

基于 GIS 和 RS 的红壤丘陵区土壤侵蚀敏感性评价研究

苏泳娴^{1,2,3}, 黄光庆^{2*}, 陈修治^{1,2,3}, 李智山^{1,2,3}, 陈水森²

(1. 广州地理研究所, 广东广州 510070; 2. 中国科学院广州地球化学研究所, 广东广州 510640; 3. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要 基于 GIS 和高分辨率定量遥感技术, 选取我国典型的生态脆弱区——南方红壤丘陵区为研究区域, 利用通用水土流失方程, 对佛山高明区土壤侵蚀敏感性进行定量评价。研究表明, 该区年平均土壤侵蚀模数为 6 757.34 t/(km²·a), 属于强度侵蚀, 土壤侵蚀敏感性呈现“南面、北面、中部丘陵台地以及西面边缘侵蚀敏感, 东面平原不敏感”的特点。坡度大于 7~15° 的地方是产生强度侵蚀的源区, 土壤侵蚀极度敏感区主要分布在山麓地带的农田和经济林区域, 而坡度较高的区域以中度敏感与高度敏感为主。草地、灌木林、桉树林、裸地和其他未利用土地是该地区的高危侵蚀土地类型。

关键词 土壤侵蚀敏感性; 通用水土流失方程(USLE); 红壤丘陵区; GIS; RS

中图分类号 S157.1 文献标识码 A 文章编号 0517-6611(2011)22-13458-05

Study on Soil Erosion Sensitivity of Red Soil Covered Hilly Regions Based on GIS and RS Technology

SU Yong-xian et al (Guangzhou Institute of Geography, Guangzhou, Guangzhou 510070)

Abstract The typical frail ecosystem — the red soil covered hilly regions of Southern China was selected as the study area. The Universal Soil Loss Equation (USLE) was used to study the soil erosion sensitivity in Gaoming Region based on GIS and high-resolution remote sensing technology. The annual soil erosion in Gaoming reached 6 757.34 t/(km²·a), belonging to the serious erosion regions. The soil erosion sensitivities of southern, northern, western and central hilly regions in Gaoming were extremely high, while the soil erosion sensitivities in eastern plains were lower. The hilly regions where the incline degree was larger than 7~15° were the major serious soil erosion sensitivity regions. High soil erosion sensitivity areas mainly distributed in the fields or economical forestry. However large incline degree areas were mainly dominated by high soil erosion sensitivities. Grasslands, shrubs, Eucalyptus forest, bare grounds and other land types were the major high soil erosion land types.

Key words Soil erosion sensitivity; Universal soil loss equation (USLE); Red soil covered hilly regions; GIS; RS

快速的城市化进程打破了自然生态与人工环境之间已有结构和功能的平衡, 正对城市周围及其内部生态环境造成现实的或潜在的威胁^[1]。面对这一问题, 地理学从区域的综合影响和响应的角度, 以“全球着眼, 就地着手”为视角, 聚焦生态环境危机区、脆弱区和热点区^[2]。我国红壤丘陵区主要分布在我国东南部, 跨越南方 11 个省(区), 619 个县(市), 共约 118 万 km², 占国土面积的 12.13%^[3]。该地区光热充足, 降水充沛, 自然资源丰富, 具有巨大的生产潜力。但由于红壤丘陵区生态稳定性差, 生物组织和生产力波动性大, 对人类活动及突发性灾害的反应敏感, 自然环境极易向不利于人类利用的方向演替^[4]。加之近几十年来, 我国部分南方地区片面追求经济效益, 对自然资源过度开发利用, 导致该地区水土流失严重, 水旱灾害加剧, 生态稳定性降低, 自然环境恶化, 已成为我国生态环境脆弱的地区之一。土壤侵蚀作为红壤丘陵区生态脆弱的一个最主要部分, 研究其敏感性状况, 对提高我国红壤丘陵区土地生产力、有效治理水土流失、确定生态功能分区以及协调发展区域经济与环境具有重大的理论和实践意义。

土壤侵蚀敏感性评价是根据区域土壤侵蚀的形成机制, 分析其区域分异规律, 明确可能发生的土壤侵蚀类型、范围与可能程度^[5]。目前, 对土壤侵蚀敏感性的研究方法主要有 3 种: ①城市规划中用于生态功能分区的定性赋值法^[6-8]; ②运用试验小区模拟土壤侵蚀敏感性情况^[9-10]; ③结合遥感

(RS)、地理信息系统(GIS)模拟土壤侵蚀敏感性状况^[11-12]。相对前 2 种方法, RS 和 GIS 具有快速、准确、定量测算区域内土壤侵蚀敏感性分布情况的优点。笔者选取佛山市高明区为研究对象, 应用 RS 与 GIS 技术相结合的方法, 利用通用水土流失方程(USLE), 对高明区土壤侵蚀敏感性进行定量评价, 分析土壤侵蚀敏感性空间分布特征及其与坡度和土地利用类型的关系, 以期为该地区水土流失的防治和退化生态系统的恢复提供依据, 为我国南方红壤丘陵区的水土资源利用与保护提供理论参考和实践范例。

