

四川省土壤侵蚀敏感性评价及其空间分布特征

李鑫博¹ 吴小辉² 李绪佳³ 宋鹏⁴

(1. 汉源县林业局, 四川 汉源 625300; 2. 石棉县林业局, 四川 石棉 625400;

3. 林业生态监测中心, 四川 成都 610081; 4. 四川省林业科学研究院, 四川 成都 610081)

摘要:本文以四川全省为研究区域,以通用水土流失方程为基础,运用GIS技术,分析了降雨、土壤可蚀性、地形、植被覆盖因素对区域土壤侵蚀敏感性的影响程度,并生成研究区不同地貌单元单因素敏感性评价图。在此基础上,应用ArcGIS的空间叠加分析功能,完成单要素的叠加运算,实现研究区土壤侵蚀敏感性综合评价,探讨了研究区土壤侵蚀敏感性高低空间分布规律。结果表明:研究区土壤侵蚀敏感性以高度敏感、中度敏感和极敏感为主,轻度敏感和不敏感比例相对较小,土壤侵蚀敏感性空间分布规律较为明显,以研究区中部龙门山脉北端至西南部雅砻江中游一线分开,西部大部分地区属中度以下敏感性区域,而东部大部分地区属高度、极敏感性区域。研究区土壤侵蚀敏感性程度与土壤侵蚀现状总体分布是基本一致的,降雨、土壤类型、地形起伏以及植被覆盖等自然因素是土壤侵蚀发生、发展的潜在条件,其中植被覆盖受人类活动的影响最为明显,因而,在其它自然影响因素极难改变的情况下,充分有效保护区域内现有原始森林植被和植被生态系统恢复与重建对控制土壤侵蚀具有特别重要的意义。

关键词:土壤侵蚀;敏感性;空间分布;四川省

中图分类号:S714

文献标识码:A

文章编号:1003-5508(2014)05-0029-08

Assessment and Spatial Distribution of Soil Erosion in Sichuan Province

LI Xin-bo¹ WU Xiao-hui² LI Xu-jia³ SONG Peng⁴

(1. Sichuan Hanyuan County Forestry Bureau, Hanyuan 625300, China;

2. Sichuan Shimian County Forestry Bureau, Shimi 625300, China;

3. Sichuan Forestry Ecological Monitoring Center, Chengdu 610081, China;

4. Sichuan Academy of Forestry, Chengdu 610081, China)

Abstract: Sichuan Province is located in the upper reaches of the Yangtze River. The quality of its ecological environment not only has a direct bearing on the regional ecological security, but also it occupies a pivotal position in the ecological environment and the sustainable development of social economy of the upper reaches of the Yangtze River. And yet soil erosion of this region has become the most serious ecological problem. In this paper by using the technique of GIS, analysis was made of the impact of rainfall factor, soil factor, topography factor and vegetation coverage on soil erosion sensitivity based on universal soil erosion equation. On this basis of overlapping operations of the single factor, thus an evaluation was gotten on soil erosion sensitivity of the study area by applying the spatial overlapping analysis functions of ArcGIS; Discussion was made on the soil erosion sensitivity space dividing rule of different terrain features effected by different leading factors. The results showed that the soil erosion sensitivity of the study area was mainly based on the high, middle and extreme sensitivity, the mild sensitivity and insensitivity constituted a relatively minor proportion, the spatial distribution regularity of soil erosion sensibility was obvi-

收稿日期:2014-05-20

基金项目:四川省林业厅科技攻关项目(2009-04、2010-44)。

作者简介:李鑫博(1981-),男,助理工程师,主要从事森林资源、石漠化荒漠化和水土保持监测工作。E-mail:151369905@QQ.com

ous; The area was separated by the Longmen Mountains in the center of Sichuan province and the middle reaches of the Yalong River in southwest of Sichuan province, the sensitivity of most parts of the western area was moderate and low, the most parts of the eastern area were high and extreme sensitive areas. It indicated that the degree of soil erosion sensitivity coincided with the existing overall distribution; Rainfall, soil texture, topographic, vegetation coverage and other natural factors were potential conditions of occurrence and development of soil erosion, vegetation coverage in the study area was affected by human activity more significantly than other factors. Therefore, when it was extremely difficult to change its natural factors, protection of the existing primeval forest vegetation in study area and adequate restoration of ecosystem had important implications for soil erosion control.

