

基于 AnnA GNPS 模型的大宁河流域泥沙输移比评价

花利忠^{1, 2, 3}, 贺秀斌², 颜昌宙¹, 韦杰², 南宏伟²

(1. 中国科学院 城市环境研究所, 福建 厦门 361021; 2. 中国科学院 水利部 成都山地灾害与环境研究所, 四川 成都 610041; 3. 中国科学院 生态环境研究中心, 北京 100085)

摘 要: 选择三峡库区大宁河流域为研究区, 基于流域土地利用、土壤、地形及 11 个气象站 8 a 气象数据等资料, 利用分布式流域评价模型——AnnA GNPS 研究了流域泥沙输移特性。结果表明, 大宁河流域多年平均输沙量自上游巫溪站的 1.25×10^6 t/a, 沿程递增至大昌站的 1.81×10^6 t/a, 大昌站以下增加缓慢, 到流域出口为 1.95×10^6 t/a; 东溪河和巫溪站以下至大昌站的大宁河干流左岸区间是两大产沙集中区; 全流域 SDR 值为 0.30, 各子流域 SDR 值变化范围为 0.376 ~ 0.531, 与相关文献研究结果一致; 干流控制站点 SDR 值与流域站点控制面积呈负相关关系 ($r^2 = 0.73$), 但这种关系在各支流上不明显, 这是由于各子流域地形、土壤、土地利用和降雨量空间异质性都很大, 表明对于不同的流域, 仅用 SDR 值与流域面积关系无法确切计算其 SDR 值。

关键词: AnnA GNPS 模型; 泥沙输移比; 三峡库区; 大宁河流域

文献标识码: A

文章编号: 1000—288X(2009)03—0154—05

中图分类号: X87, TV141

Assessment of Sediment Delivery Ratio in Daning River Watershed Based on AnnA GNPS Model

HUA Li-zhong^{1, 2}, HE Xiu-bin², YAN Chang-zhou¹, WEI Jie², NAN Hong-wei²

(1. Institute of Urban Environment, Chinese Academy of Sciences, Xiamen, Fujian 361021, China;

2. Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610041, China

3. Research Center for Ecocnvironmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China)

Abstract: Annualized Agricultural Non-Point Source model (AnnA GNPS), a continuous-simulation model at watershed scale, simulates surface water, sediment, nutrients, and pesticides leaving the cells and their transport through watershed. The Daning River watershed is selected as a study case. The characteristics of sediment delivery are studied based on landuse, soil, topographic data, and eight-year climatic data from 11 meteorological stations. Averaged annual sediment load is 1.25×10^6 t/a at the Wuxing station, rapidly rises up to 1.81×10^6 t/a at the Dachang station, and reaches 1.95×10^6 t/a at the watershed outlet. Xixi River, one of the biggest tributaries in the Daning River watershed, has the largest volume of water discharge up to 20.97% of the total at the watershed outlet. Dongxi River, the second tributary, has the most sediment load up to 26.88% of the total at the watershed outlet. In addition, the area of left bank in the middle watershed (from Wuxi station to Dachang station) is another large sediment source. The sediment delivery ratio (SDR) of the whole watershed is 0.30 in accordance with published references. Viewed from four main stream stations, i.e. Dongxi river outlet, Wuxi station, Dachang station, and the watershed outlet, the SDR is positively correlated with the watershed area. However, the relation is not significant in the six tributaries owing to the high variations of drainage area, slope, runoff-rainfall factors, land use/land cover, etc.

Key words: AnnA GNPS model; sediment delivery ratio; Three Gorges Reservoir region; Daning River watershed

收稿日期: 2008-01-23

修回日期: 2008-11-11

基金项目: 国家 973 项目 (2003CB415201); 中国科学院知识创新工程重要方向项目 (KZCX2-YW-422); 国家自然科学基金课题 (40701059); 中国科学院西部行动计划项目 (KZCX2-XB2-07-01)

作者简介: 花利忠 (1978—), 男 (汉族), 山西省晋中市人, 博士后, 主要从事流域侵蚀产沙模拟和城市生态环境规划研究。E-mail: hualizhong2008@yahoo.com.cn。

