

土壤侵蚀预警和决策支持系统的设计与应用

杜书立, 付微, 赵军, 张兴义

(中国科学院 东北地理与农业生态研究所 黑土重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150081)

摘要: 土壤侵蚀严重地影响了东北黑土区的土壤质量和粮食产量。利用 GIS 平台结合土壤侵蚀模型, 以遥感数据、田间采样数据和农户调查数据为数据源, 建立了侵蚀决策方案管理数字化地块图, 实现了 GIS 支持下的土壤侵蚀预警和侵蚀防治信息化决策, 可以根据不同地块的侵蚀程度, 提供不同的治理措施决策建议, 实现了田块尺度水土流失预警及水土保持决策的数字化管理, 建立了侵蚀黑土农区水土流失综合治理信息化管理样板。

关键词: 土壤侵蚀; RUSLE 模型; GIS 二次开发; 决策支持系统

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2014)01-0258-05

中图分类号: S157

Design and Application of Early Warning and Decision Support System for Soil Erosion

DU Shu-li, FU Wei, ZHAO Jun, ZHANG Xing-yi

(Key Laboratory of Black Soil, Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, Harbin, Heilongjiang 150081, China)

Abstract: Soil erosion has seriously affected black soil quality and food production in Northeast China. Based on GIS and RUSLE, a digital land-block map for decision making and management of soil erosion is made and the early warning and information decision making for erosion control with support of GIS is accomplished, by using remote sensing images, field sampling and farmer survey as data sources. Through this system, different control measures and suggestions can be provided according to erosion degrees in different land types, and digital management can be implemented for early warning of soil and water loss and decision making of soil and water conservation at field scale. In this way, information management model is established for comprehensive control of soil and water loss in Northeast China.

Keywords: soil erosion; RUSLE; GIS secondary development; decision support system

东北黑土区是世界上 4 大片黑土区之一, 是中国最主要的粮食生产基地之一。东北黑土区开发虽只有百余年^[1], 但由于受到降雨、径流、地形、地表植被、人类活动、土地利用类型以及耕作管理等众多因素的影响, 土壤侵蚀严重, 主要表现在坡耕地黑土层被剥蚀而变薄, 侵蚀沟纵横造成土地支离破碎^[2-5]。据调查统计, 黑土区每年流失掉的黑土总量达 $1 \times 10^8 \sim 2 \times 10^8 \text{ m}^3$, 其中流失的氮磷钾养分就相当于数百万吨化肥, 土壤有机质含量比开垦前下降了近 $1/2$ ^[6-7]。黑土区侵蚀沟已经达到 2.5×10^5 条余, 侵蚀耕地 $5.9 \times 10^5 \text{ hm}^2$ 以上^[1]。东北黑土区的土壤侵蚀问题已引起了广泛的关注, 近年来, 国家和地方逐步

加大防治力度^[8-10]。GIS 与 RS 已成为当前国家和区域水土流失普查的主要手段, 刚完成的“第一次全国水利普查”中的全国水土保持普查就是主要借助 GIS 与 RS 技术^[11-12]。利用空间数据, 对侵蚀区进行整体水土保持规划、水土流失治理和效益评价, 为直观认识水土流失危害和科学防治提供了重要手段。GIS 具有强大的设计、规划和管理决策功能, 通过预测水土流失, 宏观范围上直观地体现出侵蚀现状, 并且可以分析不同类型的数据, 连接不同的模型形式, 从而建立合理的 GIS 评价模型^[13]。同时 GIS 具有非常人性化的可视界面, 非常有利于相关人员进行深入分析以及正确决策。

收稿日期: 2013-03-08

修回日期: 2013-04-16

资助项目: 国家科技基础条件平台建设项目“地球系统科学数据共享平台, 东北数据分平台”(2005DKA32300)

作者简介: 杜书立(1987—), 男(汉族), 吉林省松原市人, 硕士, 研究实习员, 研究方向为地理信息系统应用和土壤生态。E-mail: dushuli@neigaeherb. ac. cn.

