

# 基于 GIS 和 USLE 的伊犁河谷土壤侵蚀敏感性评价

李大龙<sup>1,2</sup> 杨 井<sup>1\*</sup> 李卫红<sup>1</sup> 朱成刚<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 中国科学院新疆生态与地理研究所, 荒漠与绿洲生态国家重点实验室, 乌鲁木齐 830011; <sup>2</sup> 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要** 伊犁河谷是新疆重要的农牧业生产基地, 水土流失是该地区最为严重的生态环境问题之一。本文以通用土壤流失方程 USLE 为计算模型, 借助 ArcGIS 空间分析功能, 选取降雨、植被、土壤、地形因子, 并对方程中的可变因子降雨、植被进行季节区分, 对伊犁河谷土壤侵蚀敏感性进行综合评价。受可变因子的影响, 研究区土壤侵蚀敏感性在季节尺度上差异显著, 主要表现为: 伊犁河谷土壤侵蚀春季最敏感, 秋季次之, 夏季土壤侵蚀以轻度敏感为主; 土壤侵蚀高敏感地区所占面积随季节推进逐渐缩减, 春季、夏季、秋季, 所占面积比例分别为 32.2%、6.1%、6.0%; 空间上, 土壤侵蚀轻度敏感地区主要分布在河谷盆地及平原地区, 中度、高度敏感地区集中分布在山前坡地, 以及海拔 1500 m 以上、坡度 20° 左右的山区; 在可变因子中, 植被因子对土壤侵蚀敏感性的影响程度大于降雨因子。

**关键词** 伊犁河谷; 土壤侵蚀; 敏感性评价; USLE

## Evaluating the sensitivity of soil erosion in the Yili River valley based on GIS and USLE.

LI Da-long<sup>1,2</sup>, YANG Jing<sup>1\*</sup>, LI Wei-hong<sup>1</sup>, ZHU Cheng-gang<sup>1</sup> (<sup>1</sup>State Key Laboratory of Desert and Oasis Ecology, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Science, Urumqi 830011, China; <sup>2</sup>University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China).

**Abstract:** The Yili River valley is an important production base of agriculture and animal husbandry in Xinjiang. Recently, soil loss is a significant ecological environment problem in this region. Based on the universal soil loss equation (USLE) and spatial analysis functions in ArcGIS, this study evaluated the temporal and spatial characteristics of soil erosion sensitivity according to selected factors (i.e. precipitation, vegetation cover, soil, slope, slope length) in the valley, with the factors of precipitation and vegetation being discriminated in different seasons. The results showed that in the study area, the soil erosion was most sensitive in spring, followed by autumn, while it was only slightly sensitive in summer and in the whole year. The total area of soil erosion with high sensitivity had a significant seasonal difference. It was largest in spring (32.2% of the total area), while only 6.1% in summer, and slightly less in autumn than in summer. Spatially, soil erosion area of low sensitivity was mainly distributed in plain area of the valley, while the area of medium and high sensitivity was mainly in the steep field, and in mountain area with elevation above 1500 m and slope about 20°. Furthermore, the influence of vegetation factor on soil erosion was greater than that of precipitation factor.

**Key words:** Yili River valley; soil erosion; sensitivity evaluation; USLE.

土壤侵蚀是世界上发生范围最广、影响最为严重的生态环境问题, 已经影响到地球上 1/3 的农业土壤 (Graaff *et al.*, 2013), 它会导致区域环境破坏,

引发一系列生态问题, 如生产力下降、水体污染、洪涝灾害及生物多样性降低 (Park *et al.*, 2011; Wang *et al.*, 2013)。据 2013 年统计数据, 中国土壤侵蚀总面积达到  $294.91 \times 10^4 \text{ km}^2$ , 占国土面积的 30.72% (刘震, 2013)。土壤侵蚀已经成为中国最严重的环境问题之一, 建立有效的水土资源保护措施刻不容缓。研究土壤侵蚀敏感性, 对于明确土壤侵

国家科技支撑计划项目 (2014BAC15B03)、中国科学院“西部之光”人才培养计划项目 (YB201302) 和青年千人计划 (Y371051001) 资助。

收稿日期: 2015-08-25 接受日期: 2016-01-29

\* 通讯作者 E-mail: yangjing@ms.xjbg.ac.cn

蚀敏感区,合理制定区域水土保持措施具有重要意义(王礼先,2005;郑粉莉等,2008; Xu *et al.*, 2013)。自 20 世纪 50 年代以来,世界各地广泛开展了土壤侵蚀研究,很多学者选择综合多种影响因素的土壤侵蚀模型进行研究,其中由 Wischmeier 等(1978)提出的通用土壤流失方程(USLE)是经验模型的典型代表,另外适用于不同地区的一系列模型(Lafren *et al.*, 1991; Morgan *et al.*, 1998)也应运而生。中国对于土壤侵蚀的研究主要研究集中在以小流域为单元的水土流失综合治理与试验示范等方面(李锐, 2008),包括侵蚀因子研究(王志伟等,2012),土壤侵蚀定量评价(杨冉冉等,2013)和土壤侵蚀及其治理的区域环境效应研究(王万忠等,2012)等方面。近年来,随着遥感技术的迅速发展,USLE 与 GIS 相结合已成为估算土壤侵蚀及其空间分布、土壤侵蚀敏感性评价的有效方法。目前对土壤侵蚀敏感性的研究主要集中在年时间尺度及更长时间尺度上,而少对土壤侵蚀敏感性进行季节性区分的研究,但土壤侵蚀受自然因子的影响存在很强的季节变动性。为了更加准确地揭示土壤侵蚀的敏感性特征,各个时间尺度上土壤侵蚀敏感性的研究都应受到重视。

伊犁河谷位于中国天山山脉西部,是新疆重要的农业和畜牧业基地。伊犁河谷谷地两侧广泛堆积黄土层,谷地内地形地貌复杂,沟壑众多坡度较大;季节性的融雪径流及丰富的降水,对抗蚀能力弱的黄土坡地极易造成冲刷侵蚀,引发水土流失(乔木等,2007)。近年来,以水土资源为核心的大规模农业开发加剧了对生态环境的扰动,水土流失等生态问题日益突出(王蕾等,2013)。据统计,伊犁河流域水土流失面积达  $3.74 \times 10^4 \text{ km}^2$ ,占流域总面积的 66%。仅水力侵蚀面积就达  $3.73 \times 10^4 \text{ km}^2$ ,占水土流失面积的 99.8%(袁咏等,2006)。水土流失已经成为影响这一地区生态安全的关键因素和亟待解决的生态环境问题。大多数研究集中在植被退化(范天文等,2008)、融雪侵蚀(史彦江等,2009)、水土资源开发(裴厦等,2008)等方面。本文在国内外土壤侵蚀敏感性研究的基础上,分析伊犁河谷的环境特征,提取影响土壤侵蚀的主要影响因子,确定了主要评价指标和敏感性等级。借助 GIS、RS 等操作平台,运用 USLE 模型,对不同季节下伊犁河谷土壤侵蚀敏感性进行综合评价,根据区域土壤侵蚀的形成规律,分布特征,分析其产生原因。其结果将为研究区进一步开展水土保持规划、增强伊犁河谷地区生

