

基于 SWAT 模型的大伙房水库汇水区径流与泥沙模拟

杨 巍¹, 汤 洁¹, 李昭阳¹, 卞建民¹, 闫 钰²

(1. 吉林大学 环境与资源学院, 长春 130012; 2. 中国市政工程东北设计研究总院, 长春 130021)

摘 要:采用 SWAT 模型,在 GIS 技术和流域基础信息数据库的支持下,对研究区径流和泥沙进行了模拟研究,利用 2006—2009 年的日径流和泥沙监测数据对模型进行了校准和验证,验证结果表明 SWAT 模型适用于研究区。结果表明:区内土壤侵蚀强度以微度为主,年均泥沙量为 15.395 万 t;不同土地利用方式下的土壤侵蚀模数不同,耕地土壤侵蚀模数最大为 475.84 t/(km²·a),泥沙量占总量的 94.4%,且季节性较强,在 7 月、8 月的产沙量占全年总量的 67.9%;年均入库水量和入库泥沙分别为 10.899 亿 m³、8.265 万 t,其中浑河流域贡献率最大,其次为苏子河流域。本研究揭示了辽宁省主要城市供水水源的大伙房水库汇水区水土流失规律,为水土保持和面源污染防治提供了重要基础支持。

关键词:SWAT; 径流; 泥沙; 模拟; 大伙房水库

中图分类号:P338⁺.5

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2012)02-0077-05

Streamflow and Sediment Simulation Based on SWAT Model in Dahuofang Reservoir Catchment

YANG Wei¹, TANG Jie¹, LI Zhao-yang¹, BIAN Jian-min¹, YAN Yu²

(1. College of Environment and Resources, Jilin University, Changchun 130012, China;

2. China Northeast Municipal Engineering Design and Research Institute, Changchun 130021, China)

Abstract: This study simulated the stream flow and sediment based on SWAT model in Dahuofang reservoir catchment, GIS technology and basic information database of watershed. The calibration and validation of streamflow and sediment were performed from 2006 to 2009, and the results showed that SWAT model could be applied to study area very well. The results of model evaluation showed that the annually amount of soil erosion was 1.5395×10^5 t, which was low-grade erosion in the category. Soil erosion rate was 475.84 t/(km²·a) in cultivated lands, and the ratio of sediment yield which was brought to river from cultivated lands was 94.4%. Reservoir inflow was 1.0899×10^9 m³ and sediment flux into the reservoir was 8.265×10^4 t, and the Hunhe River had the largest contribution, followed by Suzi River. Sediment yield was highly different all the year around, and the ratio of sediment yield was 67.9% in July and August out of the whole year. This research reveals the soil erosion regulation in catchment area of Dahuofang Reservoir serving as the water source of major cities in Liaoning Province, and provides important basic support for soil and water conservation and the prevention of non-point source pollution.

Key words: SWAT; streamflow; sediment; simulation; Dahuofang Reservoir

人类活动和自然因素造成的水土流失严重威胁土地资源、水资源和生态环境。水土流失最直接的表现即土壤肥力和质量退化,根据水利部第二次遥感普查结果,我国现有水土流失面积 3.67×10^6 km², 占国土总面积的 38.2%^[1],可见研究土壤侵蚀和泥沙运移,已经是目前环境保护中的一个重要课题。由于

土壤侵蚀是流域非点源污染的重要组成部分,估算流域泥沙产量和研究泥沙运移情况是流域非点源污染模拟的基础工作之一。目前基于 3S 技术和 ULSE 模型研究土壤侵蚀的方法较为普遍;而集成了 RUSLE 的非点源污染模拟模型为径流、泥沙动态研究提供了较好的研究方法^[2-5],如 AnnAGNPS 模型,

收稿日期:2011-09-29

修回日期:2011-10-17

资助项目:国家科技重大专项“水体污染控制与治理”(2009ZX07528-006-01-03)

