

基于CT扫描技术的土柱孔隙结构及其抗侵蚀能力研究

——以种植百喜草为例

张亭¹, 施明明², 李鑫², 王新军³, 曹龙熹¹

(1.成都理工大学 生态环境学院, 四川 成都 610059; 2.成都理工大学
地球科学学院, 四川 成都 610059; 3.交通运输部科学研究院, 北京 100029)

摘要: [目的] 分析百喜草土柱孔隙结构与土壤抗侵蚀能力之间的联系, 为水土保持植物措施的优化布设以及效益评估提供科学依据。[方法] 依托植物土柱长期微区试验, 通过CT扫描技术研究种植百喜草的土柱孔隙指标(孔隙长度密度、体积密度、表面积密度和孔隙数密度), 开展边坡水槽冲刷试验。设置3个坡度(10°, 20°和30°)和5个流量(0.8, 1.6, 2.4, 3.2, 4.0 L/s)组合量化土壤抗侵蚀能力, 分析孔隙指标与抗侵蚀能力因子之间的关系。[结果] 百喜草土柱孔隙发育程度随生长时间不断增强, 而随土层深度减弱; 4个孔隙结构指标在0—5 cm土层的数值远大于5—10 cm土层, 且表层0—5 cm的平均土壤细沟可蚀性(0.026 s/m)和临界水流剪切力(7.0 Pa)分别是下层5—10 cm的0.33, 1.54倍。[结论] 植物根系发育的孔隙指标能够表征土壤抗侵蚀能力变化, CT扫描获取的4个孔隙结构指标与细沟可蚀性等因子显著相关, 其中孔隙表面积密度与土壤抗侵蚀能力指标关系最为密切。

关键词: 百喜草; CT扫描; 孔隙结构; 土壤分离速率; 细沟可蚀性

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2023)05-0148-08

中图分类号: S154.4, S157

文献参数: 张亭, 施明明, 李鑫, 等. 基于CT扫描技术的土柱孔隙结构及其抗侵蚀能力研究[J]. 水土保持通报, 2023, 43(5): 148-155. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2023.05.018; Zhang Ting, Shi Mingming, Li Xin, et al. A study on pore structure and soil erosion resistance of soil column based on CT scanning technology [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023, 43(5): 148-155.

A Study on Pore Structure and Erosion Resistance of Soil Column Based on CT Scanning Technology —Taking Bahiagrass Plantation as an Example

Zhang Ting¹, Shi Mingming², Li Xin², Wang Xinjun³, Cao Longxi¹

(1.College of Ecology and Environment, Chengdu University of Technology,
Chengdu, Sichuan 610059, China; 2.College of Earth Sciences, Chengdu University of Technology,
Chengdu, Sichuan 610059, China; 3.China Academy of Transportation Sciences, Beijing 100029, China)

Abstract: [Objective] The relationship between soil column pore structure and soil erosion resistance for soil columns with Bahiagrass was analyzed in order to provide a scientific basis for the optimal arrangement of plants for soil and water conservation and to assess the benefits of planting Bahiagrass. [Methods] This study was conducted using long-term experiments of Bahiagrass grown in soil columns. Four pore indicators (pore length density, bulk density, surface area density, and pore number density) of Bahiagrass soil columns were quantified by CT scanning technology. Flushing tests using a flume with variable slopes were carried out to quantify soil erosion resistance at three slopes (10°, 20°, and 30°) and five runoff rates (0.8, 1.6, 2.4, 3.2, and 4.0 L/s). The relationships between pore structure characteristics and erosion resistance factors were then determined. [Results] Bahiagrass root system development increased during the growth period, but decreased with soil depth. The values of four pore structure indicators in 0—5 cm soil layer were much higher

收稿日期: 2022-10-25

修回日期: 2023-01-01

资助项目: 国家重点研发计划项目“陆路交通基础设施与生态环境协调机制研究及集成示范”(2021YFB2600105)

第一作者: 张亭(1996—), 女(汉族), 新疆维吾尔自治区石河子市人, 硕士研究生, 研究方向为植物生态学。Email: ztcdut2022@163.com。

通信作者: 曹龙熹(1982—), 男(汉族), 河南省驻马店市人, 博士, 研究员, 主要从事水土保持与生态修复等方面的研究。Email: longxicao@cudt.edu.cn。

than those in 5—10 cm soil layer, and the average soil rill erodibility (0.026 s/m) and critical shear stress (7.0 Pa) in 0—5 cm surface layer were 0.33 and 1.54 times the values of those respective parameters in 5—10 cm lower soil layer. [Conclusion] The pore characteristics of plant root development indicated soil erosion resistance. The four pore structure indicators obtained by CT scanning were significantly related to factors such as rill erodibility. The pore surface area density was most closely related to the erosion resistance factors.

