

# 基于 CSLE 模型的天山北坡西白杨沟 流域土壤侵蚀定量评价

卢刚

(新疆维吾尔自治区水土保持与生态环境监测总站, 新疆 乌鲁木齐 830000)

**摘要:** [目的] 定量评价天山北坡西白杨沟流域水土流失土壤侵蚀状况, 分析其分布特征, 为区域水土保持以及生态环境建设提供科学依据。[方法] 以新疆维吾尔自治区乌鲁木齐县西白杨沟流域为研究区, 采用样地调查与地理信息系统(GIS)、遥感(RS)技术相结合方法和 CSLE 模型, 对西白杨沟流域进行土壤水力侵蚀评价及侵蚀强度空间分布分析。[结果] 天山北坡西白杨沟流域平均土壤侵蚀模数  $748.91 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ 。地形对土壤侵蚀强度影响明显, 在坡度  $20^\circ \sim 40^\circ$  区域, 土壤侵蚀模数最高, 为  $1\,127.22 \sim 1\,229.62 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ 。缓坡( $<20^\circ$ )区域, 坡度对土壤侵蚀模数呈正效应, 而在陡坡( $40^\circ \sim 70^\circ$ )区域, 坡度对土壤侵蚀模数呈负效应。土壤侵蚀主要发生在南坡、东南坡和东坡; 不同土地利用方式对土壤水力侵蚀程度影响不同, 表现为: 呈灌木林地 [ $1\,709.80 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ ]  $>$  有林地 [ $1\,389.40 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ ]  $>$  天然牧草地 [ $605.20 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ ]  $>$  人工牧草地 [ $334.71 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ ]  $>$  水浇地 [ $113.69 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ ] 的趋势。[结论] 土壤侵蚀强度总体以微度和轻度为主, 强烈侵蚀、极强烈侵蚀、剧烈侵蚀主要分布在流域的中下游和下游; 天山北坡西白杨沟流域侵蚀强度的空间分布与地形、土地利用、土壤性质联系紧密。

**关键词:** 土壤侵蚀; 遥感; CSLE 模型; 天山北坡

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2019)02-0124-07

中图分类号: S157

**文献参数:** 卢刚. 基于 CSLE 模型的天山北坡西白杨沟流域土壤侵蚀定量评价[J]. 水土保持通报, 2019, 39(2): 124-130. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2019.02.020; Lu Gang. Quantitative assessment of soil erosion in west Baiyanggou watershed on north slopes of Tianshan Mountains based on CSLE model[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2019, 39(2): 124-130.

## Quantitative Assessment of Soil Erosion in West Baiyanggou Watershed on North Slopes of Tianshan Mountains Based on CSLE Model

Lu Gang

(General Station Soil and Water Conservation and Ecological  
Environment Monitoring of Xinjiang, Urumqi, Xinjiang 830000, China)

**Abstract:** [Objective] Quantitative assessment of soil erosion in West Baiyanggou watershed on the north slopes of Tianshan Mountains and its distribution characteristics were studied in order to provide the scientific basis for ecological management and soil erosion control. [Methods] Taking the West Baiyanggou watershed in Urumqi County of Xijiang Wei Autonomous Region as the research area, using the methods of sampling plot survey, geographic information system(GIS), remote sensing system(RS) and CSLE model, soil erosion was assessed and the spatial distribution of erosion intensity was analyzed. [Results] The average soil erosion modulus was  $748.91 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$  in the West Baiyanggou watershed on the north slope of the Tianshan Mountains. In most areas of this watershed, the intensity of soil erosion was at weak or slight level. Strong, extreme or severe erosions were mainly distributed in the middle and lower reaches of the basin. Soil erosion was significantly impacted by the topographic factors. In the regions with slope of  $20^\circ \sim 40^\circ$ , the highest soil

收稿日期: 2018-05-22

修回日期: 2018-07-21

资助项目: 新疆维吾尔自治区财政专项“天山北坡典型区水土流失与经济发展关系研究”

第一作者: 卢刚(1978—), 男(汉族), 甘肃省民勤县人, 硕士, 高级工程师, 主要从事水土保持监测与管理方面的工作。E-mail: lugang830@126.com。

erosion modulus varied between 1 127.22~1 229.62 t/(km<sup>2</sup>·a). In the regions with slope <20°, the slope factor has a positive effect on the soil erosion modulus. While in the regions with slope of 40°~70°, the slope factor has a negative effect on the soil erosion modulus. Soil erosion mainly occurred on the south slope, southeast slope and east slope, and influenced by land use types with the following rank: shrub land[1 709.80 t/(km<sup>2</sup>·a)]>woodland [1 389.40 t/(km<sup>2</sup>·a)]>natural grassland[605.20 t/(km<sup>2</sup>·a)]>artificial pasture [334.71 t/(km<sup>2</sup>·a)]>irrigated land[113.69 t/(km<sup>2</sup>·a)]. [Conclusion] The intensity of soil erosion is generally at slightness and lightness level. Strong erosion, extremely strong erosion, and severe erosion are mainly distributed in the middle and lower reaches of the basin. Soil properties, slope and land use types were closely related to the soil erosion distribution in the study area.

