DOI: 10.20103/j.stxb.202403010426

张思靖,马建业,李占斌,李鹏,陈亚军,吕小永,李海波,代启安.黄土丘陵沟壑区粉砂壤土崩解性能变化及其影响因子试验研究——以王茂沟小流域为例.生态学报,2025,45(1):91-102.

Zhang S J, Ma J Y, Li Z B, Li P, Chen Y J, Lü X Y, Li H B, Dai Q A.Experimental study on the change and influencing factors of the disintegration performance of silty loam soil in loess hilly and gully region: a case study of Wangmaogou small watershed. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(1):91-102.

黄土丘陵沟壑区粉砂壤土崩解性能变化及其影响因子 试验研究

——以王茂沟小流域为例

张思靖1,马建业1,李占斌1,*,李 鹏1,2,陈亚军3,吕小永3,李海波4,代启安4

1 西安理工大学省部共建西北旱区生态水利国家重点实验室,西安 710048

2 西安理工大学旱区生态水文与灾害防治国家林业局重点实验室,西安 710048

3 中国有色金属工业西安勘察设计研究院有限公司,西安 710061

4 栾川龙宇钼业有限公司,洛阳 471500

摘要:土壤崩解是土壤可蚀性的重要表征指标,在阐明土壤侵蚀机理和构建侵蚀模型方面起着重要作用。尽管目前有关植物根系对土壤崩解的研究取得了一定的进展,但是土壤崩解受到根系和土壤理化性质的双重影响,而有关根系和土壤理化性质对土壤崩解的协同作用仍缺乏深入量化研究。以王茂沟小流域5个土地利用下的原状土样作为研究对象,基于崩解试验测定土壤崩解参数,并分析其与根系和土壤理化性质的相关性及主控因子,量化土壤崩解的变化机制,得到如下结论:(1)综合崩解速率、崩解比速率和崩解量三个崩解指标,不同土地利用下,土壤的崩解性均呈现出草地<坡耕地<梯田<果园<坝地;(2)利用 VPA分析和偏最小二乘路径分析,解释了土壤理化性质和根系特征及其协同作用对土壤崩解性的贡献并分析其量化关系。结果表明,含根土体中,根系对土壤崩解的直接效应强于间接效应,其直接贡献为16%,较土壤理化性质(16.4%)偏低,但较两者的协同效应偏高 62.5%。不同土地利用下,土壤崩解性能的变化主要以土壤理化性质直接影响为主;(3)Spearman 相关分析和 RDA分析表明,与土壤崩解相关性最高的根系因子为RLD,土壤因子为粉粒,所有环境因子中以RLD 的效应最强。不同土地利用下,影响土壤崩解相关性最高的根系因子为RLD,土壤因子为粉粒,所有环境因子中以RLD 的效应最强。不同土地利用下,影响土壤崩解性能的主控因子也存在差异。研究结果可为黄土丘陵沟壑区生态建设条件下的土壤崩解研究和侵蚀机理的解析提供参考,对于黄土高原生态脆弱区的生态修复和生态功能的维持具有重要意义。

关键词:黄土丘陵沟壑区;不同土地利用;植物根系;土壤理化性质;土壤崩解

Experimental study on the change and influencing factors of the disintegration performance of silty loam soil in loess hilly and gully region: a case study of Wangmaogou small watershed

ZHANG Sijing¹, MA Jianye¹, LI Zhanbin^{1,*}, LI Peng^{1,2}, CHEN Yajun³, LÜ Xiaoyong³, LI Haibo⁴, DAI Qi'an⁴

1 State Key Laboratory of Eco-hydraulics in Northwest Arid Region of China, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China

2 Key Laboratory of National Forestry Administration on Ecological Hydrology and Disaster Prevention in Arid Regions, Xi'an University of Technology, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China

3 China Nonferrous Metal Industry Xi'an Survey and Design Institute Co., Ltd., Xi'an 710061, China

收稿日期:2024-03-01; 网络出版日期:2024-09-24

⁴ Luanchuan County Longyu Molybdenum Industry Co., Ltd., Luoyang 471500, China

基金项目:国家自然科学基金项目(42307452,42330719,U2040208);教师博士科研启动经费(451124007)

^{*} 通讯作者 Corresponding author.E-mail: zhanbinli@126.com

Abstract: Soil disintegration serves as a crucial indicator of soil erosion erodibility, significantly informing the elucidating of soil erosion mechanisms and the development of erosion models. Despite advancements in research regarding the impact of plant root on soil disintegration, the process is subject to dual influences from both root systems and soil physicochemical properties. However, comprehensive quantitative studies on the synergistic effects of these factors on soil disintegration remains elusive. This study utilized undisturbed soil samples under five different land use patterns within the Wangmaogou watershed as the research object. By conducting disintegration experiments, the soil disintegration parameters are determined. The analysis was conducted to explore the correlation and identify significant factors influencing these parameters in relation to root systems and soil physicochemical properties. Eventually, this quantitative approach aimed to elucidate the mechanisms driving changes in soil disintegration. The findings revealed the following conclusions: (1) The comprehensive analysis of disintegration rate, disintegration ratio rate, and the amount of disintegration revealed a distinct trend in soil vulnerability across land use patterns. grasslands exhibited the lowest degree of disintegration, followed by sloping arable land, then terraced fields, with orchards demonstrating greater disintegration characteristics, and dam lands showing the highest degree of disintegration. (2) Using soil physicochemical properties and root characteristics as categorical variables, this study utilized variance partitioning analysis (VPA) and partial least squares path analysis (PLS-PM) to explicate the contributions of soil physicochemical properties and root characteristics, along with their synergistic effects on soil disintegration. The quantitative relationships among these factors were also analyzed. Findings revealed that within root-laden soil, the direct effect of roots on soil disintegration surpassed the indirect effects, accounting for a 16% contribution, a figure marginally lower by 2.4% compared to the direct contribution of soil physicochemical properties, but this was 62.5% greater than the combined synergistic effect of the two factors. Under different land use patterns, The alterations in soil disintegration capability were primarily driven by the direct influences of soil physicochemical properties. (3) The Spearman correlation analysis and Redundancy Analysis (RDA) revealed that among the root factors, RLD (root length density) exhibited the highest correlation with soil disintegration, while silt content was the most significant soil factor. Among all environmental factors, the effect of RLD was the most pronounced. Under different land use patterns, the principal determinants that govern the soil disintegration properties are found to be distinct. These research results can provide reference for the study of soil disintegration and the elucidation of erosion mechanisms under ecological construction conditions in the loess hilly and gully region, which possess significant implications for ecological restoration and the maintenance of ecological functions in the ecological fragile regions of the Loess Plateau.

