

基于多因子层次覆盖模型的潜在土壤侵蚀等级评价^{*}

——以内蒙古林西县为例

李新宇^{1,2}, 唐海萍², 张新时^{2,3}, 孙 林⁴

(1. 北京市园林科学研究所, 北京 100102; 2. 北京师范大学 资源学院, 北京 100875;
3. 中国科学院植物所, 北京 100093; 4. 中国林业科学研究院 森环森保所, 北京 100091)

摘 要: 以内蒙古林西县作为研究案例, 采用降雨侵蚀力、主要地形体、土壤可蚀性、植被盖度及水土保持措施等参数, 利用 TM 影像、DEM、土壤类型图、土地利用类型图等地理辅助数据与地面实测土壤理化性质及多年降水数据, 在 GIS 与 RS 技术支持下, 对 5 个单因子作用下研究区潜在水土流失风险进行评价。并基于多因子层次覆盖评价模型, 对复合因子及多因子综合作用下研究区潜在水土流失状况进行评价。结果表明: 地形、土壤与植被盖度 3 个因子对土壤侵蚀的贡献量较大, 土地利用方式与降雨强度对土壤侵蚀的贡献量较小。5 个因子综合作用的结果是: 林西县有近 77% 的土地面积面临强度及强度以上水土流失的危险。其中轻度及微度水土流失面积占总土地面积的比例较小, 二者共占总土地面积比例 14.8%, 主要分布在林西县西北部的中高山坡度较低地区; 强度水土流失占 22.8%, 主要发生在北部的中山区及中部的河谷平川区; 极强度水土流失占 43.8%, 主要发生在中部及南部低山丘陵区; 剧烈水土流失面积占 10.8%, 集中分布在北部中山高坡区。

关键词: 土壤侵蚀; USLE; GIS; 多因子层次覆盖评价; 林西县

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2007)04-0154-06

Potential Soil Erosion Assessment Based on the USLE and Multi-factor Hierarchical Cover Model

——A Case Study of Linxi County in Inner Mongolia

LI Xin-yu¹, TANG Hai-ping², ZHANG Xin-shi^{2,3}, SUN Lin⁴

(1. Beijing Institute of Landscape Gardening, Beijing 100102, China; 2. College of Resources Science and Technology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 3. Institute of Botany, CAS, Beijing 100093, China; 4. Research Institute of Forest Ecology, Environment and Protection, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China)

Abstract: This study aimed at the evaluation of the hazard of soil erosion under single or compound factors at regional scale using a Geographic Information System (GIS) and remote sensing in Linxi county of Inner Mongolia. Precipitation, topographic, soil, and land use data were collected, processed, and constructed into a spatial database using GIS and remote sensing data. Areas that had suffered soil erosion and the contributions to soil erosion of single factor and compound factor are analyzed and mapped using the Universal Soil Loss Equation (USLE) and Multi-factor Hierarchical Cover Model (MHCM). The results show that landform, soil and vegetation coverage strengthen the soil erosion risk, while precipitation and land use lessen the soil erosion risk. Nearly 77% of the land area might suffer severe soil erosion risk. Slight and light ero-

* 收稿日期: 2007-04-02

基金项目: 国家重点基础研究发展规划资助项目(G2000018607); 北京市园林局“北京市东灵山-百花山风景名胜区草甸景观变化的评价与恢复研究”

作者简介: 李新宇(1979-), 女, 博士, 工程师, 研究方向为生态区评价及恢复。

通讯作者: 唐海萍, E-mail: tanghp@ires.cn

sion area accounts for 14.8%, which mainly distributed in the low slope of northwest mid-mountain areas. Intensive erosion area accounts for 22.8%, primarily in the northern part of the mountain and the central valley. An area of extreme intensive erosion 43.8%, occurred mainly in the central and southern parts of the hilly area. Severe oil erosion area is 10.8%, concentrated in the northern mid-mountain slopes.