态环境稳定性提供信息服务与数据支撑。

## 1 研究地区与研究方法

### 1.1 研究区概况

伊犁河谷位于欧亚大陆腹地的新疆天山北坡西部山区。地理坐标介于  $79^{\circ}50'30'' \text{ E} - 84^{\circ}56'50'' \text{ E}$ ,  $42^{\circ}14'16'' \text{ N} - 44^{\circ}50'30'' \text{ N}$ 。河谷北东南三面环山,呈向西开放的喇叭口状,西面与哈萨克斯坦共和国交界,流域面积  $5.7 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。

伊犁河谷属温带大陆性气候,受特殊的地形、地势影响,气候温和,降水充沛,全流域平均气温  $2.8 \sim 9.1 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ,年均降水量  $200 \sim 500 \text{ mm}$ ,山区可达  $800 \sim 1000 \text{ mm}$ 。河谷内水系分布广泛,大小河流 120 多条(图 1)。

地貌单元中山地丘陵占 75.1%,河谷平原占 24.4%。土壤分布受地形,气候等影响,垂直分布结构完整,主要包括高山草甸土、山地黑钙土、山地栗钙土以及灰钙土等。

### 1.2 数据来源

本文的基础地理数据包括:(1)MODIS 数据为来自于美国 NASA 的 EOS 数据中心发布的 16 d NDVI 合成 MOD13Q1 级数据产品,其空间分辨率为 250 m,时间跨度从 2014 年 1 月到 2014 年 12 月;(2)DEM 数据为 2011 年 NASA 公布全球空间分辨率为 30 m 的 ASTER GDEM V2 版数据;(3)降雨数据由东英吉利大学(Harris *et al.*, 2014 年)气候研究小组(CRU TS v. 3.22)提供的高分辨率网格数据集的月降水量数据,该数据集空间分辨率为  $0.5^{\circ}$ ,时间跨度从 1998 年 1 月到 2013 年 12 月;(4)土壤数据来自基于世界土壤数据库(HWSD)的中国土壤数据集。使用 ArcGIS 和 ENVI 等软件对以上数据进行处理。

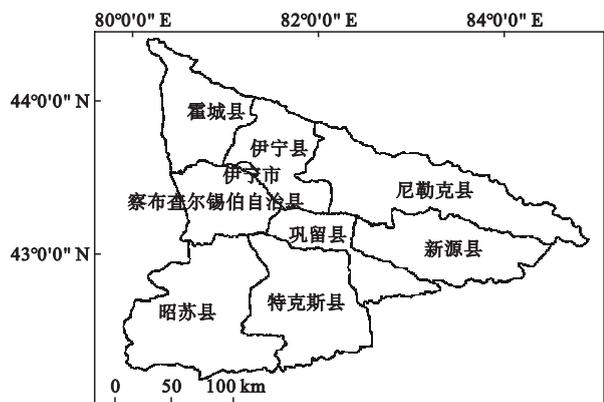


图 1 研究区位置示意图

Fig.1 Sketch map of location of the study area

### 1.3 土壤侵蚀敏感因子计算方法

在进行土壤侵蚀敏感性研究时,主要选取能够反映土壤侵蚀敏感性的因子,通过定量的土壤侵蚀模型,对区域土壤侵蚀敏感性进行综合评价。国内在北方土石山区(王娇等,2014)及黄土高原(周俊菊等,2011;李欣欣,2014)等多个地区很好地实现了通用土壤流失方程(USLE)的运用,伊犁河谷的自然环境与这些地区具有相似性,所以本文选取由 Wischmeier 和 Smith 提出的通用土壤流失方程(USLE)(Wischmeier *et al.*, 1978)。该模型全面考虑了影响土壤侵蚀的自然因素,通过植被覆盖度、坡度坡长、土壤可蚀性、降雨侵蚀力和水土保持措施 5 个因子进行定量计算,模型如下:

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

式中,  $A$  为土壤流失量( $t \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ),  $R$  为降雨侵蚀因子( $\text{MJ} \cdot \text{mm} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$ ),  $K$  为土壤可蚀性因子( $t \cdot \text{h} \cdot \text{MJ}^{-1} \cdot \text{mm}^{-1}$ ),  $L$  为坡长因子(无量纲),  $S$  为坡度因子(无量纲),  $C$  为植被因子(无量纲),  $P$  为水土保持因子(无量纲)。土壤侵蚀敏感性是指排除人为等外在影响因素,在自然状况下发生土壤侵蚀可能性的大小(王春菊等,2005)。因此,结合伊犁河谷地域特点,选取降水、土壤、坡度坡长以及植被覆盖等 4 个因子作为土壤侵蚀敏感性评价指标。

**1.3.1 降雨侵蚀力因子( $R$ )** 降雨是引起土壤侵蚀的直接动力,降雨侵蚀力作为衡量降雨引起土壤侵蚀能力的指标。通常采用 EI 30 指标度量。EI 30 的计算需要大量的实测资料,由于研究区缺乏实测资料,为此采用降雨侵蚀力的简易算法。本文采用 Wischmeier 等(1971)的经验公式进行计算。该计算公式是基于大量试验站的降雨侵蚀资料推导得出的。王万忠等(1996)发现其在中国北方地区具有一定的适用性,其计算公式为:

$$R = \sum_{i=1}^{12} 1.735 \times 10^{1.5(\log p_i^2 - \log p) - 0.8188} \quad (2)$$

式中,  $R$  为年降雨侵蚀力,  $p_i$  为各月平均降水量,  $p$  为年平均降水量。选取伊犁河谷周边均匀分布的降水数据计算  $R$  值,运用 ArcGIS 空间内插功能,采用 Kriging 方法得到  $R$  值的空间分布图。为了区分出降雨侵蚀力的季节性差异,本文分别计算了春、夏、秋三个季节的降雨侵蚀力,并计算了年降雨侵蚀力。

**1.3.2 土壤可蚀性因子( $K$ )** 土壤的可蚀性主要取决于土壤的理化特征,在通用土壤流失方程中,土

壤可蚀性因子  $K$  是一个通过实验确定的定量数值,最初的测定方法是在标准连续休闲的裸露小区条件下,单位降雨侵蚀指数形成的单位面积上的土壤流失量(李月臣等,2009)。通过实验测定大面积的  $K$  值费时费力,可行性较差,本文参考已有的相关成果(仲嘉亮等,2014),运用侵蚀-生产力评价(EPIC)模型中的  $K$  值计算公式,结合伊犁河谷土壤分布情况,得到该区土壤可蚀性因子空间分布图。计算公式如下:

$$K = \left\{ 0.2 + 0.3 \exp \left[ -0.0256 SAN \left( 1 - \frac{SIL}{100} \right) \right] \right\} \times \left( \frac{SIL}{SLA + SIL} \right)^{0.3} \times \left[ 1.0 - \frac{0.25C}{C - \exp(3.72 - 2.95C)} \right] \times \left[ 1.0 - \frac{0.7SN1}{SN1 + \exp(-5.51 + 22.9SN1)} \right] \quad (3)$$

式中,  $SAN$  为砂粒(粒径为 0.1~2 mm)百分含量(%),  $SIL$  为粉砂(粒径为 0.002~0.1 mm)百分含量(%),  $SLA$  为黏粒(粒径为 <0.002 mm)百分含量(%),  $C$  为有机质百分含量(%),  $SN1 = 1 - SAN/100$ 。

