

基于多源地空耦合数据的青藏高原冻融侵蚀强度评价

郭兵^{1,2,3,4}, 姜琳¹

[1. 山东理工大学 建筑工程学院, 山东 淄博 255000; 2. 东华理工大学

江西省数字国土重点实验室, 江西 南昌 330013; 3. 区域开发与环境响应湖北省重点实验室 (湖北大学), 湖北 武汉 430062; 4. 地理国情监测国家测绘地理信息局重点实验室, 湖北 武汉 433079]

摘要: [目的] 分析和探讨青藏高原冻融侵蚀成因及其空间分布格局, 为研究区水土保持研究和生态环境保护提供数据支撑和决策参考。[方法] 引入冻融侵蚀动力因子(冻融期降雨侵蚀力和冻融期风场强度)和冻融期降水量(表征冻融期土壤相变水量)构建冻融侵蚀评价模型, 进而对青藏高原冻融侵蚀状况开展了定量评价和空间格局分析。[结果] 构建的冻融侵蚀评价模型在青藏高原地区具有较高的适用性, 总体评价精度为 92%; 青藏高原冻融侵蚀面积分布广泛, 占总面积的 63.68%, 而非冻融侵蚀区则主要分布于柴达木盆地、雅鲁藏布江流域下游以及横断山区; 冻融侵蚀强度随着坡度的上升而增加, 15°~24°和 ≥24°坡度带上冻融侵蚀剧烈, 而 ≤3°坡度带冻融侵蚀强度相对较小; 不同植被类型区的冻融侵蚀强度空间分布格局差异显著, 其中草甸的冻融侵蚀强度最小。[结论] 青藏高原冻融侵蚀状况总体上属于中度侵蚀, 其空间分布格局受地形、植被类型和气候影响显著。

关键词: 冻融侵蚀; 多源数据; 遥感; 冻融日循环天数; 降雨侵蚀力

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2017)04-0012-08

中图分类号: P642.14

文献参数: 郭兵, 姜琳. 基于多源地空耦合数据的青藏高原冻融侵蚀强度评价[J]. 水土保持通报, 2017, 37(4): 12-19. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2017.04.003; Guo Bing, Jiang Lin. Evaluation of freeze-thaw erosion in Qinghai-Tibet Plateau based on multi-source data[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2017, 37(4): 12-19. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2017.04.003

Evaluation of Freeze-thaw Erosion in Qinghai-Tibet Plateau Based on Multi-source Data

GUO Bing^{1,2,3,4}, JIANG Lin¹

[1. Shandong University of Technology, School of Civil Architectural Engineering, Zibo,

Shandong 255000, China; 2. Key Laboratory for Digital Land and Resources of Jiangxi Province, East China

University of Technology, Nanchang, Jiangxi 330013, China; 3. Hubei Key Laboratory of Regional Development and Environmental Response (Hubei University), Wuhan, Hubei 430062, China; 4. Key Laboratory for National Geographic Census and Monitoring, National Administration of Surveying, Mapping and Geoinformation, Wuhan, Hubei 433079, China]

Abstract: [Objective] To analyze and explore the causes and the spatial patterns of the freeze-thaw (FT) erosion in Qinghai-Tibet Plateau, and to provide important data support and decision-making references for soil and water conservation research and eco-environment protection in this region. [Methods] The driving force factors of FT erosion (the rainfall erosion and wind field strength during FT period) and the precipitation during FT period (indicating the soil water content) were introduced to establish an evaluation system of FT erosion and then the spatial distribution pattern of FT erosion were analyzed. [Results] The evaluation model of FT erosion had high applicability in Qinghai-Tibet Plateau with the overall evaluation accuracy of 92%. The FT erosion area were widely distributed, covering 63.68% of the total area; and the non-FT erosion zones

收稿日期: 2016-11-16

修回日期: 2017-01-26

资助项目: 东华理工大学江西省数字国土重点实验室开放基金项目“南岭山地森林及生物多样性生态功能区生态脆弱性驱动因子定量分析研究”(DLLJ201709); 区域开发与环境响应湖北省重点实验室开放研究基金项目[2017(B)003]; 地理国情监测国家测绘地理信息局重点实验室开放基金项目(2016NGCM02); 山东理工大学博士科研启动基金项目(4041/416027); 国家重大科技专项(00-Y30B14-9001-14/16); 国家自然科学基金项目(41501425)

第一作者: 郭兵(1987—), 男(汉族), 山东省高青县人, 博士, 讲师, 主要从事生态环境与灾害遥感的研究。E-mail: guobingjl@163.com。

通讯作者: 姜琳(1987—), 女(汉族), 山东省文登区人, 硕士, 主要从事环境遥感的研究。E-mail: linlin20061998@126.com。

were mainly distributed in the lower reaches of the Yarlung Zangbo River Basin, Qaidam Basin and the Hengduan mountains. The intensity of FT erosion increased with the increase of slope. The erosion intensities of $15^{\circ}\sim 24^{\circ}$ and $\geq 24^{\circ}$ slope zone were severe while that of $\leq 3^{\circ}$ slope zone was relatively slight. The spatial distribution patterns of FT erosion intensity among different vegetation types were significantly different. The FT erosion intensities of broad leaved forest and crops were relatively severe while that of meadow was slighter. [Conclusion] The FT erosion of Qinghai-Tibet Plateau belongs to the level of moderate erosion and the spatial patterns are significantly affected by terrain, plant types and climate factors.

