

基于 GIS 技术的古城小流域土壤侵蚀研究

孟凡影¹, 付伟涛¹, 杨欢¹, 刘明仁¹, 刘明月²

(1. 吉林建筑大学城建学院, 长春 130111; 2. 中国科学院 东北地理与农业生态研究所, 长春 130021)

摘 要:选取克山县古城小流域作为研究对象, 基于 GIS 技术, 选用修正的通用土壤流失方程计算土壤侵蚀模数, 依据《黑土区水土流失综合防治技术标准》进行侵蚀强度划分, 并分析各侵蚀强度空间分布特征、不同土壤侵蚀强度总量, 以及土地利用类型对土壤侵蚀的影响。研究表明: 研究区年侵蚀总量为 123 572.62 t, 侵蚀总面积为 12 494.31 hm², 占总土地面积的 34.81%。以轻度侵蚀为主, 中度侵蚀次之, 强烈、极强烈、剧烈侵蚀也有发生, 但侵蚀面积及侵蚀量均较小。轻度侵蚀集中分布于研究区中部、西北部; 中度侵蚀主要分布于研究区中部、东北部地区; 强烈侵蚀、极强烈、剧烈侵蚀零散分布于研究区内, 多为林地向旱地过渡区。土壤侵蚀主要发生在旱地、未利用地; 城乡工矿居民用地也较容易发生土壤侵蚀, 但侵蚀面积较小; 其他土地利用类型不易发生土壤侵蚀。

关键词: RUSLE 模型; 古城小流域; 土壤侵蚀; GIS

中图分类号: P208; S157

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2015)05-0009-05

GIS-Based Research of Soil Erosion in Gucheng Small Watershed

MENG Fanying¹, FU Weitao¹, YANG Huan¹, LIU Mingren¹, LIU Mingyue²

(1. The City College of Jilin Jianzhu University, Changchun 130111, China;

2. Institute of Northeast Geography and Agricultural Ecology, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130021, China)

Abstract: We selected the Gucheng small watershed of Keshan County as the research region. Based on the data of precipitation, the soil, DEM, the remote sensing data, the geographic information system (GIS) and remote sensing (RS) technology, the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) model was used to calculate the soil erosion and classify the calculation, then the soil erosion rate was analyzed, spatial distribution was evaluated, and with the impact of the land use on soil erosion was examined. Results showed that low-level was the main soil erosion rate, medium-level was just less than the low-level, high-level, very high-level and acute level also happened, but their percentages were relative low. Low-level soil erosion rate mostly distributed on the central region and the northwestern region, the medium-level distributed in the central region and the northeastern region, the other levels both scattered. The soil erosion most happened on the farmland or the unused-land, the residential area also existed soil erosion. The soil erosion did not readily occurred in the other kinds of land uses. Therefore, it could be seen that increasing the vegetation coverage of the forest or decreasing the area of farmland could control soil erosion.

Keywords: RUSLE model; Gucheng small watershed; soil erosion; GIS

土壤侵蚀是指地球表面的土壤及其母质在受重力、水力、风力、冻融等外力的作用下, 综合各种自然的、人为的影响因素, 而发生的各种破坏、分离、搬运及沉积的现象。依据外力作用可分为重力侵蚀、水力侵蚀、风力侵蚀、冻融侵蚀等土壤侵蚀类型, 其中水力侵蚀为最主要的形式, 通常称为水土流失^[1]。土壤

侵蚀可导致土地资源退化、土壤养分流失、江河污染、水体富营养化等危害, 已成为全球性公害^[2]。我国是世界上土壤侵蚀最为严重的国家之一, 根据水利部第 2 次遥感普查结果显示, 我国现有土壤侵蚀面积约 3.67×10^8 hm², 约占国土总面积的 38.2%^[3], 土壤侵蚀问题亟待解决^[4]。