**1.3.3 坡长坡度因子( $LS$ )** 伊犁河谷地形地貌复杂,垂直高差大,  $LS$  因子很难计算。这里借鉴有关研究(李月臣等,2009),采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 DEM 数据为基本信息源,在 ArcGIS 空间分析模块的支持下,使用栅格邻域计算工具(neighborhood statistics),提取研究区的地形起伏数据。本文采用张军等(2008)、王玲等(2009)基于新疆 1:250000 DEM 数据得出新疆地形起伏度计算的最佳统计单位为  $8 \times 8$  网格( $2.56 \text{ km}^2$ )大小进行计算。

**1.3.4 植被因子( $C$ )** 植被覆盖因子反映植被阻抗土壤侵蚀的作用,本文选用植被覆盖度  $C$  值表征植被因子与土壤侵蚀量间的关系。 $C$  因子值介于 0~1,裸地状况下  $C$  值取最小值 0,地面受良好保护时  $C$  值取 1,表示无土壤侵蚀。利用 NDVI 估算模型计算(Gutman *et al.*, 1998;张月丛等,2008):

$$F_c = (NDVI - NDVI_{\min}) / (NDVI_{\max} - NDVI_{\min}) \quad (4)$$

通过  $F_c$  表示植被因子,能够较好地反映土壤侵蚀与植被盖度之间的关系。为了区分不同季节间植被覆盖度的差异,分别计算了春季、夏季、秋季的  $C$  值,同时对年最大  $C$  值进行了计算分析。

### 1.4 土壤侵蚀敏感性综合评价

**1.4.1 土壤侵蚀敏感性因子分级** 本文参考国内外土壤侵蚀敏感性评价研究成果(王效科等,2001;

表 1 土壤侵蚀敏感性因子评价指标体系表

Table 1 Evaluation index system of soil erosion sensitivity

敏感性	降雨侵蚀力 $R$ ( $\text{MJ} \cdot \text{mm} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$ )	土壤可蚀性 $K$	地形起伏度 $LS$ ( $\text{m}$ )	植被因子 $C$	分级赋值 $P$	分级标准 $SS$
不敏感	<25	<0.25	≤20	>0.7	1	1.0~2.0
轻度敏感	25~100	0.25~0.30	20~50	0.5~0.7	3	2.1~4.0
中度敏感	100~400	0.30~0.35	50~100	0.3~0.5	5	4.1~6.0
高度敏感	400~600	0.35~0.40	100~300	0.1~0.3	7	6.1~8.0
极敏感	>600	>0.40	>300	≤0.1	9	>8.0

王小丹等,2004;曾旭婧等,2014),依据国务院西部地区开发领导小组办公室和国家环境保护总局联合发布的《生态功能区划技术暂行规程》(2002)的分级标准及水利部的行业标准《土壤侵蚀分类分级标准》(SL 190-2007),对相应影响因子进行分级,该分级标准是根据目前对中国土壤侵蚀和有关生态环境研究的资料制定的。针对伊犁河谷自然环境特征,确定土壤侵蚀敏感性分级标准(表 1),为了综合反映出伊犁河谷土壤侵蚀的空间分异情况,应用 ArcGIS 软件分别对降雨、地形、土壤可蚀性、植被的数据进行数据重采样、栅格转换,将各个数据源统一到 30 m×30 m 的空间分辨率,按照表 1 进行重分类,将各敏感性因子空间分布图进行栅格叠加运算,绘制出土壤侵蚀敏感性综合评价图。

**1.4.2 土壤侵蚀敏感性综合评价方法** 土壤侵蚀敏感性是一个多因素综合作用下产生的结果,因此需对其进行综合评价。根据各个因子的分级与赋值,在 ArcGIS 操作平台上进行空间叠加分析,对以上各因子的敏感性影响分布图做栅格乘积运算获得伊犁河谷地区土壤侵蚀敏感性综合评价图。综合评价计算公式(曾旭婧等,2014)如下:

$$SS_j = \sqrt[4]{\prod_{i=1}^4 S_i} \quad (5)$$

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。运用 ArcGIS 中的分类分级模块与定性分析相结合的方法,借鉴相关学者在太行山所做研究的分级标准(王娇等,2014)将研究区的  $SS_j$ 分为 5 级。

**1.4.3 土壤侵蚀敏感性及其影响因素的弹性分析**

为了定量分析土壤侵蚀敏感性变化与降雨因子敏感性、植被因子敏感性变化之间的联系,利用得到的敏感性数据分别对二者进行弹性分析。综合考虑土壤侵蚀敏感性对降水和植被的弹性系数。借鉴 Schaake(1990 年)提出的方法,定义土壤侵蚀敏感性对可变因素(降雨、植被)变化的弹性公式为:

$$X = \frac{\Delta Q_i / \bar{Q}}{\Delta X_i / \bar{X}} = \frac{(Q_i - \bar{Q}) / \bar{Q}}{(X_i - \bar{X}) / \bar{X}} \quad (6)$$

式中, $X$  为弹性系数, $\Delta Q_i$  和  $\Delta X_i$  分别为土壤侵蚀敏感性所占面积比例和降雨,植被要素敏感性所占面积比例对各自平均值的变化。根据陈莹等(2011 年)的研究,该弹性系数可以看作是  $\Delta X_i / \bar{X}$  和  $\Delta Q_i / \bar{Q}$  之间的线性回归系数,可采用最小二乘法进行估计,其线性回归相关系数越大表示土壤侵蚀对其影响因素(降雨、植被)的变化也就越敏感。

## 2 结果与分析

### 2.1 伊犁河谷土壤侵蚀敏感性单因子分析

**2.1.1 降雨敏感性评价** 降雨是土壤侵蚀发生的原动力,降雨过程中不同的雨量、雨强、降雨历时与坡面的产流产沙关系密切。通过对研究区降雨敏感性进行研究,可以更加全面地了解不同地区降雨对土壤侵蚀的影响程度。伊犁河谷地区年降雨量在 200~500 mm,山区可达 800~1000 mm。我们对存在侵蚀性降雨的春季、夏季、秋季及年降雨侵蚀力进行分析研究。结果显示:伊犁河谷降雨侵蚀力季节性差异较大,降雨侵蚀力最大值出现在夏季(1104.6  $\text{MJ} \cdot \text{mm} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$ ),最小值在秋季(73.1  $\text{MJ} \cdot \text{mm} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$ )。降雨侵蚀力在相同时间不同地点差异也比较显著,最大值与最小值相差接近 5 倍(表 2)。随着降雨量的增加,土壤遭受侵蚀的敏感性也随之上升。研究区春、夏时段土壤侵蚀对降雨的敏感性以高度敏感为主,所占面积比分别为 68.9%和 46.2%。秋季及年降雨侵蚀力敏感性主要为中度敏感,所占面积比分别接近 76.4%和 55.1%。其中,降雨侵蚀力极敏感地区春季面积最大,夏季次之,所占面积比分别为 20.9%和 9.7%。由图 2 可知,空间上,整个研究区从西向东,由南到北降水侵蚀力差异显著,呈现出由中间向四周逐级增强的趋势。降雨侵蚀力中度、高度敏感地区主要分布在伊犁河谷两侧山前坡地、丘陵沟壑及高山区。