**Keywords:** soil erosion; remote sensing ; CSLE model; north slopes of Tianshan Mountains

土壤侵蚀是地球表面的土壤物质在水力、风力等自然外力或人为因素的作用下发生的剥离、搬运和沉积的过程<sup>[1]</sup>。它在全球范围内发生最广泛,已经成为严重威胁着人类的生存与区域发展的重要生态环境问题<sup>[2-3]</sup>。土壤侵蚀研究受到国内外专家学者关注,经历了从定性研究到定量研究的转变<sup>[4]</sup>。面上土壤侵蚀评价主要的困难在于数据的可获得性以及数据的质量<sup>[5]</sup>。遥感具有规则重复观测能力,可以表征大面积的地表特征及变化<sup>[6]</sup>,是进行环境和灾害动态监测的先进有效的技术手段。结合遥感技术手段,开展面上水土流失监测工作,国内外学者已有一些研究成果。经过近 40 a 的发展,由于该模型对大多数应用者具有简单优势,而至今应用较为广泛<sup>[7-8]</sup>。另外 GIS 技术和 RS 技术促使在 RUSLE 模型在区域尺度上增加。GIS,RS 和 RUSLE 模型结合提高了土壤侵蚀的数量和空间分布,同时可以降低评估成本和提高评估准确性<sup>[9]</sup>。通用土壤流失方程 USLE<sup>[10-11]</sup>和修正通用土壤流失方程 RUSLE<sup>[12]</sup>发展为国外经验模型的典型代表。2000 年胡良军等<sup>[13]</sup>提出了基于遥感和 GIS 的区域水土流失定量评价方法。随后国内学者应用国外经验模型,对三江源<sup>[14]</sup>、江西省<sup>[15]</sup>、祁连山<sup>[4]</sup>、福建省长汀县河田盆地区<sup>[16]</sup>等地开展研究,评估了面上区域水土流失强度及空间格局,明确了土地利用等因子和土壤侵蚀的关系。中国土壤流失预报方程(CSLE)是刘宝元等<sup>[17]</sup>依据 USLE 模型,利用黄土丘陵沟壑区径流小区的实测资料提出。众多国内学者,将 GIS,RS 与 CSLE 模型相结合,对陕西省<sup>[18]</sup>、孤山川流域<sup>[19]</sup>、山东省临沂地区<sup>[20]</sup>,开展土壤侵蚀定量评估。可见在 GIS 和 RS 支持下,通过建立土壤侵蚀影响因子数据库,利用土壤侵蚀模型(如 USLE,RUSLE 和 CSLE)进行土壤侵蚀定量评价,是区域土壤侵蚀评价研究的基本趋势,且多集中在湿润区,而对新疆干旱区而言,面上土壤侵蚀研究相对较

少。且研究新疆水土流失主要集中在降水较大的伊犁河谷区域<sup>[21-22]</sup>,天山北坡区域研究鲜见报道。新疆维吾尔自治区地处我国西北部,欧亚大陆腹地,属典型的温带大陆性气候,干旱少雨,但降水脉冲特征空间差异明显<sup>[23]</sup>,降水量随海拔升高而增加,呈山区降水多平原降水少的格局<sup>[24]</sup>,且具有增强的趋势<sup>[25]</sup>。在天山北坡山区受季节性强降水影响,水蚀尤为明显,为新疆天山北坡水力侵蚀的典型区。而这些地区恰恰是新疆旅游经济和畜牧经济增长点,因此以天山北坡西白杨沟流域为研究对象,采用样地调查、地理信息系统(GIS)与遥感(RS)技术相结合方法,应用中国土壤流失预报方程(CSLE),对西白杨沟流域进行土壤水力侵蚀评价及侵蚀强度空间分布分析,以期掌握西白杨沟的土壤侵蚀强度分布特征,地形和土地利用类型对土壤侵蚀量影响,可为新疆干旱区区域水土保持、土壤侵蚀研究提供数据支持,为新疆天山北坡区域经济发展提供科学参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

西白杨沟流域(图 1)位于新疆维吾尔自治区天山中段北坡,乌鲁木齐县甘沟乡内,距乌鲁木齐市约 75 km,东经 87°03'—87°14',北纬 43°21'—43°27'。属温带大陆性气候,四季分明,夏季日照时间长,冬季较短。多年平均降水量为 452.02 mm,降水量在年内主要集中在 5—9 月,占全年降水量的 75.59%,其中尤其以 5—8 月的降水量为最集中,占全年降水量的 66.59%。多年平均气温 1.14 ℃,昼夜温差大,寒暑变化剧烈,日照时数长,热量充足。平均大风日数 20 d,风向多为东南风。流域面积约 72.04 km<sup>2</sup>,地处中山区与低山区的过渡带,地势总体西南高,东北低,海拔高度约 1 918~3 800 m,地面自然坡降为 3.2%~5.1%。北坡地形陡峭,南坡地形坡度较缓。林地零星分布于阴面山坡,冲沟发育。土地利用类型

