

基于 GIS 的四川省冻融侵蚀界定与评价

张建国^{1,2}, 刘淑珍¹, 范建容¹

(1. 中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所, 四川 成都 610041; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘 要: 根据作者和前人相关成果, 提出四川省冻融侵蚀区界定的理论依据, 并以 GIS 技术为支撑, 确定出了四川省冻融侵蚀区的范围。接着在综合分析冻融侵蚀的影响因子的基础上, 提出了适合四川省的冻融侵蚀相对分级标准; 利用此标准, 在 GIS 软件支持下实现了四川省冻融侵蚀相对分级。运用分级结果对四川省冻融侵蚀进行了综合评价。

关键词: 四川省; 冻融侵蚀; 分级; 评价

中图分类号: TP79, P94 **文献标识码:** A

冻融侵蚀是高寒地区由于温度的变化, 导致土体或岩石中的水分发生相变, 体积发生变化, 以及由于土壤或岩石不同矿物的差异胀缩造成了土体或岩石的机械破坏, 被破坏的土体或岩块在重力等作用下被搬用、迁移、堆积的整个过程。它多发生在高纬度、高海拔、气候寒冷的区域。我国是个冻融侵蚀分布较广的国家, 全国可发生冻融侵蚀的面积超过 $126.98 \times 10^4 \text{ km}^2$, 约占国土总面积的 13.4%。其中大部分的冻融侵蚀分布在青藏高原地区^[1]。据调查, 作为长江、黄河主要源头的青藏高原, 冻融侵蚀的面积达到 $104 \times 10^4 \text{ km}^2$, 严重地影响了当地人民的生产、生活和地区经济的发展。同时冻融侵蚀的产物也成为长江、黄河泥沙的主要来源。已有的研究结果也表明, 冻融侵蚀可以增大土壤的可蚀性和坡面土体的不稳定性, 从而增加水土流失量^[2-8]。在部分冻融侵蚀区, 春季融雪径流侵蚀量占全年水土流失量的绝大部分。因此, 加快冻融侵蚀的研究, 找出有效防治冻融侵蚀的方法和途径显得极为迫切和必要。然而由于资金和技术的原因使得对冻融侵蚀的研究尚处于起步阶段, 还未引起国内外学者的足够重视。在我国, 冻融侵蚀还未列入现代侵蚀的研究范畴^[9, 10]。

四川省位于长江上游地区, 介于我国自西向东三个台阶的一、二级台阶的过渡地带, 其中西部为地势高亢的川西高山高原区, 是青藏高原向东延伸的部分, 海拔高、温度低, 部分区域土壤侵蚀以冻融侵蚀为主。冻融侵蚀对这些区域人民的生存和发展的影响, 已表现得越来越明显。为此, 本文以四川省西部为例, 在 GIS 技术支持下探讨了冻融侵蚀区的界定及其冻融侵蚀相对分级。

1 四川冻融侵蚀区的界定

冻融侵蚀区是指具有强烈的冻融作用为特征的寒冷气候条件, 冻融作用是最普遍、最主要的外力侵蚀过程, 同时应有相应的冻融侵蚀地貌形态表现的区域。因此判断一个区域是否属于冻融侵蚀区, 最关键的是看该区域的侵蚀动力是否以冻融作用营力为主。虽然冻融侵蚀区一定存在冻融侵蚀, 但发生冻融侵蚀的区域并不一定都属于冻融侵蚀区, 因为有冻融侵蚀发生的区域冻融作用未必占主要地位。如果把发生冻融侵蚀的区域等同于冻融侵蚀区, 显然扩大了四川省冻融侵蚀区的范围。

一些学者把多年冻土区的下界作为冻融侵蚀区

收稿日期(Received date): 2004- 08- 05; 改回日期(Accepted): 2004- 11- 18。

基金项目(Foundation item): 国家重点基础研究发展计划“973 计划”(2003CB415202)资助。[Supported by National Key Basic Research and Development Program (2003CB415202).]

