

文章编号: 1674-2869(2017)03-0288-08

基于USLE模型的祁连山南坡土壤侵蚀现状评价

魏兰香^{1,2}, 曹广超^{1*}, 曹生奎^{1,2}, 袁杰^{1,2}, 吴成永^{1,2}

1. 青海省自然地理与环境过程重点实验室, 青海 西宁 810008;
2. 青海师范大学生命与地理科学学院, 青海 西宁 810008

摘要: 借助“3S”技术, 应用USLE模型, 对祁连山南坡土壤侵蚀现状进行了定量评估, 分析了高程、坡度、植被覆盖度等土壤侵蚀的主要影响因子, 得到了土壤侵蚀的空间分布特征. 结果显示: 2014年祁连山南坡土壤侵蚀量为 1.54×10^7 t/a, 侵蚀面积为 2.21×10^4 km². 从面积来看, 以微度侵蚀为主, 占土壤侵蚀总面积的70.43%; 从侵蚀量来看, 以轻、中度侵蚀为主, 占总侵蚀量的87.67%; 强度侵蚀和极强度侵蚀面积及其侵蚀量所占比例均极小, 无剧烈侵蚀; 从空间分布来看, 微度侵蚀多分布在山体之间地势平坦区域, 轻度侵蚀及以上级别主要分布在托勒山、走廊南山、冷龙岭、大通山及其托勒南山沿线. 坡度、植被覆盖度、海拔与土壤侵蚀模数相关性显著, 土壤侵蚀级别与侵蚀量随着海拔和坡度的增加而上升, 随植被覆盖度的增加而下降.

关键词: 3S技术; 土壤侵蚀; USLE模型; 祁连山南坡

中图分类号: P951 文献标识码: A doi: 10.3969/j.issn.1674-2869.2017.03.014

Soil Erosion in Southern Slope of Qilian Mountains Based on Universal Soil Loss Equation Model

WEI Lanxiang^{1,2}, CAO Guangchao^{1*}, CAO Shengkui^{1,2}, YUAN Jie^{1,2}, WU Chengyong^{1,2}

1. Qinghai Province Key Laboratory of Physical Geography and Environmental Process, Xining 810008, China;
2. College of Life and Geographical Sciences, Qinghai Normal University, Xining 810008, China

Abstract: This paper assesses quantitatively the current situation of the soil erosion in the southern slope of Qilian Mountains, using technologies of the remote sensing, geographical information system and global positioning system, and universal soil loss equation model. The spatial distribution characteristics of soil erosion were obtained by analyzing the main influencing factors of soil erosion such as elevation, slope, vegetation coverage. The result shows that the erosion amount is 1.54×10^7 t/a and the erosion areas are 2.21×10^4 km² in the southern slope of Qilian Mountains in 2014. The slight erosion accounts for 70.43% of the total soil erosion areas, and the erosion amount of mild and moderate erosion accounts for 87.67% of the total. The proportion of the intensive and extremely intensive erosion areas and their erosion amount only takes a small amount; furthermore, there is no severe erosion. Most of slight erosion distributes in the flat terrain between the mountains while the mild erosion and above mainly distribute in the Tuole Mountain, Zoulang Nanshan, Lenglongling, Datong Mountain and along the Tuole Nanshan. The erosion modulus has a significant correlation with slope grade, vegetation coverage and elevation. The level and the amount of soil erosion rise with the increasing of elevation and slope while they decline as vegetation coverage increases.

Keywords: “3S” technology; soil erosion; USLE model; southern slope of the Qilian Mountains

收稿日期: 2016-12-29

基金项目: 国家自然科学基金(41361005); 青海省科技厅项目(2015-Z-Y01)

作者简介: 魏兰香, 硕士研究生. E-mail: lanweixiang@163.com.

*通讯作者: 曹广超, 博士, 教授. E-mail: caoguangchao@qhnu.edu.cn

引文格式: 魏兰香, 曹广超, 曹生奎, 等. 基于USLE模型的祁连山南坡土壤侵蚀现状评价[J]. 武汉工程大学学报, 2017, 39(3): 288-295.

WEI L X, CAO G C, CAO S K, et al. Study on soil erosion in the southern slope of qilian mountains based on the usle model[J]. Journal of Wuhan Institute of Technology, 2017, 39(3): 288-295.

土壤侵蚀是由水力和风力作用引起的土壤颗粒的分离与搬运过程,会造成破坏土地资源、降低土壤肥力、制约粮食生产增长等一系列的生态问题^[1]. 作为影响区域内土壤结构和生态环境的重要因素,土壤侵蚀研究受到国内外专家学者关注. 土壤侵蚀自研究以来,在研究范围上经历了较微观的尺度(坡面和小流域)到区域尺度的变化;从研究成果上经历了从定性研究到定量研究的转变. 目前,计算土壤侵蚀的国内外模型主要有USLE^[2] (universal soil loss equation, USLE)、WEPP^[3] (water erosion prediction project, WEPP)、EUROSEM^[4] (the european soil erosion model, EUROSEM)、LISEM^[5] (limburg soil erosion model, LISEM)模型、RUSLE^[6] (revised universal soil loss equation, RUSLE)等模型. 将土壤质地、降水、植被、坡度、坡长及人类活动干扰等影响因素考虑在内的USLE模型是为评价某地区多年平均土壤侵蚀量而设计的^[7],此模型积累了丰富的经验数据并且在世界各地都做了本土化的修正,它是全球应用最为广泛的土壤侵蚀模型. 此模型在20世纪70年代中期引入我国,经过近40年的消化、改进、发展和应用,目前我国已建立起具有自己特色的USLE模型并在国内得到广泛的应用^[8-10].