Key words: soil erosion; USLE; GIS; multi-factor hierarchical cover model; Linxi county

土壤侵蚀已成为全球性的环境问题,它涉及多因素、多层次、多尺度。而山地丘陵地区的土壤侵蚀状况及其变化对整个区域的社会经济发展,生态环境的整体变化和具体治理措施的投入力度等都有着密切的联系^[1]。通用水土流失方程 USLE(Universal Soil Loss Equation)是目前评价土壤侵蚀最常用的模型之一,并随遥感和 GIS 技术的发展,实现了由难以掌握统一标准和精度的常规调查到具有统一标准和精度的水土资源信息空间处理的转变,可以对不同区域尺度的生态环境及水土流失状况进行实时的客观评价和预测^[2,3]。但是 USLE 模型应用于区域尺度上时,需要降水、土壤等方面较详尽的过程数据,而由此带来的极大不确定性会直接影响模型评价的准确性。因此,有许多研究结合其他理论方法来进行土壤潜在侵蚀量的计算^[4-6],用以保证水土流失状况评价的准确性。

本研究尝试将多因子层次覆盖评价模式应用于 USLE 模型中,以内蒙古林西县作为研究案例,评价土壤潜在侵蚀状况的等级,为 USLE 模型在区域尺度乃至更大尺度上的应用提供新的研究思路,研究结果也可作为区域生态环境建设,自然资源的管理和保护提供科学依据。

1 研究区概况

内蒙古林西县位于大兴安岭山脉南端的西侧,北方农牧交错带东北部。依据内蒙古植被地带划分,林西县属于山地落叶阔叶林及山地草原带^[7],典型的森林草原过渡区,具有大兴安岭南麓山地丘陵区典型景观特征与北方农牧交错带的生产特征。东经 117°37'55"~118°34'30",北纬 43°14'43"~44°14'43",全县总土地面积 3 933.4 km²。境内以山地丘陵地貌为主。基岩山区面积为 2 615 km²,占总面积的 66%;山间沟谷及河谷平原区的面积为 1 335 km²,占总面积的 34%。按中国气候区划分类,林西地处中温带半干旱大陆性季风气候区。全县年均气温 4.7℃,平均降水量为 370.4 mm。特殊的自然环境条件和人类不合理的土地利用方式使林西县成为水土流失典型区域,并成为造成当地土壤沙化、生态环境退化、社会经济滞后的主要影响因子^[8]。

2 单因子影响评价

2.1 研究方法及数据处理

主要选取的数据包括 2002 年 TM 影像,林西县 1:40 万土壤类型图、林西县 1:25 万的数字高程模型、2004 年野外调查所获取的土壤理化性质数据以及周边 17 个气象站点 1961~2000 年的 40 a 逐旬气象资料。栅格运算涉及的条件运算,在 Arc/Info8.3 的 Workstation 中 GRID 模块中完成,统一设定栅格大小为 100 m×100 m。

根据 USLE 模型,选择影响水土流失的各项因子为:降雨侵蚀力因子(R),土壤可蚀性因子(K),主要地形因子(LS),植被盖度因子(C),水土保持措施因子(P)。

2.1.1 降雨侵蚀力因子

利用统计学方法,建立以月降雨量为参数的降雨侵蚀力计算公式,选用福尼埃指数法来计算降雨侵蚀力因子值,即:

$$MFI = \frac{\sum_{i=1}^{10} P_i^2}{P} \quad (1)$$

式中: P_i ——月降雨量; P ——年降雨量。

首先计算林西县及周边 16 个旗县 40 a 逐月降雨数据;运用 Kriging 空间插值的方法计算林西县栅格大小为 100 m 逐月(5~10 月)降水量分布栅格图,得到基于栅格的降雨侵蚀力因子值;然后,将逐月降雨侵蚀因子栅格图进行叠加得到年降雨量分布栅格图;利用公式(1)对每个栅格进行运算,得到降雨侵蚀力因子对土壤侵蚀的贡献量,并确定土壤侵蚀强度分级标准(表 2)。

2.1.2 主要地形因子

通用水土流失方程 USLE 中,用 LS 表示地形因子对土壤侵蚀的贡献量,即选用坡度与坡长两个因子来评价,在小流域尺度这两个因子足以反映地形因子对土壤侵蚀所起到的作用,但在区域尺度上,由于 DEM 分辨率相对较小,除考虑坡度与坡长等因子外,还应将地形起伏度、海拔高度等因子考虑进来,全面反映地形因子对土壤侵蚀的贡献量^[9,10]。因此,采用地形这一综合指标反映区域地形对区域