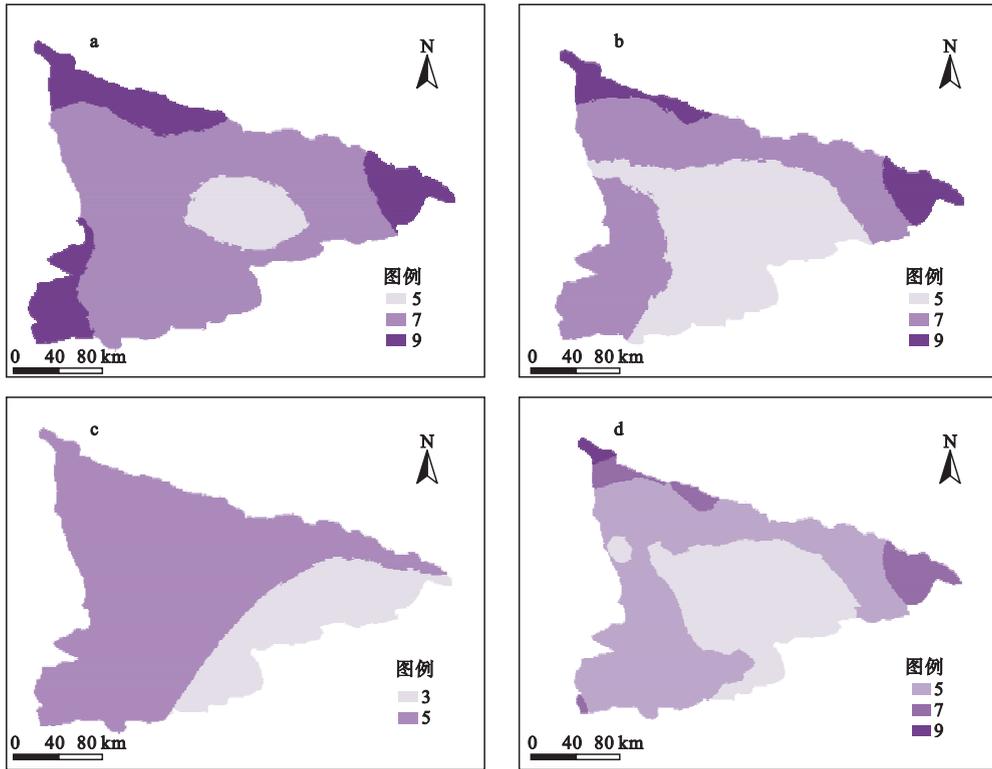


图2 伊犁河谷降雨侵蚀力敏感性空间分布图

Fig.2 Sensitivity spatial distribution of rainfall erosivity in Yili River valley

a. 春季, b. 夏季, c. 秋季, d. 年均, 3. 轻度敏感, 5. 中度敏感, 7. 高度敏感, 9. 极敏感。

**2.1.2 地形敏感性评价** 地形起伏度是影响土壤侵蚀的地形因素,通常在一定范围内地面高差越大,土体不稳定性越大,容易造成土壤流失。由于伊犁河谷地处天山西部,地表起伏较大,土壤侵蚀非常敏感。计算分析得知该研究区地形因子以高度敏感(起伏度范围在 100~300 m)为主,面积为  $2.2 \times 10^4$  km<sup>2</sup>,占地区总面积的 41%,其次为中度敏感(起伏度 50~100 m),所占比例为 20.2%。轻度敏感(起伏度 20~50 m)与不敏感(起伏度 0~20 m)面积相当,所占比例分别为 17.9% 和 18.3% (表 3)。可以看出,河谷底部平原地区起伏度较小,两侧山坡及丘陵地区起伏度相对较大(图 3a)。海拔在 1500 m 以上

表 2 伊犁河谷降雨侵蚀力敏感性评价表

Table 2 Sensitivity evaluation of rainfall erosivity in Yili River valley

时间	降雨侵蚀力 (MJ mm · hm <sup>-2</sup> · h <sup>-1</sup> · a <sup>-1</sup> )	轻度敏感 面积 (%)	中度敏感 面积 (%)	高度敏感 面积 (%)	极敏感 面积 (%)
春季	332.8~1036.5	*	10.2	68.9	20.9
夏季	274.8~1104.6	*	44.1	46.2	9.7
秋季	73.1~354.8	23.6	76.4	*	*
年均**	36.2~512.4	30.1	55.1	10.2	4.6

\* 表示数值非常小, \*\* 年均为年内(包含四个季节)的均值。

地面起伏度非常大,特别是横贯谷地的 3 条山脉两侧坡地,山高坡陡、沟壑纵横,为土壤侵蚀的高度敏感地区。

**2.1.3 土壤可蚀性敏感性评价** 土壤可蚀性作为土壤性质的重要评价指标,表征土壤抵抗侵蚀营力的能力,同时也能够反映土壤受外力侵蚀的敏感性(Bouyoucos, 1935)。伊犁河谷土地资源类型丰富,土壤类型主要包括:灰钙土、栗钙土、黑钙土、沼泽土、草甸土以及少量盐碱土(裴厦等, 2008)。通常情况下,质地疏松,含沙量高的土壤极易遭受侵蚀营力的破坏而发生水土流失(马广玉等, 2015)。该地区地形地貌特殊,谷地土壤广泛发育在覆盖有黄土状母质的阶地及洪积平原下部,土壤质地多为中壤

表 3 伊犁河谷地形因子敏感性评价表

Table 3 Sensitivity evaluation of topography factor in Yili River valley

敏感性	面积(km <sup>2</sup> )	比例(%)
不敏感	9917.2	18.3
轻度敏感	9654.1	17.9
中度敏感	10942.5	20.2
高度敏感	22171.9	41.0
极敏感	1332.1	2.6

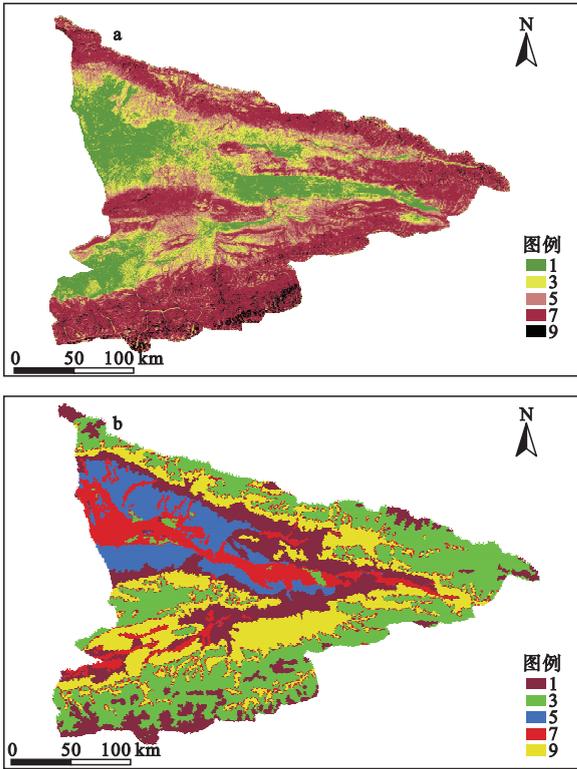


图3 伊犁河谷地形、土壤因子敏感性空间分布图  
**Fig.3 Sensitivity spatial distribution of topography factor and soil texture in Yili River valley**  
 a. 地形因子, b. 土壤质地, 1. 不敏感, 3. 轻度敏感, 5. 中度敏感, 7. 高度敏感, 9. 极敏感。