作者简介(Biography): 张建国(1973-), 男, 甘肃陇西人, 中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所博士研究生。主要从事土壤侵蚀动态监测方面的研究。电话:(028) 85229091, 13548183008 [Zhang Jianguo(1973-), male, Ph. D candidate, research direction: dynamic monitoring of soil erosion. E-mail: sezejg@yahoo.com.cn]

的下界。如水利部水土保持司编的《水土保持技术规范》就规定冻融侵蚀是多年冻土在冻融交替作用下发生的土壤侵蚀现象, 发生在多年冻土区的坡面、沟壁、河床、渠坡等处^[11]。然而人们发现在多年冻土区外围 100~ 300 m 的范围内, 外力作用仍以冻融作用为主, 地貌类型也以冻融侵蚀地貌(冰缘地貌)为主。因此如以四川省多年冻土区的下界作为冻融侵蚀区的下界, 显然缩小了四川省冻融侵蚀区的范围。根据我们对川西高原的调查, 我们认为冻融侵蚀区的下界与冻土学当中的冰缘区的下界更为接近, 取冰缘区的下界作为冻融侵蚀区的下界更为合理。

对于冰缘区的界定, 虽然迄今尚未取得共识, 但大多数学者认为, 冰缘区与多年冻土区就其冰缘地貌形成环境条件及形态类型来说, 二者之间存在许多共同之处, 但冰缘区应包括多年冻土区, 因为大家认为一些实属冰缘的形态在多年冻土区之外亦有出现^[12, 13]。而且周幼吾、邱国庆、程国栋等^[12]通过研究认为冰缘区下限比多年冻土下界低 100~ 300 m。因此我们认为冻融侵蚀区的下界应比多年冻土区的下界约低 100~ 300 m。邱国庆、程国栋(1995)利用

青藏高原 78 个气象站的资料曾对青藏高原冻土区的年平均气温(T) 与纬度(X_1)、经度(X_2) 及海拔(X_3) 的关系进行了回归分析, 得到如下回归方程

$$T = 66.3032 - 0.9197X_1 - 0.1438X_2 - 0.005596X_3 \tag{1}$$

并认为在青藏高原多年冻土带下界大致与年平均气温 $-2\sim -3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 相当^[12]。据此, 选择年平均气温 $-2.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 作为多年冻土带的下限, 并在此基础上再降低 200 m 后作为四川省冻融侵蚀区的下界是可行的。因此, 我们取年均温 $-2.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的海拔高度减去 200 m 作为四川省冻融侵蚀区下界。并由(1)式推导出了四川省冻融侵蚀区下界海拔的计算公式

$$H = \frac{66.3032 - 0.9197X_1 - 0.1438X_2 + 2.5}{0.005596} - 200 \tag{2}$$

式中 H 为冻融侵蚀区海拔下限(m)。表 1 是根据上述理论求得的四川西部部分县城所在地冻融侵蚀区的理论海拔下限。我们以此海拔下限作为各县冻融侵蚀区的下界。

对四川省行政区划图按上述计算结果赋值并在 ERDAS 软件中和 DEM 叠加, 即可提取出四川冻融侵蚀区分布图(图 1)。

表 1 四川省冻融侵蚀区下界海拔高度
Table 1 Elevation of lower limit of freeze-thaw erosion area in Sichuan Province

