

基于 CSLE 模型的巴基斯坦土壤侵蚀评价

朱浩楠¹, 杨勤科^{1,2}, 杜朝正¹, 黄晨璐¹, 庞国伟^{1,2}, 王春梅^{1,2}, 朱梦阳³

(1.西北大学城市与环境学院, 西安 710127;

2.旱区生态水文与灾害防治国家林业局重点实验室, 西安 710127; 3.陕西土地集团研究院, 西安 710127)

摘要: 通过制作土壤侵蚀图, 分析土壤侵蚀主控因子, 为巴基斯坦水土流失与保护提供合理的科学依据及治理参考。以土壤侵蚀抽样调查单元数据和土壤侵蚀因子数据为数据源, 基于 CSLE 模型分别以空间插值法和地图代数法定量计算巴基斯坦水蚀区土壤侵蚀图, 以空间插值结果为参照对地图代数计算结果做直方图匹配得到巴基斯坦水蚀速率图; 采用水利部 SL 190—2007 标准对巴基斯坦风蚀强度进行了定性评价; 使用分类决策树分析土壤侵蚀的主控因子。结果表明, 空间插值法制图具有空间预测的准确性, 地图代数法制图可以表现良好的局地变异特征; 直方图匹配土壤侵蚀图兼具这 2 种方法的优点, 土壤水蚀速率平均值为 $972.9 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$, 水蚀区土壤侵蚀比较严重, 风蚀区以剧烈风蚀和极强烈风蚀为主, 大部分地区生物措施因子是影响土壤侵蚀的主控因子, 耕作区和山区的主控因子分别是 R 因子和 LS 因子。

关键词: 土壤侵蚀; 中国土壤流失方程; 地图代数; 空间插值; 直方图匹配; 主控因子

中图分类号: S157

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2021)02-0022-09

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2021.02.004

Assessment of Soil Erosion in Pakistan Based on CSLE Model

ZHU Haonan¹, YANG Qinke^{1,2}, DU Chaozheng¹, HUANG Chenlu¹,

PANG Guowei^{1,2}, WANG Chunmei^{1,2}, ZHU Mengyang³

(1.College of Urban and Environment, Northwest University, Xi'an 710127;

2.Key Laboratory of State Forest Administration on Ecological Hydrology and Disaster Prevention in Arid Areas, Xi'an 710127; 3.Shaanxi Land Engineering Construction Group Co. Ltd., Xi'an 710127)

Abstract: To provide reasonable scientific basis and control reference for soil erosion conservation in Pakistan, soil erosion map was made, and the dominant factors of soil erosion was analyzed. Based on the Chinese Soil Loss Equation (CSLE), taking soil erosion sampling survey units and soil erosion factor datasets such as rainfall erosivity factor (R factor), soil erodibility factor (K factor), slope steepness and slope length factor (LS factor), biological measure factor (B factor), engineering-control practices factor (E factor), and tillage practices factor (T factor) as data sources, spatial interpolation and map algebra method were used to make soil erosion maps for water erosion area, the spatial interpolation result was then used as a reference to update the map algebra calculation result with histogram matching to obtain the Pakistan water erosion rate map. The standards for classification and gradation of soil erosion (SL 190—2007) proposed by the Ministry of Water Resources of the People's Republic of China was adopted for qualitative evaluation the wind erosion intensity in Pakistan. Meanwhile, classification decision tree was used to analyze the dominant influence factors of soil erosion. The results showed that the spatial interpolation method has good accuracy of spatial prediction while the map algebra method can express good local variation characteristics. The soil erosion map matched by histogram had the advantages of the two methods. Average value of soil water erosion rate was $972.9 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$, and the grade of soil erosion was serious. The wind erosion area was dominated by severe and extremely strong wind erosion. Biological measures factor was the dominant influence factor for soil erosion in most areas, while the R factor and LS factor were the dominant influence

收稿日期: 2020-10-16

资助项目: 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: 朱浩楠(1995—), 男, 山东菏泽人, 在读硕士, 主要从事区域土壤侵蚀调查与定量评价研究。E-mail: zhuhn@stumail.nwu.edu.cn

通信作者: 杨勤科(1962—), 男, 陕西陇县人, 教授, 主要从事区域土壤侵蚀评价和侵蚀地形分析研究。E-mail: qkyang@nwu.edu.cn

factors in agricultural area and mountainous area respectively.

Keywords: soil erosion; Chinese Soil Loss Equation; map algebra; spatial interpolation; histogram matching; dominant influence factor

土壤是一种有限的自然资源,不仅为地球上的生命提供生存保障^[1],也是承载生态系统不可或缺的物质基础,当今土壤侵蚀已成为破坏土壤的最大威胁之一^[2-3]。土壤侵蚀的评估与治理要以土壤侵蚀制图为基础^[4]。国内外学者主要通过使用土壤侵蚀模型定量计算土壤侵蚀速率,进而分析土壤侵蚀状况。Panagos 等^[5]使用 RUSLE 编制了欧盟土壤流失图;刘宝元等^[6]将抽样调查方法与 CSLE 模型相结合完成我国水力侵蚀普查制图;Borrelli 等^[7]用 RUSLE 对全球土壤侵蚀进行定量评价分析。这些方法可归纳为基于遥感以及 GIS 技术制图的地图代数法和基于抽样调查法的空间插值法^[8]。土壤侵蚀受到多种因子影响,研究者引入机器学习方法分析土壤侵蚀的主控因子,如郝姗姗等^[9]使用 BP 神经网络方法对黄土丘陵区土壤侵蚀因子进行敏感性分析。

巴基斯坦是典型的农业国家,由于不合理的开发,森林覆盖率持续下降,致使约 76% 的土地受到不同程度的水蚀和风蚀影响^[10],因而该国对土壤侵蚀的研究和治理已刻不容缓。目前的研究主要是在中小流域和小区域尺度,如 Saleem 等^[11]对巴基斯坦波特瓦尔地区的土壤侵蚀速率估算,Abuzar 等^[12]计算巴基斯坦伊斯兰堡西姆利(Simly)流域的土壤侵蚀速率,Arshad 等^[13]模拟巴基斯坦北部典型小流域的土壤侵蚀速率。目前存在的主要问题是缺乏对全境土壤侵蚀的评价,需要制作全境的土壤侵蚀图以期对巴基斯坦土壤侵蚀治理和研究提供有效支撑。

本研究在前期调查研究的基础上^[14],基于抽样调查单元数据,用中国土壤流失方程(Chinese Soil Loss Equation, CSLE)与 GIS 相结合的方法,以各因子相乘的地图代数法和基于抽样单元的空间插值法定量计算巴基斯坦水蚀区土壤侵蚀图,以 SL 190—2007 标准^[15]为依据,根据植被覆盖度数据定性分析得到风蚀区土壤侵蚀等级图,以期全面准确地分析土壤侵蚀的基本状况,为该国土壤侵蚀治理提供科学依据,同时也为整个泛第三极典型区土壤侵蚀治理提供参考。