1 材料与方法

1.1 研究区概况 佛山市高明区地处广东省中部, 珠江三角洲西翼, 位于 112°22'34"~112°55'6"E, 22°38'46"~23°1'5"N, 全区面积约 960 km²。高明区地质构造复杂, 地层褶皱, 断裂发育。地貌单元主要有三角洲平原、丘陵台地、低山、岩溶盆地、丘间谷地, 总体地势自西南向东北倾斜。西、南、北部山地丘陵交错起伏, 南部的皂幕山是佛山市第 1 峰, 主峰海拔 805 m; 东部和东北部为广阔的冲积平原, 平原内水网密布, 有丘陵、残丘点缀。高明区气候属于亚热带季风湿润气候, 终年气温较高, 多年平均气温为 21.9℃, 多年平均降雨量为 1 674.9 mm, 降雨集中在 4~9 月。森林覆盖率达 47.7%, 但由于人类活动的影响, 山区植被多为次生性质, 且人工桉树林占林地总面积的 42.7%。从地形、地貌以及土壤特征来看, 高明区属于典型的南方红壤丘陵区。因此, 以高明区为例, 研究南方红壤丘陵区土壤侵蚀敏感性, 具有一定的代表性和指导意义。

1.2 研究数据 所用数据主要包括高明区 2008 年 Quickbird 遥感影像, 1:50 000 地形图、气象局观测站点数据(雨量数据)、统计局数据等。其中, Quickbird 卫星数据少云、质量良好, 其 0.5 m 的高空间分辨率与其他中低分辨率遥感影像

基金项目 国家自然科学基金项目(40771218); 广东省科技计划项目(2007B020500002-7, 2004B20701002)

作者简介 苏泳娴(1985-), 女, 广东中山人, 硕士研究生, 研究方向: 景观生态与 GIS 应用, * 通讯作者, 研究员, 博士, 博士生导师, 从事环境地质、区域和城市生态环境规划方面的研究, E-mail: hgq@gdas.ac.cn.

收稿日期 2011-04-18

相比效果更好。处理工具主要有 ERDAS IMAGINE、ArcGIS 等软件。

1.3 模型选择 土壤侵蚀一般分为以水力为主要侵蚀营力的水蚀、以风力为主要侵蚀营力的风蚀以及以重力和冻融为主要侵蚀营力的其他侵蚀。高明区位于我国南方亚热带地区,其土壤以红壤为主,因此主要考虑该地区由水蚀所引起的土壤流失情况。水蚀受到多种因素的影响和制约。目前用来评估水蚀引起土壤侵蚀量的模型有很多,其中最早建立且较为成熟的侵蚀预报模型是由美国 Wischmeier 等在 1965 年提出的通用土壤流失方程 USLE^[13]。该方程建立在土壤侵蚀理论以及大量实地观测数据统计分析的基础上,且方程式形式简单,所需参数较易获得,因子的解释具有物理意义。因此,它是目前预测土壤侵蚀量最为广泛使用的方法^[11]。USLE 模型表达式为:

$$A = 0.224 \times R \times K \times L \times S \times C \times P \quad (1)$$

式中 A 为土壤流失量, $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$; R 为降雨侵蚀性因子, $173.6 \text{ m} \cdot \text{t} \cdot \text{cm}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$; K 为土壤可蚀性因子, $0.01292 \text{ t} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{h}/(\text{m}^3 \cdot \text{t} \cdot \text{cm})$; L 为坡长因子,无量纲; S 为坡度因子,无量纲; C 为作物管理因子,无量纲; P 为侵蚀防治措施因子,无量纲。

1.4 技术路线 基于 GIS 和 RS 的土壤侵蚀敏感性评价方法是以通用土壤流失方程为核心,结合 RS 与 GIS,利用 GIS 强大的空间数据组织分析运算能力,将研究区离散为 $10 \text{ m} \times 10 \text{ m}$ 的栅格,获取每个栅格内土壤侵蚀的各影响因子信息 (R, L, K, P, C)。根据各因子算式及评价模型,逐个计算出各栅格的年均侵蚀量和侵蚀模数,最终得到高明区土壤侵蚀总量和侵蚀敏感性分级图(图 1)。

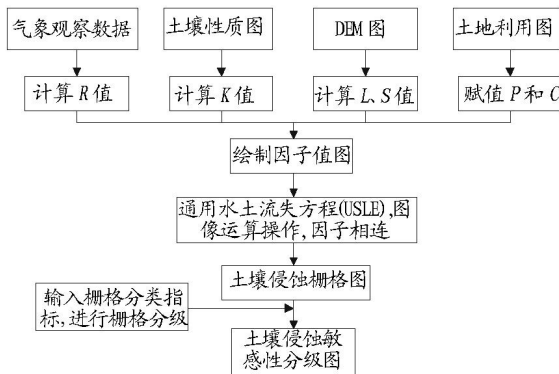


图 1 土壤侵蚀敏感性分析流程

Fig. 1 Flow of soil erosion sensitivity analysis

1.5 USLE 各因子值的确定和因子图的生成

1.5.1 R 因子的估算。降雨侵蚀力是土壤侵蚀敏感性评价中的重要因子,与降雨量、降雨历时、降雨强度和降雨动能相关,反映降雨特性对土壤侵蚀的影响^[14-15]。通常,降雨侵蚀力难以直接测定,大多用降雨参数如雨强、雨量等来估算。王万忠等对我国土壤侵蚀因子进行研究,发现在南方红壤地区使用 $\sum E_{60} \cdot I_{60}$ 和 $P \cdot I_{60}$ 估算降雨侵蚀力无明显差异,且较准确^[16]。这里考虑到获取数据的可能性,将年降雨总量 (P) 与年最大 60 min 降雨量 (I_{60}) 相乘来估算 R 值。

