

土壤侵蚀模型中植被管理因子的遥感估算

宋现锋¹ 段 峥¹ 牛海山¹ 河野泰之²

(¹中国科学院研究生院资源与环境学院 ²日本京都大学东南亚研究所)

摘要:在大区域土壤侵蚀评价中,由于缺乏详细的降雨记录和侵蚀观测实验,USLE 模型中植物管理因子的参数化非常困难。该研究提议采用多时相 Landsat TM/ETM 遥感图像和天气模拟相结合的方法来估算植物管理因子值。其中,采用线性光谱分解算法计算各类地面覆盖物的盖度,用以估算潜在土壤流失率;采用 CLIGEN 模型模拟历史降雨事件并计算降雨侵蚀指数的时间分布;最后使用正则化的降雨侵蚀指数加权平均潜在土壤流失率,获得植物管理因子的估算值。该研究方法在潮河上游流域进行了应用验证,计算各土地利用类型的植物管理因子值并对比分析,结果表明,其数值变化与土地利用分类定义的植被盖度非常一致,利用上述因子值进行土壤侵蚀评估的结果和其他研究成果很接近。

关键词: 植被管理因子;降雨侵蚀指数;潜在土壤流失率;线性光谱分解算法;CLIGEN 模型

中图分类号: S714.7 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1522(2009)03-0058-06

SONG Xian-feng¹; DUAN Zheng¹; NIU Hai-shan¹; Yasuyuki Kono². **Estimation of the cover and management factor for modeling soil erosion using remote sensing.** *Journal of Beijing Forestry University* (2009) 31(3) 58-63 [Ch, 17 ref.]

¹ College of Resource and Environment, Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100049, P. R. China;

² Center for Southeast Asian Studies, Kyoto University, 606-8501, Japan.

The cover and management factor (C) of the Universal Soil Loss Equation (USLE) is difficult to be estimated over broad geographic areas where meteorology and soil erosion are poorly monitored. This paper presents a new approach to estimate C factor based on multi-temporal images of Landsat TM/ETM and a weather generator. The linear spectral unmixture algorithm was adopted to calculate the fractional abundance of ground cover, from which the potential soil loss ratio ($PSLR$) was estimated. The weather generator (CLIGEN) was used to simulate historical rainfall events and compute the distribution of rainfall erosivity indices. The annual C factor was finally estimated by means of weighting $PSLR$ with the proportion of rainfall erosivity indices. The proposed method was applied to the upstream area of the Chaohe River for validation. The results showed that the estimated C values appropriately responded to the vegetation abundance and land use types, and the estimated soil loss fitted well to the observed records.

Key words cover and management factor; rainfall erosivity index; potential soil loss ratio ($PSLR$); linear spectral unmixture algorithm; CLIGEN model

通用水土流失方程 USLE (Universal Soil Loss Equation) 中,植被管理因子 (cover and management factor, C) 受气候、植被及土地利用方式的影响,具有显著的地域差异性。近年来,在大区域的土壤侵蚀评价工作中,遥感估算植物管理因子得到了广泛重视。遥感覆盖范围广、重复周期短,同地面观测实

验方法相比较,可以快速地获取广域的地面覆盖变化。目前,多数研究采用了归一化植被指数,通过建立植被管理因子与该指数的相关经验方程,获得植被管理因子^[1-4]。最近,又有学者考虑了多种地面覆盖物的综合作用,采用地物光谱混合模型,从遥感影像中获取植被、土壤、岩石等多种地物的地表盖度,

收稿日期:2008-06-05

http://www.bjfujournal.cn, http://journal.bjfu.edu.cn

基金项目:中国科学院百人计划择优支持项目“人地系统相互作用机理与空间过程”、日本粟田水与环境基金项目(19701)。

第一作者:宋现锋,博士,副教授。主要研究方向:环境地理信息系统。电话:010-88256462 Email:xfsong@gucas.ac.cn 地址:100049 北京市石景山区玉泉路甲 19 号中国科学院研究生院资源与环境学院。