祁连山南坡的水源涵养林和草原植被对增强水源涵养功能、减少荒漠化、保护冰川、调节气候、保护生物多样性和供水发挥着重要的作用,对促进区域可持续发展具有极为重要的生态地位. 但对其生态环境有重要影响的土壤侵蚀现状缺乏相关研究. 本文利用“3S”技术(遥感技术(remote sensing, RS)、地理信息系统(geographical information system, GIS)、全球定位系统(global positioning system, GPS)),结合USLE模型对祁连山南坡土壤侵蚀现状进行了综合研究和系统评价,以期了解土壤侵蚀的空间分布特征,从而为区域土壤保持和水土流失防治提供理论依据和技术支持.

1 研究区域概况

祁连山南坡(见图1)地处青海省东北部,地理位置介于东经98°14'~102°64',北纬37°05'~39°09',总面积为2.38×10⁴ km². 该区域属典型的高原大陆性气候^[11]. 其降水特征不但受海拔高度的影响,而且受所处的纬度、经度以及地形的坡向和坡度的影响,每年5~9月份为降雨量最大的季节. 该区水资源丰富,大小河流呈树枝状散开,主要包括黑河与大通河两大流域水系^[11]. 植被主要以草地为主、林地为辅.

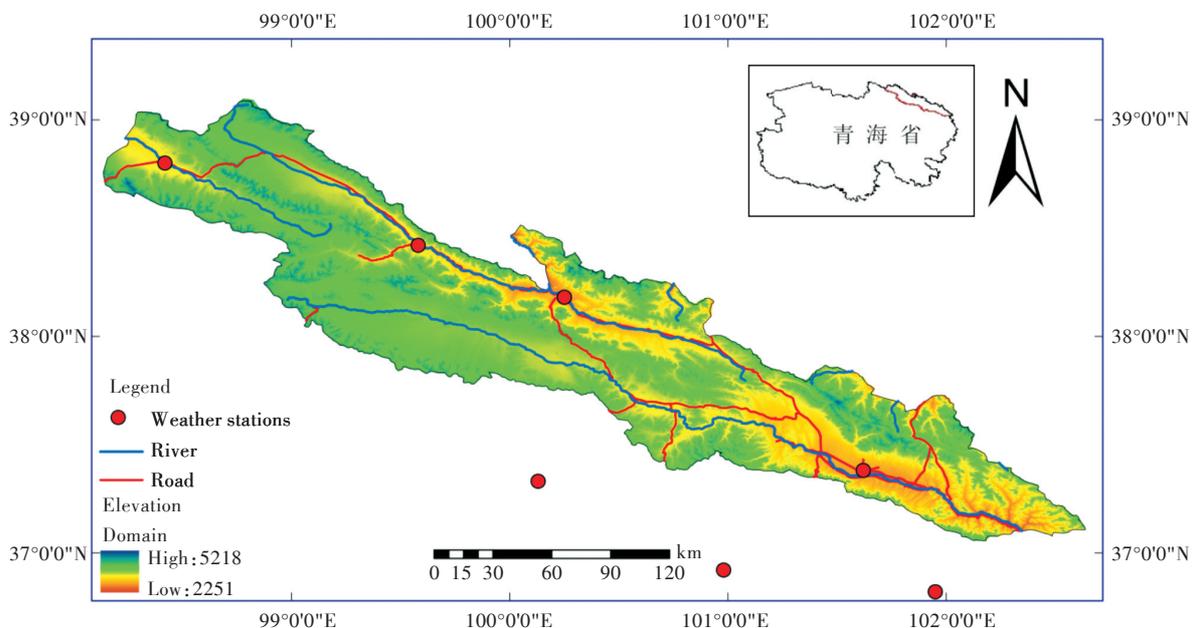


图1 研究区域概况图

Fig. 1 Overview diagram of study area

2 数据与方法

2.1 数据来源

本文所使用的原始数据主要包括2014年

Landsat8影像数据、DEM(digital elevation model, DEM)数据(分辨率:30 m)、青海省土壤图、2014年气象数据(见表1).

表 1 数据来源
Tab. 1 Resources of data

名称 name	文件格式 format	来源 source
DEM 数据	IMG	http://www.gscloud.cn
Landsat8 影像数据	GeoTIFF	http://www.gscloud.cn
气象数据	TXT	青海省气象局
1:100 万青海省土壤图	SHP	青海省地矿测绘院

2.2 研究方法

选取美国学者 Smith 和 Wischmeier 于 20 世纪 50 年代提出的通用土壤流失方程 (USLE)^[9] (见公式 1), 通过提取模型中的降雨侵蚀力因子、土壤侵蚀力因子、坡度及坡长因子、植被覆盖因子、水土保持因子六因子, 将各因子连乘, 可以得到研究区 2014 年土壤侵蚀级别分类图 (计算获得的 USLE 各因子空间分布及土壤侵蚀分级如图 2 所示)。