Key Words: loess hilly and gully region; different land use; plant root systems; soil physicochemical properties; soil disintegration

土壤崩解在土工试验规范中称为湿化,指的是土体浸入水中发生碎裂、崩塌、解体的现象,是土壤侵蚀发生的必要条件之一^[1]。土壤崩解是评估土壤抗侵蚀能力的重要指标,也是土壤侵蚀模型的重要输入参数^[2]。 已有研究表明,土壤崩解受到多种因素的影响,如:干湿交替^[3]、温度^[4]、土壤性质^[5]、植物根系^[6]、冻融循环^[7]等。

作为土壤崩解的重要影响因素,目前土壤理化性质相关方面的研究已经开展了大量工作。以往的研究表明,土壤崩解与土壤含水率和机械组成密切相关^[5,8],随着土壤含水率的增加,土壤崩解性能呈降低的趋势;随着黏粒含量越大,土壤崩解率越小。潘贤斌等^[9]通过试验也得出崩解时间和崩解率随着颗粒粒径的增大 而减小的结论。罗美^[10]对赣江源保护区的研究结果也表明,土壤进行团聚体崩解研究得到土壤团聚体初始 粒径越小,土壤崩解的破坏越小。当土壤被静水完全浸没时,结构稳定性较好的土壤表现出色的抗崩解能力, 其土壤颗粒之间的黏结力能抵御压缩空气产生的较强排斥力和水化作用,进而降低了土壤的崩解程度。综上 所述,土壤崩解与质地、有机质、团聚体等土壤理化性质密不可分。 植物根系在土壤结构稳定性方面起着不可忽视的作用,不仅通过在土壤基质中的穿插、缠绕、加筋等作用 形成团聚体的骨架^[11],结合根系网络的固结作用加强土壤基质,还可以通过分泌的胶结物质与土壤颗粒相互 作用,增加土壤的有机质和水稳性团聚体含量,改善土壤结构^[12],减轻土壤崩解。肖海等^[13]和王桂尧等^[14] 均表明,植物根系能够显著增强土壤的抗崩解性能。有效根密度、根重密度、根长是影响土壤崩解的主要根系 特征^[6,15-16]。但是根系并不是单独存在的,而是与土壤复合成整体,通过协同作用共同抵抗静水崩解作用。 部分学者也对土壤理化性质与根系的协同作用进行了量化分析^[6],发现土壤理化性质和根系的协同作用会 影响土壤崩解,但以往的大多数研究都集中在单一因素对土壤崩解的影响上,土壤崩解的主导因素尚不一致。 迄今为止,由于根土之间复杂的相互作用,根土复合体条件下,土壤崩解的变化机理仍不明晰。因此,需要大 量的试验数据来揭示影响土壤崩解的主控因子和变化机制。

黄土高原是世界上水土流失最严重的地区之一,生态严重恶化^[17]。自从退耕还林还草工程开展以来,土 壤侵蚀得到了有效控制,生态环境逐渐恢复^[18]。在此过程中,大部分的耕地转变为林草地,土地利用发生了 很大变化^[19]。而不同土地利用下,土壤性质以及植物群落类型都存在差异^[20],从而导致土壤崩解性的不同。 因此,本研究采集王茂沟小流域5个不同土地利用下的根土复合体样品作为研究对象,探究根系和土壤理化 性质对土壤崩解性能的影响因子和变化机制,对于进一步解析植被恢复条件下土壤崩解机制以及生态恢复措 施研究均具有重要意义,为黄土丘陵沟壑区生态恢复背景下土壤生态功能和水土保持的进一步研究提供科学 依据。