自 20 世纪 50 年代以来,各国学者注重土壤侵蚀物理过程和概念模型的研究,先后开发了 USLE, WEPP, RUSLE 等模型^[5-7]。但从应用角度来看,机理模型仍属于研究性模型,需要对土壤侵蚀各个阶段进行严格地模拟实测,程序复杂耗费时间及财力,尚且无法代替概念模型投入使用。目前使用最多的 USLE/RUSLE 模型,其主要适用于坡耕地、草地、林地、荒山、荒坡及稳定沟系等的水力侵蚀,而不能用于风力侵蚀、重力侵蚀、冻融侵蚀等。故本文基于 RUSLE 模型研究的土壤侵蚀仅为水力侵蚀,下文统称为土壤侵蚀。随着土壤侵蚀模型的日渐成熟,地理信息系统(GIS)、遥感(RS)等空间信息技术的不断推广,各国学者利用 GIS 的空间分析功能,以及 RS 实时、广域等特征优势,基于土壤侵蚀模型进行区域性土壤侵蚀研究^[5]。我国学者也根据各自研究区的特征,对模型中各因子进行修正,得出各研究区的土壤侵蚀状况。但针对东北黑土地重点治理区各小流域范围内的土壤侵蚀定量评价,尚未开展。

本文以克山县古城小流域为例,基于修正的通用土壤流失方程(RUSLE),综合运用 GIS 相关功能,定量评价克山县古城小流域土壤侵蚀状况,分析其土壤侵蚀空间分布特征及土地利用类型对土壤侵蚀的影响,为本区域的生态环境保护和政府决策提供支持和帮助。

1 试验材料与方法

1.1 研究区概况

古城小流域地处黑龙江省克山县中部,位于小兴安岭余脉与松嫩平原过渡地带的典型黑土区,地理坐标为北纬 47°59′11″—48°09′28″,东经 125°37′52″—126°03′19″,总面积为 358.91 km²。属嫩江支流乌裕尔河水系,地貌类型以波状起伏台地为主,地势呈东北高,西南低趋势,海拔高度约为 208~368 m,气候类型属寒温带大陆性季风气候,夏季短而酷热,冬季长而严寒。多年平均降水量约为 510 mm,日照时数约为 2 710 h,年平均≥10℃有效积温约为 2 400℃,多年平均气温约为 1.1℃,无霜期 122 d 左右。土壤则以黑土为主,草甸土、黑钙土为辅。植被属小兴安岭植物区系。

1.2 数据来源

本文依据 RUSLE 方程中各因子的算法,收集研究区 1980—2010 年日侵蚀性降雨数据、DEM、土壤类型图、小流域水土保持工程布置图等。并基于 0.5 m 分辨率的 WorldView 1,2 遥感影像制备水土保持现状图;基于 Spot 5 10 m 分辨率影像制备土地利用现状图;基于 30 m 分辨率的 Landsat TM 影像

进行植被覆盖度图的制备等。

1.3 研究方法与技术路线

本文采用 GIS 和野外调查相结合的方法,对遥感数据进行处理,最终完成研究区土地利用现状图、植被覆盖图、水土保持现状图等;并参考 RUSLE 修正意见和参数测定规范,结合研究区的实际情况及野外调查数据,对模型中各因子的算法进行修正,得到适合本研究区各因子的栅格数据,统一坐标系后,设置像元大小为 10 m,利用 ArcGIS 软件的 Raster Calculator 进行复合运算,将所有因子相乘从而获得土壤侵蚀量(A)的栅格数据,从而得到该区域流域侵蚀图。根据水利部颁发的《黑土区水土流失综合防治技术标准》(SL446—2009),对研究区的土壤侵蚀强度等级数据进行制备、统计和分析。

1.4 土壤侵蚀预报模型

修正的通用土壤流失方程(RUSLE)是在通用土壤流失方程(USLE)的基础上建立起来的,属经验模型,它将众多影响土壤侵蚀速率的因素归纳为 5 个主要因子,基本形式为:

$$A=R \cdot K \cdot LS \cdot C \cdot P \quad (1)$$

式中:A——土壤侵蚀量[t/(hm²·a)];R——降雨侵蚀力因子[(MJ·mm)/(hm²·h·a)];K——土壤可蚀性因子[(t·hm²·h)/(hm²·MJ·mm)];LS——坡长与坡度因子;C——覆盖与管理因子;P——水土保持措施因子。