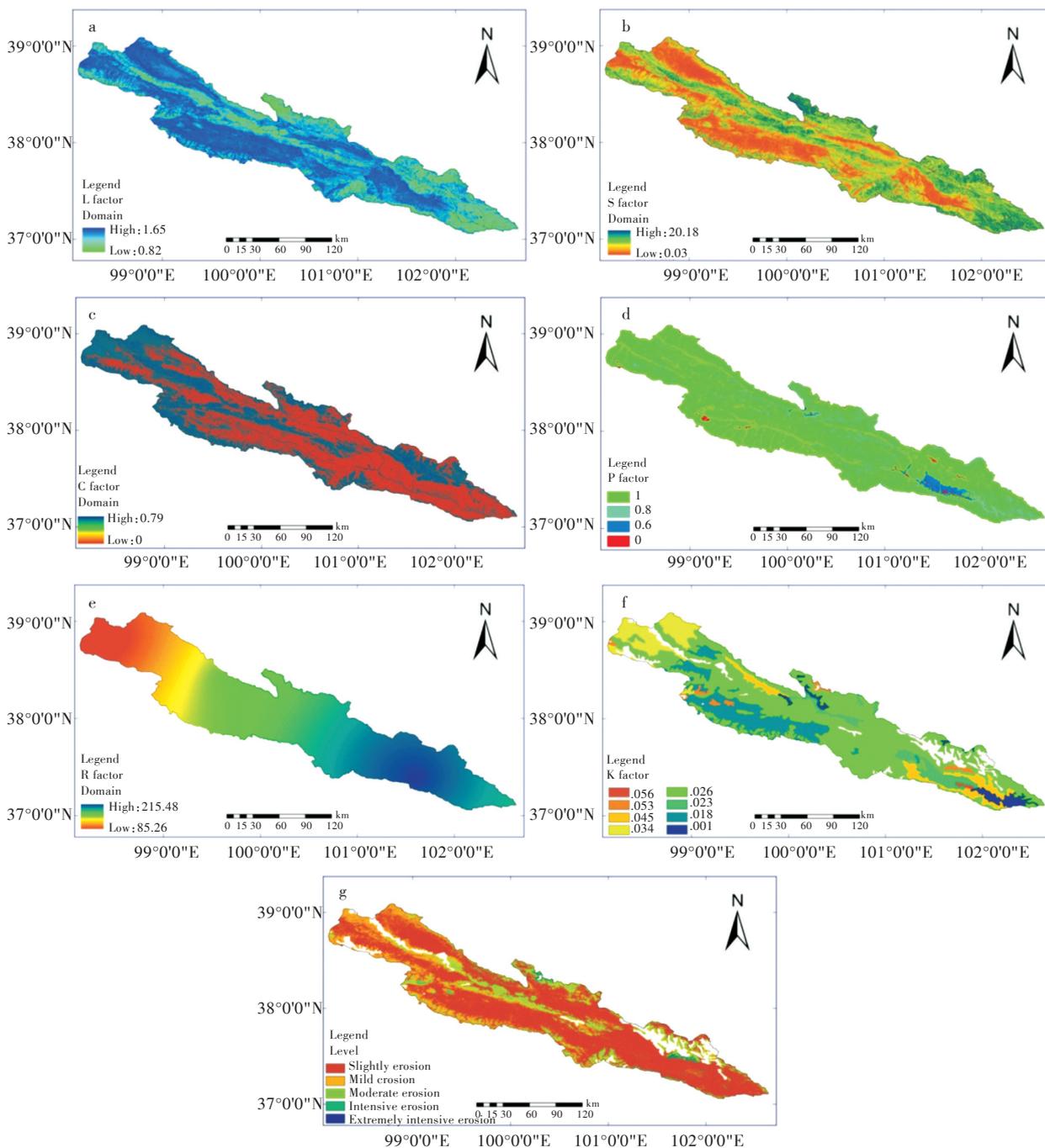


图 2 土壤侵蚀分级及各因子 (a)坡长因子; (b)坡度因子; (c)植被覆盖因子; (d)水土保持因子; (e)降雨侵蚀力因子; (f)土壤侵蚀力因子; (g)土壤侵蚀级别分类

Fig. 2 Level of soil erosion and factors (a) Length of slope factor; (b) Slope factor; (c) Vegetation coverage factor; (d) Soil and water conservation factor; (e) Rainfall erosivity factor; (f) Soil erosivity factor; (g) Classification of soil erosion level

通过将土壤侵蚀量栅格图分别与坡度、植被覆盖度、高程栅格图叠加,通过掩膜提取工具,获得祁连山南坡不同坡度、植被覆盖度、海拔下的土壤侵蚀面积和侵蚀量。

$$A=R \cdot K \cdot L \cdot S \cdot C \cdot P \quad (1)$$

式(1)中: A 为年土壤流失量,单位是 $t/(hm^2 \cdot a)$; R 为降雨侵蚀力因子,单位为 $[MJ \cdot mm/(hm^2 \cdot h \cdot a)]$; K 为土壤侵蚀力因子,单位是 $[t \cdot h/(MJ \cdot mm)]$; L 和 S 分别为坡长、坡度因子; C 为植被覆盖因子, P 为水土保持因子, L 、 S 、 C 和 P 均为无量纲。