Keywords: freeze-thaw erosion; multi-source data; remote sensing; number of days of freeze-thaw cycles; rain-fall erosion

冻融侵蚀是土壤侵蚀的主要方式之一,是仅次于风蚀、水蚀的第三大土壤侵蚀类型,其中我国冻融侵蚀区域面积占国土总面积的 17.97%^[1],侵蚀最严重的地区主要分布在西藏、青海、甘肃、内蒙古、黑龙江等省份^[2]。21 世纪以来,随着全球气候变暖日益加剧,冻融侵蚀研究已经引起广泛重视^[3]。冻融侵蚀的形成过程十分复杂,其主要动力来源于寒冻风化(物理风化、化学风化、生物风化)和雪蚀的作用,前者表现为水分相变引起的土体或岩石的破碎,后者则表现为不同矿物与水分结合后体积变化引起的土壤或岩石的破碎^[4]。冬末春初时期,由于温度的频繁变化而造成的冻融交替所引起的岩石、土壤性质发生变化,进而造成的冻融侵蚀作用^[5]。冻融侵蚀作为青藏高原水土流失加剧的重要原因之一,一方面改变和破坏着土壤的物理性质,降低了耕地的生产能力,另一方面也增加了河流的泥沙来源^[6-7]。由于冻融过程破坏了土壤的物理结构和化学属性,使水土流失的物质来源增加,加速了土壤有机质以及氮、磷、钾等元素的流失,极大威胁了耕地资源、草地资源^[8-9]。当前,国外研究学者针对冻融侵蚀发生机理以及冻融侵蚀过程定量描述开展了大量研究^[10-12]。虽然国内的冻融侵蚀研究起步较晚,但是许多学者已开展了一系列相关的研究工作:吴万贞等^[13]分析了三江源地区冻融侵蚀动力,并结合冻融发生的条件,进行了冻融侵蚀强度的分析与评价;景国臣等^[14]对冻融侵蚀的作用形式和危害程度进行了分析和探讨,认为冻融侵蚀加快了土壤侵蚀速率;李瑞平等^[15]基于野外实测数据分析了季节性冻融土壤水盐运移特征,构建了冻融期气温因子与土壤水盐运移的关系模型;施建成等^[16]利用 AMSR-E(advanced microwave scanning radiometer-earth observing system)亮温数据产品计算相邻两日发射率变化来判断一日之内是否发生冻融循环过程,获取了全国每年的冻融日循环天数;盛煜等^[17]利用纬度、高程、太阳辐射等数据对疏勒河流域上游进行了流域尺度的辐射调整模型、等效高程模型和区域多年冻土分布模型的研究。然而当前多数

研究中构建冻融侵蚀评价模型多考虑地形(坡度、坡向、气温年较差)、植被(植被覆盖度)、降水(年降雨量)等地理环境背景因子,而对冻融侵蚀形成的驱动力因子考虑较少^[3,6-8]。此外,冻融侵蚀的作用机理相比水力侵蚀更为复杂,青藏高原严酷的地理环境造成该区域地理信息观测数据较匮乏,导致针对该地区的大尺度冻融侵蚀定量评价研究相对不足^[4,7]。冻融侵蚀在中国分布广泛,而青藏高原及其附近高山区是中国冻融侵蚀最集中和最强烈的区域^[7]。本文在前人研究基础上,引入冻融侵蚀动力因子(冻融期降雨侵蚀力和冻融期风场强度)构建冻融侵蚀评价体系,开展青藏高原冻融侵蚀强度的定量研究,并对冻融侵蚀空间分布格局进行分析和探讨,为该地区的水土保持研究和生态环境保护提供重要的数据支撑和决策参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

青藏高原地处中国西南部,西起帕米尔高原,东至横断山脉,南自喜马拉雅山脉南缘,北到昆仑山—祁连山北侧,东西长 2 945 km,南北宽达 1 532 km ($26^{\circ}00'12''\sim 39^{\circ}46'50''N$, $73^{\circ}18'52''\sim 104^{\circ}46'59''E$),面积为 2.57×10^6 km²,占中国陆地总面积的 26.8%,包括西藏、青海 2 省区的全部和新疆、甘肃、四川、云南 4 省区的部分地区^[4,7]。在青藏高原分布着众多的高大山脉,主要有喜马拉雅山脉、念青唐古拉山脉、昆仑山脉、唐古拉山脉、祁连山脉、冈底斯山脉、横断山脉等。该区太阳辐射强烈,气温的较差大,气温低,年际变化较小,干湿季节分明^[9]。夏季,由于受到印度洋西南季风和印度洋的湿润气流的影响,高原大部分区域降水较多。而冬季,由于青藏高原受干燥的西风带的影响,多大风(部分地甚至达到了 200 d),降水稀少。青藏高原植被类型复杂多样,高原水平带谱依次出现森林、草甸、草原、荒漠等植被,垂直自然带也由东南部的海洋性湿润型递变为高原腹地的大陆性干旱型^[4]。

岩石或土体的破坏程度就越大,冻融侵蚀强度就

越大^[1]。一天内最高温度大于 0 ℃并且最低温度小于 0 ℃则定义为一个冻融日循环^[4]。年冻融日循环天数则是指一年中冻融日循环发生的天数^[11]。该指标基于青藏高原及周边 160 个气象站点(755 站点)近 15 a 的 0 cm 地温数据计算获取的,然后用克里金内插法得到冻融日循环天数分布图,空间分辨率为 1 000 m。

