

北方土石山区小麦与玉米秸秆还田年限对 棕壤细沟侵蚀阻力的影响

张含玉¹, 李佳倩^{1,2}, 赵雅杰^{1,2}, 李靖江³, 刘志华², 方怒放^{3,4}, 刘前进¹

(1. 山东省水土保持与环境保育重点实验室, 临沂大学资源环境学院, 山东 临沂 276005; 2. 东北农业大学
资源环境学院, 哈尔滨 150030; 3. 西北农林科技大学水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100;
4. 中国科学院教育部水土保持与生态环境研究中心, 陕西 杨凌 712100)

摘要: [目的] 研究不同秸秆还田年限对细沟侵蚀阻力的影响, 可为秸秆还田坡地细沟侵蚀过程模拟与防治提供科学依据。[方法] 以秸秆还田 0 a(CK)、3~4 a(R1)、5~6 a(R2)、7~8 a(R3)、9~10 a(R4)、15 a(R5) 和 20 a(R6) 为研究对象, 通过土样采集与分析, 利用偏最小二乘回归分析, 明确秸秆还田条件下土壤侵蚀阻力的主控因子。[结果] 1) 随秸秆还田年限的增加, 细沟可蚀性(K_d) 呈先降低后增加再降低趋势, R2、R3、R5 和 R6 处理 K_d 均显著低于 CK 处理 [$170.38 \text{ cm}^3/(\text{N} \cdot \text{s})$]; 随秸秆还田年限的增加, 土壤临界剪切力(τ_c) 整体呈先增加后降低趋势, 表现为 $R1=R3>R2>CK>R4>R6>R5$, 但各处理间差异不显著。2) 与 CK 处理相比, 不同秸秆还田年限均可降低土壤体积质量(BD)、湿筛 $>0.25 \text{ mm}$ 团聚体($WG_{0.25}$) 和交换性钠离子质量分数, 增加土壤总孔隙度和水分质量分数(SWC), 但不同还田年限处理对土壤性质的影响具有差异。3) 土壤 K_d 随交换性镁离子、有机质、腐殖质、富里酸(FA)、胡敏素和交换性钙离子增加而降低, 随 $WG_{0.25}$ 的增加而增加; 土壤 τ_c 与 FA、干筛 $>0.25 \text{ mm}$ 团聚体和 BD 呈正比, 与水分质量分数呈反比。[结论] 各处理 K_d 和 τ_c 的差异表明, 秸秆还田 5~8 a 或 15~20 a 显著降低细沟可蚀性, 有助于提高土壤侵蚀阻力, 具有较好控制细沟侵蚀的效果。

关键词: 秸秆还田年限; 细沟可蚀性; 临界剪切力; 土壤理化性质

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2025)02-0074-08

Effects of the Duration of Wheat and Maize Straw Returning on Rill Erosion Resistance in Brown Soil in the Earth-rocky Mountainous Area of Northern China

ZHANG Hanyu¹, LI Jiaqian^{1,2}, ZHAO Yajie^{1,2}, LI Jingjiang³, LIU Zhihua², FANG Nufang^{3,4}, LIU Qianjin¹

(1. Shandong Provincial Key Laboratory of Soil and Water Conservation and Environmental Protection, College of Resources and Environment, Linyi University, Linyi, Shandong 276005, China; 2. College of Resources and Environment, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China; 3. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 4. The Research Center of Soil and Water Conservation and Ecological Environment, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Education, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: [Objective] Research on the effects of the duration of straw returning on rill erosion resistance can provide scientific evidence for rill erosion modeling and controlling in sloping farmland. [Methods] Taking straw returning durations of 0 years (CK), 3—4 years (R1), 5—6 years (R2), 7—8 years (R3), 9—10 years (R4), 15 years (R5), and 20 years (R6) as the study subjects, soil samples were collected and analyzed. Partial least

收稿日期: 2024-09-10

修回日期: 2024-10-09

录用日期: 2024-10-16

网络首发日期(www.cnki.net): 2024-11-13

资助项目: 山东省自然科学基金项目(ZR2023MD081); 国家自然科学基金项目(42377329, 42077061, 41701311); 山东省高等学校青年创新团队项目(2022KJ115, LUJIAORENZI20199)

第一作者: 张含玉(1987—), 女, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事土壤侵蚀研究。E-mail: zhanghanyu@lyu.edu.cn

通信作者: 刘前进(1979—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail: liuqianjin@lyu.edu.cn

http://stbxb.alljournal.com.cn

squares regression analysis was applied to identify the main controlling factors of soil erosion resistance under straw returning conditions. [Results] 1) With the increase of straw returning duration, rill erodibility (K_d) first decreased, then increased, and decreased again. The K_d values of R2, R3, R5, and R6 were significantly lower than that of CK [$170.38 \text{ cm}^3/(\text{N}\cdot\text{s})$]. With the increase in the duration of straw returning, soil critical shear stress (τ_c) showed a trend of first increasing and then decreasing, with the pattern of $R1=R3>R2>CK>R4>R6>R5$, although the differences among treatments were not significant. 2) Compared to CK, all straw returning treatments reduced soil bulk density (BD), the content of water-stable aggregates $>0.25 \text{ mm}$ ($\text{WG}_{0.25}$), and exchangeable sodium ions, while increasing total porosity and soil saturated moisture content (SWC), although the effects on soil properties varied across treatments. 3) Among all the main controlling factors of K_d , K_d decreased with the increases in exchangeable magnesium ions, soil organic matter, humic substances, fulvic acid (FA), humin, and exchangeable calcium ions, but increased with the increase in $\text{WG}_{0.25}$. Among all the main controlling factors of τ_c , τ_c was positively correlated with FA, dry-sieved aggregates $>0.25 \text{ mm}$, and BD, and negatively correlated with soil moisture content and SWC. [Conclusion] Straw returning for 5—8 years or 15—20 years significantly reduced K_d , helped to improve soil erosion resistance and can effectively control rill erosion.