2.2.1 坡度因子和坡长因子估算 坡度因子和坡长因子由数字高程模型 DEM 计算而来。由于精确获得每个网格的点的坡长值是不可能的^[12],刘宝元等在京津风沙源治理水土蚀研究中,调查统计发现坡长和坡度呈负相关,即坡长随坡度的变大而变小,根据野外调查规定^[9]:坡度在 10° 以下,坡长统一取60m;坡度在 $10^\circ \sim 15^\circ$ 之间时,坡长取50m;坡度在 $15^\circ \sim 20^\circ$ 之间时,坡长取40m;当坡度在 $20^\circ \sim 25^\circ$ 之间时,坡长取30m;坡度在 $25^\circ \sim 35^\circ$ 之间时,坡长取20m;当坡度在 35° 以上时,坡长统一取15m。本文利用ArcGIS空间分析功能下的Slope工具求得坡度值,采用式(2)和式(3)式计算 L 值和 S 值^[9]。

$$\begin{cases} S=10.80 \sin \theta+0.03 & \theta < 5^\circ \\ S=16.80 \sin \theta-0.50 & 5^\circ \leq \theta < 10^\circ \\ S=21.91 \sin \theta-0.96 & \theta \geq 10^\circ \end{cases} \quad (2)$$

$$L=\left(\frac{\lambda}{22.13}\right)^m \begin{cases} m=0.5 & \tan \theta > 0.05 \\ m=0.4 & 0.03 < \tan \theta \leq 0.05 \\ m=0.3 & 0.01 < \tan \theta \leq 0.03 \\ m=0.2 & \tan \theta \leq 0.01 \end{cases} \quad (3)$$

式(2)和式(3)中, S 为坡度因子值(无量纲); L 为

坡长因子值(无量纲); θ 为坡度值($^\circ$); λ 为水平坡长值(m); m 为坡长指数(无量纲)。

2.2.2 植被覆盖因子估算 植被覆盖因子是评价植被因素抵抗土壤侵蚀能力的重要指标。反映了植被或作物管理措施对土壤流失量的影响,其值介于0~1之间^[13],无量纲, C 值越大说明所对应土地利用类型的土壤侵蚀越严重。采用式(4)~式(5)计算 C 值^[14]。

$$f_c = (n - n_{\min}) / (n_{\max} - n_{\min}) \quad (4)$$

$$C = \begin{cases} 1 & f_c = 0 \\ 0.6508 - 0.3436 \lg f_c & 0 < f_c < 78.3\% \\ 0 & f_c \geq 78.3\% \end{cases} \quad (5)$$

式(4)和式(5)中: n 为归一化植被指数; f_c 为植被覆盖度。

2.2.3 水土保持因子 水土保持因子是指在相同条件下的一定时间内,有水土保持措施的标准小区与无水土保持措施的标准小区土壤流失量之比。水土保持因子反应实施水土保持措施后对侵蚀的减小作用,因子取值在0~1之间。对2014年Landsat8数据[LC81320342014198LGN00、LC81330332014-205LGN00、LC81330342014205LGN00、LC8134033-2014196LGN00、LC81340342014196LGN00五景影像(影像之间间隔短且含云量最少)]预处理,镶嵌、裁剪、解译(根据全国生态遥感监测土地利用与土地覆盖分类体系:见表2)得到土地利用类型图(云覆盖区域利用同年不同月份或不同年份的影像替换解译),借鉴并参照刘宝元等在《土壤侵蚀预报模型》中所确定的相应 P 值^[15](见表3)。

表2 祁连山南坡生态遥感监测土地利用与土地覆盖分类体系

Tab. 2 Classification system of land-use and land-cover through remote sensing-based ecological monitoring in southern slope of the Qilian Mountains

一级分类 primary classification	耕地 arable land	林地 forest land	草地 grass land	水域 waters	城乡、工矿、居民用地 construction land	未利用土地 unused land
二级分类	水田、旱地	有林地、灌木林、疏林地、其他林地	高覆盖度草地、中覆盖度草地、低覆盖度草地	滩涂、滩地、河渠、湖泊、水库坑塘、永久性冰川、雪地	城镇用地、农村居民点、其他建设用地	沙地、戈壁、盐碱地、沼泽地、裸土地、裸岩石砾地、其他

2.2.4 降雨侵蚀力因子 降雨侵蚀力反映了降雨引起土壤侵蚀的潜力。通过计算气象站点(祁连、海晏、托勒、野牛沟、门源、刚察、互助7个站点2014年年降雨量)年降雨量,根据伍育鹏等^[16]资料

显示,本文利用Excel,采用以下公式计算各站点 R 值,通过采取反距离加权法进行空间插值,得到 R 值栅格图像。

$$R = 0.0438 P^{1.61} \quad (6)$$

式(6)中: R 是年降雨侵蚀力($\text{MJ}\cdot\text{mm}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$), P 为年降雨量(mm).

