, 是最敏感因子。同时调整参数值, 采用 1991—2006 年的实测月流量数据对模型进行了校准和验证, 结果表明: 模型对月流量模拟的相对误差在模型校准期和验证期均小于 15%, 决定系数 R^2 大于 0.8, Nash—Sutcliffe 系数 Ens 高于 0.7, SWAT 模型对红门川流域产流的模拟结果良好。因此, SWAT 模型中的灵敏性分析模块可以应用在面积较小的中尺度流域, 具有一定的推广意义。

关键词: SWAT 模型; 灵敏性分析; 参数因子; 红门川流域; 中尺度流域

中图分类号: P333.9

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2011)01-0161-05

Research of Sensitivity Analysis Module of SWAT Model in Middle-scale Watershed

—A Case Study of Hongmenchuan Watershed in Miyun County

ZHU Li^{1,2}, QIN Fu-cang², YAO Yun-feng², ZHANG Li-juan^{2,3}, YU Xin-xiao⁴

(1. Department of Resource and Environment, Baotou Normal College, Baotou,

Inner Mongolia 014030 China; 2. College of Ecological and Environmental, Inner Mongolia Agricultural

University, Hohhot 010019, China; 3. Soil and Water Conservation Station in Xilinguole League, Xilinhaote,

Inner Mongolia 026000, China; 4. Key Laboratory of Soil and Water Conservation & Desertification Combating of Ministry of Education, School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: The soil and water assessment tool (SWAT) is a physically-based continuous event hydrologic model. This paper mainly introduces the sensitivity analysis model of the module AVSWAT 2005 principle, application and verified in Hongmenchuan watershed. Based on the sensitivity analysis, the main parameters affecting the simulated values in this watershed were determined, the CN₂, the SOL_AWC and the SOL_K were the significant and sensitive parameters. Adjusting the parameters based on the analyzed results, using 1991 to 2006 continuous simulations on monthly runoff, satisfied simulation results were obtained with the relative error was under 15%, Nash-sutcliffe coefficient (Ens) more than 0.7, and correlation coefficients R^2 exceeding 0.8, SWAT model of Yunzhou reservoir basin simulation result is good. Therefore, the application of sensitivity analysis module of SWAT model in soil-gravel area in middle-scale watershed of smaller area has improved the accuracy of simulation dramatically.

Key words: SWAT model; the sensitivity analysis; parameters; Yunzhou reservoir basin; middle-scale watershed

SWAT(Soil and Water Assessment Tool)模型是分布式水文模型,被广泛用于大、中尺度流域土地利用经营管理的影响评价^[1]。灵敏性分析是模型适用性研究的基础。由于参数的获取通常存在空间变异性、量测误差等问题致使模拟值与观测值之间吻合程度不高。一个灵敏参数的不确定性将会显著影响模型的预测结果,在模型验证期和校准期,对模型灵敏性参数的适当调节是非常重要的^[2]。模型参数的灵敏性分析正是基于上述问题而提出的。灵敏性分析是用来评价因模型输入参数的改变而导致输出结果相应改变的技术,灵敏性分析有助于识别对模型输出影响较为显著的参数^[2]。它的目的在于分析判断哪些输入参数值的变化对输出结果的影响很重要,从而提高模型的可用性。

对于模型灵敏性参数的分析^[3-8]表明,在以前的 SWAT 模型版本中,虽均达到了提高模型可用性的目的,但是模型参数的选取往往依赖于经验,缺乏科学依据,并没有形成一套完整的灵敏性分析方法。而 AVSWAT 2005 是 ArcView3. x GIS 软件的扩展,界面效果好,便于操作,并且新增添了灵敏性分析模块,该模块的增加正弥补了这方面的不足。

