

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2024.03.036.

刘子玥, 章文波, 殷兵, 等. 基于 CSLE 的泛第三极地区土壤侵蚀强度空间分布特征[J]. 水土保持研究, 2024, 31(3): 1-9.

Liu Ziyue, Zhang Wenbo, Yin Bing, et al. Spatial Distribution Pattern of Soil Erosion Intensity in the Pan-Third Pole Region Based on CSLE[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(3): 1-9.

基于 CSLE 的泛第三极地区土壤侵蚀强度空间分布特征

刘子玥¹, 章文波¹, 殷兵², 杨勤科³, 魏欣¹, 刘宝元¹, 殷水清¹

(1.北京师范大学 地理科学学部, 北京 100875; 2.西北农林科技大学

水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 3.西北大学 城市与环境学院, 西安 710127)

摘要: [目的] 定量评估泛第三极地区的土壤侵蚀状况, 明确土壤侵蚀的分布特征, 以为土壤侵蚀的科学防治提供依据。[方法] 基于分层不等概率系统抽样方法, 共布设 31 406 个调查单元。利用中国土壤流失方程 CSLE 计算泛第三极地区土壤侵蚀速率, 并利用莫兰指数 (I) 探讨其分布特征。[结果] (1) 泛第三极地区平均土壤侵蚀速率为 $162.73 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$, 水土流失面积比例为 7.75% , 土壤侵蚀速率超过 $500 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ 的地区主要位于西亚、东亚和南亚; (2) 土壤侵蚀存在明显的空间聚集性 ($I=0.9209$), 以高高型和低低型聚集为主, 高高型聚集主要分布在西亚北部、南亚北部和西南部以及中国的东北、黄土高原和西藏南部; (3) 草地、灌丛和耕地是土壤侵蚀较严重的土地利用类型, 其中 $>1000 \text{ m}$ 的草地、 $>500 \text{ m}$ 的灌丛和耕地的土壤侵蚀更严重, 超过 25% 的土地都发生了水土流失, 平均土壤侵蚀速率变化于 $426.85 \sim 683.72 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ 。[结论] 海拔介于 $1000 \sim 6000 \text{ m}$ 的草地、 $500 \sim 4000 \text{ m}$ 的灌丛以及 $1000 \sim 4000 \text{ m}$ 的耕地是泛第三极地区土壤侵蚀发生的重点区域, 需特别关注。

关键词: 土壤侵蚀; 泛第三极; 空间分布; 莫兰指数

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2024)03-0001-09

Spatial Distribution Pattern of Soil Erosion Intensity in the Pan-Third Pole Region Based on CSLE

Liu Ziyue¹, Zhang Wenbo¹, Yin Bing², Yang Qinke³, Wei Xin¹, Liu Baoyuan¹, Yin Shuiqing¹

(1. Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;

2. Institute of Soil and Water Conservation, Northeast A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

3. College of Urban and Environmental Sciences, Northeast University, Xi'an 710127, China)

Abstract: [Objective] The aims of this study are to quantify soil erosion and analyze its distribution pattern in the Pan-Third Pole region, and to provide scientific basis for soil erosion control in this region. [Methods] Based on a stratified systematic design with unequal probabilities, a total of 31 406 sampling units were selected. The Chinese Soil Loss Equation (CSLE) was employed to calculate the soil erosion rate. The Moran's index (I) was used to characterize its spatial distribution in the Pan-Third Pole region. [Results] (1) The mean soil erosion rate was $162.73 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ in the Pan-Third Pole region, and the proportion of the soil loss area was 7.75% . The areas with the soil erosion rate exceeding $500 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ mainly distributed in West Asia, East Asia and South Asia. (2) Soil erosion was highly aggregated in the study region. The value of Moran's I was up to 0.9209 . The spatial aggregation manifested as high-high and low-low aggregations, and the former was observed primarily in northern West Asia, northern and southwestern South Asia, as well as northeastern China, Loess Plateau, and southern Tibet. (3) Soil erosion was relatively more serious in the grassland,

收稿日期: 2023-06-05

修回日期: 2023-06-27

资助项目: 第二次青藏高原综合科学考察研究(2019QZKK0306); 中国科学院战略性先导科技专项子课题“土壤侵蚀定量评价与分区防控对策”(XDA20040202)

第一作者: 刘子玥(1999—), 女, 河北唐山人, 硕士研究生, 主要从事土壤侵蚀研究。E-mail: 202121051015@mail.bnu.edu.cn

通信作者: 章文波(1971—), 男, 湖南长沙人, 副教授, 博士, 主要从事土壤侵蚀研究。E-mail: wenbozhang@bnu.edu.cn

<http://stbcj.paperonce.org>

scrubland and arable land. Especially in the grassland with the altitude $\geq 1\ 000$ m, scrubland and arable land above 500 m, the percentage of the soil loss area exceeded 25%, and the mean soil erosion rate ranged from 426.85 to 683.72 t/(km² · a). [Conclusion] In the Pan-Third Pole region, the grassland with the altitude between 1 000 and 6 000 m, scrubland between 500 and 4 000 m and arable land from 1 000 to 4 000 m were judged as the key areas susceptible to soil erosion, which requires the special attention.