1 材料和方法

1.1 研究区域

研究区位于陕西省绥德县的王茂沟小流域(110°20'26"E—110°22'46"E,37°34'13"N—37°36'03"N),属黄 土丘陵沟壑区第一副区(图1),是无定河左岸一级支流韭园沟中游左岸的一条支沟,流域面积 5.97km²,地形 破碎,坡陡沟深、地貌复杂,属典型的黄土丘陵沟壑区特征。王茂沟小流域属半干旱大陆季风性气候,多年平 均降水量 513mm,多年平均气温 10.2℃,降水量较少且分布不均,降水集中在 7、8、9 月,气候特征与黄土丘陵 沟壑区较为相似。流域位于黄绵土分布的中心区域(图1),土壤以黄绵土为主,土壤质地为粉质壤土^[21]。主 要土地利用类型为坡耕地(22.32%)、梯田(15.36%)、坝地(6.24%)、草地(36.51%)、果园(10.42%)、林地 (9.15%)(图1)^[22]。王茂沟小流域位于黄土丘陵沟壑区的中心地带,为水土流失保持试验点,经过多年生态 恢复和水土流失治理,形成草地为主的生态格局,但该区域仍依然保留着一定比例的农地,破碎的地形与较为 集中的降雨是该区域水土流失的原动力,属于水土流失重点恢复区域。众多学者普遍认为其是黄土丘陵沟壑 区具有典型代表性的水土流失治理小流域,流域中普遍性的水土流失问题及与黄土丘陵沟壑区较为相似的水 土流失特征使其在黄土丘陵沟壑区水土流失治理方面具有显著的示范效应[23]。王茂沟小流域不仅在地理位 置上具有明显代表性,更是在地貌形态、气候、土壤类型及质地、水土流失特征以及土地利用等方面展现出黄 土丘陵沟壑区的典型特征。王茂沟小流域的土壤崩解性能变化及影响因子的试验研究在黄土丘陵沟壑区的 水土流失控制方面具有重要的科学价值,丰富了黄土丘陵沟壑区土壤抗蚀性的转化过程及特征的理解。植被 恢复和土壤管理措施能有效提高土壤的抗蚀能力[24],本研究进一步验证并细化了这些措施在黄土丘陵沟壑 区的具体应用效果,为黄土丘陵沟壑区及相似土壤质地区域的生态修复提供了实践指导和实际应用价值。

1.2 样地取样

通过遥感数据和实地调查相结合的方法,本研究在王茂沟小流域选取了五种具有代表性的土地利用类型 作为研究对象:草地、梯田、坡耕地、坝地和果园(表1)。无定河流域主要的土地利用类型为草地、耕地、裸地 和人造地表为主^[25]。黄土丘陵沟壑区主要土地利用类型包括农地(坡耕地、梯田、坝地、果园)、草地、林地、 未利用土地^[26-27],分别占 37.6%、45.6%、11.5%、1.3%。因此,王茂沟小流域的主要土地利用类型比例与黄土 丘陵沟壑区及无定河流域较为相似,本次选取了在王茂沟小流域和黄土丘陵沟壑区较大比例的几种土地利用



图1 王茂沟小流域基本信息

Fig.1 Basic information of Wangmaogou small watershed

类型不仅体现了王茂沟小流域广泛存在的土地管理模式和独特的农业、生态系统特征,而且在黄土丘陵沟壑 区具有一定的代表性。通过分析王茂沟小流域不同土地利用模式对土壤侵蚀和土壤崩解的影响,为王茂沟小 流域的土地利用决策和水土保护策略提供科学指导,也为黄土丘陵沟壑区在类似土地利用条件下区域的侵蚀 控制和生态恢复提供了参考和实践基础。其中草地包括2个样地,主要植物种分别为冰草(Agropyron cristatum)、苜蓿(Medicago Sativa);坡耕地和梯田的主要作物均为谷子(Setaria italica);坝地的主要作物为玉 米(Zea mays);果园的主要树种为苹果树(Malus Mill)。为了减少环境因素对于实验结果的干扰,本次研究选 取的实验坡面的海拔、坡度、坡向、土壤类型等因素尽可能相似,对于所有选定的实验坡面,土壤均为黄绵土, 土壤质地为粉质壤土,确保数据的准确性,为进行有效的对比研究提供可靠基础。黄绵土在黄土丘陵沟壑区 具有较高的覆盖比例,为47.2%。其覆盖区域通常遭受严重的水土流失危害,对于研究黄土丘陵沟壑区水土 流失及土壤侵蚀等环境问题至关重要^[28-29]。因此选择粉质壤土作为试验土壤能为研究黄土丘陵沟壑区土壤 水土保持措施有效性提供实证基础。 17

19

12

5

2

1期

采样点

Sampling point

梯田 Terrace

坝地 Dam land

坡耕地 Slope farmland

冰草草地 Agropyron cristatum grassland

苜蓿草地 Medicago sativa grassland

表1 采样点基本信息							
Table 1 Basic information of sampling points							
坡度 Slope/(°)	海拔 Elevation/m	主要植物类型 Main plant type	根类型 Root type				

1119

1119

1079

1022

997

冰草

苜蓿

谷子

谷子

玉米

须根系

直根系

须根系

须根系

须根系

果园 Orchard 苹果树 1023 直根系 粉质壤土 4 每个坡面呈"S"型排列布置6个采样点,采样点布设方法示意图见图2,即从采样点中选取起点和终点, 其他点按照图中路径规划的"S"形进行设置。该布设方法有助于更全面覆盖整个坡面,提高采样的准确性和 代表性。在每个坡面,使用体积为100cm3的圆形环刀分0-5cm和6-10cm两层采集0-10cm土层的原状土 样进行土壤崩解试验,为确保数据的可靠性,每个样地采集24个样品,每个深度层均采集两个样品作为重复。 所得数据通过计算平均值和标准差来减少随机误差,每个深度的样品均值作为该深度的代表性数据。经过误 差分析和异常值分析显示,整体数据在可接受范围内,表明重复测量具有一致性。通过单因素方差分析进一 步验证了实验设计的合理性,确保了研究结果的准确性和可对比性。对于梯田、坡耕地、坝地和草地,采集时 需剪去植株的地上部分,去除结皮和枯落物。对于果园,在果树基部 50cm 处采集原状土样。同时采用直径 为 10cm,高度为 5cm 的圆形环刀采集每个采样点的根土复合体样品,用于测定该样点的根系含量,每个样点 采集2个样品作为重复。

在每个采样点采集一些额外土样来测定土壤理化性质,额外土样的质地与采样点的土壤一致,均为黄绵 土。利用体积为100cm³的圆形环刀采集土样,用于测定土壤容重和饱和含水率,每个深度采集2个样品。