作者简介:杨巍(1985—),男,吉林通化人,在读硕士研究生,主要研究方向为生态环境系统工程。E-mail:yangwei_128@yahoo.cn

通信作者:汤洁(1957—),女,吉林长春人,博士,教授,主要从事生态环境系统工程及其数字化研究。E-mail:tangjie0724@163.com

SWAT 模型。SWAT 模型不仅能定量模拟产沙情况,也能模拟泥沙在河道的输移运动情况。国内外研究者利用 SWAT 模型开展了不同流域尺度径流和泥沙的模拟研究,并对流域的土壤侵蚀强度进行了分级,分析了不同土地利用方式对流域产沙的影响。研究表明模型对径流和泥沙的模拟具有较好的适用性,并且模型对径流的模拟结果要好于泥沙的模拟结果^[6-9]。SWAT 模型的广泛应用证实了这个分布式水文模型可以应用在不同地域、不同空间尺度、不同时间步长的多个环境过程中,为径流模拟、泥沙等非点源污染模拟提供了一个强大的平台。

辽宁大伙房水库位于辽宁省抚顺市,是辽河流域重要的水库型饮用水源地,为沈阳、抚顺、大连等七座城市提供生活和工业用水,被列为全国城市供水九大重点水源地之一。近年来汇水区人工生产设施和生活设施增建较多,地表植被破坏,水土流失和水污染等生态问题日渐突出,对水源地水质和水库的蓄水及防洪带来威胁。利用 SWAT 模型开展汇水流域产沙以及泥沙入库研究,其结果可为饮用水源地的水土保持和管理工作提供基础支持。

1 研究区概况

大伙房水库汇水区地处长白山支脉西南延续部分的低山区,位于辽宁省抚顺市的抚顺县、清原县和新宾县之内,呈东南高、西北低之势,地理位置介于东经 $124^{\circ}05' - 125^{\circ}17'$,北纬 $41^{\circ}29' - 42^{\circ}16'$,见图 1。

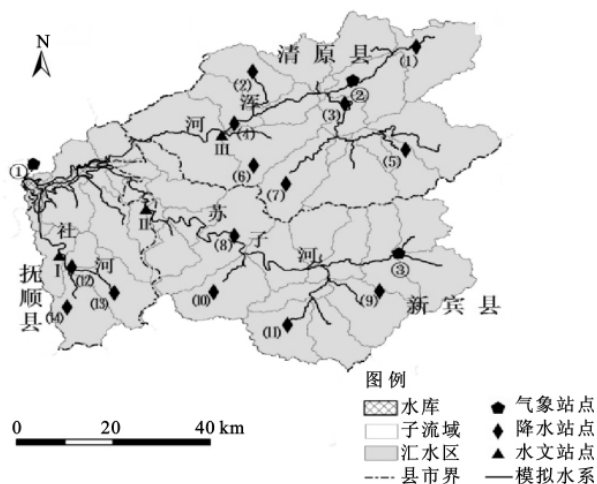


图 1 研究区地理位置及气象站点、水文站点图

水文站点:Ⅰ南章党(社河),Ⅱ占贝(苏子河),Ⅲ北口前(浑河);气象站点:①章党站②清原站③新宾站;降水站点:(1)英额门(2)树基沟(3)四道河子(4)北口前(5)观东场(6)暖泉子(7)于家堡子(8)木奇(9)那加堡子(10)赵家堡子(11)边外堡子(12)南章党(13)佟庄子(14)傲牛

大伙房水库是一座以防洪、灌溉和工业供水、城市生活用水为主的典型山谷型水库,总库容为 22.68 亿 m^3 ,水库控制流域面积 5 437 km^2 。浑河(清原