Keywords: soil erosion; Pan-Third Pole region; spatial distribution; Moran's *I* index

泛第三极地区是指以青藏高原为主体的第三极向周围拓展,包括哈萨克斯坦、中国、马来西亚、巴基斯坦、乌克兰、伊朗等 65 个国家,与“一带一路”建设经济带高度重合^[1]。该区域大部分国家处于气候与地质变化的敏感地带,自然环境复杂,生态环境脆弱,发生水力侵蚀的风险较大。据估计印度有 68.4% 的土地退化是由水力侵蚀引起的^[2],中国(未含香港、澳门特别行政区和台湾地区)水力侵蚀面积达 129.32 万 km²^[3]。由此可看出,土壤水力侵蚀是泛第三极地区面临的主要生态环境问题之一。

已有诸多学者针对泛第三极地区的水力侵蚀开展了研究,Somasiri 等^[4]基于 RUSLE 模型采用无缝隙网格估算法对斯里兰卡 Mahaweli 流域上游的土壤侵蚀速率进行了计算;Irven 等^[5]采用无缝隙网格估算法对土耳其 Seyhan 流域的土壤侵蚀进行了定量评价,USLE 模型被应用于侵蚀速率的计算。除对土壤侵蚀的定量评价外,也有学者关注土壤侵蚀的空间分布状况,Saha 等^[6]通过比较不同行政区的侵蚀速率来探讨孟加拉国 Jamuna 流域的土壤侵蚀空间分布特征;Chalise 等^[7]则比较了不同土地利用类型下的侵蚀速率,认为尼泊尔 Aringale Khola 流域的侵蚀主要发生在林地上。然而,当前研究仍存在一些不足,在土壤侵蚀的评价方法上,已有研究多采用无缝隙网格估算法,相比于抽样调查法,该方法的空间连续性较差,且无法较好反映水土保持措施的作用^[8-9];在研究区域上,当前研究多集中于某一国家或某一流域,针对全区域的土壤侵蚀研究较少。

鉴于此,本研究采用抽样调查法确定泛第三极地区的土壤侵蚀现状,通过空间自相关分析、统计分析探讨土壤侵蚀的分布特征,以确定泛第三极地区土壤侵蚀发生的重点区域,以期为泛第三极地区土壤侵蚀的防治提供科学依据,更好地推进“绿色丝绸之路”建设。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

泛第三极地区(纬度 81.86°N—11.01°S,经度 180.00°E—180.00°W)总面积约 5 108.75 万 km²,平

均海拔 701 m(不考虑海洋和大陆架),气候类型主要有温带大陆性气候、温带季风气候、热带季风气候等,主要土地利用类型有耕地、林地和草地。

1.2 数据来源

(1) 调查单元数据:采用分层不等概系统抽样方法在泛第三极地区共计布设调查单元 31 406 个,中国区进行了加密,属性数据主要包括水土保持措施和土地利用信息。其中,1 万个调查单元来自中国第一次水力普查水土保持情况普查的单元数据,基于野外实地调查得到,其余调查单元基于高分辨率遥感影像进行目视判读得到。调查单元数据的分辨率为 10 m。(2) 降水数据:来源于美国国家海洋气象局气候预报中心(Climatic Prediction Center, CPC)发布的日降雨数据,空间分辨率为 0.5°,时间序列为 1986—2015 年,该数据用于降雨侵蚀力因子 *R* 的计算。(3) 地形数据:Aster GDEM 数据空间分辨率为 30 m,用于坡长因子和坡度因子 *LS* 的计算;SRTM 数据空间分辨率为 90 m,高纬部分用 Aster GDEM 数据进行填补,用于小流域的提取。(4) 植被数据:植被指数 NDVI,源于 MODIS 的 MOD13A2 产品,空间分辨率为 1 km,时间序列为 2014—2016 年,用于 NDVI 的提取以及 FVC 的计算;非光合植被 NPV 数据,下载网址:<http://dapds00.nci.org.au/thredds/catalog/tc43/modis-fc/v310/tiles/catalog.html>。(5) 土壤可蚀性因子 *K*^[10]:源于青藏高原科学数据中心,空间分辨率为 1 km。(6) 土地利用数据^[11]:来源于青藏高原科学数据中心,2015 年,空间分辨率为 1 km。

1.3 研究方法

1.3.1 调查单元土壤侵蚀计算 采用中国土壤流失方程(Chinse Soil Loss Equation, CSLE)(式 1)^[12]计算土壤侵蚀速率:

$$A = R \times K \times L \times S \times B \times E \times T \quad (1)$$

式中:*A* 为土壤侵蚀速率[t/(hm² · a)];*R* 为降雨侵蚀力因子[MJ · mm/(hm² · h · a)];*K* 为土壤可蚀性因子[t · hm² · h/(hm² · MJ · mm)];*L* 为坡长因子,无量纲;*S* 为坡度因子,无量纲;*B* 为生物措施因子,无量纲;*E* 为工程措施因子,无量纲;*T* 为耕作措施因子,无量纲。

(1) 降雨侵蚀力因子 R 。 R 因子的计算公式如下^[13]:

$$\bar{R} = \sum_{k=1}^{24} \bar{R}_{\text{半月}k} \quad (2)$$

$$\bar{R}_{\text{半月}k} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sum_{j=0}^m (\alpha \times P_{i,j,k}^{1.7265}) \quad (3)$$

$$\overline{WR}_{\text{半月}k} = \frac{\bar{R}_{\text{半月}k}}{\bar{R}} \quad (4)$$

式中: \bar{R} 为多年平均年降雨侵蚀力 $[\text{MJ} \cdot \text{mm}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{a})]$; k 为第 k 个半月数,将一年划分为 24 个半月, k 取值范围为 1~24; $\bar{R}_{\text{半月}k}$ 为第 k 个半月的降雨侵蚀力 $[\text{MJ} \cdot \text{mm}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{a})]$; i 为所用降雨资料年份序列的编号; j 为第 i 年第 k 个半月侵蚀性降雨日的编号; $P_{i,j,k}$ 为第 i 年第 k 个半月第 j 个侵蚀性日降雨量 (mm) ; α 为参数,暖季 $\alpha = 0.3937$,冷季 $\alpha = 0.3101$; $\overline{WR}_{\text{半月}k}$ 为第 k 个半月平均降雨侵蚀力占多年平均降雨侵蚀力的比例。

对降雨侵蚀力计算结果与中国 831 个气象站点计算结果复核对比,发现该 R 值存在系统偏低现象,最后采用乘以修订系数(2.1594)的方式进行了修订。

(2) 土壤可蚀性因子 K 。 K 因子的计算基于国际土壤参比信息中心(International Soil Reference and Information Centre, ISRIC)的土壤数据,利用 Wischmeier 等^[14]提出的土壤可蚀性因子算法,采用土壤可蚀性因子计算工具(K_Tool)得到,计算结果来源于杨勤科^[10]。