$$R = 0.272 \times (P \times I_{60}/100)^{1.205} \quad (2)$$

式中 R 为年侵蚀力, $100 \text{ m} \cdot \text{t} \cdot \text{cm}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{a})$; P 为年降雨总量, mm ; I_{60} 为年最大 60 min 降雨量, mm 。

计算每个观测站点的 R 值后,根据站点的空间分布,在 ArcGIS 中采用协克里金插值法,以经纬度和海拔高度作为影响降雨因子的协变量,进行研究区 R 值的表面化,生成研究区多年平均降雨侵蚀力 R 值空间分布图。

1.5.2 K 因子的估算。土壤可蚀性因子 (K) 反映土壤的可蚀性,表现为雨滴和地表水冲击下土壤被剥离的难易程度^[17]。决定土壤可蚀性的 2 个最主要因子是土壤机械组成和土壤有机质含量^[18]。目前,对于 K 值的计算主要有 Wischmeier 诺模图法^[19]、Romkens 公式算法^[20] 和柯克比查表法^[21] 等。研究中, K 值的获取是通过实地采样分析,运用 Williams 等在 EPIC 模型中的方法,利用土壤有机质含量和颗粒组成资料进行估算得到。

$$K = \{0.2 + 0.3 \times \exp[-0.0256 \times S_d \times (1 - S_i/100)]\} \times [S_i/(C_i + S_i)]^{0.3} \times \{1 - 0.25 \times C/[C + \exp(3.72 - 2.95 \times C)]\} \times [1.0 - 0.7 \times (1 - S_d/100)] / \{1 - S_d/100 + \exp[-5.51 + 22.9 \times (1 - S_d/100)]\} \quad (3)$$

式中 S_d 为砂粒含量,%; S_i 为粉粒含量,%; C_i 为黏粒含量,%; C 为有机碳含量,%。

高明区土壤类型随地形的不同而呈差异分布,西部、南部低山丘陵区主要为麻赤红壤,中部、北部低山丘陵为页赤红壤,河谷、平原地主要为潜育水稻土,夹杂少量的潜育水稻土,沿江出海口处有脱潮土。由表 1 可知, K 值主要分布在 $0.125 \sim 0.184$ 。同时,绘制高明区的土壤值分布图。

1.5.3 L, S 因子的估算。坡长 (L) 是在其他条件相同情况下,特定坡长的土壤流失量与坡长为 20 m 的土壤流失量的比。坡度 (S) 是在其他条件相同情况下,特定坡度的土壤流失量与坡度为 0 时土壤流失量的比。坡长和坡度因子是评

表 1 高明区土壤机械组成与可蚀性因子

Table 1 Soil mechanical composition and soil erosion factors in Gaoming

名称 Name	有机质含量 Content of organic matter//%	砂类含量 Content of sand//%	粉粒含量 Content of particle//%	黏粒含量 Clay content %	K 值 K value
潜育水稻土 Gleyed paddy soil	2.40	12.92	64.64	22.44	0.147 3
潜育水稻土 Waterlogogenic paddy soil	1.93	16.04	62.07	21.89	0.184 3
脱潮土 Dehydration soil	3.16	25.33	54.50	20.17	0.202 0
页赤红壤 Ye latosolic red soil	2.65	41.37	37.80	20.83	0.132 0
麻赤红壤 Ma latosolic red soil	2.32	39.51	32.01	28.48	0.124 8

价地形地貌特征对土壤侵蚀影响程度的指标。 L, S 因子的

提取是以 DEM 为基础来计算每个栅格的坡度和坡长^[22]。

在 ERDAS IMAGINE 软件的 Topographic Analysis 模块中对 DEM 作坡度分析和坡向分析,可以直接得到栅格的坡度和坡向,再利用临域分析和空间分析得到坡长,最后结合 McCool 改进的坡长因子法^[23]和 Nearing 的坡度因子法^[24]求算出每个栅格的 L 、 S 因子值。

$$L = (x/22.13)^m \quad (4)$$

式中 L 为坡长因子,无量纲; x 为坡长, m ; m 为指数,无量纲。当坡度 $\theta \geq 9\%$ 时 $m = 0.5$; 当 $3\% \leq \theta < 9\%$ 时 $m = 0.4$; 当 $1\% \leq \theta < 3\%$ 时 $m = 0.3$; 当 $\theta < 1\%$ 时 $m = 0.2$ 。