土壤侵蚀的影响。

表 1 林西县主要地形及其指标体系

主地形体	海拔/m	起伏度	坡度/(°)
河谷平原		1	0~ 1.5 1.5~ 6
丘陵	600~ 900	1, 2, 3	6~ 18 > 18
山间谷地		1	0~ 1.5
丘陵		1	1.5~ 6, 6~ 18
低坡度山体台地	900~ 1200	2, 3	0~ 1.5, 1.5~ 6
中坡度低山		2, 3	6~ 18
高坡度低山		1, 2, 3	> 18
低坡度中山	> 1200	1, 2, 3	0~ 1.5, 1.5~ 6, 6~ 18
高坡度中山		1, 2, 3	> 18

运用 Arc/Info8.3 软件作为主要分析工具, 首先利用等高线生成 DEM, 转换为 GRID 格式。分别提取海拔高程与坡度层, 计算移动窗口大小为 100 m × 100 m 海拔高度差值, 得到地势起伏指数。地形体划分标准见表 2, 并确定土壤侵蚀强度分级标准(表 2)。

2.1.3 土壤可蚀性因子

土壤 K 值表示土壤被冲蚀的难易程度, 反映土壤被侵蚀外营力剥蚀和搬运的敏感性。采用 Williams 等人^[11]在 EPIC(Erosion Productivity Impact Calculator) 模型中发展的土壤可蚀性因子 K 值计算公式。

$$K = \{0.2 + 0.3 \exp[-0.25 S_{AN}(1 - SIL/100)]\} \times \left(\frac{S_{IL}}{C_{LA} + S_{IL}}\right)^{0.3} \times \left[1.0 - \frac{0.25C}{C + \exp(3.72 - 2.95C)}\right] \times \left[1.0 - \frac{0.75S_{N1}}{S_{N1} + \exp(-5.51 + 229S_{N1})}\right] \quad (2)$$

式中: S_{AN} ——砂粒含量百分数 (2.0~ 0.1 mm); S_{IL} ——粉粒含量百分数 (0.1~ 0.002 mm); C_{AL} ——黏粒含量百分数 (< 0.002 mm); C ——有机质含量百分数; $S_{N1} = 1 - S_{AN}/100$ 。

该式以 K 值大小来表示土壤抗蚀性能的强弱, K 值越大, 抗蚀性能越弱, 反之则强。但该计算式所采用的土壤颗粒粒径是以 < 0.002, 0.002~ 0.1, 0.1~ 2 mm 3 个颗粒径级为计算标准, 而我国土壤质地分析则多用比重计速法, 没有所需粒径级别。所以按照我国的计量方法分别将砂粒的级别订为 0.1~ 0.05 mm、粉粒粒径为 0.05~ 0.005 mm、黏粒为 < 0.005 mm。按 K 值变化范围通常将土壤划分为难侵蚀性土壤($K < 0.05$)、较难侵蚀土壤(0.06~

0.15)、可侵蚀土壤(0.16~ 0.20)、易侵蚀土壤(0.21~ 0.30)、较易侵蚀土壤(0.30~ 0.35)和极易侵蚀土壤(> 0.35)。

公式中的土壤理化性质由野外实地调查获取, 计算典型土壤类型的抗蚀指数 K 值。叠加土壤类型空间分布图, 确定土壤抗蚀性等级(表 2)。

2.1.4 植被盖度

土壤侵蚀研究中, 植被对土壤侵蚀的综合影响和作用通常以植被覆盖- 作物管理因子(C)来表示。不同植被类型的水土保持效益不同, 但对同一类植被而言, 影响土壤侵蚀大小的因素主要是植被盖度^[12]。在前人研究基础上, 建立植被盖度与 C 因子相关关系。

从 2002 年的 TM 遥感影像上提取植被盖度数据, 并对影像进行分类得到植被类型数据。

$$NDVI = \left\{ \frac{BAND4 - BAND3}{BAND4 + BAND3} + 1 \right\} \times 127 \quad (3)$$

$$V_c = \frac{NDVI - \min(NDVI)}{\max(NDVI) - \min(NDVI)} \times 100\% \quad (4)$$

式中: BAND4 ——光谱的近红外(Near-infrared)波段, 光谱范围为 760~ 900 nm, BAND3 红光(Red)波段, 光谱值 520~ 600 nm。式 3 中: V_c 为植被盖度, $\min(NDVI)$ 为研究区最小 $NDVI$ 值, $\max(NDVI)$ 为研究区最大的 $NDVI$ 值。