Keywords: straw returning duration; rill erodibility; critical shear stress; soil physicochemical properties

Received: 2024-09-10

Revised: 2024-10-09

Accepted: 2024-10-16

Online(www.cnki.net): 2024-11-13

细沟侵蚀是坡面侵蚀的主要方式之一,其产沙量可占坡面总产沙量的50%~70%,因此细沟侵蚀防治是坡耕地水土保持的重要任务^[1-3]。细沟侵蚀是径流剪切力和土壤侵蚀阻力相互作用的结果,其中,土壤侵蚀阻力是土壤抵抗侵蚀能力的综合反应,由土壤质地、体积分数、团聚体等土壤性质决定^[4]。秸秆还田作为全球广泛应用的保护性耕作措施,可改善土壤结构、改变土壤有机质质量分数及体积质量等土壤性质^[1,5]。然而,秸秆还田对土壤性质与结构的影响具有长期累积效应,土壤性质变化程度因秸秆还田年限的不同具有差异^[1,6]。因此,明确秸秆还田年限对土壤性质的影响,揭示土壤侵蚀阻力响应规律,可为秸秆还田条件下土壤侵蚀防治提供科学依据。

土壤侵蚀阻力是WEPP(water erosion prediction project)、SWAT(soil and water assessment tool)等土壤侵蚀模型中刻画沟蚀过程的关键参数,与土壤体积质量、质地、团聚体数量及稳定性等土壤性质密切相关,常用细沟可蚀性和临界剪切力定量表征^[7]。细沟可蚀性反映土壤对侵蚀营力剥蚀和输沙的敏感性;土壤临界剪切力是表征土壤力学性质的一个重要指标,反映土体抵抗外力作用而发生剪切变形破坏的能力。细沟可蚀性与土壤体积质量呈负相关,而土壤临界剪切力则相反^[7-8]。土壤有机质可增加土壤颗粒间的黏着力和凝聚力,从而增加土壤临界剪切力,降低细沟可蚀性^[1,8]。随着土壤团聚体数量的增加及团聚体稳定性的增强,土壤临界剪切力变大,细沟可蚀性降低^[8]。土壤离子交换容量值越高,颗粒

聚集性和黏着性越大,土壤侵蚀阻力越大。土壤微生物分泌产生的有机酸、活性基团、高分子量有机物质等,可胶结土壤颗粒,提高土壤稳定性,增强土壤侵蚀阻力^[9]。

秸秆混入土壤后腐烂分解改变土壤有机质、团聚体稳定性、腐殖质组分等土壤化学性质,且未腐解的秸秆直接影响土壤结构、体积质量、孔隙度等土壤物理性质^[1,5,10]。因此,秸秆还田后土壤性质的变化受秸秆分解速率的影响,而分解速率因还田年限的不同具有差异性。随着秸秆还田年限的增加,0~50 cm土层土壤体积质量呈降低趋势,但秸秆还田 $>10 \text{ a}$ 后,土壤体积质量变化幅度显著降低^[11]。已有研究^[5,12]发现,短期秸秆还田对土壤团聚体和有机碳的影响不显著;但随着还田年限的增加,秸秆还田可显著增加土壤总有机碳质量分数($>5 \text{ a}$)、团聚体平均重量直径($>5 \text{ a}$)、几何平均直径($>3 \text{ a}$)和水稳性大团聚体数量($>3 \text{ a}$),显著降低分形维数($>5 \text{ a}$)。随着秸秆还田年限的增加,土壤中有有机质、全氮、碱解氮、速效磷、速效钾等养分显著增加^[11,13]。长期秸秆还田可增加土壤中胡敏酸和胡敏素质量分数,而富里酸质量分数较稳定^[14-15]。可见,秸秆还田对土壤性质的影响具有时间异质性,仍需加强不同还田年限对土壤性质影响的研究。

棕壤是在暖温带湿润半湿润大陆性季风气候的落叶阔叶林下发生较强淋溶作用和黏化作用形成的土壤。棕壤为地带性土壤,在中国主要分布在北方土石山区的辽东-山东半岛一带。北方土石山区棕壤

砾石质量分数高,土层浅薄,蓄水能力弱,水土流失严重。该区主要农作物有小麦、玉米、花生、地瓜等,其中,小麦-玉米轮作和花生-小麦-玉米轮作是该区广泛应用的种植制度,并且在小麦和玉米收获时普遍使用联合收割机,直接进行秸秆还田,其中小麦秸秆还田方式为覆盖,玉米秸秆还田通过旋耕掺混于耕层土壤。鉴于此,本文以北方土石山区不同小麦与玉米秸秆还田年限的棕壤农地为研究对象,通过土样采集与分析,研究不同秸秆还田年限对棕壤土壤性质及侵蚀阻力的影响,明确秸秆还田条件下土壤侵蚀阻力的主控因子,为秸秆还田下细沟侵蚀过程模拟与防治提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本试验以具有北方土石山区代表性的山东省临沂市沂水县(35.67°N, 118.69°E)和沂南县(35.45°N, 118.63°E)为研究区。研究区属于温带季风性气候,多年平均气温 13.4 °C,年平均降水量 890 mm,多集中在 6—9 月。土壤类型为棕壤,主要农作物为玉米、花生和小麦,已长期实施秸秆还田措施,可为试验的开展提供良好的条件。基于系统野外调查,结合课题组已有的资料,选取 7 个代表性秸秆还田年限进行试验,分别是秸秆还田 0 a(CK)、3~4 a(R1)、5~6 a(R2)、7~8 a(R3)、9~10 a(R4)、15 a(R5)和 20 a(R6),每个还田年限选取 2 个地块作为样地,共 14 个样地(表 1)。