1 研究区概况与基础数据

1.1 研究区概况

巴基斯坦(23°30′—36°45′N,60°53′—75°31′E)位于南亚次大陆西北部,东北境与中国新疆接壤,东临印度,西毗阿富汗,全国领土面积为 880 254 km²(含巴控克什

米尔地区)(图 1)。巴基斯坦地势由东北向西南逐渐降低,依据地形特征,巴基斯坦大致可以分为 4 大地形区,即北部和西部山区、中东部平原、南部沙漠区和南部沿海地区,全境约 3/5 为山地和丘陵。巴基斯坦大部分区域属于热带干旱和半干旱气候类型,北部山区年降雨量可达 2 000 mm,而干旱地区通常在 150 mm 以下。巴基斯坦是南亚地区水土流失最严重的国家之一,最高纪录达到 150~165 t/(hm²·a)^[16]。

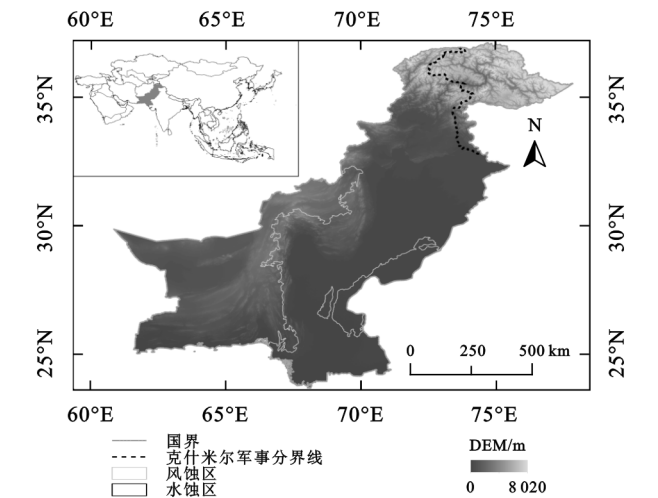


图 1 研究区位置

1.2 基础数据

本研究所用数据包含 2 个部分:一是土壤水蚀抽样调查数据,研究区(包括陆地部分 55 km 范围的缓冲区)共计 475 个抽样调查单元(图 2),所有抽样调查单元数据均由解译而来并通过质量验证^[17];二是用于地图代数法整体计算的土壤侵蚀因子数据(表 1)。

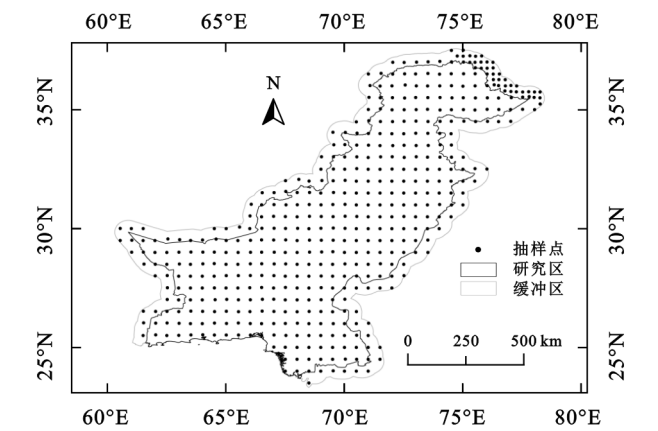


图 2 抽样点单元分布

2 研究方法

2.1 土壤侵蚀评价方法

巴基斯坦水蚀区土壤侵蚀速率采用中国土壤流

失方程进行定量计算,模型公式为:

$$A=RKLSBET \tag{1}$$

式中: A 为土壤侵蚀速率($t/(hm^2 \cdot a)$),表示单位面积坡面多年平均年土壤流失量; R 为降雨侵蚀力因子($(MJ \cdot mm)/(hm^2 \cdot h \cdot a)$); K 为土壤可蚀性因子($((t \cdot hm^2 \cdot h)/(hm^2 \cdot MJ \cdot mm))$); 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。

根据巴基斯坦的实际地理特征,结合降雨数据,以年降雨量 $<300\text{ mm}$ 为依据划分出风蚀区和水蚀区,对风蚀按照水利部 SL 190—2007 标准^[15](表 2)进行定性评价,利用植被覆盖度数据划分出风蚀区及对应的风蚀等级。

表 1 基础数据

基础数据	数据来源	分辨率
降雨侵蚀力	项目组提供 1	1 km
土壤可蚀性	项目组提供 2	1 km
坡度坡长因子	项目组提供 3	30 m
年平均降雨数据	项目组提供 4	1 km
植被覆盖度数据	项目组提供 5	1 km
(percent Tree_cover,percent NonTree_vegetate)数据集	(http://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/search)网站下载	250 m
土地利用类型(Globel Land30,GLC30)数据	(http://data.ess.tsinghua.edu.cn)网站下载	30 m
耕作区划图及 T 因子属性表	全球熟值图和《水土流失普查技术规定》	矢量及表格数据
包括详细水土保持措施的 475 个抽样调查单元矢量数据	项目组提供	矢量数据

注:1~5 均由泛第三极土壤侵蚀定量评价与分区防控对策(XDA20040202)项目组的阶段成果数据。

表 2 风蚀强度分级

级别	地表形态	植被覆盖度/% (非流沙面积)	对应侵蚀速率/ ($t \cdot km^{-2} \cdot a^{-1}$)
微度侵蚀	固定沙丘、沙地和滩地	>70	<200
轻度侵蚀	固定沙丘、半固定沙丘、沙地	$70\sim50$	$200\sim2500$
中度侵蚀	半固定沙丘、沙地	$50\sim30$	$2500\sim5000$
强烈侵蚀	半固定沙丘、流动沙丘、沙地	$30\sim10$	$5000\sim8000$
极强烈侵蚀	流动沙丘、沙地	<10	$8000\sim15000$
剧烈侵蚀	大片流动沙丘	<10	>15000

2.2 土壤侵蚀因子获取与预处理

采用巴基斯坦边界(含 55 km 缓冲区)对项目组提供的全球 R 因子、全球 K 因子和全球 LS 因子进行裁剪、双线性内插重采样处理,得到研究区 R 、 K 、 LS 因子 30 m 分辨率栅格数据层(图 3a、图 3b 和图 3c)。 R 、 K 、 LS 因子的计算方法参照相关文献^[18-20]和《水土流失普查技术规定》(2017 年 9 月)^[21]。本文着重介绍土壤侵蚀因子 B 、 E 、 T 的计算。