1.4.1 降雨侵蚀力因子 降雨侵蚀力因子是一项评价降雨引起土壤侵蚀潜在能力的指标,反映了气候因素对土壤侵蚀的影响作用,通常采用降雨参数来估算^[8]。本文基于侵蚀性降雨量数据,参考第一次全国水利普查——水土保持情况普查采用的降雨侵蚀力计算模型,得到适用于本研究区的降雨侵蚀力值^[9]。具体计算公式如下:

(1) 年平均半月降雨侵蚀力:

$$R_{\text{半月}k} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\alpha \sum_{j=1}^m P_{d_{ij}}^{\beta} \right) \quad (2)$$

$$\alpha = 21.239\beta^{-7.3967} \quad (3)$$

$$\beta = 0.6243 + \frac{27.346}{\bar{P}_{d_{12}}} \quad (4)$$

$$P_{d_{12}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{1}{m} \sum_{j=1}^m P_{d_{ij}} \right) \quad (5)$$

式中: $R_{\text{半月}k}$ ——第 k 半月的降雨侵蚀力[(MJ·mm)/(hm²·h·a)]; $P_{d_{ij}}$ ——第 i 年第 k 半月第 j 日≥12 mm 的日降雨量; α, β ——回归系数; $\bar{P}_{d_{12}}$ ——≥12 mm 日降雨量多年平均值; i ——年数($i=1, 2, \dots, N$); j ——第 i 年第 k 半月日降雨量≥12 mm 的日数($j=1, 2, \dots, m$); l ——第 i 年日降雨量≥12 mm 的日数($l=$

1,2,⋯,n)。

(2) 多年平均年降雨侵蚀力:

$$\bar{R}=\frac{\sum_{k=1}^{24}R_{\text{学月}k}}{24} \tag{6}$$

式中: \bar{R} ——多年平均年降雨侵蚀力 $[(\text{MJ}\cdot\text{mm})/(\text{hm}^2\cdot\text{h}\cdot\text{a})]$; k ——1 年 24 个半月($k=1,2,\cdots,24$)。经计算, R 取值为 $1\,250.634\,(\text{MJ}\cdot\text{mm})/(\text{hm}^2\cdot\text{h}\cdot\text{a})$ 。

1.4.2 土壤可蚀性因子 土壤可蚀性因子是一项评价土壤被蚀难易程度的指标,可以反映土壤遭受侵蚀的敏感程度,与土壤自身性质有关^[10]。本文参考第 1 次全国水利普查——水土保持情况普查中的公式估算 K 因子^[9],计算公式如下。

$$K=\{0.2+0.3\exp[-0.0256S_a(1-S_i/100)]\}\left[S_i/(C_1+S_i)\right]^{0.3}\times\left[1-\frac{0.25C}{C+\exp(3.72-2.95)}\right]\times\left[1-\frac{0.7S_a}{S_a+\exp(-5.51+22.9S_a)}\right] \tag{7}$$

式中: S_a ——砂粒含量($2\sim0.05\text{ mm}$); S_i ——粉砂含量($0.05\sim0.002\text{ mm}$); C_1 ——黏粒含量($<0.002\text{ mm}$); C ——有机碳含量。本文公式中所使用的参数

表 1 C 因子取值

| 地类 | 交通运输 用地和公路 | 人工 牧草地 | 其他 土地 | 其他 林地 | 农村 居民点 | 城镇 居民点 | 天然牧草 地和草地 | 旱地 |
|-----|---------------|-----------|----------|----------|-----------|-----------|--------------|---------|
| C 值 | 0.22 | 0.0032 | 0.455 | 0.184 | 0.03 | 0.153 | 0.01 | 0.24 |
| 地类 | 水域及水利设施 | 特殊用地 | 有林地 | 水田 | 灌木林地 | 水浇地 | 独立工矿用地 | 商服及公共用地 |
| C 值 | 0 | 0.5 | 0.025 | 0.18 | 0.006 | 0.1 | 0.01 | 0.153 |