表 1 样地基本信息

Table 1 Basic information on sampling sites

处理	还田年限/a	纬度(N)	经度(E)	海拔/ m	坡度/ (°)
CK	0	35°30'	118°38'	134	2.05
		35°41'	118°42'	142	3.37
R1	3~4	35°28'	118°37'	128	3.77
		35°40'	118°40'	145	4.32
R2	5~6	35°27'	118°38'	119	15.91
		35°40'	118°41'	157	3.58
R3	7~8	35°27'	118°38'	135	6.34
		35°41'	118°42'	143	10.19
R4	9~10	35°27'	118°38'	146	5.39
		35°41'	118°41'	153	4.58
R5	15	35°28'	118°37'	139	3.37
		35°41'	118°41'	150	3.11
R6	20	35°27'	118°38'	133	5.23
		35°41'	118°41'	146	11.33

1.2 样品采集与测定

试验样品采集与分析于 2022 年 6 月进行。在各

样地,按“S”形布设 4 个表层原状土样采样点,利用内径 14 cm、高 10 cm 的不锈钢环刀采集,用于细沟可蚀性和土壤临界剪切力测定,共采集 56 个原状土样。采样时,选择较为平整的土壤表面,并去除地表杂草、枯落物等。同时,在各采样点周围采集 1 个表层混合土样,并利用体积为 100 cm³的环刀采集原状土样,分别采集 56 个表层土样和原状土样。所有原状土用保鲜膜包裹,胶带密封并编号,所有样品带回室内进行分析。试验选取的所有地块均采用花生-小麦-玉米轮作种植制度,采样时所有地块均种植玉米。

利用自制的 JET 土壤侵蚀阻力测定仪,记录土样被冲刷的深度随时间的变化,借助迭代解法计算细沟可蚀性(K_d)与土壤临界剪切力(τ_c)。具体的仪器组成、测定方法等见相关研究^[5,16-18]。

利用体积 100 cm³环刀采集的原状土,根据浸水烘干法测定土壤体积质量(BD)、水分质量分数(SMC)、土壤总孔隙度(TP)、毛管孔隙度(CP)、通气孔隙度(AP)和饱和水分质量分数(SWC)。表层土样风干、过筛后,采用干筛法测定>0.25 mm 团聚体(DG_{0.25}),采用湿筛法测定>0.25 mm 水稳性团聚体(WG_{0.25}),采用重铬酸钾外加热法测定有机质(SOM),采用焦磷酸钠-氢氧化钠浸提液法测定土壤腐殖质(HS)、胡敏酸(HA)、富里酸(FA)和胡敏素(HM),采用原子吸收法测定交换性钙离子(Ca²⁺)和镁离子(Mg²⁺),采用火焰光度法测定交换性钾(K⁺)和钠(Na⁺)。

1.3 数据分析

利用 Microsoft Excel 2019 软件中迭代解法计算 K_d 和 τ_c 。利用 SIMCA 14.1 软件进行偏最小二乘回归分析,识别秸秆还田条件下土壤侵蚀阻力主控因子。利用 SPSS 17.0 软件进行相关性和显著性分析,并利用 Origin Pro 2021 软件绘图。

2 结果与分析

2.1 不同秸秆还田年限的细沟侵蚀阻力

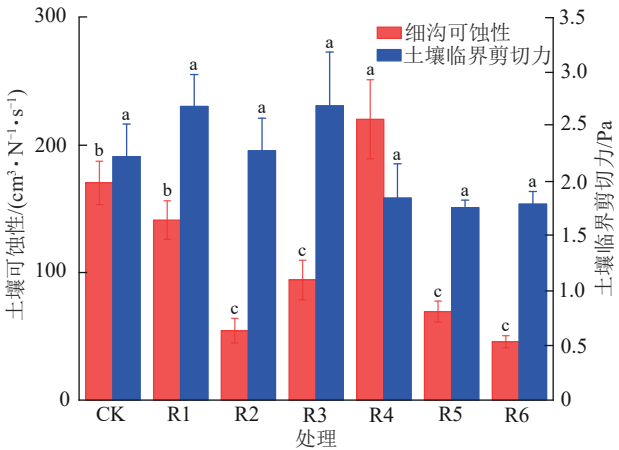
从图 1 可以看出,随着秸秆还田年限的增加, K_d 呈先降低后增加再降低趋势。其中,R4 处理的 K_d 最大,为 220.25 cm³/(N·s),显著高于其他处理($p < 0.05$)。CK 处理的 K_d 次之,为 170.38 cm³/(N·s)。与 CK 处理相比,R1 处理降低 K_d ,但差异不显著;而 R2、R3、R5 和 R6 处理显著降低 K_d ($p < 0.05$)。R6 处理 K_d 在所有处理中最低,为 45.79 cm³/(N·s)。

从图 1 还可看出,随着秸秆还田年限的增加, τ_c 整体呈先增加后降低趋势,但不同还田年限处理间 τ_c 无显著差异($p > 0.05$)。R1 和 R3 处理的 τ_c 相同,均为 2.69 Pa,且高于其他处理。CK 处理的 τ_c 为 2.23 Pa。