侵蚀泥沙可以携带大量污染物进入河流系统进而造成严重的水质恶化,同时,还可能造成湖泊水库淤积、江河堵塞,加剧洪涝灾害。因此输沙量常被作为水库和水坝建设中预测和判断非点源污染的重要指标之一,但输沙量的预测目前仍然存在许多问题^[1]。泥沙输移比 SDR (sediment delivery ratio) 的概念最初由 Brown 于 1950 年为估计美国入河、入海的泥沙量而提出的,反映了流域侵蚀泥沙输移能力状况的指标,其确切估算对于流域泥沙的控制、自然资源的可持续利用及环境保护非常重要,为此流域泥沙输移比的研究引起国内外众多学者的关注。然而,SDR 的确定受众多因素影响,如入口泥沙的来源与质地、沙源与主河道的距离、沟壑密度、流域面积、坡度、坡长、土地利用/土地覆被变化以及降雨—径流等。因此,虽然美国农业部于 1972 年发布了关于 SDR 与流域面积关系的手册,但目前还没有能够十分精确地估算 SDR 的方法^[2]。

我国泥沙输移比的研究始于 20 世纪 70 年代后期,主要集中在黄河中游,直到 80 年代随着三峡枢纽工程兴建的可行性论证需要,长江流域泥沙输移比研究才得以发展,但这方面的研究还不成熟,对一些问题的认识存在较大分歧,许多对 SDR 值的研究,除少数小流域为定量研究外,多数属于定性的或半定量研究^[3],至今对长江流域的泥沙输移比的大小尚未形成共识。

AnnA GNPS (annualized agricultural non-point source)^[4] 模型是一个连续模拟地表径流、泥沙和污染物负荷的分布式流域评价模型,可用来进行水土流失研究,以确定土壤侵蚀风险区,也可以评价流域内农业管理措施对流域水文和水质的响应,进而评估 BMPs 的风险及其花费或进行效益分析。由于该模型的科学性和实用性已被国外许多政府部门接受,并作为流域管理和水质监测等方面的有效工具之一。该模型在中国应用较少,主要集中于东南沿海^[5-6]和黄土高原^[7],且主要是针对流域的水质污染,特别是氮磷污染,缺乏对中等尺度流域 SDR 值的研究。三峡水库兴建的泥沙问题关系到水库的寿命与效益,长江流域泥沙输移比的准确计算不仅使入库沙量通过流域侵蚀量来正确地预估,而且还能确切地评估某时段水土保持效益,采用 AnnA GNPS 模型研究三峡库区的大宁河流域泥沙输移规律具有重要的理论意义与实践价值。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

大宁河流域位于三峡库区的腹心地带,地处大巴

山东段南麓的渝、陕、鄂 3 省(市)结合部,东接湖北省神农架林区,西与重庆开县、云阳接壤,北连重庆城口县和陕西省镇坪县,地跨东经 108°44′—110°11′,北纬 31°04′—31°44′,干流全长为 162 km,流域面积 4 181 km²。该流域是长江三峡库区的重点淹没区之一。

研究区地处大巴山弧形构造、川东褶皱带及川鄂湘黔隆起褶皱带的结合部位,地质构造体系复杂,以石灰岩为主。流域内由于内力地质作用和后期强烈的侵蚀、剥蚀、溶蚀,形成了地势陡峭,岩溶发育,沟谷密布,峡谷幽深的景观,以中、低山为主(占全流域的 95%以上),少有丘陵平坝的地貌景观。流域属于亚热带季风气候,四季分明,光照充足,降水丰沛,年均降雨量在 1 000 mm 以上,但时间分布极不均匀,其中汛期降雨量(4—10 月)占全年降雨量的 87%以上。流域土壤类型有黄壤、黄棕壤、棕壤、石灰(岩)土、山地草甸土、紫色土、新积土和水稻土共 8 个土类,其中面积最大的类型是黄壤,占流域面积的 45.8%。流域植被类型复杂,主要地带性植被有亚热带常绿阔叶林、常绿及落叶混交林,低山针阔林及竹林和草本、禾本农作植被。该区内山高坡陡,降雨集中,土壤侵蚀严重。