然后确定植被管理因子与这些地面覆盖物的联立方程^[5]。

上述方法考虑了地面覆盖物的减蚀作用, 简单易行、具有一定的实用性, 但是由于忽略了植被管理因子受侵蚀性降雨季节分布规律的影响, 以及地表植被盖度随时间而变化的规律, 在空间和时间上缺少推广价值。本研究提出了从遥感角度估算植物不同生长时期的潜在土壤流失率, 结合同时期的降雨侵蚀指数模拟数据、分阶段估算植被管理因子值的方法。最后, 以潮河上游流域为研究区, 验证了上述植被管理因子估算方法。

1 研究区概况

研究区域是北京密云水库的潮河上游流域(图1), 属于半干旱地区。地理范围东经 116°08'10"~116°46'34"、北纬 41°09'46"~41°37'30"、面积约 1 600 km²。高程位于 640~2 200 m 之间, 土壤冻融期为 4 月底、结冻期为 11 月初, 年均气温 6℃、年均最低气温 -20℃、最高气温 30℃。流域经济活动以农业经济为主, 多年来种植规模相对稳定, 一年一熟种植方式、以玉米、豆类、谷物等作物为主, 大部分作物生长期 90~120 d。大气降雨累年平均约 500 mm, 主要发生在 6~8 月份, 约占全年降雨量的 70%~80%。

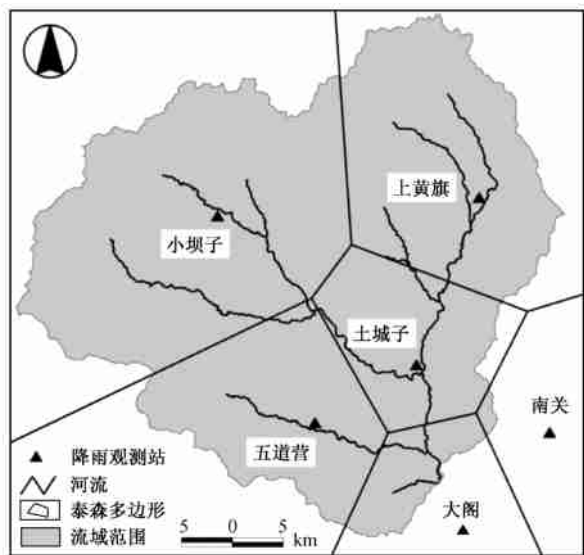


图1 潮河上游流域地理位置

FIGURE 1 Location of upstream watershed of Chaohe River

2 研究方法

2.1 植被管理因子

USLE 模型中, 植被管理因子是指一定条件下, 作物牧草、植被覆盖和实施残茬覆盖等田间管理措施土地上的土壤流失量与同等条件下实施清耕的连续休闲地土壤流失量的比值。植被管理因子的传统计算方法是结合降雨记录数据和土壤侵蚀地面观测

数据进行估算的^[6]。

$$C = \sum_{i=1}^n R_i \cdot SLR_i \quad (1)$$

式中: $\sum_{i=1}^n R_i = 1$, i 为植物生长阶段, R_i 为植物生长第 i 阶段的正则化降雨侵蚀指数(0~1); SLR_i 为同时期的土壤流失率(0~1); C 为植被管理因子年均值。

降雨侵蚀指数的时间分布是使用历史降雨数据计算降雨侵蚀力获得的; 而土壤流失率(soil loss ratio, SLR)则是通过标准小区的土壤侵蚀观测结果获得的。在大区域的土壤侵蚀评价中, 尤其是发展中国家, 多数区域没有详细的自动观测降雨历史数据和长期的土壤侵蚀观测实验积累, 因此难以得到这两组参数的实际观测数值。

