

辽河重污染支流招苏台河径流和泥沙模拟研究

汤洁, 张爱丽, 侯克怡, 李昭阳, 田雷, 林晓晟, 王博

(吉林大学 环境与资源学院, 长春 130012)

摘要:在 3S 技术和基础信息数据库的支撑下,应用 SWAT 模型对招苏台河流域径流和泥沙进行了模拟研究,利用 2004—2009 年的日径流量、输沙率等水文实测数据对模型进行校准和验证,评价参数满足要求。模拟结果表明:研究区年平均径流量和输沙量为 $1.64 \text{ m}^3/\text{s}$ 、6.90 万 t,土壤侵蚀模数为 $62.93 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$,侵蚀强度为微度侵蚀,耕地的土壤侵蚀模数最大,是该河泥沙的主要来源;径流量和输沙量在时间分布上具有季节性特点;根据研究区的水土流失特征,提出拟采取的水土保持措施,并模拟了河流两岸不同尺度植被缓冲带控制情景条件下的水文响应。该研究揭示了招苏台河流域径流和泥沙产生的规律和特征,为研究区水土保持和重污染河流的治理提供数据和管理决策支持。

关键词:SWAT; 3S 技术; 招苏台河; 径流; 泥沙

中图分类号:TV141

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2014)02-0111-05

The Simulation of Runoff and Sediment in Heavy Polluted Tributary of Liaohe-Zhaosutai River

TANG Jie, ZHANG Ai-li, HOU Ke-yi, LI Zhao-yang, TIAN Lei, LIN Xiao-sheng, WANG Bo

(College of Environment and Resource, Jinlin University, Changchun 130012, China)

Abstract: This research simulated runoff and sediment of Zhaosutai river basin based on SWAT model, 3S technology and basic database. The data of daily runoff and sediment transport rate from 2004 to 2009 were used to calibrate and validate the results of the model output. It proved that SWAT model was feasible for the research. Simulation results showed that average annual runoff was $1.64 \text{ m}^3/\text{s}$ and sediment discharge was $6.90 \times 10^4 \text{ t}$. Soil erosion modulus was $62.93 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$, which was categorized as slightly erosion. Cultivated land was the main source of sediment generation in the research area. From the results of SWAT model, runoff and sediment discharge were ranged with season. According to the characteristics of the study area, the soil and water conservation measures were proposed, and hydrological response of scenarios of different control measures of vegetation buffer zone with different scales were simulated. This research reveals the characteristics of runoff and sediment in Zhaosutai river basin, and provides data and management decision support for soil and water conservation for the study area.

Key words: SWAT; 3S technology; Zhaosutai river basin; runoff; sediment

由于自然因素及人类对水土资源的不合理开发利用,土壤覆盖物遭受破坏,在外力作用下易引发水土流失。我国是世界上水土流失最严重的国家之一,水土流失面积已达到 367 万 km^2 ,占国土面积的 38.2%,每年土壤流失量为 50 亿 $\text{t}^{[1-2]}$,总体上呈现强度高、发展快、成因复杂、危害严重等特征。水土流失的危害主要表现在降低土壤肥力、泥沙淤积阻碍地表径流,导致土地荒漠化等,另外,泥沙具有相当数量的

黏土矿物和无机、有机胶体,在水体中是很好的吸附剂,多种污染物质可附着于泥沙颗粒表面,随泥沙运移进入河流,带来严重的环境问题。SWAT(Soil and Water Assessment Tool)模型是一个连续模拟地表径流、泥沙和非点源污染的分布式水文模型,集成了 3S 技术、径流曲线数法(SCS)及修正的通用土壤流失方程(RUSLE),SWAT 模型以其强大的功能、先进的模型结构及高效的计算,在水文模型中占有重要

的地位,已成为现代水文模拟研究的热点^[3]。国内外学者开展了大量的水文模拟研究,并对土地利用、气候及其他情景变化的水文效应进行分析^[4-8],证明了 SWAT 模型在模拟地表径流、地下径流、泥沙的有效性。

招苏台河流经吉林省四平市,是重要的农业灌溉水源和污染物容纳水体。近年来,由于人类无节制的开发,地表植被破坏严重,水土流失和水体污染等生态环境问题日益突出,给农业生产带来极大的安全隐患。本文应用 SWAT 模型模拟吉林省境内招苏台河流域的 2004—2009 年径流及输沙量,以期为研究区水土保持和河流污染治理提供数据和管理决策支持。

