

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2024.03.017.

蒙雯洋, 饶良懿. 砒砂岩覆土区典型小流域土壤可蚀性 K 值空间变异特征[J]. 水土保持研究, 2024, 31(3):10-19.

Meng Wenyang, Rao Liangyi. Spatial Variability of Soil Erodibility Factor K of the Typical Small Watershed in the Soil Covered Area of Pisha Sandstone Region[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(3):10-19.

砒砂岩覆土区典型小流域土壤可蚀性 K 值 空间变异特征

蒙雯洋^{1,2}, 饶良懿^{1,2}

(1.北京林业大学 水土保持学院, 北京 100083; 2.水土保持国家林业和草原局重点实验室, 北京 100083)

摘要: [目的]研究砒砂岩覆土区典型小流域土壤可蚀性的空间变异特征,为砒砂岩覆土区土壤侵蚀机理深入探究和土壤侵蚀有效防治提供科学依据。[方法]以内蒙古准格尔旗砒砂岩覆土区二老虎沟小流域为研究对象,采集 0—10 cm 和 10—20 cm 土层共 144 份土壤样品,基于 EPIC 模型估算土壤可蚀性 K 值,并利用 GIS 和地统计学方法分析土壤可蚀性 K 值空间变异特征。[结果](1) 二老虎沟小流域土壤砂粒、粉粒、黏粒和有机碳均呈中等变异程度,除黏粒和有机碳为中等空间自相关性外,其他土壤属性均呈弱空间自相关性。(2) 小流域土壤可蚀性 K 值介于 0.018 7~0.047 6 $t \cdot hm^2 \cdot h / (hm^2 \cdot MJ \cdot mm)$, 0—10 cm 和 10—20 cm 土层 K 值变异系数分别为 15.5% 和 20.3%, 属中等变异强度; 0—10 cm 土层 K 值主要受随机性因素影响,呈弱空间自相关性,而 10—20 cm 土层受随机性因素和结构性因素共同影响,为中等空间自相关性。(3) 3 种克里格插值方法结果表明:小流域土壤可蚀性 K 值空间变异受海拔和坡度影响明显,其总体分布趋势为西部和东南部较高、中部及偏东部较低;普通克里格插值方法较适宜应用于砒砂岩覆土区小流域,其估算结果可较好地显示土壤可蚀性的整体和局部两方面的空间变异特征。(4) 在垂直空间变异上, 0—10 cm 和 10—20 cm 土层土壤可蚀性 K 值总体分布规律相似,但 10—20 cm 土层土壤可蚀性 K 值较 0—10 cm 土层空间变异更为明显。[结论]海拔和坡度对砒砂岩覆土区典型小流域土壤可蚀性 K 值空间变异影响明显,未来应优先对坡面和坡顶区域进行土壤侵蚀防治。

关键词: 土壤可蚀性 K 值; EPIC 模型; 空间变异特征; 砒砂岩覆土区; 小流域

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2024)03-0010-10

Spatial Variability of Soil Erodibility Factor K of the Typical Small Watershed in the Soil Covered Area of Pisha Sandstone Region

Meng Wenyang^{1,2}, Rao Liangyi^{1,2}

(1.School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;

2.Key Laboratory of State Forestry and Grassland Administration on Soil and Water Conservation, Beijing 100083, China)

Abstract: [Objective] The spatial variability of soil erodibility of the typical small watershed in the soil covered area of Pisha sandstone region were explored, and to provide scientific basis for further exploring the mechanism of soil erosion and effectively preventing soil erosion in the soil covered area of Pisha sandstone region. [Methods] Erlaohugou small watershed in the soil covered area of Pisha sandstone region was taking as the study area. 144 soil soil samples from 0—10 cm and 10—20 cm soil layers were collected. The EPIC model was used to calculate the soil erodibility K value, and the methods of GIS and geostatistics was used to analyze the spatial variability of soil erodibility K value. [Results] (1) The variation coefficients of sand, silt, clay and soil organic carbon were moderate variability in small watershed. Except for the clay and soil organic carbon possessed by moderate spatial correlation, other soil properties had weak spatial correlation.

收稿日期: 2023-05-09

修回日期: 2023-07-11

资助项目: 北京市科技新星计划(2006A22); 国家重点研发计划“砒砂岩区复合土壤侵蚀综合治理技术”(2017YFC0504503)

第一作者: 蒙雯洋(1996—), 女, 重庆人, 硕士, 研究方向: 流域自然地理过程。E-mail: 1061234065@qq.com

通信作者: 饶良懿(1976—), 女, 福建建瓯人, 教授, 博导, 研究方向: 水土保持, 生态系统修复与管理。E-mail: raoliangyi@bjfu.edu.cn

<http://stbcj.paperonce.org>

(2) The range of soil erodibility K value was $0.018\ 7\sim 0.047\ 6\ \text{t}\cdot\text{hm}^2\cdot\text{h}/(\text{hm}^2\cdot\text{MJ}\cdot\text{mm})$, and the variation coefficients of K value in 0—10 cm and 10—20 cm soil layers were 15.5% and 20.3%, respectively, which belonged to moderate variability. The K value in 0—10 cm soil layer affected by random factor was weak spatial correlation, yet the K value in 10—20 cm soil layer was moderate spatial correlation and influenced by random and structural factors. (3) The result of three Kriging methods showed the spatial variability of soil erodibility K value was significantly affected by elevation and slope, and spatial distribution exhibited a trend that the high K value was located in the west and southeast, and the low stand in central and east-central area. Compared with other Kriging methods, the Ordinary Kriging was more suitable for the Pisha sandstone region as a result of the better reflection of spatial variability from whole and partial. (4) In vertical spatial distribution, the soil erodibility K value belonging to different soil layers had similar distribution trend, but the spatial variability of K value in 10—20 cm soil layer was more obvious than that in 0—10 cm soil layer. [Conclusion] The elevation and slope affect the spatial variability of soil erodibility K value significantly, and the priority area for prevention and control is slope surface and top of slope in the future.

Keywords: K value of soil erodibility; EPIC model; spatial variability; soil cover area of Pisha sandstone region; small watershed

土壤侵蚀主要受降雨侵蚀力、土壤可蚀性、植被覆盖状况、坡长和坡度等因素影响,其中土壤可蚀性是表征土壤本身抗蚀抗冲能力的一个重要指标,即侵蚀内营力,国际上常用 K 值来衡量^[1]。土壤可蚀性 K 值大小常用来表示土壤侵蚀发生的难易程度,其研究对土壤侵蚀机理探究和土壤侵蚀量估算等具有重要意义^[2]。土壤可蚀性 K 值的估算方法主要包括实测法、诺谟图法和公式法等,公式法克服实测法测定时间长和诺谟图法准确度低的缺点得到了广泛的运用,其中 EPIC(Erosion Productivity Impact Calculator)模型在我国得到广泛应用。