对于同一种植被类型而言, 影响土壤侵蚀大小的因素主要是植被盖度, 但不同植被类型即使具有相同的植被盖度, 其水土保持功能不尽相同。利用查阅文献, 确定各种植被类型的植被盖度对应的 C 因子值, 计算出不同植被类型植被盖度对应的 C 因子值。

草地植被 C 因子计算公式如下^[13]:

$$C = e^{-0.0418(V-5)} \quad (5)$$

林地 C 因子计算公式:

$$C = e^{-0.0418(V-1.5)^{1.5}} \quad (6)$$

牧草地、灌丛草地以及农田 C 因子计算公式如下^[14]:

$$C = e^{-0.0344V} \quad (7)$$

式(5), (6), (7)中, V ——为植被盖度。利用遥感影像, 计算流域的植被盖度^[15]。并根据公式(5), (6), (7), 利用从对遥感影像计算及解译得到的植被盖度图与植被类型图, 计算不同植被类型下不同植被盖度的 C 因子值, 并确定土壤侵蚀强度分级标准(表 2)。

2.1.5 水土保持措施

USLE 方程要求 P 值应由田间实验与标准小

区水土流失的比率求算, 但对于 GIS 支持下的区域尺度的 P 值通常由土地利用方式来确定。由于研究区农业耕作保护措施较少, 土地利用方式可以代

表区域水土保持措施的应用, 因此本研究采用土地利用分类图来评价水土保持措施 P 因子^[1, 16], 并确定土壤侵蚀强度分级标准见表 2。

表 2 根据各因子划分土壤潜在侵蚀强度分级标准

强度级	侵蚀强度	R 因子	LS 因子	K 因子	C 因子	P 因子
1	微度	73~ 74	河谷平原		0.0~ 0.2	河流、有林地
2	轻度	75~ 76	山间谷地		0.2~ 0.4	水浇地、灌木林
3	中度	77	丘陵、低坡度台地	草甸黑钙土、盐化草甸土	0.4~ 0.6	人工草地、果园
4	强度	78~ 79	中坡度低山	暗栗钙土、草甸栗钙土、风沙土	0.6~ 0.8	天然草地、旱地
5	极强度	80~ 81	高坡度低山、低坡度中山	典型黑钙土、典型灰色森林土、草甸沼泽土、钙积棕壤、暗色草甸土、生草棕壤	0.8~ 1.0	工矿、城镇用地、道路
6	剧烈	82~ 83	高坡度中山	淋溶黑钙土、生草灰色森林土	> 1.0	裸地

2.2 结果与分析

林西降雨侵蚀因子引起的土壤侵蚀等级空间分布特征见表 3。林西县降雨侵蚀因子最大值达到 83.4 mm, 最小值为 73.6 mm, 平均值为 79.9 mm。80~ 81 mm 的极强度侵蚀分布最广, 占面积比例 37.7%, 其次为 78~ 79 mm 的强度侵蚀级别, 微度与轻度侵蚀仅占 10%。

根据地形因子引起土壤侵蚀的贡献作用分析, 由于林西县地形复杂多样, 有 82.33% 的地区存在发生中等强度以上水土流失的危险, 其中约有 40% 以上地区会发生强度水土流失。西北部及西南部山地由于地势起伏大, 水土流失明显大于河谷平原区。其中流失最严重的地段是中山地区。

林西县土壤的 K 值都较高, 抗蚀性能较弱, 土壤抗蚀性共分为 4 级, 可侵蚀土壤(0.18~ 0.20)、易侵蚀土壤(0.20~ 0.22)、较易侵蚀土壤(0.22~ 0.24)和极易侵蚀土壤(> 0.24)。可见, 全县土壤的

抗蚀性都很低, 有近 70% 的土壤存在遭受强度侵蚀的危险, 更有 30% 左右的土壤会受到极强度或剧烈侵蚀的危险。所以仅考虑土壤因素, 林西县大部分地区都会存在强度的水土流失。

林西县植被盖度总体水平较低, 控制土壤水土流失能力较差。从植被覆盖作物管理 C 因子的空间分布特征来看, 林西县 85.8% 的土地面积植被覆盖- 作物管理 C 因子值大于 0.8, 土地面临极强度土壤侵蚀的危险。