(3) 坡长坡度因子 LS 。 LS 因子的计算基于 SRTM 数据,采用符素华等^[15]研发的坡长坡度因子计算工具(LS_Tool)得到。

(4) 生物措施因子 B 。对于园地、林地和草地来说,采用式 5 进行 B 因子的计算,其他土地利用类型则通过赋值得到,详见《区域水土流失动态监测技术规范(试行)》^[16]。

$$B = \sum_{i=1}^{24} \text{SLR}_i \times \text{WR}_i \quad (5)$$

式中: WR_i 为第 i 个半月降雨侵蚀力占全年降雨侵蚀力的比值; SLR_i 为第 i 个半月园地、林地和草地的土壤流失比例,计算公式如式(6—8)所示。

茶园和灌木林地 SLR_i 计算公式^[16]:

$$\text{SLR}_i = \frac{1}{1.17647 + 0.86242 \times 1.05905^{100 \times \text{FVC}}} \quad (6)$$

果园、其他园地、有林地和其他林地 SLR_i 计算公式^[16]:

$$\text{SLR}_i = 0.44468 \times e^{(-3.20096 \times \text{GD})} - 0.04099 \times e^{(\text{FVC} - \text{FVC} \times \text{GD})} + 0.0257 \quad (7)$$

草地 SLR_i 计算公式^[16]:

$$\text{SLR}_i = \frac{1}{1.25 + 0.78845 \times 1.05968^{100 \times \text{FVC}}} \quad (8)$$

式中: FVC 为植被覆盖度; GD 为乔木林的林下盖度。对 MODIS 的 MOD13A2 产品数据进行拼接裁剪、投影转换等数据预处理,然后对有云及阴影的像元数据先后进行 3 a 最大值合成和 Savitzky-Golay 滤波等两个步骤的去云处理,将循环周期 16 d 共 23 期的植被指数转换成 24 个半月的植被指数,进一步采用像元二分法计算得到 24 个半月的植被覆盖度 FVC 。包括除乔木林冠层以外的所有植被(灌木、草本和枯落物)构成的林下盖度 GD ,基于非光合植被(non-photosynthetic vegetation, NPV)数据计算并按实地调查情况修订。

(5) 工程措施因子 E 。根据解译结果中的工程措施类型进行赋值,赋值表详见《区域水土流失动态监测技术规范(试行)》^[16]。

(6) 耕作措施因子 T 。 T 因子的计算借鉴了土壤流失比例的思想,为 24 个半月土壤流失比例与降雨侵蚀力占全年降雨侵蚀力比值的乘积之和,土壤流失比例计算方法如式(9)所示。

$$\text{SLR}_i = (1 - 0.835 \times \text{PV}_i) \times e^{(-2.6 \times \text{NPV}_i)} \quad (9)$$

式中: SLR_i 为第 i 个半月土壤流失比例; PV_i 和 NPV_i 分别为第 i 个半月绿色、非绿色植被覆盖度。

1.3.2 区域土壤侵蚀速率计算及统计 基于调查单元土壤侵蚀速率和区域土地利用计算区域土壤侵蚀速率,主要过程包括:基于调查单元侵蚀计算结果,统计得到调查单元各地块平均土壤侵蚀速率;每一类土地利用类型地块平均土壤侵蚀速率面积加权平均,得到各调查单元每一类土地利用类型平均侵蚀速率;基于调查单元各类土地利用类型平均侵蚀速率,采用克里金法分别进行空间插值;根据区域土地利用图和分土地利用类型的各个土壤侵蚀速率栅格图,逐像元对应土地利用类型得到所属土地利用类型的土壤侵蚀速率,遍历得到全区土壤侵蚀速率。

1.3.3 小流域的划分 基于 90 m 分辨率的 SRTM 数据,采用坡长坡度因子计算工具(LS_Tool)提取小流域。泛第三极地区可划分为 30 余万个小流域,其中最小面积为 50 km^2 ,最大面积为 54 266 km^2 ,平均面积为 167 km^2 。

1.3.4 土壤侵蚀空间分布特征分析 采用莫兰指数(Moran's I)用于土壤侵蚀空间自相关程度的度量^[17-18],分为全局空间自相关和局部空间自相关。

(1) 全局空间自相关。全局空间自相关用于描述某一要素的整体分布情况,用 I 值大小来衡量^[19]:

$$I = \frac{n}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij}} \times \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (10)$$

式中: I 为全局莫兰指数; W_{ij} 为小流域 i 与小流域 j 间的空间权重, 当小流域 i 与小流域 j 相邻时, $W_{ij} = 1$, 反之, $W_{ij} = 0$; n 为小流域总数; x_i 和 x_j 分别为小流域 i 和小流域 j 的平均土壤侵蚀速率。

I 的取值范围为 $[-1, 1]$, $I > 0$ 表示空间正相关, 且 I 值越大, 空间相关性越明显; $I < 0$ 表示空间负相关, I 值越小, 空间差异越大; $I = 0$ 表示空间呈随机性。

(2) 局部空间自相关。局部空间自相关分析用于揭示空间要素在局部范围内的空间聚集或分散特征, 依据评价单元 Moran's I 指数与其相邻单元 Moran's I 指数平均值的关系, 分为高高、低低、高低和低高 4 种类型。高高型代表该小流域土壤侵蚀较严重, 周边小流域土壤侵蚀也较严重; 低低型反之; 高低型代表该小流域土壤侵蚀较严重, 周边小流域土壤侵蚀较轻微; 低高型反之。某评价单元 i 的 Moran's I 值计算公式为^[19]:

$$I_i = \frac{n^2}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij}} \times \frac{(x_i - \bar{x}) \sum_{j=1}^n W_{ij} (x_j - \bar{x})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (11)$$