土与轻壤土, 结构疏松, 多孔隙, 易发生土壤侵蚀。伊犁河谷土壤可蚀性中度、轻度敏感地区所占面积比例较大, 达到 42.6%, 主要分布在海拔 1000 m 以下河谷两岸、草原灰钙土覆盖的山前坡地以及高山地区初育土、薄层土地区。其次为不敏感地区, 占研究区面积的 23.1%, 主要分布在特克斯, 巩乃斯谷地, 海拔 1100~1500 m, 由山地栗钙土及冰川冰雪覆盖的中低山地带。土壤可蚀性高敏感地区分布于河流两岸的冲积扇缘地段, 占研究区面积的 13%。土壤可蚀性极敏感地区主要分布在海拔 1800 m 左右的中高山黑钙土覆盖的地区, 特克斯谷地山体两侧居多, 占研究区面积的 20%(表 4、图 3b)。

**2.1.4 植被因子敏感性评价** 植被作为土壤表面的覆盖物, 不仅影响土壤的发生发育, 而且能够对表层土壤产生一定的保护作用。伊犁河谷的植被分布受海拔及小区域气候的影响, 主要发育有荒漠、草原、草甸、森林等植被类型。通过分析不同季节植被对土壤侵蚀的影响, 发现一年当中春季和秋季伊犁河谷植被覆盖度较低, 土壤侵蚀敏感性较高: 春季最敏感, 秋季次之、夏季以不敏感为主。其中, 中度敏

感所占面积(春季  $1.8 \times 10^4 \text{ km}^2$ 、秋季  $2.5 \times 10^4 \text{ km}^2$ ), 所占比例分别为 34.4% 和 44.9%, 高度敏感地区面积所占比例达到(春季 57.4%、秋季 42.6%)(表 5)。空间上, 春秋两季植被因子较敏感地区主要分布在植被较少的河谷平原耕作区及海拔在 1000~1500 m 的低山丘陵和山前坡地。极度敏感地区集中在海拔 2000 m 以上的山地草原、天然林地及冰川积雪区域。夏季植被状况较好, 土壤侵蚀较敏感地区主要集中在海拔 1000 m 左右的低山丘陵带、山前坡地等低覆被荒漠草原地带(图 4)。

**2.2 伊犁河谷土壤侵蚀敏感性评价结果**

利用 USLE 模型, 计算得到植被、地形、降雨、土壤 4 个影响因子的敏感性指数, 然后通过 GIS 平台进行空间数据叠加分析, 得到伊犁河谷不同季节的土壤侵蚀敏感性综合评价分布图(图 5), 从土壤侵蚀敏感性的面积数量特征上来看, 土壤侵蚀敏感性的季节差异较大, 春季面积最大、秋季次之, 夏季最小, 最大最小所占面积相差达 5 倍之多。从时间分布特征来看, 春季、秋季土壤侵蚀敏感性以中度敏感为主(春季  $2.3 \times 10^4 \text{ km}^2$ 、秋季  $2.9 \times 10^4 \text{ km}^2$ ) 分别占地区总面积的 42.5% 和 53.8%(表 6)。夏季及年土壤侵蚀以轻度敏感为主, 所占比例分别为 54.5% 和 63.4%。土壤侵蚀高度敏感与极敏感所占面积在各季节中分布不均, 其中春季最多( $1.7 \times 10^4 \text{ km}^2$ ), 所占面积比例达 32.2%; 夏季次之, 所占比例为 6.1%; 秋季略小于夏季, 为 6%, 年度所占比例仅为 1.1%。

表 4 伊犁河谷土壤可蚀性敏感性评价表  
**Table 4 Sensitivity evaluation of soil erodibility in Yili River valley**

敏感性	面积( $\text{km}^2$ )	比例(%)
不敏感	12379.9	23.1
轻度敏感	17309.2	32.3
中度敏感	5513.6	10.3
高度敏感	7273.6	13.6
极敏感	11095.2	20.7

表 5 伊犁河谷植被因子敏感性评价表  
**Table 5 Sensitivity evaluation of vegetation factor in Yili River valley**

时间	不敏感面积(%)	轻度敏感面积(%)	中度敏感面积(%)	高度敏感面积(%)	极敏感面积(%)
春季	1.5	6.7	34.4	28.5	28.9
夏季	42.1	22.3	14.6	15.8	5.2
秋季	1.8	10.7	44.9	26.8	15.8
年最大*	54.1	19.0	13.9	9.4	3.6