土壤可蚀性 K 值受母质、地形、气候、植被等自然因素及耕作、施肥等人类活动的影响,在时空分布上具有明显的变异特征^[3]。了解其空间变异特征对土壤侵蚀量化研究和制定水土保持措施具有重要共同意义。目前,我国土壤可蚀性 K 值及其空间变异特征研究取得显著进展。例如在大、中尺度上,梁音等^[1]基于第二次土壤普查资料采用土壤可蚀性方法计算 K 值,并通过面积进行加权平均探究东部丘陵区土壤可蚀性 K 值图及分布规律;张科利等^[4]通过东北黑土区、北方土石山区、黄土高原地区、西南石质山区和南方红壤丘陵区野外观测资料获取土壤可蚀性实测 K 值,并与土壤可蚀性估算模型获取的估算值对比,提出中国土壤可蚀性 K 值变化规律;宋春风等^[5]通过 EPIC 模型和面积加权的方法求得土壤可蚀性 K 值,并探讨长江上游土壤可蚀性空间分布特征;朱明勇等^[6]采用模型模拟和空间插值的方法揭示南水北调中线工程水源地丹江口水库区的土壤可蚀性及分布特征;李季孝等^[7]基于云南省 274 个土壤剖

面资料,采用模型计算和 GIS 空间分析的方法揭示云南省土壤可蚀性 K 值及空间分布特征;荆莎莎等^[8]基于地统计学原理为指导,以蒙阴县和沂水县为研究区域探讨北方土石山区典型县土壤可蚀性空间分布特征;李子君等^[3]利用 GIS 空间分析和统计功能,探讨北方土石山区的沂河流域土壤可蚀性空间分布特征;曹祥会等^[2]和管飞等^[9]基于区域土壤资料,采用地统计学及相关方法分析河北省和江淮丘陵区土壤可蚀性 K 值及空间分布特征;岑奕等^[10]和高家勇等^[11]均采用 EPIC 模型估算 K 值,分别揭示华中地区和喀斯特地区贵州省的土壤可蚀性 K 值分布特征。此外在小流域尺度上土壤可蚀性 K 值也取得一系列研究成果,例如湖北丹江口水库库区五龙池小流域^[12]、低山丘陵区女儿寨小流域^[13]、西南石质山区尖山河小流域^[14]和陕西省丹江源区鹦鹉沟小流域等^[15]。总的来看,土壤可蚀性 K 值估算方法以 EPIC 模型为主,且主要通过插值方法获取 K 值空间分布图或分级图,开展土壤可蚀性与土地利用/植被覆盖类型、海拔、坡度等因素的相关关系研究。此外,现有土壤可蚀性 K 值相关研究相对偏少,尤其缺少采用多种插值方法对 K 值空间变异特征进行探究。

砒砂岩区集中分布于黄土高原北部晋陕蒙接壤的鄂尔多斯高原,地处生态环境自然要素过渡区,侵蚀—地貌—植被耦合时空分异性突出,多种侵蚀动力在时间和空间上交替叠加,极易受到侵蚀作用,是黄河中游粗泥沙来源的核心区^[16]。根据上覆土层类型的不同,砒砂岩区可分为砒砂岩覆土区、砒砂岩覆沙区和砒砂岩裸露区,其中砒砂岩覆土区占砒砂岩总面积的 50.6%^[17],为三者中最高。在相同土地利用方

式下,砒砂岩覆土区土层具备更高的土层储水量和有机碳含量,土壤保水能力较强,在一定程度上促进植被重建恢复工作开展。但与此同时,区域内坡度变化更大,地表破碎程度高,故砒砂岩覆土区土壤侵蚀研究与侵蚀治理工作更加复杂,是砒砂岩区进行复合土壤侵蚀规律探究和植被恢复重建的主要区域^[18]。近年来,砒砂岩开展的研究多集中在砒砂岩的理化属性和分布特征等岩性、侵蚀机理(水力、风力、重力和冻融及复合侵蚀等)、综合治理措施(沙棘柔性坝、鱼鳞坑、淤地坝等)以及岩石改性等方面^[18-20]。

鉴于研究区多动力复合土壤侵蚀机理,土壤可蚀性及其驱动因素并非简单的线性关系,而是驱动因子间复杂的交互叠加效应,这也进一步增加土壤可蚀性空间变异的复杂性。因此,研究砒砂岩覆土区小流域土壤可蚀性空间变异特征对于探讨该区土壤侵蚀机理具有重要意义。目前,虽然砒砂岩覆土区小流域土壤可蚀性 K 值的研究已经开展^[21],但基于地统计学方法,尤其是利用不同克里格插值方法分析土壤可蚀性 K 值空间变异特征未见研究和探讨。本文选取典型砒砂岩覆土区小流域调查单元—二老虎沟小流域为研究区域,采集 0—10 cm 和 10—20 cm 土层共 144 份土壤样品,基于 EPIC 模型估算土壤可蚀性 K 值,并利用 GIS 和地统计学方法进行描述性统计分析、半方差分析和克里格插值分析。应用普通克里格(Ordinary Kriging)、简单克里格(Simple Kriging)和指示克里格(Indicator Kriging)等 3 种插值方法,探讨砒砂岩覆土区小流域土壤可蚀性 K 值空间变异特征,旨在提升砒砂岩覆土区土壤侵蚀特征的清晰化认识。研究可为了解砒砂岩覆土区土壤侵蚀机理、制定合理有效的水土保持措施、促进区域生态修复提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

砒砂岩覆土区二老虎沟小流域位于内蒙古自治区准格尔旗境内(东经 $110^{\circ}32'$ — $111^{\circ}06'$,北纬 $39^{\circ}26'$ — $39^{\circ}56'$),属皇甫川流域的三级支流,如图 1 所示。二老虎沟小流域属温带大陆性气候区,多年平均气温 7.3°C ,多年平均降雨量为 350 mm,且降水年际变化大,夏季(7—9 月)降雨量占全年的 60%~70%。砒砂岩是由厚层砂岩、砂页岩和泥质砂岩等组成的岩石互层,岩性多为砂岩和泥岩,该类岩层结构强度低,抗侵蚀能力弱。小流域上覆黄土或浮沙,其质地属于砂土,土质疏松,土壤颗粒间孔隙大,保水性差且养分易淋失,进一步增强土壤对侵蚀的敏感度。二老虎沟小流域属覆土砒砂岩地貌^[16],区域内多为黄土丘陵沟

壑,沟壑密度达 $3\sim 6\text{ km}/\text{km}^2$,坡面存在裸露的基岩,且基岩裸露度超过 30%^[22],其砒砂岩包含紫红色、黄绿色和灰白色等诸多颜色,黄土覆盖较厚,数米到数十米不等,土壤侵蚀类型以水蚀为主,复合侵蚀严重^[16],是典型的砒砂岩覆土区小流域调查单元。研究区小流域内由于长期严重的水土流失,因此开展了相关综合治理措施,包括阳坡坡顶乔灌木相结合的种植措施,在坡面种植沙棘,沟底形成沙柳坝等。