式中: I_i 为小流域 i 土壤侵蚀速率的 Moran's I 指数; 其余同上。

在本研究中, 以小流域作为评价单元, 计算评价单元内的平均土壤侵蚀速率, 以此作为基础数据, 采用 GeoDa 软件进行土壤侵蚀速率的全局空间自相关分析和局部空间自相关分析。

2 结果与分析

2.1 土壤侵蚀总体分布特征

2.1.1 总体状况 泛第三极地区平均土壤侵蚀速率为 $162.73 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$, 最大达到 $17\,740.3 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ 。参考 Singh^[20]、Yigez^[21] 等采用的土壤侵蚀强度分级标准, 将侵蚀强度划分成 6 个级别: 微度侵蚀、轻度侵蚀、中度侵蚀、强烈侵蚀、极强烈侵蚀和剧烈侵蚀 (表 1)。将轻度及以上强度的侵蚀视为发生了水土流失, 泛第三极多数地区不发生水土流失, 水土流失面积为 389 万 km^2 , 占总面积的比例为 7.75% 。泛第三极地区以轻度侵蚀为主, 占总土地面积比例为 5.15% , 其次为中度侵蚀, 所占面积比例 1.96% ; 其余强度的侵蚀面积很小, 所占比例均不足 1% 。

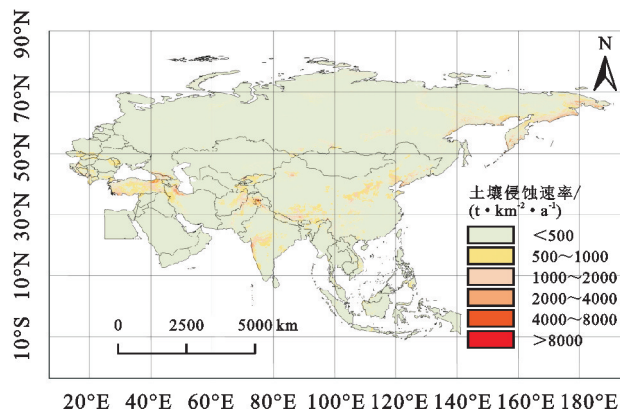
表 1 泛第三极地区土壤侵蚀强度分级

Table 1 Classification of soil erosion intensity in

Pan-Third Pole region

土壤侵蚀强度	土壤侵蚀速率/ ($\text{t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)	所占面积 比例/%
微度侵蚀	< 500	92.25
轻度侵蚀	$500 \sim 1000$	5.15
中度侵蚀	$1000 \sim 2000$	1.96
强烈侵蚀	$2000 \sim 4000$	0.55
极强烈侵蚀	$4000 \sim 8000$	0.08
剧烈侵蚀	> 8000	0.01

土壤侵蚀速率 $> 500 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ 的地区集中分布在西亚、东亚以及南亚地区, 在俄罗斯东北部、中亚南部、中东欧西部也有一些分布, 而在东南亚地区仅有零星分布 (图 1)。对于西亚地区来说, 主要分布在土耳其、格鲁吉亚、伊朗等国家, 从地形来看主要位于安纳托利亚高原、扎格罗斯山脉、厄尔布尔士山脉以及伊朗高原附近; 土壤侵蚀速率 $> 500 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ 的地区主要分布在中国的青藏高原、云贵高原、黄土高原、山东丘陵以及东北平原附近; 对于南亚地区而言, 主要分布在阿富汗、巴基斯坦、印度等国家, 位于西高止山脉、东高止山脉、印度半岛、苏莱曼山脉以及喜马拉雅山脉附近。由此可看出, 泛第三极地区水土流失主要发生在高原、山脉附近。



注: 基于自然资源部标准地图服务网站 GS(2016)166 号标准地图制作, 底图边界无修改, 下同。

图 1 泛第三极地区土壤侵蚀空间分布

Fig. 1 Spatial distribution map of soil erosion in Pan-Third Pole region

2.1.2 聚集特征 全局 Moran's I 结果为: $I = 0.9209$, $Z\text{-score} = 845.8518$, $p = 0.001$ 。由于 $p < 0.01$, 且 $Z\text{-score} > 2.58$, 因此有 99% 的把握认为土壤侵蚀是聚集分布的。

局部 Moran's I 结果显示 (图 2): 泛第三极地区土壤侵蚀的空间聚集类型主要有 2 类: 高高型和低低型聚集, 占总面积的比例分别为 12.29% 和 39.56% 。

其中,中东欧和东南亚大部分地区土壤侵蚀的聚集分布不显著;西亚、中亚和俄罗斯等地区均以低低型聚集为主,仅在伊朗北部、土耳其、格鲁吉亚、吉尔吉斯斯坦、塔吉克斯坦以及俄罗斯的东部存在高高型聚集;对于东亚来说,低低型聚集主要分布在蒙古国南部以及中国的新疆、西藏北部、青海西北部等,高高型聚集主要分布在中国的东北、黄土高原、西藏南部以及河北的西部、东北部;南亚的高高型聚集主要分布在阿富汗东部、巴基斯坦北部、印度东部以及尼泊尔。

与土壤侵蚀的空间分布(图 1)对比发现,高高型聚集区和土壤侵蚀速率 $>500\text{ t}/(\text{km}^2\cdot\text{a})$ 的区域基本重合。俄罗斯东部、中国东北部、黄土高原、西藏南部、土耳其以及印度西部等区域均为土壤侵蚀速率 $>500\text{ t}/(\text{km}^2\cdot\text{a})$ 的区域,也是高高型聚集的主要分布区域,因此可认为泛第三极地区土壤侵蚀较严重的区域多是连续、成片分布的。