本项研究建议采用气候模拟和植被遥感相结合的方法来估算植被管理因子。根据时间分辨率粗糙的气象观测数据, 采用 CLIGEN 气候发生器模拟详细的历史降雨事件, 并据此获得侵蚀性降雨侵蚀指数的时间分布。从遥感角度出发, 使用遥感提取的各类地面覆盖物的地表盖度来估算土壤流失率。由于不是实际观测结果, 暂称为潜在土壤流失率。

2.2 降雨侵蚀指数的数值模拟

对于时间分辨率低的降雨数据记录, 降雨雨强直方图质量差, 甚至没有雨强数据, 因此难以计算降雨侵蚀指数。采用 CLIGEN 模型模拟降雨事件, 可以有效地模拟雨强分布曲线, 该模型在国内外的适用性已经得到广泛验证^[7-8]。

CLIGEN 模拟降雨事件的 4 个基本参数: 降雨量 P (cm)、降雨持续时间 D (h)、最大雨强与平均雨强的比值 i_p 、最大雨强出现时间与降雨持续时间的比值 t_p 。假设降雨呈现单峰形态, 可以用双指数方程拟合雨强分布曲线^[9]:

$$i(t) = \begin{cases} i_p e^{b(t-t_p)}, & 0 \leq t \leq t_p \\ i_p e^{d(t_p-t)}, & t_p < t \leq 1.0 \end{cases} \quad (2)$$

式中: $i(t)$ 为 t 时刻雨强与平均雨强的比值, b 与 d 为调整参数, 满足条件 $d = bt_p/(1-t_p)$ 和 $i_p(1 - e^{-bt_p}) - bt_p = 0$ 。

根据降雨事件的雨强分布曲线, 可以计算出整个降雨过程的降雨总动能与最大 30 min 雨强, 从而获得降雨的侵蚀指数。瞬时降雨的单位动能^[10]:

$$E(t) = \begin{cases} 210 + 89 \log I(t), & I(t) \leq 7.6 \text{ cm/h} \\ 289, & I(t) > 7.6 \text{ cm/h} \end{cases} \quad (3)$$

式中: $I(t) = i(t)P/D$, $I(t)$ 为 t 时刻雨强。

由式(2)与(3)得到降雨总动能 E :

$$E = \int_0^1 E(t) I(t) dt \quad (4)$$

由式(2)近似地得到最大 30 min 雨强 I_{30} :

$$I_{30} = \frac{2P_i}{Db} (1 - e^{-\frac{D}{b}}) \quad (5)$$

式中:当降雨持续时间 D 小于 30 min 时, $I_{30} = 2P$ (cm/h)。

降雨侵蚀指数^[11]:

$$R = EI_{30}/173.5 \quad (6)$$

研究区有 6 个降雨观测站,满足 USLE 模型对流域面积的站点数目要求。由于单年降雨分布具有时间上的随机性或不稳定性,因此使用了 1975—1990 年的日值降雨数据。经整理并利用 CLIGEN 逐日模拟出降雨事件的基本要素,然后采用上述公式计算出每个测站的日降雨侵蚀指数,再经统计得到每个测站的累年各月的降雨侵蚀指数,最后正则化获得累年各月的降雨侵蚀指数分布曲线(图 2)。各观测站的降雨侵蚀指数分布曲线相似,近似正态分布。根据结果,1—3 月份及 11—12 月份的侵蚀能力几乎为零。4 月与 10 月的降雨侵蚀力较弱,5 月与 9 月中等,6—8 月最强。