1.4.5 水保措施因子 水土保持措施因子是指在一定条件下,采用某种水保措施后的土壤流失量与未采用水保措施且顺坡种植时的土壤流失量之比^[14,17]。值介于 0,1 之间,对水土保持措施完备,不容易发生土壤侵蚀的地区, P 因子取值为 0;对未实施水土保持措施的地区, P 因子取值为 1。本文基于 World-View 1,2 影像解译研究区水保措施现状,参考张宪奎等^[14]的黑龙省土壤流失方程中 P 值的研究结果,由于该区地处克山县包含在张宪奎所计算 P 值区域内,故本文直接引用,对研究区中的农田根据采取的不同耕作措施确定 P 值,而对非农田类型则赋 P 为 1^[14](表 2), P 值是对黑龙省试验站、试验场、科研网站的研究资料进行整理计算得到的,已广泛应用到黑龙省土壤侵蚀方面研究中^[18-19]。

表 2 各种水保措施因子的 P 值

| 水保措施 | 水平梯田 | 地埂 | 等高垄作 |
|-------|-------|-------|-------|
| P 值 | 0.029 | 0.145 | 0.352 |

2 结果与分析

2.1 土壤侵蚀模数计算及其空间分布特征

基于 ArcMap 空间分析功能,将各因子连乘即可

均来源于中国土壤数据库。

1.4.3 坡长与坡度因子 坡长因子 L 和坡度因子 S 用来反映地形地貌特征对土壤侵蚀的影响,通常将它们视为地形因子,放在一起考虑。本文基于 DEM 数据,利用杨勤科等^[11]开发的 LS 因子计算软件求得 LS 值。

1.4.4 覆盖和管理因子 覆盖和管理因子是指在一定条件下,种植作物地块上的土壤流失量与同等条件下的清耕、连续休闲地块上土壤流失量的比值^[12]。其值介于 0,1 之间,对裸地等容易受到侵蚀作用的区域 C 因子取值较大,甚至接近 1,对水域等不存在土壤侵蚀的区域 C 因子取值为 0。本文参考美国农业部农业手册 282 号文件中 C 值的经验值,并在前者研究基础之上^[12-14],结合考虑研究区土地利用类型、植被覆盖度等因素,对该区 C 值进行调整(表 1),基于学者们的经验 C 值^[15-16],对东北黑龙江、二龙湖流域、辉发河流域等区域进行土壤侵蚀研究,证明 C 值经验值适用于东北地区,本文经验赋值对前人研究进行综合、微调,使 C 值适用于本研究。

求出土壤侵蚀模数。根据《黑土区水土流失综合防治技术标准》(SL446—2009),对土壤侵蚀模数进行分级,分级结果见图 1。轻度侵蚀集中分布于研究区中部、西北部;中度侵蚀主要分布于研究区中部、东北地区;强烈、极强烈、剧烈侵蚀零散分布于研究区内,侵蚀所占比重较小,多分布于植被覆盖度较低的林地向旱地过度地带。综合考虑土地利用类型、植被覆盖度、地形等因素,分析土壤侵蚀分区的特征如下:地势较为平坦的旱地多发生微度、轻度侵蚀,因为旱地植被覆盖度较高,加之地形平坦不易发生面状侵蚀,多为溅蚀;坡度为 $2^{\circ}\sim3^{\circ}$ 的坡耕地侵蚀强度加大,易发生中度侵蚀;而坡度更大的坡耕地、林地向旱地过渡带、植被覆盖度较低处以及缺乏水保措施地区或上述几种类型叠加区往往侵蚀强度更大,易发生强烈以上等级侵蚀。