段)、苏子河和社河是大伙房水库三条主要入库河流。区域多年平均降水量为 650~800 mm,降水主要集中在 7—8 月,约占全年降水量的 50%左右。多年平均年水面蒸发量为 1 100~1 600 mm,平均相对湿度 65%~70%。流域内林地占 62%,农田占 9.7%,荒山占 9%,牧地占 6%,村庄、果园、河流等占 13.3%^[10]。研究区主要土壤类型有暗棕壤、棕壤、草甸土、白浆土、沼泽土、水稻土 6 个土类,其中以棕壤分布最为广泛。

2 材料与方法

2.1 SWAT 模型概述

SWAT (Soil and Water Assessment Tool) 模型^[11]是 Dr. Jeff 为美国农业部(USDA)农业研究服务中心(ARS)开发的流域尺度分布式水文模型, SWAT 模型集成了遥感(RS)、地理信息系统(GIS)和数字高程模型(DEM)技术,主要用来模拟和预测较长时间段内复杂流域内不同土壤、土地利用与管理方式下产生的水、泥沙与营养物的变化。

SWAT 模型结构复杂,它是由 701 个方程和 1 013 个中间变量组成的一个模型系统,结构上可以分为水文过程、土壤侵蚀和污染负荷三个子模型^[12]。水文过程子模型可以模拟和计算流域水文循环过程中降水、地表径流、层间流、地下水流以及河段水分输移损失等部分。该子模型模拟水文过程可以分为两个部分:一部分是控制主河道的水量、泥沙量、营养成分及化学物质多少的产流与坡面汇流等各水分循环过程;另一部分是与河道汇流相关的各水分循环过程,决定水分、泥沙等物质在河网中向流域出口的输移运动情况。土壤侵蚀子模型从对降水和径流产生的土壤侵蚀运用修正的通用土壤流失方程(RUSLE)获取。污染负荷子模型主要进行氮循环模拟和磷循环模拟过程,这两个循环伴随水文过程和土壤侵蚀过程而发生^[13]。

2.2 数据输入

2.2.1 空间数据输入 本研究所需要的空间数据包括:分辨率为 30 m×30 m 的 DEM (GRID 格式) 数据,比例尺为 1:5 万的土地利用图和土壤类型图 (SHAPE 格式),比例尺为 1:25 万的水系图 (SHAPE 格式)。空间数据输入采用统一的 Albers 等积圆锥投影,由于 DEM 形成的河网可能与实际情况会有偏差,因此,采用 1:25 万水系图对其进行校正。

2.2.2 属性数据输入 在进行流域模拟时要求输入多年气象数据,包括日降水量、日最高气温、日最低气温、日平均相对湿度、日平均风速与日太阳辐射量。

SWAT 模型气象数据的录入包括气象月平均值和气象站点的实测数据,需按模型的格式要求建立 .dbf 或 .txt 格式的文件进行输入,同时建立 .dbf 格式的链接表将气象资料导入模型。第一部分气象数据用来构建 SWAT 模型内部天气发生器,即气象月均值,在计算过程中使用清原、章党和新宾三个气象站点 1986—2009 年逐日的降水量、最高和最低气温、太阳辐射量、露点温度和平均风速数据(中国气象科学数据共享服务网核心用户)。根据 SWAT 模型需要和研究区实际情况,第二部分的逐日降水数据采用研究区的 14 个降水站点(来自中华人民共和国水文年鉴——辽河流域水文资料)和第一部分气象数据 3 个气象站点 2001—2009 年的实测温度数据。

SWAT 模型中用到的土壤属性数据主要包括物理属性和化学属性两类数据。其物理属性决定了土壤剖面中水和气的运动情况,并对水循环起着重要的作用,物理属性数据主要包括土壤粒径级配百分比、土壤容重、有效含水率等。土壤化学属性决定着土壤中营养物质的赋存状态和含量,主要包括土壤的硝态氮、有机氮和有机磷的浓度,用来确定污染模拟的模型初始值。本研究中构建土壤属性库主要参考《抚顺土壤》、《清原土壤》、《抚顺县农业资源调查与农业区划报告》、《新宾土壤普查报告》和《辽宁土壤》等资料。本研究利用 MATLAB 7.0 软件和由美国农业部开发的土壤水特性计算程序 SPAW 进行土壤粒径级配转换和土壤可利用有效水量、饱和水力传导率等参数的计算。