表3 不同土地利用 P 值Tab. 3 P value of different types of land-use

土地利用类型 land-use type	P 值 P value
耕地	0.6
林草地	0.8
建设用地	0
水域	0
高覆盖度草地(>60%)	1
中覆盖度草(30%~60%)	1
低覆盖度草地(<30%)	1
难利用地	1

2.2.5 土壤侵蚀力因子 土壤侵蚀力因子是一项评价土壤被降雨侵蚀力分离、冲蚀和搬运难易程度的指标. 其值由土壤的性质决定, 本文 K 值采用刘吉峰等^[17]研究成果(研究区土壤类型包含冰山雪被、高山碎石、湖, 因以上3种特殊的土壤性质, 不会发生土壤侵蚀, 故在土壤侵蚀计算过程中, 将其扣除). K 值单位为常用公制单位: $\text{t}\cdot\text{h}/(\text{MJ}\cdot\text{mm})$.

2.2.6 土壤侵蚀强度 参照国家分类标准 SL/190—2007《土壤侵蚀分级分类标准》, 划分研究区土壤侵蚀级别^[8](见表4). 土壤侵蚀模数是表示单位面积时间内剥蚀并发生位移的土壤侵蚀量. 其单位是 $\text{t}/(\text{km}^2\cdot\text{a})$, 同时也可以采用单位时间段内的土

壤侵蚀厚度, 单位为 mm/a .

表4 土壤侵蚀强度分级标准

Tab. 4 Grading standard of soil erosion

级别 level	平均侵蚀模数 average erosion modulus / [$\text{t}/(\text{km}^2\cdot\text{a})$]	平均流失厚度 average erosion thickness / (mm/a)
微度侵蚀	<500	<0.37
轻度侵蚀	500~2.50×10 ³	0.37~1.90
中度侵蚀	2.50×10 ³ ~5.00×10 ³	1.90~3.70
强度侵蚀	5.00×10 ³ ~8.00×10 ³	3.70~5.90
极强度侵蚀	8.00×10 ³ ~1.50×10 ⁴	5.90~11.10
剧烈侵蚀	>1.50×10 ⁴	>11.10

3 结果与分析

3.1 研究区域土壤侵蚀空间分布特征

通过研究区域土壤侵蚀分级图及土壤侵蚀统计(表5). 结果显示: 祁连山南坡以微度侵蚀为主(从面积来看), 面积($1.56\times 10^4\text{ km}^2$)占土壤侵蚀总面积的70.43%, 侵蚀量($4.57\times 10^5\text{ t/a}$)仅占到侵蚀总量的2.97%, 多分布在研究区地势平坦区域; 轻($3.89\times 10^3\text{ km}^2$, 17.62%)、中度($2.42\times 10^3\text{ km}^2$, 10.95%)侵蚀面积偏小, 但轻($6.04\times 10^6\text{ t/a}$)、中度($7.42\times 10^6\text{ t/a}$)侵蚀总量占到总侵蚀量的87.67%, 轻度侵蚀及以上级别主要分布在青海省(东北部)与甘肃省交界处的走廊南山区域; 祁连县境内托勒山区域及其西南部的托勒南山区域; 门源县境内北部冷龙岭区域; 海晏县、祁连县、门源县交界处的大通山区域.

表5 土壤侵蚀统计

Tab.5 Statistics of soil erosion

级别 level	平均侵蚀模数 average erosion modulus / [$\text{t}/(\text{km}^2\cdot\text{a})$]	面积 area / km^2	面积比例 percentage of area / %	平均侵蚀模数 average erosion modulus / [$\text{t}/(\text{km}^2\cdot\text{a})$]	侵蚀量 erosion amount / (t/a)	侵蚀量比例 percentage of erosion amount / %
微度侵蚀	<500	1.56×10^4	70.43	29.38	4.57×10^5	2.97
轻度侵蚀	500~2 500	3.89×10^3	17.62	1.55×10^3	6.04×10^6	39.34
中度侵蚀	2 500~5 000	2.42×10^3	10.95	3.07×10^3	7.42×10^6	48.33
强度侵蚀	5 000~8 000	197.03	0.89	6.26×10^3	1.23×10^6	8.03
极强度侵蚀	8 000~15 000	23.92	0.11	8.58×10^3	2.05×10^5	1.34

3.2 研究区域土壤侵蚀与环境因子的关系

3.2.1 土壤侵蚀模数与坡度、植被覆盖度、高程的相关性分析 土壤侵蚀的面积、侵蚀量与坡度、植被覆盖度、海拔关系密切. 文中通过 SPSS 软件分析相关性. 研究区坡度划分依据《水土保持综合治理规划通则 GB/T15772—1995》^[10], 植被覆盖度根据水利部植被覆盖度分级标准^[10], 海拔高程范围为

2 254m~ 5 218m, 将分为<3 000m、3 000m~4 000m、4 000m~ 5 000m、>5 000m 4个海拔等级. 通过在不同土壤侵蚀模数的不同环境因子等级中各均匀取10个样点(部分样区因面积过低, 未取样), 分析坡度、植被覆盖度、高程与土壤侵蚀模数的相关性. 结果表明: 坡度、植被覆盖度、高程与土壤侵蚀模数的相关系数分别为0.802、-0.834、0.680, 在