1 研究区概况

招苏台河发源于四平市梨树县三家子乡,是辽河的一级支流,由东向西流经梨树县梨树镇、郭家店镇等 7 个乡镇,在该县四棵树乡流入辽宁省,在辽宁省通江口乡汇入辽河(图 1)。招苏台河流域地理位置位于东经 124°17′—124°57′,北纬 44°13′—44°35′,流域面积 1 120 km²,吉林省境内长度 103 km。流域处于温带和暖温带,具有大陆性和季风性气候特征,气温低,寒冷周期长。该河径流量年内分布具有明显的季节特点,6—9 月份为丰水期,径流量占年径流量的 60%~70%,3—5 月和 10 月份为平水期,11 月份进入枯水期,流量显著减少。

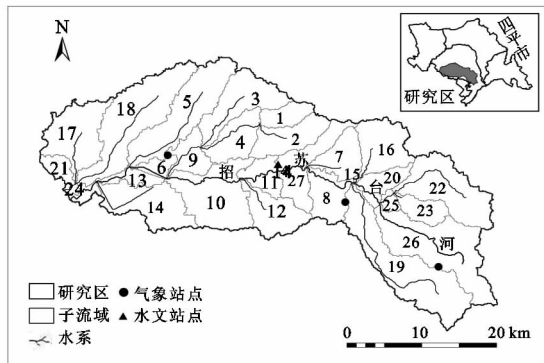


图 1 招苏台河流域地理位置及站点

招苏台河流域以农业种植和牧业养殖为支柱产业,无工业企业,流域内水体污染以农业面源污染为主,据 2010 年的统计数据,流域内共有耕地 856.27 km²,占土地总面积的 76.59%,养殖场及养殖小区 202 家。梨树县环境监测数据显示,招苏台河 2004—2010 年多个断面为劣 V 类水质,是辽河流域跨省界河流污染最严重的支流之一。随径流和泥沙携带进入河流的面源污染物是造成水体污染的重要原因,因此,研究重污染河流径流和泥沙的运动规律,对于流域水土保持和水污染治理具有十分重要的意义。

2 模型与数据处理

2.1 SWAT 模型

SWAT 模型由美国农业部(USDA)农业研究局(ARS)基于 SWRRB 模型开发的流域尺度模型,属物理模型,适用于具有不同土壤类型、土地利用和管理方式下的复杂流域的模拟,可在资料缺乏的地区建模,模型在美国、加拿大、中国等 40 多个国家有广泛应用,主要集中在模拟地表水和地下水的水质、水量,预测土地管理措施对大尺度流域的水文、泥沙和非点源污染等方面^[5,9-13]。SWAT 模型主要包括水文过程、土壤侵蚀和污染负荷三个子模型。水文过程可分为水循环陆地阶段和水循环水面阶段。水循环陆地阶段指的是流域的产流和坡面汇流,控制着每个子流域内主河道的水、沙、营养物质等的输入量;水循环水面阶段也就是河道中的汇流部分,决定了水、沙等物质向流域出口的输移运动。土壤侵蚀子模型使用 RUSLE 方程计算泥沙的生成量,方程用径流代替降水因子,改善了泥沙量的预测。污染负荷子模型可用来模拟氮、磷污染负荷及其在河道中的迁移转化过程^[10,14]。

2.2 数据库构建

数据库对 SWAT 模型的运行至关重要,模型通过调用数据库提取流域、地形、土壤等信息模拟流域的水文特征及物质的迁移转化。模型模拟所需数据主要有空间数据、非空间属性数据,以及用于校准、验证的水文监测数据。空间数据库包括数字高程模型(DEM)、土地利用图、土壤类型图等,其建立和管理均由 ArcGIS 10.0 软件完成。所有图件的地理坐标设为 WGS1984,为保证投影后面积的真实性,本研究采用 Albers 等积圆锥投影。非空间属性数据一般考虑气象资料和土壤属性数据。SWAT 模型数据库及数据来源见表 1。

2.3 模型校准与验证

本文利用 2004—2007 年、2008—2009 年的径流、泥沙等水文监测数据进行校准与验证,选用相关系数 R^2 、相对误差 R_e 和 Nash-Sutcliffe 系数 E_{ns} 用于评价模拟值与实测数据的吻合程度。 R^2 可通过线性回归的方法得到, R_e 和 E_{ns} 计算公式为:

$$R_e = \frac{Q_p - Q_0}{Q_0} \times 100\% \quad (1)$$

$$E_{ns} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_0 - Q_p)^2}{\sum_{i=1}^n (Q_0 - Q_{avg})^2} \quad (2)$$