1.2.2 冻融期降水量 降水量作为影响冻融侵蚀的主要因素,已经成为土壤侵蚀学科的共识^[5]。降水主要通过岩石和土体中水分含量来影响冻融循环作用。在冻结过程中,由于水从液态冻结为固态时体积约增加 1.1 倍,因而降水量越大使得土体中含水量越大,水体液固态转化对岩土体的机械破坏作用就越明显^[1,3]。在融化过程中,降水量则可以通过改变土体的物理性质从而改变土壤的抗蚀性^[12]。该指标基于青藏高原及周边 323 个气象站点(755 站点及基于 TRMM 数据的降水插值点)的近 15 a 的降水数据计算获得,然后利用克里金内插法得到冻融期降水量分布图,空间分辨率为 1 000 m。

1.2.3 冻融期降雨侵蚀力 冻融侵蚀中,降水量不仅可以增加岩土体中的含水量影响冻融侵蚀作用,而且还通过雨滴击溅和地表径流为冻融侵蚀提供直接动力因素^[7]。降雨量越大,降雨侵蚀力越大,水流对土壤的搬运作用就越强。因而,降雨侵蚀力是影响冻融侵蚀强度的直接动力因素之一^[4]。该指标基于青藏高原及周边 323 个气象站点(755 站点及基于 TRMM3 B42 数据的降水插值点)的近 15 a 的降水数据计算获得,然后用克里金内插法得到冻融期降雨侵蚀力分布图,空间分辨率为 1 000 m。降雨侵蚀力计算公式为:

$$\bar{R}_k = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\alpha \sum_{j=1}^m P_{dijk}^\beta) \quad (1)$$

$$\alpha = 21.239\beta^{-7.3967}, \quad \beta = 0.624 + \frac{27.346}{P_{d12}}$$

$$\overline{P_{d12}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{1}{m} \sum_{l=1}^m P_{di}$$

式中: \bar{R}_k ——第 k 个月的降雨侵蚀力 [(MJ · mm)/(hm² · h)]; N ——计算数据序列长(为 30 a); m ——第 i 年第 k 个月侵蚀性降雨的天数; P_{dijk} ——第 i 年第 k 个月第 j 次侵蚀性降雨量; α ——模型参数; $\overline{P_{d12}}$ ——侵蚀性降雨的多年平均值(mm),以日降雨量 ≥ 12 mm 界定为侵蚀性降雨。

1.2.4 冻融期风场强度 青藏高原冻融侵蚀过程多发生于冬春两季(每年的 10 月至次年的 4 月),而该时段的大风日数是剩余时段的十几倍。高原许多地方一年之中大风数超过了 100 d,部分地区甚至达到

200 d^[4,7]。半干旱、干旱冻融侵蚀区,风力作用能够影响岩土体的冻化速率和冻融侵蚀物质的搬运过程,因此风力大小是影响冻融侵蚀强度的重要动力因素之一。相关研究表明^[4],6 m/s 的风速是土壤颗粒的移动的临界值,因此,本研究计算了冻融期 > 6 m/s 的风速日数作为表征青藏高原冻融期风场强度的指标。该指标基于青藏高原及周边 160 个气象站点(755 站点)近 15 a 的风向风速数据计算获取,然后利用克里金内插法得到冻融期风场强度分布图,空间分辨率为 1 000 m。

1.2.5 坡度 坡度是影响冻融侵蚀数量和侵蚀位移大小的重要因素^[14]。坡度越大,岩土体表面失稳得可能性越大,被冻融作用破坏的岩土体发生滑动、崩塌、翻滚、跳跃的可能性显著增加^[4]。此外,随着坡度的增加,冻融侵蚀的物质输移量增加,输移的距离也增大^[11]。因此,坡度对冻融侵蚀也十分重要。坡度指标基于 90 m 分辨率的 SRTM-DEM 利用 ArcGIS 10.2 的 slope 工具计算获取。

1.2.6 坡向 坡向是反映不同地形条件下坡面接受太阳辐射能力强弱的重要因素之一^[15]。阳坡太阳辐射光照时间长,地面接受的太阳辐射量就越多,因而白天地表温度剧烈升高至 0 ℃以上。而阴坡由于接受太阳辐射能量少,导致白天和黑夜的温度均在 0 ℃以下,造成阴坡的冻融作用明显弱于阳坡^[6]。坡向指标是基于 SRTM-DEM 重采样数据利用 ArcGIS 10.2 的 Aspect 工具计算获取。

1.2.7 植被 植被通过根系对土壤产生固结作用,提高土壤的稳定性,还能通过截留降水和阻碍地表水的冲刷进而直接保护地表,降低土壤侵蚀量^[16]。此外,植被的存在能较大程度减小地表温度的变化程度,减小岩土体的温差,从而减弱冻融循环作用强度及其对土体的破坏。因此植被盖度较大的地区在一定程度上可以减弱冻融侵蚀作用^[4]。植被盖度的计算采用 1 000 m 分辨率的 MODIS NDVI 数据(2000—2015 年)。本研究中植被盖度计算公式为:

$$FVC = \left(\frac{NDVI - NDVI_{soil}}{NDVI_{soil} - NDVI_{veg}} \right)^l \quad (2)$$

式中:FVC——植被覆盖度; $NDVI_{veg}$ ——全植被覆盖情况下像元值(置信区间为 0.995); $NDVI_{soil}$ ——全裸土情况下像元值(置信区间为 0.005); l ——经验因子,在此取值 1.1。