通信作者: 张兴义(1966—), 男(汉族), 黑龙江省哈尔滨市人, 博士, 研究员, 主要研究方向为土壤侵蚀。E-mail: zhangxy@neigaeherb. ac. cn.

选取东北黑土区松嫩平原中心地带海伦市光荣村作为研究区,光荣村土壤侵蚀区域多分布在耕地区域,在东北黑土区土壤侵蚀和水土流失表现上具有代表性。结合 ArcGIS, SuperMap 和 SuperObject 等软件,建立土壤侵蚀预警和决策支持系统,旨在为黑土区水土流失综合治理提供数字化平台。

1 研究区概况

松嫩平原黑土区光荣村位于黑龙江省海伦市,地理坐标为 $47^{\circ}20'N, 127^{\circ}48'E$ 。耕地面积 450 hm^2 , 占总土地面积的 85.1% , 农田地块 723 块, 面积 $0.3 \sim 7 \text{ hm}^2$ 不等, 主要种植作物为大豆和玉米^[14]。光荣村示范区地貌类型为平川漫岗地, 土壤类型为黑土, 土层较厚, 平均厚度 46.6 cm 左右; 土壤有机质含量平均约为 48.4 g/kg ; 当前土壤肥力总体比较肥沃, 但侵蚀强度大, 面蚀和沟蚀均严重, 且仍处于发展趋势。

2 土壤侵蚀方程及其各参数的计算

2.1 土壤侵蚀方程

土壤侵蚀方程是本系统的核心部分, 根据前人的研究以及参考众多参考文献, 选择张宪奎等^[15-18] 在 RUSLE 模型基础上建立的黑龙省土壤流失方程作为土壤侵蚀方程, 具体形式如下:

$$A=R \times K \times L \times S \times C \times P \quad (1)$$

式中: A ——单位面积多年平均土壤流失量 [$\text{t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$]; R ——降雨侵蚀力因子 (J/m^2); K ——土壤可蚀性因子 [$(\text{t} \cdot \text{hm}^2 \cdot \text{h})/(\text{hm}^2 \cdot \text{MJ} \cdot \text{mm})$]; L ——坡长 (m); S ——坡度 ($\%$); C ——植被与经营管理因子; P ——水土保持措施因子。

2.2 参数计算

根据张宪奎等^[18] 的研究, 降雨侵蚀力因子 R 为:

$$R=EI \quad (2)$$

式中: E ——一次降雨中某时段降雨量产生的动能 (J/m^2); I ——某时段降雨强度 (cm/h)。利用 1980 年以来海伦地区的降水数据, 运用张宪奎等的方法, 计算得出 $R=1\,225.5(\text{J}/\text{m}^2)$ 。

试验区光荣村地处黑土带的中心区域, 根据张宪奎等^[18] 的计算, 黑土区土壤可蚀性因子为 $K=0.26$ [$(\text{t} \cdot \text{hm}^2 \cdot \text{h})/(\text{hm}^2 \cdot \text{MJ} \cdot \text{mm})$]。

对于地形因子 LS , 国内外学者提出了很多种不同的计算方法^[19-23]。本文使用 ArcGIS 软件, 根据光荣实验区的 DEM 数据计算坡长因子 L 和坡度因子 S 。

植被与经营管理因子 C 是 RUSLE 中最重要的因子, RUSLE 用次因子法计算各种土地利用方式的

特定 C 值是建立在植物冠层、雨滴降落高度、地表覆盖度和糙度、根量及前茬土地利用方式、土壤前期含水量等基础之上, 从而提供更灵活的能描述种植制度和保土耕作措施或牧草轮作等的 C 值估计方法^[24]。根据光荣地区的实际种植作物以及其他植被情况, 结合张宪奎等^[18] 的研究结果, 我们选取植被与经营管理因子 C 分别为 $0.262\,6$ (大豆)、 $0.257\,8$ (玉米)、 0.06 (林地) 和 0.15 (草地)。

