

# 祁连山南坡土壤侵蚀定量研究与影响因素分析

童珊<sup>1,2,3</sup>, 曹广超<sup>2,3</sup>, 闫欣<sup>1,2,3</sup>, 刁二龙<sup>1,2,3</sup>, 张卓<sup>1,2,3</sup>

(1.青海师范大学 地理科学学院, 西宁 810008; 2.青海师范大学 青海省自然地理与环境过程重点实验室, 西宁 810008; 3.青藏高原地表过程与生态保育教育部重点实验室, 西宁 810008)

**摘要:**土壤侵蚀是引起土壤土地退化及土壤肥力下降的主要原因之一,直接影响着区域生态经济的可持续发展。基于 RUSLE 模型、CA-Markov 模型及 LMDI 模型,对祁连山南坡 2000—2019 年土壤侵蚀空间变化及预测、不同地形条件下土壤侵蚀变化特征及影响因子的定量分析进行了研究,为研究区水土保持治理提供参考。研究表明:(1) 土壤侵蚀模数呈现出西北向东南递减的趋势,整体增加速率为 0.0645/a;(2) 土壤侵蚀变化分为两个阶段,2000—2005 年为土壤侵蚀加重阶段,2005—2019 年为土壤侵蚀减轻阶段;(3) 2019—2027 年,土壤侵蚀虽有减轻的趋势,但也要防止极强度以下的侵蚀低级向高级转变;(4) 土壤侵蚀模数随着海拔及坡度的增加而增加,在海拔 4 700~5 200 m 及坡度 $>30^{\circ}$ 的区域土壤侵蚀模数达到最大,分别为 10 460.72、7 256.32 t/(km<sup>2</sup>·a)。土壤侵蚀量随着坡度的增加而减小,不同坡向下的土壤侵蚀排序为西 $>$ 北 $>$ 南 $>$ 东 $>$ 水平方向;(5) 植被对土壤侵蚀的影响一定是积极的,而降雨不一定加重土壤侵蚀,且土壤侵蚀受植被和降雨影响较小区域主要分布在门源县。综上,祁连山南坡的土壤侵蚀近几年得到较好的治理,可根据具体的环境条件对土壤侵蚀进行分类治理。

**关键词:**土壤侵蚀;土壤侵蚀动态变化;土壤侵蚀预测;影响因素分析

中图分类号:S157.1

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2022)05-0100-08

## Quantitative Study on Soil Erosion and Its Influencing Factors on the South Slope of Qilian Mountain

TONG Shan,<sup>2,3</sup> CAO Guangchao<sup>2,3</sup>, YAN Xin<sup>1,2,3</sup>, DIAO Erlong<sup>1,2,3</sup>, ZHANG Zhuo<sup>1,2,3</sup>

(1.College of Geographical Sciences, Qinghai Normal University, Xining 810008, China; 2.Qinghai Key Laboratory of Natural Geography and Environmental Process, Qinghai Normal University, Xining 810008, China; 3.Key Laboratory of Earth Surface Processes and Ecological Conservation in Qinghai-Tibet Plateau, Ministry of Education, Xining 810008, China)

**Abstract:** Soil erosion is one of the main causes of soil degradation and soil fertility decline, which directly affects the sustainable development of regional ecological economy. Based on RUSLE model, CA Markov model and LMDI model, we studied the spatial change and prediction of soil erosion on the south slope of Qilian Mountain from 2000 to 2019, and the quantitatively analyzed the soil erosion change characteristics and influencing factors under different topographic conditions, so as to provide reference for soil and water conservation and control in the study area. The results show that: (1) the soil erosion modulus decreased from northwest to southeast, and the overall increase rate was 0.064 5/a; (2) the change of soil erosion could be divided into two stages: 2000—2005 was the aggravation stage of soil erosion, and 2005—2019 was the mitigation stage of soil erosion; (3) from 2019 to 2027, although soil erosion tended to reduce, it was also necessary to prevent the transformation from low-level to high-level erosion below extreme intensity; (4) the soil erosion modulus increased with the increase of altitude and slope; the soil erosion modulus reached to the maximum in the area with altitude of 4 700~5 200 m and slope $>30^{\circ}$ , which were 10 460.72 and 7 256.32

收稿日期:2021-07-17

修回日期:2021-07-30

资助项目:青海省祁连山自然保护区管理局及祁连山国家公园长期科研基地“祁连山国家公园(青海片区)湿地保护恢复及其生态服务功能评估监测项目”(QHTX-2020-043-02)

第一作者:童珊(1995—),女,陕西西安人,博士生,研究方向为地表环境过程与生态响应。E-mail:1661143102@qq.com

通信作者:曹广超(1971—),男,山东省苍山人,教授,博士生导师,主要从事青藏高原地区环境变化与地理信息系统应用研究。E-mail:Caoguangchao@qhnu.edu.cn

$t/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ , respectively; the amount of soil erosion decreased with the increase of slope, and the order of soil erosion in different slope directions was west>north>south>east>horizontal direction; (5) the impact of vegetation on soil erosion must be positive, while rainfall does not necessarily aggravate soil erosion, and soil erosion is less affected by vegetation and rainfall, which is mainly distributed in Menyuan County. In conclusion, soil erosion on the southern slope of Qilian Mountains has been well controlled in recent years, and soil erosion can be classified and controlled according to specific environmental conditions.

**Keywords:** soil erosion; soil erosion dynamic change; soil erosion prediction; analysis of influencing factors

土壤侵蚀会导致土壤肥力、土地利用率和生产力大幅下降<sup>[1-2]</sup>,甚至制约生态环境和经济的可持续发展<sup>[3-4]</sup>。青海省共有水土流失面积 16.21 万  $\text{km}^2$ ,约占全省土地总面积的 23.28%,其中中度侵蚀以上面积占 6.46 万  $\text{km}^2$ 。为减缓水土流失,需要对其进行定量化的研究,有一些学者已经对青藏高原进行的初步研究,例如康琳琦<sup>[5]</sup>基于 USLE 模型模拟青藏高原的降雨侵蚀,林慧龙等<sup>[6]</sup>以<sup>137</sup>Cs 示踪法为基础,结合 RUSLE 模型,以 GIS 反演为手段,综合分析三江源区 2001—2012 年土壤侵蚀影响因子的特征和土壤侵蚀空间分布规律,陈豪等<sup>[7]</sup>基于 USLE 模型,对祁连山国家公园 2005—2019 年水力侵蚀进行模拟和计算,分析土壤侵蚀模数时空分布的动态变化及影响土壤侵蚀的主导因素,因此 RUSLE 模型对海拔相差较大区域具有一定的适应性。