县	纬度 ($^{\circ}$)	经度 ($^{\circ}$)	冻融侵蚀区 下界(m)	县	纬度 ($^{\circ}$)	经度 ($^{\circ}$)	冻融侵蚀区 下界(m)
若尔盖	33.60	102.95	3 927	小金	31.00	102.30	4 371
九寨沟	33.20	104.20	3 961	道孚	31.00	101.20	4 400
红原	32.80	102.60	4 068	丹巴	30.80	101.90	4 415
阿坝	32.90	101.80	4 072	白玉	31.20	98.80	4 429
松潘	32.60	103.60	4 075	康定	30.05	101.90	4 538
石渠	33.00	98.10	4 151	雅江	30.05	101.00	4 561
黑水	32.10	102.98	4 173	理塘	30.00	100.20	4 590
壤塘	32.20	101.00	4 208	巴塘	30.00	99.20	4 615
色达	32.20	100.30	4 226	新龙	29.67	98.58	4 686
理县	31.30	103.20	4 299	九龙	29.00	101.50	4 721
甘孜	31.60	100.00	4 332	乡城	28.90	99.80	4 781
德格	31.80	98.60	4 335	木里	27.90	101.30	4 907
炉霍	31.40	100.70	4 347	冕宁	28.60	102.20	4 768
得荣	28.70	99.30	4 827	马尔康	32.00	102.30	4 207
稻城	29.00	100.30	4 752	金川	31.50	102.00	4 297
盐源	27.50	101.50	4 967				

注: 其他县因无冻融侵蚀分布, 故未一一列出。

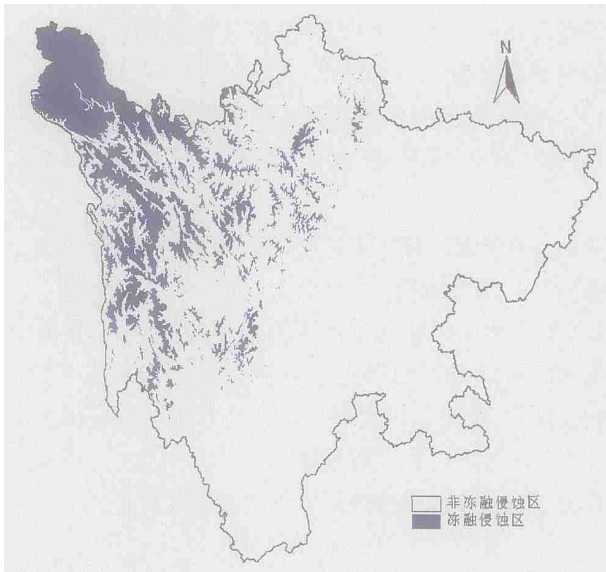


图 1 四川省冻融侵蚀区分布图

Fig. 1 Distribution of freeze thaw erosion in Sichuan Province

2 四川冻融侵蚀强度相对分级

严格来说,冻融侵蚀的强度分级应以冻融侵蚀区单位时间内,单位面积上土壤的流失量作为分级依据。然而由于冻融侵蚀区气候环境恶劣,难以布置侵蚀小区进行实验研究。目前国内外也尚无冻融侵蚀流失量的报道,因此对冻融侵蚀进行强度分级难度很大。然而事实上在冻融侵蚀区确实存在着侵蚀程度的差异,而造成这种差异的原因是由于影响冻融过程以及冻融产物搬运条件的因素的差异。为此选择这些影响冻融侵蚀的因素作为分级指标进行冻融侵蚀相对分级是可行的。

2.1 分级指标选择

一个地区发生不同强度冻融侵蚀的可能性受多种因素的影响。其中起主要作用的因素为温度、地形、地表覆盖、降水量、海拔、土壤等。

2.1.1 温度

温度包括区域内年平均地温、地面年温度较差等。冻融作用发生的前提条件是土温周期性的发生变化,因此温度是影响冻融侵蚀的首要因素。它直接决定着冻结和融化的深度和程度。温差越大,冻融深度也越大,反之,则减少。一般情况下在冻融侵蚀区,气温变化越剧烈,冻融作用也就越强烈。因此在理论上首先应当选择一个能反映土壤温度变化剧烈程度的指标作为划分冻融侵蚀强度的指标之一。然而影响冻融侵蚀的温度指标(如地面温度较差)多