目前对于模型参数灵敏性的问题,多是针对面积较大的中尺度流域进行研究,如黄土丘陵沟壑区^[9]、东北平原区^[10]、三峡库区^[11]和华北土石山区^[12]等,并分别从产流、潜在蒸发量、非点源污染和气候、土地覆被等方面进行研究。但是 SWAT 模型参数灵敏性分析在面积相对较小的中尺度流域就产流方面的研究还较少,所以本文主要应用 AVSWAT 2005 模型的灵敏性分析模块,研究典型的中尺度流域——北京密云县红门川流域影响产流模拟结果精度的主导参数因子,以提高模型在中尺度流域的适用性。

1 研究区概况

红门川流域位于密云县东部山区,距密云县城 20 km。该流域西起东经 117°02′06″,东至东经 117°15′29″,南起北纬 40°21′06″,北至北纬 40°27′40″。流域面积 128 km²,均为山地,流域内有红门川河,是潮河的一条支流,流经密云县 3 个乡,至邓家湾入潮河。

红门川流域地处山区,地貌类型复杂,处在华北平原与蒙古高原的过渡地带,属燕山山脉,境内山峦起伏,东、西、北三面群山连绵,中部低缓,西南开阔,地势自北向西南倾斜,呈簸箕形,海拔 100~1 200 m。流域气候属暖温带半湿润季风型大陆性气候,具有四季分明、温差较大、光照充足、雨量不均、季风显著、降水集中、雨热同季等特征。因地貌相对高差变

化大,从而表现为明显的气候垂直变化。流域土壤类型较少,以山地棕壤及褐土分布为主。有机质较低,肥力水平中等,该土壤多为农用土壤,土层深厚,质地适中,土体构型良好,保水保肥能力强。

流域植被类型多种多样,具有明显的山地特征,山地植被丰富,是国家“三北”防护林和密云水库水源涵养林的重要组成部分。天然植被组成以中生、中旱生或旱生的多年生灌木为主。人工植被主要为针叶林(油松 *Pinus tabulaeformis*)、阔叶林(刺槐 *Robinia pseudoacacia* L、栓皮栎 *Quercus variabilis*)或灌丛(荆条 *Vitex negundo* var. *heterophylla*、酸枣 *Ziziphus jujuba* Mill. var. *spinosa*(Bunge)Hu)。

2 研究方法

2.1 流域基本数据获取

采用红门川流域 2005 年 1:10 万地形图,经过数字化处理得到研究区 DEM 图,投影为 Albers 等面积圆锥投影,椭球参数为 Krasovskii。利用流域的 1:10 万土地利用图和土壤类型图,在 GIS 支持下,建立该流域土地利用属性和土壤属性的空间数据库。降水数据利用流域内降雨测站 1991—2006 年的逐日降水数据。气象资料采用流域气象站 1991—2006 年的气象数据。水文数据采用该流域 1991—2006 年逐日径流数据。该流域 SWAT 模型试验研究基础数据见图 1 及附图 5—6。



图 1 红门川流域 DEM 图

2.2 LH-OAT 灵敏性分析方法

在 AVSWAT2005 中采用的是 LH-OAT(Latin Hypercube One-factor-At-a-Time)敏感度分析方法,是由 Morris 于 1991 年提出的^[13]。它是结合了 LH(Latin Hypercube)采样法和 OAT 敏感度分析的一种新的方法,集中了两者的优点。LH-OAT 灵敏性分析方法是指对每一抽样点(LH 抽样法)进行 OAT 灵敏性分析^[14],灵敏性最终值是各局部灵敏性之和的平均值。该方法既保证了所有参数的所有区间都能够采样,又保证了模型每次的输出结果的变化能够确切地归因于输入的变化,从而保障了灵敏性分析的充分和有效性。SWAT 模型可用于灵敏性计算的模型参数见表 1。