马尔科夫模型(CA-Markov)可以根据目前时间的事物状态来模拟预测未来某个时间该事物的状态,它被广泛应用于土地利用变化<sup>[8]</sup>、植被覆盖动态变化<sup>[9]</sup>以及人口等<sup>[10]</sup>各项地理学研究,但也有对于土壤侵蚀的预测研究,例如武国胜<sup>[11]</sup>及赵博轩等<sup>[12]</sup>利用此模型对福建长汀土壤侵蚀动态预测,赵明松等<sup>[13]</sup>利用 CA-Markov 模型对安徽省的土壤侵蚀进行预测。迪氏指数因子分解模型(LMDI),是可以从像元尺度定量判断各因素变化对土壤侵蚀变化的具体贡献值<sup>[14]</sup>,该模型能够对结果进行完全分解,无不能分解的残余项,与已往的影响因素分析方法例如地理探测器<sup>[15]</sup>、主成分分析法、相关性分析法<sup>[16-17]</sup>及通径分析等<sup>[18]</sup>方法不同,是研究增长内因及作用强度中广为应用的一种方法<sup>[19-20]</sup>。QIAN H E 等<sup>[21]</sup>利用 LMDI 模型对青藏高原从像素尺度计算植被覆盖因子(C 因子)和降雨侵蚀力因子(R 因子)对土壤侵蚀变化的贡献值。贺倩等<sup>[14]</sup>利用 LMDI 模型对三江源土壤侵蚀影响因素进行研究,植被对土壤侵蚀变化整体上具有积极作用,贡献值范围集中在 $-100 \sim 100 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 。

祁连山南坡地形复杂,生态系统丰富,可以说祁连山南坡是整个祁连山地区水源涵养的核心区<sup>[22]</sup>。

本文通过对研究区不同地形条件下土壤侵蚀的定量研究、未来 6 a 不同土壤侵蚀强度预测及对影响土壤侵蚀内因的定量化表达,为研究区土壤侵蚀的治理及决策提供一定的科学支撑。

## 1 研究区概况与数据来源

### 1.1 研究区概况

祁连山南坡地处青海省境内,山脉包括东北-西南走向的走廊南山、托勒山、托勒南山、大通山和冷龙岭,地形地貌复杂多样<sup>[23]</sup>,研究区地理位置为东经 $98^{\circ}08'13''$ — $102^{\circ}38'16''$ ,北纬 $37^{\circ}03'17''$ — $39^{\circ}05'56''$ ,总面积约为 $2.4 \times 10^4 \text{ km}^2$ ,区域内海拔高差大,土壤类型丰富<sup>[24]</sup>,主要山脉均为西北—东南走向,其间分布山间谷地,该区是典型的高原大陆性气候,气温日较差大,年平均气温为 $-5.9^{\circ}\text{C}$ ,四季不明显,年内无绝对无霜期,年降水量约 400 mm,主要集中在 5—9 月,7 月、8 月最为集中<sup>[25]</sup>。受地形影响,水热条件垂直变换明显,区内生态环境差异较大<sup>[26]</sup>。

### 1.2 数据来源

气象数据:数据来源于中国气象科学数据共享服务网(<http://cdc.cma.gov.cn>)下载国家台站监测数据,包括祁连山及周边气象 33 个站点的降雨资料,整理后得到站点的月降雨量及年降雨量数据,时间为 2000 年、2005 年、2010 年、2015 年及 2019 年。

NDVI 数据:本文使用的植被遥感数据 MOD13Q1,来源于 NASA 网站(<https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/>),空间分辨率为 $250 \text{ m} \times 250 \text{ m}$ ,时间分辨率为 16 d,经过拼接、裁剪及最大合成法形成年 NDVI 数据,时间为 2000 年、2005 年、2010 年、2015 年及 2019 年。

DEM 数据:来源于地理空间数据云平台(<http://www.gscloud.cn>),空间分辨率为 $90 \text{ m} \times 90 \text{ m}$ 。

不同土地利用类型数据:来源于中国科学院地理科学与资源研究所(<http://www.resdc.cn/>),空间分辨率为 $30 \text{ m} \times 30 \text{ m}$ ,时间为 2000 年、2005 年、2010 年、2015 年及 2020 年。

## 2 研究方法

### 2.1 土壤侵蚀方程

本文使用 RUSLE 土壤流失方程,对研究区长时期土壤侵蚀进行量化评估,表征降雨和下垫面共同作用下的单位面积潜在土壤流失速率<sup>[27]</sup>:

$$A=RKLS\textit{SCP}\tag{1}$$

表 1 不同土地利用类型 P 值

土地利用类型	林地	草地	水域	沼泽	建筑用地	裸岩	永久积雪	裸土	盐碱地/沙地
P 值	1	1	0	0.2	0	0.1	1	1	1

表 2 耕地 P 值

耕地					
坡度	<5	5~10	10~15	15~20	>25
P 值	0.1	0.221	0.305	0.575	0.705

本文运用蔡崇法等人建立的植被覆盖管理因子(C)与植被覆盖度的关系计算公式得到各个时期的植被覆盖管理因子栅格数据。修正后的公式如下<sup>[28]</sup>:

$$c=\frac{\text{NDVI}-\text{NDVI}_{\min}}{\text{NDVI}_{\max}-\text{NDVI}_{\min}}\tag{2}$$
$$C=\begin{cases}1 & c\leqslant 0.095 \\ 0.6508-0.3436\lg c & 0.095< c\leqslant 0.783 \\ 0 & c>0.783\end{cases}\tag{3}$$

式中:C 为植被盖度因子;c 为植被覆盖度。

R 反映降雨对土壤侵蚀的影响,是土壤侵蚀预报的重要因子,我们利用祁连山的气象站点降雨观测数据,整理得到研究区月平均降雨量和年平均降雨量。通过计算得到整个研究区 R,经过随机森林插值得到研究区面上 R,插值精度均在 0.8 以上。

$$R=\sum_{i=1}^{12}1.735\times10^{1.5\lg(p_i^2/p)-0.08188}\tag{4}$$

式中: $p_i$  为月均降雨量(mm); $p$  为年平均降雨量(mm)。

土壤可蚀性 K 值大小表示土壤是否受侵蚀破坏的性能,是控制土壤承受降雨和径流分离及输移等过程的综合效应<sup>[29]</sup>,其计算公式如下:

$$\text{SN}=1-\text{SAN}/100\tag{5}$$

$$K=\{0.2+0.3\exp[-0.0256\times\text{SAN}\times(1-\frac{\text{SIL}}{100})]\}$$
$$(\frac{\text{SIL}}{\text{CLA}-\text{SIL}})^{0.3}[1.0-\frac{0.025C}{C+\exp(3.72-2.95C)}]$$
$$[1.0-\frac{0.7\text{SN}}{\text{SN}+\exp(-5.51+22.9\text{SN})}]\tag{6}$$