2.3 模型模拟

SWAT 模型首先基于 DEM 提取流域内的水系,模拟水系见图 1,然后由设定的子流域集水面积阈值和子流域进出口点位划分子流域。在确定合理的子流域划分时,需要考虑 DEM 分辨率、土地利用类型分布等因素^[14]。最终确定流域共分为 45 个子流域(图 1)。子流域划分完成之后进行水文响应单元(HRU)的划分,把一个子流域视为多个 HRU,通过设定土壤和土地利用类型在子流域内的叠加阈值来确定 HRU 及其性质,本文土地利用和土壤阈值分别设定为 6% 和 12%,将流域划分为 277 个 HRU。然后加载气象数据和默认的其他数据库文件。最后在 SWAT VIEW 界面下进行模型的初次模拟。

2.4 模型敏感性分析、校准与验证

在 SWAT 模型的应用中,可以选择相对误差 R_e (式 1)、决定系数 r^2 (式 2)与 Nash—Suttcliffe 系数 E_{ns} (式 3)来判断模型适用性,以校正模型。 R_e 可评

价总实测值与总模拟值之间的偏离程度,其值越小说明模拟值越接近实测值。 r^2 为相关系数的平方, r^2 可评价实测值与模拟值之间的数据吻合程度,当 $r^2 = 1$ 时表示非常吻合,当 $r^2 < 1$ 时,其值越小反映出数据吻合程度越低。若 E_{ns} 为负值,说明模拟平均值比直接使用实测值的可信度更低。对于径流和泥沙校准要求其模拟值与实测值年均误差分别小于实测值的 20% 和 30%,月均的评价系数 $r^2 > 0.6$,且 $E_{ns} > 0.5$ 。

$$R_e = \frac{P_{sim} - Q_{obs}}{Q_{obs}} \times 100\% \quad (1)$$

$$r^2 = \frac{[\sum_{i=1}^n (Q_{obs} - Q_{avg})(P_{sim} - P_{avg})]^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{obs} - Q_{avg})^2 \sum_{i=1}^n (P_{sim} - P_{avg})^2} \quad (2)$$

$$E_{ns} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs} - P_{sim})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{obs} - Q_{avg})^2} \quad (3)$$

式中: Q_{obs} ——实测值; P_{sim} ——模拟值; Q_{avg} ——实测平均值; P_{avg} ——模拟平均值。

2.4.1 参数敏感性分析 本研究对径流和泥沙的敏感性分析采用模型自带模块,即 Motris^[15] 提出的 LH—OAT 法进行参数的敏感性分析,其优点是确保所有参数在其取值范围内均被采样,并可确定是哪个参数改变了模型的输出,该方法减少了需要调整的参数数目,提高了计算效率。通过径流和泥沙模拟的参数敏感性分析,选取径流曲线数(CN2)、土壤蒸发补偿系数(ESCO)、土壤有效含水量(SOL_AWC)、基流系数(ALPHA_BF)、平均坡度(SLOPE)、平均坡长(SLSUBBSN)、挟沙能力线性指数(SPCON)、挟沙能力幂指数(SPEXP)等顺序靠前的敏感参数作为校准的主要参数。在实际校准过程中要将敏感参数和实际物理过程结合起来进行参数调整,因为调整很多参数中的一个,都可以得到相同的结果,但要选择最能描述过程的那个参数,否则利用这些参数模拟不能反映系统的真实过程。