\* 年最大为年内植被覆盖度达到最大。

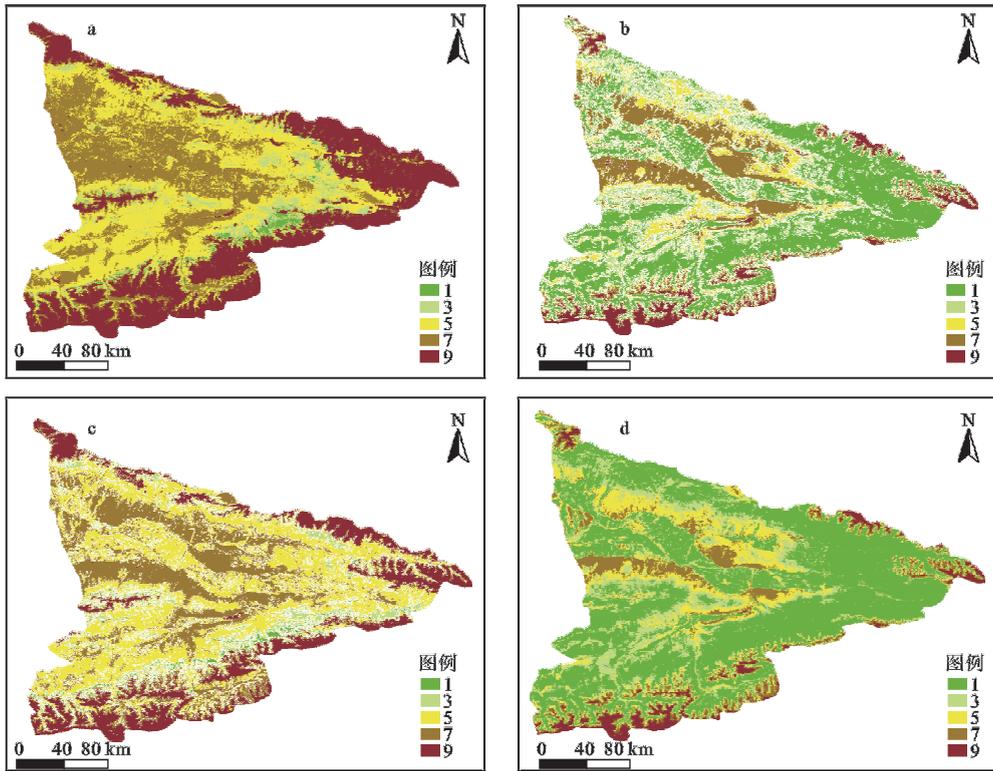


图4 伊犁河谷植被因子敏感性空间分布图

Fig.4 Sensitivity spatial distribution of vegetation factor in Yili River valley

a. 春季, b. 夏季, c. 秋季, d. 年最大, 1. 不敏感, 3. 轻度敏感, 5. 中度敏感, 7. 高度敏感, 9. 极敏感。

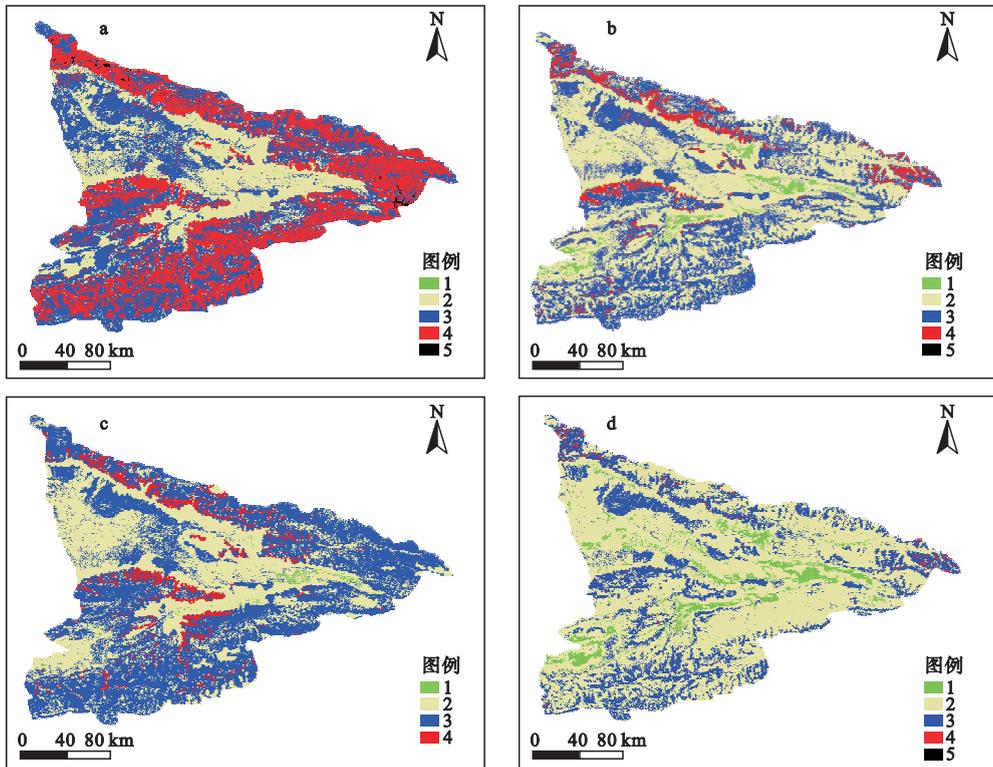


图5 伊犁河谷土壤侵蚀敏感性综合评价图

Fig.5 Integrated evaluation of soil erosion sensitivity in Yili River valley

a. 春季, b. 夏季, c. 秋季, d. 年均, 1. 不敏感, 2. 轻度敏感, 3. 中度敏感, 4. 高度敏感, 5. 极敏感。

表 6 伊犁河谷土壤侵蚀敏感性综合评价表  
Table 6 Integrated sensitivity evaluation on soil erosion in Yili River valley

时间	不敏感 面积 (%)	轻度敏感 面积 (%)	中度敏感 面积 (%)	高度敏感 面积 (%)	极敏感 面积 (%)
春季	0.1	24.8	42.5	32.2	0.4
夏季	2.7	54.5	36.6	6.1	0.1
秋季	0.7	39.4	53.8	6.0	0.1
年均	4.6	63.4	30.6	1.1	0.3

从空间分布特征来看,春季轻度敏感地区分布在地形起伏较小的山坡,丘陵及河道周边,特别是在尼勒克县西部的山前坡地、巩留县中部、新源县中西部以及昭苏盆地以东、特克斯谷地南部低山丘陵区域;中度、高度敏感地区集中分布在平原区到山区过渡的荒漠草场区,比如伊宁县北山坡、察县南缘坡地以及植被较少、沟壑众多、海拔 1500 m 以上,坡度 20°左右的山区坡地。夏季土壤侵蚀高敏感区减少,轻度敏感地区面积大幅增加,增加地区主要集中在乌孙山与科古琴山之间的伊犁盆地平原地区、巩乃斯谷地及乌孙山南部昭苏盆地平缓地区。秋季土壤侵蚀中度敏感地区相对于夏季显著增加,增加区域主要集中在海拔在 1800 m 左右的山地灌丛草原区域,特别是在昭苏盆地,特克斯谷地南部山区。

从土壤侵蚀的主要影响因子来看,降雨侵蚀力因子和植被覆盖因子是研究区土壤侵蚀年内变化的主要影响因子,受区域气候影响较大。为了定量分析土壤侵蚀敏感性与降雨侵蚀力因子、植被因子之间的联系,在其他影响因子不变的情况下,借鉴 Schaake 提出的方法对两者进行弹性分析(式 6),结果显示,土壤侵蚀敏感性与植被因子、降雨侵蚀力因子的相关性分别为 0.97 和 0.22,植被因子对土壤侵蚀敏感性的影响程度大于降水侵蚀力因子。因此,在无法控制降雨的前提下,加强该地区的植被保护和生态恢复,是防治水土流失的有效措施。

### 3 讨论

土壤侵蚀受地形地貌、降雨、植被及土壤质地等因素影响,利用土壤流失方程 USLE 研究伊犁河谷土壤侵蚀过程中,地形地貌和土壤质地基本不会变化,但是降雨因子与植被因子随季节变化明显,为了更加准确地计算土壤侵蚀程度,就必须考虑影响因子的时间变化情况。单纯计算研究区年土壤侵蚀情况,必然会忽略土壤侵蚀的季节变化特征,降低该地

区土壤侵蚀评价的准确性。为了更加准确地分析伊犁河谷土壤侵蚀敏感性分布规律及特征,本文从春季、夏季、秋季及全年不同时间段与时间尺度,分别对伊犁河谷的土壤侵蚀敏感性进行分析研究,综合评价该地区土壤侵蚀敏感性程度,反映了随着时间的推移该地区生态系统中各因子相互作用强度的变化情况。由于伊犁河谷冬季降水以固态降水为主,基本不产生侵蚀性降水,且植被状况稳定,冬季不易发生土壤侵蚀。但其固态降水引发的土壤侵蚀具有时滞性,主要以叠加形式作用在在春夏季节,以冻融侵蚀,融冰融雪侵蚀为主。

计算分析可知,春、夏、秋 3 个季节与年土壤侵蚀敏感性数据存在显著差异。研究区土壤侵蚀春季最敏感,秋季次之,夏季及年土壤侵蚀以轻度敏感为主(表 6);可以看出,运用通用土壤流失方程计算的年土壤侵蚀敏感性,削弱了土壤侵蚀的季节特征。土壤侵蚀的季节性变化规律存在地域差异,如李欣欣(2014)所研究的岔口流域,土壤侵蚀程度同样呈现出季节性差异,但与本研究不同,岔口流域土壤侵蚀最严重的季节出现在夏季,原因在于其侵蚀性降雨主要发生在夏季,春季降雨稀少。而伊犁河谷春季侵蚀性降雨强度(降雨峰值出现在 4—6 月,图 6)较大,地表植被处于生长季,没有达到最大覆盖度,且春季气温回升迅速,是河谷山地冰雪冻融侵蚀的高发期,加剧了区域的土壤侵蚀程度。

通过对比分析地形因子与土壤侵蚀敏感性数据,发现地形起伏度在 100~300 m、坡度在 15°以上的地区与土壤侵蚀中度、高度敏感地区分布范围相吻合,且分布面积相近,所占比例都在 40%左右。庞国伟(2012)和任坤等(2015)发现,流域土壤侵蚀强度受地形影响显著,随着坡度的增加,侵蚀强度与侵蚀量均显著增加,阳坡侵蚀强度高于阴坡。王娇等(2014)在研究太行山区的土壤侵蚀也发现,15°~20°左右坡度带的土壤侵蚀强度以中高度敏感性为主。这种土壤侵蚀敏感地带与一定数值范围的地形要素在空间分布与数量分布上高度一致的现象说明,地形因子是影响土壤侵蚀的关键因素之一,在防治水土流失的过程中应予以重视,加强该坡度范围内的生态保护力度。