林西县天然草地面积较大, 约占全县土地面积的 50%, 但由于管理水平较低, 绝大部分草地都已经发生严重的退化现象, 植被盖度很低, 土壤抵抗侵蚀的能力与旱作农田基本一致。所以在只考虑土地利用方式对水土流失带来的风险时, 林西县有近 60% 左右的土地面积会发生强烈的水土流失。同时, 土地利用引起的强度水土流失很分散, 几乎遍布全县。

表 3 各因子引起林西县潜在土壤侵蚀风险的面积比率

强度级	侵蚀强度	R 因子	LS 因子	K 因子	C 因子	P 因子
1	微度	0.02	0.15	0	0.14	0.15
2	轻度	0.08	0.03	0	0	0.21
3	中度	0.09	0.39	0.02	0	0.02
4	强度	0.27	0.24	0.68	0	0.59
5	极强度	0.38	0.15	0.10	0.37	0.01
6	剧烈	0.16	0.04	0.20	0.49	0.02

3 水土流失多因子层次覆盖模型评价

3.1 研究方法

各因子并非独立作用于土壤侵蚀, 而是通过或加强减弱的相互影响, 综合作用产生土壤侵蚀。根据林西县的地域特征, 并结合单因子作用结果, 选用

因子权重大小依次为主要地形体、土壤、土地利用、植被、降雨, 图 1 给出多因子层次覆盖分析模型^[17]。根据各因子的权重大小依次确定两两因子各侵蚀等级复合后引起的土侵蚀等级, 由此逐一将各因子图进行两两叠加, 最终得林西县土壤潜在侵蚀强度分布图。