水土保持措施因子 P , 是指不同的土壤侵蚀治理措施下, 农地土壤流失量与顺坡耕作农地土壤流失量之比。根据张宪奎等^[18] 的研究, 我们选取 P 因子的数值为 1 (顺坡垄) 和 0.029 (横坡垄), 而在林地与草地地类中, 并不存垄向, 各种地表植被的生长方式以及位置分布是不符合垄向分布的, 因此在分布上对水土保持并没有很好的效果, 所以林地和草地的水土保持措施因子 P 值均为 1 。

2.3 建立土壤侵蚀管理地块图

以地块为基本单元逐个调查近 3 a 来的降雨强度、频率以及种植作物, 将调查结果整理并编码, 建立空间检索, 关联到专家知识库。同样以地块为基本单元, 对地块的相应信息进行采集, 包括土壤类型、土地利用类型、垄向、坡向以及土壤中氮磷钾等重要养分的含量等。

首先, 利用 ArcGIS 软件对空间分辨率为 2.5 m 的 ALOS 遥感数据进行解译得到土地利用图, 同时进行矢量化, 并与实地采集土壤养分数据和其他调查数据进行关联^[14]。然后, 根据光荣村的 DEM, 利用 ArcGIS 软件计算光荣试验区各地块的实际坡长。根据张宪奎等^[18] 建立的黑龙省土壤流失方程作为土壤侵蚀模型, 将地类、坡度、坡长等进行分类整理。地类分为耕地、林地、草地以及非农业用地, 由于侵蚀沟侵蚀严重, 在修复前无法进行利用, 因此, 将侵蚀沟作为独立的一个类型, 不归于其他地类之中; 坡度根据 $>0.5^{\circ}$, $0.5^{\circ} \sim 2^{\circ}$, $2^{\circ} \sim 3^{\circ}$, $3^{\circ} \sim 4^{\circ}$, $4^{\circ} \sim 5^{\circ}$, $5^{\circ} \sim 6^{\circ}$, $6^{\circ} \sim 7^{\circ}$ 以及 $>7^{\circ}$ 分级; 坡长根据 <100 , $100 \sim 200$, $200 \sim 500$ 及 $>500 \text{ m}$ 分级; 对于耕地, 作物垄向也是土壤侵蚀的重要因素, 垄向分为横坡垄和顺坡垄, 作为农田土壤侵蚀的重要因子。根据以上分级, 去掉不存在的组合部分, 共将光荣村试验区所有地块分为 34 类, 作为侵蚀管理单元模块, 从而制定不同的治理措施。表 1 中列出了这 34 类不同组合的具体组合形式, 即 34 类地块各自的地类、坡度范围、坡长范围以及垄向。附图 5 根据表 1 中的不同组合, 将光荣村的 34 类地块赋以不同的颜色, 从而进行分类管理和治理。

表 1 光荣村土壤侵蚀管理地块组合及各因子范围

分类编号	土地利用类型	坡度/(°)	坡长/m	作物垄向	分类编号	土地利用类型	坡度/(°)	坡长/m	作物垄向
1	草地	<0.5	<100	—	18	农田	<0.5	<100	顺坡垄
2	草地	0.5~2	<100	—	19	农田	<0.5	<100	横坡垄
3	草地	2~3	<100	—	20	农田	0.5~2	<100	顺坡垄
4	草地	3~4	<100	—	21	农田	0.5~2	<100	横坡垄
5	草地	4~5	<100	—	22	农田	2~3	<100	顺坡垄
6	草地	5~6	<100	—	23	农田	2~3	<100	横坡垄
7	草地	6~7	<100	—	24	农田	2~3	100~200	顺坡垄
8	草地	>7	<100	—	25	农田	3~4	<100	顺坡垄
9	林地	<0.5	<100	—	26	农田	3~4	<100	横坡垄
10	林地	0.5~2	<100	—	27	农田	3~4	200~500	顺坡垄
11	林地	2~3	<100	—	28	农田	4~5	<100	顺坡垄
12	林地	3~4	<100	—	29	农田	4~5	<100	横坡垄
13	林地	4~5	<100	—	30	农田	5~6	<100	顺坡垄
14	林地	4~5	100~200	—	31	农田	5~6	<100	横坡垄
15	林地	5~6	<100	—	32	农田	6~7	<100	横坡垄
16	林地	6~7	<100	—	33	侵蚀沟	—	—	—
17	林地	>7	<100	—	34	非农业利用土地	—	—	—