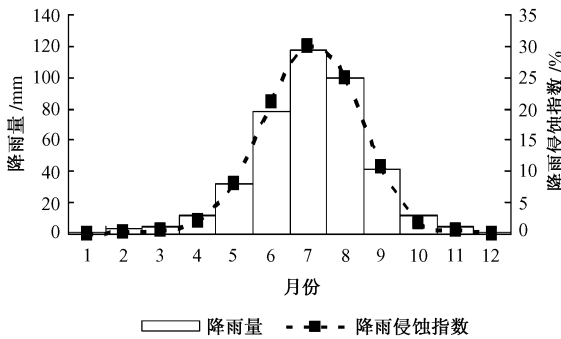


图2 土城子观测站的月降雨量与降雨侵蚀指数分布曲线

FIGURE 2 Average monthly precipitation and the distribution of rainfall erosivity indices at Tuchengzi Station, Fengning County of Hebei Province

根据水文观测站的地理坐标构建泰森多边形,确定每个测站的影响范围(图 1)。将各站正则化的降雨侵蚀指数时间分布曲线与泰森多边形相关联,插值得到降雨侵蚀指数的时间与空间分布,获得计算植物管理因子时的加权系数时间序列图层。

2.3 潜在土壤流失率的遥感估算

2.3.1 遥感影像的时相选择

选取遥感影像数据要结合研究区域的土壤侵蚀发生时期以及农作物与自然植被的生长期。潮河上游流域的土壤侵蚀发生时期主要是降雨月份 4—10 月(图 2),覆盖了植物的整个生长期。

选取遥感影像的季相越多,越能准确地反映出农作物或自然植被的生长态势、反映出不同生长阶段的植物地表覆盖度的变化及其对土壤侵蚀的影响作用。

本研究使用了 LANDSAT TM 影像,根据云盖量、云雨天气以及遥感成像周期等限制条件,选择了 1990—1991 年的 5 月上旬、7 月上旬和 9 月上旬影像。这些时间段分别代表着农作物或自然植被生长过程的不同阶段,能够反映出各植物地表覆盖面积的基本变化趋势。

采用线性光谱混合模型、通过混合像元分解求解上述各时间阶段的植被、裸露土壤、岩石等地物覆盖度,进而估算出潜在土壤流失率。

2.3.2 线性光谱混合模型

目前的光谱混合模型主要包括:线性模型、概率模型、几何光学模型、随机几何模型和模糊分析模型。其中,线性模型的原理简单、实现方便,应用比较广泛。虽然地物光谱混合是一种复杂的非线性关系,但是许多研究表明,线性模型仍然具有较好的拟合能力,能够达到一定的精度^[12]。

线性模型基于如下假设:混合像元在某一波段的反射率是各端元组分在该波段反射率的线性组合,其中,权重系数就是各端元组分所占像元面积的百分数,表示为:

$$G_i = \sum_{j=1}^n (r_{ij}F_j) + \epsilon_i \quad (7)$$

式中: $\sum_{j=1}^n F_j = 1$, $0 \leq F_j \leq 1$; n 为端元组分的数目; G_i 为混合像元在第 i 波段的反射值; r_{ij} 为混合像元内第 j 端元组分在第 i 波段的反射值; F_j 为混合像元内第 j 端元组分的丰度; ϵ_i 为第 i 光谱波段的残差。

线性模型中端元组分的确定是模型实现成功与否的关键。端元组分数目应小于影像波段数,这里选取了 4 种端元组分:植被、土壤、水分(阴影)和非光合作用物质(岩石/残茬等)。端元组分光谱特征需要经过提纯处理,采用了主成分分析方法,分离出噪声、减少信息冗余。端元组分之间的相关性尽量降低、以提高端元组分间的正交特性,采用了离散度指标(transformed divergence)^[13],确认端元组分之间的非相关性。

线性模型中遥感影像 DN 值到反射率的转换,可以提高图像质量与像元分解结果精度。参考 LANDSAT 用户手册,将遥感影像与端元组分的 DN 值转换成反射率,然后采用限制条件约束下的二次规划方法求解各端元组分丰度。分析光谱分解残差图,整个研究地区的光谱分解残差均值比较合理。但是城镇等建筑用地区域残差偏高,因此针对这部分地区重新选择端元组分进行光谱分解,降低残差。