表 1 灵敏性分析模型参数

变量	定义	变量	定义
ALPHA_BF	基流 α 系数	ESCO	土壤蒸发补偿系数
GW_DELAY	地下水滞后系数	EPCO	植物蒸腾补偿系数
GW_REVAP	地下水再蒸发系数	SPCON	泥沙输移线性系数
RCHRG_DP	深蓄水层渗透系数	SPEXP	泥沙输移指数系数
REVAPMN	浅层地下水再蒸发系数	SURLAG	地表径流滞后时间
QWQMN	浅层地下水径流系数	SMFMX	6 月 21 日雪融系数
CANMX	最大冠层蓄水量	SMFMN	12 月 21 日雪融系数
GWNO3	地下水中硝酸盐含量	SFTMP	降雪气温
CN2	SCS 径流曲线系数	SMTMP	雪融最低气温
SOL_K	土壤饱和水导电率	TIMP	结冰气温滞后系数
SOL_Z	土壤深度	NPERCO	氮下渗系数
SOL_AWC	土壤可利用水量	PPERCO	磷下渗系数
SOL_LABP	土壤初始易变磷含量	PHOSKD	土壤磷分离系数
SOL_ORGN	土壤初始有机氮含量	CH_EROD	河道可侵蚀系数
SOL_ORGP	土壤初始有机磷含量	CH_N	主河道曼宁系数值
SOL_NO3	土壤初始硝酸盐含量	TLAPS	气温下降率
SOL_ALB	潮湿土壤反照率	CH_COV	河道覆盖系数
SLOPE	平均坡度	CH_K2	河道有效水导电率
SLSUBSN	平均坡长	USLE_C	USLE 中植物覆盖度因子最小值
BIOMIX	生物混合效率系数	BLAI	最大潜在叶面积指数
USLE_P			USLE 中水土保持措施因子

3 AVSWAT 2005 模型模拟

3.1 模型灵敏性分析

在 ArcView 3.2 平台上,运行 AVSWAT 2005,自动生成格式化的模型参数和输入数据。在此基础上,经过 AVSWAT 2005 模拟计算,运行灵敏性分析模块,得到影响红门川流域产流模拟结果精度的 16 个重要参数见表 2。

表 2 灵敏性赋值表

分类	因子值	灵敏性
I	<0.05	低
II	0.05~0.2	中
III	0.2~1.0	高
IV	>1.0	很高

由表 3 可以看出:重要参数的灵敏性等级介于 I—III 之间,没有 IV 级,这是由于 SWAT 模型为美国农业部研制的,主要针对美国的现状,而在我国有一定差距,所以难达到很高的灵敏性。从研究区的灵敏性等级看,① SCS 径流曲线系数(CN₂)、土壤可利用水量(SOL_AWC)、基流 α 系数(ALPHA_BF)的影响是显著的,是最敏感因子,按灵敏性等级划分原则定为 III 级,灵敏性因子值分别为:0.526,0.389,0.333,均在 0.2~1 范围内,灵敏性等级高,即对径流的输出结果影响程度高。② 土壤蒸发补偿系数(ESCO)、土壤饱和导水电率(SOL_K),按灵敏性等级划分原则

定为 II 级,灵敏性因子值分别为 0.136 和 0.06,在 0.05~0.2 范围内,灵敏性等级中,即对径流的输出结果影响程度中等。③ 6 月 21 日雪融系数(SMFMX)、12 月 21 日雪融系数(SMFMN)、地表径流滞后时间(SURLAG)、河道有效水导电率(CH_K2)等因子,按灵敏性等级划分原则定为 I 级,其灵敏性因子均值<0.05,灵敏性等级低,即对径流的影响轻微或没有影响。