降雨与植被是土壤侵蚀年内变化的主要影响因子。我国北方大部分地区从春季到夏季植被复苏但生长缓慢,降雨量与降雨强度却增加迅速,导致土壤侵蚀的驱动力迅速增强,夏季土壤侵蚀强度达到最

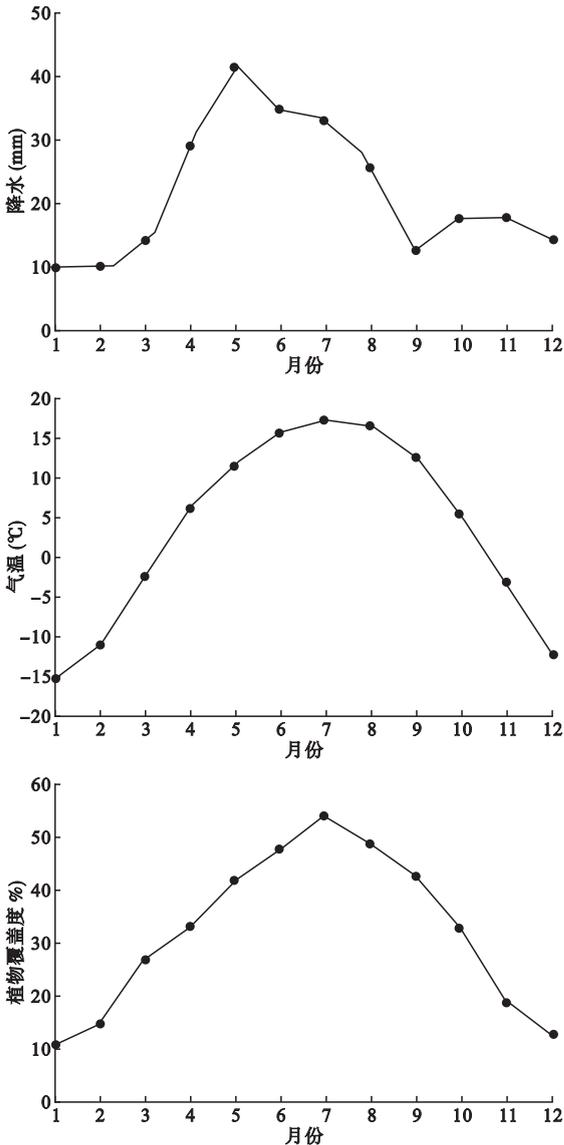


图6 伊犁河谷月平均降水、气温、植被覆盖度变化图  
Fig.6 Monthly mean precipitation, temperature, and vegetation coverage change in the Yili River valley

大。我们通过对伊犁河谷的多年月平均降水、温度和植被覆盖度进行统计分析发现,伊犁河谷降水峰值在4—6月,气温与植被覆盖度同步性较高,滞后于降水,7月达到最大值(图6)。张军民等(2006)在研究伊犁河谷气候资源特点时也发现,伊犁河谷植被种类多、分布范围广、春长夏短、气温回升快,夏季植被覆盖度较高,植被对降雨侵蚀的阻挡能力较大,削弱了该地区夏季的土壤侵蚀。吴昌广(2011)研究了三峡库区的植被覆盖与土壤侵蚀的关系,发现气温是驱动植被NDVI变化的主要因子,且在季节水平上,春冬两季植被NDVI变化对同期气温的敏感性较大。有研究发现,近年来伊犁河谷植被覆

盖度整体下降趋势明显,减小区域主要位于乌孙山两端以及伊犁河谷周围海拔2000 m左右的中、低山区域(闫俊杰等,2013),且降水量和极端降水量总体呈现明显增加的趋势(赵丽等,2014),这种变化,再加上近年来人类活动扰动增加,加剧了该地区发生水土流失的风险。

本研究运用通用土壤流失方程(USLE),在缺乏研究区相关土壤侵蚀实测数据的情况下,借助遥感影像解译与GIS空间分析技术,完成了伊犁河谷主要自然因子驱动下土壤侵蚀敏感性的评价分析。主要目的并非得出某一年份的实际水土流失量,而是一个相对的水土流失风险,能够对研究区域的水土流失风险动态进行监测。利用遥感方法能够帮助我们从更大尺度上研究并认知土壤侵蚀特征,而结合实地观测实验,校正遥感数据解译的准确性,建立更加科学准确且适宜于本地区的土壤侵蚀模型等工作尚需进一步加强。

#### 4 结论

本文借助通用土壤流失方程USLE,在GIS、ENVI等软件平台上,选取降雨侵蚀力 $R$ 、土壤质地 $K$ 、植被覆盖 $C$ 以及坡长坡度 $LS$ 等4个影响土壤侵蚀的因子,针对不同季节开展伊犁河谷土壤侵蚀敏感性研究。

土壤侵蚀敏感性数量特征。伊犁河谷植被因子、降雨因子季节波动较大,导致河谷春季、秋季土壤侵蚀以中度敏感为主(春季 $2.3 \times 10^4 \text{ km}^2$ 、秋季 $2.9 \times 10^4 \text{ km}^2$ ),所占比例分别达到42.5%和53.8%。夏季及年土壤侵蚀以轻度敏感为主,所占面积比例分别为54.5%和63.4%。

土壤侵蚀高度敏感性地区季节差异较大。春季面积最大( $1.7 \times 10^4 \text{ km}^2$ ),所占比例达到32.2%;夏季次之,所占比例为6.1%;秋季略小于夏季。主要归因于,春季降雨多,植被覆盖状况差,夏秋两季相对较好。

土壤侵蚀敏感性的空间分布特征。土壤侵蚀轻度敏感性地区集中在河谷盆地平原地区,如伊犁盆地大部、昭苏盆地西部以及巩留、尼勒克、特克斯、新源县交界的区域;中度、高度敏感性地区分布在植被较少、坡度较大、沟壑较多的山前冲积坡地,以及海拔1500 m以上、坡度 $20^\circ$ 左右的山区,特别是横贯谷地的3条山脉两侧坡度较大的地区,依山体走向而形成了3条土壤侵蚀高度敏感性区域条带。

通过对比降雨因子与植被因子对土壤侵蚀敏感性的作用大小,发现伊犁河谷植被因子对土壤侵蚀敏感性的影响程度大于降雨因子。

## 参考文献

陈莹, 陈兴伟. 2011. 基于弹性分析的闽江流域径流演变与气候变化关系. 福建师范大学学报: 自然科学版, **27**(6): 101-105.

范天文, 闫凯, 靳瑰丽. 2008. 伊犁河谷天然草地退化现状及修复措施. 草业科学, **25**(3): 22-25.

李锐. 2008. 中国水土流失基础研究的机遇与挑战. 自然杂志, **30**(1): 6-11.

李欣欣. 2014. 基于 GIS 与 RUSLE 模型岔口小流域土壤侵蚀时空变化定量研究(硕士学位论文). 太谷: 山西农业大学.

李月臣, 刘春霞, 赵纯勇, 等. 2009. 三峡库区(重庆段)土壤侵蚀敏感性评价及其空间分异特征. 生态学报, **29**(2): 788-796.