很难获得。邱国庆等^[12]根据 106 个气象站的资料对青藏高原冻土区的气温年较差(A)与纬度、经度、及海拔的关系进行回归分析后得到如下回归方程

$$A = 3.1052 + 1.2418X_1 - 0.2275X_2 - 0.0004133X_3 \quad (3)$$

因此可以利用式(3)计算气温年较差,所以选择气温年较差作为冻融侵蚀相对强度分级指标之一是可行的。

2.1.2 地形

地形对冻融侵蚀影响有极为重要的影响。其中坡度是影响冻融侵蚀的最主要的地形因子,首先坡度直接决定着冻融侵蚀产物向下输送的距离的远近和输送量的多少,即影响着侵蚀量和侵蚀位移的大小。一般情况下,地形坡度越大,冻融侵蚀产物被输送得越多越远。此外,地形的不同,冻融侵蚀的类型也不同。因此在作冻融侵蚀相对强度分级时也将坡度作为划分冻融侵蚀强度的指标之一。

2.1.3 植被

植被对冻融侵蚀的影响表现在三个方面。首先,植被的地上部分对地表起保护作用。其次,植被的根系通过对土壤的固结缠绕等机械作用,以及通过提高土壤的稳定性作用来降低冻融作用对土体的破坏。再次,植被的存在减小了土温的较差,从而减小了冻融作用的程度。据周幼吾等^[12]研究,植被减小地面温度较差的作用是普遍的。在青藏高原高山草甸和亚高山草甸地带,草被层呈丘状、斑状(鳞状)、片状、稀疏散状分布,覆盖度依次减小(90%~20%),并相应减小地面年较差4.1~1.5℃,即相应减小地面温度年较差的17%~16%。总之,在其他条件相同时,植被盖度越小冻融侵蚀越强烈。因此,在作冻融侵蚀分级时也应将植被盖度作为冻融侵蚀强度分级指标之一。由于植被盖度难以获得,而不同的土地利用类型具有不同的植被盖度,为了便于操作我们用土地利用类型作为植被盖度的替代指标。

2.1.4 土壤

土壤的冻结与融化与土的热物理性质关系极为密切,而土的物理性质又决定于土的成分、密度、孔隙度等。据徐学祖等^[12]的研究,冻土和融土的导热系数、导温系数和容积热容量均随干重度增大而增大,随土壤粒度增大而增大。土壤质地对季节融化层的影响很大,从不同土壤质地最大融化深度看:泥炭层中为0.5~1.2m,亚粘土1.5~2.2m,加砾石

或碎石的亚粘土为 1.8~ 2.5 m, 砂砾石中为 2.5~ 3.5 m, 基岩中可达 8~ 10 m。因此土壤的性质对冻融侵蚀有重要的影响。然而在四川冻融侵蚀区, 土壤性质方面的数据目前难以获得, 故暂时未将土壤作为冻融侵蚀的分级指标之一。

2.1.5 降水

对冻融侵蚀的影响较为复杂, 一方面, 降水量增大, 导致土体中含水量增大, 冻结时由于水体结冰体积增大而对土体的破毁作用增加, 同时融水对土壤的搬运作用也会随着降水的增加而增大。从这一点来说降水的增大加强了冻融侵蚀。另一方面, 降水会使土壤中含水量增大而导致土壤的比热增大从而减小土层的消融深度, 减轻冻融侵蚀。同时, 由于冻融侵蚀区的降水以固态(雪)为主, 积雪会减小地面温度较差, 从而减小季节融化深度。从这一点来说,

降水的增大反而减弱了冻融侵蚀。降水对冻融侵蚀的作用究竟是以增强为主还是以减弱为主, 目前尚无定论, 故也未将其作为冻融侵蚀的分级指标。

2.2 分级标准

由于温度较差在较小区域内差异很小, 是影响冻融侵蚀的地带性因素。根据利用式(3)的计算结果, 发现四川冻融侵蚀区温度年较差在 11~ 23℃之间。因此我们首先根据气温年较差的差异将冻融侵蚀区分成三类, 然后再根据每一类的地形和地表覆盖状况进行冻融侵蚀分级。其中坡度的分级主要以坡度对侵蚀产物输送的影响程度以及不同坡度的地面冻融侵蚀类型的差异为依据。而土地利用类型的分级主要以地表植被盖度为依据。根据各指标值在冻融侵蚀区的具体分布情况, 并参考专家意见, 最后确定出分级标准(表 2)。

