

DOI:10.13870/j.cnki.stbcb.2024.05.002

张宁, 张光辉, 邢书昆. 东北黑土区土壤侵蚀阻力对土地利用类型的响应与影响因素 [J]. 水土保持学报, 2024, 38(5): 40-48.

ZHANG Ning, ZHANG Guanghui, XING Shukun. Soil resistance and its influencing factors under different land use types in the black soil region of Northeast China[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(5): 40-48.

东北黑土区土壤侵蚀阻力对土地利用类型的响应与影响因素

张宁¹, 张光辉^{1,2}, 邢书昆¹

(1.北京师范大学地理科学学部, 北京 100875; 2.北京师范大学地表过程与资源生态国家重点实验室, 北京 100875)

摘要: [目的] 土壤侵蚀阻力反映了土壤抵抗侵蚀的性能, 包括细沟可蚀性(K_r)和土壤临界剪切力(τ_c)。通过水槽冲刷试验探究不同土地利用类型下土壤侵蚀阻力差异及其主控因素, 为揭示东北黑土区土壤侵蚀动力机制提供理论基础。[方法] 在黑龙江省嫩江市鹤山农场鹤北小流域选取 7 种典型的土地利用类型, 利用水槽冲刷试验测定土壤分离能力, 拟合了 K_r 和 τ_c , 采用相关分析和偏最小二乘回归方法, 确定影响土壤侵蚀阻力的主要因素。[结果] (1) 不同土地利用类型样地 K_r 为 0.003~0.372 s/m, 道路 K_r 最高, 与农地相比, 草地、横向林带、林地、纵向林带和灌木的 K_r 分别降低 94.00%, 86.20%, 84.00%, 83.60% 和 71.60%; τ_c 为 4.84~13.85 Pa, 农地和道路较低, 分别为 4.84, 9.80 Pa, 其他样地 τ_c 均 > 10.00 Pa, 且无显著差异。(2) 相关分析结果表明, K_r 与黏粒、团聚体稳定性和有机质呈极显著负相关 ($p < 0.01$), 与砂粒、黏结力、根系质量密度和混入表土层的枯落物密度呈显著负相关 ($p < 0.05$), 与粉粒呈极显著正相关 ($p < 0.01$); τ_c 与粉粒呈极显著负相关 ($p < 0.01$), 与砂粒和混入表土层的枯落物密度呈极显著正相关 ($p < 0.01$), 与有机质和根系质量密度呈显著正相关 ($p < 0.05$)。 (3) 偏最小二乘回归结果表明, K_r 主要受土壤黏粒、粉粒、团聚体稳定性、根系质量密度、有机质和混入表土层的枯落物密度影响; τ_c 主要受土壤有机质、混入表土层的枯落物密度、粉粒和根系质量密度影响。[结论] 土地利用类型显著影响土壤侵蚀阻力, 草地减缓侵蚀效果最佳, 减少农地水土流失至关重要。根系质量密度、枯落物密度、土壤质地、团聚体稳定性和有机质是影响土壤侵蚀阻力的关键因子。研究结果为揭示东北黑土区土地利用类型影响土壤侵蚀动力机制及土地利用优化提供理论基础。

关键词: 土地利用变化; 土壤侵蚀阻力; 土壤分离能力; 细沟可蚀性; 临界剪切力

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242-(2024)05-0040-09

Soil Resistance and Its Influencing Factors Under Different Land Use Types in the Black Soil Region of Northeast China

ZHANG Ning¹, ZHANG Guanghui^{1,2}, XING Shukun¹

(1. Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2. State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resources Ecology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: [Objective] Soil resistance reflects the characteristics of soil to mitigate erosion and is quantified by rill erodibility (K_r) and critical shear stress (τ_c). To investigate the difference of soil resistance and its main controlling factors under different land use types through the flume scouring test, which provided a theoretical basis for revealing the dynamic mechanism of soil erosion in Northeast black soil area. [Methods] Seven typical land use types were selected in the Hebei small watershed of Heshan farm, located in Nenjiang city of Heilongjiang Province. K_r and τ_c were determined using the measured soil detachment capacity by scouring test in a large hydraulic flume. The dominant factors influencing soil resistance were determined by correlation analysis and partial least square regression. [Results] (1) The estimated K_r varied from 0.003 to 0.372 s/m among different land use types. K_r of road was the highest. Compared to cropland, K_r of

收稿日期: 2024-02-23

修回日期: 2024-03-25

录用日期: 2024-04-15

网络首发日期 (www.cnki.net): 2024-06-17

资助项目: 国家重点研发计划项目 (2021YFD1500803)

第一作者: 张宁 (2000—), 女, 硕士研究生, 主要从事土壤侵蚀研究。E-mail: ningzhang@mail.bnu.edu.cn

通信作者: 张光辉 (1969—), 男, 博士, 教授, 主要从事土壤侵蚀和水土保持研究。E-mail: ghzhang@bnu.edu.cn

http://stbcb.alljournal.com.cn

grassland, transverse forest belt, woodland, longitudinal forest belt, and shrub land decreased by 94.00%, 86.20%, 84.00%, 83.60%, and 71.60%. The fitted τ_c ranged from 4.84 and 13.85 Pa. Cropland and road had lowest τ_c (4.84 and 9.80 Pa). The differences in τ_c were not significant between other land use types and were greater than 10.00 Pa. (2) Correlation analysis showed that K_r was significantly correlated with clay content, aggregate stability and organic matter content ($p < 0.01$), and sand content, soil cohesion, root mass density and litter density mixed within topsoil layer negatively ($p < 0.05$). It was significantly correlated with silt content positively ($p < 0.01$). τ_c was significantly related to silt content negatively ($p < 0.01$). It was significantly correlation with sand content and topsoil litter density ($p < 0.01$), and organic matter content and root mass density positively ($p < 0.05$). (3) The results of PLSR analysis demonstrated that the dominant factors influencing K_r were soil clay content, silt content, aggregate stability, root mass density, organic matter content and litter density mixed within topsoil layer. The key factors affecting τ_c were soil organic matter content, litter density mixed within topsoil layer, silt content and root mass density. [Conclusion] Land use type significantly affects soil resistance. Grassland is most effective at mitigating erosion and is critical for reducing erosion on cropland. Root mass density, litter density, soil texture, aggregate stability and organic matter content are key factors influencing soil resistance. The results of the study provide a theoretical basis for understanding the mechanism of land use type impacting soil erosion dynamics and land use optimization in the black soil area.