1.3 数据来源

DEM 数据采用 90 m 分辨率的 STRM-DEM 数据,该数据集来源于中国科学院计算机网络信息中心

国际科学数据镜像网站 (<http://datamirror.csdb.cn>); 风向风速、降水量、气温数据来自气象站点数据 (755 气象站点), 该数据集来源于中国气象科学数据共享服务网 (<http://cdc.cma.gov.cn/home.do>), 而降水插值站点数据则基于 TRMM3 B42 数据获取, 该数据集空间分辨率为 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$, 数据格式为 NetCDF, 来自美国 NASAGoddard 数据分发中心 DAAC(Distributed Active Archive Center) (<http://trmm.gsfc.nasa.gov/>); MOIDS NDVI 数据空间分辨率为 1 000 m, 该数据集来源于中国科学院计算机网络信息中心国际科学数据镜像网站 (<http://datamirror.csdb.cn>)。

1.4 研究方法

1.4.1 冻融侵蚀区范围界定方法 冻融侵蚀区是指具有强烈冻融作用的寒冷气候条件, 同时有典型的冻融侵蚀地貌形态表现的区域, 并且该区域的冻融作用非常普遍^[5,10]。

当前, 关于青藏高原冻融侵蚀区范围确定的研究方法很多, 其中得到普遍认可的方法是取冰缘区的下界作为冻融侵蚀区的下界, 取年平均温度 -2.5°C 线作为多年冻土带的下界, 并认为冰缘区下界比多年冻土区下界低 200 m 左右^[8]。本研究基于青藏高原及周边 160 个气象站点 (755 站点) 30 a 气温观测数据和 SRTM-DEM 数据 (纬度、经度及海拔) 利用回归方程计算出年均温 -2.5°C 的海拔, 进而得出冻融侵蚀区的下界海拔, 最后提取准冻融侵蚀区的基本范围, 再从中剔除沙漠化区和冰川区, 就可得到青藏高原冻融侵蚀区的范围。所得回归方程 (通过 $p=0.05$ 的

显著性检验) 为:

$$H = \frac{66.303 - 0.920X - 0.144Y + 2.5}{0.005596} - 200 \quad (3)$$

式中: H ——冻融侵蚀区下界海拔高度 (m); X ——纬度 ($^{\circ}$); Y ——经度 ($^{\circ}$)。

1.4.2 冻融侵蚀强度评价方法 综合指数评价法是将不同的评价指标进行叠加进行综合计算, 得到一个综合性的评价指数^[3-4,7]。国内外针对土壤冻融侵蚀定量研究多采用分级赋权重评价模型, 该评价模型首先选取不同的指标构建一个综合评价体系, 然后对选取的各冻融侵蚀因子进行等级划分, 确定体系内不同指标的权重值, 最后叠加计算形成一个加权综合指数^[4], 其计算公式为:

$$FT = \frac{\sum_{i=1}^n W_i I_i}{\sum_{i=1}^n W_i} \quad (4)$$

式中: FT ——冻融侵蚀综合评价指数; W_i ——各指标权重; I_i ——分级后冻融指标; n ——采用冻融侵蚀评价因子数量。评价指数越大, 冻融侵蚀越强烈。

2 冻融侵蚀强度评价

2.1 冻融侵蚀评价指标分级及其权重确定

选取冻融日循环天数、冻融期降水量、冻融期降雨侵蚀力、冻融期风场强度、坡度、坡向和植被覆盖度 7 个指标构建了青藏高原冻融侵蚀强度评价体系, 然后根据各指标数据的直方图分布与取值情况, 参照前人的研究成果^[3-4,7,13] 和第一次全国水利普查冻融侵蚀研究调查评价方法, 基于 AHP 层次分析法确定了各指标的等级赋值标准和权重赋值方案 (表 1)。

表 1 各指标的等级赋值标准和权重赋值

评价指标	赋值标准					权重
	1	2	3	4	5	
冻融日循环天数/d	≤ 100	100~160	160~220	220~270	≥ 270	0.15
冻融期降水量/mm	≤ 50	50~100	100~200	200~300	≥ 300	0.15
冻融期风场强度/d	≤ 5	5~10	10~15	15~20	≥ 20	0.10
冻融期降雨侵蚀力	≤ 100	100~250	250~550	550~1 000	$\geq 1 000$	0.10
坡度/ $^{\circ}$	≤ 3	3~8	8~15	15~24	≥ 24	0.25
坡向	0~36	36~72	72~108	108~144	144~216	0.05
	324~360	288~324	252~288	216~252		
植被覆盖度	≥ 80	60~80	40~60	20~40	≤ 20	0.20

2.2 冻融侵蚀评价结果验证

基于 ArcGIS 10.2 软件利用综合指数评价法对各评价指标分级数据进行加权求和, 得到青藏高原冻融侵蚀强度指数。为了便于后续的冻融侵蚀空间格局分

析, 本文基于冻融侵蚀强度指数的直方图分布结合野外观测数据, 利用 ArcGIS 10.2 的 Natural Breaks 方法对计算数据进行分级处理, 分级标准详见表 2, 最终得到青藏高原冻融侵蚀强度的分级图 (图 1)。