Key words: Soil erosion, Sensitivity, Spatial difference, Sichuan Province

四川省位于我国西南,全国大陆总地势第一级青藏高原与第二级长江中下游平原的过渡带上,是长江上游生态屏障建设的重点省份之一,具有极其重要的生态地理位置^[1,2]。长期以来,区域受自然因素和人为活动的影响,水土流失现象越来越严重,已成为长江中上游地区泥沙的主要来源地^[3]。因而,区域内水土流失治理研究一直备受众多学者的高度重视,这些研究无疑提高了人们对区域水土流失问题的认识和理解,但相关研究大多集中于区域内局部流域水土流失治理模式与土壤侵蚀量预测模型的研究^[4-7],而对区域尺度土壤侵蚀敏感性的评价研究却鲜有报道。土壤侵蚀敏感性评价属区域性土壤侵蚀风险评价,其目的是为了识别容易形成土壤侵蚀的区域,评价土壤侵蚀受自然因素潜在的影响程度^[8-9]。本文从分析区域土壤侵蚀敏感性(仅涉及水力侵蚀,对含有水力侵蚀的复合侵蚀也只考虑水力侵蚀)的自然因素角度出发,对土壤侵蚀潜在影响因素敏感性进行评价,探讨自然因素对区域土壤侵蚀敏感性的影响及不同敏感程度的空间分布规律。目的在于进一步深入研究区域内水土流失基本驱动机制,提供该区域科学的、量化的土壤侵蚀敏感性评价信息,识别易发生水土流失的重点区域,为四川省水土保持规划治理、天然林保护(Ⅱ期)、退耕还林还草等生态环境建设工程提供科学依据。

1 研究区域概况

四川省(92°21′~108°12′E, 26°03′~34°19′N)地处青藏高原东南缘,东接重庆,南连贵州和云南,西邻西藏,北衔青海、甘肃和陕西,幅员面积约48.5×10⁴ km²,占全国面积的5.1%,居全国第五位。全省地貌东西差异极大,地形复杂多样,西高东低的特点非常明显,自西向东大致可分为川西高山高原、川

西南山地、四川盆地周缘和著名的四川盆地四大不同地貌单元。由于受海拔差异和局部地形的影响,区域内各地貌单元自然概况差异明显。

2 研究方法

根据通用水土流失方程的基本原理,并参考国家环保总局发布的《生态功能区划技术暂行规程》(2002, 7)及参考文献^[14-22],选择降雨侵蚀力(R)、土壤可蚀性(K)、坡长坡度因子(LS)以及植被覆盖因子(C)对研究区的土壤侵蚀敏感性进行评价研究。土壤侵蚀敏感性是自然因素所决定生态系统的土壤侵蚀敏感程度。由于农业措施(P)主要与人类活动密切相关的因子,与生态系统自然的敏感性无太大关系,故不作为评价指标。

2.1 降雨侵蚀敏感性评价方法

降雨是引起水土流失的动力和前提条件,降水量多少与侵蚀能力大小的时空格局与水土流失有着直接的关系。该指标是反映区域土壤侵蚀性降雨宏观特征的一个指标,是评价区域降雨引起土壤侵蚀潜在能力的重要参数。周伏建等人通过研究提出了适合我国南方地区降雨侵蚀力(R)的简易计算公式^[23],因此,研究中借鉴其研究成果,采用1~12月多年月均降雨量计算研究区内各国家级气象站点的降雨侵蚀力月值, R 值的计算公式为:

$$R = \sum_{i=1}^{12} (0.3046P_i + 1.6398)$$

式中 R 为年降雨侵蚀力($J \cdot cm / (hm^2 \cdot h)$),为1月~12月份多年月平均降雨量(mm)。

根据气象站点的空间分布,运用 Arcgis 空间内插功能,采用 Kriging 方法对研究区降雨侵蚀力(R)进行空间化处理,经修正后得到 R 值的空间分布图,并依据表1中的分级标准绘制土壤侵蚀对降水

侵蚀的敏感性分级图(图 1)。

表 R 因子对土壤侵蚀敏感性影响分级赋值标准

分级	不敏感	轻度敏感	中度敏感	高度敏感	极敏感
降雨侵蚀力(R)	<250	250~300	300~350	350~400	>400
分级赋值(S)	1	3	5	7	9

2.2 土壤可蚀性敏感性评价方法

通用水土流失方程中,土壤可蚀性因子(K)值

表 2 K 因子对土壤侵蚀敏感性影响分级赋值标准

分级	不敏感	轻度敏感	中度敏感	高度敏感	极敏感
土壤可蚀性(K)	岩石裸岩	≤ 0.3	$0.3 < K \leq 0.32$	$0.32 < K \leq 0.33$	$K > 0.33$
分级赋值(S)	1	3	5	7	9

是一个由试验确定的定量数值。对于大区域尺度而言,大范围直接测定 K 值可行性较差。因此,研究中借鉴邓良基等人对四川省不同土壤类型表土可蚀性(K)值的研究成果^[24] 根据不同土壤类型可蚀性(K)值实际情况,以四川省土壤类型分布图为底图,按表 2 中的分级标准绘制土壤侵蚀对土壤可蚀性(K)的敏感性分布图(图 2)。