Keywords: land use change; soil detachment capacity; soil resistance; rill erodibility; critical shear stress

Received: 2024-02-23

Revised: 2024-03-25

Accepted: 2024-04-15

Online(www.cnki.net): 2024-06-17

东北黑土区是我国重要的商品粮生产基地,主产大豆和玉米,在国家粮食安全体系中发挥着十分重要的作用^[1]。但由于受到独特的自然环境和长期不合理开垦及高强度农业生产的影响,黑土区水土流失严重,导致黑土层变薄、养分流失、土壤肥力和土地生产力下降,制约该区的可持续发展,威胁国家粮食安全^[2-4]。因此,研究东北黑土区土壤侵蚀机理具有重要的理论意义和生产价值。

土壤侵蚀包括土壤分离、泥沙输移和泥沙沉积 3 个子过程,土壤分离的主要驱动力包括雨滴击溅和径流冲刷,其中由径流冲刷引起的土壤分离过程,主要受控于坡面径流水动力学特性和土壤侵蚀阻力(细沟可蚀性和土壤临界剪切力)。细沟可蚀性和土壤临界剪切力表征土壤对侵蚀的抵抗作用,二者与土壤理化性质和植被特性密切相关^[5-6]。土壤黏粒质量分数越高,团聚体越发育,团聚体稳定性提高,土壤侵蚀阻力随之增大^[7];随粉粒质量分数增加,细沟可蚀性呈幂函数增大^[8];砂粒质量分数增加能够通过促进降水入渗,减少地表径流,进而降低侵蚀动力,同时砂粒直径较大,偏小的径流挟沙力降低侵蚀量,土壤侵蚀阻力增大^[9]。土壤侵蚀阻力随土壤体积质量的增大而增大^[10-11]。土壤团聚体数量增多,稳定性增强改善土壤结构,增大土壤侵蚀阻力^[12]。土壤侵蚀阻力随土壤

黏结力的增大呈幂函数减小^[8,13]。土壤有机质质量分数的增加有效促进团聚体发育且增强其稳定性,进而增大土壤侵蚀阻力^[14]。随植被根系质量密度增大,土壤侵蚀阻力呈指数函数增大^[15]。混入表土层的枯落物密度与土壤侵蚀阻力呈正相关^[16-17]。

土地利用类型及其调整对土壤理化性质及植被特性的影响,势必引起土壤侵蚀阻力的响应。ZHANG 等^[18]研究发现,在黄土高原典型小流域,细沟可蚀性受土地利用类型的显著影响,农地最大,依次为草地、灌木、荒坡和林地;WANG 等^[19]测定黄土高原坡耕地、37 年撂荒地、柠条林、刺槐林、油松林及油松和紫穗槐混交林的细沟可蚀性发现,坡耕地细沟可蚀性最大,混交林的细沟可蚀性最小;孙龙等^[20]研究发现,与玉米地相比,黄土高原 40 年林龄刺槐林地细沟可蚀性降低 86.30%,临界剪切力增加 10.10%,但相关研究主要集中在黄土高原。众所周知,黄土和黑土的理化性质差异明显,同时黄土高原与黑土区土地利用类型明显不同,这些差异可能导致不同土地利用类型下土壤侵蚀阻力及其影响因素出现明显的变化。因此,本文在东北黑土区代表性小流域选取 7 种典型的土地利用类型,利用水槽冲刷试验研究不同土地利用类型下土壤侵蚀阻力差异及其主控因素,为揭示黑土区土壤侵蚀动力机制提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于黑龙江省嫩江市鹤北小流域(48°59′00″—49°03′00″N, 125°16′00″—125°121′00″E), 海拔 317~399 m, 流域面积 27.60 km², 地处小兴安岭向松嫩平原的过渡地带, 地形为典型的长缓坡漫川漫岗, 坡长 300~2 000 m, 坡度 3°~6°^[21-22]。该区气候类型为寒温带半湿润大陆性季风气候, 年平均气温 0.4 ℃, 年平均降水量 534 mm, 集中于 6—9 月^[22]。土壤以典型黑土为主, 黑土层厚度为 30~50 cm, 平均有机质质量分数 43.62 g/kg, 土壤质地黏重, 具有较高潜在肥力与保水保肥能力, 成土母质主要为第四纪湖相冲积和沉积黄土状亚黏土^[23-24]。自然植被已基本开垦为以大豆和玉米为主的农地, 农业机械化程度高, 起垄、播种、喷药、施肥、除草和收割均沿主林带方向实行机械化作业^[25]。流域内土地利用类型多样, 其中农地占流域总面积的 79.80%, 林地占 7.30%, 灌木占 9.30%, 草地占 3.70%^[26]。通过系统野外勘察, 在鹤北小流域的 8 号子流域选取 7 种土地利用类型进行试验, 分别为农地、道路、草地、灌木、林地、横向林带和纵向林带(表 1)。

表 1 各样地基本信息

Table 1 Basic information on sampling sites

样地	经度/ (°)	纬度/ (°)	海拔/ m	坡度/ (°)	坡向	作物或 主要植被
农地	125.334	49.005	364.41	3.11	西南	大豆
道路	125.341	49.001	383.67	4.18	南	无芒稗
草地	125.341	49.002	384.45	3.86	东南	拂子茅、羊草、芡蒿
灌木	125.323	49.002	365.38	4.84	北	沙棘、芡蒿
林地	125.328	49.009	371.22	3.36	南	落叶松、龙芽草
横向林带	125.322	49.005	350.55	3.31	北	落叶松、白桦、芡蒿
纵向林带	125.315	49.004	341.41	4.47	西	白桦、芡蒿

1.2 样品采集、土壤理化性质与植被特性测定

本试验样品采集及各项指标测定均于 2022 年 8 月进行。在各样地(表 1)按“S”形采集 25 个表层原状土样测定土壤分离能力, 7 个样地共采集 175 个原状土样。采样时选择较为平整的土壤表面, 去除地表杂草和枯落物, 将内径 9.8 cm、高 5 cm 的不锈钢环刀垂直压入土壤, 为减小环刀引起的土壤扰动, 在按压环刀的同时用剖面刀不断切割环刀周围土壤。当环刀被土壤充分填满后, 盖上环刀上盖, 小心将环刀挖出, 削去底部多余土壤, 放上棉布后盖上环刀下盖, 用保鲜膜包裹、胶带密封并编号。同时, 在采样点周围用小铝盒采集 0—5 cm 土层的混合土样, 立即密封以