由于本研究采用历史遥感数据,无法实时调查验证端元组分的实际丰度,因此运用影像 NDVI 与植被端元组分进行相关分析,相关系数接近 90%。

表明提取结果比较可靠。

2.3.3 潜在土壤流失率

在地面观测实验中,土壤流失率是指在相同土壤、坡度和相同降雨条件下,某一特定农作物或植被的土壤流失量和耕种后连续休闲土地的土壤流失量的比值。因为数学除法作用是约掉降雨、土壤与地形的影响,所以土壤流失率的物理意义是指地面覆盖物对土壤侵蚀的综合作用。

根据上述土壤流失率的语义分析并参照 DE ASIS 2007 年的相关研究^[5],本项研究提出利用遥感提取的地面覆盖物如:植被、裸露土壤与非光合作用物质等估算该遥感时相的潜在土壤流失率(potential soil loss ratio, *PSLR*),见公式(8)。具体过程为:水分/阴影部分不参与估算,对植被、土壤以及非光合作用物质的丰度进行正则化处理,以确保 3 者的和为 100%。

$$PSLR = \frac{\alpha F_{ls}}{1 + F_{veg} + F_{NPM}} \quad (8)$$

式中:*PSLR* 表示潜在土壤流失率(0~1),*F_{ls}* 表示裸露土壤盖度,*F_{veg}* 表示植被盖度,*F_{NPM}* 表示非光合作用物质盖度, α 代表修正系数,可以通过比较水土流失观测实验结果获得。本项研究中, α 缺省值为 1,将来需要进一步标定以提高准确度。

利用上述选择的 3 个时相的遥感影像(5、7、9 月),通过遥感光谱分解得到地面覆盖物的盖度后,使用公式(8)分别估算出 3 个时期的潜在土壤流失率(图 3)。

3 结果与分析

将 5、7、9 月的潜在土壤流失率进行线性插值,估算出 4—10 月的月值分布;然后根据公式(1),选择位于 4—10 月的降雨侵蚀指数时空分布序列、加权平均潜在土壤流失率;最终获得植被管理因子年均值的空间分布图(图 3)。

国内缺少发达国家那样的植被管理因子数据库,缺乏全国统一的植被管理因子衡量标准,不同估算方法差异大、可比性差。本研究从土地利用类型的 *C* 值变化以及土壤侵蚀评估两个角度,间接地验证了 *C* 值的合理性。

3.1 土地利用类型的 *C* 值变化规律

按照土地利用分类标准(1984),在 ArcGIS 中将该区域的土地利用图与植被管理因子图进行叠置,使用 Zonal Mean 统计各种土地利用类型的年均植被管理因子值(表 1)。

对比分析表明,土地利用类型的 *C* 因子数值具有明显的变化规律:有林地<疏林地<灌木林<其

表 1 潮河上游土地利用类型的年均 *C* 值

TABLE 1 Annual *C* values of land use in Chaohe River upstream

土地利用类型	<i>C</i> 值	土地利用类型	<i>C</i> 值
有林地	0.025	城镇用地	0.153
灌木林	0.069	农村居民点	0.452
疏林地	0.066	其他建设用地	0.180
其他林地	0.184	沙地	0.689
高覆盖草地	0.132	裸岩石砾地	0.028
中覆盖草地	0.221	山地旱地	0.328
低覆盖草地	0.512	丘陵旱地	0.318
滩地	0.620	平原旱地	0.217

他林地,高覆盖草地<中覆盖草地<低覆盖草地,平原旱地<丘陵旱地<山地旱地。

在土地利用分类标准中,二级分类是根据植被的覆盖度定义的。表 1 所示的二级土地利用分类的植被管理因子数值与二级土地利用类型的植被盖度变化规律是一致的。虽然不能直接说明因子值的准确程度,但却能够定性地说明植被管理因子间的赋值大小相对合理。