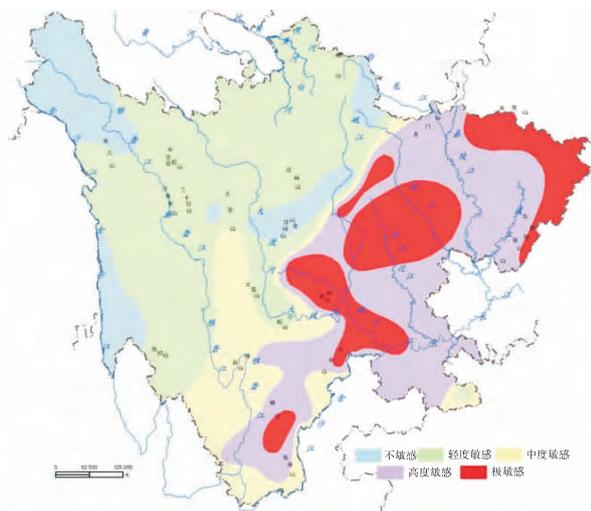


图 1 降雨因素土壤侵蚀敏感性评价图

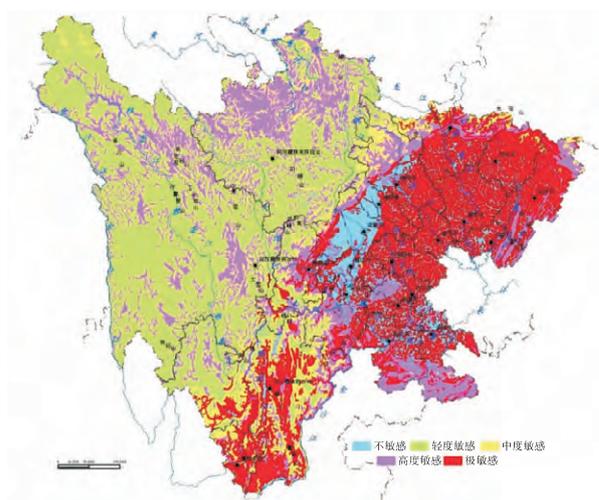


图 2 土壤类型土壤侵蚀敏感性评价图

2.3 地形因子敏感性评价方法

对于大尺度分析研究,坡度坡长因子(LS)很难计算。这里采用地形起伏度大小与土壤侵蚀敏感性的关系估计,在评价研究中应用地形起伏度作为区域土壤侵蚀敏感性评价的地形指标。以研究区

1:25 万DEM 数据为基本信息源,在 Arcgis 空间分析模块的支持下,分别提取邻域为 9×9 的窗口计算邻域范围内的地形起伏度。然后,按表 3 的分级标准绘制土壤侵蚀的地形因子(LS)的敏感性分布图(图 3)。

表 3 地形因子对土壤侵蚀敏感性影响分级赋值标准

分级	不敏感	轻度敏感	中度敏感	高度敏感	极敏感
地形起伏度	0~100	100~200	201~300	301~400	>400
分级赋值(S)	1	3	5	7	9

2.4 植被覆盖敏感性评价方法

植被覆盖能对降雨势能起到有效的削减作用,同时具有保水和抗侵蚀作用,有良好植被覆盖的土壤侵蚀极大减少。研究汇总 2008 年四川省森林资

源县级调查规划(二类调查)矢量图层,包括土地利用类型、树种郁闭度、灌木和草本覆盖情况等详细地表植被覆盖信息,按照表 4 分级评价标准绘制植被覆盖对土壤侵蚀敏感性评价分级图(图 4)。

表 4 植被覆盖因子对土壤侵蚀敏感性影响分级赋值标准

分级	不敏感	轻度敏感	中度敏感	高度敏感	极敏感
植被类型(V)	城镇及交通、水域、水田、沼泽	针叶林、阔叶林、混交林、草甸	稀疏草丛、灌丛、经济林植被	流石滩植被	农耕地、无植被
分级赋值(S)	1	3	5	7	9

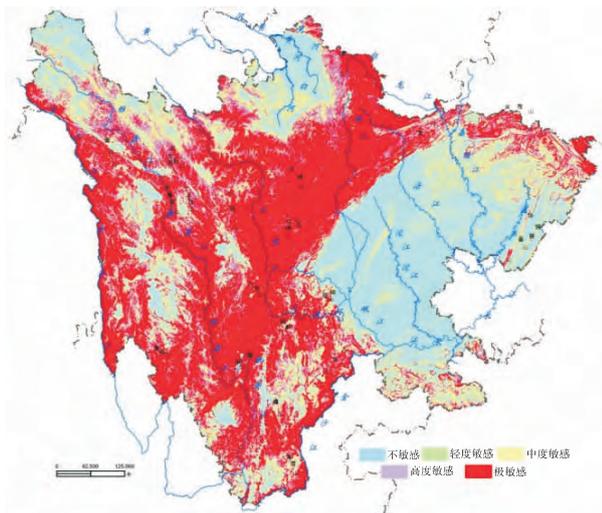


图3 地形起伏度土壤侵蚀敏感性评价图

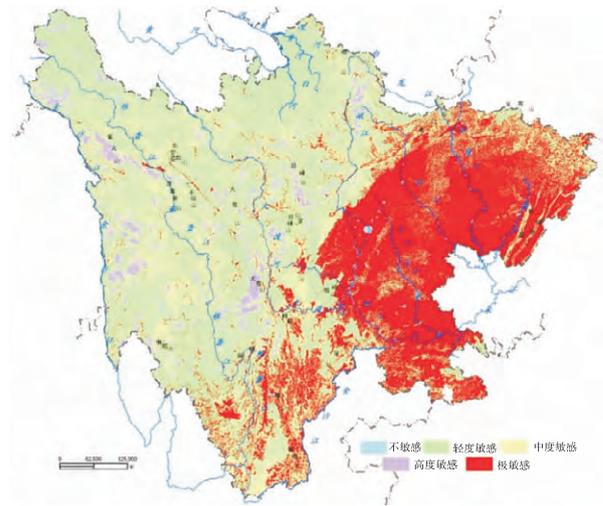


图4 植被覆盖土壤侵蚀敏感性评价图

2.5 土壤侵蚀敏感性综合评价方法

单因素影响因子确定的水土流失敏感性只是反映某一个因子的作用程度,无法综合反映研究区土壤侵蚀敏感性的空间分布特征综合反映出来。在 ArcGis9.3 中,将上述单因素敏感性分布图叠加,并对单因素评价价值进行叠加运算,其公式如下:

$$SS_j = \sqrt[4]{\prod_{i=1}^4 S_i}$$

式中, SS_j 为 j 空间单元土壤侵蚀敏感性指数, S_i 为 i 因素敏感性等级值。

然后采用自然分界法 (Natural break, 将综合评价结果分成 5 类, 这种分类方法是利用统计学的 Jenk 最优化法得出的分界点, 能够使各级的内部方差之和最小) [15-25], 绘制出研究区土壤侵蚀敏感性综合评价图 (图 5)。

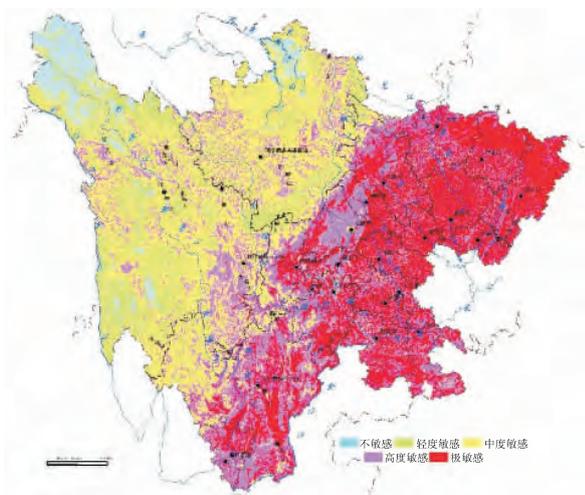


图5 土壤侵蚀敏感性综合评价图

3 结果分析

3.1 降雨敏感性评价

降雨敏感性以轻度敏感、高度敏感和极敏感为主,分别占研究区面积的 37.2%、24.0%、和 14.8% (表 5)。从空间分布来看 (图 1), 以研究区中部龙门山北端至西南部雅砻江一线分开, 西部绝大部分地区属中度以下敏感性区域, 东部大部分地区属于高度敏感、极敏感性区域。极敏感区域主要分布在四川盆地中部的沱江、涪江流域和四川盆地边缘的米仓山、大巴山以及四川著名的“华西雨屏”地区; 高度敏感区域主要分布在四川盆地、四川盆地边缘和川西南山地的中部; 而中度以下敏感性区域则主要分布在川西高山高原地区和川西南山地部分地区。这与研究区受境内特殊地形地貌的影响而形成独特的气候特征有极大的关系, 四川盆地、四川盆地边缘属湿润温暖的东南季风气候、川西南山地部分地区属冬干夏湿的西南季风气候, 降水充沛, 夏季大范围的大雨、暴雨及短历时高强度暴雨为土壤侵蚀提供强大的外力, 而川西高山高原和川西南山地部分地区则属高山高原寒冻气候, 年均降雨量相对较少。

3.2 土壤类型

土壤类型敏感性以轻度敏感 (42.1%)、高度敏感 (21.3%) 和极敏感 (23.2%) 为主, 三者面积之和达到的 86.6% (表 6), 不敏感区域和中度敏感性区域面积大致相当, 分别占研究面积的 6.9% 和 6.5%。从空间分布来看 (图 2), 极敏感区域集中分

表 5 降雨因素水土流失敏感性评价

地貌区域	不敏感		轻度敏感		中度敏感		高度敏感		极敏感	
	面积 (km ²)	比例 (%)								
川西高山高原	53 727.3	22.0	168 565.1	69.2	21 254.4	8.7	213.6	0.1	/	/
川西南山地	/	/	6 361.9	9.4	31 895.6	47.0	26 352.7	38.8	3 293.0	4.8
四川盆地周缘	2 651.4	4.3	5 678.4	9.2	7 062.7	11.5	22 245.3	36.1	24 042.0	39.0
四川盆地	/	/	/	/	0.3	0.1	67 404.5	60.3	44 251.8	39.6
四川省合计	56 378.8	11.6	180 605.4	37.2	60 213.0	12.4	116 216.0	24.0	71 586.8	14.8

表 6 土壤类型水土流失敏感性评价

地貌区域	不敏感		轻度敏感		中度敏感		高度敏感		极敏感	
	面积 (km ²)	比例 (%)								
川西高山高原	235.2	0.1	174296.7	71.6	6331.3	2.6	62061.9	25.5	388.6	0.2
川西南山地	455.6	0.8	14129.5	25.2	12662.1	22.5	6373	11.3	22541.1	40.1
四川盆地周缘	0.4	/	15807.2	19.1	12476.6	15.1	27091.7	32.8	27223.4	33
四川盆地	32649.9	31.7	/	/	9.8	/	7863.9	7.6	62402.3	60.6
四川省合计	33341.1	6.9	204233.4	42.1	31479.8	6.5	103390.5	21.3	112555.4	23.2