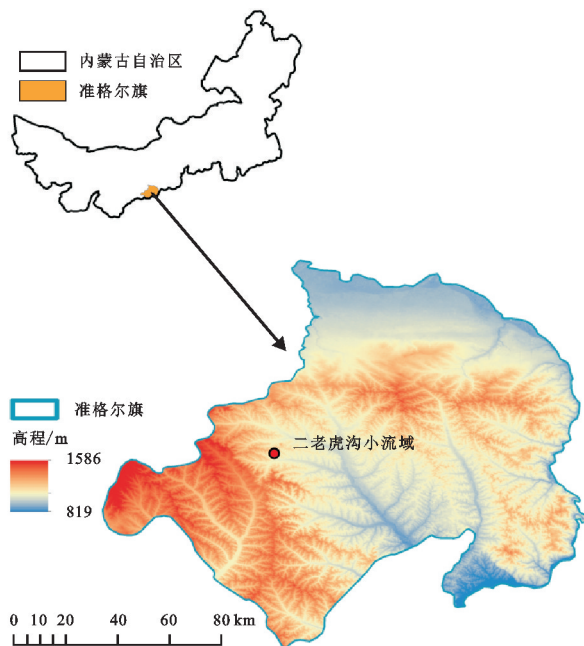


图 1 研究区位置示意图

Fig. 1 Location of the study area

1.2 研究方法

1.2.1 土壤样品采集 2018 年 5 月根据研究区域植被和地形条件调查,选取二老虎沟小流域具有代表性的覆土砒砂岩类型支沟,从沟口到沟头等距划分 8 个断面,而各断面分别选取不同坡位进行采样,其中 8 个断面包括沟头、下游和沟口各 2 个,上游和中游各 1 个,在每个断面上由阴坡顶至阳坡顶呈“U”型布设 9 个采样点,包括坡顶(阴/阳)、坡上(阴/阳)、坡中(阴/阳)、坡下(阴/阳)和沟底。在 72 个采样点上,每个采样点分别采集 0—10 cm 土层和 10—20 cm 土层的 500 g 混合土样,再将 144 份土样装入密封袋中带回实验室进行土壤性质测定。

1.2.2 土壤样品处理 将野外带回的土壤样品去除杂物,经风干、研磨和过筛后分别采用比重计法和重铬酸钾外加热法测定土壤机械组成和有机碳含量。土壤机械组成测定时,用量筒将处理好的土壤进行沉降,通过鲍式甲种比重计在不同时段测定数值,再通过换算得到砂粒(0.05~2.0 mm)、粉粒(0.002~0.05 mm)和黏粒(<0.002 mm)含量。

1.3 土壤可蚀性 K 值估算方法

关于土壤可蚀性估算的研究方法有很多,目前国内常用的具有代表性的公式主要包括 EPIC 模型、Shirazi 公式和 Torri.D 公式等。其中 EPIC 模型是用于确定土壤侵蚀与生产力关系的综合模型,虽然基于美国土壤条件开发形成,但模型提供了 4 种预测水蚀的公式以分析土壤侵蚀状况以及与影响因素的关系,结合 GIS 技术可将模型的应用范围扩展到不同区域尺度,加之其参数获取和计算过程较为简单,故在世界范围内得到了广泛的试验验证与应用,已成为世界上较有影响力的侵蚀研究模型之一。我国许多学者也通过该模型估算不同区域土壤可蚀性 K 值,特别是饶良懿等将不同模型进行对比发现 EPIC 模型在砒砂岩区具备较高适用性。虽然模型在实际应用中出现估值过高的问题,但模型估算值与实测值间存在良好线性关系^[4],保证了一定的精度,模型仍具备相当的参考价值,且国内多采用 EPIC 模型估算的土壤可蚀性 K 值为基准,基于此可以对照和验证研究结果。对于缺乏实测数据的砒砂岩覆土区二老虎沟小流域,考虑到研究区土壤理化属性资料这一条件有限,故采用 EPIC 模型中 K 值估算方法衡量土壤对侵蚀的敏感程度,计算公式如下:

$$K = \{0.2 + 0.3 \exp[-0.0256 S_d (1 - S_i / 100)]\} \times [S_i / (C_l + S_i)]^{0.3} \times \{1.0 - 0.25 C / [C + \exp(3.72 - 2.95 C)]\} \times \{1.0 - 0.7 SN / [SN + \exp(-5.51 + 22.9 SN)]\} \quad (1)$$

式中: S_d 为砂粒含量的百分比; S_i 为粉粒含量的百分比; C_l 为黏粒含量的百分比; C 是土壤有机碳的百分比, $SN = 1 - S_d / 100$ 。式中 K 值单位为美国制 $[t \cdot \text{hm}^2 \cdot \text{h} / (\text{hm}^2 \cdot \text{MJ} \cdot \text{mm}^2)]$, 将美制单位 K 值乘以 0.131 7 转化为国际制单位 $[t \cdot \text{hm}^2 \cdot \text{h} / (\text{hm}^2 \cdot \text{MJ} \cdot \text{mm}^2)]$, 本文 K 值均采用国际制单位。

1.4 数据分析和处理

使用 Excel 2019 进行数据处理和土壤可蚀性 K 值的计算; 采用 SPSS 24.0 对数据进行描述性统计分析和 K-S (Kolmogorov-Smirnov) 正态性检验; 利用软件 minitab 17.0 对非正态分布的土壤有机碳进行 Johnson 转换, 使土壤参数均符合正态分布 (显著水平均值 > 0.05); 通过 GS+9.0 建立半方差函数模型和确定半方差参数以分析土壤属性和 K 值空间分布特征和趋势; 利用 ArcGIS 10.2 的普通克里格 (Ordinary Kriging)、简单克里格 (Simple Kriging) 和指示克里格 (Indicator Kriging) 等 3 种克里格插值方法进行土壤可蚀性 K 值空间插值, 绘制 3 种不同插值方法下的土壤可蚀性 K 值空间变异图; 利用交叉验证法对 3 种克里格插值结果进行精度对比。

2 结果与分析

2.1 描述性统计分析

描述性统计分析可帮助了解与掌握土壤数据基本特征和结构, 进一步认识研究区土壤属性的整体脉络。其中变异系数的大小可描述土壤特性的变异程度, 当 CV (Coefficient of Variation) $< 10\%$ 时, 属于弱变异强度; 当 $10\% \leq CV \leq 100\%$ 时, 属于中等变异强度; 当 $CV > 100\%$ 时, 属于强变异强度^[9]。由表 1 可见, 砒砂岩覆土区二老虎沟小流域土壤砂粒含量最高, 远高于粉粒和黏粒, 且 10—20 cm 土层土壤机械组成变幅均高于 0—10 cm 土层; 相较于其他土壤属性, 土壤有机碳含量最低, 且其偏度较大, 表明数据分布的不对称程度较大, 且 10—20 cm 土层有机碳的不对称程度远高于 0—10 cm 土层。二老虎沟土壤各属性变幅、极差和标准差均表现为 10—20 cm 土层高于 0—10 cm 土层, 表明 10—20 cm 土层土壤属性在同一横面具有更大变化幅度。土壤砂粒、粉粒、黏粒和有机碳的 CV 均在 $10\% \sim 100\%$ 内, 为中等变异程度, 存在一定程度空间变异, 其中土壤有机碳的 CV 最高, 0—10 cm 和 10—20 cm 土层分别为 38% 和 51%, 而砂粒最低, 两层土层均低于 15%, 故研究区土壤砂粒分布广泛且较为均匀, 土壤有机碳含量低且分布最为不均。除砂粒外, 土壤各属性 CV 均表现为 10—20 cm 土层高于 0—10 cm 土层, 说明土壤机械组成和有机碳含量在 10—20 cm 土层空间变异更强, 较 0—10 cm 土层不稳定性更显著。