表 2 四川省冻融侵蚀分级标准
Table 2 Classification criteria of freeze-thaw erosion in Sichuan Province

年较差 (℃)	土地类型	坡度(°)				
		< 5	5~ 15	15~ 25	25~ 35	> 35
11~ 15	高覆盖度草地、湖泊、沼泽、灌木、林地	微度	微度	微度	轻度	中度
	中覆盖度草地	微度	微度	轻度	中度	强度
	低覆盖度草地、耕地	微度	轻度	中度	强度	极强度
	裸土地	轻度	中度	强度	极强度	极强度
	裸岩	微度	微度	微度	轻度	中度
15~ 19	高覆盖度草地、湖泊、沼泽、灌木、林地	微度	微度	轻度	中度	强度
	中覆盖度草地	微度	轻度	中度	强度	极强度
	低覆盖度草地、耕地	轻度	中度	强度	极强度	极强度
	裸土地	中度	中度	强度	极强度	极强度
	裸岩	微度	微度	轻度	中度	强度
19~ 23	高覆盖度草地、湖泊、沼泽、灌木、林地	微度	轻度	中度	强度	极强度
	中覆盖度草地	轻度	中度	中度	强度	极强度
	低覆盖度草地、耕地	轻度	中度	强度	极强度	极强度
	裸土地	中度	强度	强度	极强度	极强度
	裸岩	微度	轻度	中度	强度	极强度

2.3 分级方法

分级的技术路线如图 2 所示。根据公式(2), 在 ERDAS 软件中用 DEM 计算出四川省温度年较差, 并按表 2 的标准分成 11~ 15℃、15~ 19℃、19~ 23℃三级, 得到年较差分级图; 在 ERDAS 软件中利用

DEM 作出坡度图, 并按表 2 的标准分成 5 级, 得到坡度分级图; 在 ARC/INFO 中把土地利用类型图按表 2 标准重新分类, 得到土地利用类型分级图; 在 ERDAS 中按照表 2 的标准叠加年较差分级图、坡度分级图、土地利用类型分级图, 并将叠加结果用冻融