式中:SAN,SIL,CLA 和 C 分别代表砂粒含量(%)、粉粒含量(%)、黏粒含量(%)和有机碳含量(%)。

坡长坡度因子 LS 可由 DEM 计算获取,基于渭河流域的 90 m DEM 数据,采用从国家科技基础条

式中:A 为土壤侵蚀模数[t/(hm<sup>2</sup>·a)];R 为降雨侵蚀力因子[(MJ·mm)/(hm<sup>2</sup>·a)];K 为土壤可蚀性因子(t·hm<sup>2</sup>·h)/(hm<sup>2</sup>·hm<sup>2</sup>);LS 为坡长坡度因子,无量纲;C 为植被覆盖管理因子,无量纲,值域范围 0~1;P 为水土保持措施因子,与土地利用类型相关,无量纲,值域范围 0~1,P=0,表示无侵蚀地区;P=1 表示未采取任何水保措施的地区,P 值赋值见表 1—2。

件平台—国家地球系统科学数据共享服务平台—黄土高原科学数据中心(<http://loess.geodata.cn>)申请得到的 Launch LS 工具计算研究区 LS 因子<sup>[30]</sup>。

### 2.2 土壤侵蚀变化率

本文对 2000—2019 年土壤侵蚀模数变化率用最小二乘法进行提取,具体公式如下<sup>[31]</sup>:

$$\beta=\frac{n\sum XY-\sum X\sum Y}{n\sum X^2-(\sum X)^2}\tag{7}$$

式中:β 为目标变量的变化率;X 为年份、Y 为因变量;n 为研究时段总年份。

### 2.3 马尔科夫模型

马尔科夫模型(Markov model)是 1907 年由俄国数学家 Markov 在研究布朗运动时发现的,可以用来模拟事物状态的转移,具有状态转移的无后效性<sup>[32]</sup>,本文利用马尔可夫模型对祁连山的土壤侵蚀进行预测,具体公式如下<sup>[33]</sup>:

$$\boldsymbol{P}=\boldsymbol{P}_{ij}=\begin{vmatrix}P_{11}&P_{12}&\cdots&P_{1N}\\P_{21}&P_{22}&\cdots&P_{2N}\\\vdots&\vdots&\vdots&\vdots\\P_{N1}&P_{N2}&\cdots&P_{66}\end{vmatrix}\tag{8}$$

式中: $P_{ij}$  为土壤侵蚀等级类型 i 到 j 的转移概率。

元胞自动机(cellular automata,CA)是一种能够模拟系统时空演变过程,具有空间计算特征的动力学模型,具体公式如下:

$$S_{(t+1)}=f[S_{(t)},N]\tag{9}$$

### 2.4 LMDI 模型

迪氏指数因子分解模型(LMDI 模型),经常被应用于驱动因素分析研究,研究的指标因子 R,K,LS,C,P,本文主要研究植被与降雨对土壤侵蚀变化的影响。具体公式如下:

$$V=\sum_{i=1}^nV_i=\sum_{i=1}^n(x_{1,i},x_{2,i},\cdots,x_{n,i})\tag{10}$$

$$\Delta V_{\text{tot}}=V^T-V^0=\Delta V_{x1}+\Delta V_{x2}+\cdots+\Delta V_{xn}\tag{11}$$

式中:ΔV<sub>tot</sub>为目标量变化;V<sup>T</sup>为计划期 T 时的目标量;V<sup>0</sup>为基期 0 时的目标量;i=1,2,⋯,n。式(11)反映了从

基期 0 到计划期  $T$  时间段内目标量的变化<sup>[14,34]</sup>。

$$\Delta V_{xk} = \sum_{i=1}^n L(V_i^T, V_i^0) \ln\left(\frac{x_{k,i}^T}{x_{k,i}^0}\right) \\ = \sum_{i=1}^n \frac{V_i^T - V_i^0}{\ln V_i^T - \ln V_i^0} \ln\left(\frac{x_{k,i}^T}{x_{k,i}^0}\right) \quad (12)$$

其中,

$$L(V_i^T, V_i^0) = \frac{V_i^T - V_i^0}{\ln V_i^T - \ln V_i^0} \quad (13)$$

式中:  $V_i^T$  为计划期  $T$  时的目标量;  $V_i^0$  为基期 0 时的目标量;  $x_{k,i}^T$  为计划期  $T$  时的指标量;  $x_{k,i}^0$  为基期 0 时的指标量。

3 结果与分析

3.1 土壤侵蚀的时空变化

从图 1 中可以看出,研究区土壤侵蚀模数呈现出西北向东南递减的趋势,2000—2005 年侵蚀变化明显,极强度侵蚀突显,2010—2015 年微度、轻度侵蚀逐渐向中度侵蚀转变。2000—2019 年研究区整体土壤侵蚀模数呈增加趋势,平均值为  $1.29 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ ,变化速率为  $0.06/\text{a}$ ,且土壤侵蚀强烈的区域土壤侵蚀变化率也相对较大。