2.2.1 B 因子计算 参考 Borrelli 等^[7]对全球作物覆盖因子的研究,对于非农业用地 B 因子,结合 IGBP(international geosphere biosphere programme)的土地利用分类^[22],定义相应土地利用类型 B 因子值的约束范围,详细范围见表 3。对应 IGBP 土地利用类型代码中的第 1~5 类均按照公式(2)计算,对应 IGBP 土地利用类型代码中的第 6~10 类均按照公式(3)计算。

$$B_{na} = MIN_b + (MAX_b - MIN_b) \cdot (1 - \frac{TC}{100}) \tag{2}$$

式中: B_{na} 为林地覆盖的 B 因子值; MAX_b 和 MIN_b 根据 Borrelli 赋值规则进行设置。 TC (林地覆盖表面)被标准化为 0~1 的范围,并描述地面被林地覆盖的百分比。

$$B_P = MIN_b + (MAX_b - MIN_b) \cdot (1 - \frac{NonTree_vegetate}{100}) \tag{3}$$

式中: B_p 为非林地覆盖(即灌木、草地覆盖等)的 B 因子值; MAX_b 和 MIN_b 根据 Borrelli 赋值规则进行设置。 $NonTree_vegetate$ (灌木、草地覆盖表面)被标准化为 0~1 的范围,并描述地面被灌木、草地等覆盖的百分比。耕地赋值为 1。

最后将 GLC30 土地利用数据对应 IGBP 的土地利用类型,在 ArcGIS 中合并 B_{na} 、 B_p 和耕地 B 值得到最终的 B 因子图层(图 3d)。所有因子图层用最近邻法重采样成 30 m 分辨率。

2.2.2 E 因子计算 根据抽样单元中的工程措施信

息,按照《水土流失普查技术规定》(2017 年 9 月)^[21] 计算抽样单元 E 因子值,然后根据抽样单元的间距(55 km)为栅格尺寸,以抽样单元中心位置为栅格中心生成

栅格数据,栅格值等于每个抽样单元的 E 值;然后对该数据做 5×5 的均值滤波并用双线性内插法重采样到 30 m,得到研究区的 E 因子专题图(图 3e)。

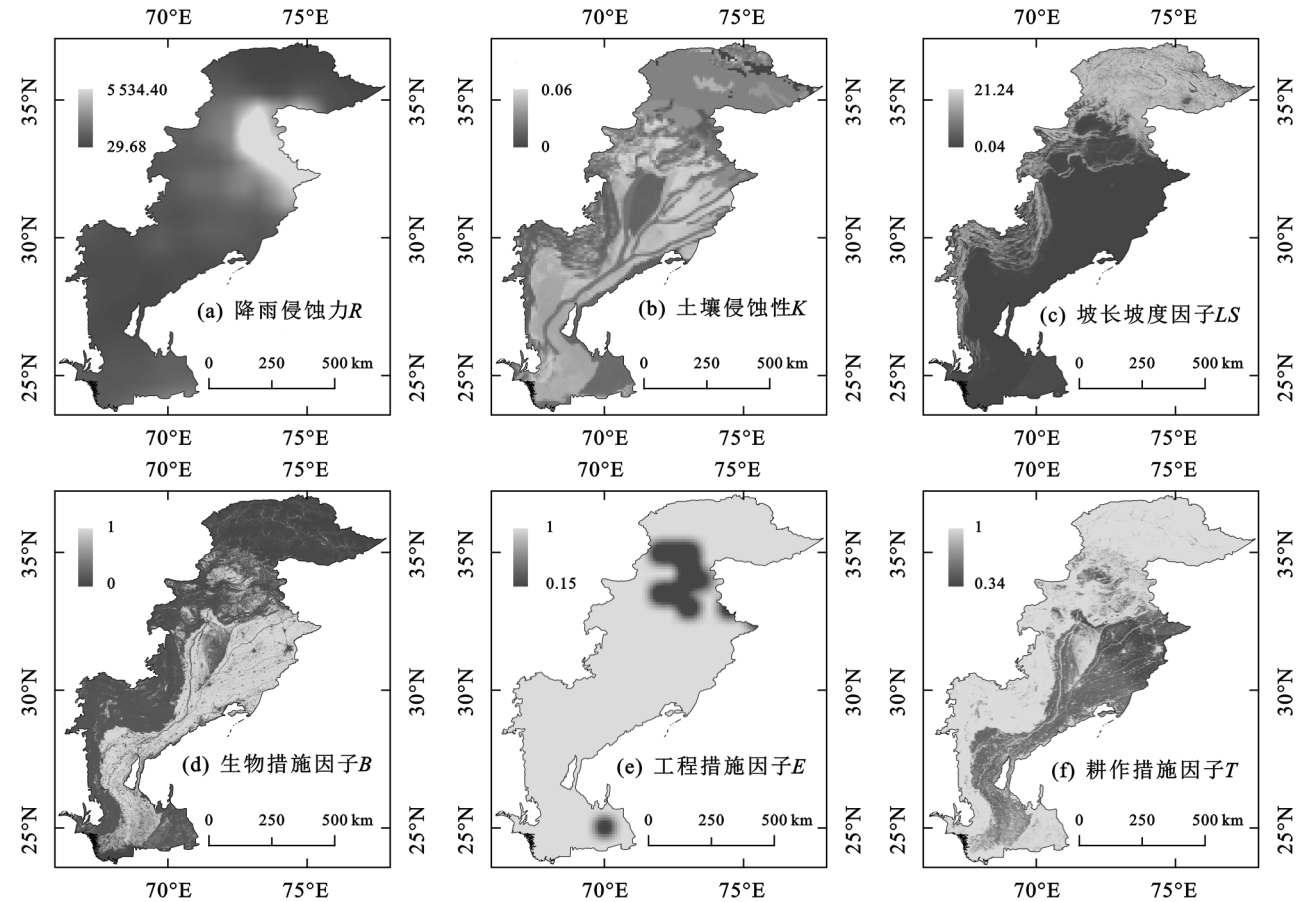


图 3 土壤侵蚀因子

2.2.3 T 因子计算 依据全球熟制图^[23] 和《水土流失普查技术规定》(2017 年 9 月)^[21],在 ArcGIS 中对具有不同耕作措施类型的区域进行相应的赋值,得到 30 m 分辨率 T 因子图层(图 3f)。

表 3 非农业用地 B 因子值

IGBP 代码	土地利用类型	MIN _b —MAX _b
0	水体	0
1	常绿针叶林	0.0001~0.003
2	常绿阔叶林	
3	落叶针叶林	
4	落叶阔叶林	
5	混交林	0.01~0.15
6	郁闭灌丛	
7	稀疏灌丛	
8	多树草原	
9	稀树草原	0
10	草原	
11	永久湿地	
13	城市与建筑群	
15	冰原雪地	