减少水分蒸发损失, 采用烘干称重法测定冲刷前各原状土样的初始含水量并计算干土重。

测定的土壤理化性质包括土壤质地(黏粒、粉粒和砂粒)、体积质量、黏结力、贯入阻力、团聚体稳定性和有机质, 指标测定所进行的土样采集和原位试验均位于土壤分离能力样品采集点附近。在各样地按“S”形采集 6 个表层土样并充分混合, 待自然风干后分别过 2, 0.25 mm 干筛, 测定土壤质地和有机质含量, 其中土壤质地利用激光粒度仪(Mastersizer 2000)测定, 有机质含量采用重铬酸钾外加热法测定, 每个样地重复测定 3 次。使用体积为 100 cm³的小环刀在各样地分别采集 3 个原状土样, 通过烘干称重法测定土壤容重, 各样地重复测定 3 次。在各采样点原位测定土壤黏结力和贯入阻力, 黏结力采用 Eijkelkamp 袖珍式黏结力仪测定, 贯入阻力采用 Eijkelkamp 0603 袖珍式贯入阻力仪测定, 每个样地重复测定 10 次。采用湿筛法测定团聚体稳定性, 依据各孔径的直径和孔径上团聚体干土重, 计算水稳性团聚体平均重量直径(MWD), 每个样地重复测定 3 次。

植被特性可能显著影响土壤侵蚀阻力, 本文测定根系质量密度和混入表土层的枯落物密度(0—5 cm)。在各样地采样点附近采集与土壤分离能力试验样品相同的 5 个土样, 将土样置于 1 mm 筛子上用水缓慢冲洗, 待附着在根系和枯落物上的泥土被完全洗净后, 分别将洗出的根系和枯落物, 装入信封并置于烘箱中在 65 ℃下烘干至恒重, 称重计算根系质量密度和混入表土层的枯落物密度。

1.3 坡面径流水动力学特性测定

试验在 5 m 长、0.4 m 宽的变坡水槽中进行, 为模拟自然条件下地表粗率并保持试验过程中水槽底部糙率稳定, 用油漆将过 2 mm 筛的试验土样粘到水槽底部。试验前调整水槽坡度和流量, 流量由阀门组控制, 用水桶收集倒入量筒, 取 5 次平均值为流量。待水流稳定后, 通过染色法测定水流表面流速, 在距水槽出水口上端 2.6 m 处沿水槽横断面均匀布设 12 个点, 滴加高锰酸钾溶液, 记录染色水流通过 2 m 长测流区的时间, 计算该坡度和流量下水流表面最大流速, 取 10 次测量的平均值(去掉 1 个最大值和 1 个最小值)。试验时测定水流温度, 计算水流雷诺数, 根据流态选择相应的流速修正系数计算水流平均流速。水流深度用流量和平均流速计算(公式 1); 水流剪切力用水流深度和坡度计算(公式 2)。

$$h = \frac{Q}{vB} \quad (1)$$

式中: h 为水流深度(m); Q 为流量(m^3/s); v 为平均流速(m/s); B 为水槽宽度(m)。

$$\tau = \rho ghS \quad (2)$$

式中: τ 为水流剪切力(Pa); ρ 为水的密度(kg/m^3); g 为重力加速度(m/s^2); S 为坡度(m/m)。

根据坡度和流量组合,设计5组不同的水动力条件,对采集的原状土样在5个水流剪切力下冲刷,每个水流剪切力下重复冲刷5个土样。由于预试验发现冲刷农地土样所需最大剪切力明显小于冲刷其他样地土样的最小水流剪切力,因此单独为农地土样冲刷设定一组水流剪切力(4.86~11.32 Pa),其他样地则设定另一组水流剪切力(16.28~36.18 Pa)。由于土壤侵蚀阻力通过水流剪切力和土壤分离能力线性拟合后斜率及与X轴截距确定,因此,设定2组不一样的水流剪切力不会影响试验结果和结论。冲刷试验具体的水动力学参数见表2。

表2 冲刷试验采用的径流水动力学特性

Table 2 Hydraulic parameters used in flume scour tests

土地利用 类型	坡度/ %	流量/ ($10^{-3} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	流速/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	水深/ 10^{-3}m	水流 剪切力/Pa
其他	14.05	5.16	1.08	11.82	16.28
	14.05	7.47	1.19	15.48	21.31
	14.05	9.30	1.21	19.03	26.20
	17.63	9.30	1.27	18.04	31.17
	21.26	9.30	1.32	17.37	36.18
农地	8.75	1.36	0.59	5.66	4.86
	8.75	2.43	0.78	7.65	6.56
	8.75	3.07	0.79	9.56	8.20
	8.75	3.99	0.87	11.37	9.75
	8.75	5.01	0.94	13.20	11.32

1.4 土壤分离能力测定

为消除土壤水分对土壤分离能力测定的影响,试验前对土壤样品进行饱和,将土样静置于水中,水面维持在土壤表层1 cm以下,8 h后取出土样,于阴凉处静置12 h后用于冲刷试验。调节水槽坡度及流量至设计值,将土样移到距离水槽出水口0.6 m的放样室内,使土样表面与水槽底面齐平,然后测定土壤分离能力。

为减小样环边壁效应的影响,待土样冲刷深度约为2 cm时,停止冲刷试验并记录冲刷时间,将冲刷后的土样置于烘箱中,以105℃烘至恒重后称重。土壤分离能力计算公式为:

$$D_c = \frac{W_0 - W_d}{tA} \quad (3)$$

式中: D_c 为土壤分离能力[$\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]; W_0 为冲刷