式中: Q_0 ——实测值; Q_p ——模拟值; Q_{avg} ——实测平均值; n ——实测数据数量。模型校准要求年径流量 $R_e < 20\%$ 、年泥沙负荷 $R_e < 30\%$ 、月均值的评价系数 $R^2 \geq 0.6$,且 $E_{ns} \geq 0.5$ 。

表 1 SWAT 模型数据库及数据来源

数据类型	包含参数	数据获取
土地利用	流域内土地利用类型	2008 年 Landsat ETM 影像(30 m×30 m)人工解译
地形	子流域面积、平均坡长、平均高程、河道长度、河道宽度等	分辨率为 90 m×90 m 的数字高程模型(DEM)分析
土壤	土壤类型图,物理属性数据(土壤结构、湿密度、有机碳含量等),化学属性数据(有机氮、全氮、全磷等)	中国科学院南京土壤研究所提供的 1:100 万中国土壤矢量图,SPA、1STOPT 等软件运算
气象	日最高气温、日最低气温、日降水量、太阳辐射、风速、相对湿度等	气象站点的监测数据
水文	日径流值、输沙率、水质数据	水文站点监测数据

2.4 SWAT 模型运行

SWAT 模型基于 DEM 在面积阈值为 18 km² 的尺度上提取流域的水系,应用 Burn-In 功能以现有水系为基础调整后,将研究区划分为 27 个子流域(图 1)。模型根据土地利用、土壤类型等空间信息,以子流域为单位划分水文响应单元(HRU),以反映不同组合间的水文特征。综合分析各子流域土地利用和土壤类型组合及分布,将其最小面积阈值比分别定为 4%和 5%,即小于阈值的土地利用及土壤类型重新划分,与其他类型合并,土地利用图和土壤类型图叠加后,共划分为 153 个水文响应单元。

通过 SWAT 模型的敏感性分析模块,确定对模拟影响较大的敏感因子:SCS 径流曲线系数(CN2)、土壤蒸发补偿系数(ESCO)、土壤可利用水量(SOIL_AWC)、最大冠层需水量(CANMX)、基流 α 系数(ALPHA_BF)等。基于敏感性分析的结果及梨树水文站的监测数据,对年径流量、月径流量、年输沙量和月输沙量依次进行校准,2004—2007 年为校准期,2008—2009 年为验证期。年径流量 R_e 为 14.47%,年泥沙负荷 R_e 为 4.4%,月校准和验证的结果见表 2、图 2,表明 SWAT 模型应用在招苏台河流域径流和输沙量的评估和预测研究是可行的。

表 2 招苏台河流域校准和验证结果

时期	项目	实测月均值	模拟月均值	R_e	R^2	E_m
校准期	径流量/(m ³ ·s ⁻¹)	1.86	1.91	-0.07	0.77	0.75
	输沙量/t	2498.01	2850.38	0.14	0.88	0.54
验证期	径流量/(m ³ ·s ⁻¹)	1.50	1.23	-0.18	0.81	0.78
	输沙量/t	2642.35	2487.46	-0.06	0.77	0.67

3 结果与分析

根据 SWAT 模型模拟结果,招苏台河流域 2004—2009 年 6 a 的年均径流量为 1.64 m³/s,入河泥沙量、输沙量分别为 6.90 万 t、6.71 万 t,在河道中输移损失 0.19 万 t,土壤侵蚀模数为 62.93 t/(km²·a),根据水利部土壤侵蚀分类分级标准^[15],侵蚀强度属于微度侵蚀。基于 SWAT 模型年模拟结果,统计不同土地利用类型的产沙量。耕地产生的泥沙量为 6.48 万 t/a,占总量的 93.86%,居民地的产沙量为 0.42 万 t/a,占总量的 6.13%,林地、草地等的产沙量占总量的 1.00%;耕地的土壤侵蚀模数为 79.02 t/(km²·a),林地为 0.17 t/(km²·a),草地为 0.65 t/(km²·a)。因此耕地是该河泥沙产生的主要来源。