Keywords: Bahiagrass; CT scanning; pore structure; soil detachment rate; rill erodibility

植物是土壤发展过程中很活跃的因素之一,植物根系可以通过物质分解等途径改变土壤理化特性^[1]。除此之外,植物根系还会对土壤力学性能产生深刻影响,根系在土壤中的穿插、缠绕以及嵌入等作用可以增强土壤胶结能力,促进土壤团聚体的形成和稳定,从而改善土壤结构并增强土壤抗侵蚀能力^[2]。这一作用机制是植物水土保持效应的基础,研究植物孔隙与土壤抗侵蚀能力的关系对于水土保持效益评估具有重要意义。

土壤抗侵蚀能力是指土壤抵制水力、风力、重力或冻融等破坏、离散、运输和沉积的能力^[3],在科学研究和实际应用中可以表示为多种不同意义的指标,具体到土壤侵蚀过程研究中,可依据临界水流剪切力模型使用土壤分离速率、细沟可蚀性、临界水流剪切力等指标进行描述^[4],这是 WEPP 等土壤侵蚀过程模型用于细沟侵蚀过程模拟的理论基础,也是描述土壤抵抗细沟水流冲刷侵蚀能力的重要依据。由于植物根系在稳定土壤结构和防治土壤侵蚀方面的重要作用,学者们通过试验研究探讨了根系特征对土壤抗侵蚀能力的影响。研究表明,根系能够通过固结土壤颗粒来增加侵蚀阻力,从而降低土壤分离速率,土壤分离速率随根系质量或长度密度的增加呈不同的函数趋势下降^[5]。植物根系对细沟可蚀性和临界水流剪切力也具有显著影响,许多研究都表明细沟可蚀性随着根长密度的增加而降低,而临界水流剪切力则随根系质量密度增加而增加^[6]。学者们通过以上研究建立了根系指标与抗侵蚀能力指标之间的量化方程,而获取根系结构信息是构建根系抗侵蚀能力关系方程的基本前提。由于土壤的不透明性,现有研究大多采用挖掘法和土钻法等传统方法测量根系指标,此类方法不仅耗时费力,同时还会对根系产生破坏并影响分析结果。

近年来,具备非侵入、便捷性等优点的 X 射线 CT 扫描技术被逐渐应用到土壤学研究领域^[7],其基本原理是利用 X 射线对不同物质的穿透率差异,使用探测器在不同角度接受透射信号,从而构建样品断层的空间结构。CT 扫描技术提供了一种原位三维可视化孔隙和土壤结构表达方法,可用于量化土壤孔

隙形状、大小和分布状况等特征信息^[8],研究土壤水力特性、饱和导水率、水分特征曲线等指标^[9],分析植物根系生长演变趋势以及土壤团聚体微结构特征响应^[10]等。基于 CT 扫描技术研究土壤大孔隙和植物根系特征是当前的学术热点与前沿方向。大量研究表明土壤大孔隙的形成与根系发育密切相关,CT 扫描获取的大孔隙指标与植物根系形态之间具有较高相似性^[11-12],通过 CT 扫描技术提取根系发育形成的孔隙指标,可以在一定程度上定量表征植物根系的原位结构信息,在此基础上探究孔隙指标与土壤抗侵蚀能力之间的关系有助于深入揭示根系的固土作用机制,同时也便于建立抗侵蚀能力指标与土壤 CT 扫描领域前沿研究成果之间的联系,从而为土壤抗侵蚀能力研究提供新的视角。而目前与土壤孔隙 CT 扫描相关的研究主要侧重于土壤结构和溶质运动等方面,针对土壤抗侵蚀能力的研究尚不多见。