多为天然牧草地(78.73%)和有林地(17.68%)。研究区内主要分布栗钙土,质地为中、轻壤土,有机质含量在 6.6~29.2 g/kg 之间。植被主要生长蒿草、鸭茅、早熟禾、苜蓿、针茅、披碱草和云杉等。西白杨沟的水系发源于海拔 3 319 m 的北天山天格尔 II 峰。上源由二条河道汇集而成,由西南向东北方向流,在白杨沟瀑布附近汇合,后继续流向东北方向,最后注入大西沟,全长 23 km。它是一条由冰雪融水、降雨及地下水混合补给的河流,其径流组成大致为:冰川融水占 12%,融雪水占 37%,降雨占 36%,地下水占 15%。其多年平均径流量为  $2.44 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,年最大径流量  $3.44 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,年最小径流量为  $1.75 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

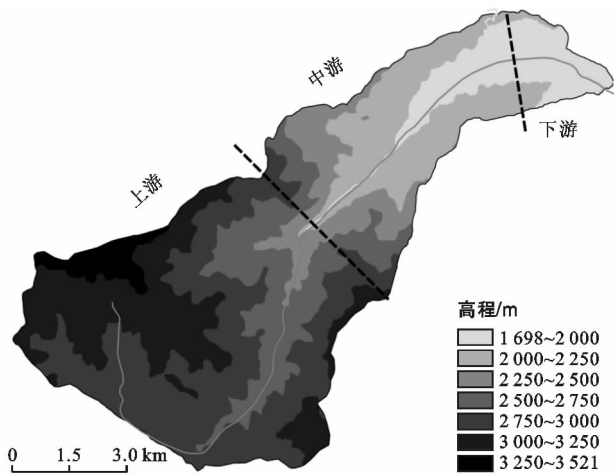


图 1 西白杨沟流域划分及地形

## 1.2 数据获取

(1) 空间数据。为了获取 CSLE 模型中生物措施因子( $B$ ),从美国地质调查局官网(USGS)获取 2015 年 8 月的 Landsat 8 OLI 遥感影像,空间分辨率为 30 m,融合处理得到空间分辨率为 15 m,为了与地形数据空间分辨率对应,将其重采样为 10 m;基于新疆维吾尔自治区测绘局地形图(1:10 000),采用 ArcGIS 软件对地形图数据处理得到 10 m 的数字高程模型数据(DEM);获取研究区 2015 年第二次土地调查的土地利用数据。

(2) 气象数据。由于新疆的气象站点多分布在平原区,在山区的气象站点稀缺。为准确获取天山山区降水数据,在距流域出水口 1.5 km 处布设一套自

动气象站,通过自动气象站获得 2015 年共 15 次降雨过程资料,以 10 min 为间隔记录的降水数据。

(3) 土壤与植被盖度。由于研究区处于天山山区,按照均匀样点方式采样比较难。在考虑土地利用、样点分布及可到达基础上,在研究区内布点(附图 1),并进行实地的土壤采样,分析土壤质地及有机质的含量。土壤有机质用油浴加热重铬酸钾氧化容量法测定;土壤颗粒组分采用筛分法和比重计法测定。对研究区内草地植被盖度、林地郁闭度通过数码相机照相获取后处理得到。

## 1.3 土壤水力侵蚀量的计算方法

1.3.1 CSLE 模型 本研究采用的是刘宝元参考 USLE 的有关思想针对中国实际提出适用于全国范围的中国土壤流失方程 CSLE(Chinese Soil Loss Equation)模型<sup>[17]</sup>。其表达式为:

$$M=R \cdot K \cdot L \cdot S \cdot B \cdot E \cdot T \quad (1)$$

式中: $M$ ——单位面积年均土壤流失量 $[\text{t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})]$ ; $R$ ——降雨侵蚀力因子 $[\text{MJ}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})(\text{mm} \cdot \text{h}^{-1})]$ ; $K$ ——土壤可侵蚀因子 $[(\text{t} \cdot \text{hm}^2 \cdot \text{h})/(\text{hm}^2 \cdot \text{MJ} \cdot \text{mm})]$ ; $L$ ——坡长因子; $S$ ——坡度因子单位; $B$ ——生物措施因子; $E$ ——工程措施因子; $T$ ——耕作措施因子。

1.3.2 降雨侵蚀力因子( $R$ ) 美国的 Wischemeier 等<sup>[11]</sup>于 1971 年进行了大量的样地试验,结合大量的实测资料,提出了以降雨总动能  $E$  和 30 min 最大降雨雨强  $I_{30}$  的乘积作为降雨侵蚀力指标的经典计算方法。其表达式为:

$$R=E \cdot I_{30} \quad (2)$$

式中: $R$ ——降雨侵蚀力因子 $[\text{MJ}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})(\text{mm} \cdot \text{h}^{-1})]$ ; $E$ ——降雨总动能; $I_{30}$ ——雨强。将上式计算出的每次降雨的降雨侵蚀力累加得到年降雨侵蚀力。由于区域面积不大,周边相邻的气象站距离较远,在距离研究区 1.5 km 处布设一个自动气象观测站,以 10 min 为间隔记录的降水数据。因此采用  $EI_{30}$  计算,“以点带面”方法获得研究区降雨侵蚀力因子。