2.2 不同土壤侵蚀强度总量分析

由于微度等级侵蚀能力较弱,通常不参与土壤侵蚀量的统计分析。对其他 5 个等级进行分区统计后,结果表明研究区年侵蚀总量为 $123\,572.62\text{ t}$,侵蚀总面积为 $12\,494.31\text{ hm}^2$,占总土地面积的 34.81% 。其中轻度侵蚀量为 $62\,744.30\text{ t}$,侵蚀面积为 $9\,346.03\text{ hm}^2$,占侵蚀总面积的 74.80% ;中度侵蚀量为 $39\,738.50\text{ t}$,

侵蚀面积为 2 566. 00 hm², 占土壤侵蚀总面积的 20. 54%; 强烈侵蚀量为 10 635. 10 t, 侵蚀面积为 375. 01 hm², 占土壤侵蚀总面积的 3. 00%; 极强烈侵蚀量为 4 995. 37 t, 侵蚀面积为 122. 22 hm², 占土壤侵蚀总面积的 0. 98%; 剧烈侵蚀量为 5 459. 35 t, 侵蚀面积为 85. 05 hm², 占土壤侵蚀总面积的 0. 68% (表 3—4)。

总体上, 该研究区土壤侵蚀以轻度为主、中度次之, 两者共占侵蚀总量的 82. 94%, 侵蚀总面积的 95. 34%, 而强烈、极强烈、剧烈侵蚀量均较低, 侵蚀面积依次递减, 3 者共占侵蚀总面积的比例不足 5%。

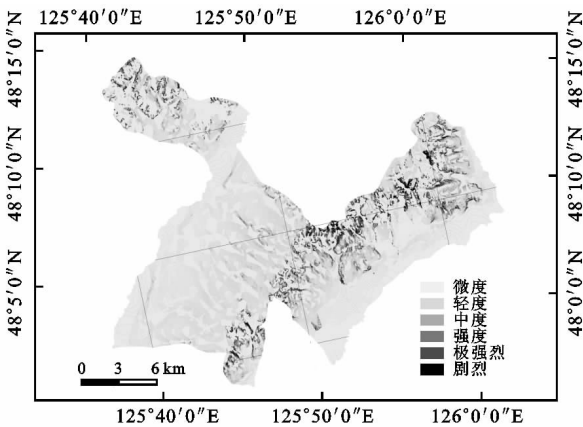


图 1 土壤侵蚀强度空间分布

表 3 不同土壤侵蚀强度面积

| 项目 | 轻度 | 中度 | 强烈 | 极强烈 | 剧烈 | 总侵蚀面积 | 总土地面积 | 侵蚀比例 |
|--------------------|----------|----------|---------|---------|--------|-----------|----------|--------|
| 面积/hm ² | 9346. 03 | 2566. 00 | 375. 01 | 122. 22 | 85. 05 | 12494. 31 | 35891. 1 | |
| 比例/% | 74. 80 | 20. 54 | 3. 00 | 0. 98 | 0. 68 | 100. 00 | | 34. 81 |

表 4 不同土壤侵蚀强度年侵蚀总量

| 项目 | 轻度 | 中度 | 强烈 | 极强烈 | 剧烈 | 总计 |
|-------------------------------------------------|-----------|-----------|-----------|----------|----------|------------|
| 侵蚀总量/t | 62744. 30 | 39738. 50 | 10635. 10 | 4995. 37 | 5459. 35 | 123572. 62 |
| 平均侵蚀量/(t · hm ⁻² · a ⁻¹) | 6. 71 | 15. 49 | 28. 36 | 40. 95 | 64. 23 | |
| 比例/% | 50. 78 | 32. 16 | 8. 61 | 4. 04 | 4. 42 | 100. 00 |

2.3 土地利用对土壤侵蚀强度的影响

将土壤侵蚀强度数据与土地利用数据进行叠加, 分析各侵蚀强度与土地利用方式的关系。

由表 5 可知, 旱地的侵蚀面积最大, 林地次之, 城乡工矿居民用地第三, 其余类型侵蚀面积均较小, 水域基本无侵蚀。旱地以轻度侵蚀为主, 中度次之, 其他等级侵蚀面积较小; 林地、草地、城乡工矿居民用地主要发生轻度侵蚀, 其他等级几乎未发生。未利用地