表 3 重要参数灵敏性值

参数代码	参数含义	重要性	灵敏性值	灵敏性等级
SMFMX	6 月 21 日雪融系数	8	0.00545	I
SMFMN	12 月 21 日雪融系数	13	0.00186	I
ALPHA_BF	基流 α 系数	3	0.33300	III
GWQMN	浅层地下水径流系数	12	0.00205	I
ESCO	土壤蒸发补偿系数	4	0.13620	II
SLOPE	平均坡度	15	0.00150	I
CH_K2	河道有效水导电率	10	0.00400	I
CN2	SCS 径流曲线系数	1	0.52600	III
SOL_AWC	土壤可利用水量	2	0.38900	III
SURLAG	地表径流滞后时间	14	0.00163	I
SMTMP	雪融最低气温	9	0.00530	I
TIMP	结冰气温滞后系数	7	0.00972	I
CANMX	最大冠层蓄水量	6	0.02260	I
SOL_K	土壤饱和导水电率	5	0.06050	II
CH_N	主河道曼宁系数值	11	0.00211	I
BIOMIX	生物混合效率系数	16	0.00083	I

3.2 模型校准验证

选用相对误差 R_e 、决定系数 R^2 和 Nash-Sutcliffe 系数 E_{ns} 评价模型的适用性^[15-19]。模型参数校准和验证选用红门川流域 1991—2006 年的实测径流数据。为了检验其参数率定的准确性和模拟的合理性,将数据系列分为校准和验证阶段。依据观测资料的完整性,选取 1991—1998 年作为模型模拟红门川流域水文过程的输入参数的校准时期,1999—2006 年作为模型参数的验证阶段。

通过调整模型参数使径流模拟值与实测值吻合,要求模拟值与实测值年均误差应小于实测值的

15%,月均值的线性回归系数 $R^2>0.6$,且 $E_{ns}>0.5$ 。本研究的校准结果完全符合以上要求,其中校准期的相对误差为 0.09,复相关系数为 0.87,Nash-Sutcliffe 系数为 0.86,验证期的相对误差为 0.07,复相关系数为 0.81,Nash-Sutcliffe 系数为 0.80。径流的模拟值与实测值的拟合效果较好,模型能够比较准确地模拟径流量,如图 2—3 和表 4 所示。

如图 2—3 所示,校准期的相对误差为 0.08,决定系数为 0.80,Nash-Sutcliffe 系数为 0.76,符合要求(要求模拟值与实测值年均误差应小于实测值的 15%,月均值的决定系数 $R^2>0.6$,且 $E_{ns}>0.5$)。

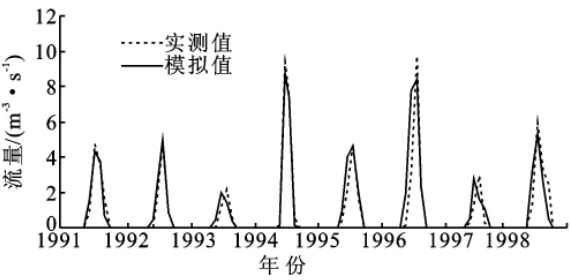


图 2 校准期月流量模拟值与实测值对比图

如图 4—5 所示,验证期的相对误差为 0.10,决定系数为 0.85,Nash-Sutcliffe 系数为 0.81,符合要求

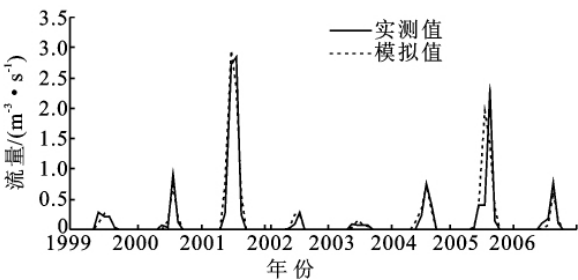


图 4 验证期月流量模拟值与实测值对比图

表 4 月径流模拟评价结果

时期	月均值/(m³·s⁻¹)		R_e	R^2	E_{ns}
	实测值	模拟值			
校准期	0.85	0.92	0.09	0.87	0.86
验证期	0.15	0.16	0.07	0.81	0.80