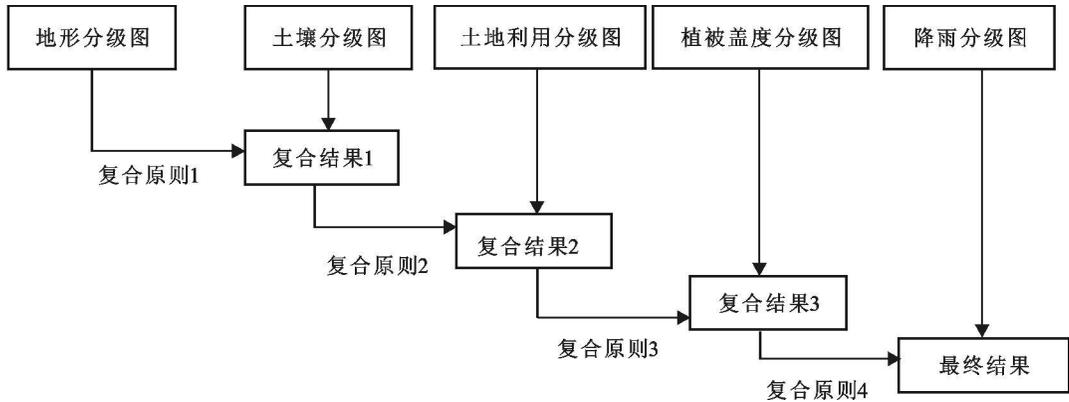


图 1 多因子层次覆盖分析模型

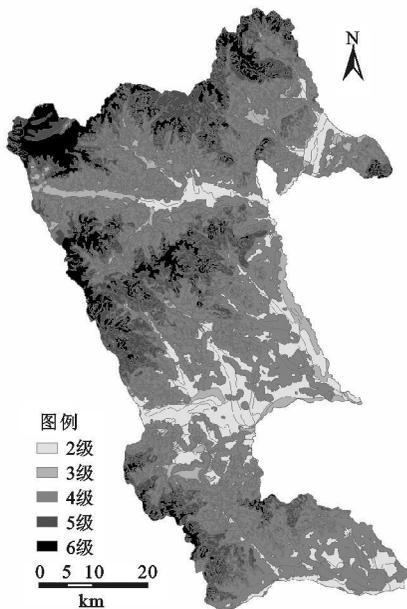


图 2 土壤-地形两因子引起的土壤侵蚀分级

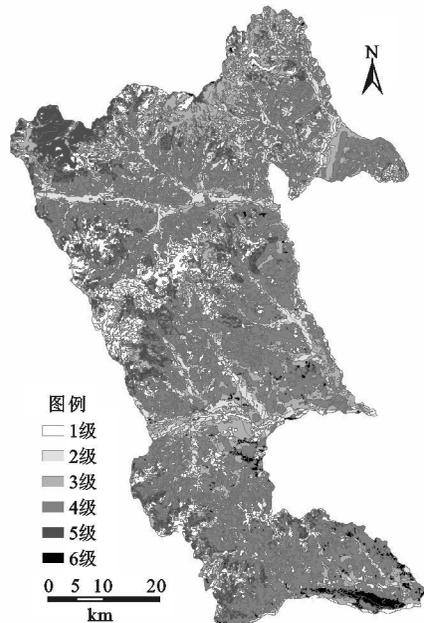


图 3 土壤-地形-土地利用三因子作用的土壤侵蚀分级

3.2 结果与分析

根据地形与土壤因子的复合原则,将两因子影响下生成的土壤侵蚀分级图进行叠加,由于地形和土壤因子影响,强度等级在 4 级及以上的流失面积占 70%,只有 13%的地区不易发生水土流失。根据地形、土壤复合因子与土地利用因子的复合原则,将 3 个因子影响下生成的土壤侵蚀分级图进行叠加,结果表明微度和轻度流失面积分别占 15.2%与 11.6%,中度流失 17.3%,强度水土流失面积占 55.9%,下降 26%。微度水土流失主要是中高山地区的有林地及河谷平原的水田及有林地。显而易见,人为采取的水土保持措施会强烈地改变水土流失状况。强度的水土流失发生在中高山地区的农业利用土地与植被破坏严重地区。根据地形、土壤、土地利用复合因子与植被覆盖因子的复合原则,将 4 个因子影响下生成的土壤侵蚀分级图进行叠加,考虑人为水土保持措施,林西县水土流失强度应有所

减弱,但由于管理水平较低,在低山及中高山地区,发生轻度及强度水土流失的几率减小,极强度及剧烈水土流失的几率明显增加。

地形、土壤、土地利用和植被以及降水因子根据复合原则生成的土壤潜在侵蚀强度的分布图。表明林西县土壤潜在侵蚀共分为 6 级,由于区域降水强度较小且空间分布差异不明显,水土流失强度受到降水因子的影响较小。各因子的综合作用结果是:强度及强度以上的水土流失面积有所增加,所占比例较大,达到 77.4%。其中强度水土流失占 22.8%,主要发生在北部中山区及中部河谷平川区,极强度水土流失占 43.8%,主要发生在中部及南部低山丘陵区,剧烈水土流失面积占 10.8%,集中分布在北部中山高坡区。轻度水土流失面积占总土地面积的比例增加最多,微度水土流失面积所占比例减少最多。二者共占总土地面积比例 14.8%,分布在林西县西北部的中高山坡度较低地区。