3 系统开发及数据库的建立

3.1 开发方式

可视化二次开发是现今 GIS 应用开发的主要发展方向。GIS 的软件平台与可视化二次开发软件相结合,具有很强的应用性,不仅快速方便,而且易于各个平台之间的移植。本文是以超图公司的 SuperMap Object 为 GIS 基础软件,利用 Visual Basic 语言作为开发程序,二者相集成的开发方式实现。

3.2 空间数据库建立

空间数据和属性数据进行分离式储存,通过关键字段进行连接调用。为了方便属性数据的编辑和更新,将属性数据置于关系数据库系统之中。空间数据中包括光荣实验区的地形数据、土地利用数据、土壤类型数据等,并且利用 ALOS 影像数据解译得到光荣村的地块数据;属性数据主要包括一些实地调查数据等。分别对空间数据和属性数据进行整理:空间数据配准、矢量化,并且分类;属性数据按照相同格式进行规范化、标准化。属性数据可以通过 SQL 数据库进行数据访问进而进行属性数据查询等,并且可以通过二次开发语言与空间图形数据进行交互性操作。属性数据库的调用完全在后台执行,图形和属性数据的查询与维护在同界面下实现。

4 系统设计与功能

4.1 系统设计

4.1.1 系统设计目标 光荣示范区土壤侵蚀预警决

策支持系统是用于为不同土壤条件和不同侵蚀强度下的土壤侵蚀综合治理的 GIS 管理平台。具体目标是:实现直观的可视化的地块信息查看,主要是包括侵蚀影响因子和土壤养分信息并且提供相应地块的侵蚀强度;为管理者提供宏观决策分析平台,使管理者能够对系统进行维护,数据更新、查询、分析;为农民用户提供根据不同侵蚀情况而制定的侵蚀综合治理措施,如生物措施,工程措施,合理施肥等。

4.1.2 系统框架 由于使用者层次和专业不一,因此系统框架设计时注重以用户为主,界面整洁、易懂,操作简单,人性化强。

对于空间数据和属性数据,采用分离的方式进行储存,之后在 VB 中编写接口,调用 ODBC 与数据库源进行连接,之后再利用 RDO 和 SQL 进行数据的访问查看。主要包括数据输入和输出,数据显示,空间数据的分析,专题图制作,系统配置与维护,数据库,侵蚀治理措施等模块(见图 1)。