表 2 冻融侵蚀强度分级

冻融侵蚀强度等级	微度侵蚀	轻度侵蚀	中度侵蚀	重度侵蚀	剧烈侵蚀
冻融侵蚀强度指数	≤ 2.3	2.3~2.6	2.6~3	3~3.3	≥ 3.3

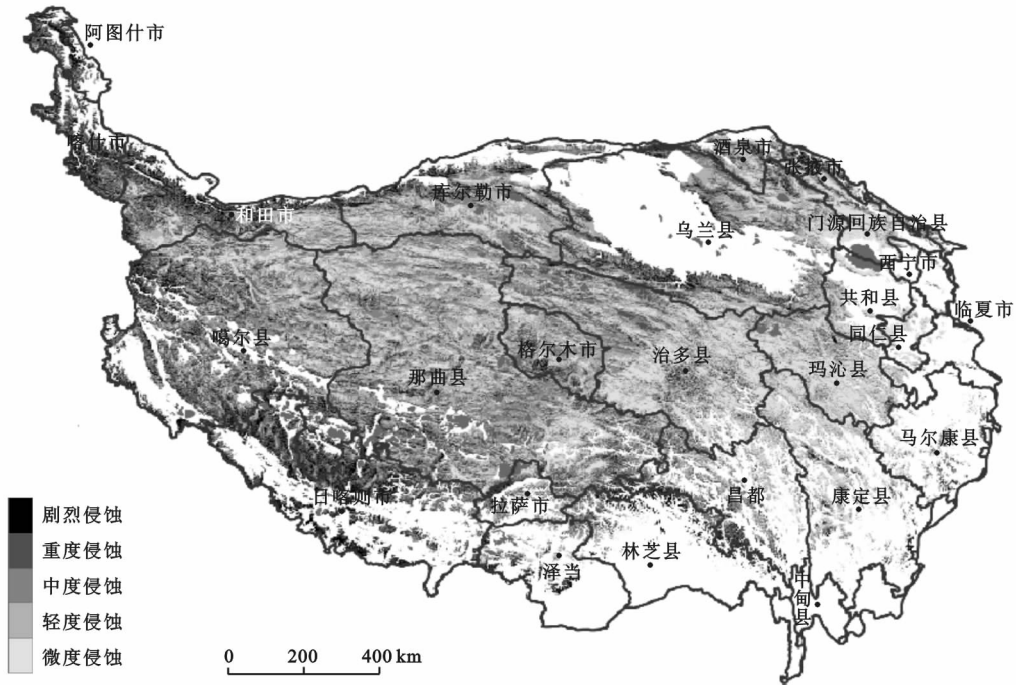


图 1 青藏高原冻融侵蚀强度的分级

从不同土地利用、不同植被类型、不同地形地貌上(保证野外实测数据的有效性)选取了 278 个野外实测(2013 年)(表 3)与评价结果构建了错误矩阵,分析了冻融侵蚀评价结果的精度,分析发现(表 4):不同冻融侵蚀强度等级的评价精度略有差异,但是总体评价精度较高,为 92%;其中,微度侵蚀区的评价精

度最高,为 96%,其次为轻度侵蚀区,评价精度为 93%,而剧烈侵蚀区的评价精度最低,为 79%,其原因在于在剧烈侵蚀区和重度侵蚀区的野外验证点较少,影响了该侵蚀等级评价结果的验证精度。综上分析,总体的评价精度表明本研究所构建的冻融侵蚀评价模型在青藏高原地区具有较高的适用性。

表 3 野外验证点分布

项目	各侵蚀等级					总数
	微度侵蚀	轻度侵蚀	中度侵蚀	重度侵蚀	剧烈侵蚀	
微度侵蚀	82	1	1	1	0	85
轻度侵蚀	2	94	3	1	1	101
中度侵蚀	1	3	35	0	0	38
重度侵蚀	1	1	1	35	2	40
剧烈侵蚀	1	1	0	1	11	14
总数	87	100	40	38	14	278

表 4 各侵蚀级别评价精度

精度验证	%				
	微度侵蚀	轻度侵蚀	中度侵蚀	重度侵蚀	剧烈侵蚀
评价精度	96	93	92	88	79

3 冻融侵蚀强度空间格局分析与讨论

青藏高原冻融侵蚀面积分布广泛(详见图 1),其面积为 $1.64 \times 10^6 \text{ km}^2$,占青藏高原总面积的 63.68%,主要分布于昆仑山、喀喇昆仑山、藏北高原、雅鲁藏布江流域中上游、阿里高原、冈底斯山、巴颜喀

拉山、祁连山等地区;其中轻度侵蚀区面积最广,面积为 $5.124 \times 10^5 \text{ km}^2$ (图 2),主要分布于那曲县中北部、治多县北部、噶尔县北部以及库尔勒市南部,其主要原因在该地区地势较为平缓,地形坡度较小,草地、草甸广布,植被盖度较高,降水稀少,土壤含水量低,导致冻融循环作用较弱;其次为重度侵蚀区,面积为

$3.614 \times 10^5 \text{ km}^2$, 主要分布于噶尔县的中西部、日喀则市北部以及乌兰县的北部和南部边缘地区, 这与以上地区的地形、气温和植被覆盖度相关; 微度侵蚀区和中度侵蚀区面积分别为 $3.444 \times 10^5 \text{ km}^2$ (分布于玛沁县、康定县北部、治多县南部、门源回族自治县), $3.161 \times 10^5 \text{ km}^2$ (分布于噶尔县西部、那曲县南部); 剧烈侵蚀区面积最小, 为 $1.051 \times 10^5 \text{ km}^2$, 主要分布于阿图什市西部、喀什市、和田市北部、日喀则市北部以及林芝县北部, 其分布格局主要受地形和植被覆盖状况影响。而非冻融侵蚀区则主要分布于柴达木盆地、雅鲁藏布江流域下游以及横断山区, 其原因在于主要是以上地区海拔高度较低, 年平均气温较高, 冻融侵蚀特征不明显。