当坡度 $\theta \geq 9\%$ 时,坡度因子的计算公式为:

$$S = 16.8 \times \sin\theta - 0.5 \quad (5)$$

当坡度 $\theta < 9\%$ 时,坡度因子 (S) 的计算公式为:

$$S = 10.8 \times \sin\theta + 0.05 \quad (6)$$

1.5.4 C 因子的估算。 植被覆盖因子 (C) 作为土壤侵蚀的抑制因子,是影响水土流失的重要因素之一,也是受人为影响最大的因子。植被覆盖因子对土壤流失量的影响主要与土地利用类型和植被覆盖度有关,可以根据土地利用类型和植被覆盖度求得。

在 ERDAS IMAGINE 软件里,Quickbird 遥感图像用监督分类结合目视解译的方法可将土地利用类型分为有林地、灌木林、疏林地和其他林地、草地、工矿用地、旱地、水田、裸地、农村居民用地、水域、城镇用地以及其他未利用地等。植被覆盖度则按照 Gutman 等提出的根据归一化差值植被指数 ($NDVI$)^[25]来计算。

$$NDVI = \frac{\rho_4 - \rho_3}{\rho_4 + \rho_3}$$

式中 ρ_4 和 ρ_3 分别为近红外波段和可见光红波段的反射率。

最后根据高明区土地利用现状及植被覆盖度解译与反演结果,参考蔡崇法等求取 C 值的研究成果^[12, 26],得到高明区不同土地利用类型的年平均 C 值(表 2)。

表 2 高明区植被覆盖因子

Table 2 Vegetation coverage factors in Gaoming

土地利用类型 Land use types	C 值 C value	土地利用类型 Land use types	C 值 C value
有林地 Forested land	0.006	水田 Paddy field	0.180
灌木林 Shrubwood	0.015	裸地 Bare land	0.450
疏林地和其他林地 Opening and other forest land	0.017	农村居民用地 Rural residents land	0.030
草地 Grassland	0.080	水域、城镇用地 Water area urban land	0
工矿用地 Land for industry and mining land	0.010	其他未利用地 Other unused land	0.060
旱地 Dry land	0.310		

1.5.5 P 因子的确定。 水土保持措施因子 (P) 是采取水土保持措施后的土壤流失量与顺坡种植时土壤流失量的比值。 P 取值范围 $0 \sim 1$, 其中 0 值代表采取水土保持措施后无侵蚀地区, 1 值则用于表示未采取水土保持措施的地区。一般说来,自然植被和坡耕地的 P 值为 1 , 无植被区域(城镇、农村居民点、水域等)的 P 值为 0 , 而农作物区域的 P 值则与耕作方式有较大的关系。由于高明区位于河谷台地间的农作物一般采用等高耕作,在考虑高明区土地利用现状的基础上,

参考 Wischmeier 等对于等高耕作农作物不同坡度的 P 值的研究结果^[27](表 3),编写 AML 程序,生成高明区的 P 值因子图。AML 程序如下:

```

/* 根据 dem 计算土地坡度(%) 赋值给 slp05pr 变量 */
slp05pr = slope ( dem ,percentrise)
/* 如果土地利用类型为无植被区域,则将 P 赋值为 0 */
If ( landuse = 1)
USLE_P = 0
/* 如果土地利用类型为农作物区域且坡度 <= 2%, 则将 P 赋值为 0.6 */
else if ( landuse = 2 & slp05pr <= 2)
USLE_P = 0.6
/* 如果土地利用类型为农作物区域且 2% < 坡度 <= 8% 则将 P 赋值为 0.5 */
else if ( landuse = 2 & slp05pr > 2 & slp05pr <= 8)
USLE_P = 0.5
/* 如果土地利用类型为农作物区域且 8% < 坡度 <= 12% 则将 P 赋值为 0.6 */
else if ( landuse = 2 & slp05pr > 8 & slp05pr <= 12)
USLE_P = 0.6
/* 如果土地利用类型为农作物区域且 12% < 坡度 <= 16% 则将 P 赋值为 0.7 */
else if ( landuse = 2 & slp05pr > 12 & slp05pr <= 16)
USLE_P = 0.7
/* 如果土地利用类型为农作物区域且 16% < 坡度 <= 20% 则将 P 赋值为 0.8 */
else if ( landuse = 2 & slp05pr > 16 & slp05pr <= 20)
USLE_P = 0.8
/* 如果土地利用类型为农作物区域且 20% < 坡度 <= 25% 则将 P 赋值为 0.9 */
else if ( landuse = 2 & slp05pr > 20 & slp05pr <= 25)
USLE_P = 0.9
/* 其他情况,则将 P 赋值为 1.0 */
else
USLE_P = 1.0
end if

```

表 3 高明区水土保持措施因子

Table 3 Soil and water conservation factors in Gaoming

土地坡度 Land gradient//%	P 值 P value	土地坡度 Land gradient//%	P 值 P value
1~2	0.6	13~16	0.7
3~8	0.5	17~20	0.8
9~12	0.6	21~25	0.9

1.5.6 栅格土壤侵蚀模数的计算。 由于数据来源不同,各因子图的栅格大小和坐标系统可能有所不同。在对这些因子进行叠加之前,必须先统一栅格大小以及坐标系统。笔者最终把各因子图离散为 $10 \text{ m} \times 10 \text{ m}$ 的栅格图,并统一为三度分带的西安 80 坐标系。在此基础上,用 ArcGIS 的空间分析工具执行重叠运算功能,将各因子按式(1)相乘,最后得到栅格土壤侵蚀模数图。