2.2.4 抽样单元土壤侵蚀速率计算 基于解译的抽样单元信息,使用 CSLE 模型计算每个抽样单元各土地利用类型的土壤侵蚀速率^[8],得到以各抽样单元为边界的 5 m 分辨率的土壤侵蚀速率图。

2.3 土壤侵蚀制图方法

2.3.1 空间插值法 基于 475 个抽样单元计算的土壤水蚀速率图,统计各个抽样单元各类土地利用的土壤侵蚀速率均值,利用 ArcGIS 的地统计插值工具,以 R 、 LS 、 B 因子为协变量,按照耕地、林地、灌木、草地等土地利用类型分别对抽样单元进行协同克里金插值,将湿地、水系、苔原、冰原等地类赋值为 0,再将各插值图层按照 GLC30 的利用类型合并,得到完整的巴基斯坦水蚀区 30 m 分辨率土壤水蚀速率图。

2.3.2 地图代数法 对于巴基斯坦水蚀区,将预处理后的土壤侵蚀因子图层整体相乘,得到水蚀区 30 m 分辨率的土壤侵蚀速率图。对于风蚀区,以水利部 SL 190—2007 标准中对风蚀区的定义为划分依据,根据降雨数据划分出风蚀区,再使用植被覆盖度数据对风蚀等级进行定性分级,制作风蚀区 30 m 分辨率土壤侵蚀等级图。

2.3.3 直方图匹配 使用地图代数法和空间插值法制作的土壤侵蚀速率图各有优缺点^[8]。空间插值法具有整体统计特征准确性,地图代数法具有良好的局地变异特征;为了发挥其各自的优点,尝试以空间插值土壤侵蚀图像元值为参照,对地图代数土壤侵蚀图进行直方图匹配,得到新的土壤侵蚀速率图。

2.4 主控因子分析

考虑到 CSLE 模型计算得到的土壤侵蚀图与 R 、 K 、 LS 、 B 等因子均有联系,因而在土壤侵蚀速率制图的基础上,用分类决策树探究土壤侵蚀速率与各土壤侵蚀因子 R 、 K 、 LS 、 B 之间的关系,理解土壤侵蚀的主控因子。本文使用 R 中的 *party* 包,基于 *ctree* 函数对侵蚀因子图层 R 、 K 、 LS 、 B 进行模型拟合,然后提取各个节点 *nodes* 的信息,得到分类树。在此基础上,获取每个节点的信息,并将其以栅格形式可视化。

3 结果与分析

3.1 土壤侵蚀因子分析

就各个因子看, R 因子(图 3a)在空间上呈现从北到南先增大后减小的趋势,这种格局主要受降水量的影响; K 因子(图 3b)表现出与土地利用相关的空间分布格局,高值区域与耕地相对应,低值区域主要与草地、林地等区域对应; LS 因子(图 3c)总体呈现从东北向西南值逐渐减小的规律,这是因为北部和西部地形崎岖、起伏度大,而中部和南部是广阔的平原; B 因子(图 3d)值与植被类型及覆盖度有关,所以从空间格局上由北向南,按照林地区、草地区、耕地区依次增大; E 和 T 图层(图 3e 和图 3f)是根据抽样单元解译数据和全球熟制图制作的,在中东部平原地区较小,其余区域均较大。

3.2 制图方法的对比

3.2.1 基于空间插值和地图代数 2 种方法的结果对比分析 空间插值法和地图代数法得到的水蚀区土壤侵蚀图见图 4a 和图 4b。从宏观的空间分布方面来看,2 种方法所得土壤侵蚀高值均主要集中于巴基斯坦北部高山区南面的波特瓦尔高地,北部山区土壤侵蚀速率也较高,而中东部地区和南部沿海区侵蚀相对较小。造成这样分布的原因是波特瓦尔高地地形起伏大的同时降雨量也大,加剧土壤的侵蚀^[14]。北部山区地形起伏大,植被多为稀疏灌木和草原,土壤侵蚀也相对较高。东北部克什米尔地区多为裸岩、冰川冻土等,所以土壤侵蚀处于较低水平。中东部地区和南部沿海区是巴基斯坦主要的农业耕作区,地势平坦,作物覆盖对土壤有一定的保护作用。

从图面细节纹理或土壤侵蚀的局地变异特征看,空间插值法计算的结果较为平滑,部分地区有成片聚集或成层分布的格局,更多地表达土壤侵蚀的宏观和趋势性分布,土壤侵蚀速率在 $100\sim2\,500\text{ t}/(\text{km}^2\cdot\text{a})$ 的分布较为集中。空间插值法是以高分辨率抽样解译结果(土地利用和水土保持措施)和高分辨率的抽样单元土壤侵蚀速率图的统计计算为基础,比较真实地表达土壤侵蚀速率的趋势。地图代数法计算的土壤侵蚀速率图,在宏观趋势上与空间插值图一致,但细节纹理更为自然和丰富,在土壤侵蚀速率比较弱的西部,表现出比较好的纹理特征,因此总体上看能较好地表达局地变异。但是由于计算的分辨率较低,对水土保持措施考虑不够完全,因此在一定程度上会低估土壤侵蚀速率,以至于当分辨率粗到一定程度时(如 250 m)其结果更趋向为一种潜在的土壤侵蚀^[7]。