侵蚀区分布图剪切(clip),即可得到四川省冻融侵蚀分级图(图3)。

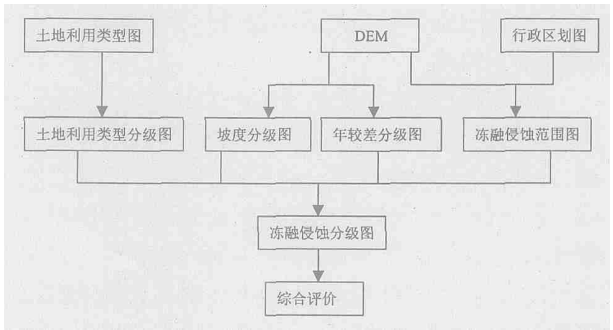


图2 四川省冻融侵蚀综合评价技术路线

Fig. 2 Technique route of evaluation of freeze-thaw erosion in Sichuan Province

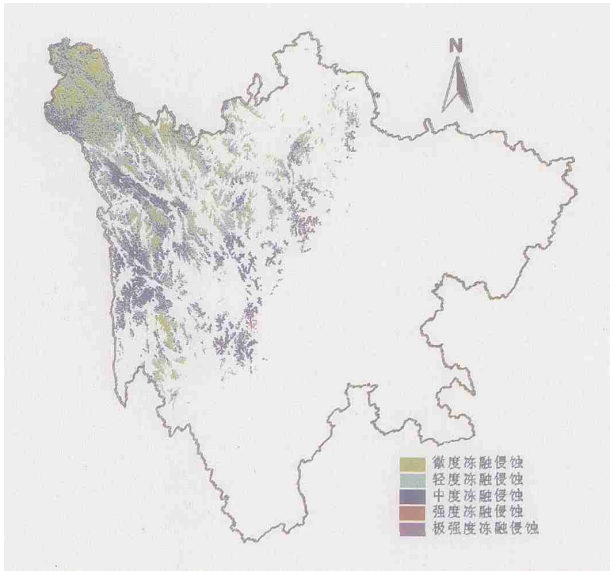


图3 四川省冻融侵蚀分级图

Fig. 3 Classification map of freeze-thaw erosion in Sichuan Province

3 结果分析

由图3可以看出四川省的冻融侵蚀主要分布在西部的石渠、德格、白玉、甘孜、色达、新龙、巴塘、壤塘、阿坝、稻城等区域,另外在大雪山、岷山等区域分布也较广。

从冻融侵蚀程度来看,四川省的冻融侵蚀以轻度为主,根据对冻融侵蚀分级图进行面积量算,轻度冻融侵蚀占总冻融侵蚀区面积的37.22%,中度冻融侵蚀占23.84%,强度冻融侵蚀占1.88%。轻度以上占62.94%。

从空间分布来看,微度和轻度冻融侵蚀分布较为均匀,而中度以上冻融侵蚀分布较为集中,主要分布在石渠县南部的莫拉山和子拉山、德格县和甘孜县南部的沙鲁里山、白玉县南部、巴塘县、理塘县西部、九龙县北部、康定县南部等区域。

4 结语

作为我国主要侵蚀类型之一的冻融侵蚀,多分布于我国西部地区,一直未能引起国内外学者的足够重视,目前国内外对冻融侵蚀的研究甚少,远远落后于对水蚀和风蚀的研究。然而随着西部大开发的实施,为了保证环境与经济协调发展,迫切需要知道西部地区的土壤侵蚀类型、程度、分布等基本情况,以便为各级政府决策部门提供科学依据。因此对我国西部地区冻融侵蚀的研究就显得尤为重要。为此本文以四川西部为例探讨了冻融侵蚀区的界定及其冻融侵蚀相对分级,提出了一套基于GIS技术的冻融侵蚀快速评价方法。在目前没有冻融侵蚀流失量数据的情况下是具有一定的实用性的。

参考文献(References):

[1] Chen Lei, Jiao Juren, Liu Zhen, et al. . The atlas of soil erosion in China[M]. Beijing: Standards Press of China. 2002. [陈雷,焦居仁,刘震,等. 中国土壤侵蚀图册[M]. 北京:中国标准出版社, 2002.]

[2] Kok H, McCool D K. Quantifying freeze/thaw-induced variability of soil strength[J]. Transactions of the ASAE, 1990, 33(2): 501 ~ 506.

[3] Mostaghimi S, Young R A, Wilts A R, et al. Effects of frost action on soil aggregate stability[J]. Transactions of the ASAE, 1988, 31(2): 435~ 439.

[4] Edwin J Chamberlain, Anthony J Gow. Effect of freezing and thawing on permeability and structure of soils[J]. Engineering geology, 1979, (13): 73~ 92.

[5] Fomanek G E, Mccool D K, Papendick R I. freeze-thaw and consolidation effects on strength of a wet silt loam[J]. Transactions of the ASAE, 1984, 27(6): 1749~ 1752.

[6] Sharratt B S, Lindstrom M J. Laboratory simulation of erosion from a partially frozen soil[J]. Soil erosion research for the 21st century, 2001: 159~ 162.

[7] Sharratt B S, Lindstrom M J, Benoit G R, et al. . Runoff and soil erosion during spring thaw in the northern U. S corn belt[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2002, 55(4): 487~ 494.