1.3 土壤崩解装置与试验方法

崩解装置主要由数显式推拉力计、崩解桶、崩解架等组件构成(图2)。本次试验方法属于拉力计法,相较 于传统方法,装置包含自动化功能,具有稳定性和复现能力,能同步显示测试过程,简化数据处理步骤,保障试 验数据的可靠性^[30]。数显式推拉力计精度为 0.01 N,崩解装置经过多次重复试验,试验误差控制在±2%以 内,显示出良好的重现性和稳定性^[7]。

试验开始前,将数显推拉力计归零,然后将环刀中土壤放置在与崩解架相连的5cm×5cm的金属网格上, 悬挂在数显式推拉力计上,记录崩解土壤入水前推拉力计读数。推拉力计与笔记本电脑连接,记录土样的受 力(N),同时记录时间。试验开始后,将土壤缓慢置于静水中观测,同时开始同步测量软件,每0.1s记录一次 推拉力计读数,待读数不再发生变化时停止试验。

为了客观反映试验土壤的崩解状况,采用土壤崩解速率、土壤比速率和崩解量作为衡量土壤崩解性的指标。

崩解速率 v^[31]:

$$v_0 = \frac{f_{i1} - f_{i2}}{g\Delta t}$$

式中, v_0 为修正前土壤崩解速率(g/min); Δt 为崩解时间。

$$k = \frac{(1+\beta)\rho_s}{(1+\beta)\rho_s - 1}v = kv_0$$

式中, k 为修正系数; β 为土壤饱和含水率; ρ_s 为国际通用土壤密度, 为 2.65g/cm³; v 为修正后土壤崩解速率 (g/min)。

崩解比速率 $V_i^{[32]}$:

土壤质地

Soil texture

粉质壤土

粉质壤土

粉质壤土

粉质壤土

粉质壤土

$$B_i = \frac{M_i}{M} \times 100\%$$

式中, B_t 为崩解指数(%); M_t 为 t 时刻的累积土壤崩解量(g); M 为崩解土样总重(g)。

$$V_t = \frac{B_t}{t}$$

式中, V_t 为崩解比速率(%/s);t为崩解时间(s)。



图 2 试验过程示意图 Fig.2 Schematic diagram of the experimental process 1 为笔记本电脑;2 为数显式推拉力计;3 为崩解架;4 为崩解桶

1.4 土壤理化性质和根形态特征的测定

1.4.1 土壤理化性质指标的测定

土壤机械组成采用激光粒度仪(Malvern Mastersizer 2000)测定;将体积为 100cm³的圆形环刀采集的土样 在水位接近 5cm 的条件下浸润 12 h 后称量,以测定土壤饱和含水率;采用重铬酸钾外加热法测定土壤有机 质;采用湿筛法测定>0.25mm 粒径土壤团聚体的含量;上述指标均测定 3 次作为重复。团聚体平均质量直径 (MWD)的计算公式如下:

$$\mathbf{MWD} = \sum_{i=1}^{n} W_i d_i$$

式中, W_i 为各径级范围内土壤团聚体质量占土壤干重的百分比(%), d_i 为团聚体的平均直径(mm)。

1.4.2 根系形态特征的测定

将采集回来的原状土样进行冲洗,并将样品放置于 1.0mm 的的筛网上反复冲洗,洗出并收集样品中的根 系,并去除杂物。对于植物根系,用万深 LA-S 系列植物图像分析仪得到根长数据。将扫描完的根系重新收 集,在 65℃下烘干 24h,然后称量干根质量。通过计算得到根重密度和根长密度,具体公式如下:

$$RWD = \frac{RW}{V}$$
$$RLD = \frac{RL}{V}$$

式中,RWD 为根重密度(kg/m³),RLD 为根长密度(km/m³),RM 为干根质量(kg),RL 为根长(km),V 为取样 器容积(m³)。

1.5 数据处理与分析

采用 Excel 2020 和 SPSS 26.0 软件进行数据处理和统计分析,并使用 Origin 2024 进行 Spearman 相关分析 检验和绘图。使用 SPSS 进行单因素方差分析,并进行邓肯事后检验。利用 Canoco 5.0 进行冗余分析和 RStudio 的 vegan 包进行 VPA 分析。通过 smartPLS 建立偏最小二乘路径模型(PLS-PM)。

45 卷

2 结果与分析

1期

2.1 不同土地利用类型的土壤理化性质和根系特征

不同土地利用类型下土壤理化性质如表 2 所示, 坝地的容重为 1.35g/cm³, 显著高于果园、梯田、坡耕地、草地(P<0.05),其中,梯田的容重最低,为 1.23g/cm³。在>0.25mm 团聚体含量方面,呈现与容重相反的变化规律, 坝地(4.35%)显著低于果园、梯田、坡耕地、草地(P<0.05),其中,梯田最高,为 11.22%。对于 MWD, 梯田最大,为 0.48mm, 而草地和坝地显著较小,分别为 0.28mm、0.25mm(P<0.05)。此外,梯田的有机质含量最高,为 4.31g/kg, 坝地最低,为 2.94g/kg,梯田、果园、草地显著高于坝地(P<0.05), 而坡耕地与其他土地利用之间没有显著差异。草地、坡耕地、梯田、果园的饱和含水率差异不大, 但坝地显著较低, 仅为 37.01% (P<0.05),可能与其较高的容重有关。在土壤机械组成方面, 黏粒和粉粒含量表现出梯田>坝地>坡耕地>草地>果园的趋势, 而砂粒的趋势相反。