表 2 不同土地利用类型下的土壤侵蚀
Table 2 Soil erosion under different land use types

土地利用 类型	占总国土 面积的比例/%	平均土壤侵蚀速率/ ($\text{t}\cdot\text{km}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$)	水土流失面积比例/%	
			占该土地利用面积	占总水土流失面积
耕地	18.93	275.02	14.89	36.39
林地	33.47	88.02	1.56	6.76
草地	15.87	396.18	23.37	47.88
灌丛	2.30	417.78	18.48	5.48
湿地与水体	3.08	0.00	0.00	0.00
城市用地	0.53	83.79	3.77	0.26
荒漠稀疏植被	5.54	0.00	0.00	0.00
苔原	0.26	0.00	0.00	0.00
裸地	19.77	42.16	1.27	3.24
冰川	0.27	0.00	0.00	0.00

草地和耕地的土壤侵蚀较严重,水土流失面积占总水土流失面积的比例分别达到了 47.88%和36.39%,二者合计达到 84.27%,其中草地上发生水土流失的面积比例最大,达到 23.37%,耕地发生水土流失的面积比例为 14.89%,排列第 3(表 2)。从平均侵蚀速率看,草地的平均侵蚀速率为 $396.18\text{ t}/(\text{km}^2\cdot\text{a})$,为第二大值,耕地侵蚀速率为 $275.02\text{ t}/(\text{km}^2\cdot\text{a})$,为第三大值。灌丛的面积尽管较小,仅占总土地面积的 2.30%,但其侵蚀也较严重,平均土壤侵蚀速率最大,达到 $417.78\text{ t}/(\text{km}^2\cdot\text{a})$,水土流失的面积比例次最大,达到 18.48%(表 2)。林地流失面积占总流失面积比例为 6.76%,超过了灌丛,但是林地分布最为广泛,因此实际侵蚀严重性相对灌丛明显轻微,林地平均侵蚀速率只有 $88.02\text{ t}/(\text{km}^2\cdot\text{a})$,水土流失面积比例也仅为 1.56%。

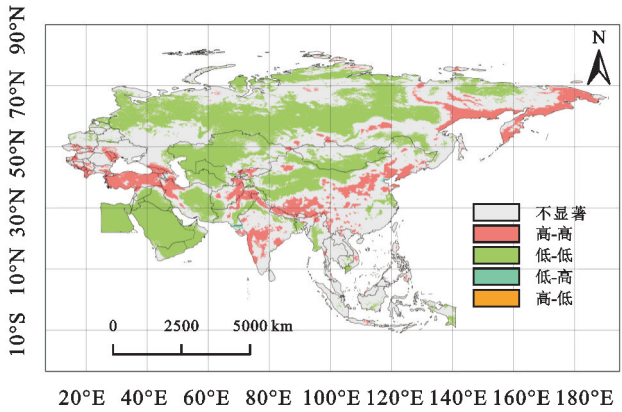


图 2 泛第三极地区土壤侵蚀 LISA 聚集
Fig. 2 LISA aggregation map of soil erosion in Pan Third Pole region

2.2 不同土地利用类型的土壤侵蚀

泛第三极地区土地利用方式以林地、裸地、耕地和草地为主,这 4 种土地利用面积占全区域总面积的比例分别为 33.43%,19.70%,18.90%和 15.80%,合计达到 88.04%(表 2)。

裸地以裸岩石砾地和沙地为主,真正意义上的裸土很少。因此,裸地侵蚀并不严重,平均土壤侵蚀速率较低,仅为 $42.16\text{ t}/(\text{km}^2\cdot\text{a})$,裸地上的水土流失面积占裸地总面积的比例为 1.27%,但是裸地总面积较大,占国土面积比例达到 19.77%,因此裸地流失面积占总流失面积比例达到了 3.24%。由此可看出,草地、灌丛和耕地是泛第三极地区侵蚀较严重的土地利用类型。

2.3 主要土地利用类型在不同海拔的侵蚀

为进一步明确土壤侵蚀发生的重点区域,统计草地、灌丛和耕地在不同海拔等级的侵蚀特征,海拔等级的划分参考李炳元等^[22]的方法,并结合研究区特点对 0~1 000 m进行了细分(表 3)。>1 000 m 的草地侵蚀较严重,平均侵蚀速率均超过了 $500\text{ t}/(\text{km}^2\cdot\text{a})$,对草地水土流失的贡献达到了 74.72%;而对于<1 000 m 的草地而言,51.1%的土地仅贡献了 25.28%的水土流失,流

失面积占自身面积的比例不足 20%。

对于灌丛而言,<200 m 和 200~500 m 地区的侵蚀较轻,平均侵蚀速率不足 500 t/(km²·a);4 000~6 000 m 的灌丛侵蚀最严重,70.59%的土地都发生了水土流失,但该区域占灌丛面积的比例不足 1%,对总水土流失的贡献也不足 1%;500~1 000 m,1 000~2 000 m 和 2 000~4 000 m 的灌丛侵蚀也比较严重,平均侵蚀速率分别达到了 560.97,549.94,549.48 t/(km²·a),对灌丛水土流失的贡献合计达到了 44.85%。

<200 m 和 200~500 m 的耕地虽贡献了 56.18%的水土流失,但该区域侵蚀并不严重,平均侵蚀速率仅为

197.55,297.85 t/(km²·a),流失面积占自身面积的比例不足 20%;500~1 000 m 和 4 000~6 000 m 的耕地侵蚀较严重,流失面积占自身面积的比例 30%左右;1 000~2 000 m 和 2 000~4 000 m 的耕地侵蚀最严重,平均侵蚀速率分别为 546.71,551.90 t/(km²·a),流失面积占自身面积的比例超过了 40%。

综合考虑侵蚀严重程度及其面积比例,将 1 000~6 000 m 的草地、500~4 000 m 的灌丛以及 1 000~4 000 m 的耕地确定为泛第三极地区土壤侵蚀的重点区域,该重点区域 9.61%的国土面积贡献了 46.79%的水土流失。

表 3 草地、灌丛和耕地在不同海拔的土壤侵蚀

Table 3 Soil erosion of grassland, scrubland, arable land under different altitude