3.2 *C* 值应用评估

获得植被管理因子 *C* 后,采用 USLE 模型进行土壤侵蚀评估。其中,降雨侵蚀因子 *R* 采用历年气象统计数据,由 CLIGEN 模拟得出,土壤抗蚀因子 *K* 采用第二次全国土壤普查资料,由 Williams 的 *K* 值方法得出^[1],地形因子 *LS* 采用 1:5 万 DEM 数据、缓坡采用 McCool 坡度公式^[14],陡坡采用 Liu 等经验公式^[15],水土保持因子通过野外调查、并参考华北地区农耕措施因子值研究结果。

根据水利部颁布的土壤水力侵蚀标准,对 USLE 土壤侵蚀估算结果进行模数分级,获得土壤侵蚀风险等级图(图 4)。统计结果表明,潮河上游流域的年平均土壤侵蚀模数为 1.273 kg/m²,属于轻度侵蚀,与其他研究结果近似^[16-17],从而也间接说明本文植被管理因子估算值的有效性。

4 结 论

针对大区域土壤侵蚀风险评估工作中缺乏历史观测资料的问题,本文提出了使用遥感估算的潜在土壤流失率和降雨模型模拟的降雨侵蚀指数估算植被管理因子评价的方法。土壤流失率是通过遥感光谱混合模型提取的地面覆盖物盖度估算获得的,即潜在土壤流失率,替代了地面侵蚀观测试验得出的土壤流失率。降雨侵蚀指数的时间分布则是采用 CLIGEN 气候模型,根据研究区的历史气象数据统计,模拟出当地侵蚀性降雨的时间分布曲线。