1.3.3 土壤可侵蚀因子( $K$ ) 土壤可蚀性是指土壤受到侵蚀力的破坏性能的难易程度,是土壤对侵蚀介质的剥蚀和搬运作用的敏感性,是影响土壤侵蚀的内因因素。 $K$  的确定采用 Williams 等在 EPIC 模型中  $K$  的算法<sup>[26]</sup>。

$$K = \left\{ 0.2 + 0.3 \exp \left[ -0.0256 S_{AN} \left( 1 - \frac{S_{IL}}{100} \right) \right] \right\} \times \left\{ \frac{S_{IL}}{C_{LA} + S_{IL}} \right\}^{0.3} \times \left\{ 1.0 - \frac{0.25C}{[C + \exp(3.718 - 2.947C)]} \right\} \times \left\{ 1.0 - \frac{0.7SN_1}{SN_1 + \exp(-5.509 + 22.899SN_1)} \right\} \quad (3)$$

式中:  $S_{AN}$ ——砂粒含量(%);  $S_{IL}$ ——粉粒含量(%);  $C_{LA}$ ——黏粒含量(%);  $C$ ——有机碳含量(%);  $SN_1 = 1 - S_{AN}/100$ 。  $K$  值单位  $[(t \cdot \text{hm}^2 \cdot \text{h}) / (\text{hm}^2 \cdot \text{MJ} \cdot \text{mm})]$ 。利用 ArcGIS 采用克里金法得出流域土壤  $K$  栅格图(附图 2),  $K$  的范围为  $0.01 \sim 0.06 [(t \cdot \text{hm}^2 \cdot \text{h}) / (\text{hm}^2 \cdot \text{MJ} \cdot \text{mm})]$ , 与梁音等对新疆土壤可侵蚀  $K$  的研究成果<sup>[27]</sup> 基本一致。

1.3.4 坡长因子值( $L$ )与坡度因子值( $S$ ) 坡长与坡度反映了地形地貌特征对土壤侵蚀量的影响。采用 Foster 等<sup>[28]</sup> 于 1974 年提出的分段坡长因子公式来计算区域上每一栅格的坡长因子, 计算公式为:

$$L_i (\lambda_{out}^{m+1} - \lambda_{in}^{m+1}) / [(\lambda_{out} - \lambda_{in}) \times 22.13^m] \quad (4)$$

式中:  $L_i$ ——第  $i$  个栅格的坡长因子;  $\lambda_{out}, \lambda_{in}$ ——栅格出口及入口的坡长;  $m$ ——坡长指数。根据刘宝元等<sup>[29]</sup> 的研究结果, 坡长指数  $m$  取值为:  $m = 0.2, \theta < 0.5^\circ$ ;  $m = 0.3, 0.5^\circ \leq \theta < 1.5^\circ$ ;  $m = 0.4, 1.5^\circ \leq \theta < 3^\circ$ ;  $m = 0.5, \theta \geq 3^\circ$ 。根据国内外的研究成果, 由于不同坡度对土壤侵蚀强度影响不同, 在不同的坡度范围下分别选用不同的公式来计算坡度因子。  $10^\circ$  以下的坡度选用 McCool<sup>[30]</sup> 的公式,  $10^\circ$  以上的坡度选用刘宝元等<sup>[31]</sup> 的公式, 计算公式为:

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

式中:  $S$ ——坡度因子;  $\theta$ ——坡度( $^\circ$ )。

1.3.5 水保措施因子(BET) CSLE 模型将水保措施因子分为生物措施因子( $B$ )、工程措施因子( $E$ )以及耕作措施因子( $T$ )。植被指数作为一种重要的遥感归一化参数, 并已作为一种遥感手段广泛应用于土地利用覆盖探测、植被覆盖密度评价、作物识别和作物预报等方面。本研究参照 Choudhury 等的研究成果<sup>[32]</sup>, 利用 Landsat8 遥感影像, 根据下式计算植被覆盖指数:

$$NDVI = (IR - R) / (IR + R)$$

$$FCI = (NDVI - NDVI_{\min}) / (NDVI_{\max} - NDVI_{\min}) \quad (6)$$

式中:  $FCI$ ——植被覆盖度(%);  $NDVI$ ——归一化植被指数;  $NDVI_{\max}, NDVI_{\min}$ ——研究区不同土地利用类型在 95% 和 5% 的置信区间的  $NDVI$  最大值和最小值。

本研究采用蔡崇法等<sup>[33]</sup> 的方法, 即根据生物措施因子( $B$ )与植被覆盖度  $FC$  的关系公式进行  $B$  值的估算(附图 3), 其值介于  $0 \sim 1$  之间。

$$C = \begin{cases} 1 & (FC = 0) \\ 0.6508 - 0.3436 \times \text{Lg}(FC) & (0 < FC \leq 78.3\%) \\ 0 & (FC > 78.3\%) \end{cases} \quad (7)$$

式中:  $B$ ——生物措施因子;  $FC$ ——植被覆盖度(%).