土地利用 类型	海拔 等级	该区域占该土地利用 总面积的比例/%	平均土壤侵蚀速率/ (t·km ⁻² ·a ⁻¹)	水土流失面积比例/%	
				占该土地利用 该海拔总面积	占该土地利用 水土流失面积
草地	<200 m	21.83	192.40	7.06	6.51
	200~500 m	14.46	241.98	11.26	6.87
	500~1000 m	14.81	343.66	19.04	11.90
	1000~2000 m	20.17	509.78	35.54	30.26
	2000~4000 m	14.41	664.60	40.26	24.49
	4000~6000 m	14.32	519.99	33.03	19.96
	>6000 m	0.01	606.95	18.63	0.01
灌丛	<200 m	42.50	329.00	9.71	22.38
	200~500 m	28.08	404.04	20.90	31.82
	500~1000 m	17.85	560.97	27.95	27.06
	1000~2000 m	9.35	549.94	27.26	13.83
	2000~4000 m	1.97	549.48	37.05	3.96
	4000~6000 m	0.25	683.72	70.59	0.95
	>6000 m	0.00	—	—	—
耕地	<200 m	55.86	197.55	7.34	27.60
	200~500 m	26.23	297.85	16.19	28.58
	500~1000 m	10.17	426.85	29.24	20.01
	1000~2000 m	6.39	546.71	46.38	19.96
	2000~4000 m	1.25	551.90	42.82	3.60
	4000~6000 m	0.10	517.40	35.09	0.24
	>6000 m	0.00	—	—	—

3 讨论

3.1 土壤侵蚀速率计算结果的可靠性分析

(1) 与坡面尺度研究结果的对比。已有学者在泛第三极地区开展坡面土壤侵蚀研究,其中 Hartanto^[23]、Awasthi^[24]、Narain^[25]、Şahin^[26] 和 Yüksek^[27]等均采用径流小区法分别对印度尼西亚、尼泊尔、印度和土耳其的土壤侵蚀进行了研究;Golosov^[28]、Joshi^[29]、Anh^[30]等采用侵蚀针法分别对俄罗斯、印度和越南的土壤侵蚀进行了研究;Mandal 等^[31]采用径流小区与 137Cs 相结合的

方法对印度的土壤侵蚀开展了研究。按照土地利用类型一致、空间位置一致或临近、植被覆盖近似的原则,将上述研究结果与本模型计算的调查单元土壤侵蚀速率进行对比,发现模型计算的土壤侵蚀速率具有较好的可信度(图 3)。

(2) 与区域尺度研究结果的对比。2015 年中国水土流失动态监测结果^[3]显示,水力侵蚀导致的水土流失面积为 129.32 万 km²,面积比例为 13.47%,本研究得到 2015 年中国水土流失面积比例为 12.14%,与中国动态监测结果基本一致。由于采用的数据源

有差别,成果数据分辨率也不同,总水土流失面积和空间格局近似,但局部有区别。

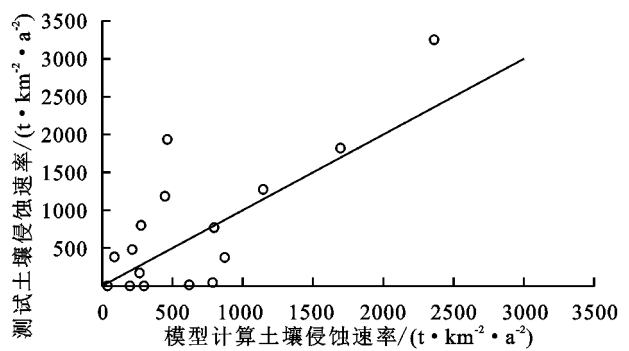


图 3 与坡面尺度研究结果的对比

Fig. 3 Comparison with slope scale research results

表 4 Singh 等研究结果与本研究结果的对比

Table 4 Comparison with the results of Singh, et al.

土壤侵蚀速率/ ($t \cdot km^{-2} \cdot a^{-1}$)	土壤侵蚀强度		该强度侵蚀面积占总面积的比例/%	
	Singh 等研究	本研究	Singh 等研究	本研究
<500	轻度侵蚀	微度侵蚀	82.63	84.33
500~1000	中度侵蚀	轻度侵蚀	6.87	11.43
1000~2000	高度侵蚀	中度侵蚀	5.96	3.11
2000~4000	极高度侵蚀	强烈侵蚀	3.30	0.86
4000~8000	重度侵蚀	极强烈侵蚀	1.24	0.28
>8000	极重度侵蚀	剧烈侵蚀	0.00	0.00

Panagos 等^[33]采用 RUSLE 模型对欧洲的土壤侵蚀速率进行了研究,与泛第三极地区重合的国家结果如表 5 所示。除捷克、克罗地亚、斯洛伐克和斯洛文尼亚外,其他国家的平均土壤侵蚀速率均与本研究结果相近,而捷克、克罗地亚和斯洛伐克的平均土壤侵蚀速率低于本研究结果,斯洛文尼亚的平均土壤侵蚀速率高于本研究结果。总体来看,本研究对中东欧地区侵蚀情况的研究结果与 Panagos 等结果近似。

表 5 Panagos 等研究结果与本研究结果的对比

Table 5 Comparison with the results of Panagos, et al.