由于植被管理因子的影响因素众多,将来的工作还需要提高遥感提取地面参数的种类和精度,同

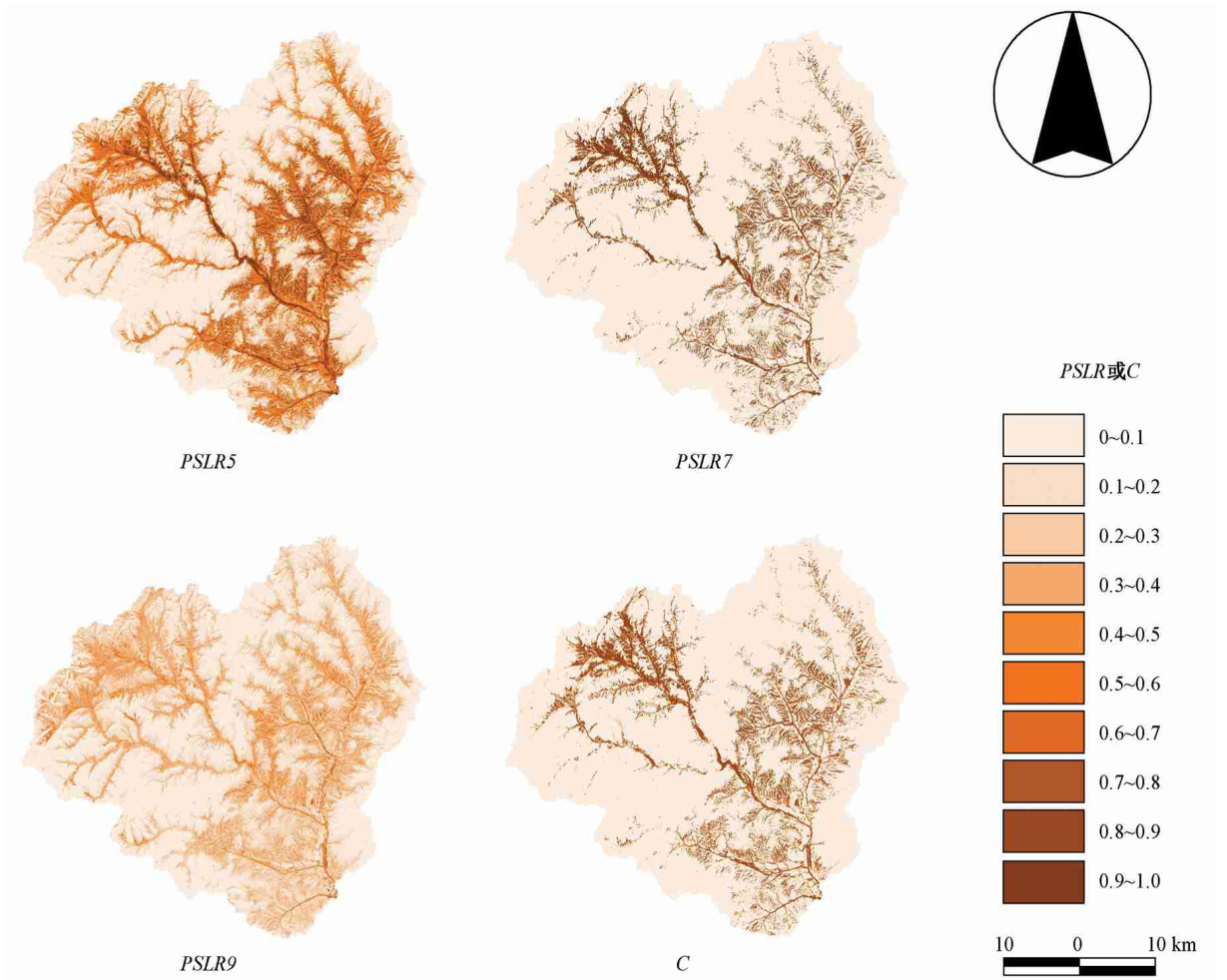


图3 遥感估算的5,7,9月的潜在土壤流失率以及年均C值
 FIGURE 3 Annual C factor and PSLR in May, July and September