1.5.7 土壤侵蚀敏感性分级图的形成。在栅格侵蚀模数图的基础上,进一步根据水利部颁布的《水土保持技术规范》SL190-2007 侵蚀强度标准(表 4)确定土壤侵蚀分级指标,利用 ArcGIS 的分类功能,对栅格侵蚀量进行分级,将侵蚀量在同一侵蚀等级的栅格进行归并,进而绘制出高明区土壤侵蚀敏感性分级图(图 2)。南方红壤丘陵区的容许流失量为 500 t/(km²·年)。

表 4 土壤侵蚀敏感性分级标准

Table 4 The grading standard of soil erosion sensitivity

侵蚀量级别 Grades of erosion amount	平均侵蚀模数 Average erosion modulus // t/(km ² ·年)	敏感性级别 Grades of sensitivity
微度 Lowliness	<200, <500, <1 000	不敏感
轻度 Slight	200 500, 1 000 ~ 2 500	轻度敏感
中度 Moderate	2 500 ~ 5 000	中度敏感
强烈 Strong	5 000 ~ 8 000	高度敏感
极强烈 Extremely strong	>8 000	极度敏感

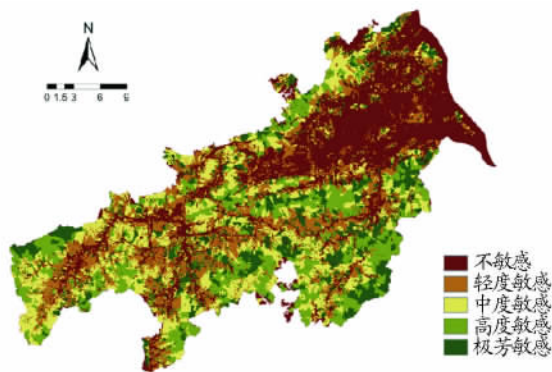


图 2 土壤侵蚀敏感性分级

Fig. 2 Classification of soil erosion sensitivity in Gaoming

2 结果与分析

2.1 土壤侵蚀敏感性现状分析 在 ArcGIS 支持下对高明区土壤侵蚀敏感性不同级别进行面积的统计。表 5 表明,高明区年平均侵蚀模数为 6 757.34 t/(km²·年),属于强度侵蚀。高明区的不敏感区域主要分布在荷城、明城等高明河下游平原地区,面积 305.44 km²,占总面积的 31.82%,面积虽大,但是其侵蚀量仅占总侵蚀量的 0.34%。中度敏感区域和轻度敏感区域的面积相当,分别为 187.46 和 178.42 km²。土壤侵蚀极度敏感区域的面积占整个高明区总面积的比例最小,为 13.54%,但是侵蚀总量占高明区土壤总侵蚀量的比例最大,达 70.39%,主要分布在老香山、云勇林场、明阳山和凌云山等山脉以及大布林场、狮子头山、茶山等山麓与平原交界的地区。总体上,高明区土壤侵蚀敏感性空间上呈现“南面、北面、中部丘陵台地以及西面边缘侵蚀高敏感,东面平原低敏感”的分布特点。高明区地处亚热带季风区,红壤丘陵区特殊的自然条件(低山丘陵、易蚀性红壤、充沛的雨量 and 夏季频繁的暴雨等)为土壤侵蚀的发生、发展提供有利的外在条件和物质基础。

2.2 土壤侵蚀敏感性的地形分异特征 高明区属低山丘陵区,西、南部丘陵台地交错起伏是引起土壤侵蚀的重要因素之一。通过 ArcGIS 叠置高明区土壤侵蚀敏感性分级图和高明区坡度等级分布图,提取各级坡度上土壤侵蚀敏感性分布。由表 6 可知,随着高明区坡度的增大,土壤侵蚀敏感性逐渐升高。坡度在 0~3°之间以不敏感为主,占该坡度等级总面积的 69.81%;3~7°之间以不敏感与轻度敏感为主,分别占该坡度等级总面积的 24.58% 和 30.39%;而在 7~15°之间,中度敏感迅速增加,达 24.31%,中度以上敏感面积超过该坡度总面积的 50%;当坡度达到 30°以上时,中度以上敏感面积占 93.54%。可见,坡度大于 7~15°的区域(特别是坡度大于 30°的区域)是高明区产生强度土壤侵蚀的源区。研究还表明,高明区土壤侵蚀极度敏感区分布在坡度小于 3~7°

表 5 高明区土壤侵蚀统计

Table 5 Statistics of soil erosion sensitivity in Gaoming

敏感性级别 Grades of sensitivity	侵蚀模数 Erosion modulus t/(km ² ·年)	侵蚀面积 Erosion area km ²	占总面积的百分比 Percentage in total area // %	侵蚀总量 Total erosion amount // t	占总侵蚀量的百分比 Percentage in total erosion amount // %
不敏感 Insensitive	<500	305.44	31.82	22 366.555	0.34
轻度敏感 Slight sensitive	500 ~ 2 500	178.42	18.59	244 522.12	3.77
中度侵蚀 Moderate erosion	2 500 ~ 5 000	187.46	19.53	688 648.16	10.62
高度敏感 High sensitive	5 000 ~ 8 000	158.70	16.53	965 591.6	14.88
极度敏感 Extremely sensitive	8 000 ~ 15 000	129.98	13.54	4 565 921.24	70.39