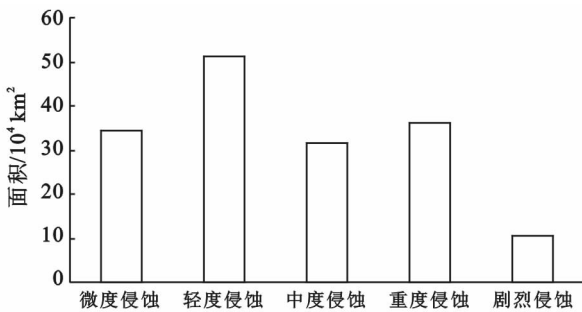


图 2 研究区不同侵蚀强度级别面积

3.1 不同流域冻融侵蚀侵蚀强度分析

为了更深入分析青藏高原的冻融侵蚀空间分布特征, 本研究选取了 6 个典型二级流域探讨了冻融侵蚀在流域尺度上的空间分异格局(表 5)。结果表明: (1) 羌塘高原内陆河流域的冻融侵蚀面积最广, 面积为 $6.726 \times 10^5 \text{ km}^2$; 其次为金沙江石鼓以上流域, 面积为 $1.604 \times 10^5 \text{ km}^2$; 随后为雅鲁藏布江流域, 侵蚀面积为 $1.087 \times 10^5 \text{ km}^2$; 而冻融侵蚀分布面积最小的流域则为藏南诸河流域, 面积为 $2.400 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。从

侵蚀区占流域总面积比例上分析: 羌塘高原内陆河流域的侵蚀面积百分比最大, 为 91.89%, 主要原因在于该流域平均海拔较高, 气温低, 气温较差大, 寒冻风化剥蚀和融冻泥流等冻融侵蚀作用普遍; 其次为金沙江石鼓以上和塔里木河河源流域, 其面积百分比分别为 75.88% 和 69.85%, 主要原因在于以上两个流域内山地广布, 地势陡峻, 坡度较大, 冻融侵蚀过程较强烈; 而冻融侵蚀区所占面积比例最小的流域是藏南诸河流域, 为 16.97%, 与该流域内植被盖度较高, 气温较差低, 坡度较小相关。(2) 通过对比青藏高原的 6 个典型二级流域的侵蚀强度可以发现各流域的冻融侵蚀构成比例存在显著差异(图 3): 其中金沙江石鼓以上流域的微度侵蚀和轻度侵蚀面积分布最广, 占侵蚀面积的比例分别为 36.28%, 29.27%; 藏南诸河流域的剧烈侵蚀和重度侵蚀面积比例最大, 分别为 40.42%, 36.25%; 澜沧江流域的微度侵蚀和轻度侵蚀面积最广, 所占比例分别为 34.41%, 32.80%; 塔里木河河源流域中的重度和剧烈侵蚀区分布面积最广, 占侵蚀面积的比例分别为 44.21%, 24.21%; 羌塘高原内陆河流域的轻度和中度侵蚀区面积所占比例最大, 分别为 36.66%, 22.55%; 而雅鲁藏布江流域的重度和剧烈侵蚀区面积分布最广, 所占面积比例分别为 39.74%, 20.42%。综上分析发现, 微度和轻度侵蚀区面积所占比例较大的流域为澜沧江和金沙江石鼓以上流域, 其主要原因在于以上流域的植被盖度高, 气温年较差较小, 冻融循环作用较弱。重度和剧烈侵蚀区所占面积比例较大的流域为藏南诸河、雅鲁藏布江和塔里木河河源流域, 其主要原因在于藏南诸河流域和雅鲁藏布江流域的地形起伏度较大, 坡度陡峻, 冻融期降雨和降雨侵蚀力大, 冻融侵蚀地貌发育显著, 而塔里木河河源流域的冻融期风场强度较大, 植被覆盖度低, 岩土体表面白天在太阳辐射下强烈升温融化, 夜间急速降温冻结, 导致该区域冻融侵蚀强度较高。

表 5 不同流域侵蚀情况对比

流域及编号	流域总面积	侵蚀总面积	10^4 km^2				
			微度侵蚀	轻度侵蚀	中度侵蚀	重度侵蚀	剧烈侵蚀
1 金沙江石鼓以上*	21.14	16.04	4.76	5.82	3.19	2.09	0.18
2 藏南诸河	14.14	2.40	0.12	0.20	0.24	0.87	0.97
3 澜沧江*	8.31	4.97	1.71	1.63	0.84	0.69	0.10
4 塔里木河河源*	10.88	7.6	0.33	0.94	1.13	3.36	1.84
5 羌塘高原内陆河	73.19	67.26	11.47	24.66	15.17	13.35	2.61
6 雅鲁藏布江流域	24.46	10.87	0.79	1.8	1.74	4.32	2.22

注: * 表示该流域在青藏高原内部的部分。

3.2 不同坡度冻融侵蚀强度分析

不同坡度上的冻融侵蚀构成比例差异显著。由

图 4 可以知道, $15^\circ \sim 24^\circ$ 和 $\geq 24^\circ$ 坡度带上剧烈侵蚀区占绝对优势, 其所占侵蚀总面积百分比分别为