1.2 模型简介

1998 年,美国农业部的农业研究局(USDA-ARS)与自然资源保护局(NRCS)针对流域农业管理措施的响应情况而设计了基于连续事件的流域尺度的分布式农业非点源污染模型——AnnA GNPS,它克服了场次降雨模型 A GNPS (agricultural non-point source)对流域内非点源污染无法进行长期预测的缺点。AnnA GNPS 模型按流域水文特征将流域划分成任意形状的均质分室(cell)单元,然后由河网把这些分室单元连接起来,以日为尺度连续模拟各分室单元的径流、泥沙、养分和农药负荷量,通过河道演算得到流域出口处各种成分的量。模型可以模拟流域内任一分室单元的各成分的量,并对任何指定河段上输出的各成份进行汇总统计。模型主要由降雨径流子模型、侵蚀子模型和物质迁移转化子模型组成。降雨径流子模型中,采用美国土壤保护局曲线值(SCS-CN)方法计算地表径流,修正的 TR-55 方法计算峰值径流。侵蚀子模型中,采用 RUSLE 模型计算坡面侵蚀,HUSLE 模型计算由坡面沉积物进入沟道的输移率,河道泥沙输移计算则基于 Bagnold 水流挟沙力方程和改进的 Einstein 储存平衡方程。化学物质迁移模型块中,采用 EPIC(erosion productiv-

ity impact calculator)和GLEAM(groundwater loading effects of agricultural management systems)模型模拟氮、磷、有机碳和杀虫剂等物质的日动态变化。AnnAGNPS模型的输入参数主要包括地形、气象、土地特征和农田管理等。模型内部提供了众多的模块大大方便了模型参数的生成,各模块与ArcView GIS紧密集成,所有运算都由下拉式选单直接驱动各程序进行,从而大大提高了运算效率与可视化程度。

1.3 泥沙输移比定义

泥沙输移比一般可以定义为,流域某一断面实测输沙量与断面以上流域侵蚀量之比,一般可用下式(1)表示

$$SDR = r / T \quad (1)$$

式中:SDR——泥沙输移比(无量纲); r ——流域出口断面实测输沙量 [$t / (km^2 \cdot a)$]; T ——控制断面以上流域总的土壤水蚀量 [$t / (km^2 \cdot a)$]。

1.4 参数获取

模型所需主要参数来源于文献[8-16]。地理参数包括分室单元数据和沟道数据,它们由模型内置的河网生成器(Flownet Generator)计算。分室单元数据包括分室单元编号、沟道代号、水流进入沟道的位置、分室单元面积、坡度、平均高程、坡向和汇流时间或者薄层流、浅层流、集中流的坡长、坡度等参数。沟道数据包括沟道比降、下一级沟道代码、末端海拔高度、底宽、顶宽和沟道长度等参数。利用Flownet Generator模块,通过设置临界源面积(critical source area, CSA)和最小源头沟道长度(minimum source channel length, MSCL) 2个参数,按流域水文特性将整个流域离散化为3268个分室单元数和1314条沟道。土地利用信息源为2004年10月的Landsat 5 TM遥感影像,分类系统采用中科院在“八五”期间“国家资源环境遥感宏观调查、动态调查、动态分析与遥感技术前沿的研究”提出的两级分类系统^[17],对遥感影像人机交互解译并结合研究区典型样区进行野外验证后建立土地利用数据库。根据调查结果,流域作物概化为水稻、小麦、玉米和油菜4种,认为水田主要以水稻和油菜轮作,而旱地则以玉米和小麦轮作。各种专题数据包括气象、土壤和作物生长与田间管理等都在GIS平台上经过适当处理以符合模型需求。

2 结果与讨论

根据所获取的模型运行数据,包括流域土地利用、土壤、地形、作物管理及流域内11个气象站8a

(1998—2005年)气象数据等资料,利用模型计算得到流域各个分室单元的径流、土壤侵蚀量和输沙量。据重庆市2005年水土流失公报显示:巫溪和巫山两县的微度侵蚀面积比例分别为50.29%和56.56%,取平均值53.43%,表示大宁河流域微度侵蚀比例。模型预测的大宁河流域微度侵蚀面积比例为47.76%,两者相差10.61%。实测的巫溪站2000—2004年平均输沙量为 $1.303 \times 10^6 t/a$ ^[18],巫溪站控制面积2000 km²,则平均输沙模数为 $651.7 t / (km^2 \cdot a)$,模型预测的巫溪站同期平均输沙量和输沙模数为 $1.089 \times 10^6 t/a$ 和 $544.5 t / (km^2 \cdot a)$ 。预测精度为83.5%左右。表明模型对流域侵蚀产沙的预测是比较合理的。

选择大宁河流域6条最大支流和4个主要站点(东溪河出口,即东溪河与干流交汇处,可视为控制站点)的控制面积作为研究对象。各支流和站点控制面积边界的划分仍然通过Flownet Generator模块,通过调试,发现设置CSA = 8000 hm², MSCL = 20000 m时,这些边界被很好地划分出来(图1)。大昌站控制的流域面积为3050 km²,6条支流面积之和占流域总面积的74%,其中西溪河面积最大为750.9 km²,柏杨河面积最小为284.3 km²。