的区域所占比例较低(0.47%),而在坡度大于 3~7°的低坡度区域和高坡度区域所占比例差别不大。造成这种结果的原因主要是高明区坡度在 15°以上的区域针叶林和针阔混交林覆盖率较高,对土壤侵蚀有较好的缓解作用,导致高明区坡度较高的区域以中度敏感与高度敏感为主,极度敏感主要分布在山麓地带的农田和经济林区域。总体上,高明区大部分地区属于低山丘陵,高低起伏的坡地是造成土壤侵蚀的重要因素;同时,随着人口的增长,大量的开荒种地、陡坡种植、采石取土、开山建厂等土壤破坏行为加剧土壤侵蚀。因此,高明区土壤侵蚀的控制必须加强坡地尤其是坡耕地的生态

修复。

2.3 土壤侵蚀敏感性的土地利用分异特征 叠置土壤侵蚀敏感性分级图和土地利用类型图,得到高明区各土地利用类型的土壤侵蚀敏感性分布。由表 7 可知,不同土地利用类型的侵蚀面积差异较大。由于高明区土壤侵蚀属于高度敏感,主要针对高度敏感和极度敏感进行分析。总体来看,各土地利用类型中,属于高度敏感和极度敏感的土壤侵蚀区域面积大小排序依次为有林地>疏林地>草地>旱地>其他未利用地>水田>灌木林>工矿用地>裸地>农村居民用地。但从土壤侵蚀面积占各类用地的面积比例来看,大小排序依

次为灌木林 > 其他未利用地 > 裸地 > 疏林地 > 草地 > 旱地 > 有林地 > 农村居民用地 > 工矿用地 > 水田。其中, 高明区有林地主要分布在土壤侵蚀最敏感的低山丘陵中, 但其侵蚀面积仅占有林地总面积的 42%, 较其他土地利用类型而言, 高度敏感和极度敏感侵蚀所占比例较小。由此可见, 有林地具有良好的水土保持功能。从表 7 还可以看出, 草地、灌木林、疏林地和其他林地的抗土壤侵蚀能力较差, 但相比之下, 草地的抗侵蚀能力较灌木林、疏林地和其他林地要好。这是由于高明区丘陵台地中疏林地和其他林地以种植桉树为主, 而桉树对水分以及土壤肥料、养分的需求会严重抑制当地乡土、原产、原生物种的生长, 使得森林植物种类极为单一, 生

态十分脆弱, 土壤侵蚀的敏感性增加。因此, 在保证森林覆盖率的同时, 应选择种植根系发达、固土作用强的乡土树种, 必要时, 在敏感性较高的区域采取封山育林措施, 减少人为干扰, 引导植被从次生林向原生林方向演变。对于裸地、其他未利用地, 虽然侵蚀面积较小, 但是其侵蚀比例非常高, 说明这些土地利用类型都是高危侵蚀类型, 应加强这些区域的植被恢复; 旱地耕作和水田耕作是高明区 2 种最主要的耕作方式。水田的土壤侵蚀面积比例最低, 仅为 6.62%, 而旱地的土壤侵蚀面积超过该类土地利用面积的 50%。可见, 旱地的抗侵蚀能力较水田弱很多。因此, 在条件适宜区域, 最好开垦为经济效益高、水土保持功能强的水田。

表 6 高明区不同坡度的土壤侵蚀敏感性分布

Table 6 The distribution of soil erosion sensitivity of different slopes in Gaoming

坡度 Gradient//°	不敏感 Insensitive	轻度敏感 Slight sensitive	中度敏感 Moderate sensitive	高度敏感 High sensitive	极度敏感 Extremely sensitive	中度以上敏感区 Moderate sensitizing range or above	%
0~3	69.81	16.77	5.53	2.42	0.47	8.42	
3~7	24.58	30.39	17.27	10.47	15.30	43.04	
7~15	12.65	28.35	24.31	15.76	18.93	59.00	
15~30	4.00	18.45	33.01	27.34	23.20	83.55	
>30	1.02	6.43	27.75	41.42	24.37	93.55	

表 7 高明区不同土地利用类型的土壤侵蚀敏感性分布

Table 7 The distribution of Soil erosion sensitivity percents of different land use types in Gaoming

土地利用类型 Land use types	不敏感 Insensitive	轻度敏感 Slight sensitive	中度敏感 Moderate sensitive	高度敏感 High sensitive	极度敏感 Extremely sensitive	高度以上敏感区 High sensitizing range or above	%
有林地 Forested land	4.40	20.26	33.12	29.98	12.24	42.22	
灌木林 Shrubwood	5.97	10.27	17.87	4.72	61.17	65.89	
疏林地和其他林地 Opening and other forest land	8.75	11.54	11.21	10.81	57.69	68.49	
草地 Grassland	13.51	13.31	15.86	10.26	47.06	57.31	
工矿用地 Land for industry and mining land	46.50	27.34	13.66	8.20	4.30	12.50	
旱地 Dry land	17.37	16.12	16.44	8.95	41.13	50.07	
水田 Paddy field	58.38	29.90	5.10	2.34	4.28	6.62	
裸地 Bare land	9.62	10.59	9.02	5.55	65.22	70.77	
农村居民用地 Rural residents land	30.94	39.48	12.04	8.49	9.05	17.54	
其他未用地 Other unused land	5.24	10.04	10.58	9.62	64.51	74.13	