与CK处理相比,R2处理的 τ_c 增加2.0%,为2.28 Pa; R4、R5和R6均降低 τ_c ,分别为1.85、1.76、1.79 Pa。

2.2 不同秸秆还田年限土壤理化性质的差异

从表2和表3可以看出,与CK处理相比,不同秸秆还田年限均可降低土壤BD、WG_{0.25}和Na⁺质量分数,增加土壤TP和SWC。其中,R5处理土壤BD和WG_{0.25}显著低于其他处理,且其土壤TP、SWC、HA、Mg²⁺和K⁺最大,而WG_{0.25}和FA最低。与CK处理相比,R3和R4处理均降低土壤SOM、HS和HM,而其他处理则相反。在所有处理中,R2处理SOM、HS、FA和HM最高;R6处理SMC和CP最大,而土壤AP最小。相关分析结果(图2)表明,部分土壤理化性质间具有显著相关性,如BD与SMC、TP、WG_{0.25}、SOM、HS、HA、Ca²⁺等具有显著相关性;SMC与BD、TP、SOM、Ca²⁺、Mg²⁺等具有显著相关性。



注:图柱上方同一变量的不同字母表示不同处理间差异显著($p<0.05$)。

图 1 不同秸秆还田年限细沟侵蚀阻力
Fig. 1 Rill erosion resistance of different years of straw returning

表 2 不同秸秆还田年限土壤物理性质

Table 2 Soil physical properties of different years of straw returning

处理	BD/ (g·cm ⁻³)	SMC/%	TP/%	CP/%	AP/%	SWC/%	DG _{0.25} /%	WG _{0.25} /%
CK	1.59a	16.48b	40.04b	29.93b	10.11a	25.28b	50.34a	79.79a
R1	1.55a	15.36b	41.64b	33.40a	8.24b	27.09a	51.68a	73.18a
R2	1.48a	24.30a	44.31a	38.27a	6.04b	30.06a	54.17a	66.32a
R3	1.54a	12.87c	42.03b	28.49b	13.54a	27.91b	57.17a	67.30a
R4	1.48a	17.60b	44.33a	34.26a	10.07a	30.39a	49.91a	74.56a
R5	1.36b	23.00a	48.55a	37.69a	10.86a	36.11a	54.48a	52.32b
R6	1.45a	25.96a	45.13a	39.22a	5.91b	31.43a	52.13a	65.95a

注:BD为土壤体积质量;SMC为土壤水分质量分数;TP为土壤总孔隙度;CP为土壤毛管孔隙度;AP为土壤通气孔隙度;SWC为土壤饱和水分质量分数;DG_{0.25}为干筛>0.25 mm团聚体;WG_{0.25}为湿筛>0.25 mm团聚体;同列不同小写字母表示不同处理间差异显著($p<0.05$)。

表 3 不同秸秆还田年限土壤化学性质

Table 3 Soil chemical properties of different years of straw returning

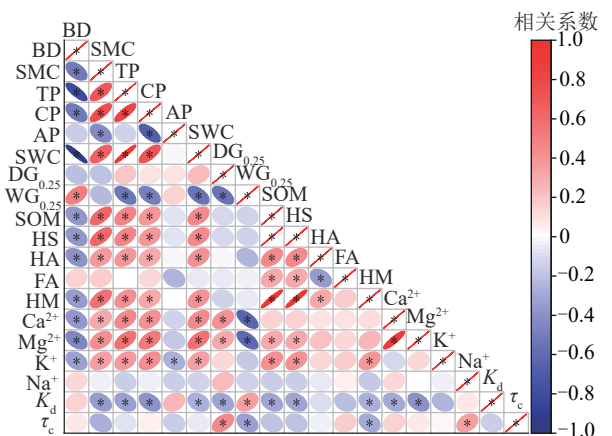
处理	SOM/ (g·kg ⁻¹)	HS/ (g·kg ⁻¹)	HA/ (g·kg ⁻¹)	FA/ (g·kg ⁻¹)	HM/ (g·kg ⁻¹)	Ca ²⁺ / (mol·kg ⁻¹)	Mg ²⁺ / (mol·kg ⁻¹)	K ⁺ / (mol·kg ⁻¹)	Na ⁺ / (mol·kg ⁻¹)
CK	13.24b	6.98b	1.44b	1.08b	4.57a	11.53a	1.39b	0.31a	0.17a
R1	14.59b	7.70ab	1.98a	1.61a	4.10a	3.75c	0.94b	0.58a	0.05b
R2	18.78a	9.90a	1.38b	1.95a	6.57a	10.79a	2.03a	0.80a	0.08b
R3	12.50b	6.59b	1.08b	1.56a	3.95a	16.24a	2.50a	0.25a	0.05b
R4	12.97b	6.84b	1.32b	1.13ab	4.39a	7.87b	0.85b	0.53a	0.07b
R5	17.63a	9.30a	2.19a	0.95b	6.16a	12.20a	2.70a	0.90a	0.05b
R6	18.71a	9.87a	1.68a	1.81a	6.38a	13.80a	2.40a	0.42a	0.05b

注:SOM为土壤有机质;HS为土壤腐殖质;HA为胡敏酸;FA为富里酸;HM为胡敏素;Ca²⁺为交换性钙离子;Mg²⁺为交换性镁离子;K⁺为交换性钾离子;Na⁺为交换性钠离子;同列不同小写字母表示不同处理间差异显著($p<0.05$)。

2.3 秸秆还田条件下细沟侵蚀阻力主控因子识别

由细沟侵蚀阻力与土壤理化性质之间的相关分析可知,K_d与SMC、TP、CP、SWC、DG_{0.25}、WG_{0.25}、SOM、HS、HM、Ca²⁺和Mg²⁺呈显著相关; τ_c 与DG_{0.25}、WG_{0.25}、HM和Na⁺呈显著相关。鉴于部分土壤理化性质间具有显著相关性,本研究利用偏最

小二乘回归分析土壤理化性质对细沟侵蚀阻力的影响,以消除原始自变量(土壤理化性质)的相关性,并用变量投影重要性指标(variable importance for the projection, VIP)和回归系数分别表示土壤理化性质对细沟侵蚀阻力(因变量)的影响程度和方向。