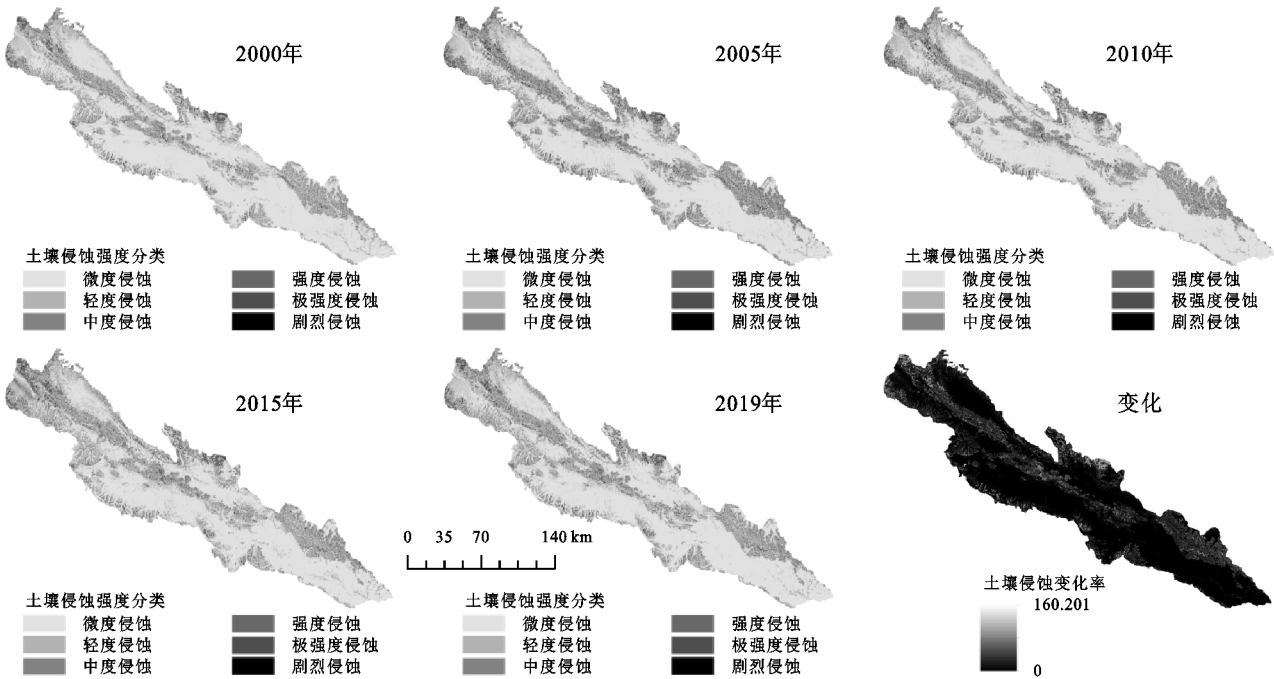


图 1 祁连山南坡土壤侵蚀强度分级

3.2 土壤侵蚀强度的时空动态变化及预测

(1) 土壤侵蚀强度动态变化。由表 3 中可以得出,2000—2019 年祁连山南坡除了剧烈侵蚀外,其余土壤侵蚀等级向高一级土壤侵蚀强度转化的比例大于向低一级土壤侵蚀转化的比例,土壤侵蚀改善不明显,分阶段看,2000—2005 年土壤侵蚀强度低一级向高一级转化幅度最大,其中  $60.14\%$  的极强度侵蚀转化为剧烈侵蚀、 $58\%$  的强度侵蚀转化为极强度侵蚀。2005—2019 年土壤侵蚀等级由高一级转化低一级较多,土壤侵蚀得到明显改善。因此总体上看土壤侵蚀未改善可能是由于 2000—2005 年土壤侵蚀加剧,即使 2005 年之后政府加强土壤侵蚀防治工作,仍然大于 2000 年的土壤侵蚀。

(2) 土壤侵蚀预测。本研究用 2015—2019 年转移矩阵预测 2023 年及 2027 年土壤侵蚀分类等级,2019 年预测土地利用类型与实际对比,Kappa 系数为  $0.92$ ,验证经度较高。从表 4 中看出,强度以上的

侵蚀面积逐渐减少,轻度侵蚀与中度侵蚀面积增加,微度侵蚀面积减少。表明整体上土壤侵蚀强度有减轻趋势,但同时也应注意降低土壤侵蚀强度低一级向高一级转变的风险。

3.3 土壤侵蚀在不同地形条件下的变化特征

(1) 不同海拔范围内土壤侵蚀变化特征。从表 5 中可以看出,2 700 m 以上,海拔越高土壤侵蚀模数越大,海拔在 4 700~5 200 m 的土壤侵蚀模数最大,达到  $1.05 \times 10^4 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ ,土壤侵蚀模数最低值在海拔 2 700~3 200 m,为  $514.61 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ ,而海拔 3 700~4 200 m 的土壤侵蚀量最大,高达  $1.26 \times 10^6 \text{ t}/\text{a}$ ,最低值出现在海拔 2 200~2 700 m,为  $1.47 \times 10^4 \text{ t}/\text{a}$ ,海拔在 4 700~5 200 m 的土壤侵蚀量不大,但单位面积侵蚀量最大。由于祁连山南坡随着海拔的升高引起水热条件的变化,土壤植被类型及土地利用类型也发生着巨大的变化,在海拔 4 200 m 以上分布着大量的裸岩、永久冰川及积雪等,植被覆盖较

少,易发生土壤侵蚀,而在 3 200~3 700 m 人类活动 2 700 m 以下土壤侵蚀主要受居民点建设、交通等基础设施的修建等人类活动影响<sup>[35]</sup>。

表 3 祁连山南坡土壤侵蚀强度面积转移矩阵 %

时间段	侵蚀强度	微度侵蚀	轻度侵蚀	中度侵蚀	强度侵蚀	极强度侵蚀	剧烈侵蚀
2000—2005 年	微度侵蚀	84.61	12.29	1.95	0.69	0.37	0.09
	轻度侵蚀	13.37	45.18	31.37	7.00	2.60	0.48
	中度侵蚀	4.07	6.25	28.36	41.46	17.27	2.60
	强度侵蚀	2.28	1.90	5.87	19.91	58.00	12.04
	极强度侵蚀	1.24	0.87	1.87	4.91	30.97	60.14
	剧烈侵蚀	0.68	0.46	0.81	1.49	10.31	86.25
2005—2010 年	微度侵蚀	88.14	9.24	1.58	0.58	0.36	0.11
	轻度侵蚀	36.33	51.92	9.63	1.49	0.53	0.11
	中度侵蚀	13.04	26.85	44.07	12.90	2.77	0.37
	强度侵蚀	7.26	6.91	29.97	40.14	14.35	1.35
	极强度侵蚀	4.61	3.02	7.67	27.37	46.88	10.44
	剧烈侵蚀	1.60	0.77	1.66	3.57	23.24	69.15
2010—2015 年	微度侵蚀	84.11	10.73	2.65	1.12	0.82	0.58
	轻度侵蚀	16.78	57.74	14.43	5.18	3.87	2.00
	中度侵蚀	4.15	37.40	39.34	10.09	5.55	3.48
	强度侵蚀	2.34	5.49	54	23.05	10.49	4.63
	极强度侵蚀	1.66	1.74	11.40	42.40	31.40	11.42
	剧烈侵蚀	0.93	0.47	1.03	3.62	31.51	62.44
2015—2019 年	微度侵蚀	87.13	10.05	1.71	0.59	0.36	0.17
	轻度侵蚀	32.73	49.37	15.23	2.11	0.46	0.10
	中度侵蚀	10.59	25.04	40.30	19.70	4.15	0.22
	强度侵蚀	7.57	11.41	23.38	32.78	22.68	2.18
	极强度侵蚀	5.79	9.85	9.42	18.78	39.11	17.05
	剧烈侵蚀	4.18	6.60	6.28	6.33	18.26	58.36
2000—2019 年	微度侵蚀	88.67	10.98	0.00	0.06	0.14	0.15
	轻度侵蚀	8.20	75.15	16.57	0.00	0.00	0.08
	中度侵蚀	1.10	9.76	67.86	21.29	0.00	0.00
	强度侵蚀	0.69	0.20	13.83	61.80	23.47	0.00
	极强度侵蚀	0.61	0.34	0.25	12.47	70.52	15.82
	剧烈侵蚀	0.38	0.11	0.58	0.00	12.24	86.70

表 4 祁连山南坡 2019—2027 年土壤侵蚀强度面积占比 %

侵蚀强度	2019 年	2023 年	2027 年
微度侵蚀	72.22	67.64	63.05
轻度侵蚀	10.36	14.99	19.63
中度侵蚀	6.33	6.84	7.35
强度侵蚀	3.91	4.07	4.23
极强度侵蚀	3.57	3.51	3.45
剧烈侵蚀	3.62	2.95	2.29