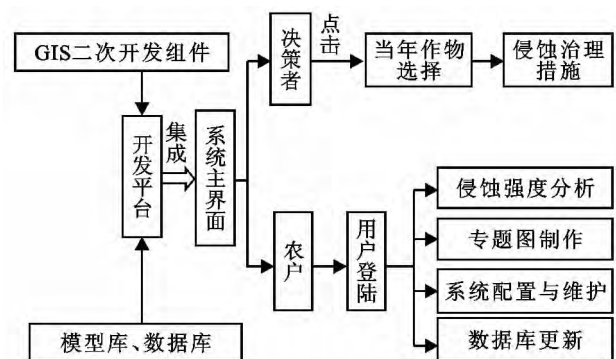


图 1 土壤侵蚀预警和决策支持系统集成过程

4.2 系统功能

在进行系统功能和界面设计时,以方便实用为原则,系统界面简洁,具有较好的实用性。

(1) 地图基本操作。具有基本的 GIS 功能,包括放大、缩小、自由缩放、移动和全图显示。这些功能直观,且便于操作,适合不同人群使用。

(2) 地形查询。地块的坡度范围是侵蚀强度的重要指标,通过地形状况功能,可以清晰简易地显示出各个不同坡度范围的地块,同时对于已经形成的侵蚀沟也会重点标注,这样非常有助于使用者快速定位不同侵蚀强度的地块和侵蚀沟位置。

(3) 侵蚀预警与治理功能。侵蚀预警和治理功能是本系统的重点,主要是利用张宪奎等^[18]在 RUSLE 模型基础上建立的黑龙省土壤流失方程作为土壤侵蚀方程为驱动,进行侵蚀模数计算,之后根据《黑土区水土流失综合防治技术标准》^[25]进行侵蚀强度分级,并且根据不同的侵蚀强度制定综合治理方案。

4.3 系统应用

土壤侵蚀预警功能模块中主要包括地块状况、地块信息、侵蚀预警、综合治理方案、效益评估等功能。本系统针对 2 个层次的用户。第一是管理者,他们有宏观分析和决策的能力,可以利用该平台对区域水土流失情况的变化进行分析和决策。第二是农户,他们可以利用该系统平台,了解自家的地块水土流失的状况,在耕作时应该采取哪些措施更有利于达到保水保肥、优质高产的目的。针对不同的用户,操作系统侧重不同,但尽量简单化,采取触摸点击的方式操作。输出的结果也尽量简单易懂。

4.3.1 管理者应用平台 该系统结合不同地块的坡长、坡度、土地利用方式、土壤性状和种植管理等具体信息,进行土壤侵蚀分类分级。土壤侵蚀强度分级,系统以年平均侵蚀模数为判别指标,在缺少侵蚀模数实测资料时,根据有关侵蚀方式(面蚀、沟蚀)的判别指标进行^[25]。该区域共形成了 34 种不同地形地貌、侵蚀强度、土壤养分等组合方案,当管理者用户选中地块时,即会在预警提示窗口中显示出其侵蚀模数以及侵蚀强度等具体信息,让使用者直观地感受到耕种地块所处水土流失危害的程度。例如,当管理者要对分类号为 27 的地块进行分析和决策时,点击地块分类号为 27 的地块,系统即会提示此地块平均坡度为 3.78° ,坡度范围 $3^\circ\sim 4^\circ$,侵蚀模数为 $44.3 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$,介于 $36\sim 48 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$,属于土壤侵蚀极强烈区域,达到严重预警。系统同时会给出相应的治理措施如工程措施:修筑坡状梯田,坡顶种植水保林,林侧挖节流

沟;耕作措施:沿坡状梯田横坡起垄、秋起垄、秋双层深施肥、垅底深松,另增加根茬、有机质还田等措施的综合治理模式;生物措施:沿坡每隔 50 m 修一条宽 1~2 m 的生物隔离带,可选种多年生牧草、多年生经济植物(如石刁柏、胡枝子等)。

对分类号为 3 的地块进行分析和决策时,如上例操作,系统会提示该地块坡度范围为 $2\sim 3^\circ$,属中度侵蚀区,极易成为侵蚀严重区域,提示具体的治理措施:工程措施需采取农田防护林体系和耕作措施,按国家和省级防护林体系标准营造农田防护林,减轻风蚀、水蚀的侵害;耕作措施中主要采取横坡起垄、秋起垄、秋双层深施肥、垅底深松,另增加根茬、有机质还田等措施的综合治理模式;暂时还不需要生物措施。