4 结论

通过 SWAT 模型灵敏性分析模块在红门川流域的应用,得到对径流模拟结果有重大影响的参数的灵敏性值及对应的灵敏度等级。得出重要的灵敏性参数:SCS 径流曲线系数(CN₂)、土壤可利用水量(SOL_AWC)、基流 α 系数(ALPHA_BF)对径流的影响是显著的,是最敏感的因子;土壤蒸发补偿系数(ESCO)、土壤饱和导水电率(SOL_K)对径流也有一定影响,是影响一般的因子。

同时采用 1991—2006 年实测月流量数据对模型

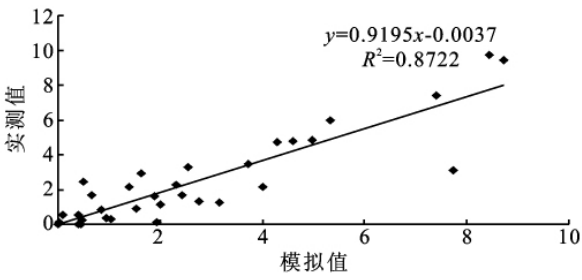


图 3 校准期月流量模拟值与实测值相关关系图

(要求模拟值与实测值年均误差应小于实测值的 15%,月均值的决定系数 $R^2>0.6$,且 $E_{ns}>0.5$)。

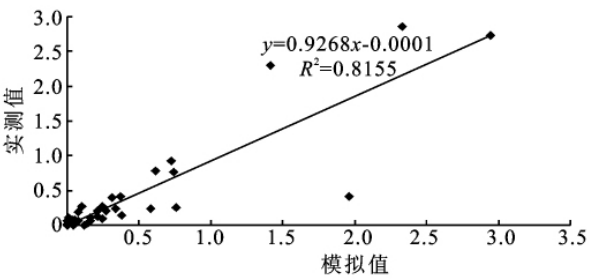


图 5 验证期月流量模拟值与实测值相关关系图

进行了校准和验证,校准期的相对误差为 0.09,复相关系数为 0.87,Nash-Sutcliffe 系数为 0.86;验证期的相对误差为 0.07,复相关系数为 0.81,Nash-Sutcliffe 系数为 0.80,本研究的校准结果完全符合要求。实测的输入数据和率定的数据可能存在很多潜在误差,包括实测数据产生的误差和降水量、土地利用类型和土壤类型的误差。所以该模型能够比较准确地模拟径流量,模型在面积较小的中尺度流域——红门川流域的适用性较好。

参考文献:

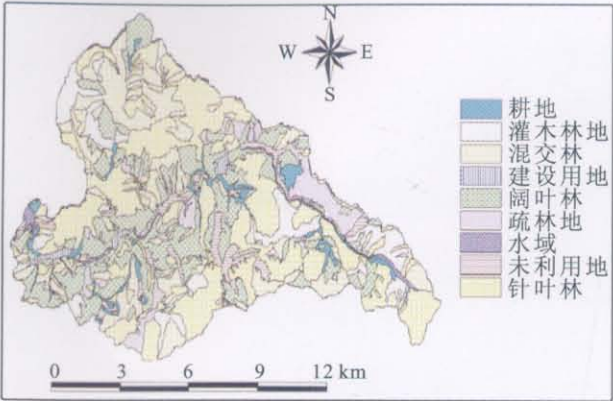
[1] 孙庆艳. 华北土石山区典型流域森林植被水文生态过程响应研究[D]. 北京:北京林业大学,2008.

[2] Chu Tzyy-Woei. Modeling hydrologic and water quality response of a mixed land use watershed in Piedmont physio-graphic region[D]. Maryland: University of Maryland, College Park,2003.