注:BD为土壤体积质量;SMC为土壤水分质量分数;TP为土壤总孔隙度;CP为土壤毛管孔隙度;AP为土壤通气孔隙度;SWC为土壤饱和水分质量分数;DG_{0.25}为干筛>0.25 mm团聚体;WG_{0.25}为湿筛>0.25 mm团聚体;SOM为土壤有机质;HS为土壤腐殖质;HA为胡敏酸;FA为富里酸;HM为胡敏素;Ca²⁺为交换性钙离子;Mg²⁺为交换性镁离子;K⁺为交换性钾离子;Na⁺为交换性钠离子;K_d为细沟可蚀性;τ_c为临界剪切力;*表示 $p\leq 0.05$ 。下同。

图 2 土壤理化性质与侵蚀阻力相关性

Fig.2 Correlation of soil physicochemical properties with soil resistance

表 4 秸秆还田条件下细沟侵蚀阻力偏最小二乘回归最优模型

Table 4 Summary of partial least squares regression model for rill erosion resistance under the condition of straw returning

因变量	成分	对自变量变异性解释的百分比/%	对自变量变异性解释的累积百分比/%	对因变量变异性解释的百分比/%	对因变量变异性解释的累积百分比/%	Q^2_{cum}
K_d	1	54.1	54.1	72.0	72.0	0.59
	2	18.8	72.9	20.4	92.4	0.77
	3	9.7	82.6	5.4	97.8	0.80
	4	7.2	89.8	2.0	99.8	0.97
τ_c	1	54.7	54.7	50.6	50.6	0.21
	2	12.2	66.9	37.5	88.1	0.34
	3	13.6	80.5	8.7	96.8	0.64
	4	6.2	86.7	3.1	99.8	0.83

注: Q^2_{cum} 为偏最小二乘回归模型中主成分累积可解释的因变量方差比。

本研究选取的土壤理化性质均对细沟侵蚀阻力有影响,但是影响的重要性具有差异,其中VIP<1的土壤理化性质被认为是对细沟侵蚀阻力的影响较小。因此,进一步的分析仅针对VIP>1的土壤理化性质。在 K_d 偏最小二乘回归最优模型中,VIP值最高的为Mg²⁺(VIP=1.36),其次为DG_{0.25}(VIP=1.25)、SOM(VIP=1.16)和HS(VIP=1.16),以及FA(VIP=1.09)、HM(VIP=1.05)、WG_{0.25}(VIP=1.05)和Ca²⁺(VIP=1.02)(图3)。回归系数的正负号表明, K_d 与Mg²⁺、DG_{0.25}、SOM、HS、FA、HM和Ca²⁺呈正比,与WG_{0.25}呈反比。在 τ_c 偏最小二乘回归最优模型中,VIP>1的土壤理化性质有FA(VIP=1.61)、DG_{0.25}(VIP=1.40)、BD(VIP=1.12)、SWC(VIP=1.04)和SMC(VIP=1.03)(图4)。 τ_c 随土壤

从秸秆还田条件下细沟侵蚀阻力偏最小二乘回归最优模型参数(表4)可知, K_d 和 τ_c 偏最小二乘回归模型均提取4个偏最小二乘回归成分。在 K_d 偏最小二乘回归最优模型中,第1成分对土壤理化性质(自变量)和 K_d (因变量)变异性解释的百分比分别为54.1%和72.0%;第2、3、4成分对土壤理化性质变异性解释的百分比分别为18.8%、9.7%和7.2%,对 K_d 变异性解释的百分比分别为20.4%、5.4%和2.0%。偏最小二乘回归最优模型4个成分对 K_d 变异性的解释的累计百分比和累积可解释的因变量方差比分别为99.8%和0.97。在 τ_c 偏最小二乘回归最优模型中,第1成分对土壤理化性质变异性解释的百分比为54.7%,第2、3、4成分对土壤理化性质变异性解释的百分比分别为12.2%、13.6%和6.2%。第1、2、3、4成分对 τ_c 变异性的解释的百分比分别为50.6%、37.5%、8.7%和3.1%。偏最小二乘回归最优模型4个成分对 τ_c 变异性的解释的累计百分比和累积可解释的因变量方差比分别为99.8%和0.83。

FA、GD_{0.25}和BD的增大而增大,随SWC和SMC的增大而减小。

3 讨论

土壤 K_d 与 τ_c 可综合反映土壤性质所决定的土壤抵抗侵蚀的能力。利用偏最小二乘回归分析秸秆还田条件下土壤理化性质对细沟侵蚀阻力的影响发现, K_d 的主控因子为Mg²⁺、DG_{0.25}、SOM、HS、FA、HM、WG_{0.25}和Ca²⁺(图3)。团聚体作为土壤结构的基本单元,其数量和稳定性均可影响土壤结构^[19]。土壤团聚体数量越多,稳定性越强,土壤侵蚀阻力越大。因此,DG_{0.25}与 K_d 呈负相关。Mg²⁺可与土壤有机质和胶体颗粒表面上的负电荷结合,形成稳定的桥黏土矿物结构,增强土壤团聚体的稳定性^[20]。Ca²⁺与土壤中的负离子(如有机物、矿物等)交换时,可在

土壤中形成稳定的电荷平衡,促进团聚体的形成^[21]。SOM可促进团聚体发育并增强其稳定性,进而降低 K_d ^[22-23]。土壤HS作为SOM的主要成分,包括HA、FA和HM。FA和HM可与土壤中阳离子结合,促进土壤的团聚体形成,并增强团聚体稳定性^[23-24]。因

此, K_d 与 Mg^{2+} 、SOM、HS、FA、HM和 Ca^{2+} 呈负相关。而 K_d 与 $WG_{0.25}$ 呈正相关,可能是由于秸秆还田条件下湿筛 >0.25 mm团聚体的胶结物质主要为根、菌丝等临时性胶结剂^[23,25],土壤颗粒间胶结力较弱,土壤可蚀性较大。