工程措施因子( $E$ )和耕作措施因子( $T$ )。根据高分辨率谷歌影像解译, 结合实地调查, 确定研究区内无相关工程措施和耕作措施, 均赋值为 1。

## 2 结果与分析

### 2.1 土壤侵蚀强度分级面积与分布

依据国家水利部颁布的《土壤侵蚀分类分级标准(SL190-2007)》确定土壤侵蚀强度分级指标<sup>[16]</sup>, 将流域土壤侵蚀强度分为 6 级, 即微度  $[0 \sim 1\,000 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})]$ 、轻度  $[1\,000 \sim 2\,500 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})]$ 、中度  $[2\,500 \sim 5\,000 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})]$ 、强烈  $[5\,000 \sim 8\,000 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})]$ 、极强烈  $[8\,000 \sim 15\,000 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})]$  和剧烈  $[> 15\,000 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})]$ 。如表 1 所示, 微度侵蚀面积为  $4\,973.45 \text{ hm}^2$ , 占流域总面积的 69.03%; 轻度侵蚀面积为  $1\,546.49 \text{ hm}^2$ , 占流域总面积的 21.47%; 中度侵蚀面积为  $558.46 \text{ hm}^2$ , 占流域总面积的 7.75%; 强烈侵蚀面积为  $109.57 \text{ hm}^2$ , 占流域总面积的 1.52%; 极强烈侵蚀面积为  $16.58 \text{ hm}^2$ , 占流域总面积的 0.23%。剧烈侵蚀面积为  $0.17 \text{ hm}^2$ , 占流域总面积的 0.002%。研究区内平均土壤侵蚀模数  $748.91 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ 。天山北坡西白杨沟流域土壤侵蚀强度总体以微度和轻度为主。

表 1 研究区土壤侵蚀强度分级面积表

侵蚀强度	侵蚀面积/ $\text{hm}^2$	比例/%
微度	4 973.45	69.03
轻度	1 546.49	21.47
中度	558.46	7.75
强烈	109.57	1.52
极强烈	16.58	0.23
剧烈	0.17	0.002
合计	7 204.72	100.00

微度侵蚀主要分布于西南高山区, 西白杨沟流域上游区域; 轻度侵蚀主要分布整个流域; 中度侵蚀主要分布在流域的中游和下游; 强烈侵蚀、极强烈侵蚀、剧烈侵蚀主要分布在流域的中下游和下游(附图 4)。

### 2.2 坡度对土壤侵蚀的影响

将流域地形坡度以  $10^\circ$  为间距, 分为 8 类(表 2)。在坡度  $20^\circ \sim 40^\circ$  间, 土壤侵蚀模数较高, 在  $1\,127.22 \sim 1\,229.62 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ ; 在其他坡度范围 ( $< 20^\circ$  和  $> 40^\circ$ ) 土壤侵蚀模数较低, 在  $113.12 \sim 833.17 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$  之间。从不同坡度的土壤侵蚀模数标准差来看, 在坡度  $20^\circ \sim 40^\circ$  间的标准差较大, 在  $1\,396.90 \sim 1\,425.482 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$  范围间; 而在其他坡度 ( $< 20^\circ$  和  $> 40^\circ$ ),

其标准差在 316.80~887.75 间波动。从不同坡度的区域土壤侵蚀模数总数来看,在坡度 20°~40°间,土壤侵蚀模数 51 876.80 t/a, 占总土壤侵蚀比重 70.27%。可见整个流域内土壤侵蚀主要发生在坡度 20°~40°间,主要原因是在 20°~40°间土地面积较大,为 4 405.02 hm<sup>2</sup>,且土壤侵蚀模数较高所致。坡度 20°~40°间坡度较大,植被较稀疏,土壤可侵蚀性较高,三类关键因子耦合作用驱动水土流失,引起土壤侵蚀强度较大;而在坡度更大(>40°)区域,虽然植被稀疏,但基本为裸露岩石,三类关键因子综合作用抑制土壤侵蚀。所以 20°~40°区域应是今后该流域水土流失的重点治理对象。

表 2 研究区不同坡度的土壤侵蚀模数

坡度/ (°)	面积/ hm <sup>2</sup>	平均值/ (t·km <sup>-2</sup> ·a <sup>-1</sup> )	标准差	合计/ (t·a <sup>-1</sup> )	比例/ %
0~10	551.77	113.12	316.80	624.17	0.95
10~20	1 327.16	439.05	798.87	5 826.88	8.90
20~30	2 234.96	1 127.22	1 425.48	25 193.01	38.50
30~40	2 170.06	1 229.62	1 396.90	26 683.50	40.77
40~50	707.05	800.40	887.75	5 659.22	8.65
50~60	185.56	655.73	696.35	1 216.77	1.86
60~70	27.34	833.17	790.62	227.79	0.35
70~80	0.82	1 234.57	735.44	10.12	0.02

表 3 研究区不同坡向土壤侵蚀模数

坡向	坡向/ (°)	面积/ hm <sup>2</sup>	平均值/ (t·km <sup>-2</sup> ·a <sup>-1</sup> )	标准差	合计/ (t·a <sup>-1</sup> )	模数比例/ %
北	-22.5~22.5	895.84	710.19	853.83	6 362.18	9.72
东北	22.5~67.5	1 013.67	807.58	1 009.15	8 186.16	12.51
东	67.5~112.5	987.20	1 018.53	1 456.44	10 054.97	15.36
东南	112.5~157.5	1 022.56	1 042.81	1 530.69	10 663.32	16.29
南	157.5~202.5	948.63	1 179.55	1 623.79	11 189.55	17.10
西南	202.5~247.5	865.26	909.42	1 267.41	7 868.88	12.02
西	247.5~292.5	756.19	755.59	870.40	5 713.71	8.73
西北	292.5~337.5	694.95	744.50	841.32	5 173.93	7.91