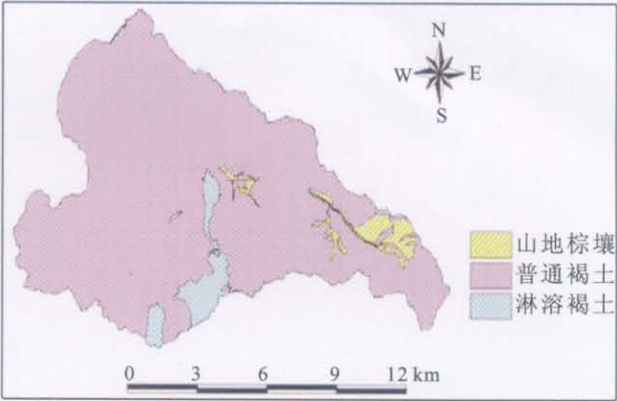
- [3] 李峰,胡铁松,黄华金. SWAT 模型的原理、结构及其应用研究[J]. 中国农村水利水电, 2008(3): 24-28.
- [4] 梁犁丽,汪党献,王芳. SWAT 模型及其应用进展研究[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2007, 5(2): 125-131.
- [5] Huisman J A, Breuer L, Fredr H G. Sensitivity of simulated hydrological fluxes towards changes in soil properties in response to land use change[J]. Physics and Chemistry of the Earth, 2004, 29(11/12): 749-758.
- [6] Romanowicz A A, Vancloosterm M, Rounsevell M, et al. Sensitivity of the SWAT model to the soil and land use data parametrisation: a case study in the Thyle Catchment, Belgium[J]. Ecological Modelling, 2005, 187(2): 27-39.
- [7] Klaus E, Lytz B, Hans-Georg F. Parameter uncertainty and the significance of simulated land use change effects [J]. Journal of Hydrology, 2003, 273(1): 164-176.
- [8] Holvoet K, Van Griensven A, Seuntjens P, et al. Sensitivity analysis for hydrology and pesticide supply towards the river in SWAT[J]. Physics and Chemistry of the Earth, 2005, 30(8): 518-526.
- [9] 宋艳华. SWAT 模型辅助下的径流模拟与生态恢复水文响应研究: 以陇西黄土高原华家岭南河流域为例[D]. 兰州: 兰州大学, 2006.
- [10] 王鹏. 基于 SWAT 模型的岔路河星星哨水库以上流域径流模拟[D]. 长春: 吉林大学, 2007.
- [11] 许其功,席北斗,何连生,等. 三峡库区大宁河流域非点源污染研究[J]. 环境工程学报, 2008, 2(3): 299-303.
- [12] 张丽娟,秦富仓,岳永杰,等. SWAT 模型灵敏性分析模块在云州水库流域的研究[J]. 水土保持通报, 2010, 30(3): 122-127.
- [13] Morris M D. Factorial sampling plans for preliminary computational experiments[J]. Technometrics, 1991, 33(2): 123-131.
- [14] Romanowicz A A, Vanclooster M, Rounsevell M, et al. Sensitivity of the SWAT model to the soil and land use data parametrisation: a case study in the Thyle catchment, Belgium[J]. Ecological Modelling, 2005, 187(1): 27-39.
- [15] 范丽丽,沈珍瑶,刘瑞民,等. 基于 SWAT 模型的大宁河流域非点源污染空间特性研究[J]. 水土保持通报, 2008, 28(4): 133-137.
- [16] 张雪松,郝芳华,杨志峰. 基于 SWAT 模型的中尺度流域产流产沙模拟研究[J]. 水土保持研究, 2003, 10(4): 38-42.
- [17] 王海龙,余新晓,武思宏,等. SWAT 模型灵敏度分析模块在黄土高原典型流域的应用[J]. 北京林业大学学报, 2007, 29(2): 238-242.
- [18] Popov E G. Gidrologicheskie Prognozy (Hydrological Forecasts)[M]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1979.
- [19] 庞靖鹏,刘昌明,徐宗学. 基于 SWAT 模型的径流与土壤侵蚀过程模拟[J]. 水土保持研究, 2007, 14(6): 88-93.