3.1 模拟结果时空分析

3.1.1 时间分析 由图 2 可以看出,枯水期、平水期和丰水期的径流量差异显著,平均径流量分别为 0.45、0.91、3.71 m³/s。枯水期处于冬季,河水结冰,基本无径流量,或以污水为主的少量径流;丰水期径流量较大,在 7 月、8 月份达到峰值,这与降雨的峰值

相一致,降雨是直接补给径流的主要途径。招苏台河输沙量最大值亦出现在 7 月、8 月份,即随着降雨量的增大,土壤侵蚀的强度和泥沙的输移能力均明显提高。输沙量在 3 月份出现小峰值,其原因是春季融雪产流,导致没有植被覆盖的表层土壤易随径流进入河流。

对 2004—2009 年模拟结果的统计分析表明(表 3),径流量与降雨量呈显著正相关,相关系数 R^2 为 0.88($P<0.05$),降雨是水文循环的直接动力,是影响径流的重要因素。输沙量与径流量的 R^2 为 0.58($P<0.1$),有一定的相关性,这是因为河道产沙伴随着水文循环过程发生,但也较多受到植被类型、地形、土壤侵蚀因子、农业管理和水土保持措施等的影响,导致二者的相关系数较小。

3.1.2 空间分析 由招苏台河流域不同子流域年均产流和产沙的空间分布可以看出(图 3),子流域 18 及河流发源地(子流域 19,22,26)对流域年径流量贡献较大,4 个子流域产生的年径流量为 0.36 亿 m³,占流域总量的 32.45%,为流域的主要产流区。产沙量较大的是子流域 5,10,18,19,22,26,产沙量达 2.93 万 t,

占总产沙量的 42.50%，是流域主要的产沙区。比较子流域的坡度发现，产流、产沙大的子流域平均坡度

大于其他子流域，且土地利用以耕地为主，地理特征及土地利用类型为产流、产沙提供了良好的条件。

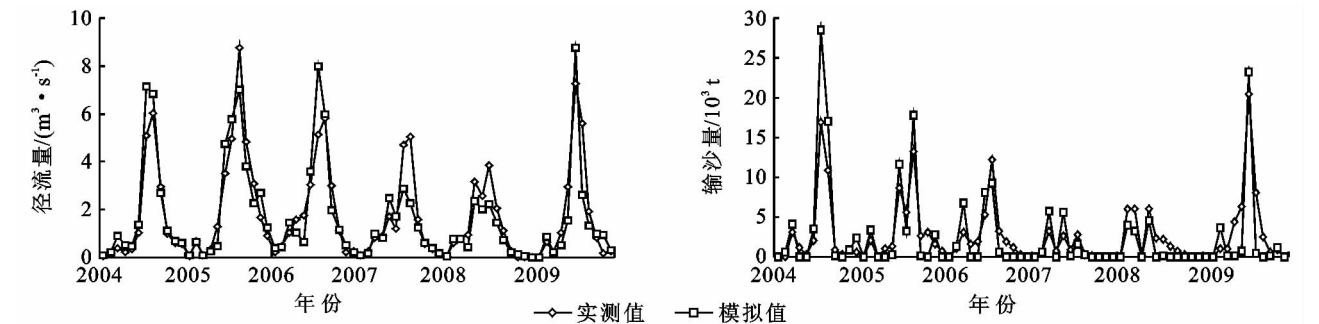


图 2 2004—2009 年逐月径流量和输沙量模拟与实测结果

表 3 招苏台河流域 2004—2009 年模拟结果

项目	2004 年	2005 年	2006 年	2007 年	2008 年	2009 年
年径流量/亿 m ³	0.61	0.78	0.68	0.37	0.29	0.49
输沙量/万 t	9.35	10.83	6.61	6.72	3.01	9.01
降雨量/mm	452.45	578.30	492.80	400.10	387.75	398.3