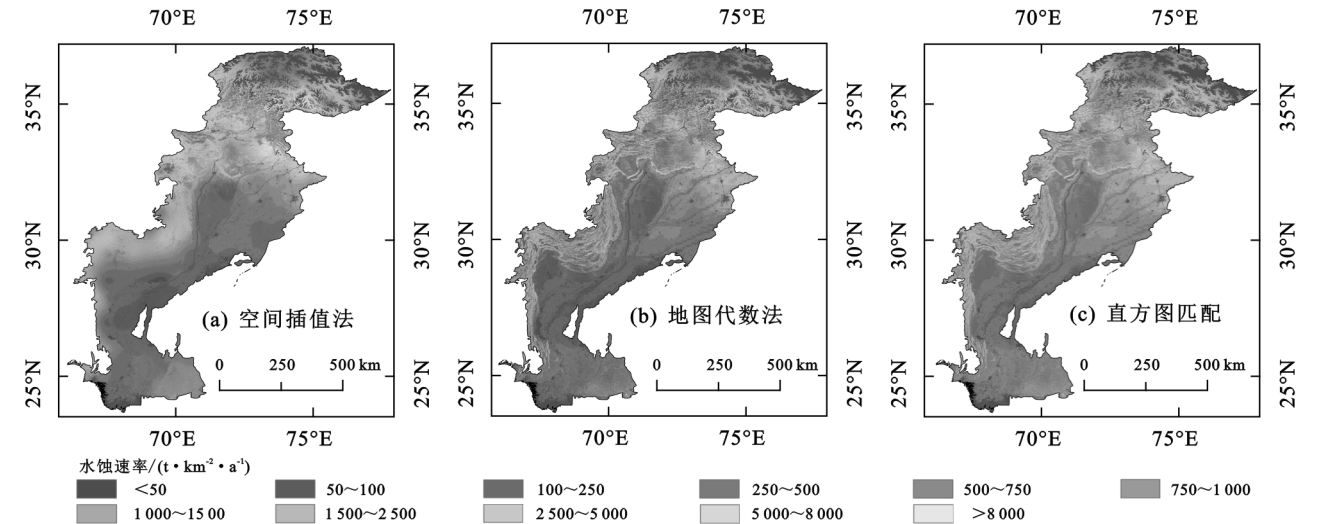


图 4 巴基斯坦水蚀区土壤侵蚀速率

对比 2 种方法计算的土壤水蚀速率的基本统计信息(表 4)表明,2 种方法的均值近似相等,2 种方法计算研究区土壤侵蚀的平均水平一致。但地图代数

法的值域和标准差是空间插值法的 2 倍左右,说明地图代数法计算的结果局地变异特征明显。

3.2.2 直方图匹配及其效果 以空间插值土壤侵蚀

图的像元值作为参照,对地图代数土壤侵蚀图经直方图匹配后的结果(图 4c)表明,土壤侵蚀的空间结构得到改善,与直接插值结果相比局地变异得到更好表达;统计分布方面,均值为 972.9 t/(km² · a),说明基本统计特征得到保持;直方图相似度指数(匹配结果与直接插值结果)为 0.87,效果比较理想。

表 4 2 种方法计算巴基斯坦水蚀区水蚀速率统计结果比较

单位:t/(km ² · a)			
计算方法	值域	平均值	标准差
空间插值图	0~10203	951.1	1461.2
地图代数图	0~24382	966.1	2473.4

从土壤侵蚀速率累计频率曲线(图 5)可以看出,在侵蚀速率<2 200 t/(km² · a)时,空间插值累计频率曲线始终低于地图代数,但是在>2 200 t/(km² · a)范围以后,空间插值累计频率曲线呈现出高于地图代数的趋势。这是因为地图代数法计算土壤侵蚀速率值离散程度大,而空间插值更多反映土壤侵蚀值的集中趋势。直方图匹配后,累计频率曲线与空间插值的频率曲线基本重合。

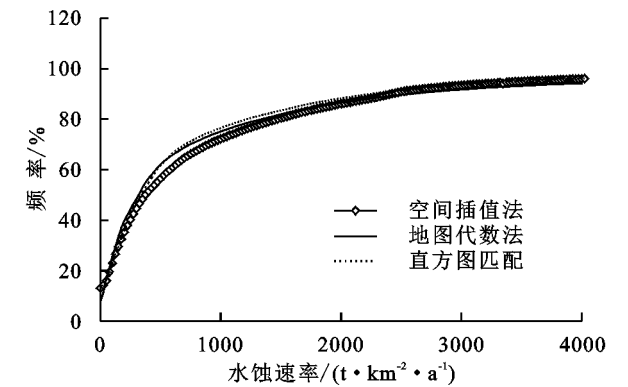


图 5 3 种方法土壤侵蚀速率累计频率曲线对比

3.3 土壤侵蚀特征分析

3.3.1 水蚀特征分析 从宏观的空间分布格局来看,波特瓦尔高地与北部山区土壤侵蚀较为严重,中东部和南部沿海农业耕作区土壤侵蚀状况较轻。统计分布表明,水蚀区 29.4%的水蚀速率在 200 t/(km² · a)以下,49.4%的水蚀速率在 500 t/(km² · a)以下,73.1%的水蚀速率在 1 000 t/(km² · a)以下,90.5%的水蚀速率在 2 500 t/(km² · a)以下,水蚀区平均土壤侵蚀速率为 972.9 t/(km² · a),说明研究区土壤侵蚀比较严重。

统计各土地利用类型的年平均土壤侵蚀模数(表 5)表明,灌木的年平均土壤侵蚀速率最大为 1 934.6 t/(km² · a),耕地和草地次之,林地的年平均土壤侵蚀速率最小。这是因为巴基斯坦具有很大面积比重的稀疏草地,植被稀少,地表裸露,主要分布在北部高山区,高起伏度和低覆盖度使得灌木林土壤侵蚀速率高;农业耕作区由于采取了一定的水保措施,所以土

壤侵蚀状况有一定的改善,参照中国水利部颁发的《土壤侵蚀分类分级标准(SL 190—2007)》^[15](表 6)可知,总体处于轻度侵蚀等级。综合来看,耕地、草地是影响巴基斯坦土壤侵蚀的主要土地利用类型。

表 5 各土地利用类型土壤侵蚀平均速率

土地利用类型	土壤侵蚀速率/(t · km ⁻² · a ⁻¹)	面积比/%
耕地	1180.4	33.6
林地	235.5	4.8
草地	1124.5	46.8
灌木林	1934.6	2.0

表 6 水蚀强度分级

级别	对应侵蚀速率/(t · km ⁻² · a ⁻¹)
微度侵蚀	<200
轻度侵蚀	200~2500
中度侵蚀	2500~5000
强烈侵蚀	5000~8000
极强烈侵蚀	8000~15000
剧烈侵蚀	>15000

3.3.2 风蚀区侵蚀强度分级分析 基于中国水利部颁发的《土壤侵蚀分类分级标准(SL 190—2007)》^[15]对巴基斯坦风蚀区土壤侵蚀等级评价结果(图 6)表明,巴基斯坦的风蚀以剧烈和极强烈风蚀为主,占风蚀地区面积比例分别为 44.40%和 52.60%,有少量强烈和中度风蚀,其面积占比分别为 2.98%和 0.02%。根据丁思洋等^[24]对中巴经济走廊生态评价的研究,巴基斯坦西南部和中东部的沙漠地区缺水严重、植被覆盖度低、土地退化严重等问题并存,是生态评价质量差的区域。