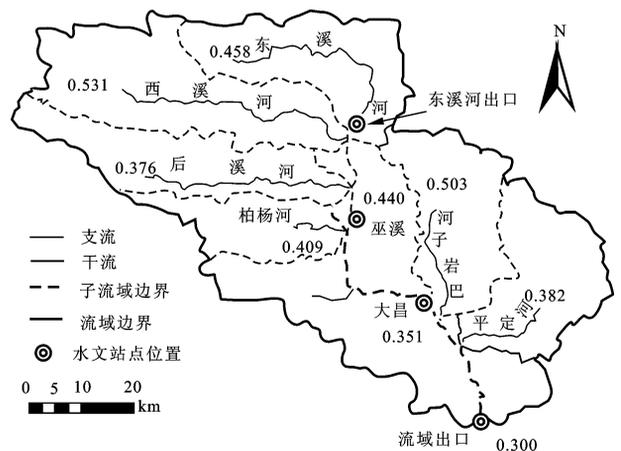


图1 大宁河流域泥沙输移比空间分布

各支流和站点的径流量和输沙量计算,需要首先指定其汇流位置,也就是沟道代码(如巫溪站代码为284),通过模型的河道演算功能得到各处的径流与输沙量(表2)。但侵蚀量的计算不同,模型用RUSLE方程已经计算了各分室单元的侵蚀量,即整个流域的侵蚀分布,用各支流和站点控制面积边界剪切这个流域侵蚀分布图,然后按各支流和站点控制面积进行汇总得到侵蚀量(表1)。

表1 大宁河流域主要支流和干流控制站点的多年平均水沙特征

子流域控制站点名称	集水面积/ km ²	年均产流量/ (10 ⁸ m ³ ·a ⁻¹)	占总径流量比 例/%	年均径流深/ (mm·a ⁻¹)	年均输沙量/ (10 ⁴ t·a ⁻¹)	占总输沙量比 例/%	年均输沙模数/ (t·km ⁻² ·a ⁻¹)	年侵蚀量/ (10 ⁴ t·a ⁻¹)	年均侵蚀模数/ (t·km ⁻² ·a ⁻¹)	占总侵蚀量比 例/%
东溪河	542	2.7	14.52	501.8	52.3	26.88	965.8	114.3	2 108.0	17.61
西溪河	751	3.9	20.97	524.1	48.8	25.08	650.1	91.9	1 223.9	14.17
后溪河	515	2.8	15.05	540.7	24.0	12.33	465.8	63.7	1 237.7	9.82
柏杨河	284	1.6	8.60	565.2	31.6	16.24	1 111.2	77.2	2 715.0	11.90
巴岩子河	463	1.4	7.53	299.9	19.0	9.76	410.3	35.5	766.6	5.47
平定河	485	1.8	9.68	378.1	19.5	10.02	402.8	51.2	1 054.9	7.89
巫溪站	2 000	10.3	55.38	513.4	124.6	64.03	623.1	283.5	1 417.4	43.69
大昌站	3 050	15.3	82.26	500.1	181.2	93.11	594.1	516.0	1 691.7	79.53
流域出口	4 181	18.6	100.00	444.9	194.6	100.00	465.3	648.8	1 551.7	100.00

大宁河流域各支流和干流控制站点的 8 a 平均水沙特征列于表 1 中。大宁河干流多年平均输沙量自上游巫溪站的 1.25×10^6 t/a, 沿程递增至大昌站的 1.81×10^6 t/a, 大昌站以下增加缓慢, 到流域出口为 1.95×10^6 t/a。6 条支流中, 侵蚀最严重是柏杨河, 流域平均侵蚀模数达 $2 715.0$ t/(km²·a), 其次是东溪河, 平均侵蚀模数最低的为巴岩子河 766.6 t/(km²·a)。各条支流中, 西溪河对流域出口的径流量贡献最大, 年均产流量 3.9×10^9 m³, 占流域出口的 20.97%。对流域出口——长江干流输沙量贡献最大的是东溪河, 年均输沙量 5.23×10^5 t, 占流域出口的 26.88%; 此外, 巫溪站以下至大昌站的大宁河干流左岸区间也是产沙集中区, 这一地区降雨量大且集中, 年均径流深大, 以坡耕地和低覆盖度草地为主, 因此侵蚀产沙严重, 如柏杨河在各支流中年均径流深最大, 面积不大, 产流量只占总流域的 8.60%, 但输沙量却占 16.24%, 年均输沙模数高达 $1 111.2$ t/(km²·a)。