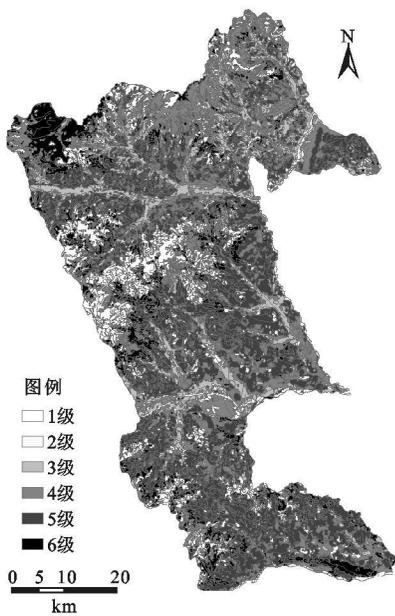


图 4 土壤-地形-土地利用-植被覆盖四因子作用的土壤侵蚀分级

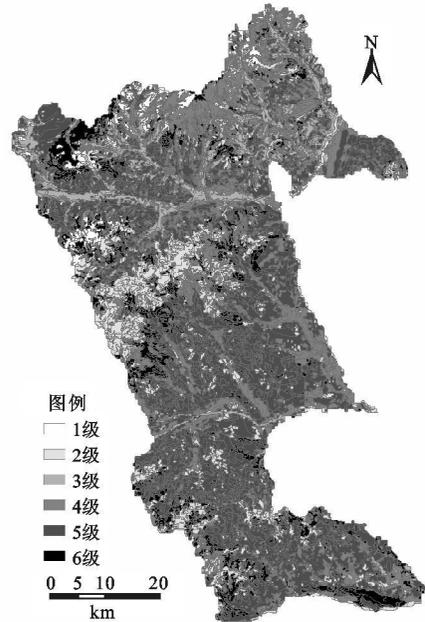


图 5 林西县土壤潜在侵蚀分级

4 讨论

利用 USLE 模型可以精确计算土壤潜在侵蚀量,但各因子都需要较详细的过程数据,而限于县域尺度数据获取的难度及有效性,简单应用 USLE 模型计算大尺度水平下的土壤侵蚀模数存在一定困难。本文首先分别应用福尼埃指数、地形体指数、EPIC 模型、NDVI 指数、土地利用分类图等多种方法,准确方便地评价了降水、地形、土壤、植被、管理等 5 个因子分别影响下林西县潜在土壤侵蚀状况。并根据评价结果所得到的各因子影响下侵蚀等级的面积差别,确定了各因子对区域土壤侵蚀程度影响的贡献大小。其中地貌与土壤是影响林西县进行生产活动的最基本的自然条件,也是决定研究区土壤侵蚀程度最主要的 2 个因素。其次分别是土地利用方式、植被盖度及降雨强度。根据多因子层次覆盖评价模型,基于各因子对土壤潜在侵蚀的贡献量,确定两两因子复合原则,得到不同层次下多因子复合影响下林西县土壤潜在侵蚀状况,由此判定 5 个因子中现有土地利用方式较合理,可以减轻由于地形破碎及土壤因素带来的土壤侵蚀作用。但由于植被覆盖度较低,加强了土壤侵蚀作用。降雨因子对土壤侵蚀贡献不明显。

虽然基于水土流失评价模型 USLE 客观的选择了评价参数,并从多因子层次覆盖评价角度,对复合因子及多因子综合作用下研究区潜在水土流失状况进行评价,从理论和实际操作上具有一定准确性且方便,但在确定各因子对土壤潜在侵蚀量的贡献大小及两两因子在层次覆盖模型中的复合原则中具

有一定缺陷,需要在应用中加以注意。

参考文献:

- [1] Lee S. Soil erosion assessment and its verification using the universal soil loss equation and geographic information system: a case study at Boun, Korea [J]. *Environmental Geology*, 2004, 45: 457-465.
- [2] Burrough P A. Dynamic modeling and geo-computation in environmental modeling [A]. In: GIS Reader [C]. Karssenber D, Burrough P A eds. Faculty of Geographical Sciences, Utrecht University, The Netherlands, 1998.
- [3] William F W. Agro-ecological sustainability and land degradation potential in Nang Rong, Thailand (D). DD of University of North Carolina at Chapel Hill, 2001.
- [4] 胡良军,李锐,杨勤科,等. 基于 GIS 的区域水土流失评价模型 [J]. *应用基础与工程科学学报*, 2000, 8(1): 1-8.
- [5] Fistikoglu O, Harmancioglu N B. Integration of GIS with USLE in assessment of soil erosion [J]. *Water Resources Management*, 2002, 16: 447-467.
- [6] Bryan B A. Physical environmental modeling, visualization and query for supporting landscape planning decisions [J]. *Landscape Urban Plan*, 2003, 65(4): 237-259.
- [7] 李博. 内蒙古地带性植被的基本类型及其生态地理规律 [J]. *内蒙古大学学报*, 1962, (2): 16-24.
- [8] Tang H P, Zhang X S. Establishment of ptimized Eco-Productive Paradigm in the Farming-Pastoral Zone of Northern China [J]. *Acta. Bot. Sin.*, 2003, 45(10): 1166-1173.

(下转第 167 页)

参考文献:

- [1] Strader B J. Nitrogen mineralization in high elevation forests of the *Appalachians*. I. Regional patterns in southern spruce fir forests[J]. *Biogeochemistry*, 1989, 7: 131- 145.
- [2] 李贵才, 韩兴国, 黄建辉等. 森林生态系统土壤氮矿化影响因素研究进展[J]. *生态学报*, 2001, 21(7): 1187 - 1195.
- [3] Heikkinen K. Transport of organic and inorganic matter in river, brook and peat mining water in drainage basin of the River Kuuminkijoki[J]. *Aqua. Terrica.*, 1990, 20: 143- 155.
- [4] 仇荣亮, 于锡军. 陆地生态系统酸沉降缓冲机制与缓冲能力[J]. *中山大学学报(自然科学版)*, 1998, 37(增刊): 157- 161.
- [5] 肖辉林, 卓慕宁, 万洪富. 大气 N 沉降的不断增加对森林生态系统的影响[J]. *应用生态学报*, 1996, 7(增刊): 110- 116.
- [6] Vitousek P M, Aber J D, Howarth R W, et al. Human alteration of the global nitrogen cycle: Sources and consequences[J]. *Ecological Applications*, 1997, 7: 737 - 750.
- [7] 朱兆良, 文孝启. 中国土壤氮素[M]. 南京: 江苏科学技术出版社, 1992.
- [8] 袁可能. 植物营养元素的土壤化学[M]. 北京: 科学出版社, 1983.
- [9] Hewitt E J, Cutting C V. Nitrogen assimilation of plants[M]. London: Academic Press, 1979.
- [10] Martin J F, Reddy K R. Interaction and spatial distribution of wetland nitrogen processes[J]. *Ecological Modelling*, 1997, 105: 1- 21.
- [11] Hill D T, Payne V W E, Rogers J W. Ammonia effects on the biomass production of five constructed wetland plant species[J]. *Bioresource Technology*, 1997, 62(3): 109- 113.
- [12] Reddy K R, Patrick W H Jr, Lindau C W. Nitrification-denitrification at the plant root-sediment interface in wetlands[J]. *Limnol. Oceanogr.*, 1989, 34: 1004 - 1013.
- [13] Gunnarsson U, Rydin H. Nitrogen fertilizer reduces *Sphagnum* production in bog communities[J]. *New phytologist*, 2000, 147: 527- 537.
- [14] 白军红, 崔保山, 杨志峰, 等. 向海沼泽湿地土壤碱解氮含量的季节动态[J]. *中国生态农业学报*, 2006, 14(2): 115- 117.
- [15] Chen R H, Twilley R R. Patterns of mangrove forest structure and soil nutrient dynamics along the Shark river estuary[J]. *Florida. Estuaries*, 1999, 22(4): 955 - 970.
- [16] 邓聚龙. 灰色系统基本方法[M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 1988.
- [17] 白军红, 邓伟, 朱颜明. 湿地土壤生物地球化学过程研究进展[J]. *生态学杂志*, 2002, 21(1): 53- 57.
- [18] Hoewyk D V, Groffman P M, Erik K, et al. Soil nitrogen dynamics in organic and mineral soil calcareous wetlands in eastern New York[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2000, 64: 2168- 2173.
- [19] 米国华. 硝酸盐调控植物根系生长的生理及分子机制[EB/OL]. <http://www.com.edu.cn/pn/migh.html>, 2002.
- [9] Beven K, Kirkby M J. A physically based, variable contributing area model of basin hydrology[J]. *Hydro. Sci. Bull.*, 1979, 24: 43- 69.
- [10] 邓慧平, 李秀彬. 地形指数的物理意义分析[J]. *地理科学进展*, 2002, 21(2): 104- 110.
- [11] Williams J R, Renard K G, Dyke P T. EPIC: a new method for assessing erosion's effect on soil productivity[J]. *Journal of Soil Water Conservation*, 1983, 38: 381- 384.
- [12] Sempel A C, Steenbuis T S, Rose C W, et al. A simplified hillslope erosion model with vegetation elements for practical applications[J]. *Journal of Hydrology*, 2002, 258: 111- 121.
- [13] 江忠善, 李秀英. 黄土高原土壤流失预报方程中降雨侵蚀力和地形因子的研究[J]. *中国科学院西北水土保持研究所集刊*, 1988, (7): 40- 45.
- [14] 金争平, 史培军, 候福昌, 等. 黄河皇甫川流域土壤侵蚀系统模型和治理模式[M]. 北京: 海洋出版社, 1992.
- [15] 孙红雨, 王长耀, 牛铮, 等. 中国地表植被覆盖变化及其与气候因子关系- 基于 NOAA 时间序列数据分析[J]. *遥感学报*, 1998, 2(3): 204- 210.
- [16] Wu S, Li J, Huang G. An evaluation of grid size uncertainty in empirical soil loss modeling with digital elevation models[J]. *Environmental Modeling and Assessment*, 2005, 10: 33- 42.
- [17] 张登荣, 赵元洪, 徐鹏炜. 水土流失遥感方法与土地资源评价[M]. 北京: 原子能出版社, 1996.

(上接第 159 页)