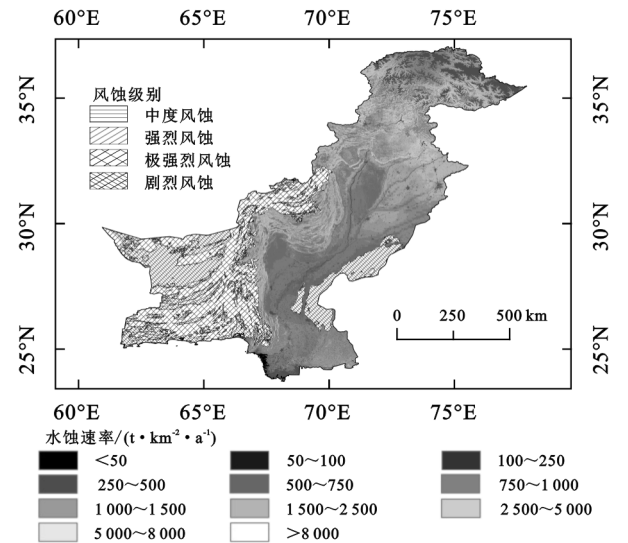


图 6 巴基斯坦土壤侵蚀(水蚀和风蚀)

3.4 土壤水蚀的主控因子分析

分类决策树状图(图 7)直观地表明各因子之间相互作用的重要性和下降趋势,终端节点层的线箱图显示其相互作用对估算的土壤侵蚀的影响,所映射的每个像元值归因于分类决策树分析中获得的最频繁

的节点类。由图 7 可知,影响巴基斯坦水蚀区土壤侵蚀第一主控因子是 *B*,其次是 *LS* 因子和 *R* 因子。结合因子节点可视化图(30 m 分辨率)(图 8)以及水蚀区 30 m 土地利用图(图 9)可知,节点 4,5,7,8 为林草覆盖区,主

要受 *B* 因子(生物措施)影响,节点 11,12 为耕作区,主要受 *R* 因子(降雨侵蚀力)影响,节点 14,15 主要为北部山区的灌木林、草地区域,地面起伏度大,*LS* 因子(坡度坡长)起主要影响作用。