前土样干重(用土壤初始体积分数计算得到)(kg); W_d 为冲刷后土样干重(kg); t 为冲刷时间(s); A 为环刀土样表面积(m^2)。

根据 WEPP(water erosion prediction project)模型,以水流剪切力为横坐标、实测土壤分离能力为纵坐标,通过线性拟合则细沟可蚀性为拟合线的斜率,而土壤临界剪切力为拟合直线在X轴上的截距:

$$D_c = K_r(\tau - \tau_c) \quad (4)$$

式中: K_r 为细沟可蚀性(s/m); τ_c 为临界剪切力(Pa)。

1.5 数据分析

数据的正态性采用夏皮罗-威尔克(Shapiro-Wilk)方法检验,不同土地利用类型样地土壤理化性质和植被特性的差异采用单因素方差分析(one-way ANOVA, $p < 0.05$)检验。细沟可蚀性、临界剪切力与土壤理化性质、根系及枯落物之间的关系采用 Spearman ($p < 0.05$)相关分析方法确定。采用偏最小二乘回归(PLSR)方法确定影响土壤侵蚀阻力的主要因子,用变量投影重要性(VIP)表征。PLSR分析利用SIMCA 14.1软件进行,其他数据的统计分析采用SPSS 24.0软件进行,绘图应用Origin 2021软件进行。

2 结果与分析

2.1 不同土地利用类型土壤理化性质和植被特性差异

不同土地利用类型的土壤质地、体积质量、团聚体稳定性、黏结力、贯入阻力、有机质、根系质量密度和混入表土层的枯落物密度变化情况见表3。其中土壤质地反映土壤颗粒组成情况;土壤体积质量、黏结力和贯入阻力反映土壤的紧实状况;团聚体稳定性和有机质则反映土壤的结构状况。

不同土地利用类型的土壤黏粒、粉粒和砂粒存在显著差异($p < 0.05$)。草地和横向林带的黏粒显著高于其他样地(27.92%和27.61%),灌木、林地和纵向林带黏粒较高且三者间无显著差异,变化为24.89%~25.91%,而农地和道路的黏粒则显著低于其他样地(16.39%和13.25%)。各样地粉粒均较高,其中农地和道路显著高于其他样地(75.81%和78.65%),而横向林带显著偏低(57.46%),其他样地变化为60.00%~70.00%。砂粒变化为7.79%~14.94%,除2个林带与草地显著偏高外,其他均 $< 10.00\%$ 。根据美国土壤质地分类标准,不同土地利用类型的土壤质地分为2种类型,草地和横向林带属于粉质黏壤土,其他土壤属粉质壤土。

各样地土壤体积质量差异显著($p < 0.05$),道路最紧实,土壤体积质量显著高于其他样地(1.43 g/cm^3),

而横向林带和纵向林带的土壤体积质量显著偏低(0.89,0.78 g/cm³),这可能与其表土根系发达和枯落物混入量较高有关,林地、农地、草地、灌木土壤体积质量依次为1.11,1.16,1.19,1.25 g/cm³。团聚体平均重量直径作为评价团聚体稳定性的重要指标,其值越大表示团聚体平均粒径团聚度越高,稳定性越强。不同土地利用类型的团聚体稳定性差异显著($p < 0.05$),草地团聚体平均重量直径最高(4.78 mm),横向林带次之(3.86 mm),道路最低(2.04 mm),其他土地

利用类型间无显著差异(3.11~3.3 mm)。土地利用类型显著影响黏结力和贯入阻力($p < 0.05$),草地、横向林带和纵向林带黏结力显著偏高(8.63,8.34,8.05 kPa),林地和道路黏结力较高(7.87,7.85 kPa),灌木偏低(6.22 kPa),农地最低(2.46 kPa)。道路因人为踩踏、车辆碾压等使得土壤紧实,贯入阻力最高(8.9 kPa),农地土壤因实施旋耕、松土等田间管理措施而较为疏松,其贯入阻力最低(2.31 kPa),其他样地间差异较小(5.88~7.23 kPa)。

表 3 不同土地利用类型土壤理化性质和植被特性

Table 3 Soil physico-chemical properties and vegetation characteristics of different land use types

样地	黏粒/%	粉粒/%	砂粒/%	土壤体积质量/ (g·cm ⁻³)	黏结力/kPa	贯入阻力/ kPa	团聚体稳定性(平均 重量直径)/mm	有机质/ (g·kg ⁻¹)	根系质量密度/ (kg·m ⁻³)	表土枯落物密度/ (kg·m ⁻³)
农地	16.39±1.00c	75.81±1.03a	7.79±0.04c	1.16±0.01d	2.46±0.03d	2.31±0.03d	3.11±0.03c	38.64±2.34f	0.44±0.10d	—
道路	13.25±0.53d	78.65±0.52a	8.10±0.85c	1.43±0.04a	7.85±0.53b	8.90±1.40a	2.04±0.28d	24.76±0.95g	0.12±0.02d	0.02±0.01d
草地	27.92±0.38a	61.25±0.49c	10.83±0.13b	1.19±0.02c	8.63±0.54a	6.63±0.6bc	4.78±0.02a	68.96±0.57b	1.76±0.33c	1.08±0.07c
灌木	24.89±0.63b	66.43±1.66b	8.67±1.09bc	1.25±0.01b	6.22±0.02c	7.23±1.18b	3.18±0.12c	43.70±0.10e	1.74±0.02c	1.06±0.09c
林地	25.25±0.66b	60.85±2.17c	13.89±1.60a	1.11±0.01e	7.87±0.02b	6.21±0.25bc	3.15±0.11c	52.63±0.31d	2.63±0.45ab	1.82±0.07b
横向林带	27.61±0.50a	57.46±1.46d	14.94±0.99a	0.89±0.01f	8.34±0.54ab	5.88±0.53c	3.86±0.09b	121.69±0.75a	3.24±0.30a	2.04±0.17a
纵向林带	25.91±1.08b	64.57±1.04b	9.53±0.05bc	0.78±0.07g	8.05±0.06ab	6.38±1.41bc	3.30±0.04c	63.73±0.77c	2.54±0.46b	1.63±0.07b

注:表中数据为平均值±标准差;同列不同小写字母表示不同样地间差异显著($p < 0.05$);“—”表示无数据。

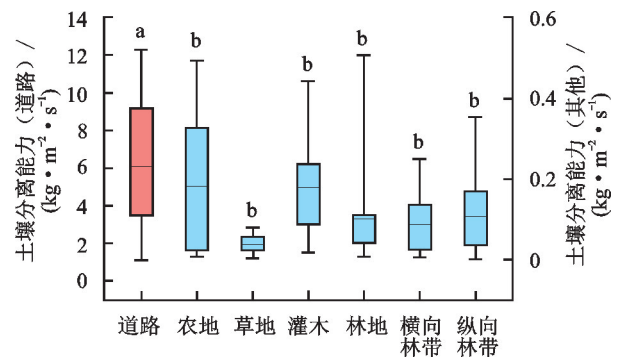
不同土地利用类型下土壤有机质差异显著($p < 0.05$),为 24.76~121.69 g/kg,横向林带有机质最高(121.69 g/kg),道路最低(24.76 g/kg),草地、纵向林带、林地、灌木和农地有机质依次降低,为 38.64~68.96 g/kg,其中林带、林地和草地有机质偏高,可能与表土根系发达、枯落物归还量大有关。