[8] Dawh T Nicholson. Experimental frost weathering of sandstone by various combinations of salts[J]. Earth surface processes and landform, 2001, 26: 811~ 818.

[9] Fan Haoming, Cai Qiangguo. Review of research progress in freeze-

- thaw erosion[J]. *Science of soil and water conservation*. 2003, **1** (4): 50~ 55. [范昊明, 蔡强国. 冻融侵蚀研究进展[J]. 中国水土保持科学, 2003, **1**(4): 50~ 55.]
- [10] Tang Keli. Characteristics and perspectives on scientific discipline of soil erosion and soil and water conservation in China[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 1999, **6**(2): 2~ 7. [唐克丽. 中国土壤侵蚀与水土保持学的特点及展望[J]. 水土保持研究, 1999, **6**(2): 2~ 7.]
- [11] Sun Zhongfeng, Song Chaofeng, Li Wenshu, *et al.*. On erosion mechanism and control measures of freezing and thaning. [J] *Journal of Heilongjiang Hydraulic Engineering College*. 1999, **26** (3): 34~ 35, 42. [孙中峰, 宋朝峰, 李文淑, 等, 浅析冻融侵蚀机理与防治对策[J]. 黑龙江水专学报, 1999, **26**(3): 34~ 35, 42.]
- [12] Qiu Guoqing, Cheng Guodong, Zhou Youwu. *et al.*. *Geocryology in China*[M], Beijing: Science Press, 2000, 15, 115. [邱国庆, 程国栋, 周幼吾, 等, 中国冻土[M]. 北京: 科学出版社, 2000. **15**, 115.]
- [13] Cui Zhijun. Basic Character of periglacial land forms on the Qinghai - Tibet Plateau[J]. *Science in China*, 1981, **6**: 725~ 733. [崔之久. 青藏高原冰缘地貌的基本特征[J]. 中国科学, 1981, **6**: 725~ 733.]

Identification and Evaluation of Freeze-thaw Erosion in Sichuan Province on the Basis of GIS

ZHANG Jianguo^{1,2}, LIU Shuzhen¹, FAN Jianrong¹

(1. Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China;

2. The Graduated School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: Freeze-thaw erosion is the third largest type of soil erosion, second only to water erosion and wind erosion. However, due to many restrictions, little research on freeze-thaw erosion has been done both in China and other countries. Especially lacking is the definition of freeze-thaw erosion zones and the assessment methods of freeze-thaw erosion. This paper has three objectives. First based on the analysis of existing relevant research result and taken Sichuan province as study area, a theoretical basis for the defining freeze-thaw erosion zones has been put forward, a formula for calculating the altitude of the lower bound of the freeze-thaw erosion zone has been established, then, the freeze-thaw erosion zones in Sichuan province has been identified by using GIS. Secondly, based on the comprehensive analysis of impact factors of freeze-thaw erosion, this paper chooses three indexes(i. e. annual temperature range, slope and vegetation), works out the criteria for relative classification of freeze-thaw erosion, and realizes the relative classification of the freeze-thaw erosion in Sichuan province under the support of GIS. Finally, synthetic assessment of freeze-thaw erosion in Tibet has been done according to the relative classification result. The results show that freeze-thaw erosion in Sichuan Province has the following regular: 1) freeze-thaw erosion lies mainly in the west in Sichuan province, such as: Shiju, Dege, Baiyu, Gezi, Seda, Xinlong, Batang, Rangtang, Aba, and Daocheng; 2) in the aspect of the degree of freeze-thaw erosion, the main grade of freeze-thaw erosion is light degree, and it takes up 37. 22% of freeze-thaw erosion zones; 3) spatial distribution of different grade of freeze-thaw erosion are much different, which shown by uniform distribution of slight degree and light degree, and by centralism distribution of other grades.

Keywords: freeze-thaw erosion; identification and evaluation, Sichuan Province, GIS