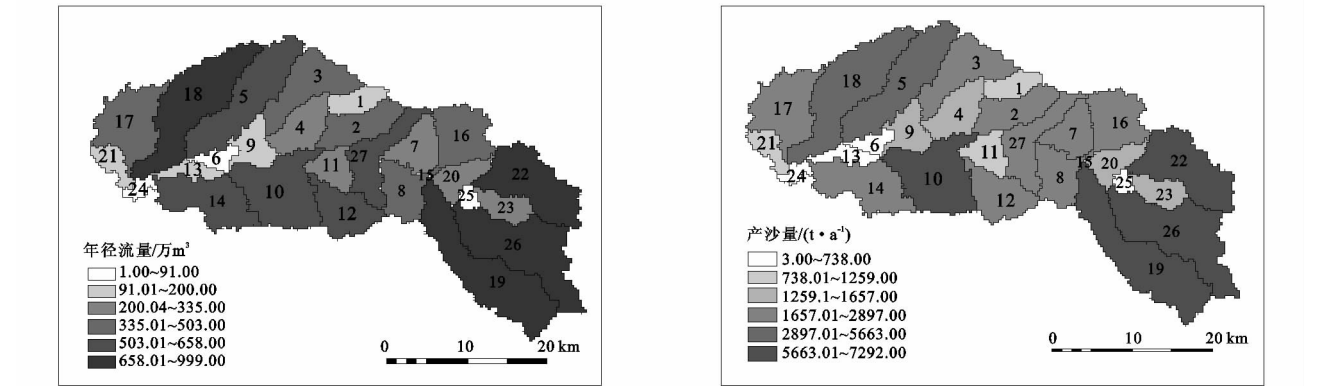


图 3 研究区年径流量和产沙量空间分布

3.2 水土保持措施模拟

利用 SWAT 模型模拟水土保持措施,对于制定和实施水土保持措施具有理论指导意义,以往研究表明^[16],研究区坡度不同,所采取的水土保持措施也有所差异。应用 ArcGIS 10.0 软件,基于 DEM 提取流域坡度(表 4)。区内坡度以 0~6°的平耕地为主,占流域总面积的 95.61%,坡度大于 6°的面积为 49.08 km²,仅占总面积的 1.39%。根据招苏台河流域平耕地的土壤类型以黑土和草甸土为主的特点,适宜在河流两岸修建植被缓冲带,以减少水土流失量。以往研究表明,河岸的植被保护缓冲带能有效拦截进入河流的泥沙、氮、磷等污染物质,改善水体水质,且在缓冲带内种植灌木、乔木等根系发达的植物可起到更好的固土作用^[14,17-19]。

表 4 招苏台河流域坡度分布

坡度/(°)	面积/km ²	所占比例/%
0~6	1070.68	95.61
6~15	48.58	1.34
15~25	0.59	0.05

为探讨缓冲带对招苏台河流域径流和泥沙的影响,本文利用 SWAT 模型中土地管理和情景模拟模块设定不同控制措施情景,结果见表 5。

表 5 不同植被缓冲带情景下产沙量模拟结果

项目	缓冲带宽度/m				
	1	2	5	10	15
产沙量/(万 t·a ⁻¹)	5.34	4.98	4.20	3.40	2.94
削减/%	22.56	27.84	39.18	50.85	57.43

植被缓冲带具有降低洪枯比的作用,可有效改善水文循环。修建缓冲带后年均径流量为 3.01 m³/s,较无缓冲带时增加了 83.5%,缓冲宽度对径流的影响不显著。分析其原因,植被缓冲带能改变流域水文条件,增加枯水期的流量,另外,研究区地处东北寒冷地区,冬季积雪 80~120 d,植被缓冲带具有较好的滞留雪的能力。春季融雪时,有植被覆盖区域的反射率较其他地区高,因而可以吸收的太阳能量、蒸腾量相应有所减少,有利于增加径流补给^[20]。相对于无水土保持措施,修建 1 m,2 m,5 m,10 m,15 m 缓冲带使研究区泥沙入河量分别降低了 22.56%,27.84%,

39.18%, 50.85%, 57.43%。缓冲带对入河泥沙量有一定的削减作用,且呈现出宽度越大,削减效果越好的趋势。缓冲带的功能随时间有显著变化,分析 2004—2009 年修建缓冲带后入河泥沙量,2005 年开始明显减小,之后趋于平缓,但在实际应用时,由于受到植被生长周期的影响,截留泥沙量是一个缓慢的过程。植被缓冲带减少泥沙是因为植被缓冲带改变了原有地表植被类型和微地形,保护土壤团聚体避免降雨的直接破坏,从而影响土壤侵蚀的动力和抗侵蚀阻力系统,减少土壤侵蚀作用^[21]。