国家	平均土壤侵蚀速率/($t \cdot km^{-2} \cdot a^{-1}$)	
	Panagos 等研究	本研究
爱沙尼亚	21	29.07
保加利亚	205	288.47
波兰	96	122.93
捷克	165	301.01
克罗地亚	316	416.47
拉脱维亚	32	49.02
立陶宛	52	71.92
斯洛伐克	218	315.06
斯洛文尼亚	743	404.52
匈牙利	162	219.50

3.2 土壤侵蚀分布

本研究得到,泛第三极地区草地、灌丛和耕地的侵

Singh 等^[20]采用 USLE 模型对印度的 Kapgari 流域的土壤侵蚀速率进行了计算,并根据土壤侵蚀速率划分出了 6 级侵蚀(表 4),Kapgari 流域各强度侵蚀所占面积比例与本研究对印度的结果近似,Kapgari 流域的侵蚀情况在印度处于平均水平。Sharda 等^[32]采用 USLE 模型对印度全国土壤侵蚀情况进行研究,网格分辨率 10 km×10 km,其土壤侵蚀速率小于 500 t/(km²·a)的面积占国土总面积的比例为 43.84%,即印度有超过 50%的国土面积发生了水土流失。Sharda 等^[32]对印度全国土壤侵蚀调查,采用的网格像元面积大,数据较粗略,水土流失面积估计结果有偏高疑问,本研究得到的印度侵蚀状况明显较轻。

蚀较严重,其他土地利用的侵蚀较轻微。草地和灌丛主要分布在坡度较大的地区,平均坡度分别达到了 7.42°和 5.94°,林地的平均坡度也较大,为 7.42°,但由于林地的植被覆盖度较高,6—8 月平均植被覆盖度达到了 79.2%,而草地和灌丛仅有 46.3%和 46.1%,导致草地和灌丛的土壤侵蚀较严重;耕地的侵蚀也较严重主要是由于植被覆盖度较低,6—8 月平均植被覆盖度为 55.8%,略高于草地和灌丛的植被覆盖度,侵蚀严重程度也弱于草地和灌丛。同一土地利用类型在不同海拔的侵蚀差异主要是由地形差异导致的,>1 000 m 草地的平均坡度达到了 16.15°,远高于<1 000 m 的草地平均坡度(3.74°);耕地<500 m 的平均坡度仅 2.04°,而 500~6 000 m 的平均坡度达到了 10.13°;<500 m 灌丛的平均坡度为 3.77°,500~4 000 m 灌丛的平均坡度为 12.67°,这解释了 500~4 000 m 的侵蚀较<500 m 严重的原因,但对于 4 000~6 000 m 的灌丛来说,平均坡度仅有 6.85°,侵蚀却是最严重的,其高侵蚀是由植被覆盖度过低引起的,6—8 月平均植被覆盖度仅为 10.3%。对于泛第三极地区而言,侵蚀差异主要是由地形和植被覆盖度差异引起的,与局部研究结果相一致^[7,21,34]。

4 结论

(1) 泛第三极地区平均土壤侵蚀速率为 162.73

t/(km²·a),水土流失面积为389万km²,占总国土面积的比例为7.75%,土壤侵蚀速率>500 t/(km²·a)的地区主要分布在西亚的土耳其、格鲁吉亚和伊朗、南亚的阿富汗、巴基斯坦、印度以及东亚的中国等国家。

(2) 泛第三极地区土壤侵蚀是聚集分布的,以高高型和低低型聚集为主,高高型聚集主要分布在西亚北部、南亚北部和西南部以及中国的东北、黄土高原、西藏南部、俄罗斯东部等地区,低低型聚集主要分布在西亚南部、中亚和俄罗斯中部等。

(3) 泛第三极地区土壤侵蚀发生的重点区域为1 000~6 000 m的草地,500~4 000 m的灌丛以及1 000~4 000 m的耕地,9.61%的国土面积贡献了46.79%的水土流失。

参考文献(References):

- [1] 姚檀栋,陈发虎,崔鹏,等.从青藏高原到第三极和泛第三极[J].中国科学院院刊,2017,32(9):924-931.
Yao T D, Chen F H, Cui P, et al. From Tibetan Plateau to third pole and pan-third pole[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2017, 32(9): 924-931.
- [2] Maji A K, Reddy G P O, Sarkar D. Degraded and wastelands of India: status and spatial distribution[R]. Indian Council of Agricultural Research, New Delhi, 2010.
- [3] 中华人民共和国水利部. 2015年中国水土保持公报[EB/OL]. <http://www.mwr.gov.cn/sj/tjgb/zgstbcgb>, 2015-12-31.
ministry of Water Resources of the People's Republic of China. Soil and Water Conservation Bulletin of China in 2015[EB/OL]. <http://www.mwr.gov.cn/sj/tjgb/zgstbcgb>, 2015-12-31.
- [4] Somasiri I S, Hewawasam T, Rambukkange M P. Adaptation of the revised universal soil loss equation to map spatial distribution of soil erosion in tropical watersheds: A GIS/RS-based study of the Upper Mahaweli River Catchment of Sri Lanka[J]. Modeling Earth Systems and Environment, 2022, 8(2): 2627-2645.
- [5] Irvem A, Topaloglu F, Uygur V. Estimating spatial distribution of soil loss over Seyhan River Basin in Turkey[J]. Journal of Hydrology, 2007, 336(1/2): 30-37.
- [6] Saha M, Sauda S S, Real H R K, et al. Estimation of annual rate and spatial distribution of soil erosion in the Jamuna basin using RUSLE model: a geospatial approach[J]. Environmental Challenges, 2022, 8: 100524.
- [7] Chalise D, Kumar L, Shrivastav C P, et al. Spatial assessment of soil erosion in a hilly watershed of Western Nepal[J]. Environmental Earth Sciences, 2018, 77: 1-11.
- [8] 陈羽璇,杨勤科,刘宝元,等.基于CSLE模型的珠江流域土壤侵蚀强度评价[J].中国水土保持科学(中英文), 2021, 19(6): 86-93.
Chen Y X, Yang Q K, Liu B Y, et al. Assessment of soil erosion intensity in Pearl River Basin based on CSLE model[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2021, 19(6): 86-93.
- [9] 邹海天,李子轩,张彩云.基于栅格像元和矢量地块的区域土壤侵蚀计算结果对比分析:以怀来县外井沟小流域为例[J].海河水利, 2020(4): 16-19.
Zou H T, Li Z X, Zhang C Y. Contrastive analysis on computed result of regional soil erosion based on grid cell and vector plot. Haihe[J]. Water Resources, 2020(4): 16-19.
- [10] 杨勤科.泛第三极(65国)土壤可蚀性因子(K)图[R].国家青藏高原科学数据中心, (2021)
Yang Q K. Soil Erodibility Factor(K) Dataset of Pan-Third Pole 65 countries[R]. National Tibetan Plateau Scientific Data Center, 2021.
- [11] 许尔琪.“一带一路”区域土地利用数据(V1.0)[R].国家青藏高原科学数据中心, 2015
Xu E Q. Land Cover Data of the Belt and Road's region (Version 1.0)[R]. National Tibetan Plateau Scientific Data Center, 2015.
- [12] Liu B, Zhang K, Xie Y. An empirical soil loss equation [C] // Proceedings of the 12th International Soil Conservation Organization Conference, Beijing, China, 2002: 26-31.
- [13] 殷水清,章文波,谢云,等.基于高密度站网的中国降雨侵蚀力空间分布[J].中国水土保持, 2013(10): 45-51.
Yin S Q, Zhang W B, Xie Y, et al. Spatial distribution of rainfall erosivity in China based on high-density station network[J]. Soil and Water Conservation in China, 2013(10): 45-51.
- [14] Wischmeier W H, Johnson C B, Cross B. Soil erodibility nomograph for farmland and construction sites[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1971, 26: 5189.
- [15] 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.
Fu Suhua, Liu Baoyuan, Zhou Guiyun, et al. Calculation tool of topographic factors. Science of Soil and Water Conservation, 2015, 13(5): 105-110.
- [16] 水利部水土保持监测中心.区域水土流失动态监测技术规范(试行)[EB/OL]. <http://swcc.mwr.gov.cn/gonggao/201808/W020180829550545447582.pdf>, 2018-8-13.
Soil and Water Conservation Monitoring Center, ministry of Water Resources. Technical Provisions for