布在川西南山地的安宁河谷和金沙江沿岸广大地区、四川盆地以及四川盆地周缘东北部的大巴山、米苍山;高度敏感区域主要分布在川西高山高原西北部雅砻江上游和北部黑河、白河流域以及四川盆地周缘南部金沙江下游地区;中度敏感性区域仅分布在四川盆地周缘、川西南山地的局部地区;轻度敏感性区域主要分布在川西高山高原和川西南山地内,不敏感区域则集中分布在四川盆地西部的成都平原。这与不同地貌单元土壤类型分布面积和土壤理化性质有密切关系,如四川盆地丘陵地区分布着大量的紫色土,其黏粒和粉粒含量高,砂粒含量高的所占比例很小,加上所有紫色土有机质含量较低,故可蚀性很高,发生土壤侵蚀的可能几率较大。

3.3 地形

除极敏感性区域外,地形起伏不同敏感性程度

表 7 地形起伏度水土流失敏感性评价

地貌区域	不敏感		轻度敏感		中度敏感		高度敏感		极敏感	
	面积 (km ²)	比例 (%)								
川西高山高原	16849.0	6.9	27302.3	11.2	44689.0	18.3	51251.4	21.0	103535.8	42.5
川西南山地	2858.1	4.2	8595.5	12.6	15429.5	22.7	15002.3	22.0	26189.1	38.5
四川盆地周缘	1281.2	2.1	6875.8	11.2	12724.8	20.6	14724.9	23.9	26053.5	42.3
四川盆地	68873.6	61.7	27142.4	24.3	12151.2	10.9	2896.5	2.6	574.1	0.5
四川省合计	89861.9	18.5	69915.9	14.4	84994.5	17.5	83875.1	17.3	156352.6	32.2

3.4 植被覆盖

植被覆盖轻度敏感性区域占研究区面积的 54.8%,其余依次为极敏感性区域(25.6%)、中度敏感性区域(14.7%)、高度敏感性区域(3.7%),不敏感区域面积积极少,仅占 1.2%(表 8)。从空间分布来看(图 4),极敏感区域主要分布在四川盆地、四

川盆地周缘北部米仓山、大巴山以及东南部金沙江下游地区和川西南山地的安宁河谷地区,这主要是由于这些区域内人口稠密,人为干扰严重,植被覆盖度低,同时农耕植被分布广泛,因而极敏感区域多分布于此;高度敏感地区主要分布在川西高山高原金沙江中游、雅砻江上游、岷江上游、大渡河中游的植被

川盆地周缘北部米仓山、大巴山以及东南部金沙江下游地区和川西南山地的安宁河谷地区,这主要是由于这些区域内人口稠密,人为干扰严重,植被覆盖度低,同时农耕植被分布广泛,因而极敏感区域多分布于此;高度敏感地区主要分布在川西高山高原金沙江中游、雅砻江上游、岷江上游、大渡河中游的植被

表 8 植被覆盖土壤侵蚀敏感性评价

地貌区域	不敏感		轻度敏感		中度敏感		高度敏感		极敏感	
	面积 (km ²)	比例 (%)								
川西高山高原	926.8	0.4	175548.0	72.0	46262.7	19.0	16787.8	6.9	4360.4	1.8
川西南山地	613.7	0.9	33527.4	49.6	14157.9	20.9	1011.4	1.5	18326.1	27.1
四川盆地周缘	449.7	0.7	35942.1	58.3	9599.4	15.6	327.3	0.5	15312.6	24.8
四川盆地	3723.0	3.3	20738.6	18.5	1113.8	1.1	/	/	86271.3	77.1
四川合计	5713.2	1.2	265756.0	54.8	71133.9	14.7	18126.5	3.7	124270.4	25.6

覆盖稀疏的少量局部地区;而中度以下敏感区域则主要分布在川西高山高原和川西南山地的广大区域,这与川西高山高原和川西南山地是四川重要的原始天然林区,人为干扰较少,森林植被保存良好有关。

3.5 综合评价

土壤侵蚀综合敏感性以中度以上敏感性区域为主,占研究区幅员面积的 82.0%;轻度以下敏感性区域仅占 18.0%(表 9)。从空间分布来看(图 5),土壤侵蚀综合敏感性以研究区中部龙门山北端至雅砻江中游一线分开,西部大部分地区属中度以下敏感性区域,东部大部分地区属高度、极敏感性区域。极敏感地区主要分布在四川盆地内沱江、涪江、嘉陵江、渠江流域、四川盆地周缘北部的米仓山、大巴山、龙门山中部、岷山中部、南部金沙江下游地区以及川西南山地的安宁河谷地区。高度敏感性区域主要分布在四川盆地西部的成都平原、四川盆地周缘岷江中下游、川西高山高原大渡河中游、川西南山地的广大地区;中度敏感区域主要分布在川西高山高原、川