3 结论

土壤侵蚀是南方红壤丘陵区的一个突出的生态问题。有效的土壤侵蚀敏感性评价能为该区域的生态功能分区、水土保持措施的实施提供理论参考和实践范例。高明区土壤侵蚀敏感性评价以通用水土流失方程为核心, 通过解译高精度的遥感影像, 并结合现有的野外调查数据获取评价所需的各因子信息; 利用 ArcGIS 的强大空间分析功能加权叠加, 并依据水利部颁布的《水土保持技术规范》SL190-2007 侵蚀强度标准, 对土壤侵蚀强度进行分级, 得到土壤侵蚀敏感性分级结果。相对于传统的赋值定性土壤侵蚀敏感性分析, 该方法将地面信息的获取、数值计算和空间数据的处理有机地结合起来, 对土壤侵蚀的敏感性进行定量分析, 极大地提高评价的合理性和准确性。

高明区年平均土壤侵蚀模数为 6 757.34 t/(km²·年), 属于强度侵蚀。土壤侵蚀敏感性空间分布呈现“南面、北面、中部丘陵台地以及西面边缘侵蚀高敏感, 东面平原低敏感”的特点。占高明区土地总面积 13.54% 的极度敏感区域侵蚀的

总量却占高明区土壤总侵蚀量的 60.97%, 而占高明区土地总面积为 31.82% 的不敏感区域侵蚀量仅为高明区土壤总侵蚀量的 0.34%。高明区的土壤侵蚀敏感性在坡度为 0~3° 时, 以不敏感为主, 随着坡度的增大, 土壤侵蚀敏感性升高。研究表明, 坡度大于 7~15° 的土地是产生强度侵蚀的源区, 极度敏感主要分布在山麓地带的农田和经济林区域, 而坡度较高的区域以中度敏感与高度敏感为主。造成这种结果的原因是, 高明区坡度在 15° 以上的区域, 针叶林和阔叶混交林覆盖率较高, 对土壤侵蚀有较好的缓解作用。

从土壤侵蚀与土地利用的关系来看, 裸地和其他未利用土地是高明区的高危侵蚀土地类型, 应加强这些区域的植被恢复, 同时防止其他土地利用类型向其演变; 有林地、水田具有良好的水土保持功能, 需要加强养护; 丘陵台地上的桉树是高明区的一个主要致侵蚀因子, 应积极地改种根系发达、涵水能力好、固土作用强的乡土树种, 必要时在敏感性较高的区域采取封山育林措施, 减少人为干扰, 引导植被从次生林向原生林方向演变。

(下转第 13520 页)

(3) 接种温度在 40 ℃ 左右, 发酵时间控制在 2.5 ~ 4.0 h, 酸奶凝乳状态良好, 没有或有极少量乳清析出。

(4) 花生汁: 牛奶为 3:2, 蔗糖添加量为 9%, 复合稳定剂添加量为 0.14%, 菌种接种量为婴儿双歧杆菌: (Lb + St) = 2:1, 接种量为 4.0% 时, 制作出的双歧搅拌型花生酸奶凝乳状态好, 黏度适中, 组织均匀, 口感细腻爽口, 乳香味花生味浓且香味协调香甜有余味。卫生及营养指标均可达到无公害酸牛奶 NY 5142-2002 标准。特征菌双歧杆菌活菌数达到 5.5×10^8 cfu/ml。

参考文献

- [1] 李西波, 纠敏, 侯玉泽. 新型花生酸奶的研制[J]. 食品研究与开发, 2008, 29(9): 81-83.
- [2] 刘玉兵, 宋宏光. 搅拌型花生酸奶的研制[J]. 黑龙江农业科学, 2009(3): 105-106.
- [3] 周翠球. 珍珠豆型花生新品种品质分析[J]. 广西农业科学, 1989(4): 18

(上接第 13462 页)