对于侵蚀沟的治理,用户需选中第 33 类地块,系统会提示该地块为侵蚀沟区,并提出预警。系统针对沟沿、沟底和沟坡 3 个重点部位提出治理措施,如沟沿治理中包括沿沟造林或者播撒一些根系发达,固土能力强的灌木或草本植物,并禁止放牧、取土等人活动,以防止人为破坏;沟底治理中有修筑谷坊,之后种植根系发达、根蘖力强、枝叶繁茂、耐水湿的树种等措施;沟坡治理中包括造林、修建梯田等措施。总之,针对 34 种不同类别的土壤侵蚀区,系统都分别组合了以往专家的知识水土流失治理的标准方案,可以实现针对不同类别进行分析和综合治理。

4.3.2 农户应用平台 农户的应用主要是获得地块土壤侵蚀的信息,综合治理的决策方案和决策指导,达到保水保肥,提高土壤肥力和作物产量的目的。为了方便农民用户使用,我们设计了两种方式进入系统:(1) 农户直接在图上找到自家地块点击进入,得到自家地块的详细信息;(2) 由于农民的知识和对计算机的应用有限,一般的汉语拼音都难以输入,所以为了方便农户的使用,我们对每个农户承包的地块都进行了编号,这样农户在使用时输入自家的编号即可进入自家地块,获得相应的地块信息。主要包括:面积、土壤养分状况、肥力等级、地块坡长、平均坡度、前几年种植信息、产量等信息。并得到根据农户自家的自然条件,地形地貌,土壤养分的作物种植指导,如坡度较大的区域,系统提示改顺坡垄为横坡垄,以及如何起垄,是否还应该种植生物隔离带,施肥的方案选择,增施有机肥和化肥的用量以及施肥方法等。如点击农户高大海家,系统会自动弹出地块信息、养分信息和决策概况 3 个窗体。养分信息窗口中提示高大海家地块碱解氮含量偏高,有效磷含量低,速效钾含量低;地块信息窗口提示农户高大海家地块的主要信息,包括地类代码、农户姓名、坡度等;在决策概况窗口中,

针对种植作物大豆,有以下推荐施肥方案:建议施尿素 30~31.5 kg/hm²,二胺 108 kg/hm²,50%硫酸钾 75 kg/hm²。之后提示施肥方法:氮肥、磷肥和钾肥作为底肥全部一次性施入。

4.4 系统管理与更新

根据使用功能的不同,只有管理者和设计者可以进行系统的更新。通过进入系统后台,对系统进行数据维护,以及对数据进行编辑和更新,并且可以进行治理方案更新和升级,重新制定,根据不同要求对专题图的制作以及进行一些空间分析工作的更新等。

5 结论

应用结果表明,该系统平台的应用,为管理者提供了到农户地块的,可以定量分析的水土流失综合治理分析平台,促进了农村信息化,农业现代化管理的进程。通过系统平台的工程指导、生物指导和耕作种植指导,使得水土流失的综合治理取得了很大的成效,农户在应用中方便快捷,在保水保肥提高作物产量上有一定程度的改进。

(1) 能将土壤侵蚀和土壤养分信息综合在一起,为农户耕作提供决策方案,提高了土地保水保肥的能力。

(2) 利用遥感数据和实地调查数据相结合,在 GIS 平台上生成以地块为基本单元的侵蚀治理单元图。方便管理者和农户使用。

(3) 充分利用当地长期田间定位试验研究成果和历年收集数据,结合张宪奎等^[8]提出的黑龙江省土壤侵蚀方程,建立土壤侵蚀模型,非常符合当地实际情况,实用性很高。

(4) 采用 GIS 平台与可视化编程语言二者相集成的开发方式,具有较好的可移植性、可扩展性;调用空间数据库和土壤侵蚀模型库,实现针对不同地块不同侵蚀强度,提出相应的治理措施。用户界面设计简洁、友好,易于操作。

[参 考 文 献]