根据式 (1) 的 EPIC 模型估算方法得到二老虎沟土壤可蚀性 K 值, 估算结果为 0.018 7~0.047 6, 最大值约为最小值的 2.5 倍, 数值变幅较大; 0—10 cm 和 10—20 cm 土层 K 值均值与中位数存在一定差异, 表明 K 值分布存在差异; K 值 CV 位于 $10\% \sim 100\%$ 这一范围, 两层土层 K 值均属中等变异程度。以上均表明砒砂岩覆土区二老虎沟小流域土壤可蚀性 K 值在空间上存在一定程度的变异性, 且对于不同深度土壤可蚀性 K 值, 10—20 cm 土层 K 值极差、标准差和 CV 数值相对较高, 初步表明土壤可蚀性 K 值在 10—20 cm 土层空间变异更强, 分布更加不稳定。

2.2 半方差函数分析

半方差函数分析在样本数据正态分布这一基础上对土壤空间变异的随机性和结构性理解具有基础性作用, 它表示不同空间位置土壤性质特征。其块金值 C_0 表示由测量误差和最小取样距离间土壤属性的随机因素引起, 包括施肥、耕作措施、种植制度等, 基台值 $C_0 + C$ 反映区域化变量受结构因素影响的程度, 包括土壤类型、母质、地形、气候等。而块金值和

基台值的比值块基比 $C_0/(C_0+C)$ 是划分土壤性质空间自相关程度的依据,表示随机部分引起的空间异质性占系统总变异的比例;当 $C_0/(C_0+C) < 25\%$ 时,表明空间变异主要受到结构性因素影响,具有强

烈空间自相关性;当 $C/(C_0+C) > 75\%$ 时,空间变异主要受到随机性因素影响,属于弱空间自相关性;当 $25\% < C_0/(C_0+C) < 75\%$ 时,受两种因素共同影响,具有中等空间自相关性^[2]。

表 1 土壤属性和 K 值描述性统计分析

Table 1 Description statistics analysis of soil properties and K factors value

项目	土层/cm	范围	平均值	标准差	偏度	峰度	变异系数/%
砂粒	0—10	42.4~80.2	61.349	8.9644	-0.023	-0.591	14.6
	10—20	38.0~81.8	67.766	9.4490	-0.782	0.778	13.9
粉粒	0—10	10.8~51.0	29.909	8.8110	0.201	-0.171	29.5
	10—20	9.2~50.8	23.674	8.8520	0.604	0.450	37.4
黏粒	0—10	3.0~16.0	8.743	2.6520	-0.181	0.456	30.3
	10—20	2.8~16.4	8.560	2.8410	0.170	0.303	33.2
有机碳	0—10	0.168~0.878	0.411	0.1560	0.826	0.166	38.0
	10—20	0.143~1.099	0.429	0.2190	1.598	2.027	51.0
K 值	0—10	0.0205~0.0470	0.0354	0.0055	-0.356	0.378	15.5
	10—20	0.0187~0.0476	0.0310	0.0063	0.016	-0.131	20.3

由表 2 可知,二老虎沟小流域 0—10 cm 和 10—20 cm 土层土壤黏粒和有机碳的 $C_0/(C_0+C)$ 位于 25%~75% 范围内,说明黏粒和有机碳均具有中等空间自相关性,受随机性因素和结构性因素共同作用。各土层砂粒和粉粒的 $C_0/(C_0+C)$ 均大于 75%,表明空间自

相关性弱,这种相关性主要受随机性因素影响。0—10 cm 土层土壤各属性 $C_0/(C_0+C)$ 均大于 10—20 cm 土层,表明 0—10 cm 土层土壤属性的空间差异不如 10—20 cm 土层显著,土壤成分较为稳定,也进一步论证土壤随机性因素对土壤属性的影响随土深增加而减弱^[23]。

表 2 土壤属性的半方差函数理论模型及其相关参数

Table 2 The semi-variogram theoretical model of soil properties and its related parameters

项目	土层/cm	模型	块金值 (C_0)	基台值 (C_0+C)	块基比 $C_0/(C_0+C)$	变程/m	残差	决定 系数
砂粒	0—10	Gaussian	0.05800	0.37600	0.846	21.131	0.0367	0.505
	10—20	Exponential	0.05970	0.37240	0.840	28.500	0.0520	0.211
粉粒	0—10	Gaussian	0.00400	0.79200	0.995	21.477	0.2410	0.490
	10—20	Spherical	0.06500	0.84400	0.923	11.800	0.1730	0.056
黏粒	0—10	Gaussian	0.09050	0.31500	0.713	125.227	0.0284	0.764
	10—20	Gaussian	0.14340	0.31280	0.542	124.261	0.0129	0.803
有机碳	0—10	Exponential	0.35600	1.07100	0.668	117.900	0.351	0.567
	10—20	Linear	0.68624	0.98000	0.300	155.174	0.195	0.367
K 值	0—10	Gaussian	0.00005	0.00053	0.915	585.606	2.689 E-07	0.413
	10—20	Exponential	0.00004	0.00009	0.501	257.400	1.976 E-09	0.417

0—10 cm 和 10—20 cm 土层土壤可蚀性 K 值的 $C_0/(C_0+C)$ 分别为 91.5% 和 50.1%,表明二老虎沟 0—10 cm 土层 K 值在变程内属于弱空间自相关性,随机性因素是空间变异主要因素,即 0—10 cm 土层土壤可蚀性受到人类活动影响相较更大,趋于均一化方向发展;10—20 cm 土层土壤 K 值位于 25%~75% 范围内,属于中等空间自相关性,受随机性和结构性因素两种因素共同影响。0—10 cm 和 10—20 cm 土层土壤可蚀性 K 值空间变异均受到随机性和结构性因素两种因素不同程度的影响,但对于不同深度土壤可蚀性 K 值,0—10 cm 土层受随机性因素主导,10—20 cm 土层由两种因素共同影响,表明随着

土层深度增加,人类活动对土壤影响不断减弱,土壤可蚀性空间自相关性不断增加。这也进一步论证二老虎沟人类活动比较频繁,可能直接或通过植被间接影响土壤可蚀性 K 值大小。

2.3 土壤可蚀性 K 值空间变异特征

克里格插值作为一种空间局部插值,是在局部区域内线性无偏最优估计内部区域化变量的方法,其建立基础是变异函数理论和结构分析,充分考虑样本点间空间位置关系以及有待估点的空间关系。利用软件 ArcGIS 10.2 对土壤可蚀性 K 值采用不同插值方法得到不同土层深度土壤 K 值空间分布图,本文采用 3 种克里格插值方法,即普通克里格 (Ordinary

Kriging)、简单克里格 (Simple Kriging) 和指示克里格 (Indicator Kriging)。

2.3.1 普通克里格插值土壤可蚀性 K 值空间变异特征 图 2 为通过普通克里格插值获得二老虎沟 0—10 cm 和 10—20 cm 土层土壤可蚀性 K 值空间分布结果。研究区 K 值呈不规则的斑状和块状分布,破碎化程度较高,总体呈现中部低四周高的分布趋势,高值区主要分布在西部、东南部和北部,最小值均位于中部偏东。在 0—10 cm 土层, K 值含量分布于 0.030~0.036 的分布面积最大,约占总流域的 50% 以上;在空间分布上,除中部偏东以外,其余方向均分布 K 值含量较高的高值区,呈现北部、西部和东南部包围低值区中部偏东的趋势。在 10—20 cm 土层, K 值含量在 0.021~0.031 的分布面积最大,约占总流域 60% 的分布面积; K 值分布呈现北部和东南部为高值区,中部为相对低值区,最低值同样位于中部偏东。相较于 0—10 cm 土层,10—20 cm 土层主体 K 值含量较低,且 10—20 cm 土层区域变异性增强,分布更加破碎,尤其体现在高值部分,仅在东南方向存在较大面积的连片高值区。从插值结果看,研究区 K 值分布存在高低值相间分布这一特点,特别地两层土层在东部低值区存在闭环的高值中心,这与插值预测和治理