刘震. 2013. 我国水土保持情况普查及成果运用. 中国水土保持科学, **11**(2): 1-5.

马广玉, 李嘉薇, 方青青, 等. 2015. 模拟降雨条件下典型土壤的可蚀性与养分流失特征. 生态学杂志, **34**(8): 2267-2273.

庞国伟. 2012. 人为作用对土壤侵蚀环境影响的定量表征(博士学位论文). 咸阳: 中国科学院研究生院(教育部水土保持与生态环境研究中心).

裴厦, 章予舒, 王立新. 2008. 伊犁河流域荒地资源开发障碍性因素分析. 新疆农业科学, **45**(S3): 17-20.

乔木, 朱自安, 徐海量, 等. 2007. 伊犁河流域重点防护林及农业生态技术示范研究. 新疆: 新疆科学技术出版社.

任坤, 梅琨, 朱慧敏, 等. 2015. 基于 RUSLE 模型的珊溪水库流域土壤侵蚀定量估算. 生态学杂志, **34**(7): 1950-1958.

史彦江, 宋锋惠, 罗青红, 等. 2009. 伊犁河谷缓坡地融雪侵蚀特征研究. 新疆农业科学, **46**(5): 1111-1116.

王娇, 程维明, 祁生林, 等. 2014. 基于 USLE 和 GIS 的水土流失敏感性空间分析——以河北太行山区为例. 地理研究, **33**(4): 614-624.

王蕾, 高亚琪, 彭岩. 2013. 伊犁河流域土壤侵蚀评价. 防护林科技, (10): 32-35.

王玲, 吕新. 2009. 基于 DEM 的新疆地势起伏度分析. 测绘科学, **34**(1): 113-116.

王春菊, 汤小华, 郑达贤, 等. 2005. GIS 支持下的土壤侵蚀敏感性评价研究. 水土保持通报, **25**(1): 68-70, 74.

王礼先. 2005. 水土保持学. 北京: 中国林业出版社.

王万忠, 焦菊英, 马丽梅, 等. 2012. 黄土高原不同侵蚀类型区侵蚀产沙强度变化及其治理目标. 水土保持通报, **32**(5): 1-7.

王万忠, 焦菊英. 1996. 中国的土壤侵蚀因子定量研究. 水土保持通报, **16**(5): 1-20.

王小丹, 钟祥浩, 范建容. 2004. 西藏水土流失敏感性评价及其空间分异规律. 地理学报, **59**(2): 183-188.

王效科, 欧阳志云, 肖寒, 等. 2001. 中国水土流失敏感性分布规律及其区划研究. 生态学报, **21**(1): 14-19.

王志伟, 陈志成, 艾钊, 等. 2012. 不同雨强与坡度对沂蒙山区典型土壤坡面侵蚀产沙的影响. 水土保持学报, **26**(6): 17-20.

吴昌广. 2011. 气候变化背景下三峡库区植被覆盖动态及其土壤侵蚀风险研究(博士学位论文). 湖北武汉: 华中农业大学.

闫俊杰, 乔木, 周宏飞, 等. 2013. 基于 MODIS/NDVI 的新疆伊犁河谷植被变化. 干旱区地理, **36**(3): 512-519.

杨冉冉, 徐涵秋, 林娜, 等. 2013. 基于 RUSLE 的福建省长汀县河田盆地土壤侵蚀定量研究. 生态学报, **33**(10): 2974-2982.

袁咏, 杨宏伟, 楼正之. 2006. 新疆伊犁州水土保持工作

现状及存在问题分析. 水土保持应用技术, (1): 41-43.

曾旭婧, 张毅, 黄素萍, 等. 2014. 定量遥感支持下的岷江上游土壤侵蚀敏感性评价. 土壤通报, **45**(4): 953-960.

张军, 李晓东, 陈春艳, 等. 2008. 新疆地势起伏度的分析研究. 兰州大学学报: 自然科学版, **44**(s1): 10-13, 19.

张军民. 2006. 伊犁河流域气候资源特点及其时空分布规律研究. 干旱气象, **24**(2): 1-4.

张月丛, 赵志强, 李双成, 等. 2008. 基于 SPOT NDVI 的华北北部地表植被覆盖变化趋势. 地理研究, **27**(4): 11.

赵丽, 杨青, 韩雪云. 2014. 1961-2009 年伊犁地区降水指数的时空分布及变化特征分析. 干旱区资源与环境, **28**(10): 82-89.

郑粉莉, 王占礼, 杨勤科. 2008. 我国土壤侵蚀科学研究回顾和展望. 自然杂志, **30**(1): 12-16.

仲嘉亮, 郭朝霞. 2014. 新疆土壤可蚀性 K 值空间插值及其分布特征研究. 新疆环境保护, **36**(3): 1-4, 10.

周俊菊, 石培基, 师玮, 等. 2011. 基于 GIS 的陇南市土壤侵蚀敏感性评价及其空间分异特征. 土壤通报, **42**(5): 1076-1080.

Bouyoucos GJ. 1935. The clay ratio as a criterion of susceptibility of soils to erosion. *Journal of American Society of Agronomy*, **27**: 738-741.

Graaff JD, Aklilu A, Ouessar M, et al. 2013. The development of soil and water conservation policies and practices in five selected countries from 1960 to 2010. *Land Use Policy*, **32**: 165-174.

Gutman G., Ignatov A. 1998. The derivation of the green vegetation fraction from NOAA/AVHRR Data for use in numerical weather prediction models. *International Journal of Remote Sensing*, **19**: 1533-1543.

Harris I, Jones PD, Osborn TJ, et al. 2014. Updated high-resolution grids of monthly climatic observations: The CRU TS3.10 dataset. *International Journal of Climatology*, **34**: 623-642.

Lafren JM, Lwonard JL, Foster GR. 1991. WEPP a new generation of erosion prediction technology. *Journal of Soil and Water Conservation*, **46**: 34-38.

Morgan RPC, Quinton JN, Smith RE, et al. 1998. The European soil erosion model (EUROSEM): A dynamic approach for predicting sediment transport from fields and small catchments. *Earth Surface Processes and Landforms*, **23**: 527-544.

Park S, Oh C, Jeon S, et al. 2011. Soil erosion risk in Korean watersheds, assessed using the revised universal soil loss equation. *Journal of Hydrology*, **399**: 263-273.

Schaake JC. 1990. From climate to flow, in *Climate Change and U. S. Water Resources*// Waggoner PE, ed. New York: John Wiley: 177-206.

Wang B, Zheng FL, Romkens, MJM, et al. 2013. Soil erodibility for water erosion: A perspective and Chinese experiences. *Geomorphology*, **187**: 1-10.

Wischmeier W.H, Johnson CB, Cross BV. 1971. A soil erodibility nomograph for farmland and construction sites. *Journal of Soil and Water Conservation*, **26**: 189-193.

Wischmeier WH, Smith DD. 1978. Predicting rainfall erosion losses: A guide to conservation planning// *Agricultural Handbook No. 537*. Washington, DC: U.S. Department of Agriculture.

Xu L, Xu X, Meng X. 2013. Risk assessment of soil erosion in different rainfall scenarios by RUSLE model coupled with Information Diffusion Model: A case study of Bohai Rim, China. *Catena*, **100**: 74-82.

作者简介 李大龙,男,1991年生,硕士,主要从事水土保持方向的研究。E-mail: lidalong2013@126.com  
责任编辑 张敏