参考文献

- [1] 莫建飞, 卢远, 韦亮英. 基于 GIS 的南宁城市生态系统敏感性评价分析[J]. 学术研究与探讨, 2007(5): 33-46.
- [2] 蔡运龙, 陆大道, 周一星, 等. 中国地理科学的国家需求与发展战略[J]. 地理学报, 2004, 59(6): 811-819.
- [3] 黄进勇, 严力蛟, 王兆寿. 红壤小流域不同土地利用方式下的水土流失特征[J]. 浙江大学学报: 农业与生命科学版, 2002, 28(1): 78-82.
- [4] 李忠武, 曾光明, 张华, 等. GIS 支持下的红壤丘陵区脆弱生态环境综合评价——以长沙市为例[J]. 生态环境, 2004, 13(3): 358-361.
- [5] 杨维, 刘云国, 曾光明, 等. 定量遥感支持下的红壤丘陵区土壤侵蚀敏感性评价——以长沙市为例[J]. 环境科学与管理, 2007, 32(1): 120-125.
- [6] 万忠成, 王治江, 董丽新, 等. 辽宁省生态系统敏感性评价[J]. 生态学杂志, 2006, 25(6): 677-681.
- [7] 马云波. 晋城市生态功能区划研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2008.
- [8] 陶星名, 张建英, 王宇峰, 等. 杭州市生态敏感性及其空间分布[J]. 浙江大学学报: 农业与生命科学版, 2006, 32(1): 27-30.
- [9] 李建牢, 刘世德. 罗玉沟流域坡面土壤侵蚀量的计算[J]. 中国水土保持, 1989(3): 28-31.
- [10] 许明祥, 刘国彬, 温仲明, 等. 黄土丘陵区小流域土壤特性时空动态变化研究[J]. 水土保持通报, 2000, 20(1): 21-23.
- [11] 王文娟, 张树文, 李颖, 等. 基于 GIS 和 USLE 的三江平原土壤侵蚀定量评价[J]. 干旱区资源与环境, 2008, 22(9): 112-117.
- [12] 蔡崇法, 丁树文, 史志华, 等. 应用 USLE 模型与地理信息系统 IDRISI 预测小流域土壤侵蚀量的研究[J]. 水土保持学报, 2000, 14(2): 19-24.
- [13] WISCHMEIER W H. A soil erodibility nomograph farm land and construction sites[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1971, 26: 189-193.
- [14] 杨圣军, 冯凤玲, 杨雪白, 等. 基于 RS 与 GIS 的龙口市土壤侵蚀评价研究[J]. 水土保持研究, 2007, 14(2): 101-103.
- [15] 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

-21.

- [4] 滕藏, 柳琪, 郭栋梁. 花生主要营养物质含量的统计与分类分析[J]. 食品研究与开发, 2003, 24(4): 84-85.
- [5] MATEOS J A. Yoghurt: A probiotic mediterranean food [J]. Arch Latinoam Nutr, 2004, 54: 76-78.
- [6] 项明洁, 刘明, 彭奕冰, 等. 低聚果糖对双歧杆菌增殖效果及肠道菌群的影响[J]. 检验医学, 2005, 20(1): 49-51.
- [7] 张敏, 郭顺堂. 大豆糖蜜双歧酸奶的研制[J]. 食品科学, 2006, 10(27): 649-651.
- [8] 孟涛, 郭兴华. 乳酸菌及其生长因子对人畜健康的作用[J]. 生物工程进展, 1993, 13(4): 48-52.
- [9] 王允祥, 郑桂富. 多菌种混合发酵花生酸乳的工艺研究[J]. 食品工艺科技, 2001, 22(3): 49-50.
- [10] 白凤翎. 国家食品卫生标准大肠菌群检验方法探究[J]. 食品工业科技, 2005, 26(11): 179-181.
- [11] 邵红, 华旭. 搅拌型酸奶稳定剂的改良研究[J]. 中国乳品工业, 2002, 30(4): 10-11.
- [12] 刘明华. HACCP 在酸奶生产中的应用[J]. 中国乳业, 2001(11): 25-27.

然灾害学报, 2002, 12(3): 14-18.

- [16] 王万忠, 焦菊英. 中国的土壤侵蚀因子定量评价研究[J]. 水土保持通报, 1996, 16(5): 1-16.
- [17] RENARD K G. RUSLE revisited status and the future[J]. Soil and Water Conservation, 1994, 49(3): 213-220.
- [18] 刘森, 胡远满, 徐崇刚. 基于 GIS、RS 和 RUSLE 的林分土壤侵蚀定量研究——以大兴安岭呼中地区为例[J]. 水土保持研究, 2004, 11(3): 21-24.
- [19] WISCHMEIER W H, SMITH D D. Rain fall energy and its relationship to soil loss [J]. Transactions American Geophysical Union, 1958, 39: 285-291.
- [20] ROMKENS M J M, PRASAD N S, POESEN J M. A Soil erodibility and properties [C]. Hamburg: Transactions of the XIII Congress of the International Society of Soil Science, 1986.
- [21] 柯克比, M J, 摩根 R P C. 土壤侵蚀[M]. 王礼先, 吴斌, 洪惜英, 等. 译. 北京: 水利电力出版社, 1987.
- [22] 钟霞, 薛重生. 基于栅格模块地形因子提取及其水土流失评价中的应用——以湖北省房县水土流失评价为例[J]. 水土保持研究, 2004, 11(1): 92-94.
- [23] McCool D K. Revised slope length factor for the universal soil loss equation[J]. Transactions of the Am Soc of Agric Engrs, 1989, 32(5): 1570-1576.
- [24] NEARING M A. A single continuous function for slope steepness influence on soil loss [J]. Soil Science Society of America Journal, 1997, 61(3): 917-919.
- [25] GUTMAN G, IGNATOV A. The derivation of the green vegetation fraction from NOAA/AVHRR data for use in numerical weather prediction models [J]. International Journal of Remote Sensing, 1998, 19: 1533-1543.
- [26] 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): 1-10.
- [27] WISCHMEIER W H, SMITH D D. Predicting rainfall erosion losses: A guide to conservation planning [C]. Washington DC: USDA-SEA Agriculture Handbook 537. U. S. Department of Agriculture, 1978: 58.