措施空间效益差异有关,如坡顶种植乔灌草治理效果较好,而陡峭坡面不易种植沙棘,土壤可蚀性 K 值在局部出现变化,而插值预测凸显此种变化。

2.3.2 简单克里格插值土壤可蚀性 K 值空间变异特征 图 3 为采用简单克里格插值获得二老虎沟 0—10 cm 和 10—20 cm 土层土壤可蚀性 K 值的空间分布结果。研究区 K 值以条带状呈现东北、西部和东南部高,中部及偏东方向较低的分布趋势, K 值总体变化平滑,连续性较好,分布特征明显。在 0—10 cm 土层, K 值含量高于 0.030 的分布面积约占总流域的 80% 以上,整体 K 值值域较小,而主体 K 值含量较高;空间分布呈现由东部向四周递增的趋势,整体连续性强且变异性较小,高值区主要分布在西部、东北和东南部。在 10—20 cm 土层, K 值值域大且低值占据主要部分, K 值含量低于 0.029 的分布面积约占总流域的 60% 以上,总体空间分布趋势与 0—10 cm 土层保持一致,但在维持连续性较好的同时,空间变异增强,高值区和低值区突显。相较于突显变化明显的 10—20 cm 土层,0—10 cm 土层主体 K 值较大且分布相对稳定,这与人类活动等随机性因素在 0—10 cm 土层作用明显相关,10—20 cm 土层更多地受到气候、地形和土壤母质等结构性因素影响。

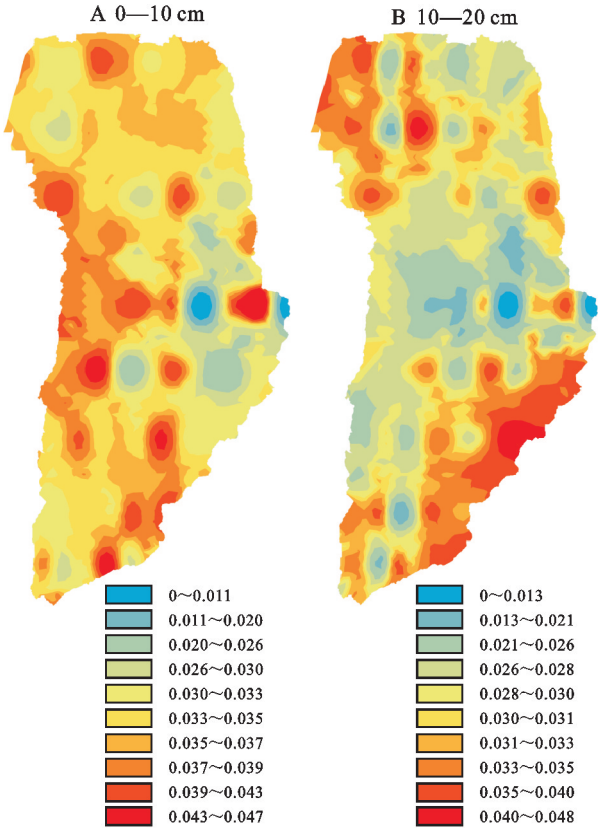


图 2 普通克里格土壤可蚀性 K 值空间插值
Fig. 2 Spatial distribution of soil erodibility
 K from Ordinary Kriging

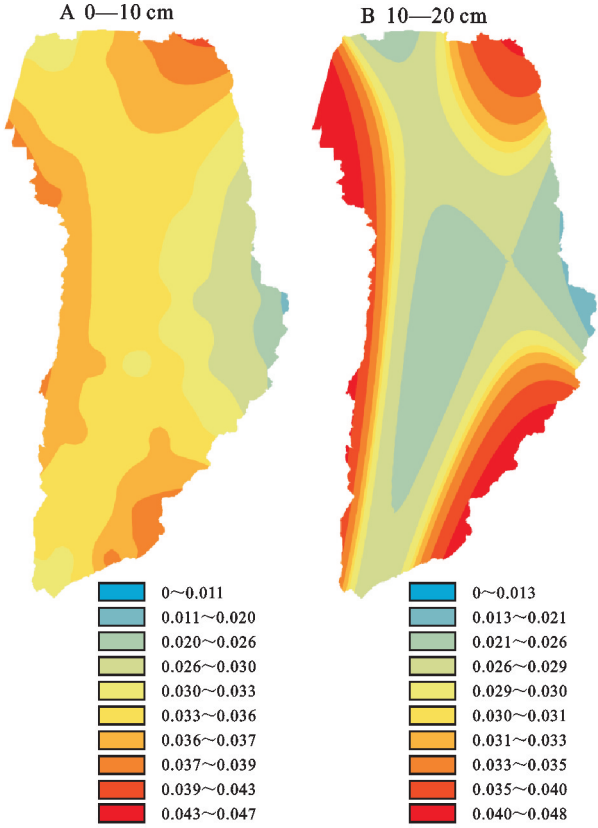


图 3 简单克里格土壤可蚀性 K 值空间插值
Fig. 3 Spatial distribution of soil erodibility
 K from Simple Kriging

2.3.3 指示克里格插值土壤可蚀性 K 值空间变异特征 通过指示克里格插值方法获得二老虎沟 0—10 cm 和 10—20 cm 土层土壤可蚀性 K 值的空间分布结果,如图 4 所示。研究区 K 值呈现斑状和块状分布相结合以及高低值中心相间分布的特点,破碎化程度高,空间变异性强且极值突显性明显。在 0—10 cm 土层, K 值极大值和极小值在整个流域内分布面积较大,虽然呈现高低值相间分布,但仍能把握其总体趋势:高值区面积占比较大,主要分布于中部偏西和东北部,东南部也存在高值中心,南部和中部偏东主要为低值区。在 10—20 cm 土层, K 值极值仍占据较大面积,但中间值面积增大,主体 K 值含量较低,空间分布趋势呈现:西部和东南部主要分布高值,中部主要分布低值。从插值结果看,0—10 cm 土层土壤可蚀性 K 值整体较高,而 10—20 cm 土层 K 值整体较低,不同土层的土壤可蚀性 K 值存在差异,但在中部偏东等局部区域,土壤可蚀性 K 值高低值中心存在重合的分布特点,这也同普通克里格和简单克里格插值下的分布规律一致。