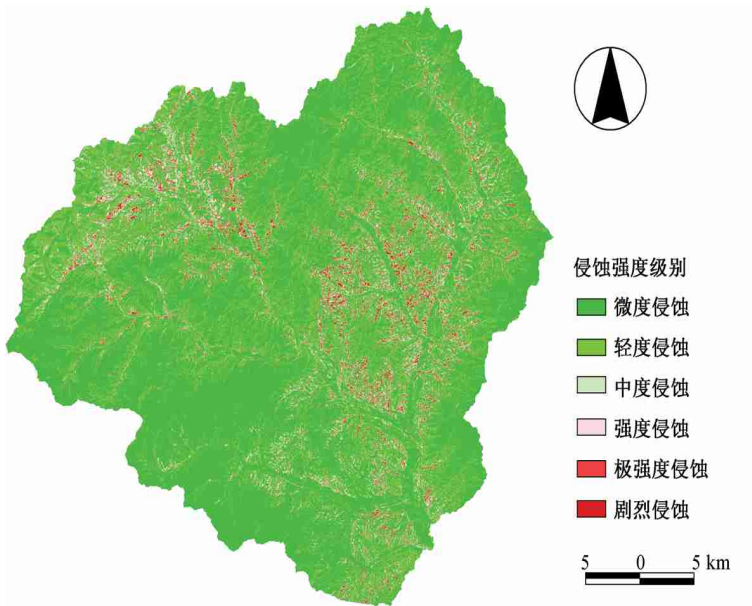


图4 土壤侵蚀风险分级
 FIGURE 4 Risk class map of soil erosion

时开展长期地面观测实验进行标定,以进一步完善上述方法。

参 考 文 献

- [1] 蔡崇法, 丁树文, 史志华. 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):20-26.
- CAI C F, DING S W, SHI Z H. Study of applying USLE and geographical information system IDRISI to predict soil erosion in small watershed [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2000, 14(2):20-26.
- [2] 马超飞, 马建文, 布和敖斯尔. USLE 模型中植被覆盖因子的遥感数据定量估算[J]. 水土保持通报, 2001, 21(4):6-9.
- MA C F, MA J W, BUHEAOSAIER. Quantitative assessment of vegetation coverage factor in USLE model using remote sensing data [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2001, 21(4):6-9.
- [3] ARSENAULT E, BONN F. Evaluation of soil erosion protective cover by crop residues using vegetation indices and spectral mixture analysis of multispectral and hyperspectral data[J]. *Catena*, 2005, 62(2-3):157-172.
- [4] BANNARI A, PACHECO K, STAENZ H. *et al.* Estimating and mapping crop residues cover on agricultural lands using hyperspectral and IKONOS data [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2006, 104(4):447-459.
- [5] DE ASIS A M, OMASA K. Estimation of vegetation parameter for modeling soil erosion using linear spectral mixture analysis of Landsat ETM data [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2007, 62(4):309-324.
- [6] 唐克丽. 中国水土保持[M]. 北京:科学出版社, 2004:320.
- TANG K L. *Soil and water conservation in China* [M]. Beijing: Science Press, 2004:320.
- [7] ZHANG Y, LIU B Y, WANG Z Q, *et al.* Evaluation of CLIGEN for storm generation on the semiarid Loess Plateau in China [J]. *Catena*, 2008, 73(1):1-9.
- [8] KOU X J, GE J P, WANG Y, *et al.* Validation of the weather generator CLIGEN with daily precipitation data from the Loess Plateau, China [J]. *Journal of Hydrology*, 2007, 347(3-4):347-357.
- [9] FLANAGAN D C, MEYER C R, YU B, *et al.* Evaluation and enhancement of CLIGEN weather generator [C]// *Proceedings of the ASAE Symposium on Soil Erosion Research for the 21st Century*. St. Joseph, MI: ASAE, 2001:107-110.
- [10] WISCHMEIER W H, SMITH D D. Rainfall energy and its relationship to soil loss [J]. *Transactions of the American Geophysical Union*, 1958, 39:285-291.
- [11] WISCHMEIER W H. A rainfall erosion index for a universal soil loss equation [C]// *Proceedings of Soil Science Society of America*. Madison: Soil Science Society of America, 1959:246-249.
- [12] JOHNSON P E, SMITH M O, TAYLOR-GEORGE S, *et al.* A semiempirical method for analysis of the reflectance spectra of binary mineral mixtures [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1983, 88:3 557-3 561.
- [13] JENSEN J R. *Introductory digital image processing: A remote sensing perspective* [M]. Upper Saddle River, New Jersey: Prentice Hall, 1996:195.
- [14] SHI Z H, CAI C F, DING S W, *et al.* Soil conservation planning at the small watershed level using RUSLE with GIS: A case study in the Three Gorge Area of China [J]. *Catena*, 2004, 55(1):33-48.
- [15] LIU B Y, NEARING M A, SHI P J, *et al.* Slope length effects on soil loss for steep slopes [J]. *Soil Society of American Journal*, 2000, 64(5):1 759-1 763.
- [16] 张有全, 宫辉力, 赵文吉, 等. 基于 GIS 和 USLE 的密云县土壤侵蚀评价及空间特征研究[J]. 水土保持研究, 2007, 14(3):358-362.
- ZHANG Y Q, GONG H L, ZHAO W J, *et al.* Quantitative evaluation and spatial analysis of soil erosion in Miyun County based on GIS and USLE [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2007, 14(3):358-362.
- [17] 周为峰, 吴炳方. 基于遥感和 GIS 的密云水库上游土壤侵蚀定量估算[J]. 农业工程学报, 2005, 21(10):46-50.
- ZHOU W F, WU B F. Soil erosion estimation of the upriver areas of Miyun Reservoir located on the Chaobai River using remote sensing and GIS [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2005, 21(10):46-50.

(责任编辑 李 慧 李 契)