- Dynamic Monitoring of Regional Soil Erosion (Trial) [EB/OL]. <http://swcc.mwr.gov.cn/gonggao/201808/W020180829550545447582.pdf>, 2018-8-13.
- [17] Moran P A P. The interpretation of statistical maps [J]. *Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Methodological)*, 1948, 10(2): 243-251.
- [18] Moran P A P. Notes on continuous stochastic phenomena[J]. *Biometrika*, 1950, 37(1/2): 17-23.
- [19] Anselin L. Local indicators of spatial association: LISA [J]. *Geographical Analysis*, 1995, 27(2): 93-115.
- [20] Singh G, Panda R K. Grid-cell based assessment of soil erosion potential for identification of critical erosion prone areas using USLE, GIS and remote sensing: A case study in the Kapgari watershed, India[J]. *International Soil and Water Conservation Research*, 2017, 5(3): 202-211.
- [21] Yigez B, Xiong D, Zhang B, et al. Spatial distribution of soil erosion and sediment yield in the Koshi River Basin, Nepal; a case study of Triyuga watershed [J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2021, 21(12): 3888-3905.
- [22] 李炳元, 潘保田, 韩嘉福. 中国陆地基本地貌类型及其划分指标探讨[J]. *第四纪研究*, 2008(4): 535-543.
- Li B Y, Pan B T, Han J F. Basic terrestrial geomorphological types in China and their circumscriptions [J]. *Quaternary Sciences*, 2008(4): 535-543.
- [23] Hartanto H, Prabhu R, Widayat A S E, et al. Factors affecting runoff and soil erosion: plot-level soil loss monitoring for assessing sustainability of forest management [J]. *Forest Ecology and Management*, 2003, 180(1/3): 361-374.
- [24] Awasthi K D, Tiwari K R, Balla M K, et al. Plot level runoff, soil and nutrient loss in upland rainfed terraces (Ban) and aspect-wise soil quality of different land uses in Pokhara Khola watershed, Nepal [J]. *International Journal of Ecology & Environmental Sciences*, 2007, 33(2/3): 105-114.
- [25] Narain P, Singh R K, Sindhwani N S, et al. Agroforestry for soil and water conservation in the western Himalayan Valley Region of India 1. Runoff, soil and nutrient losses [J]. *Agroforestry Systems*, 1997, 39: 175-189.
- [26] Şahin U, Özcan M. Effect of different soil conservation methods and planting with four-wing salt bush (*Atriplex canescens*) on soil erosion in a semi-arid region of Turkey [J]. *Bosque*, 2020, 41(3): 253-260.
- [27] Yüksek F, Yüksek T. Growth performance of Sainfoin and its effects on the runoff, soil loss and sediment concentration in a semi-arid region of Turkey [J]. *Catena*, 2015, 133: 309-317.
- [28] Golosov V N, Collins A L, Dobrovolskaya N G, et al. Soil loss on the arable lands of the forest-steppe and steppe zones of European Russia and Siberia during the period of intensive agriculture [J]. *Geoderma*, 2021, 381: 114678.
- [29] Joshi V U. Soil loss estimation by field measurements in the badlands along Pravara river (Western India) [J]. *Journal of the Geological Society of India*, 2014, 83: 613-624.
- [30] Anh P T Q, Gomi T, MacDonald L H, et al. Linkages among land use, macronutrient levels, and soil erosion in northern Vietnam: A plot-scale study [J]. *Geoderma*, 2014, 232: 352-362.
- [31] Mandal D, Giri N, Srivastava P, et al. ¹³⁷Cs: a potential environmental marker for assessing erosion-induced soil organic carbon loss in India [J]. *Current Science*, 2019, 117(5): 865-871.
- [32] Sharda V N, Mandal D, Ojasvi P R. Identification of soil erosion risk areas for conservation planning in different states of India [J]. *Journal of Environmental Biology*, 2013, 34(2): 219-226.
- [33] Panagos P, Borrelli P, Poesen J, et al. The new assessment of soil loss by water erosion in Europe [J]. *Environmental Science & Policy*, 2015, 54: 438-447.
- [34] Sahour H, Gholami V, Vazifedan M, et al. Machine learning applications for water-induced soil erosion modeling and mapping [J]. *Soil and Tillage Research*, 2021, 211: 105032.