通过对比 3 种克里格插值方法得到的土壤可蚀性 K 值空间插值图可以看出,不同插值方法下小流域土壤可蚀性 K 值空间总体分布规律具有相似性,即呈现中部及偏东方向 K 值较低,西部和东南部 K 值高的分布规律。其中普通克里格和简单克里格插值方法下的土壤可蚀性 K 值值域均与 EPIC 模型估算结果一致,而指示克里格插值结果下的 K 值极大值却远大于 EPIC 模型估算结果。这在一定程度上表明指示克里格对土壤可蚀性 K 值局部变化具有敏感性,更多地考虑特异值的影响。在指示克里格下,小流域 K 值破碎化程度和变异程度强,凸显极值,对于把握局部区域特征变化具有优势;而简单克里格下, K 值空间分布特征变化平滑,连续性强,这有利于获取小流域 K 值空间分布总体趋势;而普通克里格方法取得的结果既可以显示空间分布总体趋势,并以此为基础进一步凸显局部区域的变化特征,从而把握整体和局部两方面土壤可蚀性 K 值变化特征。因此,基于不同插值

结果图层分析发现 3 种克里格插值方法在砭砂岩覆土区小流域更为适宜的是普通克里格。

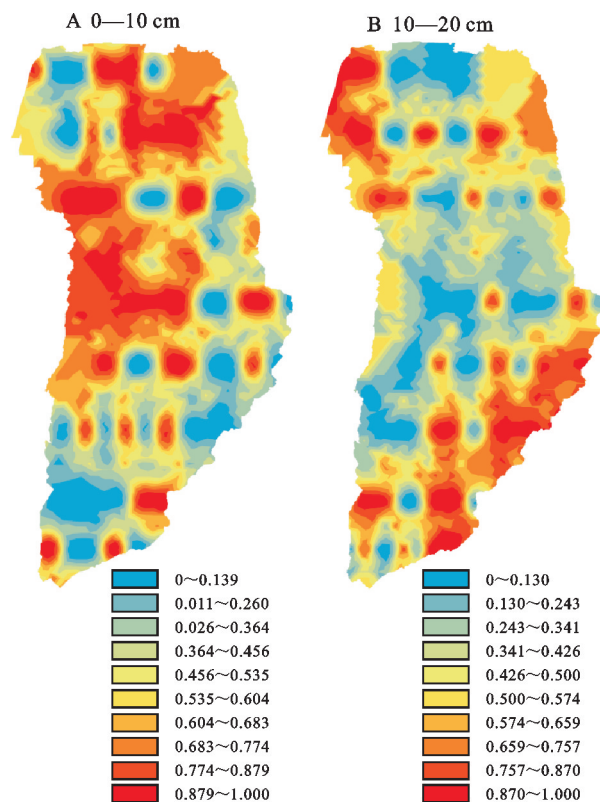


图 4 指示克里格土壤可蚀性 K 值空间插值

Fig. 4 Spatial distribution of soil erodibility K from Indicator Kriging

其次通过交叉验证法验证 3 种克里格插值方法,主要保留 3 个采样点作为样本点进行插值精度比较。其基于插值完成的栅格数据将样本点预测值进行提取,而提取的预测值与直接计算出的值进行对比以获取平均绝对误差(Mean Absolute Error, MAE)和平方根误差(Root Mean Square Error, RMSE),结果见表 3。由结果发现,在整体角度上,3 种克里格插值方法对应的平均绝对误差和平方根误差均未超过 0.65,MAE 与 RMSE 均较小,即三者对于土壤可蚀性 K 值的插值结果精度较高。而在 3 种方法结果对应精度衡量指标上,普通克里格方法对应的平均绝对误差和平方根误差均小于简单克里格和指示克里格方法,这也进一步表明普通克里格插值方法在本研究区取得的结果精度更高。

表 3 三种克里格插值方法的精度比较

Table 3 The precision comparison of three Kriging methods

土层/cm	普通克里格		简单克里格		指示克里格	
	MAE	RMSE	MAE	RMSE	MAE	RMSE
0—10	0.00035	5.30E—14	0.00279	2.55E—10	0.31848	0.06535
10—20	0.00008	1.85E—16	0.00323	3.23E—10	0.61586	0.21673

同时,研究区土壤可蚀性 K 值与坡度和海拔存在正相关关系,二老虎沟小流域自西北流经东部再流向西

南,海拔从北向南降低,东西两侧高、中间低,沟底大致与低值区重合,土壤可蚀性随坡度和海拔增加而增强,

但在不同坡面 K 值也有不同表现,0—10 cm 土层阴坡 K 值低于阳坡,这主要是由于表层阴坡具备更好的植被覆盖条件,降低了土壤可蚀性。0—10 cm 土层受随机性因素影响明显,在流域内开展植被种植等综合治理措施,土壤可蚀性 K 值趋于稳定,空间变异性相对较弱,而在 10—20 cm 土层,虽然 K 值总体分布规律与 0—10 cm 土层相似,但受土壤类型、母质、地形等结构性因素 K 值空间变异性和突显性明显。

3 讨论

本研究表明,砒砂岩覆土区二老虎沟小流域土壤可蚀性 K 值分布在 0.018 7~0.047 6 范围内, K 值均值为 0.033 2,这与史培军等^[24]和蔡欣宇^[25]在不同尺度下估算砒砂岩土类土壤可蚀性 K 值结果相近。尺度是某种特征值随空间或时间变化而增大(减小)的现象,在不同尺度下土壤可蚀性 K 值存在变异,且不同尺度下其主控因子也不同。本文以二老虎沟小流域尺度为研究区域,探讨小流域尺度下土壤可蚀性 K 值空间变异,史培军等^[24]和蔡欣宇^[25]的研究则分别于皇甫川流域和高速公路沿线这两者较大尺度估算砒砂岩土类土壤可蚀性 K 值,基于以上不同尺度探讨土壤可蚀性 K 值可使不同尺度土壤可蚀性 K 值估算结果互为验证并进一步明确小尺度具体的土壤可蚀性 K 值空间变异特征,以提升对砒砂岩覆土区小流域土壤侵蚀特征的清晰化认识。史培军等^[24]通过 USLE(Universal Soil Loss Equation)模型以砒砂岩土类、风沙土类等 4 种不同土类为侧重点估算土壤可蚀性 K 值,其中估算出黄河皇甫川流域砒砂岩土类土壤可蚀性 K 值介于 0.020~0.040 范围内,这与本研究估算的 K 值范围(0.018 7~0.047 6)相近,此外皇甫川全流域土壤流失以自然侵蚀为主导地位,自然侵蚀占 54.91%。蔡欣宇^[25]利用诺谟方程估算砒砂岩分布区大东高速公路沿线边坡的土壤可蚀性 K 值,研究依据砒砂岩土、风沙土和黄土 3 种土壤类型进行估算,砒砂岩土中再分为两种,其中白色砒砂岩 K 值为 0.024,粉色和棕红色砒砂岩为 0.045,两者平均值为 0.035,这与本研究 K 值均值(0.033 2)的估算结果大体一致。此外,二老虎沟小流域 K 值极值较大,其局部存在特异值,这主要是由于小流域尺度受坡度、海拔等微地形因素影响,而大尺度下主控因子则为人类活动、下垫面和气候等因素,故小流域尺度内部具体的空间变异被较大尺度估算结果掩盖。总体上,对比二老虎沟小流域尺度与较大尺度下砒砂岩土类的土壤可蚀性 K 值结果对比发现,不同尺度下土壤可蚀性 K 值估算结果相近,但小流域尺度估算结果更为精确。因此,在条件允许的情况下,小流域尺度下样点数的增加和尺度的缩小有利于