表 2 原状土样的基本性质 Table 2 Basic properties of undisturbed soil samples 有机质 平均质量 >0.25mm 容重 饱和含水率 土地利用类型 团聚体 砂粒 Volumetric 直径 MWD 黏粒 粉粒 Organic Saturated water Land use patterns weight/ matter/ Mean weight >0.25mm Clay/% Silt/% Sand/% content/% (g/cm) (g/kg) diameter/mm Aggregate/% 草地 Grassland $1.27{\pm}0.04{\rm b}$ $3.98 \pm 1.47a$ 40.72±2.41a $0.28{\pm}0.12\mathrm{b}$ $8.19 \pm 5.08a$ 11.77 56.94 31.30 坡耕地 Slope farmland $1.25 \pm 0.07 \mathrm{b}$ 29.90 3.53±0.69ab 40.00±2.21a $0.49 \pm 0.30a$ $10.40 \pm 5.48a$ 11.50 58.60 11.22±2.08a 梯田 Terrace $1.23{\pm}0.05{\rm b}$ $4.31 \pm 1.00a$ $40.79 \pm 1.74a$ 0.48±0.±0.37a 12.35 59.52 28.14 果园 Orchard $1.24{\pm}0.06{\rm b}$ $4.17 \pm 1.82a$ $40.90 \pm 2.73 a$ 0.55±0.37a 11.06±6.65a 10.43 56.08 33.49 $0.25 \pm 0.08 \text{b}$ $1.35 \pm 0.09a$ 2.94±0.95b $37.01{\pm}2.88\mathrm{b}$ $4.35 \pm 2.05 \mathrm{b}$ 58.98 29.39 坝地 Dam land 11.63

表中不同小写字母代表差异显著性(P<0.05)

不同土地利用下根系特征如表 3 所示。草地的 RLD 含量显著高于其他土地利用类型, RLD 草地含量为 7.206km/cm², 果园最低, 为 1.574km/cm², 相较于果园、坝地、坡耕地、梯田, 草地的 RLD 显著偏高 78.16%、 77.19%、44.62%、44.57%(P<0.05); 同样, 草地的 RWD 含量仍是五种土地利用类型中最高的, 为 1.575kg/cm³, 果园最低, 为 0.381kg/cm³, 草地的 RWD 较果园、坝地、梯田、坡耕地显著偏高 72.00%、67.11%、55.11%、 46.54%(P<0.05), 果园、坝地以及梯田、坡耕地之间差异不显著。

Table 3 Root characteristics of undisturbed soil samples							
土地利用类型 Land use patterns	根重密度 RWD Root weight density/ (kg/cm)	根长密度 RLD Root length density/ (km/cm)	土地利用类型 Land use patterns	根重密度 RWD Root weight density/ (kg/cm)	根长密度 RLD Root length density/ (km/cm)		
草地 Grassland	1.575±1.14a	7.206±4.90a	果园 Orchard	$0.381 \pm 0.34c$	$1.574 \pm 0.84 \mathrm{c}$		
坡耕地 Slope farmland	$0.842 \pm 0.62 \mathrm{b}$	$3.991{\pm}1.77\mathrm{b}$	坝地 Dam land	$0.518 \pm 0.43 c$	$1.644 \pm 1.51 \mathrm{bc}$		
梯田 Terrace	$0.707{\pm}0.52\mathrm{b}$	$3.994{\pm}1.80{\rm bc}$					

表 3 原状土样的根系特征

2.2 土壤崩解性能分析

不同土地利用类型的土壤崩解速率、崩解比速率和崩解量较为相似(图 3),综合三个指标,可以得到黄土 丘陵沟壑区不同土地利用的崩解能力为:草地<坡耕地<梯田<果园<坝地。其中,草地在崩解速率(0.31g/ min)崩解比速率(0.004%/s)和崩解量(9.59g)方面均呈现出最低值,坝地最高,分别为1.72g/min、0.021%/s 和51.40g。草地的崩解速率较坡耕地、梯田、果园、坝地显著偏低19.48%、53.65%、74.18%、82.07%,崩解比速 率显著偏低18.60%、54.41%、73.46%、80.59%,崩解量显著偏低16.00%、51.62%、72.20%、81.34%(P<0.05), 而坡耕地、草地、梯田的崩解指标之间差异不显著。





2.3 土壤崩解变化机制分析

以土壤理化性质和根系特征为分组变量,利用 VPA^[33]分析解释了土壤理化性质和根系特征及其联合作 用对土壤崩解性的独立贡献(图4)。结果表明,土壤理化性质对土壤崩解性能的解释效应为16.4%(P< 0.001),略高于根系特征的解释效应,为16.0%(P<0.001),其中,两者的协同效应占总方差的比例较小,为 6.3%(P<0.001)。综上,土壤崩解性能对土壤理化性质的变化表现出较高的敏感度,在此过程中,土壤理化性 质和根系的协同作用相对较弱。



图 4 土壤理化性质和根系特征对土壤崩解性能的相对贡献图

Fig.4 The relative contribution of soil physical and chemical properties and root characteristics to soil disintegration performance

运用偏最小二乘回归方法建立概念路径模型(图5),以定量分析土壤理化性质及根系特征对土壤崩解的 量化关系。分析结果表明,土壤理化性质对土壤崩解性能起到了极显著的负向作用(P<0.001),路径系数为 -0.433,其中,粉粒和饱和含水率为模型的有效外部载荷。根系特征对土壤崩解性能同样极为显著(P< 0.001),路径系数为-0.385,RLD 为有效外部载荷。然而,根系特征通过影响土壤理化性质对土壤崩解性能的 间接效应为 0.213,并未表现出显著性(P=0.111),表明根系特征主要通过直接作用影响土壤崩解。因此,土 壤理化性质对土壤崩解的直接效应高于根系,土壤崩解 性能的变化主要以土壤理化性质直接影响为主,其中, 粉粒、饱和含水率为影响崩解性能的重要土壤理化性质 指标。