植被特性同样受土地利用类型的显著影响,各样地根系质量密度和混入表土层的枯落物密度差异显著($p < 0.05$)。横向林带根系最发达,根系质量密度为 3.24 kg/m³,林地和纵向林带次之(2.63,2.54 kg/m³),道路根系质量密度最低,仅为 0.12 kg/m³。横向林带、林地和纵向林带的表土枯落物密度显著偏高(2.04,1.82,1.63 kg/m³),而道路和农地几乎无枯落物覆盖。

2.2 不同土地利用类型土壤分离能力差异

不同土地利用类型下土壤分离能力(D_c)存在差异,箱形图中间黑线代表平均值(图 1)。道路的 D_c 显著高于其他样地,变化范围为 2.43~9.93 kg/(m²·s),平均值为 6.11 kg/(m²·s);其他样地间 D_c 无显著差异,平均值为 0.04~0.18 kg/(m²·s);农地的 D_c 为 0.01~0.34 kg/(m²·s),平均值为 0.18 kg/(m²·s);草地、横向林带、林地、纵向林带和灌木的 D_c 分别为 0.01~0.07,0.01~0.15,0.02~0.18,0.02~0.19,0.05~0.33 kg/(m²·s),平均值分别为 0.04,0.09,0.10,0.11,

0.18 kg/(m²·s),分别比农地降低 79.20%,52.80%,44.80%,41.40%和 0.70%。



注:长方形箱体表示上下四分位数 25%~75%;上下须线表示 1.5IQR 内的范围;框内横线表示中位数。

图 1 不同土地利用类型下土壤分离能力的差异

Fig.1 Differences in soil detachment capacity under different land use types

2.3 不同土地利用类型土壤侵蚀阻力差异

通过土壤分离能力与水流剪切力的线性拟合得到细沟可蚀性(K_r)和土壤临界剪切力(τ_c),反映不同土地利用类型土壤侵蚀阻力差异, K_r 为 0.003~0.372 s/m, τ_c 为 4.84~13.85 Pa(图 2)。

道路的 K_r 明显高于其他样地(0.37 s/m),农地次之(0.05 s/m),与农地相比,草地、横向林带、林地、纵向林带和灌木的 K_r 分别降低 94.00%,86.20%,84.00%,83.60%和 71.60%(图 2a)。农地和道路的 τ_c

较低(4.84,9.80 Pa),其他样地 τ_c 偏高且差异不显著,为 13.40~13.85 Pa,与横向林带、林地、草地、灌木和纵向林带相比,农地 τ_c 分别降低65.10%,64.80%,64.50%,64.30%和 63.90%(图 2b)。

2.4 影响土壤侵蚀阻力的主要因素

Spearman 相关性分析结果表明,土壤侵蚀阻力与土壤理化性质和植被特性密切相关(图 3)。

除土壤体积质量和贯入阻力外,其他土壤和植被

特性均与 K_r 呈显著相关($p < 0.05$)。具体而言, K_r 与黏粒、团聚体稳定性和有机质呈极显著负相关($p < 0.01$);与砂粒、黏结力、根系质量密度和枯落物密度呈显著负相关,而与粉粒呈极显著正相关($p < 0.01$)。相反, τ_c 与粉粒呈极显著负相关($p < 0.01$),与砂粒和枯落物密度呈极显著正相关($p < 0.01$),与有机质和根系质量密度呈显著正相关($p < 0.05$), K_r 与 τ_c 呈显著负相关($p < 0.05$)(图 3)。

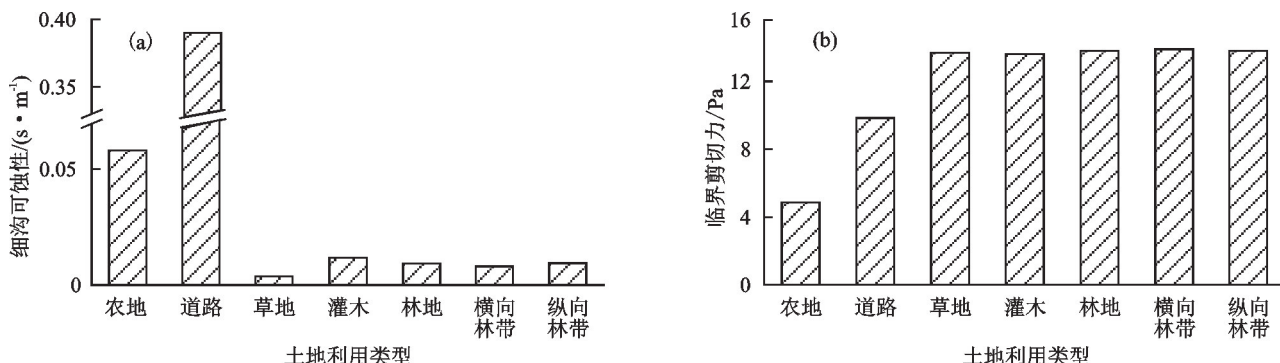
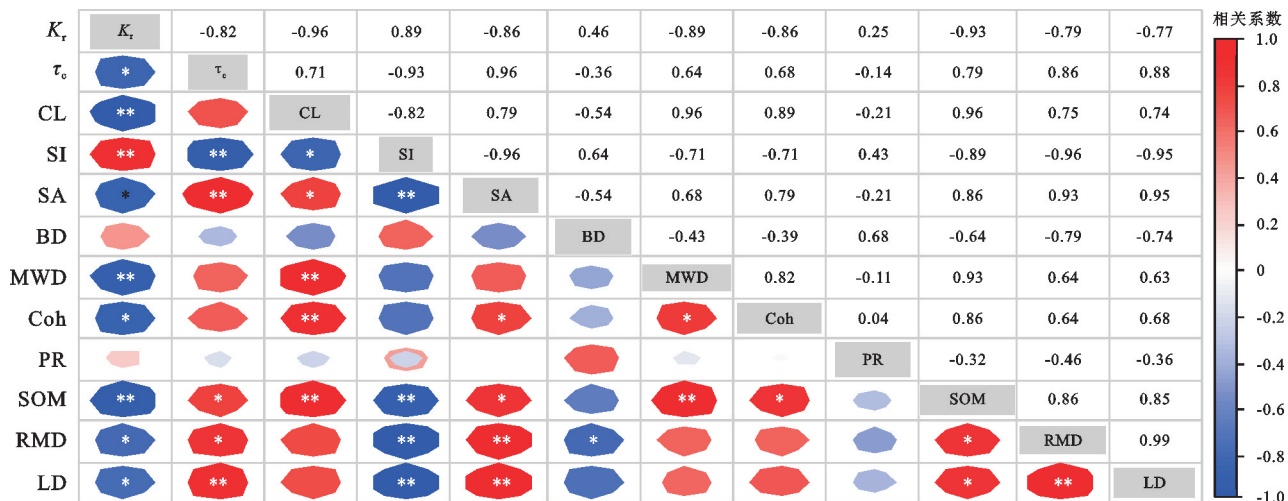