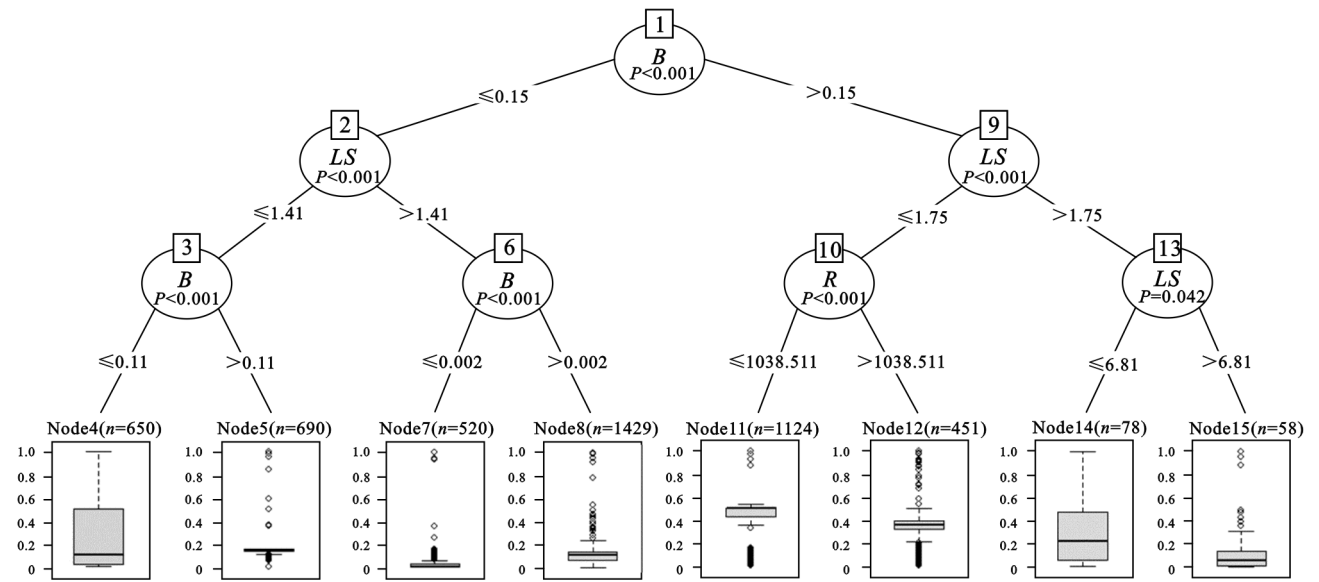


图 7 土壤侵蚀因子重要性分类决策树

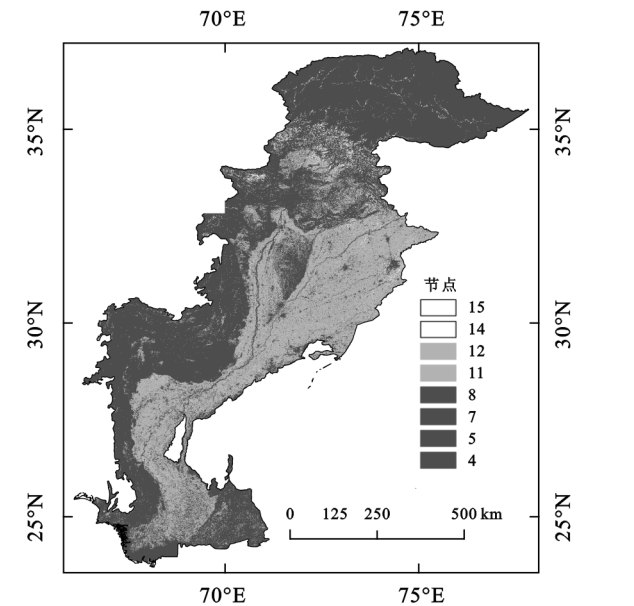


图 8 主控因子节点可视化图

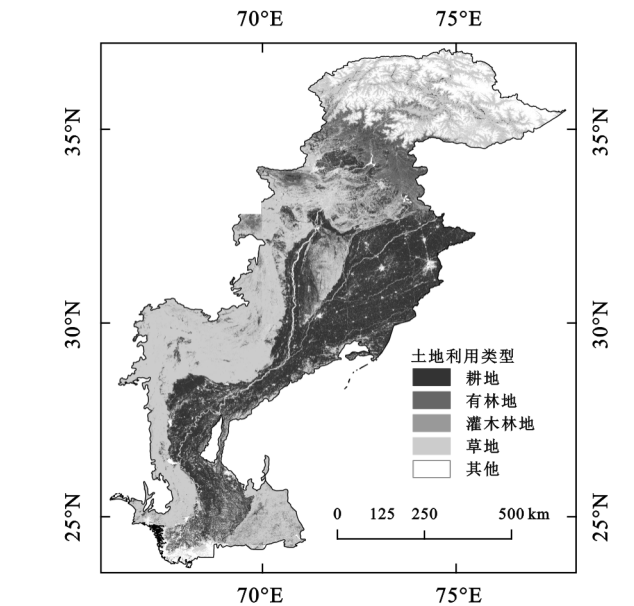


图 9 土地利用

4 讨论

4.1 区域土壤侵蚀制图方法

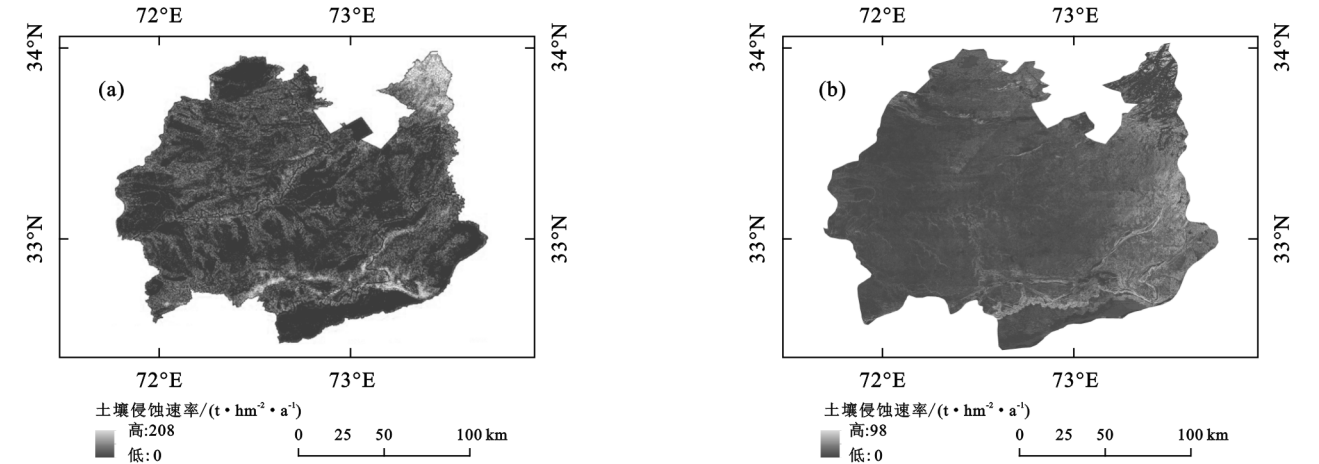
基于土壤侵蚀模型和 GIS 技术的区域土壤侵蚀图方法可归纳为地图代数法和空间插值法^[8]。多数学者^[7,25-26]使用地图代数法,即通过对土壤侵蚀因子图层整体相乘计算土壤侵蚀速率。该方法计算过程简单,结果可表达区域土壤侵蚀宏观格局及局地变异特征,但由于通常所用分辨率(100~1 000 m)与水土保持措施的尺度(1~10 m)不相匹配,以致于对水保措施的考虑不够,结果更多的表达潜在土壤侵蚀^[7,26]。空间插值法计算的基础是抽样单元的土壤侵蚀速率,结果基本可如

实表达土壤侵蚀的实际情况^[6,27]。但在由点成面的过程中,由于单元尺度上的聚合(均值计算)和插值中对一些离群值的剔除,使结果比较光滑,局地变异表达不够理想且出现分层聚集的现象。两者差异的主要原因是尺度问题,所以将其结合是可能的,能在保留地图代数法局地变异特征的基础上,改善其因低分辨率引起的数据精度低的问题。本研究采用直方图匹配方法,以空间插值土壤侵蚀图的像元值为参照,对地图代数土壤侵蚀图进行直方图匹配,结果的空间结构得以改善,局地变异表达增强。后期还可探讨基于机器学习的空间预测方法^[28-29]。

4.2 巴基斯坦土壤侵蚀相关研究的对比

目前,已有的对巴基斯坦的土壤侵蚀研究,主要是以RUSLE等模型对小流域进行时空变化分析^[11-13],这些研究可作为验证本研究计算结果的论证参照。将波特瓦尔地区土壤侵蚀图^[11]进行地理配准(图10a),与本研究的结果(30 m分辨率)(图10b)比较表明,从土壤侵蚀的宏观格局来看2幅图的趋势相似。从土壤侵蚀平均速率看,Saleem等^[11]计算结果和本研究的结果分别为1 910 t/(km²·a)和1 638 t/(km²·a)。对比Saleem

等^[11]与本研究土壤侵蚀的分级表(表7)可以发现,Saleem等^[11]认为,波特瓦尔地区69.25%的面积侵蚀速率≤200 t/(km²·a),但是根据陈同德等^[14]对巴基斯坦波特瓦尔高地的实地调查(表8),Saleem等^[11]的结果偏低,主要原因可能是低估了降雨侵蚀力因子。实地调查的15个小流域中60%的平均土壤侵蚀速率在500~2 000 t/(km²·a),这与本研究计算的500~2 000 t/(km²·a)侵蚀区间占比42%结果近似,显然本研究计算结果与实地调查更为相符。



注:(a)为已有波特瓦尔土壤侵蚀对比;(b)为本研究的土壤侵蚀。

图10 波特瓦尔土壤侵蚀对比

表7 波特瓦尔地区土壤侵蚀分级对比

土壤侵蚀分级/ (t km ⁻² · a ⁻¹)	Saleem 等 ^[11] 研究面积占比/%	本研究面积 占比/%
0~200	69.25	14.70
200~500	15.35	17.83
500~2000	13.34	42.37
>2000	2.06	25.10

表8 波特瓦尔高地实地调查单元

调查单元 编号	土壤侵蚀速率/ (t · km ⁻² · a ⁻¹)	调查单元 编号	土壤侵蚀速率/ (t · km ⁻² · a ⁻¹)
1	150.86	9	577.45
2	419.08	10	186.22
3	477.36	11	555.37
4	760.21	12	51.40
5	853.01	13	1338.91
6	1164.44	14	1107.02
7	1117.13	15	716.35
8	476.13		

4.3 关于巴基斯坦的土壤侵蚀治理

(1)土壤侵蚀量的大致估算:根据水蚀区各像元的水蚀速率大致估算水蚀区土壤侵蚀量,根据风蚀区定性分级对应区域的土壤侵蚀速率中值大致估算风蚀区土壤侵蚀量。经估算可知,水蚀区土壤侵蚀量约为6×10⁸ t/a,风蚀区约为3.4×10⁹ t/a,总量约为4×10⁹ t/a。风蚀区受到数据资料的限制,仅进行定