运用同样的分析方法,对不同土地利用下的土壤崩 解的变化机制差异性进行研究。结果表明,草地、果园 和农地的土壤崩解过程主要都受土壤理化性质的直接 驱动。对于草地,植物根系大多通过影响土壤理化性质 间接作用于土壤崩解,其协同效应对土壤崩解的贡献为 23.6%,相较之下,根系的直接效应微乎其微,仅占 0.01%。对于果园,植物根系对于土壤崩解的直接和间 接影响极为有限,其中,直接效应仅为0.03%,协同效应



图 5 土壤理化性质、根系特征和土壤崩解性能的路径模型 Fig.5 Path model of soil physical and chemical properties, root characteristics and soil disintegration propertiese

低至 0.02%。对于坡耕地、坝地,崩解变化机制与整个小流域的类似,植物根系通过直接作用影响土壤崩解,协同效应在此过程几乎忽略不计。

2.4 土壤崩解因子分析

Spearman 相关分析发现(图6),土壤崩解性能指标(崩解速率、崩解比速率、崩解量)与有机质、黏粒、粉粒、砂粒、>0.25mm 团聚体含量、RLD、MWD 和饱和含水率呈极显著相关(P<0.01),其中,RLD 与土壤崩解性能相关系数最高。通过 RDA 分析(图6)进一步阐释土壤理化性质、根系与土壤崩解的关系。结果表明,RLD 对土壤崩解性的影响效应最大(22.6%),其他因子影响相对较低:容重(15.5%)、粉粒(2.3%)、有机质(1.0%)、黏粒(0.9%)、RWD(0.7%)、MWD(0.3%)、饱和含水率(0.2%)、>0.25mm 粒径的团聚体(0.1%)。

结合 2.3 的研究结果,进一步推断出 RLD 和粉粒是影响土壤崩解性能的主要环境因子。虽然土壤理化 性质对崩解的效应较强,但是因子独立分析时,表现为 RLD 的效应强于其他土壤因子,可能是 RWD 较低的效 应所致。采用相同的分析方法对不同土地利用类型下土壤崩解的影响因子进行探究,发现草地的主要环境因 子为 RLD 和粉粒,果园的主要环境因子为容重和饱和含水率,农地的主要环境因子为 RLD 和>0.25mm 团聚 体含量。不同土地利用下,不同的土壤理化性质和根系特征的差异,进而影响土壤崩解过程,导致主要环境因 子的不一致。

3 讨论

本研究中,不同土地利用下,土壤的崩解性能均呈特定规律:草地<坡耕地<梯田<果园<坝地。随着土壤 中根系密度的增加,土壤的崩解性能得到显著改善^[14]。较高的 RLD 和 RWD 含量表征土体中具有发达的根 系,其构建的根系网络有效串联了土体,有效增强了根系的锚固作用和胶结团聚作用,提供额外的根系内聚 力,显著增强了土壤的抗剪强度和稳定性^[14]。其次,较高的根系密度,也会影响土壤水力特性,且根系的吸水 能力高度依赖于其根长密度^[34],人渗水通过根系大量进入土壤中孔隙,孔隙中残留气体大量减少。在浸水过 程中,水分较难进入土体,土体不易发生破坏。因此,草地相较于其他土地利用类型表现出较低的崩解性能。 而较低的根系密度无法提供足够的机械加固作用,土壤颗粒建连接减弱,且伴随着较少有机质的输入,土壤团 聚体减少,土壤结构变得松散和不稳定。此外,稀疏根系的土壤水分保持能力较差,孔隙度降低,水分流失较 快,进一步降低了土壤结构的稳定性,增加了土壤侵蚀潜力^[35]。此外,坝地较高的崩解性能不仅与其较低的 根系密度有关,且可能与其较高的容重和较低的有机质含量密切相关。高容重表征土壤颗粒紧密排列,孔隙 较小,同时,较低的有机质含量导致土壤结构稳定性较差,在水力作用下更容易发生崩解。土壤的理化性质和 根系特征共同决定了不同土地利用类型下土壤崩解性能的差异性。

本研究发现在黄土丘陵沟壑区的土壤崩解过程中,粉粒含量和 RLD 被确认为主导因素,与 Huang 等^[15]、



RDA1 (43.5%)

图 6 土壤崩解性能的影响因子冗余分析

Fig.6 Redundancy analysis of influencing factors of soil disintegration performance

**表示元素在 P<0.01 级别上显著相关,*表示 P<0.05 级别上显著相关;RWD:根重密度;RLD:根长密度;MWD:平均质量直径

徐少君等^[36]和段青松等^[37]的崩解实验研究发现相符。前两个研究指出在有根条件下,根长密度能较好的表 征土壤崩解性能^[15,36];而段青松等^[37]在无根条件下揭示了粉粒在预测土壤崩解性方面的潜力。无根条件 下,粉粒作为土壤质地的关键组成部分,其较大的比表面积,提高了土壤颗粒与水分子之间的吸附作用^[38]。 吸附作用不仅提升了土壤的含水量,还增强了土壤塑性^[39],导致土壤基质吸力和渗水量的减少,减缓了土壤 在浸水过程中的水动力作用。同时,粉粒在土壤颗粒间形成桥接作用,提升了土壤的内聚力,降低了土壤的崩 塌潜力^[40]。有根条件下,RLD 能很好的表征根系在土体中的密稠度和交织穿插能力^[36],对土壤表层团聚体 的发展有积极的影响^[41]。进一步的研究表明,RLD 能够解释土壤团聚体稳定性和土壤抗侵蚀性能的变 化^[42],因此能较好的表征土壤崩解。当土体浸入水中,随着水分的渗透,土体吸水逐渐饱和,土壤颗粒间的桥 接作用和胶结键在水分子作用下逐渐削弱或断裂^[40],此时,植物根系通过其物理缠绕进一步抵抗水力作用, 稳定剩余土体状态,因此根系因子的效应强于其他因子。