- [1] 孟令钦,李勇.东北黑土区坡耕地侵蚀沟发育机理初探[J].水土保持学报,2009,23(1):7-11.
- [2] 张晓平,梁爱珍,申艳,等.东北黑土水土流失特点[J].地理科学,2006,26(6):687-692.
- [3] 范昊明,蔡强国,崔明.东北黑土漫岗区土壤侵蚀垂直分带性研究[J].农业工程学报,2005,21(6):8-11.
- [4] 范昊明,蔡强国,王红闪.中国东北黑土区土壤侵蚀环境[J].水土保持学报,2004,18(2):66-701.
- [5] 崔明,张旭东,蔡强国,等.东北典型黑土区气候、地貌演化与黑土发育关系[J].地理研究,2008,27(3):527-535.
- [6] 梁爱珍,张晓平,杨学明,等.东北黑土有机碳的分布及其损失量研究[J].土壤通报,2008,39(3):533-538.
- [7] 刘兴士,阎百兴.东北黑土区水土流失与粮食安全[J].中国水土保持,2009(1):17-19.
- [8] 王小兵,吴元元,邓玲.东北黑土区黑土退化防治与保护研究[J].资源与产业,2008,10(3):81-83.
- [9] 崔明,蔡国强,范昊明.东北黑土区土壤侵蚀研究进展[J].水土保持研究,2007,14(5):29-34.
- [10] 闫业超,张树文,岳书平.近 40 a 黑土典型区坡沟侵蚀动态变化[J].农业工程学报,2010,26(2):109-115.
- [11] 魏茂盛.移动 GIS 在全国第一次水利普查中的应用[J].水利信息化,2011,8(4):48-50.
- [12] 张岩,刘宪春,李智广,等.利用侵蚀模型普查黄土高原土壤侵蚀状况[J].农业工程学报,2012,28(10):165-171.
- [13] 卢敏,张展羽.GIS 在农业水土领域的应用与研究进展[J].中国农业水利水电,2004(9):8-11.
- [14] 李勇,赵军.针对农户地块的施肥决策支持系统的设计与实现[J].农业工程学报,2010,26(1):192-196.
- [15] 陈云明,刘国彬,郑粉莉,等.RUSLE 侵蚀模型的应用及进展[J].水土保持研究,2004,11(4):80-83.
- [16] 许月卿,邵晓梅.基于 GIS 和 RUSLE 的土壤侵蚀量计算:以贵州省猫跳河流域为例[J].北京林业大学学报,2006,28(4):68-71.
- [17] 史志华,蔡崇法,丁树文.基于 GIS 和 RUSLE 的小流域农地水土保持规划研究[J].农业工程学报,2002,18(4):172-175.
- [18] 张宪奎,许靖华.黑龙江省土壤流失方程的研究[J].水土保持通报,1992,12(4):1-9.
- [19] 杜朝正.基于 ArcGIS 的坡度分析[J].实验与技术,2009,25(1):17-18.
- [20] 刘和平,王秀颖,刘宝元.短坡条件下侵蚀产沙与坡长的关系[J].水土保持学报,2011,5(2):1-5.
- [21] 王秀颖,刘和平,刘宝元.变雨强人工降雨条件下坡长对径流的影响研究[J].水土保持学报,2010,24(6):1-5.
- [22] 章文波,刘宝元.基于 GIS 的中国土壤侵蚀预报信息系统[J].水土保持学报,2003,17(2):89-92.
- [23] 胡刚,伍永秋,刘宝元,等.GPS 和 GIS 进行短期沟蚀研究初探:以东北漫川漫岗黑土区为例[J].水土保持学报,2004,18(4):16-19.
- [24] 陈云明,刘国彬,郑粉莉,等.RUSLE 侵蚀模型的应用及进展[J].水土保持研究,2004,11(4):80-83.
- [25] 中华人民共和国水利部.SL446—2009 黑土区水土流失综合防治技术标准[S].北京:中国水利水电出版社,2009.