64.37%, 94.55%; 而 $8^{\circ}\sim 15^{\circ}$ 坡度带上重度侵蚀区分布面积最广, 其面积百分比为 51.79%, 其次为剧烈侵蚀区, 其面积百分比为 21.57%, 微度和轻度侵蚀区分布面积较小; $3^{\circ}\sim 8^{\circ}$ 坡度带上重度侵蚀区所占面积比例最大, 其次为轻度侵蚀区, 其比例分别为 32.83%, 29.07%; 微度和轻度侵蚀区在 $\leq 3^{\circ}$ 坡度带上分布面积最大, 分别为 37.38%, 43.02%。综上分析发现, 青藏高原冻融强度随着坡度的上升而增加, 坡度越大, 重度和剧烈侵蚀区所占侵蚀面积百分比越大, 其原因在于坡度与冻融侵蚀量和侵蚀位移的大小具有较大的正相关性, 坡度越大, 冻融侵蚀产物被输送的就越多越远^[14]。因此, 在降水和重力的综合作用下, 坡度较大的地区其冻融侵蚀程度会大大提高。

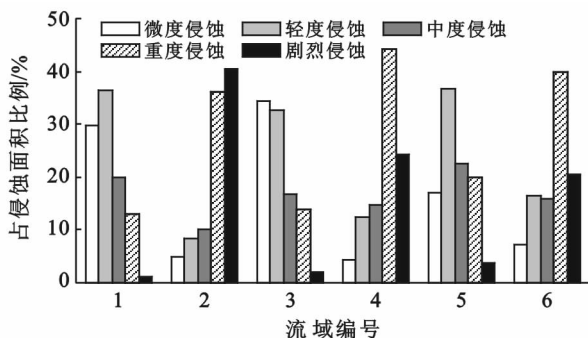


图3 各流域不同等级侵蚀强度对比

3.3 不同植被类型冻融侵蚀强度分析

植被可以保护地表, 减弱冻融作用的强度及其对土体的破坏, 因此不同植被类型区的冻融侵蚀强度空间分布格局差异显著, 分析结果发现(图5), 针叶林区的微度和轻度侵蚀区分布面积最广, 所占面积百分比分别为 23.4%, 29.36%; 阔叶林的重度和轻度侵蚀区的面积百分比最大, 分别为 27.03%, 21.62%; 灌丛的轻度侵和重度侵蚀区面积较大, 而剧烈侵蚀区分布面积较小; 荒漠和草原的轻度和中度侵蚀区占绝对优势, 其面积百分比(轻、中之和)分别为 55.09%, 56.07%; 草甸区的微度和轻度侵蚀区面积分布较大, 占侵蚀总面积的 62.17%, 而剧烈侵蚀区分布面积最小; 农作物的轻度侵和重度侵蚀区面积较大, 其面积百分比分别为 26.09%, 30.43%。综上分析发现: 草甸的冻融侵蚀强度最小, 其原因在于该区的植被覆盖度较高(植物根系对土壤的固结作用、冠层阻碍地表水的冲刷作用), 加上草甸区的坡度平缓, 因而冻融侵蚀强度较弱; 而阔叶林和农作物的冻融侵蚀强度相对较大, 其原因在于阔叶林区地形起伏较大, 降水较多, 冻融期降雨侵蚀力较大, 加行人类活动强度日益增大(乱砍乱伐等), 植被遭到较大的破坏, 因而该区冻融

侵蚀强度较大, 而农作物区的冻融侵蚀强度较大则主要是受人类活动的影响, 如开挖边坡等, 一系列的开发活动形成的冻融侵蚀常引发大型滑塌。

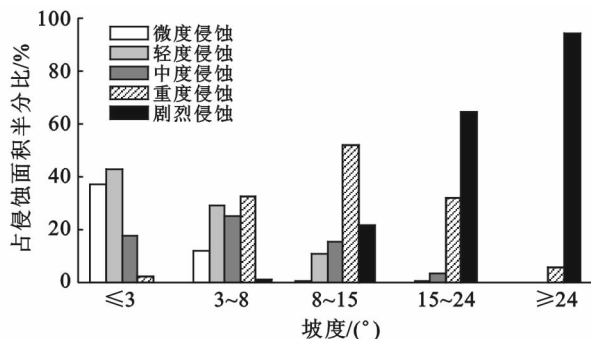


图4 各坡度带不同等级侵蚀强度对比

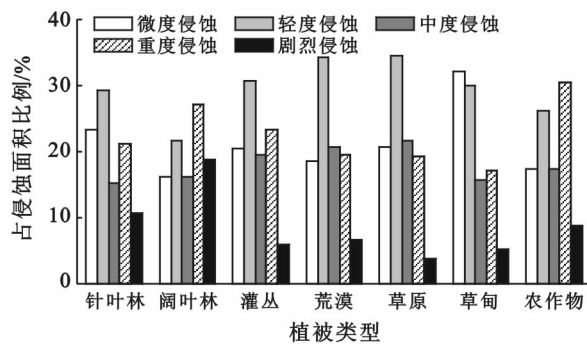


图5 各植被类型区不同等级侵蚀强度对比

4 结论

(1) 改进后的冻融侵蚀评价模型在青藏高原具有较高的适用性, 其总体评价精度达到 92%, 其中微度侵蚀区的评价精度最高, 为 96%。

(2) 青藏高原冻融侵蚀面积分布广泛, 为 $16.394 \times 10^5 \text{ km}^2$, 占总面积的 63.68%, 而非冻融侵蚀区则主要分布于柴达木盆地、雅鲁藏布江流域下游以及横断山区。澜沧江和金沙江石鼓以上流域的微度和轻度侵蚀区面积所占比例较大, 而藏南诸河、雅鲁藏布江和塔里木河源流域的重度和剧烈侵蚀区面积分布最广。