更加精确地描述砒砂岩覆土区小流域土壤可蚀性 K 值空间变异特征,将不同尺度估算结果进行对比可以提升对其侵蚀特征的深入认识,促进砒砂岩覆土区后续治理方向的明晰化。

根据 3 种插值方法发现二老虎沟小流域土壤可蚀性 K 值空间分布特征为:不同深度土层土壤可蚀性空间变异规律基本一致,且 K 值受坡度和海拔影响明显。研究区整体呈沟谷地貌,沟谷纵向延伸,东西两侧海拔高、中间低,而土壤可蚀性 K 值总体分布趋势为西部和东南部 K 值较高,中部及偏东方向 K 值较低,沟底主要分布相对低值区,沟坡随坡度和海拔增加土壤可蚀性 K 值也越高,至两侧坡顶土壤可蚀性主要为相对高值区。薛永伟等^[26]研究同样发现紫色土丘陵区小流域土壤可蚀性 K 值与海拔呈现正相关,土壤可蚀性随着流域海拔的降低而降低。Geng 等^[27]基于黄土高原小流域发现细沟可蚀性从山脊顶部到坡底逐渐减小,并随海拔高度增加而增加。而钟旭珍等^[28]以沱江流域为研究区分析土壤侵蚀动态变化发现,土壤侵蚀受坡面因子影响,且随坡度增加而侵蚀加强。这说明土壤可蚀性 K 值与海拔和坡度呈正相关关系^[5],二老虎沟小流域西部和东南部等坡顶区域土壤对侵蚀的敏感性较高,中部及偏东等沟谷区域土壤对侵蚀的敏感性较低。通过 3 种插值方法发现,在砒砂岩覆土区小流域最适宜的是普通克里格插值,其估算结果与 EPIC 公式估算结果较为一致且从整体和局部两方面凸显土壤可蚀性 K 值变化特征。

土壤可蚀性 K 值空间分布是随机因素和结构因素共同作用的结果,而不同土层深度其主要影响因素存在差异,0—10 cm 土层受耕作、施肥等随机性因素影响较大,10—20 cm 土层则更多与土壤类型、母质、地形等结构性因素关系密切。二老虎沟小流域开展包括坡顶种植乔灌木、坡面和沟底分别种植沙棘和形成沙柳坝等综合治理措施,0—10 cm 土层植被覆盖度较大,土壤有机碳积累相对均一,整体上土壤属性趋于稳定,因此 0—10 cm 土层主要受随机性因素影响,土壤可蚀性 K 值为弱空间自相关性且趋于均一化方向发展;随土层深度的增加,随机性因素影响逐渐减小且植被根系对土壤的影响减弱,使土壤可蚀性空间自相关性不断增加,因此 10—20 cm 土层土壤可蚀性 K 值空间变异性增强,为中等空间自相关性。贾振宇等^[29]基于黄泛区进行土壤磷空间变异的研究,也发现作为评价土壤肥力高低的重要指标土壤磷含量,其随机因素对 0—20 cm 土层土壤全磷含量的影响明显大于 20—40 cm 土层土壤。这也进一步证明,通常土壤属性在不同深度的变化主要是由于随机因子这一主要差异^[30]。

本研究通过地统计学分析土壤可蚀性 K 值空间

变异情况,得到砒砂岩覆土区二老虎沟小流域不同土层土壤可蚀性空间变化规律:小流域土壤可蚀性 K 值受海拔和坡度影响明显,总体呈现西部和东南部较高、中部及偏东方向较低的分布规律,在垂直空间变异上,0—10 cm 土层主体 K 值较高且趋于均一化方向发展,而随土层深度增加随机性因素减弱,呈现 10—20 cm 土层 K 值空间变异性增强。因此,小流域内侵蚀治理应考虑坡度和海拔因素,优先对坡面和坡顶进行治理,在有针对性地进行植被恢复的同时,因地制宜,结合一定工程措施增强土壤抗侵蚀能力。

4 结论

(1) 二老虎沟小流域土壤机械组成和有机碳含量存在差异,其中砂粒含量最高,有机碳含量最低;土壤属性处于中等变异程度,且在垂直空间上主要表现为随土层深度增加变异性增强的趋势。

(2) 采用 EPIC 模型估算土壤可蚀性 K 值,结果 K 值范围为 0.018 7~0.047 6;总体而言,二老虎沟小流域土壤可蚀性 K 值数值变幅较大,空间变异较为显著;对比不同土层深度 K 值,随土层深度增加 K 值空间变异性增强且随机性因素影响减弱。

(3) 通过对比 3 种克里格插值方法表明普通克里格插值方法更为适宜于砒砂岩覆土区小流域,其 K 值空间分布趋势为西部和东南部较高、中部及偏东方向较低,且 K 值空间变异特征受海拔和坡度影响明显。

参考文献(References):

- [1] 梁音,史学正.长江以南东部丘陵山区土壤可蚀性 K 值研究[J].水土保持研究,1999,6(2):48-52.
Liang Y, Shi X Z. Soil erodible K in east hillyfields of the southern yangtze river[J]. Research of Soil and Water Conservation, 1999,6(2):48-52.
- [2] 曹祥会,龙怀玉,雷秋良,等.河北省表层土壤可侵蚀性 K 值评估与分析[J].土壤,2015,47(6):1192-1198.
Cao X H, Long H Y, Le Q L, et al. Assessment and analysis of the topsoil erodibility K values in Hebei Province[J]. Soils, 2015,47(6):1192-1198.
- [3] 李子君,王硕,林锦阔,等.沂河流域土壤可蚀性空间变异研究[J].土壤通报,2019,50(1):45-51.
Li Z J, Wang S, Lin J K, et al. Spatial variability of soil erodibility in the Yihe River Basin[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2019,50(1):45-51.
- [4] 张科利,彭文英,杨红丽.中国土壤可蚀性值及其估算[J].土壤学报,2007,44(1):7-13.
Zhang K L, Peng W Y, Yang H L. Soil erodibility and its estimation for agricultural soil in China[J]. Acta Pedologica Sinica, 2007,44(1):7-13.
- [5] 宋春风,陶和平,刘斌涛,等.长江上游地区土壤可蚀性空间分异特征[J].长江流域资源与环境,2012,21(9):1123-1130.
Song C F, Tao H P, Liu B T, et al. Spatial distribution characteristics of soil erodibility K value in the upper Yangtze River[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2012,21(9):1123-1130.
- [6] 朱明勇,谭淑端,张全发.南水北调中线工程水源地的土壤可蚀性特征[J].长江流域资源与环境,2014,23(8):1161-1165.
Zhu M Y, Tan S D, Zhang Q F. Characteristics of soil erodibility in the South-to-North Water Transfer Project (Middle Route), China[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2014,23(8):1161-1165.
- [7] 李季孝,丁剑宏,陶余铨,等.云南省土壤可蚀性及其空间分布特征[J].人民黄河,2019,41(8):103-106.
Li J X, Ding J H, Tao Y Q, et al. Soil erodibility and its spatial distribution characteristics in Yunnan Province[J]. Yellow River, 2019,41(8):103-106.].
- [8] 荆莎莎,张荣华,张庆红,等.沂蒙山区典型县土壤可蚀性 K 值空间变异研究[J].土壤通报,2017,48(2):278-284.
Jing S S, Zhang R H, Zhang Q H, et al. Spatial variability on K value of soil erodibility in typical county of Yimeng Mountain Area [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2017,48(2):278-284.
- [9] 管飞,叶明亮,马友华.江淮丘陵区土壤可蚀性 K 值研究:以肥东县为例[J].中国农学通报,2020,36(1):105-111.
Guan F, Ye M L, Ma Y H. The K value of soil erosion in the Jianghuai hilly area;a case of Feidong County[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2020,36(1):105-111.
- [10] 岑奕,丁文峰,张平仓.华中地区土壤可蚀性因子研究[J].长江科学院院报,2011,28(10):65-68.
Cen Y, Ding W F, Zhang P C. Spatial distribution of soil erodibility factor(K)in central China[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2011,28(10):65-68.
- [11] 高家勇,李瑞,杨坪坪,等.贵州省土壤可蚀性 K 值空间分布特征及主要影响因子[J].水土保持研究,2022,29(5):77-84.
Gao J Y, Li R, Yang P P, et al. Spatial distribution characteristics and main influencing factor of soil erodibility K values in Guizhou Province[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2022,29(5):77-84.
- [12] 朱明勇,谭淑端,顾胜,等.湖北丹江口水库库区小流域土壤可蚀性特征[J].土壤通报,2010,41(2):434-436.
Zhu M Y, Tan S D, Gu S, et al. Characteristics of soil erodibility in the Danjiangkou Reservoir Region, Hubei Province[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2010,41(2):434-436.
- [13] 周璟,张旭东,何丹,等.小流域土壤可蚀性的空间变异及其在不同土地类型下的比较[J].土壤通报,2011,42(3):715-720.
Zhou J, Zhang X D, He D, et al. Spatial variability of soil erodibility and its comparison between different