## 2.4 土地利用类型对土壤侵蚀的影响

从土地利用角度来看,灌木林地平均土壤侵蚀模数最大 1 709.80 t/(km<sup>2</sup>·a);其次为有林地,平均土壤侵蚀模数达到 1 389.40 t/(km<sup>2</sup>·a)。而天然牧草地、人工牧草地和水浇地平均侵蚀模数均较低,分别为 605.20,334.71,113.69 t/(km<sup>2</sup>·a)。从侵蚀模数标准差来看,灌木林地和天然牧草地较高,分别为 1 606.71,1 197.17。而人工牧草地和水浇地较低,分别为 440.92 和 166.31,说明灌木林地和天然牧草地侵蚀模数变异性较大,人工牧草地和水浇地侵蚀模数变异性相对较小。从不同土地利用类型的土壤侵蚀模数总数来看,天然牧草地和灌木林地较高,分别为

## 2.3 坡向对土壤侵蚀的影响

依据坡向(方位角)不同,以 45°为角度间距,分为 8 个方向(表 3)。在南坡侵蚀最高,为 1 179.55 t/(km<sup>2</sup>·a);其东南坡和东坡的侵蚀较高,分别为 1 018.53,1 042.81 t/(km<sup>2</sup>·a);而在北坡的侵蚀最低,为 710.19 t/(km<sup>2</sup>·a);其他坡向的侵蚀在 744.50~909.42 t/(km<sup>2</sup>·a)间。从不同坡向的土壤侵蚀模数标准差来看,在南坡最高,为 1 623.79;其次是东南、东、西南坡土壤侵蚀标准差,分别为 1 530.69,1 456.44,1 267.41;在西、西北、北坡土壤侵蚀标准差较低,在 841.32~870.40 间。从不同坡向的区域土壤侵蚀模数总数来看,南坡土壤侵蚀模数总数最大,为 11 189.55 t/a,占整个流域土壤侵蚀的 17.10%;其次是在东南和东坡,土壤侵蚀总数分别为 10 663.32,10 663.32 t/a,分别占整个流域土壤侵蚀的 16.29%和 15.36%;在西北坡土壤侵蚀总数最低,为 5 173.93 t/a,仅占整个流域土壤侵蚀的 7.91%。综上所述,土壤侵蚀主要在南坡、东南坡和东坡易发生,且占整个流域土壤侵蚀总量比重较高。坡向对天山北坡的水热分配较为明显,促使土壤侵蚀强度的空间异质性较高。南坡、东南坡和东坡是今后该流域水土流失的重点治理对象。

34 460.66,17 766.58 t/a。而人工牧草地和水浇地较低,分别为 32.10,0.27 t/a。这主要是由于在流域内人工牧草地和水浇地面积较小,而且平均侵蚀模数也较低所致(表 4)。

表 4 不同土地利用类型的土壤侵蚀模数

土地利用类型	平均值/ (t·km <sup>-2</sup> ·a <sup>-1</sup> )	标准差	合计/ (t·a <sup>-1</sup> )	比例/ %
有林地	1 389.40	971.98	17 766.58	27.15
天然牧草地	605.20	1 197.17	34 460.66	52.66
灌木林地	1 709.80	1 606.71	3 675.74	5.62
人工牧草地	334.71	440.92	32.10	0.05
水浇地	113.69	166.31	0.27	0.00

### 3 讨论与结论

#### 3.1 讨论

(1) 天山北坡水土流失一直倍受学者和政府关注。本文以乌鲁木齐县西白杨沟流域为研究区,采用样地调查、地理信息系统(GIS)与遥感(RS)技术相结合方法,应用中国土壤流失预报方程(CSLE),对西白杨沟流域进行土壤水力侵蚀评价及侵蚀强度空间分布分析。发现天山北坡西白杨沟流域土壤侵蚀强度总体以微度为主,主要分布于西南高山区,西白杨沟上游区域;中度侵蚀、强烈侵蚀、极强烈侵蚀也不容忽视,中度侵蚀主要分布在流域的中游和下游;强烈侵蚀、极强烈侵蚀、剧烈侵蚀主要分布在流域的中下游和下游。

(2) 据2012年第一次全国水利普查水土保持情况公报,全国水力侵蚀面积为 $1.29 \times 10^6 \text{ km}^2$ ,占普查范围总面积的13.65%,其中轻度侵蚀面积最大,中度侵蚀面积次之,分别为51.62%和27.18%;新疆水力侵蚀总面积 $8.76 \times 10^4 \text{ km}^2$ ,占普查范围面积的6.77%,其中轻度侵蚀面积最大,中度侵蚀面积次之,分别为74.06%和21.04%<sup>[34]</sup>,可见新疆地区水力侵蚀强度低于全国平均水平,但占自治区面积比例较大,使得占全国侵蚀面积比例大。在天山北坡西白杨沟流域微度、轻度、中度侵蚀面积分别占流域总面积的69.03%,21.46%和7.75%;相比较而言,天山北坡西白杨沟流域侵蚀强度接近新疆平均水平。