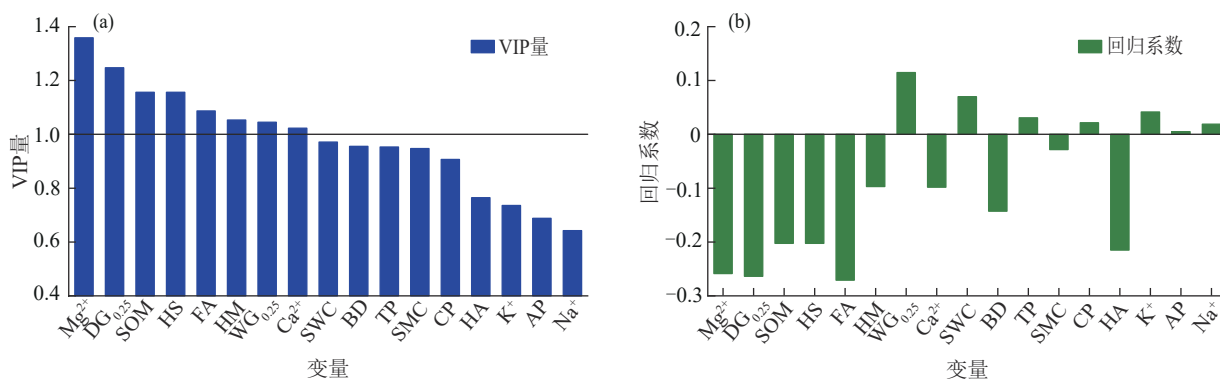


图3 K_d 偏最小二乘回归最优模型中土壤理化性质的变量投影重要性指标(VIP)和回归系数

Fig. 3 The variable importance for the projection and regression coefficient of soil physicochemical properties in partial least squares regression model for rill erodibility

对土壤 τ_c 影响较大的土壤理化性质为FA、DG_{0.25}、BD、SWC和SMC(图4),且土壤 τ_c 与FA、DG_{0.25}和BD呈正比。已有大量研究^[1,7,22,26]表明,土壤体积质量越大,越不易被分离,土壤 τ_c 随体积质量的增大而增大;土壤有机质增加,可促进大团聚体发育,增强团聚体稳

定性,提高土壤 τ_c 。当SWC较高时,土壤颗粒间的黏结力和摩擦力降低,土壤 τ_c 减小^[27-28]。当土壤水分质量分数达到饱和,SMC较高时,土壤中截留空气体积减小,内部应力发生变化,减小土壤抗剪强度,降低土壤 τ_c ^[29-30]。因此,土壤 τ_c 随SWC和SMC的增大而减小。

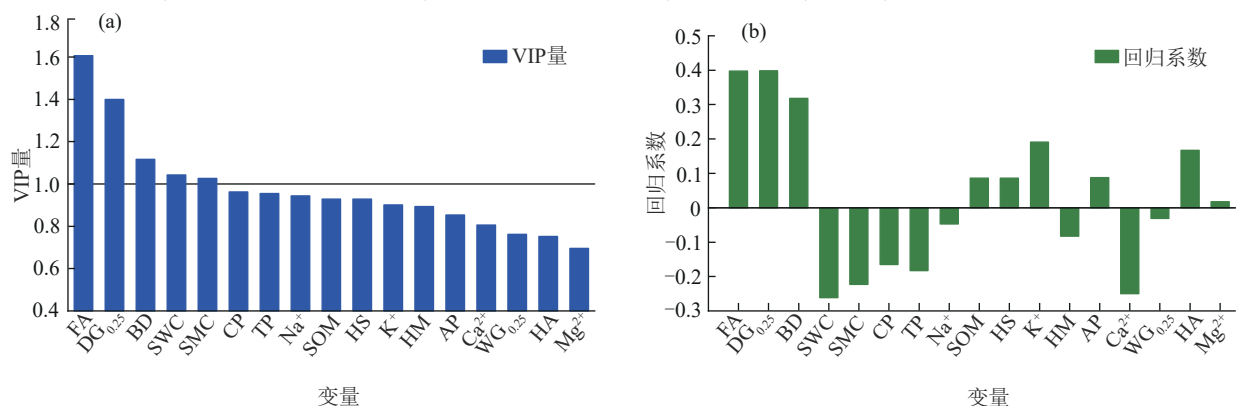


图4 τ_c 偏最小二乘回归最优模型中土壤理化性质的变量投影重要性指标(VIP)和回归系数

Fig. 4 The variable importance for the projection and regression coefficient of soil physicochemical properties in partial least squares regression model for critical shear stress

秸秆混入土壤后经腐烂分解可改变土壤性质,与CK处理相比,不同年限秸秆还田处理均可降低土壤BD、WG_{0.25}和Na⁺,增加土壤TP和SWC(表2、表3)。但随着秸秆还田年限的增加,土壤CP、SOM、HS、HA、FA和K⁺呈先增加后降低趋势,而土壤HM、Ca²⁺和Mg²⁺呈波动变化。张翰林等^[12]研究发现,秸秆还田条件下土壤大团聚体(>0.25 mm)数量、平均质量直径和几何平均直径显著提升,且随着还田年限的增加而增加;慕平等^[13]研究表明,玉米全量秸秆还田可显著增加0~30 cm耕层土壤有机质质量分数,且随着还田年限的延长增幅越大,秸秆还田