图 2 不同土地利用类型下细沟可蚀性与土壤临界剪切力的差异

Fig.2 Differences in rill erodibility and critical shear stress under different land use types



注: K_r 为细沟可蚀性; τ_c 为临界剪切力;CL为黏粒;SI为粉粒;SA为砂粒;Coh为土壤黏结力;PR为土壤贯入阻力;BD为土壤体积质量;SOM为有机质;MWD为 >0.25 mm水稳定性团聚体平均重量直径;RMD为根系质量密度;LD为混入表土层的枯落物密度。*表示在 0.05 水平显著相关; ** 表示在 0.01 水平显著相关。

图 3 土壤侵蚀阻力与土壤性质和植被特性间的相关性

Fig.3 Correlation of soil resistance with soil properties and vegetation characteristics

进一步利用 PLSR 分析土壤侵蚀阻力与土壤理化性质及植被特性间的关系,自变量对因变量解释的重要性用变量投影重要性(VIP)表征,当变量的 VIP 值 >1 时,说明该变量在解释因变量具有重要作用,对 K_r 和 τ_c 影响因子的分析可以发现,黏粒、粉粒、团聚体稳定性、根系质量密度、有机质和枯落物密度是解释 K_r 随土地利用类型变化的主要参数(图 4a),而 τ_c 随土地利用类型的变化主要受土壤有机质、表土枯落物密度、粉粒和根系质量密度的影响(图 4b)。

3 讨论

3.1 土地利用类型对土壤侵蚀阻力的影响

土壤侵蚀阻力受土地利用类型变化的显著影响。本研究结果显示,道路和农地的 K_r 明显高于其他样地,与农地相比,草地、横向林带、林地、纵向林带和灌木的细沟可蚀性分别降低 94.00%,86.00%,84.00%,83.00%和 71.60%(图 2a),与 LI 等^[8] 在黄土高原的研究结果类似,即对于黄绵土而言,农地的 K_r 最大,分别是荒地、草地、林地、灌木、果园和道路的 42.57,

28.88, 26.34, 11.65, 9.17, 1.74 倍; 对于红胶土而言, 农地的 K_r 也最大, 分别是草地、灌木和果园的 35.00, 9.00, 7.00 倍。

可见, 东北黑土区和黄土高原区的土壤侵蚀阻力均受土地利用类型的较大影响, 且农地和道路更易发生侵蚀, 而草地的土壤侵蚀阻力显著较高。其中, 农地因受到翻耕、除草、深松等农事活动的扰动, 加之不合理耕作措施的影响, 表层土壤较为疏松, 土壤侵蚀阻力显著较小; 道路因土壤黏粒少, 粉粒高, 且有机质低, 团聚体稳定性差, 土壤结构不稳定而土壤侵蚀阻力偏小; 草地具有须根数量多且密度大的特点, 网状

根系在土壤中的交织缠绕, 将土体包裹, 能够显著增强土壤抵抗径流冲刷的性能^[27], 因此草地土壤侵蚀阻力明显高于其他类型样地。

通过对比不同土地利用类型下土壤侵蚀阻力的差异, 有利于为区域水土保持措施的制定提出更加科学合理的建议, 在东北黑土区, 草地、横向林带和林地可作为优先选择的土地利用类型以保持水土, 对比而言, 黄土高原地区则可优先选择草地、林地和荒地。而对于易受侵蚀的农地而言, 如何优化耕作措施以减少农地水土流失则是 2 个区域均需重视的问题。

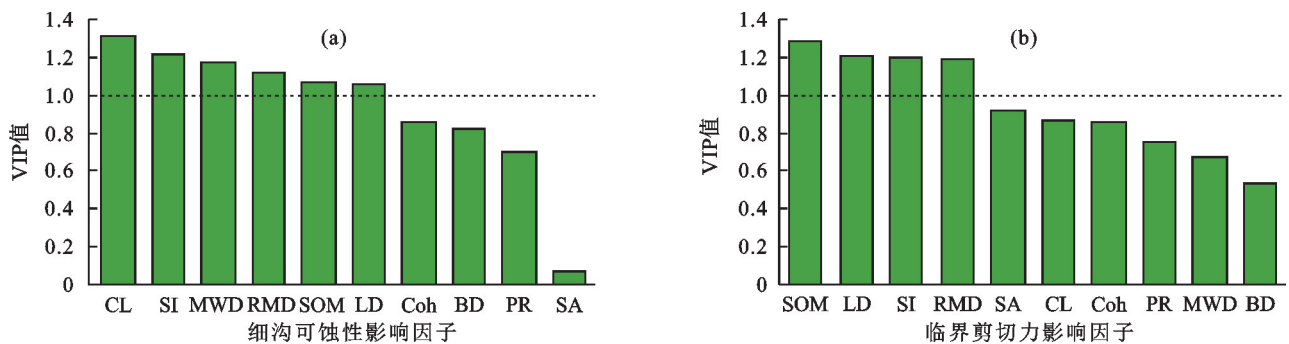


图 4 土壤理化性质和植被特性影响土壤侵蚀阻力的变量投影重要性 (VIP)

Fig.4 The Variable Importance in Projection(VIP) of soil physico-chemical properties and vegetation characteristics in influencing soil resistance