西南山地区域内(除极敏感、高度敏感区域);而在川西高山高原西北部的雅砻江源头、北部黑河、白河流域则属不敏感或轻度敏感性区域,此外,在川西高山高原沙鲁里山中部、大渡河上游部分地段属轻度以下敏感性区域。

3.6 不同地貌单元水土流失敏感性评价

从研究区不同地貌单元土壤侵蚀综合敏感性来看(表 9),川西高山高原地区以中度、轻度敏感性区域为主,两者分别占该地貌单元面积的 49.9%、25.1%,高度敏感、不敏感区域面积相对较少,分别占 15.8%、8.9%,而极敏感区域仅为 0.2%;川西南山地以高度、极敏感性区域为主,两者分别占该地貌单元面积的 53.1%、27.5%,中度敏感性区域占 18.1%,而轻度以下敏感性区域仅占 1.4%;四川盆地周缘同样以高度、极敏感性区域为主,两者面积之和占该地貌单元面积的 83.8%,中度以下敏感性区域占 16.2%;四川盆地绝大部分区域以高度、极敏感性区域为主,两者之和占到该地貌单元面积的 94.9%,中度以下敏感性区域却只占 5.1%。

表 9 土壤侵蚀综合敏感性评价

地貌区域	不敏感		轻度敏感		中度敏感		高度敏感		极敏感	
	面积 (km ²)	比例 (%)								
川西高山高原	21659.7	8.9	61003.9	25.1	121391.8	49.9	38393.7	15.8	601.0	0.2
川西南山地	184.1	0.3	592.7	1.1	10145.3	18.1	29763.7	53.1	15412.2	27.5
四川盆地周缘	838.4	1.0	2183.2	2.6	10450.6	12.6	35043.6	42.2	34525.6	41.6
四川盆地	154.0	0.1	513.1	0.5	4626.8	4.5	42763.7	41.6	54752.9	53.3
四川合计	22836.2	4.7	64292.9	13.3	146614.5	30.2	145964.7	30.1	105291.7	21.7

4 结论与讨论

研究根据通用水土流失方程原理,结合四川省自然环境特征,选择降雨侵蚀力、土壤类型、地形起伏度、植被覆盖 4 个评价指标,在 GIS 技术支持下对研究区土壤侵蚀敏感性进行了评价。结果表明:研究区土壤侵蚀敏感性以高度敏感、中度敏感和极敏感为主,轻度敏感和不敏感比例相对较小,土壤侵蚀

敏感性空间分布规律较为明显,以研究区中部龙门山脉北端至西南部雅砻江中游一线分开,西部大部分地区属中度以下敏感性区域,而东部大部分地区属高度、极敏感性区域。这与研究区水土流失现状相对比^[3],二者具有相对一致性,土壤侵蚀敏感性高的地区基本上就是目前研究区土壤侵蚀严重的地区,如极敏感性区域目前土壤侵蚀属极强度侵蚀,高度敏感地区属强度至中度侵蚀,中度敏感区为中度至轻度侵蚀,而轻度和不敏感地区基本就是轻度侵

蚀。从土壤侵蚀敏感性研究机理来看,土壤侵蚀敏感性主要受降雨、土壤特性、地形以及植被覆盖等因素的影响,人类活动可以逐渐影响和改变这些因素的特性,特别是植被覆盖受人类活动的影响最为明显,通过对植被覆盖敏感性分析可知,研究区中部龙门山至雅砻江中游一线以西的川西高山高原和川西南山地部分广大地区,是我国西南重点天然林区,保存了大面积天然林,特别是 1998a 实施“天然林保护”工程以来,区域内原始森林得以“休养生息”,20 世纪 70 年代形成的大规模采伐迹地也逐步通过人工造林、封山育林等多种方式进行人工更新和促进植被自然演替,森林生态系统得以恢复与重建,植被覆盖度稳步提高,土壤侵蚀敏感性程度较低;而龙门山至雅砻江一线以东的川西南山地部分地区、四川盆地周缘和四川盆地,是四川省人口密度最大的地区,长期的人类活动使自然植被几乎不复存在,取而代之的是易造成水土流失的农业植被、生态防护效益低下的人工林植被,以潜在高度敏感、极敏感区域为主。因而,在其它自然影响因素极难改变的情况下,充分有效保护现有原始森林植被,科学制定林一灌、林一草植被恢复模式,大力提高区域地表植被覆盖对控制土壤侵蚀具有特别重要的意义。

参考文献:

- [1] 费世民,杨玉坡.论四川林业在“长江上游生态屏障”建设中的地位与作用[J].四川林业科技,2002,23(1):27~38.
- [2] 钟祥浩,刘淑珍,范建容.长江上游生态退化及其恢复与重建[J].长江流域资源与环境,2003,12(2):157~162.
- [3] 孙凡,游翔,刘伯云,等.四川省水土流失空间分析[J].西南大学学报(自然科学版),2008,30(12):40~44.
- [4] 张明波,郭海晋,徐德龙,等.嘉陵江流域水保治理水沙模型研究与应用[J].水土保持学报,2003,17(5):110~113.
- [5] 李青云,孙厚才,熊官卿.紫色土丘陵区小流域地面侵蚀量预报[J].长江科学院院报,1995,12(3):15~21.
- [6] 贺秀斌,张信宝,文安邦.川中丘陵区侵蚀产沙的尺度单元及其研究方法[J].水土保持通报,2004,24(3):18~20.
- [7] 雷孝章.长江上游部分地区土壤侵蚀规律的研究[J].林业科学,1995,31(3):35~43.
- [8] 刘红艳,孙希华,孙玉堂.基于 GIS 的济南市土壤侵蚀敏感性评价研究[J].水土保持通报,2008,28(2):127~130.
- [9] 陈学华,周建中.基于 GIS 和 RS 的四川省彭州市土壤侵蚀敏感性评价[J].山地学报,29(6):707~712.
- [10] Renard K G, Foster G R, Weesies G A, et al. Predicting Soil Erosion by water: A Guide to Conservation Planning with the Revised Universal Soil loss Equation (RUSLE). Agricultural Handbook No. 537. Washington: United States Department of Agriculture, 1997.
- [11] Wang X D, Zhong X H, Fan J R. Assessment and spatial distribution of sensitivity of soil erosion in Tibet [J]. Journal of Geographical Sciences, 2003, 14(1): 41~46.
- [12] 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.
- [13] Nearing M A, Jeuen V, Baffaut C, et al. Modeling response of soil erosion and runoff to changes in precipitation and cover [J]. Catena, 2005, 61: 131~154.
- [14] 李月臣,刘春霞,赵纯勇,等.三峡库区(重庆段)土壤侵蚀敏感性评价及其空间分异特征[J].生态学报,2009,29(2):0788~0796.
- [15] 王小丹,钟祥浩,范建容.西藏水土流失敏感性评价及其空间分异规律[J].地理学报,2004,59(2):183~188.
- [16] 杨广斌,李亦秋,安裕伦.基于网格数据的贵州土壤侵蚀敏感性评价及其空间分异[J].中国岩溶,2006,25(1):73~78.
- [17] 莫斌,朱波,王玉宽,等.重庆市土壤侵蚀敏感性评价[J].水土保持通报,2004,24(5):45~48.
- [18] 刘康,康艳,曹明明,等.基于 GIS 的陕西省水土流失敏感性评价[J].水土保持学报,2004,18(5):168~170.
- [19] 凡非得,王克林,熊鹰,等.西南喀斯特区域水土流失敏感性评价及其空间分异特征[J].生态学报,2011,31(21):6353~6362.
- [20] 李阳兵,邵景安,王世杰,等.基于岩溶生态系统特性的水土流失敏感性评价[J].山地学报,2007,25(6):671~677.
- [21] 徐天献,王玉宽,傅斌,等.汶川地震重灾区土壤侵蚀敏感性评价[J].中国水土保持,2011(1):39~42.
- [22] 周红艺,李辉霞,范建容,等.元谋干热河谷土壤侵蚀敏感性评价[J].中国水土保持,2009(4):39~41.
- [23] 周伏建,陈明华,林福兴.福建省降雨侵蚀力指标尺值[J].水土保持学报,1995,9(1):13~18.
- [24] 邓良基,侯大斌,王昌全,等.四川自然土壤和旱耕地土壤可蚀性特征研究[J].中国水土保持,2003(7):23~25.
- [25] 汤小华,王春菊.福建省土壤侵蚀敏感性评价[J].福建师范大学学报(自然科学版),2006,22(4):1~4.
- [26] 杨子生.论水土流失与土壤侵蚀及其有关概念的界定[J].山地学报,2001,19(5):436~445.
- [27] 卢玉东,尹光志,熊有胜,何丙辉.应用 TM 图像分析重庆南川市土壤侵蚀与植被覆盖度的关系[J].南京农业大学学报,2005,28(4):72~75.
- [28] 张鲁,周跃,张丽彤.国内外土地利用与土壤侵蚀关系的研究现状与展望[J].水土保持研究,2008,15(3):43~48.
- [29] 孙凡,游翔,刘伯云,等.四川德阳地区土壤侵蚀因子与敏感性分析[J].西南师范大学学报(自然科学版),2007,32(4):47~51.
- [30] 刘洋,王桂晨.岷江源头植被景观与土壤侵蚀强度相关性研究[J].人民长江,2008,39(12):25~28.
- [31] 孙希华,张代民,闫福江,等.基于网格单元的青岛市土壤侵蚀背景值分析[J].中国水土保持,2010,10:58~61.
- [32] 李辉霞,刘淑珍,何晓蓉,等.遂宁市中区土地利用类型变化