(3) 新疆地区四周高山环绕,在地形上高山与盆地相间,形成明显的地形单元,呈“三山夹两盆”的特征,海拔 $154 \sim 8611 \text{ m}$ 之间,在每个地形单元中,由冰雪覆盖的高山、浅山丘陵区、绿洲农业区、荒漠过渡带和沙漠组成。新疆气候属典型的大陆性干旱气候,南疆干旱,光照长,少雨,年降水量仅 $20 \sim 100 \text{ mm}$ ,而北疆却达 $100 \sim 500 \text{ mm}$ ,山区多年平均年降水量在 $200 \sim 500 \text{ mm}$ 。依据《土壤侵蚀分类分级标准(SL190-2007)》,在全年日平均风速 $<5 \text{ m/s}$ ,且年平均降水量 $>300 \text{ mm}$ ,天山北坡(山区)地区划分为水力侵蚀区。由于南北疆气候差异,两大盆地的土壤植被呈现不同特点。天山北坡低山区,主要生长蒿草、鸭茅、早熟禾、苜蓿、针茅、披碱草和云杉等。山地以栗钙土、灰褐土、黑毡土为主。基于以上地形、气候、植被、土壤分异特征促使新疆水力侵蚀主要分布在北疆的伊犁州、天山南北坡地带低山区域<sup>[34]</sup>。本文研究发现,中度侵蚀、强烈侵蚀、极强烈侵蚀也不容忽视,中度侵蚀主要分布在流域的中游和下游;强烈侵蚀、极强烈侵蚀、剧烈侵蚀主要分布在流域的中下游

和下游,这与郭索彦<sup>[35]</sup>等研究结论基本一致。

(4) 有研究表明天山北坡水土流失中自然条件(降水)并不是导致泥沙产生的决定因素,山区日益扩张的放牧活动以及森林采伐行为,是影响河流泥沙输沙量增加的主要因素<sup>[36]</sup>。

(5) 本文在利用中国土壤流失预报方程(CSLE)对天山北坡西白杨沟流域土壤水力侵蚀定量评价中依然存在亟待解决的问题。如植被盖度因子采用了蔡崇法等方法直接计算,在新疆本地并没有通过系统性试验修正;降雨量空间差异较大,采用一个自动气象站,“以点带面”会带来不确定性。西白杨沟流域是天山北坡放牧和旅游干扰典型区域,人为干扰影响到土壤结构、植被盖度等因子,引起土壤可蚀性和植被盖度因子动态变化,因此人为活动干扰将是天山北坡水土流失研究方向之一。

#### 3.2 结论

(1) 天山北坡西白杨沟流域平均土壤侵蚀模数 $748.91 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ ,土壤侵蚀强度总体以微度为主,强烈侵蚀、极强烈侵蚀、剧烈侵蚀主要分布在流域的中下游和下游。

(2) 地形因素对土壤侵蚀的影响呈明显分异格局,在坡度 $20^\circ \sim 40^\circ$ 区域,土壤侵蚀模数最高,在 $1127.22 \sim 1229.62 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ 之间。在缓坡( $<20^\circ$ )区域,坡度对土壤侵蚀模数呈正效应,而在陡坡( $40^\circ \sim 70^\circ$ )区域,坡度对土壤侵蚀模数呈负效应。土壤侵蚀主要在南坡、东南坡和东坡,且占整个流域土壤侵蚀总量比重较高。

(3) 不同土地利用方式对土壤水力侵蚀程度影响不同。灌木林地平均土壤侵蚀模数最大 $1709.80 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ ;其次为有林地,平均土壤侵蚀模数达到 $1389.40 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ 。而天然牧草地、人工牧草地和水浇地平均侵蚀模数均较低,分别为 $605.20, 334.71, 113.69 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ 。

#### [ 参 考 文 献 ]

- [1] Meyer L D. Evolution of the universal soil loss equation [J]. Journal of Soil and Water Conservation[J], 1984, 39(2): 99-104.
- [2] Graaff J D, Aklilua, Ouessar M, et al. The development of soil and water conservation policies and practices in five selected countries from 1960 to 2010 [J]. Land Use Policy, 2013, 32(3): 165-174.
- [3] 李天杰. 土壤地理学[M]. 北京:高等教育出版社,2004.
- [4] 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.