3.2 影响土壤侵蚀阻力的主要因素

土壤侵蚀阻力与土壤理化性质和植被特性密切相关。本研究结果表明, 在影响 K_r 的主要因子中, 黏粒、团聚体稳定性、有机质、根系质量密度和混入表土层的枯落物密度与 K_r 呈显著负相关, 粉粒与 K_r 呈显著正相关(图 3、图 4a), 这与 LI 等^[8]和 SUN 等^[17]的研究结果一致。LI 等^[8]研究表明, K_r 随粉粒的增加而增大, 随土壤黏结力、水稳性团聚体、有机质和根系质量密度的增加而减小; SUN 等^[17]研究发现, K_r 与混入表土层的枯落物密度呈显著负相关。本文发现, τ_c 的主要影响因子有土壤粉粒、有机质、根系质量密度和混入表土层的枯落物密度, 与其他土壤理化性质间无显著相关性(图 3、图 4b), 表明细沟可蚀性比土壤临界剪切力更能刻画不同土地利用类型间土壤侵蚀阻力的差异。

相关分析结果表明, K_r 与黏粒和砂粒呈显著负相关, 与粉粒呈显著正相关(图 3), 主要因为黏粒具有粒径小、比表面积大的特点, 通过胶结作用能促进团聚体发育, 提高团聚体稳定性, 进而增大土壤侵蚀阻力, 而当粉粒和砂粒较多时, 土壤颗粒间的黏结力较小, 更易被分离, 侵蚀阻力较小^[28]。BRYAN^[12]研究表明, 土壤团聚体及其稳定性是影响土壤侵蚀最重

要的土壤物理性质, 本文 K_r 与团聚体稳定性呈显著负相关(图 3), 与 GENG 等^[29]的研究结果一致。有机质显著影响土壤团聚体形成及其稳定性, 有机质越多, 团聚体越发育且稳定性越强, 土壤侵蚀阻力越大^[14]。本文结果表明, K_r 与根系质量密度及混入表土层的枯落物密度呈显著负相关关系, 说明根系和混合于表土中的枯落物能够有效增大土壤侵蚀阻力, WANG 等^[30]也得到类似结论。植被根系不仅能够通过物理捆绑和化学吸附作用提高土壤抗蚀性能, 而且当土壤表面出现冲刷切口时, 根系可以通过承担部分水流剪切力减小水流对土壤的冲击, 达到减缓土壤侵蚀的效果^[31]。通过雨滴击溅和径流冲刷作用混入表土层的枯落物不仅通过物理缠绕和黏附作用与土壤颗粒结合抵抗径流冲刷, 减少侵蚀量, 而且通过自身分解, 增加土壤有机质, 促进土壤团聚体形成, 提高团聚体稳定性, 改良土壤结构, 增强土壤侵蚀阻力^[7]。

4 结论

(1) 土地利用类型显著影响土壤侵蚀阻力。与农地相比, 草地、横向林带、林地、纵向林带和灌木的 K_r 分别降低 94.00%, 86.20%, 84.00%, 83.60% 和 71.60%; 而农地的 τ_c 分别比横向林带、林地、草地、灌

木和纵向林带提高 65.10%, 64.80%, 64.50%, 64.30% 和 63.90%。因此,对于研究区而言,草地减缓侵蚀效果最佳,减少农地水土流失至关重要。

(2)土地利用类型显著影响土壤理化性质和植被特性,是引起不同土地利用类型下土壤侵蚀阻力差异的主要原因。Spearman 相关性分析和 PLSR 分析结果表明, K_r 随土地利用类型的变化主要受土壤黏粒、粉粒、团聚体稳定性、根系质量密度、有机质和混入表土层枯落物密度的影响;而 τ_c 主要受土壤有机质、混入表土层枯落物密度、粉粒和根系质量密度的影响。其中, K_r 与黏粒、团聚体稳定性和有机质呈极显著负相关($p < 0.01$),与根系质量密度和混入表土层枯落物密度呈显著负相关($p < 0.05$),与粉粒呈极显著正相关($p < 0.01$); τ_c 与粉粒呈极显著负相关($p < 0.01$),与混入表土层枯落物密度呈极显著正相关($p < 0.01$),与有机质和根系质量密度呈显著正相关($p < 0.05$)。

参考文献:

- [1] 刘兴土, 阎百兴. 东北黑土区水土流失与粮食安全[J]. 中国水土保持, 2009(1): 17-19.
LIU X T, YAN B X. Soil erosion and food security in black soil region of Northeast China[J]. Soil and Water Conservation in China, 2009(1): 17-19.
- [2] 李发鹏, 李景玉, 徐宗学. 东北黑土区土壤退化及水土流失研究现状[J]. 水土保持研究, 2006, 13(3): 50-54.
LI F P, LI J Y, XU Z X. The status quo of black soil degradation and water and soil loss in Northeast China [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2006, 13(3): 50-54.
- [3] 郑粉莉, 张加琼, 刘刚, 等. 东北黑土区坡耕地土壤侵蚀特征与多营力复合侵蚀的研究重点[J]. 水土保持通报, 2019, 39(4): 314-319.
ZHENG F L, ZHANG J Q, LIU G, et al. Characteristics of soil erosion on sloping farmlands and key fields for studying compound soil erosion caused by multi-forces in mollisol region of Northeast China[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2019, 39(4): 314-319.
- [4] 刘宝元, 阎百兴, 沈波, 等. 东北黑土区农地水土流失现状与综合治理对策[J]. 中国水土保持科学, 2008, 6(1): 1-8.
LIU B Y, YAN B X, SHEN B, et al. Current status and comprehensive control strategies of soil erosion for cultivated land in the Northeastern black soil area of China[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2008, 6(1): 1-8.
- [5] 张光辉. 对土壤侵蚀研究的几点思考[J]. 水土保持学报, 2020, 34(4): 21-30.
ZHANG G H. Several ideas related to soil erosion research [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2020, 34(4): 21-30.
- [6] ZHANG G H, LIU B Y, LIU G B, et al. Detachment of undisturbed soil by shallow flow[J]. Soil Science Society of America Journal, 2003, 67(3): 713-719.
- [7] 卢进波, 李子健. 水力侵蚀的土壤分离能力影响因素述评[J]. 水土保持应用技术, 2022(2): 40-42.
LU J B, LI Z J. Review on factors affecting soil separation ability of hydraulic erosion[J]. Technology of Soil and Water Conservation, 2022(2): 40-42.
- [8] LI Z W, ZHANG G H, GENG R, et al. Rill erodibility as influenced by soil and land use in a small watershed of the Loess Plateau, China[J]. Biosystems Engineering, 2015, 129: 248-257.
- [9] 张光辉, 杨扬, 刘瑛娜, 等. 东北黑土区土壤侵蚀研究进展与展望[J]. 水土保持学报, 2022, 36(2): 1-12.
ZHANG G H, YANG Y, LIU Y N, et al. Research progress and prospect of soil erosion in black soil region of Northeast China[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022, 36(2): 1-12.
- [10] 郑世清, 周佩华. 土壤容重和降雨强度与土壤侵蚀和入渗关系的定量分析[J]. 中国科学院西北水土保持研究所集刊, 1988(1): 53-56.
ZHENG S Q, ZHOU P H. A quantitative study of relationship between soil density and soil erosion[J]. Memoir of Northwestern Institute of Soil and Water Conservation Academia Sinica, 1988(1): 53-56.
- [11] GHEBREIYESSUS Y T, GANTZER C J, ALBERTS E E, et al. Soil erosion by concentrated flow: Shear stress and bulk density[J]. Transactions of the ASAE, 1994, 37(6): 1791-1797.
- [12] BRYAN R B. Soil erodibility and processes of water erosion on hillslope[J]. Geomorphology, 2000, 32(3/4): 385-415.
- [13] 蔡强国. 坡面细沟发生临界条件研究[J]. 泥沙研究, 1998(1): 54-61.
CAI Q G. Study on critical conditions of rill occurrence on slope surface[J]. Journal of Sediment Research, 1998(1): 54-61.
- [14] 魏朝富, 高明, 谢德体, 等. 有机肥对紫色水稻土水稳性团聚体的影响[J]. 土壤通报, 1995, 26(3): 114-116.
WEI C F, GAO M, XIE D T, et al. Effect of organic fertilizer on water-stable aggregates in purple paddy soil[J]. Chinese Journal of Soil Science, 1995, 26(3): 114-116.
- [15] ZHANG G H, TANG K M, REN Z P, et al. Impact of grass root mass density on soil detachment capacity by concentrated flow on steep slopes[J]. Transactions of the ASABE, 2013, 56: 927-934.

- [16] 徐秋芳,钱新标,桂祖云.不同林木凋落物分解对土壤性质的影响[J].浙江林学院学报,1998,15(1):29-33.
XU Q F, QIAN X B, GUI Z Y. Effects of litter decomposition of different trees on soil properties[J]. Journal of Zhejiang A&F University, 1998, 15(1): 29-33.
- [17] SUN L, ZHANG G H, LIU F, et al. Effects of incorporated plant litter on soil resistance to flowing water erosion in the Loess Plateau of China[J]. Biosystems Engineering, 2016, 147: 238-247.
- [18] ZHANG G H, LIU G B, TANG K M, et al. Flow detachment of soils under different land uses in the Loess Plateau of China[J]. Transactions of the ASABE, 2008, 51(3): 883-890.
- [19] WANG B, ZHANG G H, SHI Y Y, et al. Soil detachment by overland flow under different vegetation restoration models in the Loess Plateau of China[J]. Catena, 2014, 116: 51-59.
- [20] 孙龙,张光辉,王兵,等.黄土高原不同退耕年限刺槐林地土壤侵蚀阻力[J].农业工程学报,2017,33(10):191-197.
SUN L, ZHANG G H, WANG B, et al. Soil erosion resistance of black locust land with different ages of returning farmland on Loess Plateau[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(10): 191-197.
- [21] 刘刚,邢婉君,焦剑.典型黑土区坡耕地次产流径流曲线数计算方法[J].中国水土保持科学(中英文),2021,19(1):28-34.
LIU G, XING W J, JIAO J. A method for calculating curve number of each runoff event on a sloping cropland in the Typical Black Soil Region[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2021, 19(1): 28-34.
- [22] WANG C S, ZHANG G H, ZHU P Z, et al. Spatial variation of soil functions affected by land use type and slope position in agricultural small watershed[J]. Catena, 2023, 225: e107029.
- [23] 张小真,宋媛,胡亚鲜.黑土层不同粒级结构下有机碳矿化的模拟研究[J].水土保持研究,2023,30(2):74-80.
ZHANG X Z, SONG Y, HU Y X. Simulation of organic carbon mineralization in black soil layers with different particle size structures[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(2): 74-80.
- [24] 苏子龙,张光辉,于艳.东北典型黑土区不同土地利用方式土壤水分动态变化特征[J].地理科学,2013,33(9):1104-1110.
SU Z L, ZHANG G H, YU Y. Soil moisture characteristic of different land use types in the typical black soil region of Northeast China[J]. Scientia Geographica Sinica, 2013, 33(9): 1104-1110.
- [25] 李骞,段兴武.利用黑土层厚度评价东北黑土区土壤生产力:以鹤北小流域为例[J].水土保持通报,2014,34(1):154-159.
LI A, DUAN X W. Productivity assessment for black soil region in northeastern China using black soil thickness: A case study of Hebei watershed[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2014, 34(1): 154-159.
- [26] TANG J, LIU G, XIE Y, et al. Annual variation of ephemeral gully erosion in a cultivated catchment[J]. Geoderma, 2021, 401: e115166.
- [27] 王库.植物根系对土壤抗侵蚀能力的影响[J].土壤与环境,2001,10(3):250-252.
WANG K. Effects of plant roots on soil anti-erosion[J]. Soil and Environmental Sciences, 2001, 10(3): 250-252.
- [28] SHERIDAN G J, SO H B, LOCH R J, et al. Estimation of erosion model erodibility parameters from media properties[J]. Soil Research, 2000, 38(2): e265.
- [29] 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.
- [30] WANG H, ZHANG G H, LI N N, et al. Soil erodibility influenced by natural restoration time of abandoned farmland on the Loess Plateau of China[J]. Geoderma, 2018, 325: 18-27.
- [31] 李振伟.黄土丘陵区小流域土壤分离能力空间变异[D].北京:中国科学院大学,2015.
LI Z W. Spatial variability of soil detachment capacity in a small watershed on the hilly Loess Plateau[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2015.