9 a土壤有机质可增加103%;但秸秆还田可降低0~50 cm土层土壤体积质量,且随着还田年限增加,下降幅度越大。已有研究结果间的差异及不同秸秆还田年限对土壤理化性质影响的差异,可能与秸秆分解程度、秸秆残留、土壤质地和气候等有关。不同秸秆还田年限处理对土壤理化性质的影响不同,导致不同秸秆还田年限下土壤 K_d 与 τ_c 具有差异。本研究发现,与CK处理相比,仅有R4处理显著提高土壤 K_d ,而其他秸秆还田年限处理均降低 K_d 。原因可能是R4相比于CK处理降低土壤Mg²⁺、DG_{0.25}、SOM、HS、FA、HM和Ca²⁺;土壤 τ_c 随着秸秆还田年限的增

加呈先增加后降低趋势(图 2)。其中,R1 和 R3 处理的 τ_c 相同,均为 2.69 Pa,且高于 CK 处理,原因可能是 R1 和 R3 处理降低 SMC,增加 $DG_{0.25}$ 和 FA。各处理间 τ_c 无显著差异,但 R2、R3、R5 和 R6 处理显著降低 K_d ,表明秸秆还田 5~8 a 或者 15~20 a 土壤侵蚀阻力较大,具有较好控制细沟侵蚀的效果。

4 结 论

1) 不同年限秸秆还田处理均可降低土壤 BD、 $WG_{0.25}$ 和 Na^+ ,增加土壤 TP 和 SWC。R4 处理的土壤 K_d 显著高于其他处理($p < 0.05$),且 R2、R3、R5 和 R6 处理土壤 K_d 显著低于 CK 处理。随着秸秆还田年限的增加, τ_c 整体上呈先增加后降低趋势,各处理土壤 τ_c 无显著差异。R1 和 R3 处理的 τ_c 相同,且高于其他处理。

2) 土壤 K_d 的主控因子有 Mg^{2+} 、 $DG_{0.25}$ 、SOM、HS、FA、HM、 $WG_{0.25}$ 和 Ca^{2+} ,且土壤 K_d 随 Mg^{2+} 、SOM、HS、FA、HM 和 Ca^{2+} 增加而降低,随 $WG_{0.25}$ 的增加而增加。而对土壤 τ_c 影响较大的土壤理化性质为 FA、 $DG_{0.25}$ 、BD、SWC 和 SMC,且土壤 τ_c 随 FA、 $DG_{0.25}$ 和 BD 的增大而增大,随 SWC 和 SMC 的减小而降低。

3) 与 CK 处理相比,R4 处理降低土壤 Mg^{2+} 、 $DG_{0.25}$ 、SOM、HS、FA、HM 和 Ca^{2+} ,导致 R4 处理显著提高土壤 K_d 。而 R1 和 R3 处理降低 SMC,增加 $DG_{0.25}$ 和 FA,进而提高土壤 τ_c 。整体来看,秸秆还田 5~8 a 或 15~20 a,土壤侵蚀阻力较大,具有较好控制细沟侵蚀的效果。

参考文献:

- [1] 张光辉,杨扬,刘瑛娜,等. 秸秆还田阻控黑土侵蚀机理及效应[J]. 土壤与作物,2022,11(2):115-128.
ZHANG G H, YANG Y, LIU Y N, et al. Mechanisms and benefits of straw return in mitigating black soil erosion[J]. Soils and Crops, 2022, 11(2): 115-128.
- [2] 李朋飞,黄珂瑶,胡晋飞,等. 黄土丘陵沟壑区细沟发育形态的变化及其与侵蚀产沙的关系[J]. 农业工程学报, 2022, 38(18): 92-102.
LI P F, HUANG K Y, HU J F, et al. Morphological development of rills and its relationship with hillslope erosion in the hilly and gully Loess Plateau[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2022, 38(18): 92-102.
- [3] 和继军,宫辉力,李小娟,等. 细沟形成对坡面产流产沙过程的影响[J]. 水科学进展,2014,25(1):90-97.
HE J J, GONG H L, LI X J, et al. Effects of rill development on runoff and sediment yielding processes[J]. Advances in Water Science, 2014, 25(1): 90-97.
- [4] KNAPEN A, POESEN J. Soil erosion resistance effects on rill and gully initiation points and dimensions[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2010, 35(2): 217-228.
- [5] GUO J J, LIU Q J, ZHANG H Y, et al. Temporal variations in rill erosion resistance following incorporated wheat straw returning combined with nitrogen and polyphenols[J]. Catena, 2022, 217: e106502.
- [6] ARNHOLD S, LINDNER S, LEE B, et al. Conventional and organic farming: Soil erosion and conservation potential for row crop cultivation[J]. Geoderma, 2014, 219: 89-105.
- [7] 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 N, ZHANG G H, XING S K. 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.
- [8] 孙宝洋,吴志广,李占斌,等. 冻融对土壤分离能力及侵蚀阻力的影响[J]. 农业工程学报, 2020, 36(11): 57-65.
SUN B Y, WU Z G, LI Z B, et al. Effects of freeze-thaw on soil detachment capacity and erosion resistance[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(11): 57-65.
- [9] HAM S M, CHANG I, NOH D H, et al. Improvement of surface erosion resistance of sand by microbial biopolymer formation[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2018, 144(7): e06018004.
- [10] ZHAO X, YUAN G, WANG H, et al. Effects of full straw incorporation on soil fertility and crop yield in rice-wheat rotation for silty clay loamy cropland[J]. Agronomy, 2019, 9(3): e133.
- [11] 张聪,慕平,尚建明. 长期持续秸秆还田对土壤理化特性、酶活性和产量性状的影响[J]. 水土保持研究, 2018, 25(1): 92-98.
ZHANG C, MU P, SHANG J M. Effects of continuous returning corn straw on soil chemical properties, enzyme activities and yield trait[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2018, 25(1): 92-98.
- [12] 张翰林,郑宪清,何七勇,等. 不同秸秆还田年限对稻麦轮作土壤团聚体和有机碳的影响[J]. 水土保持学报, 2016, 30(4): 216-220.
ZHANG H L, ZHENG X Q, HE Q Y, et al. Effect of years of straw returning on soil aggregates and organic carbon in rice-wheat rotation systems[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2016, 30(4): 216-220.
- [13] 慕平,张恩和,王汉宁,等. 不同年限全量玉米秸秆还田对玉米生长发育及土壤理化性状的影响[J]. 中国生态农业学报, 2012, 20(3): 291-296.
MU P, ZHANG E H, WANG H N, et al. Effects of