主要发生中度、强烈侵蚀, 但面积均较小, 可能是因为未利用地的面积少。另外, 各侵蚀等级在旱地、未利用地上均有土壤侵蚀发生, 但侵蚀面积随着侵蚀等级加强而递减。

考虑林地、草地、水域均无强烈、极强烈、剧烈土壤侵蚀发生且轻中度侵蚀比例较小, 因此可以通过植树造林、提高草地植被覆盖度, 或减少大坡度坡耕地的分布来遏制土壤侵蚀。

表 5 不同土壤侵蚀强度等级与土地利用的关系

| 侵蚀等级 | 旱地 | 林地 | 草地 | 水域 | 城乡工矿居民用地 | 未利用地 | 合计 |
|------|---------|--------|-------|--------|----------|--------|----------|
| 轻度 | 83. 81 | 4. 78 | 0. 29 | 0. 060 | 4. 49 | 0. 027 | 93. 457 |
| 中度 | 25. 41 | 0. 019 | 0. 00 | 0. 00 | 0. 15 | 0. 084 | 25. 663 |
| 强烈 | 3. 71 | 0. 00 | 0. 00 | 0. 00 | 0. 011 | 0. 031 | 3. 752 |
| 极强烈 | 1. 2 | 0. 00 | 0. 00 | 0. 00 | 0. 00 | 0. 012 | 1. 212 |
| 剧烈 | 0. 84 | 0. 00 | 0. 00 | 0. 00 | 0. 00 | 0. 011 | 0. 851 |
| 合计 | 114. 97 | 4. 799 | 0. 29 | 0. 06 | 4. 651 | 0. 165 | 124. 935 |

3 讨论与结论

3.1 讨论

(1) 研究区土壤侵蚀特征为土壤侵蚀以轻度为主、中度次之, 多分布在地势平坦地区, 强烈、极强烈、剧烈侵蚀多分布于植被覆盖度较低的林地向旱地过度地带, 这主要是由于受植被覆盖和地形条件影响, 该地区地势起伏相对较大, 而地势平坦的旱地侵蚀强度较低, 该趋势与赵峰等^[20]对吉林省中部地区研究

趋势相同。

(2) 将本文研究结果与该区域前人研究结果进行比较^[13], 利用 ArcGIS 软件中 Raster Calculator 功能, 选择与参考资料相对一致的栅格单元, 统计土壤侵蚀模数的平均值。由表 6 可以看出, 两者最大偏差不足 10%, 其中 1 中结果由于植被类型和样地数较少, 同时满足植被与保土措施及坡度条件的采样点势必会很少, 误差较大可以忽略, 说明本研究计算的土壤侵蚀量结果具有良好的可信度。

表 6 本文土壤侵蚀计算结果与参考文献对比

| 编号 | 植被与保土措施 | 坡度 | 参考文献实测结果/ ($t \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$) | 本文计算结果平均值/ ($t \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$) | 相对误差/% |
|----|-----------------|-----|-------------------------------------------------|--------------------------------------------------|--------|
| 1 | 乔灌混交林,植被覆盖度 70% | 8.1 | 1.04 | 0.94 | 9.61 |
| 2 | 大豆玉米地,等高垄作 | 4.5 | 6.00 | 6.06 | 1 |
| 3 | 大豆玉米地,顺坡垄作 | 6.9 | 32.58 | 31.82 | 2.33 |

3.2 结 论

(1) 轻度侵蚀集中分布于研究区中部、西北部;中度侵蚀主要分布于研究区中部、东北部地区;强烈侵蚀、极强烈、剧烈侵蚀零散分布于研究区内,多为林地向旱地过渡区。

(2) 研究区土壤侵蚀以轻度为主,占侵蚀总面积的 74.80%,中度次之,占总面积的 20.54%,而强烈、极强烈、剧烈侵蚀面积依次递减,土壤侵蚀面积均较小。

(3) 研究区年侵蚀总量为 123 572.62 t,其中轻度侵蚀所占比例最大,为 50.78%,侵蚀总量为 62 744.30 t,中度次之,强烈、剧烈、极强烈侵蚀量依次递减,其中剧烈年侵蚀总量大于极强烈,这是因为剧烈的平均侵蚀模数大于极强烈,而两者的侵蚀面积相差不大。