- 与土壤侵蚀强度变化的关系分析[J]. 中国水土保持, 2004, 3:37~38.
- [33] 卫亚星, 王莉雯, 刘闯. 基于遥感技术的土壤侵蚀研究现状及实例分析[J]. 干旱区地理, 2010, 33(1):87~92.
- [34] 郝丽虹, 张冬明, 吴鹏飞, 等. 地理信息系统(GIS)在土壤侵蚀研究中的应用[J]. 安徽农业科学, 2007, 35(33):10779~10781.
- [35] 邱扬, 傅伯杰, 王勇. 土壤侵蚀时空变异及其与环境因子的时空关系[J]. 水土保持学报, 2002, 16(1):108~111.
- [36] 花利忠, 贺秀斌, 朱波. 川中丘陵区小流域土壤侵蚀空间分异评价研究[J]. 水土保持通报, 2007, 27(3):111~115.
- [37] 邱扬, 傅伯杰. 异质景观中水土流失的空间变异与尺度变异[J]. 生态学报, 2004, 24(2):330~337.
- [38] 李秀霞, 倪晋仁. 土壤侵蚀及其影响因素空间相关性分析[J]. 地理科学进展, 2009, 28(2):161~166.
- [39] 田光进, 张增祥, 赵晓丽, 等. 中国耕地土壤侵蚀空间分布特征及生态背景[J]. 生态学报, 2002, 22(1):10~16.
- [40] 许峰, 郭素彦, 张增祥. 20世纪末中国土壤侵蚀的空间分布特征[J]. 地理学报, 2003, 58(1):139~146.
- [41] 李斌兵, 郝粉莉, 龙栋材, 等. 基于GIS纸坊沟小流域土壤侵蚀强度空间分布[J]. 地理科学, 2009, 29(1):105~110.
- [42] 李秀霞, 李天宏, 倪晋仁. 黄河流域水蚀区土壤侵蚀空间尺度效应分析[J]. 地理科学进展, 2008, 27(6):49~56.
- [43] 邱扬, 傅伯杰, 王军, 等. 黄土丘陵小流域土壤侵蚀的时空变异及其影响因子[J]. 生态学报, 2004, 24(9):1871~1877.
- [44] 孙秀美, 孙希华, 冯军华. 沂蒙山区土壤侵蚀敏感性评价[J]. 水土保持通报, 2007, 27(3):84~87.
- [45] 谭炳香, 李增元, 王彦辉, 等. 基于遥感数据的流域土壤侵蚀强度快速估测方法[J]. 遥感技术与应用, 2005, 20(2):215~220.
- [46] 郭忠升. 水土保持植被的有效盖度、临界盖度和潜势盖度[J]. 水土保持通报, 2000, 20(2):60~62.
- [47] 谢红霞, 李锐, 杨勤科, 等. 退耕还林(草)和降雨变化对延河流域土壤侵蚀的影响[J]. 中国农业科学, 2009, 42(2):569~576.
- [48] 薛东剑, 陈晓杰, 张怡, 等. 丹巴县土壤侵蚀强度评价及空间分异研究[J]. 人民黄河, 2012, 34(9):76~78.
- [49] 李嘉俊, 许有鹏, 桑银江. GIS支持下的土壤侵蚀动态变化研究:浙江一例[J]. 南京大学学报:自然科学版, 2005, 41(3):297~303.
- [50] 张喜旺, 周月敏, 李晓松, 等. 土壤侵蚀评价遥感研究进展[J]. 土壤通报, 2010, 41(4):1010~1017.
- [51] Vrieling A, Sterk G, Vigiak O. Spatial Evaluation of Soil Erosion Risk in the West Usambara Mountains, Tanzania [J]. Land Degrad Dev, 2006, 17(3):301~319.
- [52] Matthew J. Cohena, Heith Dshepherd, Markusgwalsch. Empirical Re-formulation of the Universal Soil Loss Equation for Erosion Risk Assessment in a Tropical Watershed [J]. Geoderma, 2005, 124:235~252.
- [53] 史培军, 刘宝元, 张科利. 土壤侵蚀过程与模型研究[J]. 资源科学, 1999, 21(5):9~18.
- [54] 章文波, 谢云, 刘宝元. 降雨侵蚀力研究进展[J]. 水土保持学报, 2002, 16(5):43~46.
- [55] 吕喜玺, 沈荣明. 土壤可蚀性因子K值的初步研究[J]. 水土保持学报, 1992, 6(2):63~70.
- [56] 焦超卫, 赵牡丹, 曹颖. 区域水土流失地形因子的研究与展望[J]. 人民黄河, 2006, 28(4):58~60.
- [57] 许月卿, 黄靖, 冯艳, 等. 不同土地利用结构下的土壤侵蚀经济损失[J]. 地理科学进展, 2010, 29(11):1451~1456.
- [58] 张雪峰, 何政伟, 薛东剑. 金沙江流域东川地区水土流失分析[J]. 灾害学, 2010, 25(1):50~53.
- [59] 郭锐, 赵安成, 王爱龙, 等. 黄土高原沟壑区中尺度流域水土流失治理探讨[J]. 人民黄河, 2010, 32(9):76~77.
- [60] 范昊明, 王铁良, 蔡强国, 等. 东北地区土壤侵蚀分异特征与分区治理模式研究[J]. 水土保持研究, 2008, 15(2):69~72.
- [61] 刘兆云, 章明奎. 侵蚀-沉积连续地形中土壤碳库的空间分异[J]. 水土保持通报, 2009, 29(3):61~65.
- [62] 郑进军, 张信宝, 贺秀斌. 川中丘陵区坡耕地侵蚀空间分布的WEPP模型和¹³⁷Cs法研究[J]. 水土保持学报, 2007, 21(2):19~23.