(上接第 160 页)

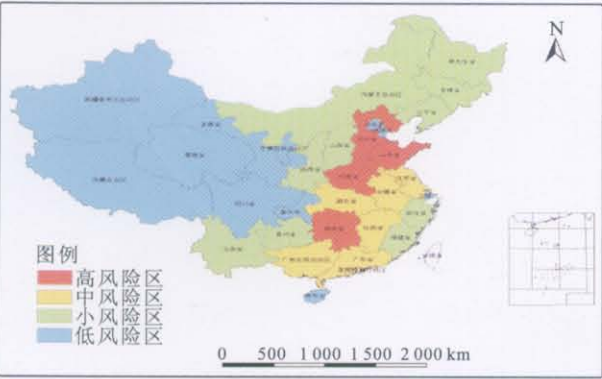
- [3] 严昶升. 土壤肥力研究方法[M]. 北京: 农业出版社, 1987.
- [4] 中国科学院南京土壤研究所土壤物理研究室. 土壤物理性质测定法[M]. 北京: 科学出版社, 1978.
- [5] 王艳红,宋维峰,李财金. 不同竹林地土壤水分入渗研究[J]. 水土保持研究, 2009, 16(2): 165-168.
- [6] 蔡跃台. 不同植被类型土壤理化性质及水源涵养功能研究[J]. 浙江林业科技, 2006, 26(3): 12-16.
- [7] 杨玉盛. 杉木林取代杂木林后林分水源涵养功能差异的研究[J]. 福建林学院学报, 1992, 12(2): 125-131.
- [8] 王艳红,宋维峰,李财金. 不同竹林枯落物层水文生态效应研究[J]. 陕西农业科学, 2009(1): 31-34.
- [9] 刘明. 凤凰山林场小流域试验场森林土壤涵养水源效益研究[J]. 林业资源管理, 1998(6): 51-54.
- [10] 阎文德. 祁连山森林枯落物水文作用的研究[J]. 西北林学院学报, 1997, 12(2): 7-14.
- [11] 俞新妥. 杉木连栽林地土壤生化特性及土壤肥力的研究[J]. 福建林学院学报, 1989, 9(3): 256-262.
- [12] 王兵,魏文俊. 宁夏六盘山不同森林类型土壤贮水与入渗研究[J]. 内蒙古农业大学学报, 2006, 27(3): 1-5.
- [13] 许明祥,刘国彬,卜崇峰,等. 圆盘入渗仪法测定不同利用方式土壤渗透性试验研究[J]. 农业工程学报, 2002, 18(4): 54-58.
- [14] 杨海龙,朱金兆,毕利东. 三峡库区森林流域生态系统土壤渗透性能的研究[J]. 水土保持学报, 2003, 7(3): 63-65.
- [15] 李智广. 水土流失测验与调查[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2005.
- [16] 杨吉华,张永涛,高祥伟,等. 封山育林提高森林蓄水保土效益的研究[J]. 水土保持研究, 2001, 8(3): 2-5.