2.4.2 模型校准与验证 本次径流和泥沙的校准与验证采用南章党、占贝和北口前(二)三个水文站点的径流及泥沙逐日监测数据,分别对社河、苏子河和浑河(清原段)三条河流的径流及泥沙进行校准与验证。模型预热时间为 2005 年,校准时间为 2006—2007 年,验证时间为 2008—2009 年,水文站点空间分布见图 1。校准顺序为:年径流、月径流、年泥沙和月泥沙。最后将三条河流模型校准和验证结果合并处理,见表 1、图 2 和图 3。

表 1 径流和泥沙率定和验证结果评价

模拟期	拟合项	实测月均值	模拟月均值	$R_e/\%$	E_{ns}	r^2
校准期	径流量/($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	31.12	29.53	-5.13	0.85	0.86
	输沙量/t	5069.23	4756.39	-6.17	0.91	0.92
验证期	径流量/($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	21.19	22.63	6.81	0.84	0.85
	输沙量/t	3142.23	3619.35	15.18	0.69	0.74

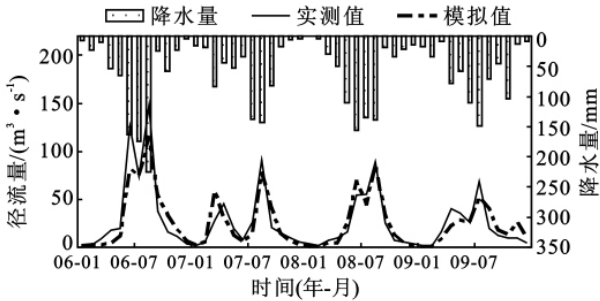


图 2 实测与模拟月径流过程线

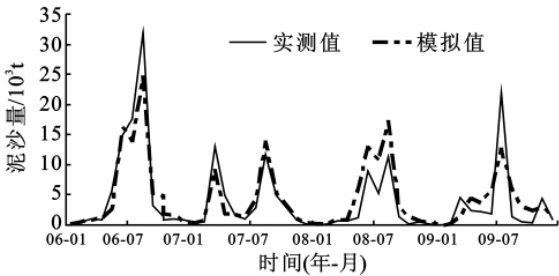


图 3 实测和模拟输沙量曲线

3 结果与分析

由表 1 可知,模型在校准和验证期的评价指标 R_e , E_{ns} 和 r^2 均满足要求,且径流的模拟效果较好, $E_{ns} > 0.84$, $R^2 > 0.85$ 。泥沙模拟在校准期的模拟效果要好于验证期。由图 2 和图 3 可知,区内径流量和泥沙量在 7 月、8 月份达到最大值,冬季较小;2006 年 6 月和 8 月经流峰值模拟值小于实测值,泥沙模拟在 2006 年和 2009 年 8 月份的模拟峰值小于实测值,这主要是由于洪水期流量大、含沙量高,观测值与实际情况存在一定误差。所以,考虑实测的输入数据和率定的数据可能存在很多潜在的误差,这个模拟结果也是令人满意的。

3.1 坡面产沙分析

根据 SWAT 模型模拟结果计算得到各子流域 2006—2009 年 4 a 年均坡面泥沙产量:浑河(清源段)流域为 8.09 万 t,苏子河流域为 5.81 万 t,社河流域为 1.17 万 t,水库周边小流域 0.34 万 t。研究区土壤侵蚀模数小于 $200 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$,其空间分布见图 4,浑河流域土壤侵蚀最严重,其次是苏子河流域,水库周边土壤侵蚀模数较小。研究区土壤侵蚀强度属于微度侵蚀^[16],大伙房水库汇水流域作为水源地保护区,森林覆盖率为 51.8%,土壤侵蚀模拟结果与实际较为符合。