(2) 不同坡度条件下土壤侵蚀变化特征。土壤侵蚀模数随着坡度的增加而增加,坡度>30°的土壤侵蚀模数最大达到 7 256.32 t/(km<sup>2</sup>·a),坡度<5°的

土壤侵蚀模数最小,为 872.10 t/(km<sup>2</sup>·a),而土壤侵蚀量随着坡度升高而降低,坡度在 8°~11°时,土壤侵蚀量达到最大为 4.24×10<sup>5</sup> t/a,坡度>30°时土壤侵蚀量最小为 1.56 万 t/a。坡度越大,植被活动愈弱<sup>[36-37]</sup>,遇到强降雨时更容易发生土壤侵蚀(表 6)。

(3) 不同坡向条件下土壤侵蚀变化特征。总体上可以看出(表 7),土壤侵蚀大小排序为坡向西>北>南>东>水平方向,土壤侵蚀模数最大在西北方向,3.37×10<sup>3</sup> t/(km<sup>2</sup>·a),土壤侵蚀量最大值出现在西南方向,为 3.72×10<sup>5</sup> t/a,无坡向区土壤侵蚀最弱。由于无坡向植被覆盖最好<sup>[35]</sup>,因此土壤侵蚀最小,陈红等<sup>[38]</sup>认为各坡向土壤侵蚀差异是由于降雨和季风

性刮风等因素造成的,但祁连山南坡地形复杂,降雨量整体上呈现出由东南向西北递减的趋势<sup>[35]</sup>,与侵蚀模数趋势正好相反,反而受植被覆盖影响较大。

表 5 不同海拔梯度下的土壤侵蚀量

海拔/ m	面积/ km <sup>2</sup>	土壤侵蚀量/ (t·a <sup>-1</sup> )	土壤侵蚀模数/ (t·km <sup>-2</sup> ·a <sup>-1</sup> )
2200~2700	146.73	14772.94	2907.55
2700~3200	2499.62	50433.08	514.61
3200~3700	7410.67	223574.01	759.69
3700~4200	10904.45	1263272.93	2864.41
4200~4700	2956.38	635217.83	5369.96
4700~5200	82.16	32172.56	10460.72

表 6 不同坡度下的土壤侵蚀量

坡度/ (°)	面积/ km <sup>2</sup>	土壤侵蚀量/ (t·a <sup>-1</sup> )	土壤侵蚀模数/ (t·km <sup>-2</sup> ·a <sup>-1</sup> )
<5	9022.89	312609.81	872.10
5~8	4479.16	408542.61	2231.32
8~11	3681.47	424169.79	2871.68
11~14	2736.79	383768.58	3603.19
14~17	1782.07	280435.39	3720.63
17~20	1121.30	194873.00	4543.28
20~30	1126.57	199393.29	4376.37
>30	49.75	15650.88	7256.32

表 7 不同坡向下的土壤侵蚀量

坡向	面积/ km <sup>2</sup>	土壤侵蚀量/ (t·a <sup>-1</sup> )	土壤侵蚀模数/ (t·km <sup>-2</sup> ·a <sup>-1</sup> )
水平	17.08	469.14	619.47
北	3128.13	31878.76	2647.16
东北	3845.31	315771.17	2153.38
东	2967.67	202417.92	1662.98
东南	2325.07	154210.98	1620.44
南	3208.99	235699.90	1781.69
西南	3871.68	372757.37	2376.99
西	2393.12	320676.42	3176.66
西北	2242.95	298561.69	3372.58

3.4 土壤侵蚀影响因素定量研究

(1) 植被覆盖因子对土壤侵蚀影响定量研究。统计可知植被对土壤侵蚀贡献值的减少量范围为 0~80 000 t/(km<sup>2</sup>·a),面积占研究区的 23.50%,主要分布在研究区西北部,植被对土壤侵蚀贡献值的增加量范围为 0~80 000 t/(km<sup>2</sup>·a),约占 26.97%,研究区不受植被影响区域约占 49.53%,主要分布在研究区东南部微度侵蚀区域(门源县内),植被覆盖较好。2005—2010 年植被覆盖因子对土壤侵蚀贡献值的减少量范围为 0~80 000 t/(km<sup>2</sup>·a),面积增加至 26.40%,植被对土壤侵蚀贡献值的增加量范围为 0~

80 000 t/(km<sup>2</sup>·a),约占 19.92%,研究区不受植被影响区域约占 53.60%;2010—2015 年植被对土壤侵蚀贡献值的减少量范围为 0~80 000 t/(km<sup>2</sup>·a),面积为 15.93%,植被对土壤侵蚀贡献值的增加量范围为 0~80 000 t/(km<sup>2</sup>·a),约占 36.22%,研究区不受植被影响区域约占 47.84%;2015—2019 年植被对土壤侵蚀贡献值的减少量范围为 0~80 000 t/(km<sup>2</sup>·a),面积为 31.53%,植被对土壤侵蚀贡献值的增加量范围为 0~80 000 t/(km<sup>2</sup>·a),约占 17.78%,研究区不受植被影响区域约占 50.68%(图 2)。

研究区整体上植被对土壤侵蚀变化无影响区域面积呈增加趋势,这与研究区植被覆盖变化趋势相符,植被对土壤侵蚀贡献值的减量效应面积总体上呈扩张趋势,而增量效应面积整体上呈萎缩趋势,且除了 2010—2015 年植被对土壤侵蚀贡献值的减少量面积小于增加量面积,其余均是减少量面积大于增加量,除说明植被覆盖对土壤侵蚀具有一定的缓解作用。

(2) 降雨对土壤侵蚀影响定量研究。由图 3 可知,降雨对土壤侵蚀模数的影响主要在 0~50 000 t/(km<sup>2</sup>·a)与 0~50 000 t/(km<sup>2</sup>·a)两个范围内。统计可知,2000—2005 年降雨对土壤侵蚀贡献值的减少量范围为 0~50 000 t/(km<sup>2</sup>·a),面积占研究区的 8.52%,整个研究区均有涉及,降雨对土壤侵蚀贡献值的增加量范围为 0~50 000 t/(km<sup>2</sup>·a),约占 32.02%,研究区不受降雨影响区域约占 59.26%,整体分布与植被对土壤侵蚀变化贡献值分布大致相同。2005—2010 年降雨对土壤侵蚀贡献值的减少量范围为 0~50 000 t/(km<sup>2</sup>·a),面积增加至 25.29%,降雨对土壤侵蚀贡献值的增加量范围为 0~50 000 t/(km<sup>2</sup>·a),减少至 14.45%,研究区不受降雨影响区域约占 60.24%;2010—2015 年降雨对土壤侵蚀贡献值的减少量范围为 0~50 000 t/(km<sup>2</sup>·a),面积为 38.26%,降雨对土壤侵蚀贡献值的增加量范围为 0~50 000 t/(km<sup>2</sup>·a),约占 2.12%,研究区不受降雨影响区域约占 59.38%;2015—2019 年降雨对土壤侵蚀贡献值的减少量范围为 0~50 000 t/(km<sup>2</sup>·a),面积为 15.20%,降雨对土壤侵蚀贡献值的增加量范围为 0~50 000 t/(km<sup>2</sup>·a),约占 25.88%,研究区不受降雨影响区域约占 58.77%。