0.01水平上相关性显著。

3.2.2 坡度与土壤侵蚀关系分析 依据标准划分坡度,不同坡度的侵蚀量、面积关系如表6所示。从发生土壤侵蚀的情况来看,微坡和较缓坡主要发生微度侵蚀和轻度侵蚀,缓坡、较陡坡主要发生微度侵蚀、轻度侵蚀、中度侵蚀、强度侵蚀。极强度侵蚀出现在陡坡、极陡坡范围内;从不同坡度侵蚀面积及侵蚀量来看,微坡($4.73 \times 10^3 \text{ km}^2$ 、21.43%)、缓坡($4.96 \times 10^3 \text{ km}^2$ 、22.48%)、较陡坡($5.16 \times 10^3 \text{ km}^2$ 、23.35%)土壤侵蚀面积占研究区土壤侵蚀总面积的比例相差不大,但其土壤侵蚀量占总土壤侵蚀

量的比例却相差较大,分别为($3.11 \times 10^5 \text{ t/a}$)2.02%、($2.34 \times 10^6 \text{ t/a}$)15.24%、($5.21 \times 10^6 \text{ t/a}$)33.95%;较缓坡($2.84 \times 10^3 \text{ km}^2$ 、12.87%)和陡坡($3.23 \times 10^3 \text{ km}^2$ 、14.62%)面积比例相差较小,但侵蚀总量分别为($4.95 \times 10^5 \text{ t/a}$)3.22%、($4.85 \times 10^6 \text{ t/a}$)31.59%;极陡坡($1.16 \times 10^3 \text{ km}^2$ 、5.25%)面积占总面积最小,但其土壤侵蚀总量比例却不是最小($2.15 \times 10^6 \text{ t/a}$ 、13.98%);从不同坡度平均侵蚀模数来看,缓坡(包含缓坡)以下平均土壤侵蚀级别为微度侵蚀,缓坡以上为轻度侵蚀。综上所述,随着坡度的增加,侵蚀级别有上升趋势且其土壤侵蚀量也逐步提高。

表6 不同坡度等级的土壤侵蚀量

Tab. 6 Amount of soil erosion of different slope levels

坡度 slope / (°)	面积 area / km ²						面积比例 percentage of area / %	平均侵蚀模数 average erosion modulus / [t / (km ² ·a)]	侵蚀量 erosion amount / (t / a)	侵蚀量 比例 percentage of erosion amount / %
	微度侵蚀	轻度侵蚀	中度侵蚀	强度侵蚀	极强度侵蚀					
	slightly erosion	mild erosion	moderate erosion	intensive erosion	extremely intensive erosion	总面积 total area				
0~5	4.71×10^3	25.63	0.00	0.00	0.00	4.73×10^3	21.43	65.64	3.11×10^5	2.02
5~8	2.35×10^3	491.33	0.00	0.00	0.00	2.84×10^3	12.87	174.14	4.95×10^5	3.22
8~15	3.31×10^3	1.59×10^3	57.21	4.69	0.00	4.96×10^3	22.48	471.70	2.34×10^6	15.24
15~25	3.01×10^3	1.29×10^3	783.86	67.25	0.00	5.16×10^3	23.35	1.01×10^3	5.21×10^6	33.95
25~35	1.61×10^3	430.34	1.10×10^3	81.73	9.55	3.23×10^3	14.62	1.50×10^3	4.85×10^6	31.59
>35	563.81	62.24	475.21	43.36	14.37	1.16×10^3	5.25	1.85×10^3	2.15×10^6	13.98

3.2.3 植被覆盖度与土壤侵蚀关系分析 依据植被覆盖度的划分标准,统计出各植被覆盖度等级下土壤侵蚀情况如表7所示。研究区植被覆盖度区域($1.48 \times 10^4 \text{ km}^2$ 、66.88%)面积最大,该区域发生微度侵蚀面积最大,侵蚀总量比例偏小($2.16 \times 10^6 \text{ t/a}$ 、14.04%),平均侵蚀模数为微度侵蚀($146.02 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$);其次是中高覆盖度区域($7.11 \times 10^3 \text{ km}^2$ 、32.20%),发生轻、中度侵蚀面积最大,侵蚀总量比例最大($1.28 \times 10^7 \text{ t/a}$ 、83.09%),平均侵蚀模数为轻

度侵蚀[$1.79 \times 10^3 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$];其他覆盖度面积、侵蚀量偏低,以发生微度侵蚀为主(植被覆盖度低于15%的裸地区域,因分布分散、像元个数偏小不能构成独立图斑,在矢量化的过程中,将其并为林地、草地、未利用土地,故其土壤侵蚀级别只有微度侵蚀;植被覆盖度30%~45%的中低覆盖,多分布于微坡的未利用土地,故土壤侵蚀度是微度侵蚀)。通过以上分析,土壤侵蚀级别及土壤侵蚀量随着植被覆盖度的升高而降低。

表7 不同植被覆盖度等级的土壤侵蚀量

Tab. 7 Amount of soil erosion of different vegetation coverage levels

植被覆 盖度 vegeta- tion cov- erage / %	面积 area / km ²						面积比例 percentage of area / %	平均侵蚀模数 average erosion modulus / [t / (km ² ·a)]	侵蚀量 erosion amount / (t / a)	侵蚀量 比例 percentage of erosion amount / %
	微度侵蚀	轻度侵蚀	中度侵蚀	强度侵蚀	极强度侵蚀					
	slightly erosion	mild erosion	moderate erosion	intensive erosion	extremely intensive erosion	总面积 total area				
<15	0.07	0.00	0.00	0.00	0.00	0.07	0.00	0.00	0.00	0.00
30~45	0.21	0.00	0.00	0.00	0.00	0.21	0.00	47.65	0.00	0.00
45~60	76.86	36.50	64.97	18.32	5.02	201.67	0.91	2.19×10^3	4.42×10^5	2.88
60~75	1.73×10^3	3.11×10^3	2.09×10^3	155.94	18.32	7.11×10^3	32.20	1.79×10^3	1.28×10^7	83.09
>75	1.37×10^4	740.18	261.92	22.77	0.58	1.48×10^4	66.88	146.02	2.16×10^6	14.04