(3) 冻融侵蚀强度随着坡度的上升而增加; $15^{\circ}\sim 24^{\circ}$ 和 $\geq 24^{\circ}$ 坡度带上剧烈侵蚀区占绝对优势; 微度和轻度侵蚀区在 $\leq 3^{\circ}$ 坡度带上分布面积最大。

(4) 不同植被类型区的冻融侵蚀强度空间分布格局差异显著: 草甸的冻融侵蚀强度最小, 而阔叶林和农作物的冻融侵蚀强度相对较大。

(5) 尽管本研究构建的冻融侵蚀评价模型在青藏高原具有很好的使用性, 然而冻融侵蚀机理的研究尚处于探索阶段, 特别是随着全球气候变化及国民经济的快速发展, 对冻融侵蚀机理和评价体系研究的

需求日益迫切,后续的研究需要从理论上有所突破,为冻融侵蚀区的水土保持和生态环境建设等提供科技支撑。

[参 考 文 献]

- [1] 刘淑珍,刘斌涛,陶和平,等.我国冻融侵蚀现状及防治对策[J].中国水土保持,2013(10):41-44.
- [2] 张建国,刘淑珍.西藏冻融侵蚀空间分布规律[J].水土保持研究,2008,15(5):1-6.
- [3] 史展,陶和平,刘斌涛,等.基于GIS的三江源区冻融侵蚀评价与分析[J].农业工程学报,2012,28(19):214-221.
- [4] Guo Bing, Zhou Yi, Wang Shixin, et al. An estimation method of soil freeze-thaw erosion in the Qinghai-Tibet Plateau [J], *Natural Hazards*, 2015,78(3):1843-1853.
- [5] 范吴明,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.
- [6] 王随继.黄河中游冻融侵蚀的表现方式及其产沙能力评估[J].水土保持通报,2004,24(2):1-5.
- [7] 李辉霞,刘淑珍,钟祥浩,等.基于GIS的西藏自治区冻融侵蚀敏感性评价[J].中国水土保持,2005(7):44-46.
- [8] Zhang Jianguo, Liu Shuzhen, Yang Siqian. The classification and assessment of freeze-thaw erosion in Tibet [J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2007, 4(2):165-174.
- [9] Zhang Jianguo, Yang Yonghong, Liu Shuzhen. Classification and assessment of freeze-thaw erosion in Tibet, China [J]. *Wuhan University Journal of Natural Sciences*, 2005,10(4):635-640.
- [10] Demidov V V, Ostroumov V Y, Nikitishena I A, et al. Seasonal freezing and soil erosion during snowmelt [J]. *Eurasian Soil Science*, 1995,28(10):78-87.
- [11] Eigenbrod K D. Effects of cyclic freezing and thawing on volume changes and permeabilities of soft fine grained soils [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1996, 33(4):529-537.
- [12] Sharratt B S, Lindstrom M J, Benoit G R, et al. Run-off 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.
- [13] 吴万贞,刘峰贵.三江源地区冻融侵蚀动力分析及其分布特点 [J]. 青海师范大学学报:自然科学版,2010,26(1):57-61.
- [14] 景国臣,任宪平,刘丙友,等.黑龙江省冻融侵蚀形式及其危害 [J]. 中国水土保持科学,2003,1(3):99-101.
- [15] 李瑞平,史海滨,赤江刚夫,等.冻融期气温与土壤水盐运移特征研究 [J]. 农业工程学报,2007,23(4):70-74.
- [16] 施建成,蒋玲梅,张立新.多频率多极化地表辐射参数化模型 [J]. 遥感学报,2006,10(4):502-514.
- [17] 盛煜,李静,吴吉春,等.基于GIS的疏勒河流域上游多年冻土分布特征 [J]. 中国矿业大学学报,2010,39(1):32-39.
- [18] 李成六,马金辉,唐志光,等.基于GIS的三江源区冻融侵蚀强度评价 [J]. 中国水土保持,2011(4):41-43.
- [19] Zhao Tianjie, Zhang Lixin, Jiang Lingmei, et al. A new soil freeze/thaw discriminant algorithm using AMSR-E passive microwave imagery [J]. *Hydrological Processes*, 2011,25(11):1704-1716.
- [20] 张建国,刘淑珍,范建容.基于GIS的四川省冻融侵蚀界定与评价 [J]. 山地学报,2005,23(2):248-253.
- [12] 崔大练,马玉心,石戈,等.紫穗槐幼苗叶片对不同于旱梯度胁迫的生理生态响应 [J]. 水土保持研究,2010,17(2):178-185.
- [13] 王瑾,毕银丽,邓穆彪,等.丛枝菌根对采煤沉陷区紫穗槐生长及土壤改良的影响 [J]. 科技导报,2014,32(11):26-32.
- [14] 岳辉,毕银丽, Zhakypbek Y, 等.接种菌根对神东矿区采煤沉陷地的生态修复效应 [J]. 科技导报,2012,30(36):56-60.
- [15] 李少朋,毕银丽,孔维平,等.丛枝菌根真菌在矿区生态环境修复中应用及其作用效果 [J]. 环境科学,2013,34(11):455-4459.
- [16] Jr D D, Nagahashi G, Pfeffer P E, et al. On-farm production of AM fungus inoculum in mixtures of compost and vermiculite [J]. *Bioresource Technology*, 2006, 97(6):809-818.

(上接第5页)