研究区整体上降雨对土壤侵蚀模数变化的贡献值无影响区域面积变化较小,降雨对土壤侵蚀贡献值的减量效应面积总体上呈扩张趋势,而增量效应面积整体上呈萎缩趋势。由于 2000—2005 年及 2015—2019 年降雨对土壤侵蚀贡献值的减少量面积小于增加量面积,而 2005—2010 年及 2010—2015 年刚好相反,说明降雨量的增加并不一定导致土壤侵蚀的增加<sup>[39]</sup>。

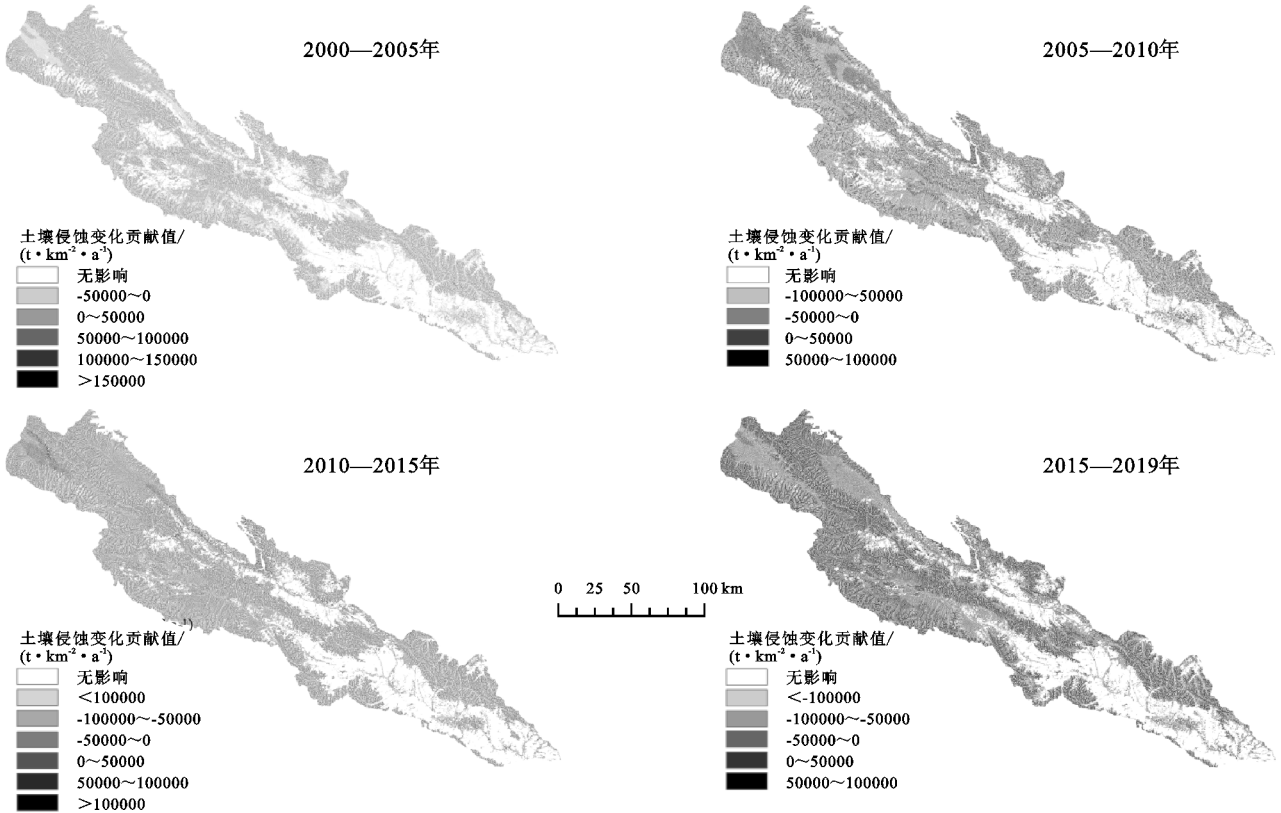


图 2 植被对土壤侵蚀变化贡献值分布

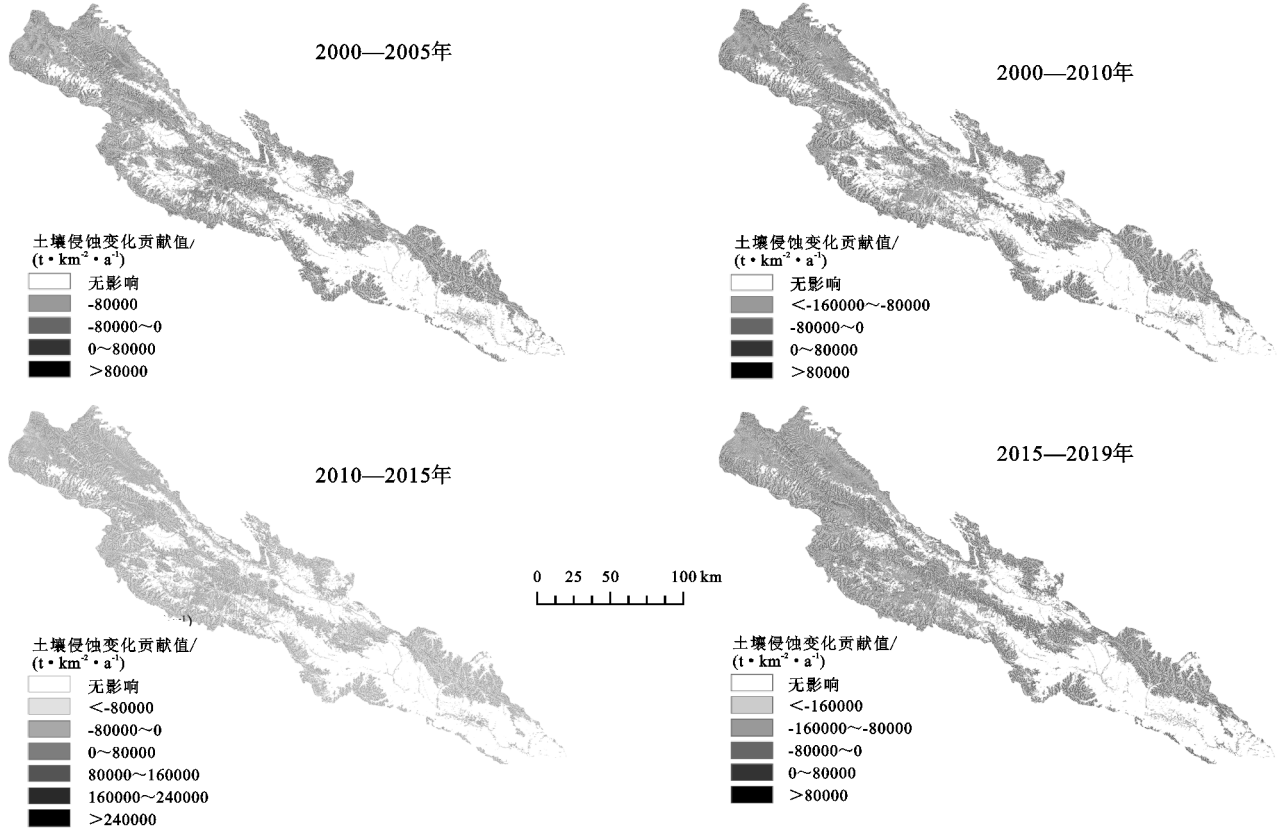


图 3 降雨对土壤侵蚀变化贡献值分布

4 结论

(1) 土壤侵蚀模数呈现出西北向东南递减的趋

势,变化速率为  $0.06/a$ ;从土壤侵蚀强度动态变化来看,2005—2019 年土壤侵蚀等级由高一级转化低一级较多,土壤侵蚀得到明显改善,且 2019—2027 年,

土壤侵蚀有减轻的趋势,但也要防止极强度以下的侵蚀低级向高转变。

(2) 从地形对土壤侵蚀影响来看,土壤侵蚀模数随着海拔及坡度的增加而增加,土壤侵蚀量随着坡度的增加而减小。在海拔 4 700~5 200 m 及坡度 $>30^\circ$ 的区域土壤侵蚀模数达到最大,分别为 10 460.72, 7 256.32 t/(km<sup>2</sup>·a)。在海拔 3 700~4 200 m 的土壤侵蚀量最大,高达  $1.26 \times 10^6$  t/a, 2 200~2 700 m 土壤侵蚀最小,为  $1.47 \times 10^4$  t/a,在坡度  $8^\circ \sim 11^\circ$  时,土壤侵蚀量达到最大为  $4.24 \times 10^5$  t/a,坡度 $>30^\circ$ 土壤侵蚀量最小为 1.56 万 t/a;不同坡向下的土壤侵蚀排序为西 $>$ 北 $>$ 南 $>$ 东 $>$ 水平方向,土壤侵蚀模数最大在西北方向,为 3 372.58 t/(km<sup>2</sup>·a),土壤侵蚀量最大值出现在西南方向,为  $3.72 \times 10^5$  t/a。

(3) 从影响土壤侵蚀变化的内因来看,土壤侵蚀受植被及降雨影响较小区域主要分布在门源县;且两者对土壤侵蚀贡献值的减量效应面积总体上呈扩张趋势,而增量效应面积整体上呈萎缩趋势,说明植被对土壤侵蚀的影响是积极的,降雨量的增加不一定导致土壤侵蚀量的增加。

#### 参考文献:

- [1] Lda B, Tsa B, Kai F, et al. Effects of erosion degree, rainfall intensity and slope gradient on runoff and sediment yield for the bare soils from the weathered granite slopes of SE China[J]. *Geomorphology*, 2019, 352: 106997.
- [2] 史东梅,金慧芳,蒋光毅.土壤侵蚀对坡耕地耕层质量退化作用及其评价趋势展望[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(18): 118-126.
- [3] Lal R. Soil erosion and the global carbon budget [J]. *Environ—Ment International*, 2003, 29(4): 437-450.
- [4] 胡光印,董治宝,逯军峰,等.近 30 a 来长江源区沙漠化时空演变过程及成因分析[J]. *干旱区地理*, 2011, 34(2): 300-308.
- [5] 康琳琦.青藏高原 1980—2009 年土壤侵蚀量的估算与比较[D].成都:四川农业大学,2017.
- [6] 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.
- [7] 陈豪.基于 USLE 模型的祁连山国家公园土壤水力侵蚀动态分析[D].兰州:兰州大学,2020.