3.2.4 海拔与土壤侵蚀关系分析 侵蚀分级面积、侵蚀量统计如表8所示. 研究区<3 000 m 高程范围内的区域面积占研究区土壤侵蚀总面积的($1.08 \times 10^3 \text{ km}^2$) 4.91%, 其土壤侵蚀量占土壤侵蚀总量的($2.75 \times 10^5 \text{ t/a}$) 1.79%, 其平均侵蚀模数为微度侵蚀($253.60 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$), 主要发生微度侵蚀; 3 000 m~4 000 m 高程范围内的区域面积占研究区土壤侵蚀总面积的($1.53 \times 10^4 \text{ km}^2$) 69.42%, 但其土壤侵蚀量只占土壤侵蚀总量的($5.69 \times 10^6 \text{ t/a}$) 37.06%, 其平均侵蚀模数为微度侵蚀($371.40 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$), 主要发生微度侵蚀; 4 000 m~5 000 m

高程范围内的区域面积占研究区土壤侵蚀总面积的($5.67 \times 10^3 \text{ km}^2$) 25.66%, 但其土壤侵蚀量却占土壤侵蚀总量的($9.39 \times 10^6 \text{ t/a}$) 61.14%, 其平均侵蚀模数为轻度侵蚀($1.66 \times 10^3 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$), 主要发生轻度侵蚀, 且轻度(含轻度)以上侵蚀面积在各高程范围内均占最大. 可见在研究区范围内随着海拔的升高, 土壤侵蚀强度级别逐渐升高, 相应的土壤侵蚀量也增加, 这与研究区特殊的地形地貌相符(平均海拔在3 000 m左右的湖盆、谷地, 平均山脉海拔在4 000 m~5 000 m之间).

表8 不同海拔等级的土壤侵蚀量

Tab. 8 Amount of soil erosion of different elevation levels

高程 elevation / m	面积 area / km^2					极强度侵蚀 extremely intensive erosion	总面积 total area	面积比例 percentage of area / %	平均侵蚀模数 average erosion modulus / [$\text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$]	侵蚀量 erosion amount / (t/a)	侵蚀量 比例 percentage of erosion amount / %
	微度侵蚀 slightly erosion	轻度侵蚀 mild erosion	中度侵蚀 moderate erosion	强度侵蚀 intensive erosion	极强度侵蚀 extremely intensive erosion						
<3 000	980.05	57.20	40.60	6.51	0.26	1.08×10^3	4.91	253.60	2.75×10^5	1.79	
3 000~ 4 000	1.29×10^4	1.44×10^3	935.67	55.29	4.03	1.53×10^4	69.42	371.40	5.69×10^6	37.06	
4 000~ 5 000	1.68×10^3	2.39×10^3	1.44×10^3	135.21	19.62	5.67×10^3	25.66	1.66×10^3	9.39×10^6	61.14	
>5 000	1.14	0.40	0.01	0.02	0.00	1.57	0.01	640.84	1×10^3	0.01	

4 结 语

利用“GIS”强大的空间分析功能, 应用国际上广泛应用的USLE模型对祁连山南坡土壤侵蚀进行了研究, 得出如下结论:

1) 祁连山南坡2014年土壤侵蚀量为 $1.54 \times 10^7 \text{ t/a}$, 平均侵蚀模数为 $695.79 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$, 土壤侵蚀面积 $2.21 \times 10^4 \text{ km}^2$. 从不同等级发生土壤侵蚀的面积和侵蚀量来看, 研究区水土保持能力情况良好, 但仍需对微度侵蚀区域持续保护, 防止破坏性的活动发生, 改变良好的生态环境. 对轻、中度侵蚀区域, 应增强植被保育、植被生态系统重建, 并严密监控, 以提高该区域土壤保持能力.

2) 研究区域内的土壤侵蚀与坡度、海拔、植被覆盖度3个环境因子相关性明显. 土壤侵蚀级别随着坡度的增加而增加, 坡度在 25° 左右的区域面积占侵蚀总面积的37.97%, 土壤侵蚀量占总侵蚀量的65.54%, 这与许月卿等人^[18-20]的研究得出的结论(坡度在 25° 左右的区域是土壤侵蚀易发生区)是相符的, 应该增强此坡度范围的植被覆盖度, 来有效减少土壤侵蚀量; 土壤侵蚀随着海拔的升高

而增加, 而随着植被覆盖度的提高而降低, 这与果超^[10]的研究成果是相符的(土壤侵蚀量也遵循此规律).

采用USLE模型评价了研究区域土壤侵蚀现状, 但其各因子计算方法大多是借鉴原有的技术和国内外相关的方法和成果来确定的, 在以后的工作中, 还应根据研究区水土流失实测结果, 尝试模型参数的本地化, 以提高估算精度.