性评价,水蚀和风蚀的交互作用尚待进一步研究。

(2)土壤侵蚀的热点地区:①波特瓦尔高地及附近山区,由于其地势崎岖,降雨强度大,加上人为活动影响,使得该地区成为巴基斯坦水蚀区土壤侵蚀最严重地区;②西南部广阔的戈壁和东南部塔尔沙漠常年干旱,年降水量多为150 mm以下,且缺乏有效的治理,使得该地区成为巴基斯坦风蚀区土壤侵蚀极严重地区。

(3)治理建议:①对于旁遮普省和信德省的农业区,加大水保措施的建设以降低大范围的灌溉对土壤的损害;②对于非农业区,加大植树造林的力度,严禁人为活动对植被的破坏;③波特瓦尔高地及北部山区降雨强度大,应加强对降水径流的及时疏导,种植固土能力强的植物。

5 结论

(1)空间插值法和地图代数法制图均可以从宏观格局上反映巴基斯坦水蚀区的土壤水蚀速率分布情况,直方图匹配制图兼具2种方法的优点。由于抽样单元计算数据为真实的土壤水蚀速率,应优先选择空间插值法或直方图匹配进行制图。

(2)巴基斯坦风蚀区以剧烈侵蚀和极强烈侵蚀为主,水蚀区土壤水蚀速率平均值为972.9 t/(km²·a),土壤侵蚀比较严重,且地区差异明显,需要制定长期计划因地制宜。

(3)土地利用类型对应不同的主控因子,林草区、

耕地区、山区的主控因子分别为生物措施、降雨侵蚀力、坡度坡长因子;影响水蚀区林草覆盖地区土壤侵蚀的最重要因子为生物措施因子,植被对土壤具有极强的保护能力。

参考文献:

- [1] Berthelin J, Valentin C, Munch J C. Soils as a key component of the critical zone 1: Functions and services[M]. USA: John Wiley & Sons Inc., 2018.
- [2] Food and Agriculture Organization of the United Nations. Soil erosion: The greatest challenge for sustainable soil management[M/OL]. Rome. Licence: CC BY-NC-SA 3.0 IGO, 2019.
- [3] Food and Agriculture Organization of the United Nations. Outcome document of the global symposium on soil erosion[M/OL]. Rome. Licence: CC BY-NC-SA 3.0 IGO, 2019.
- [4] 杨勤科.区域水土流失监测与评价[M].郑州:黄河水利出版社, 2015.
- [5] Panagos P, Borrelli P, Poesen J, et al. The new assessment of soil loss by water erosion in Europe[J]. Environmental Science and Policy, 2015, 54: 438-447.
- [6] 刘宝元, 郭索彦, 李智广, 等. 中国水力侵蚀抽样调查[J]. 中国水土保持, 2013(10): 26-34.
- [7] Borrelli P, Robinson D A, Fleischer L R, et al. An assessment of the global impact of 21st century land use change on soil erosion [J]. Nature Communications, 2017, 8(1): 1-13.
- [8] 杜朝正, 杨勤科, 王春梅, 等. 基于 CSLE 模型的全球抽样单元土壤水蚀速率计算方法初探[J]. 土壤通报, 2020, 51(1): 50-57.
- [9] 郝姗姗, 李梦华, 马永强, 等. 黄土丘陵区土壤侵蚀因子敏感性分析[J]. 中国水土保持科学, 2019, 17(2): 77-86.
- [10] 张康生. 巴基斯坦的自然环境及存在问题[J]. 环境科学进展, 1997, 5(6): 66-72.
- [11] Saleem U, Amjad A, Muhammad I, et al. Geospatial assessment of soil erosion intensity and sediment yield: A case study of Potohar Region, Pakistan[J]. Environmental Earth Sciences, 2018, 77(19): 1-13.
- [12] Abuzar M K, Shakir U, Ashraf M A, et al. GIS based risk modeling of soil erosion under different scenarios of land use change in Simly watershed of Pakistan[J]. Journal of Himalayan Earth Science, 2018, 51(2): 132-143.
- [13] Arshad A, Muhammad K A, Bashir A, et al. Modeling risk of soil erosion in high and medium rainfall zones of Pothwar Region, Pakistan[J]. Proceedings of the Pakistan Academy of Sciences: B. Life and Environmental Sciences, 2017, 54(2): 67-77.
- [14] 陈同德, 朱梦阳, 焦菊英, 等. 巴基斯坦波特瓦尔高原土壤侵蚀调查报告[J]. 水土保持通报, 2019, 39(3): 297-306.
- [15] 中华人民共和国水利部水土保持司. 土壤侵蚀分类分级标准(SL 190—2007)[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2008.
- [16] Shah Z U H, Arshad M. Land degradation in Pakistan: A serious threat to environments and economic sustainability [EB/OL]. (2007-05-27). <https://ecoweb.com/edi/060715.html>.
- [17] 朱梦阳, 杨勤科, 王春梅, 等. 区域土壤侵蚀遥感抽样调查方法[J]. 水土保持学报, 2019, 33(5): 64-71.
- [18] 殷水清, 薛筱婵, 岳天雨, 等. 中国降雨侵蚀力的时空分布及重现期研究[J]. 农业工程学报, 2019, 35(9): 105-113.
- [19] 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, 79.
- [20] 杨勤科, 郭明航, 李智广, 等. 全国土壤侵蚀地形因子提取与初步分析[J]. 中国水土保持, 2013(10): 17-21.
- [21] 水利部水土保持监测中心. 水土流失普查技术规定[M]. 北京: 水利部, 2017.
- [22] John T. User guide for the MODIS vegetation continuous fields product collection[M]. Version 1. University of Maryland, College Park; USA, 2017.
- [23] Fischer G, Velthuisen V H, Shah M. Global agro-ecological assessment for agriculture in the 21st century: Methodology and results[M]. Laxenburg: International Institute for Applied Systems Analysis, 2002.
- [24] 丁思洋, 朱文泉, 江源, 等. 基于 RS 与 GIS 的中巴经济走廊生态现状评价[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2017, 53(3): 358-365.
- [25] 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.
- [26] Teng H F, Hu J, Zhou Y, et al. Modelling and mapping soil erosion potential in China[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2019, 18(2): 251-264.
- [27] Yin S Q, Zhu Z Y, Wang L, et al. Regional soil erosion assessment based on a sample survey and geostatistics[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2018, 22(3): 1695-1712.
- [28] Hengl T, Mendes D J J, Heuvelink G B M, et al. Soil Grids 250 m: Global gridded soil information based on machine learning[J]. PLoS One, 2017, 12(2): e0169748.
- [29] Amanda R, Tomislav H, Travis N, et al. Soil property and class maps of the conterminous United States at 100-meter spatial resolution[J]. Soil Science Society of America Journal, 2018, 82(1): 186-201.