- [8] 孙定钊,梁友嘉.基于改进 Markov-CA 模型的黄土高原土地利用多情景模拟[J]. *地球信息科学学报*, 2021, 23(5): 825-836.
- [9] 玛丽艳姑丽·阿西穆,塔西甫拉提·特依拜,买买提·沙吾提,等.基于 Markov 模型的植被覆盖动态变化预测研究[J]. *水土保持研究*, 2013, 20(1): 121-125.
- [10] 邹艳,张绍良,闵扬海.城市人口规模及空间分布模拟与预测[J]. *城市问题*, 2020(6): 64-72.
- [11] 武国胜,林惠花,朱鹤健.基于马尔柯夫模型的福建长汀土壤侵蚀动态预测[J]. *福建师范大学学报:自然科学版*, 2011, 27(1): 93-98.
- [12] 赵博轩.基于 RUSLE 和 CA-Markov 的土壤侵蚀变化监测及预测研究[D].北京:中国地质大学,2020.
- [13] 赵明松,李德成,张甘霖.1980—2010 年安徽省土壤侵蚀动态演变及预测[J]. *土壤*, 2016, 48(3): 588-596.
- [14] 贺倩,戴晓爱.基于 LMDI 模型的三江源区植被对土壤侵蚀变化影响的定量分析[J]. *长江科学院院报*, 2020, 37(7): 61-67.
- [15] 贾磊,姚顺波,邓元杰,等.渭河流域土壤侵蚀时空特征及其地理探测[J]. *生态与农村环境学报*, 2021, 37(3): 305-314.
- [16] 樊登星,余新晓,贾国栋,等.北京山区灌草坡面水土流失特征及其影响因素[J]. *中国水土保持科学*, 2014, 12(2): 24-28.
- [17] 马骆,于兴修,刘前进,等.沂蒙山区土壤侵蚀空间分布及其影响因素动态变化[J]. *中国农业科学*, 2010, 43(22): 4652-4662.
- [18] 何琪琳,李斌斌,张风宝,等.东北黑土区坡耕地土壤侵蚀对影响因素响应的定量分析[J]. *地理学报*, 2021, 76(5): 1218-1230.
- [19] 马贤磊,唐亮,孙萍丽,等.城镇土地生态环境效应的影响因素研究:基于 LMDI 分解模型[J]. *南京农业大学学报:社会科学版*, 2018, 18(2): 117-128.
- [20] Ang B W. The LMDI approach to decomposition analysis: A practical guide [J]. *Energy Policy*, 2005, 33(7): 867-871.
- [21] Qian H E, Dai N, Chen N. Assessing the effects of vegetation and precipitation on soil erosion in the Three-River Headwaters Region of the Qinghai-Tibet Plateau, China[J]. *Journal of Arid Land*, 2020, 12(5): 865-886.
- [22] 钱大文,曹广民,杜岩功,等.2000—2015 年祁连山南坡生态系统服务价值时空变化[J]. *生态学报*, 2020, 40(4): 1392-1404.
- [23] 刘贤德,张学龙.祁连山天然林—河西走廊生命线[J]. *森林与人类*, 2004, 24(4): 16-19.
- [24] 杨荣荣,曹广超,曹生奎,等.祁连山南坡表层土壤有机质含量反演[J]. *生态科学*, 2020, 39(5): 57-63.
- [25] 虞敏,曹广超,曹生奎,等.近 30 年祁连山南坡降水量变化特征分析[J]. *水土保持研究*, 2019, 26(2): 241-248.
- [26] 付建新,曹广超,郭文炯.1980—2018 年祁连山南坡土地利用变化及其驱动力[J]. *应用生态学报*, 2020, 31(8): 2699-2709.
- [27] 魏健美,李常斌,武磊,等.基于 USLE 的甘南川西北土壤侵蚀研究[J]. *水土保持学报*, 2021, 35(2): 31-37, 46.
- [28] 林锦阔.基于 RUSLE 模型沂河流域土壤侵蚀研究[D].济南:山东师范大学,2017.