4 结 论

(1) 对模型进行校准和验证后,评价参数均满足要求,表明 SWAT 模型对招苏台河流域的应用研究是可行的。

(2) 招苏台河流域年平均径流量、输沙量为 1.64 m³/s、6.71 万 t,土壤侵蚀强度属于微度侵蚀。径流量、输沙量的年内分布具有季节性特点,7 月、8 月份径流量和输沙量达到峰值。产流、产沙与地形和土地利用类型有关,产流量较大的是子流域 18,19,22,26,占总量的 33.07%;产沙量较大的子流域是 5,10,18,19,22,26,占研究区总量的 42.69%。

(3) 河流两岸修建植被缓冲带后年径流量有所增加,泥沙入河量显著减少,缓冲带可有效改善水文循环,缓冲带的宽度应综合考虑流域地形、坡度、土壤结构、植物类型等因素进行确定。

(4) 招苏台河两岸目前多为耕地,无任何河岸护坡设施,居民区附近畜禽粪便及生活垃圾随意堆放,泥沙运移易携带大量的污染物和植物性营养物进入河流,导致水体污染严重。因此,揭示泥沙产生、运移的规律,实施有效的水土保持工程,不仅可减少水土流失量,也是改善河流污染,减缓跨省界河流污染负荷的重要措施。

参考文献:

- [1] 李嘉峻,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, 2005, 41(3): 297-303.
- [2] 杨巍,汤洁,李昭阳,等. 基于 SWAT 模型的大伙房水库汇水区径流与泥沙模拟[J]. 水土保持研究, 2012, 19(2): 77-81.
- [3] 庞靖鹏,徐宗学,刘昌明. SWAT 模型研究应用进展[J]. 水土保持研究, 2007, 14(3): 31-34.
- [4] FitzHugh T W, Mackay D S. Impacts of input parameter spatial aggregation on an agricultural nonpoint source pollution model[J]. Journal of Hydrology, 2000, 236(1): 35-53.
- [5] Santhi C, Arnold J G, Williams J R, et al. Validation of the SWAT model on large river basin with point and nonpoint sources[J]. Journal of the American Water Resources Association, 2001, 37(5): 1169-1188.
- [6] 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.
- [7] 于磊,朱新军. 基于 SWAT 模型的中尺度流域土地利用变化水文相应模拟研究[J]. 水土保持研究, 2007, 14(4): 53-56.
- [8] 梁小军,江洪,祝求安,等. 岷江上游流域不同土地利用与气候变化的径流响应研究[J]. 水土保持研究, 2008, 15(5): 30-33.
- [9] Arnold J G, Williams J R, Maidment D R. Continuous-time water and sediment-routing model for large basins[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1995, 121(2): 171-183.
- [10] 王中根,刘昌明,黄友波. SWAT 模型的原理、结构及应用研究[J]. 地理科学进展, 2003, 22(1): 79-86.
- [11] 汤洁,杨巍,李昭阳,等. 辽河大伙房水库汇水区农业非点源污染入库模拟[J]. 吉林大学学报:地球科学版, 2012, 42(5): 1462-1476.
- [12] Arnold J G, Allen P M. Estimating hydrologic budgets for three Illinois watersheds[J]. Journal of Hydrology, 1996, 176(1): 57-77.
- [13] 汤洁,刘畅,杨巍,等. 基于 SWAT 模型的大伙房水库汇水区农业非点源污染空间特性研究[J]. 地理科学, 2012, 32(10): 1247-1253.
- [14] 郝芳华,程红光,杨胜天. 非点源污染模型理论方法与应用[M]. 郑州:黄河水利出版社, 2008.
- [15] 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.
- [16] 和继军,蔡强国,王学强. 北方土石山区坡耕地水土保持措施的空间有效配置[J]. 地理研究, 2010, 29(6): 1017-1026.
- [17] 柴世伟,裴晓梅,张亚雷,等. 农业面源污染及其控制技术[J]. 水土保持学报, 2006, 20(6): 192-195.
- [18] 倪九派,傅涛,卢玉东,等. 缓冲带在农业非点源污染防治中的应用[J]. 环境污染与防治, 2002, 24(4): 229-231.
- [19] 袁希平,雷廷武. 水土保持措施及其减水减沙效益分析[J]. 农业工程学报, 2004, 20(2): 296-300.
- [20] 孙惠南. 近 20 年来关于森林作用研究的进展[J]. 自然资源学报, 2001, 16(5): 407-412.
- [21] 唐丽霞. 黄土高原清水河流域土地利用/气候变异对径流泥沙的影响[D]. 北京:北京林业大学, 2009.