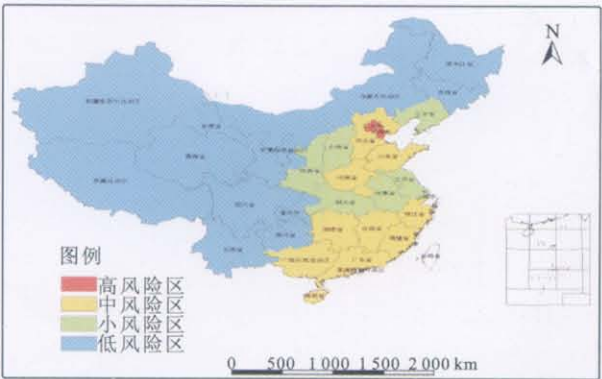
附图5 红门川流域2005年土地利用图



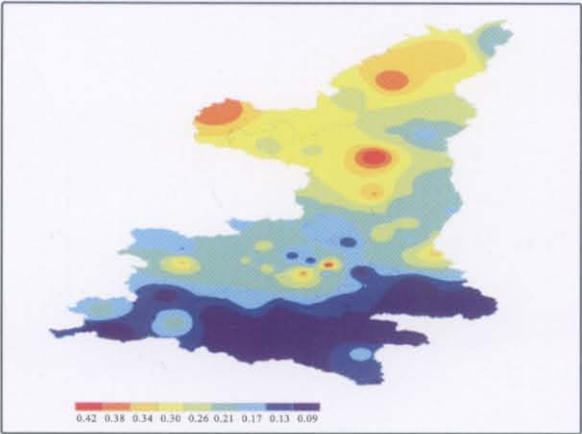
附图6 红门川流域土壤类型图



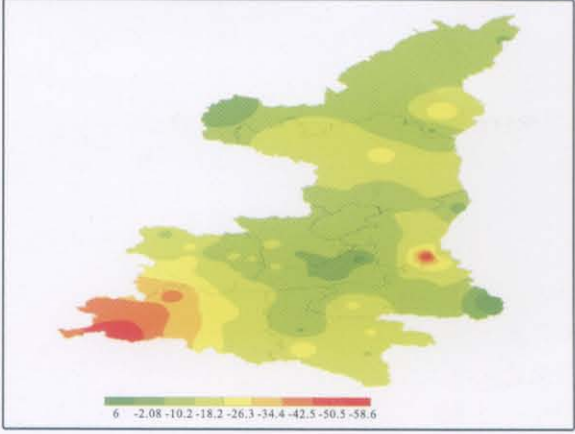
附图7 2020年我国旱灾风险等级图



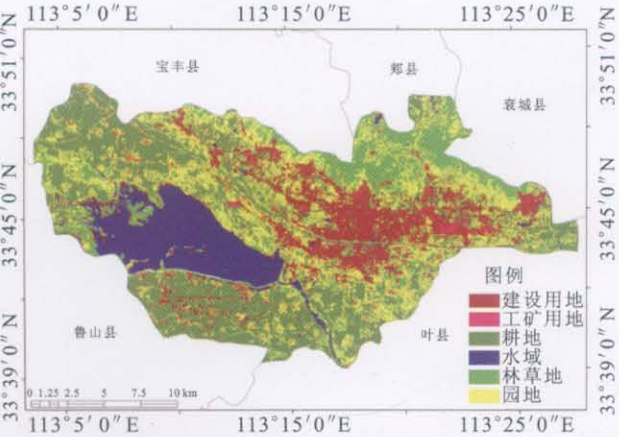
附图8 我国旱灾相对减产风险等级图



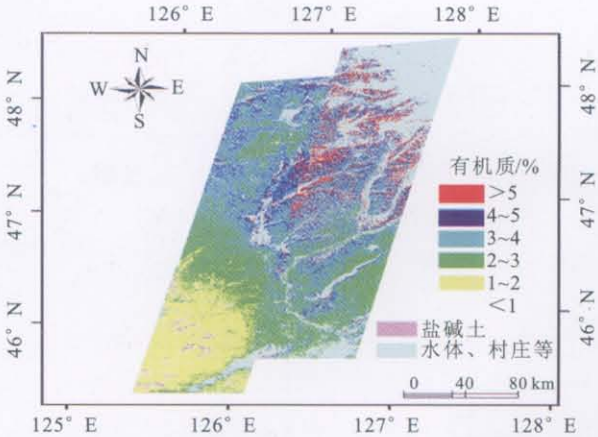
附图9 1961-2008年陕西省气温线性趋势空间分布



附图10 1960-2008年陕西省降水线性趋势空间分布



附图11 研究区景观分类图



附图12 土壤有机质含量空间分布图