- Ecology, 2013, 28(5): 943-957.
- [16] 喻锋, 李晓兵, 陈云浩, 等. 皇甫川流域土地利用变化与土壤侵蚀评价[J]. 生态学报, 2006, 26(6): 1947-1956.
- [17] 李婷, 刘康, 马力阳, 等. 秦岭山地丹江流域土地利用变化的土壤侵蚀效应评价[J]. 自然资源学报, 2016, 31(4): 583-595.
- [18] 徐晓雅, 高翔宇, 顾泽贤, 等. 澜沧县土地利用变化和土壤侵蚀特征分析[J]. 河南农业大学学报, 2017, 51(3): 421-429.
- [19] 谢颖颖, 邵争, 兰小机, 等. 喀斯特山区土地利用变化与土壤侵蚀耦合关系研究: 以毕节试验区为例[J]. 水土保持研究, 2017, 24(6): 1-5.
- [20] 章文波, 谢云, 刘宝元. 利用日雨量计算降雨侵蚀力的方法研究[J]. 地理科学, 2002, 22(6): 705-711.
- [21] 谢云, 刘宝元, 章文波. 侵蚀性降雨标准研究[J]. 水土保持学报, 2000, 14(4): 6-11.
- [22] 查良松, 邓国徽, 谷家川. 1992—2013 年巢湖流域土壤侵蚀动态变化[J]. 地理学报, 2015, 10(11): 1708-1719.
- [23] Vol. N. Using soil erosion models for global change studies [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1996, 51(5): 381-385.
- [24] 张宏鸣, 杨勤科, 刘晴蕊, 等. 基于 GIS 的区域坡度坡长因子提取算法[J]. 计算机工程, 2010, 36(9): 246-248.
- [25] Liu B Y, Nearing M A, Risse L M. Slope gradient effects on soil loss for steep slopes [J]. Transactions of the Asae, 1994, 37(6): 1835-1840.
- [26] 林杰, 张金池, 顾哲衍, 等. 基于叶面积指数的植被覆盖管理措施因子 C 的遥感定量估算[J]. 林业科学, 2013, 49(2): 86-92.
- [27] Lin J, Zhang J, Gu Z, et al. A new approach of assessing soil erosion using the remotely sensed leaf area index and its application in the hilly area[J]. Yegetos-An International Journal of Plant Research, 2014, 27(2): 1-12.
- [28] Chen J M, Rich P M, Gower S T, et al. Leaf area index of boreal forests: Theory, techniques, and measurements [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 1997, 102(D24): 29429-29443.
- [29] Kuusk A, Lang M, Nilson T. Simulation of the reflectance of ground vegetation in sub-boreal forests [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2004, 126(1/2): 33-46.
- [30] 蔡崇法, 丁树文, 史志华, 等. 应用 USLE 模型与地理信息系统 IDRISI 预测小流域土壤侵蚀量的研究[J]. 水土保持学报, 2000, 14(2): 19-24.
- [31] 陈思旭, 杨晓唤, 肖林林, 等. 基于 USLE 模型的南方丘陵山区土壤侵蚀研究[J]. 资源科学, 2014, 36(6): 1288-1297.
- [32] 姜琳, 边金虎, 李爱农, 等. 岷江上游 2000—2010 年土壤侵蚀时空格局动态变化[J]. 水土保持学报, 2014, 28(1): 18-25, 35.

(上接第 107 页)

- [29] 刘斌涛, 陶和平, 史展, 等. 青藏高原土壤可蚀性 K 值的空间分布特征[J]. 水土保持通报, 2014, 34(4): 11-16.
- [30] 符素华, 刘宝元, 周贵云, 等. 坡长坡度因子计算工具[J]. 中国水土保持科学, 2015, 13(5): 105-110.
- [31] Sun I, Cheng G W, Li W P, et al. On the Variation of NDVI with the principal climatic elements in the Tibetan Plateau [J]. Remote Sensing, 2013, 5(4): 1894-1911.
- [32] 于涛, 沈浩, 仲嘉亮. 基于 CA-Markov 模型的新疆克州土地利用动态模拟研究[J]. 新疆环境保护, 2008, 30(1): 11-14.
- [33] 赵博轩. 基于 RUSLE 和 CA-Markov 的土壤侵蚀变化监测及预测研究[D]. 北京: 中国地质大学, 2020.
- [34] Hong Q L, Xu Y, Hai Y D, et al. Analysis of Energy consumption influence factors in Japan based on LMDI model[J]. Applied Mechanics and Materials, 2011, 71-78: 2416-2419.
- [35] 付建新, 曹广超, 郭文炯. 1998—2017 年祁连山南坡不同海拔、坡度和坡向生长季 NDVI 变化及其与气象因子的关系[J]. 应用生态学报, 2020, 31(4): 1203-1212.
- [36] 崔晓临, 自红英, 王涛. 秦岭地区植被 NDVI 海拔梯度差异及其气温响应[J]. 资源科学, 2013, 35(3): 618-626.
- [37] 张静静, 郑辉, 朱连奇, 等. 豫西山地区植被 NDVI 及其气候响应的多维变化[J]. 地理研究, 2017, 36(4): 765-778.
- [38] 陈红, 江旭聪, 任磊, 等. 基于 RUSLE 模型的淮河流域土壤侵蚀定量评价[J]. 土壤通报, 2021, 52(1): 165-176.
- [39] 陈豪. 基于 USLE 模型的祁连山国家公园土壤水力侵蚀动态分析[D]. 兰州: 兰州大学, 2020.