图 1 显示了流域泥沙输移比 SDR 值的分布图, 各支流的 SDR 值变化范围很大, 为 0.376 ~ 0.531, 相差 41.2%, 与向安东等^[3]和张信宝等^[19]对长江上游主要流域 SDR 值变化范围分别为 0.15 ~ 0.61 和 0.15 ~ 0.66 的研究结果相符。AnnA GNPS 模型预测的大宁河全流域的 SDR 值为 0.30, 该结果与史德明等^[20]对库区流域 SDR 值 0.28 的研究结果接近。

从干流控制站点看, 即从上游东溪河出口经巫溪、大昌最后到流域出口, SDR 值与流域面积呈负相关关系 ($y = -0.071 \ln x + 0.925$, $r^2 = 0.73$), 说明在同一流域干流控制点上, SDR 值随流域面积增大而呈现减少的趋势。但从 6 条支流看, SDR 值与流域面积无明显相关关系, SDR 值最高的是面积最大的西溪河 0.531, SDR 值最低的是后溪河 0.376, 这

是由于各个子流域地形、土壤、土地利用和降雨量空间异质性都很大, 而它们与 SDR 值密切相关, 仅仅用 SDR 值与流域面积关系无法确切计算不同流域的 SDR 值。

3 结论

基于流域土地利用、土壤、地形及流域内 11 个气象站 8 a 气象数据等资料, 利用 AnnA GNPS 模型计算了大宁河流域 6 条最大支流和干流控制站点的径流、侵蚀量和输沙量, 分析了流域泥沙输移特征。

该模型为土壤侵蚀产沙和泥移输移的研究提供了一种新的手段, 是实现流域优化管理的有效工具之一, 深入研究该模型在我国的应用, 加强侵蚀泥沙的科学调查和研究工作, 通过模型对侵蚀泥沙迁移过程的模拟, 找出关键污染源区及迁移路径, 预报土壤侵蚀与泥沙负荷, 对于经济有效地逐步解决我国的土壤侵蚀和江河泥沙问题具有重要价值。

致谢: 非常感谢中国气象局提供的气象数据, 以及中国科学院南京土壤研究所提供的土壤图。

[参 考 文 献]

- [1] 蔡强国, 刘纪根. 关于我国土壤侵蚀模型研究进展 [J]. 地理科学进展, 2003, 22(3): 242-250.
- [2] 蔡强国, 范昊明. 泥沙输移比因子及其关系模型研究现状与评述 [J]. 地理科学进展, 2004, 23(5): 1-9.
- [3] 景可. 长江上游泥沙输移比初探 [J]. 泥沙研究, 2002, 1: 53-59.
- [4] Yuan Y, Bingner R L, Rebich R A. Evaluation of AnnA GNPS on Mississippi Delta MSEA Watersheds [J]. Transactions of the ASAE, 2001, 44 (5): 1183-1190.
- [5] 王飞儿, 吕唤春, 陈英旭, 等. 基于 AnnA GNPS 模型的千岛湖流域氮、磷输出总量预测 [J]. 农业工程学报,