土壤理化性质和植物根系通过协同效应同时影响土壤崩解,植物根部会影响靠近根系的土壤,产生根际效应,改善土壤结构,减少土壤侵蚀^[43]。具体而言,植物根系在土壤基质中形成根系网络,通过扭曲、交织和

加固来包裹土壤颗粒,改变土壤的机械特性^[12]。其次,根系分泌物作为有机物的持续来源,将土壤中细颗粒 粘合成更稳定的大团聚体^[44]。在水文特性方面,根系能改变土壤的入渗率和孔隙结构,且作为优势水流通 道,影响土壤水分分布^[45],持水能力的改善,会影响浸水过程中水分的运动途径和速度,降低大孔隙内空气压 力,有助于减少水分对土壤结构的破坏作用^[6]。本研究中,因子独立分析时,RLD 对土壤崩解的效应最强,而 RWD 效应相对较低。当对环境因子进行整体分析时,可能会减弱根系效应的总体表达,导致其对土壤崩解的 贡献被低估。本次研究解释有限,需要进一步扩展数据类型,并深入构建和分析土壤崩解模型,解析土壤崩解 的理论机制。

4 结论

(1)不同土地利用下,土壤的崩解性能均呈现出草地<坡耕地<梯田<果园<坝地。(2)利用 VPA 分析和 偏最小二乘路径分析,土壤崩解性能的变化主要以土壤理化性质(16.4%)直接影响为主,根系(16.0%)的影 响相对较弱,同时两者的协同效应较小。这一发现在不同的土地利用类型中也得到了证实,土壤理化性质是 影响土壤崩解性的主要因素。(3)通过 Spearman 相关分析和冗余分析发现,粉粒和 RLD 均为影响土壤崩解 性能变化的主导因子,其中,RLD 的效应最强。此外,土地利用类型的不同,影响土壤崩解性能的主控因子也 存在差异。

参考文献(References):

- [1] 蒋定生,李新华,范兴科,张汉雄.黄土高原土壤崩解速率变化规律及影响因素研究.水土保持通报,199,15(3):20-27.
- [2] Wang L, Zuo X F, Zheng F L, Wilson G V, Zhang X J, Wang Y F, Fu H. The effects of freeze-thaw cycles at different initial soil water contents on soil erodibility in Chinese Mollisol region. Catena, 2020, 193: 104615. Wang L, Zuo X F, Zheng F L, Wilson G V, Zhang X J, Wang Y F, Fu H
- [3] Liu W P, Song X Q, Huang F M, Hu L N. Experimental study on the disintegration of granite residual soil under the combined influence of wettingdrying cycles and acid rain. Geomatics, Natural Hazards and Risk, 2019, 10(1): 1912-1927.
- [4] Liu B C, Wang L Y, Zhou H F, Yang B, Xiao W W, Ling F K, Peng G. Experimental study on disintegration of Guilin red clay. Sustainability, 2023, 15(10): 7833.
- [5] Wang J D, Gu T F, Zhang M S, Xu Y J, Kong J X. Experimental study of loess disintegration characteristics. Earth Surface Processes and Landforms, 2019, 44(6): 1317-1329.
- [6] He L, Deng Y S, Tang Q Y, Liao D L, Wang C, Duan X Q. Effects of the Dicranopteris linearis root system and initial moisture content on the soil disintegration characteristics of gully erosion. Journal of Mountain Science, 2022, 19(12): 3548-3567.
- [7] Sainbuyan Z. 冻融循环和初始土壤含水量对东北黑土区土壤崩解速率的影响[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2019.
- [8] Li X, Wang L, Yan Y L, Hong B, Li L C. Experimental study on the disintegration of loess in the Loess Plateau of China. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2019, 78(7): 4907-4918.
- [9] 潘贤斌,何振全,盖国胜,杨玉芬.颗粒土壤改良剂制备及崩解特性研究.广东农业科学,2016,43(9):77-81.
- [10] 罗美. 赣江源土壤团聚体崩解机制. 山地农业生物学报, 2018, 37(6): 26-30.
- [11] Reubens B, Poesen J, Danjon F, Geudens G, Muys B. The role of fine and coarse roots in shallow slope stability and soil erosion control with a focus on root system architecture: a review. Trees, 2007, 21(4): 385-402.
- [12] Vannoppen W, Vanmaercke M, De Baets S, Poesen J. A review of the mechanical effects of plant roots on concentrated flow erosion rates. Earth-Science Reviews, 2015, 150: 666-678.
- [13] 肖海,夏振尧,彭逗逗,张伦,李铭怡,许文年,刘普灵.植物根系对三峡库区消落带紫色土崩解性能的影响.中国水土保持科学,2019, 17(3):98-103.
- [14] 王桂尧,周欢,夏旖琪,沙琳川,周红贵.草类根系对坡面土强度及崩解特性的影响试验.中国公路学报,2018,31(2):234-241.
- [15] Huang Y G, Wang G Y, Liu S, Tao J. Influence of acid rain and root reinforcement coupling factors on disintegration characteristics of expansive soil. PLoS One, 2023, 18(4): e0284269.
- [16] 肖宏彬, 贺茜, 李珍玉, 左学龙, 陈能, 李伟. 根系对边坡土体抗崩解能力影响的试验研究. 中南林业科技大学学报, 2015, 35(5): 35-38.
- [17] Tsunekawa A, Liu B, Yamanaka N, Du S. Restoration and Development of the Degraded Loess Plateau, China//: Springer, 2014.