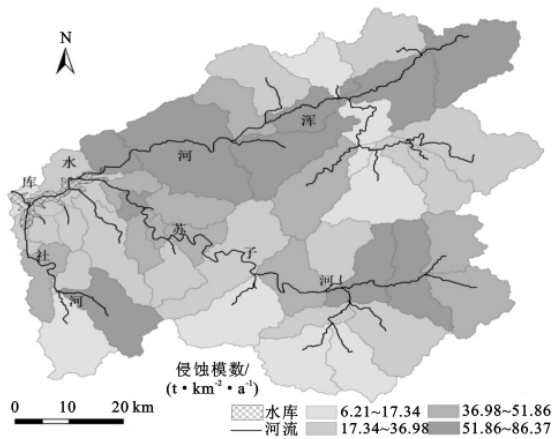


图 4 研究区土壤侵蚀模数空间分布

区内耕地的土壤侵蚀模数为 $475.84 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$,林地为 $0.82 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$;由耕地产生的泥沙量为 14.47 万 t,占总量的 94.4%,林地为 0.42 万 t,占 2.7%,草地、居民点、未利用土地以及工矿用地等产生的泥沙量占 3.9%,可见耕地产沙量是泥沙的主要来源。研究区土壤侵蚀的季节性很强,雨季产汇流过程携带大量泥沙进入河流,在 7 月、8 月的土壤侵蚀量占全年的 67.9%。

3.2 泥沙入库负荷分析

3.2.1 泥沙入库空间分析 本研究按照大伙房水库三条主要入库河流和水库周边小流域四个部分分析不同水系对水库入库水量和入库泥沙量的贡献率,见表 2,表中水量和泥沙量均为 2006—2009 年的 4 a 均值。由表 2 可知,浑河流域年均流入水库的水量和携带的泥沙量分别为 5.226 亿 m^3 和 4.077 万 t,成为水库水量和泥沙量的最大贡献者,苏子河其次,社河流域泥沙量和水库周边小流域水量的贡献率最小。由坡面分析可知年均坡面产沙量为 15.395 万 t,而年均进入水库的泥沙量为 8.265 万 t,可知泥沙在河流中输移损失量为 7.13 万 t。

表 2 大伙房水库不同流域的入库水量和泥沙量贡献率

流域	入库水量		入库泥沙量	
	水量/ 10^6 m^3	贡献率/ %	泥沙量/ 10^3 t	贡献率/ %
水库周边小流域	32.42	2.97	3.48	4.22
社河流域	52.72	4.84	3.22	3.89
苏子河流域	482.11	44.23	35.18	42.57
浑河流域	522.63	47.95	40.77	49.33

3.2.2 泥沙入库时间分析 通过对 SWAT 模型年模拟的输出结果进行计算,得到 2006—2009 年各年的入库水量和泥沙量,见表 3。其中径流量与降雨量相关系数为 0.88,分析其原因是在降雨初期产流过程中,降水量不大时主要以下渗为主,产流不明显;泥沙量与径流量的相关系数为 0.92,相关性比较好,说明产沙过程伴随地表水文循环过程进行。

表 3 2006—2009 年降雨量、入库水量和泥沙量

项目	2006 年	2007 年	2008 年	2009 年
水量/ 10^6 m^3	1461.81	1032.43	1034.76	875.51
输沙量/ 10^3 t	108.22	71.95	84.16	66.29
降雨量/mm	850.41	639.62	714.48	694.67

研究区 2006—2009 年的逐月输沙量与入库水量的拟合如图 5 所示,二者决定系数为 0.944,拟合效果较好。泥沙在径流量大的 7 月、8 月入库最多,主要是因为随着雨季的深入,降雨量与强度增大,土壤侵蚀强度加大,大径流量提高了输移泥沙的能力。在 2007 年输沙量出现了两个峰值,主要是因为春季大量的积雪融化,地表径流加大,携带了更多的泥沙进入水库。