- 2003,19 (6) :281-284.
- [6] 黄金良,洪华生,杜鹏飞,等. AnnAGNPS 模型在九龙江典型小流域的适用性检验 [J]. 环境科学学报, 2005,25(8) : 1135-1142.
- [7] 贾宁凤,段建南,李保国,等. 基于 AnnAGNPS 模型的黄土高原小流域土壤侵蚀定量评价 [J]. 农业工程学报, 2006,22 (12) :23-27.
- [8] 花利忠,贺秀斌,颜昌宙,等. 三峡库区大宁河流域 AnnAGNPS 模型参数评价 [J]. 水土保持学报, 2008, 22(4) : 65-69.
- [9] Feike J L, William J A, Martinus T G, et al. The UNSODA Unsaturated Soil Hydraulic Database User's Manual Version 1.0 [M]// USEPA, Cincinnati, 1996.
- [10] Saxton K E, Rawls W. Soil texture triangle hydraulic properties calculator [OL]. [2008-06-10] <http://hydrolab.arsusda.gov/soilwater/Index.htm>.
- [11] 四川省农牧厅,四川省土壤普查办公室. 四川土壤 [M]. 成都:四川科学技术出版社,1995.
- [12] Sharply A N, Williams J R. EPIC-Erosion Productivity Impact Calculator: 1. Model Documentation [C]// USDA Technical Bulletin, No. 1768. Washington D C: USDA, 1990.
- [13] 章文波,付金生. 不同类型雨量资料估算降雨侵蚀力 [J]. 资源科学, 2003,25 (1) :35-41.
- [14] Renard K G, Forest G R, Weesies G A, et al. RULSE: A guide to conservation planning with the revised universal soil loss equation [C]// USDA Agricultural Handbook, No. 703. Washington D C: USDA, 1997.
- [15] 刘宝元,谢云,张科利. 土壤侵蚀预报模型 [M]. 北京:中国科学技术出版社, 2001:144-162.
- [16] 花利忠,贺秀斌,朱波. 川中丘陵区小流域土壤侵蚀空间分异评价研究 [J]. 水土保持通报, 2007,27 (3) : 111-115.
- [17] 刘纪远. 中国资源环境遥感宏观调查与动态研究 [M]. 北京:中国科学院出版社, 1996.
- [18] 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) :132-137.
- [19] 张信宝. 长江上游水土流失治理的思考:与黄河中游的对比 [J]. 水土保持科技情报, 1996(4) : 7-9.
- [20] 史德明,杨艳生. 三峡库周边地区土壤侵蚀对库区泥沙来源的影响及其对策 [C]// 中国科学院三峡工程生态与环境科研项目领导小组. 长江三峡工程对生态环境影响及其对策研究论文集. 北京:科学出版社, 1987:498-521.

(上接第 129 页)

(4) 植被覆盖度显著地影响着坡面产沙量。侵蚀量与土壤容重、径流深、降雨量、降雨强度之间的关系可以用 $y = -33.414 + 28.731x_1 + 4.770x_2 - 0.151x_3 + 2.363x_4$ 很好地描述。相对降雨量而言,降雨强度对侵蚀量的影响要大一些。

[参 考 文 献]

- [1] 李朝霞,王天巍,史志华,等. 降雨过程中红壤表土结构变化与侵蚀产沙关系 [J]. 水土保持学报, 2005,19(1) :1-4.
- [2] Abdu Abdelkair, Richard C Schultz. Water harvesting in a "runoff-catchment" agroforestry system in the dry lands of Ethiopia [J]. Agroforestry Forum, 2005, (63) : 291-298.
- [3] 陈浩. 降雨特征和上坡来水对产沙的综合影响 [J]. 水土保持学报, 1992,6(2) :17-23.
- [4] 王占礼,邵明安,常庆瑞. 黄土高原降雨因素对土壤侵蚀的影响 [J]. 西北农业大学学报, 1998,26(4) :101-105.
- [5] 卢金发,黄秀华. 黄河中游地区流域产沙中的地貌临界现象 [J]. 山地学报, 2004,22(2) :147-153.
- [6] 郭忠升. 水土保持林有效覆盖率及其确定方法的研究 [J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1996,2(3) :67-72.
- [7] 胡孟春,王周龙. 土壤侵蚀的自然—社会复合系统动态过程模拟研究 [J]. 科学通报, 1994,39(12) :1118-1121.
- [8] 许志信,赵萌莉. 过度放牧对草原土壤侵蚀的影响 [J]. 中国草地, 2001,23(6) :59-63.
- [9] 田万荣. 新疆天池“96·7”暴雨洪水分析 [J]. 水文, 2001,21(6) :63-65.
- [10] 刘卉芳,朱清科,孙中峰,等. 黄土坡面不同土地利用与覆盖方式的产流产沙效应 [J]. 干旱地区农业研究, 2005,23(2) :137-141.
- [11] 申震洲,刘普灵,谢永生,等. 不同下垫面径流小区土壤水蚀特征试验研究 [J]. 水土保持通报, 2006,26(3) : 6-10.
- [12] 何丙辉,缪驰远,吴咏. 遂宁组紫色土坡耕地土壤侵蚀规律研究 [J]. 水土保持学报, 2004,18(3) :9-12.
- [13] 孙飞达,王立,龙瑞军,等. 黄土丘陵区不同降雨强度对农地土壤侵蚀的影响 [J]. 水土保持研究, 2007,14(2) : 16-18.