- [18] 燕丹妮, 武心悦, 王博恒, 郝红科. 1982—2015 年黄土高原植被变化特征及归因. 生态学报, 2023, 43(23): 9794-9804.
- [19] 张洵, 岑云峰, 高照良, 李永红, 孙贯芳, 刘文博. 2001—2020 年黄土高原生态环境质量对气候及土地利用变化的响应. 水土保持通报, 2023, 43(3): 234-244.
- [20] Wang B, Zhang G H, Yang Y F, Li P P, Liu J X. Response of soil detachment capacity to plant root and soil properties in typical grasslands on the Loess Plateau. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2018, 266: 68-75.
- [21] 刘晨光. 基于水动力过程及泥沙特性的坡面水流挟沙力试验研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2022.
- [22] Ma J Y, Li Z B, Ma B, Wang C G, Sun B Y, Shang Y Z. Response mechanism of the soil detachment capacity of root-soil composites across different land uses. Soil and Tillage Research, 2022, 224: 105501.
- [23] 冯国安,郑宝明. 陕北王茂沟流域综合治理的启示. 人民黄河, 1998, 20(1): 18-20, 38-47.
- [24] 曾令建,杨振奇,秦富仓,郭建英,张铁钢.植被覆盖变化与土壤保持演变空间异质性研究.水土保持学报,2023,37(5):178-188.
- [25] 张旭达,韩谞,孙长顺,张嘉渭,胡竞翔,黄振宇,潘保柱.无定河及延河流域不同时空尺度下土地利用对水质的影响.环境科学,2023, 45(8):1-14.
- [26] Xu Q, Chen W L, Zhao K Y, Zhou X P, Du P C, Guo C, Ju Y Z, Pu C H. Effects of land-use management on soil erosion: a case study in a typical watershed of the hilly and Gully Region on the Loess Plateau of China. Catena, 2021, 206: 105551.
- [27] Gao Q Z, Kang M Y, Xu H M, Jiang Y, Yang J. Optimization of land use structure and spatial pattern for the semi-arid loess hilly-gully region in China. Catena, 2010, 81(3): 196-202.
- [28] 王德,傅伯杰,陈利顶,赵文武,汪亚峰.不同土地利用类型下土壤粒径分形分析——以黄土丘陵沟壑区为例.生态学报,2007,27(7): 3081-3089.
- [29] Zhang K, Li S, Peng W, Yu B. Erodibility of agricultural soils on the Loess Plateau of China. Soil and Tillage Research, 2004, 76(2): 157-165.
- [30] 保锐琴,和贵祥,黄广杰,段青松.土壤崩解研究进展.贵州农业科学,2022,50(1):30-41.
- [31] 李强, 张正, 孙会, 徐伟洲. 土壤崩解速率的一种修正方法. 水土保持研究, 2015, 22(6): 344-348.
- [32] 秦富仓,董晓宇,郭月峰,李龙,李艳. 础砂岩区不同植被类型土壤崩解特征及其影响因素研究. 内蒙古农业大学学报:自然科学版, 2022, 43(5):61-70.
- [33] Wang P P, Su X M, Zhou Z C, Wang N, Liu J E, Zhu B B. Differential effects of soil texture and root traits on the spatial variability of soil infiltrability under natural revegetation in the Loess Plateau of China. Catena, 2023, 220: 106693.
- [34] Ng C W W, Zhang Q, Ni J J, Li Z Y. A new three-dimensional theoretical model for analysing the stability of vegetated slopes with different root architectures and planting patterns. Computers and Geotechnics, 2021, 130: 103912.
- [35] Smith D J, Wynn-Thompson T M, Stremler M A, Williams M A, Seiler J R, Hession W C. Root reinforcement and extracellular products reduce streambank fluvial erosion. The Science of the Total Environment, 2023, 896: 165125.
- [36] 徐少君,曾波,类淑桐,苏晓磊.三峡库区几种耐水淹植物根系特征与土壤抗水蚀增强效应.土壤学报,2011,48(1):160-167.
- [37] 段青松,保锐琴,黄广杰,罗鹏彪,陈丽红.澜沧江黄登水电站库周土壤的崩解特性.水土保持通报,2023,43(4):195-202.
- [38] Casini F, Vaunat J, Romero E, Desideri A. Consequences on water retention properties of double-porosity features in a compacted silt. Acta Geotechnica, 2012, 7(2): 139-150.
- [39] Horabik J, Jozefaciuk G. Structure and strength of kaolinite-soil silt aggregates: measurements and modeling. Geoderma, 2021, 382: 114687.
- [40] Alassal M A, Hassan A M, Elmamlouk H H. Collapse potential prediction and characteristics of unsaturated sandy soils. Geotechnical and Geological Engineering, 2023, 41(4): 2759-2774.
- [41] Le Bissonnais Y, Prieto I, Roumet C, Nespoulous J, Metayer J, Huon S, Villatoro M, Stokes A. Soil aggregate stability in Mediterranean and tropical agro-ecosystems: effect of plant roots and soil characteristics. Plant and Soil, 2018, 424(1): 303-317.
- [42] 康子健. 两种草本植物根系对土壤力学性能及抗侵蚀能力影响规律研究. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2023.
- [43] Massaccesi L, Benucci G M N, Gigliotti G, Cocco S, Corti G, Agnelli A. Rhizosphere effect of three plant species of environment under periglacial conditions (Majella Massif, central Italy). Soil Biology and Biochemistry, 2015, 89: 184-195.
- [44] Amézketa E. Soil aggregate stability: a review. Journal of Sustainable Agriculture, 1999, 14(2): 83-151.
- [45] Zhu H, Zhang L M. Root-soil-water hydrological interaction and its impact on slope stability. Georisk: Assessment and Management of Risk for Engineered Systems and Geohazards, 2019, 13(4): 349-359.