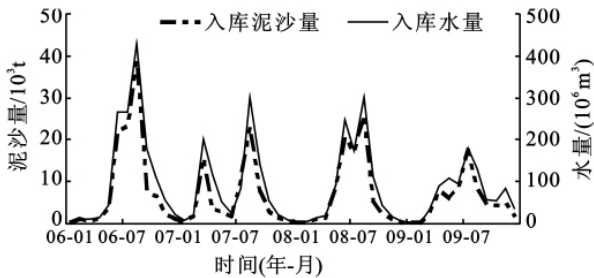


图 5 月入库泥沙量与入库水量逐月拟合

4 结论

在空间尺度上,模拟结果表明大伙房水库汇水区的土壤侵蚀以微度为主,浑河流域土壤侵蚀模数和泥沙产量都大于其他流域,其入库水量和泥沙量的贡献率最大,其次为苏子河流域,最小为水库周边小流域。

在时间尺度上,8 月的径流量和泥沙量均达到最大值,7 月、8 月产沙量占全年总量的 67.9%,可见研究区的降水、径流和泥沙都有着很强的季节性特点。

研究区耕地的土壤侵蚀模数远远大于林地等土地利用类型,由耕地产生的泥沙量占总量的 94.4%,林地为 2.7%,其他为 3.9%。通过对降雨量、入库水量和入库泥沙量的拟合分析,发现他们之间有着很好的相关关系,值得注意的是,耕地产生的泥沙是化肥和农药的重要携带者,也是影响水源地水质的重要因素。研究结果表明,SWAT 在 GIS 技术和流域基础数据库的支持下,对大伙房水库汇水流域的应用研究是可行的。

参考文献:

- [1] 李嘉俊,许有鹏,桑银江,等. GIS 支持下的土壤侵蚀动态变化研究:浙江一例[J]. 南京大学学报:自然科学版, 2005,41(3):297-303.
- [2] 陈晓燕. GIS 技术在通用土壤流失方程中的应用研究[J]. 中国水土保持,2005(5):38-39.
- [3] 赵磊,袁国林. 基于 GIS 和 ULSE 模型对滇池宝象河流域土壤侵蚀量的研究[J]. 水土保持通报,2007,27(3):42-46.
- [4] 李婷,张世熔,廖明辉,等. 基于 3S 和 ULSE 的沱江流域中游土壤侵蚀定量评价[J]. 水土保持研究,2011,18(1):24-27.
- [5] 于峰,史正涛,李滨勇,等. SWAT 模型及其应用研究[J]. 水科学与工程,2008(5):4-9.
- [6] Gessese A, Yonas M. Prediction of sediment inflow to legedadi reservoir using SWAT watershed and CCHEID sediment transport models[J]. Nile Basin Water Engineering Scientific Magazine,2008,1:65-74.
- [7] Rostamian R, Jaleh A, Afyuni M, et al. Application of a SWAT model for estimating runoff and sediment in two mountainous watersheds in central Iran[J]. Hydrology Science Journal,2008,53(5):977-988.
- [8] 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):89-95.
- [9] 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.
- [10] 童君,赵馨,朱孝林,等. 辽宁大伙房水库水生生物特征及水质生态学评价[J]. 环境保护科学,2002,28(4):10-12.
- [11] Neitsch S L, Arnold J G, Kiniry J R, et al. Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation version 2000 [M]. Temple: Texas Grassland, Soil and Water Research Laboratory, Agricultural Research Service,2001.
- [12] Neitsch S L, Arnold J G, Kiniry J R, et al. Soil and Water Assessment Tool User's Manual Version 2000 [M]. College Station: Texas Water Resources Institute,2002.
- [13] 郝芳华,程红光,杨胜天. 非点源污染模型理论与应用[M]. 郑州:黄河水利出版社,2008.
- [14] 王艳君,吕宏军,姜彤. 子流域划分和 DEM 分辨率对 SWAT 模型径流模拟的影响研究[J]. 水文,2008,28(3):22-25.
- [15] Morris M D. Factorial sampling plans for preliminary computational experiments[J]. Technometrics,1991,33(2):161-174.
- [16] SL190—2007,土壤侵蚀分类分级标准[S]. 北京:中国水利水电出版社出版,2008.