- [5] Vanrompaey A J J, Gerardgovers. Data quality and model complexity for regional scale soil erosion prediction [J]. *International Journal of Geographical Information Systems*, 2002, 16(7): 663-680.
- [6] Siakeu J, Oguchi T. Soil erosion analysis and modelling: A review[J]. *Chikei*, 2000, 21(4): 413-429.
- [7] Ganasri B P, Ramesh H. Assessment of soil erosion by RUSLE model using remote sensing and GIS: A case study of Nethravathi Basin[J]. *Geoscience Frontiers*, 2016, 7(6): 953-961.
- [8] Fernández C, Vega J A. Evaluation of RUSLE and PESERA models for predicting soil erosion losses in the first year after wildfire in NW Spain[J]. *Geoderma*, 2016, 273: 64-72.
- [9] Djoukbalá O, Mazour M, Hasbaia M, et al. Estimating of water erosion in semiarid regions using RUSLE equation under GIS environment[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2018, 77(9): 345-352.
- [10] Wischmeier W H. et al. A soil erodibility nomograph farmland and construction sites[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1971, 26, 189-193.
- [11] Wischmerier W H, Smith D D. Predicting rainfall erosion losses-a guide to conservation planning[R]. Washington: Agriculture Handbook, 1978.
- [12] 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)[M]. US: Agriculture Handbook, 1997.
- [13] 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.
- [14] 林慧龙, 郑舒婷, 王雪璐. 基于 RUSLE 模型的三江源高寒草地土壤侵蚀评价[J]. *草业学报*, 2017, 26(7): 11-22.
- [15] 刘波, 齐述华, 廖富强, 等. 土壤水力侵蚀的遥感信息模型研究:以江西省为例[J]. *武汉大学学报: 信息科学版*, 2012, 37(4): 389-393.
- [16] 杨冉冉, 徐涵秋, 林娜, 等. 基于 RUSLE 的福建省长汀县河田盆地区土壤侵蚀定量研究[J]. *生态学报*, 2013, 33(10): 2974-2982.
- [17] Liu Baoyuan, Zhang Keli, Xie Yun. An empirical soil loss equation[C]. Beijing: International Soil Conservation Organization Conference, 2002.
- [18] 程琳, 杨勤科, 谢红霞, 等. 基于 GIS 和 CSLE 的陕西省土壤侵蚀定量评价方法研究[J]. *水土保持学报*, 2009, 23(5): 61-66.
- [19] 王凯, 夏燕秋, 马金辉, 等. 基于 CSLE 和高分辨率航空影像的孤山川流域土壤侵蚀定量评价[J]. *水土保持研究*, 2015, 22(1): 26-32.
- [20] 樊彦国, 韩志聪, 李倩倩, 等. 基于 GIS 和 CSLE 的土壤侵蚀定量评价:以山东省临沂地区为例[J]. *江苏农业科学*, 2016, 44(11): 439-442.
- [21] 李大龙, 杨井, 李卫红, 等. 基于 GIS 和 USLE 的伊犁河谷土壤侵蚀敏感性评价[J]. *生态学杂志*, 2016, 35(4): 942-951.
- [22] 李小华, 曹月娥, 杨建军. 人工模拟降雨条件下伊犁河流域黄土区土壤侵蚀试验分析[J]. *水土保持学报*, 2016, 30(1): 36-40.
- [23] 慈晖, 张强, 张江辉, 等. 1961—2010 年新疆极端降水过程时空特征[J]. *地理研究*, 2014, 33(10): 1881-1891.
- [24] 张正勇, 何新林, 刘琳, 等. 中国天山山区降水空间分布模拟及成因分析[J]. *水科学进展*, 2015, 26(4): 500-508.
- [25] 韩雪云, 杨青, 姚俊强. 新疆天山山区近 51 年来降水变化特征[J]. *水土保持研究*, 2013, 20(2): 139-144.
- [26] Sharpley A N, Williams J R. EPIC-erosion/productivity impact calculator(2): User manual[J]. *Technical Bulletin-United States Department of Agriculture*, 1990, 4(4): 206-207.
- [27] 梁音, 刘宪春, 曹龙熹, 等. 中国水蚀区土壤可蚀性 K 值计算与宏观分布[J]. *中国水土保持*, 2013(10): 35-40.
- [28] Foster G R, Wischmeier W H. Evaluating irregular slopes for soil loss prediction[J]. *Trans ASAE Gen Ed Am Soc Agric Eng*, 1974, 17: 305-309.
- [29] 刘宝元, 毕小刚, 符素华, 等. 北京土壤流失方程[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- [30] Mccool D K, Brown L C, Foster G R, et al. Revised slope steepness factor for the universal soil loss equation[J]. *Transactions of the ASAE: American Society of Agricultural Engineers(USA)*, 1987, 30(5): 1387-1396.
- [31] Liu Baoyuan, Nearing M A, Risse M. Slope gradient effects on soil loss for steep slopes[J]. *Transactions of the ASAE*, 1994, 37(6): 1835-1840.
- [32] Choudhury J, Ahmed N U, Idso S B, et al. Relations between evaporation coefficients and vegetation indices studied by model simulations[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1994, 50(1): 1-17.
- [33] 蔡崇法, 丁树文. 应用 USLE 模型与地理信息系统 IDRISI 预测流域土壤侵蚀量的研究[J]. *水土保持学报*, 2000, 14(2): 19-24.
- [34] 中华人民共和国水利部. 第一次全国水利普查水土保持情况公报[J]. *中国水土保持*, 2013(10): 2-3.
- [35] 郭索彦. 基于全国土壤侵蚀普查成果浅谈新疆维吾尔自治区水土流失防治方略[C]//新疆 乌鲁木齐: 新疆水利厅、中国水土保持学会. 首届干旱半干旱区域水土保持生态保护论坛论文集选编. 2013.
- [36] 张宏锋, 欧阳志云, 郑华. 天山北坡水土流失生态效应的动态变化及其影响因素分析:以玛纳斯河流域为例[C]//新疆 乌鲁木齐: 中国生态学会青年工作委员会. 第五届中国青年生态学工作者学术研讨会论文集, 2008.