(4) 不同土地利用类型的各侵蚀等级面积不同,其中以旱地为主的轻中度土壤侵蚀面积比重较大,未利用地侵蚀强度较大,其他土地利用类型各等级比重均较小,建议完善地埂、梯田、改垄、水保林等水土保持措施,避免土壤侵蚀情况加剧。

参考文献:

[1] 王占礼. 中国土壤侵蚀影响因素及其危害分析[J]. 农业工程学报,2000,16(4):32-36.

[2] 全为民,严力蛟. 农业面源污染对水体富营养化的影响及其防治措施[J]. 生态学报,2002,22(3):291-299.

[3] 赵玉明,刘宝元,姜洪涛. 东北黑土区垄向的分布及其对土壤侵蚀的影响[J]. 水土保持研究,2012,19(5):1-6.

[4] 李波,赵海霞,郭卫华,等. 退耕还林(草),封山禁牧对传统农牧业的冲击与对策:以北方农牧交错带的皇甫川流域为例[J]. 地域研究与开发,2004,23(5):97-101.

[5] 毕小刚. 北京市山区坡面土壤流失方程研究[D]. 北京:北京林业大学,2007.

[6] 郑粉莉,刘峰,杨勤科,等. 土壤侵蚀预报模型研究进展

[J]. 水土保持通报,2001,21(6):17-18,32.

[7] Meyer L D. Evolution of the universal soil loss equation [J]. Journal of Soil and Water Conservation,1984,39(2):99-104.

[8] 董磊,彭明春,王崇云,等. 基于 USLE 和 GIS/RS 的滇池流域土壤侵蚀研究[J]. 水土保持研究,2012,19(2):11-14.

[9] 国务院第一次全国水利普查领导小组办公室. 水土保持情况普查[M]. 北京:中国水利水电出版社,2010.

[10] 于兴修,杨桂山. 通用水土流失方程因子定量研究进展与展望[J]. 自然灾害学报,2003,12(3):14-18.

[11] 杨勤科,郭伟玲,张宏鸣,等. 基于 DEM 的流域坡度坡长因子计算方法研究[J],水土保持通报,2010. 30(2):203-206.

[12] 张雪花,侯文志,王宁. 东北黑土区土壤侵蚀模型中植被因子 C 值的研究[J],农业环境科学,2006. 25(3):797-801.

[13] 张宪奎. 黑龙江省土壤流失方程应用简介[J]. 国土与自然资源研究. 1995(1):30-32.

[14] 张宪奎,许靖华,卢秀芹,等. 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.

[15] 张雪花. 非点源污染量化模型中重要影响因素的研究[D]. 长春:东北师范大学,2004.

[16] 张素梅,王宗明,闫百兴,等. 辉发河流域景观格局与土壤侵蚀的关系研究[J]. 水土保持学报,2008,22(3):29-35.

[17] 潘建平,龚健雅,李长风. 土壤侵蚀模型研究现状和 GIS,RS 应用[J]. 地质灾害与环境保护,2005,16(1):89-93.

[18] 郭乾坤,刘宝元,朱少波,等. 中国主要水土保持耕作措施因子[J]. 中国水土保持,2013(10):22-26.

[19] 刘功贤,詹敏. 黑龙江省土壤流失方程在工程建设项目土壤流失预测中的应用[J]. 中国水土保持,2000(7):23-25.

[20] 赵峰,范海峰,田竹君,等. 吉林省中部不同土地利用类型的土壤侵蚀强度变化分析[J]. 吉林大学学报:地球科学版,2006,35(5):661-666.