参考文献:

- [1] 王占礼. 中国土壤侵蚀影响因素及其危害分析[J]. 山西水土保持科技, 2000, 6(2): 14-16.
WANG Z L. Analyses of affecting factors of soil erosion and its harms in China[J]. Soil and Water Conservation Science and Technology in Shanxi, 2000, 6(2): 14-16.
- [2] WISCHMEIER W H, SMITH D D. Rainfall energy and its relationship to soil loss [J]. Transactions American Geophysical Union, 1958, 39(2): 285-291.
- [3] LAFLEN J M, LANE L J, FOSTER G R. Weep: a new generation of erosion prediction technology [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1991, 46(1): 34-38.
- [4] MORGAN R P C, QUINTON J N, SMITH R E, et al.

- The european soil erosion model (eurosem): a dynamic approach for predicting sediment transport from fields and small catchments [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 1998, 23(6): 527 - 544.
- [5] DE ROO A P J, WESSELING C G, RITSEMA C J. Lisem: a single event, physically based hydrological and soil erosion model for drainage basins. I: theory, input and output [J]. *Hydrological Processes*, 1996, 10(8): 1107-1117.
- [6] ONORI F, BONIS P D, GRAUSO S. Soil erosion prediction at the basin scale using the revised universal soil loss equation (rusle) in a catchment of sicily (southern italy) [J]. *Environmental Geology*, 2006, 50(8): 1129-1140.
- [7] 李雪莹, 杨俊, 温海明, 等. 基于RUSLE模型的土壤侵蚀量估算—以辽宁省阜新市为例 [J]. *水土保持通报*, 2015, 35(1): 199-204.
- LI X Y, YANG J, WEN H M, et al. Estimation of soil erosion amount based on rusle model—a case study in fuxin city of Liaoning province [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2015, 35(1): 199-204.
- [8] 陈兴芳. 基于USLE模型的青海湖流域土壤侵蚀现状评价 [D]. 西宁: 青海师范大学, 2012.
- [9] 李夫星. 基于USLE模型的河北省土壤侵蚀评价研究 [D]. 石家庄: 河北师范大学, 2012.
- [10] 果超. 基于USLE模型的付营子小流域土壤侵蚀评价研究 [D]. 北京: 北京林业大学, 2015.
- [11] 李姗姗. 基于RS与GIS的祁连山南坡水源涵养量估算系统研究与实现 [D]. 西宁: 青海师范大学, 2015.
- [12] 高尚玉, 张春来, 邹学勇, 等. 京津风沙源治理工程效益 [M]. 北京: 科学出版社, 2008.
- [13] 张岩, 刘宝元, 史培军, 等. 黄土高原土壤侵蚀作物覆盖因子计算 [J]. *生态学报*, 2001, 21(7): 1050-1056.
- ZHANG Y, LIU B Y, SHI P J, et al. Crop cover factor estimating for soil loss prediction [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, 21(7): 1050-1056.
- [14] 冯强, 赵文武. USLE/RUSLE中植被覆盖与管理因子研究进展 [J]. *生态学报*, 2014, 34(16): 4461-4472.
- FENG Q, ZHAO W W. The study on cover-management factor in usle/rusle: a review [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(16): 4461-4472.
- [15] 林斌. 基于RS与GIS的定西市安定区土壤侵蚀因子提取与侵蚀强度定量评价研究 [D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2011.
- [16] 伍育鹏, 谢云, 章文波. 国内外降雨侵蚀力简易计算方法 [J]. *水土保持学报*, 2001, 15(3): 31-34.
- WU Y P, XIE Y, ZHANG W B. Comparison of different methods for estimating average annual rainfall erosivity [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2001, 15(3): 31-34.
- [17] 刘吉峰, 李世杰, 秦宁生. 青海湖流域土壤可蚀性K值研究 [J]. *干旱区地理*, 2006, 29(3): 321-326.
- LIU J F, LI S J, QIN N S. Analyses of the k value of soil erosion in the area of Qinghailake [J]. *Arid Land Geography*, 2006, 29(3): 321-326.
- [18] 许月卿, 冯艳, 周东, 等. 贵州省猫跳河流域土壤侵蚀动态变化分析 [J]. *水土保持通报*, 2011, 31(1): 186-190.
- XU Y Q, FENG Y, ZHOU D, et al. Soil erosion dynamics in maotiao river water shed of Guizhou province [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2011, 31(1): 186-190.
- [19] 齐述华, 蒋梅鑫, 于秀波. 基于遥感和USLE模型评价1995-2005年江西土壤侵蚀 [J]. *中国环境科学*, 2011, 31(7): 1197-1203.
- QI S H, JIANG M X, YU X B. Evaluating soil erosion in Jiangxi province with usle model and remote sensing technology during 1995-2005 [J]. *China Environmental Science*, 2011, 31(7): 1197-1203.
- [20] 陈龙, 谢高地, 张昌顺, 等. 澜沧江流域土壤侵蚀的空间分布特征 [J]. *资源科学*, 2012, 34(7): 1240-1247.
- CHEN L, XIE G D, ZHANG C S, et al. Spatial distribution characteristics of soil erosion in lancang river basin [J]. *Resources Science*, 2012, 34(7): 1240-1247.

本文编辑: 陈小平