- landuse types of small watershed[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2011,42(3):715-720.
- [14] 王敬贵, 亢庆, 邝高明, 等. 尖山河小流域土壤可蚀性 K 值空间变异研究[J]. 生态环境学报, 2014,23(4):555-560.
Wang J G, Kang Q, Kuang G M, et al. Spatial variability of soil erodibility (K -factor) in Jianshan watershed of Yunnan province[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2014,23(4):555-560.
- [15] 胡克志. 丹江鸚鵡沟小流域土壤可蚀性空间分异特征研究[J]. 中国水土保持, 2016(7):44-48.
Hu K Z. Study on spatial differentiation characteristics of soil erodibility in the small watershed of Yingwu gully in Danjiang[J]. Soil and Water Conservation in China, 2016(7):44-48.
- [16] 李学峰, 饶良懿, 徐也钦. 砒砂岩不同类型区土壤氮磷养分特征[J]. 农业工程学报, 2022,38(5):139-147.
Li X F, Rao L Y, Xu Y Q. Characteristics of soil nitrogen and phosphorus nutrients in different Pisha sandstone areas[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2022,38(5):139-147.
- [17] Liang Z S, Wu Z R, Yao W Y, et al. Pisha sandstone: Causes, processes and erosion options for its control and prospects[J]. International Soil and Water Conservation Research, 2019,7(1):1-8.
- [18] 马章怀. 覆土砒砂岩区典型退化植被下土壤水分特征及调控[D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2020. DOI: 10.27409/d.cnki.gxbnu, 2020.001109.
Ma Z H. Characteristic and regulation of soil moisture under typical degraded vegetation in loess covered Pisha Sandstone area[D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2020.
- [19] 高玄娜. 复合侵蚀作用下砒砂岩坡面泥沙搬运机制研究[D]. 郑州: 华北水利水电大学, 2021. DOI: 10.27144/d.cnki.ghbsc, 2021.000230.
Gao X N. Study on sediment transport mechanism of Pisha Sandstone slope under combined erosion [D]. Zhengzhou: North China University of Water Resources and Electric Power, 2021.
- [20] 曹亚莉. 高温处理砒砂岩物化性质及改性材料性能研究[D]. 郑州: 华北水利水电大学, 2020.
Cao Y L. Study on Physicochemical properties and properties of modified materials in high temperature treatment of pisha sandstone[D]. Zhengzhou: North China University of Water Resources and Electric Power, 2020.
- [21] 饶良懿, 徐也钦, 胡剑汝, 等. 砒砂岩覆土区小流域土壤可蚀性 K 值研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2020, 28(4):763-773.
Rao L Y, Xu Y Q, Hu J R, et al. Study on soil erodibility factor K on soil cover area of Pisha Sandstone Region[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2020,28(4):763-773.
- [22] 邢启鑫, 饶良懿, 王志臻, 等. 内蒙古砒砂岩不同类型区土壤有机质与速效钾特征[J]. 水土保持学报, 2019,33(6):257-264,272.
Xing Q X, Rao L Y, Wang Z Z, et al. Characteristics of soil organic matter and available potassium in different types of Pisha Sandstone Area of Inner Mongolia [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2019,33(6):257-264,272.
- [23] 范晓梅, 刘高焕, 刘红光. 基于 Kriging 和 Cokriging 方法的黄河三角洲土壤盐渍化评价[J]. 资源科学, 2014, 36(2):321-327.
Fan X M, Liu G H, Liu H G. Evaluating the spatial distribution of soil salinity in the Yellow River Delta based on Kriging and Cokriging methods[J]. Resources Science, 2014,36(2):321-327.
- [24] 史培军, 刘宝元, 张科利, 等. 土壤侵蚀过程与模型研究[J]. 资源科学, 1999,21(5):9-18.
Shi P J, Liu B Y, Zhang K L, et al. Soil erosion process and model studies [J]. Resources Science, 1999,21(5):9-18.
- [25] 蔡欣宇. 砒砂岩地区高速公路边坡土壤侵蚀研究[D]. 西安: 长安大学, 2008.
Cai X Y. Study on Soil erosion of expressway slope in Pisha Sandstone Area[D]. Xi'an: Chang'an University, 2008.
- [26] 薛永伟, 王茹. 紫色土丘陵区不同土地利用条件土壤的可蚀性 K 值[J]. 江苏农业科学, 2016,44(11):488-491.
Xue Y W, Wang R. Soil erodibility K values under different land use conditions in purple soil hilly region[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2016,44(11):488-491.
- [27] Geng R, Zhang G H, Ma Q H, et al. Effects of landscape positions on soil resistance to rill erosion in a small catchment on the Loess Plateau[J]. Biosystems Engineering, 2017,160:95-108.
- [28] 钟旭珍, 张素, 吴瑞娟, 等. 沱江流域土壤侵蚀动态变化及驱动力分析[J]. 水土保持研究, 2022,29(2):43-49.
Zhong X Z, Zhang S, Wu R J, et al. Analysis of dynamic changes and driving forces of soil erosion in Tuojiang River Basin[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2022,29(2):43-49.
- [29] 贾振宇, 张俊华, 丁圣彦, 等. 基于 GIS 和地统计学的黄泛区土壤磷空间变异: 以周口为例[J]. 应用生态学报, 2016,27(4):1211-1220.
Jia Z Y, Zhang J H, Ding S Y, et al. Spatial variation of soil phosphorus in flooded area of the Yellow River based on GIS and geo-statistical methods[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2016,27(4):1211-1220.
- [30] Jiang Q H, Zhou P G, Liao C, et al. Spatial pattern of soil erodibility factor (K) as affected by ecological restoration in a typical degraded watershed of central China[J]. Science of the Total Environment, 2020,749:141609.