- continuous straw return to soil on maize growth and soil chemical and physical characteristics[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2012, 20(3): 291-296.
- [14] 刘军, 景峰, 李同花, 等. 秸秆还田对长期连作棉田土壤腐殖质组分含量的影响[J]. 中国农业科学, 2015, 48(2): 293-302.
- LIU J, JING F, LI T H, et al. Effects of returning stalks into field on soil humus composition of continuous cropping cotton field [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2015, 48(2): 293-302.
- [15] SONG X Y, LIU S T, LIU Q H, et al. Carbon sequestration in soil humic substances under long-term fertilization in a wheat-maize system from north China[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2014, 13(3): 562-569.
- [16] 郭金金, 方怒放, 刘前进, 等. 小麦秸秆粉碎还田配施氮肥与多酚对土壤侵蚀阻力的影响[J]. 水土保持学报, 2021, 35(4): 122-128.
- GUO J J, FANG N F, LIU Q J, et al. Effects of incorporated wheat straw returning combined application with nitrogen and polyphenols on soil erosion resistance[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021, 35(4): 122-128.
- [17] CUI H, LIU Q J, ZHANG H Y, et al. Long-term manure fertilization increases rill erosion resistance by improving soil aggregation and polyvalent cations [J]. Catena, 2023, 223: e106909.
- [18] XU X L, WEI W L, ZHANG H Y, et al. A 44-year balanced fertilizer application affected rill erosion resistance by changing humus, aggregates, and polyvalent cation [J]. Catena, 2021, 244: e106272.
- [19] 史志华, 宋长青. 土壤水蚀过程研究回顾[J]. 水土保持学报, 2016, 30(5): 1-10.
- SHI Z H, SONG C Q. Water erosion processes: A historical review [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2016, 30(5): 1-10.
- [20] GHERNAOUT D, GHERNAOUT B. Sweep flocculation as a second form of charge neutralization: A review [J]. Desalination and Water Treatment, 2012, 44(1/2/3): 15-28.
- [21] GALICIA A E, ESCALONA Y, OOSTENBRINK C, et al. Soil organic matter stabilization at molecular scale: The role of metal cations and hydrogen bonds [J]. Geoderma, 2021, 401: e115237.
- [22] GENG R, ZHANG G H, MA Q H, et al. Soil resistance to runoff on steep croplands in eastern China [J]. Catena, 2017, 152: 18-28.
- [23] 卢金伟, 李占斌. 土壤团聚体研究进展[J]. 水土保持研究, 2002, 9(1): 81-85.
- LU J W, LI Z B. Advance in soil aggregate study [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2002, 9(1): 81-85.
- [24] KOU B, HUI K, MIAO F, et al. Differential responses of the properties of soil humic acid and fulvic acid to nitrogen addition in the North China Plain [J]. Environmental Research, 2022, 214: e113980.
- [25] TISDALL J M, OADES J M. Organic matter and water-stable aggregates in soils [J]. Journal of Soil Science, 1982, 33(2): 141-164.
- [26] 王俊, 李强, 任禾, 等. 吉林省西部不同耕作模式下秸秆还田土壤团聚体特征[J]. 植物营养与肥料学报, 2020, 26(4): 603-612.
- WANG J, LI Q, REN H, et al. Soil aggregate characteristics under different tillage and in situ straw returning methods in western Jilin, China [J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2020, 26(4): 603-612.
- [27] SU Z, XIONG D, ZHANG J, et al. Variation in the vertical zonality of erodibility and critical shear stress of rill erosion in China's Hengduan Mountains [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2019, 44(1): 88-97.
- [28] KNAPEN A, POESEN J, GOVERS G, et al. Resistance of soils to concentrated flow erosion: A review [J]. Earth-Science Reviews, 2007, 80(1/2): 75-109.
- [29] 李敏, 张含玉, 刘前进. 含水量、坡度和流量对土壤分离能力的影响[J]. 水土保持学报, 2018, 32(5): 35-40.
- LI M, ZHANG H Y, LIU Q J. Effects of soil moisture content, slope gradient and flow discharge on soil detachment capacity [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2018, 32(5): 35-40.
- [30] ZHANG Y, ZHONG X, LIN J, et al. Effects of fractal dimension and water content on the shear strength of red soil in the hilly granitic region of southern China [J]. Geomorphology, 2020, 351: e106956.
- [31] MCGRATH G S, HINZ C, SIVAPALAN M. Modeling the effect of rainfall intermittency on the variability of solute persistence at the soil surface [J]. Water Resources Research, 2008, 44(9): e2007wr006652.
- [32] TIAN K, HUANG C H, WANG G Q, et al. Quantification of chemical transport processes from the soil to surface runoff [J]. Journal of Environmental Quality, 2013, 42(1): 83-93.
- [33] GAO B, TODD WALTER M, STEENHUIS T S, et al. Rainfall induced chemical transport from soil to runoff: Theory and experiments [J]. Journal of Hydrology, 2004, 295(1/2/3/4): 291-304.
- [34] QIAN X H, ZHAO L S, FANG Q, et al. Rill formation and evolution caused by upslope inflow and sediment deposition on freshly tilled loose surfaces [J]. Soil and Tillage Research, 2024, 235: e105868.

(上接第73页)