基于此,本研究选取百喜草这一常见的水土保持植物类型,通过 CT 扫描技术研究其根系的孔隙结构特征和根—土复合物土壤分离速率特征,对比不同生长时期百喜草植物孔隙指标及其固土效果的差异,尝试建立孔隙指标与土壤抗侵蚀能力指标之间的关系,从而为水土保持植物措施的优化布设以及效益评估提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验设计方案

采用 PVC 管填充土柱试验研究根系形成的孔隙结构及其对土壤抗侵蚀能力的影响。本研究选择的百喜草为禾本科草类植物,其栽种方式简易、生长周期短、适应能力强、根系发达,具有优良的水土保持性能^[13]。试验于 2021 年 5 月初在成都理工大学生态环境学院香樟试验基地进行。试验用土来自成都市郊农田区,土壤类型为潮土,土壤质地为壤土,有机质含量为 10.4 g/kg;将土壤过筛去除石块等杂质之后填入 50 cm 深的土槽,其中下层 35 cm 的土壤过 10 mm 筛,表层 15 cm 土壤过 5 mm 筛,采用逐层压实的方法进行填土,根据实际条件将土壤容重控制在 1.2 g/cm³ 左右。完成填土后将 PVC 管垂直嵌入表

层土壤,用于试验的 PVC 管直径为 11 cm,由 5 cm 高的上下两层合并组成 10 cm 高的柱体,用胶带将其中间固定。完成 PVC 土柱布设后播种百喜草种子,播种密度为 15 g/m^2 ,种植之后定期进行浇水、除草。试验共设置了 150 个百喜草 PVC 管土柱,为了对比研究植物孔隙的作用,本研究在 0—5 cm 土层设置了 100 个不种植百喜草的对照土柱,共计 250 个 PVC 土柱用于开展 CT 扫描和水槽冲刷试验。

1.2 CT 扫描和孔隙指标提取

分别于 2021 年 7 月、9 月和 11 月进行 3 次土柱扫描,每次采集 5 个百喜草土柱样品,剪去茎秆只保留其根系,使用保鲜膜密封土柱样品以免土体破坏,将样品送至四川省友谊医院采用医学 CT (Light-Speed VCT) 系统进行扫描,此 CT 系统能量为 120 kV,100 mA,扫描图片 DFOV 为 120 mm,扫描间隔为 0.63 mm。每个 10 cm 高的 PVC 土柱可以得到 165 张像素大小为 512×512 的 8 位图,每体素对应 $0.63 \text{ mm} \times 0.212 \text{ mm} \times 0.212 \text{ mm}$ 的样品。本研究 3 个时段共扫描 15 个百喜草根系 PVC 土柱样品,扫描流程如下所示。

使用 Sinate Dicom Viewer 软件将 CT 扫描的原始图片转为 tiff 格式,然后利用 Image J 软件按以下流程进行图像处理:首先将图像堆栈裁剪到长宽均为 85.05 mm 的感兴趣区域 (ROI) 以避免 PVC 管壁带来的边缘影响,然后先将切割后的图像转换为 8-bit 图像并重建灰度图像堆栈进而进行 3D 中值滤波和噪点消除^[14],结合实际土壤孔隙情况设置分割阈值得到二值化图像,利用 Measure Stack 插件可计算土柱不同深度的孔隙面积密度等指标。通过 Image-Adjust 进行亮度调节并设定阈值提取主要孔隙要素,植物孔隙与背景的分割阈值是通过将二值化的孔隙与实际根系进行对比直至差值 $\leq 1\%$ 得到,这能保证与根系较高的实际符合率,删除小于 1 mm^2 的小孔隙,计算孔隙长度 (L) 与孔隙等效半径 (r) 的比值,将比值 (L/r) < 20 的视为非生物孔隙并通过目视判读予以去除,保留的孔隙与根系形态较为一致^[15]。通过插件 Analyze Particles 进行图像孔隙的分析,分析得到的特征参数有植物孔隙的数目、面积、大孔隙度、成圆率和当量直径。基于孔隙数量、孔隙体积和表面积等参数,利用 3D-Object Counter 和 bone J 插件计算孔隙骨架量化结果。

为了研究百喜草土柱孔隙的动态发育特征,本文使用以下指标描述 3 个不同时期的百喜草土柱孔隙结构:①孔隙长度密度,定义为单位体积内孔隙的实际长度,可以在一定程度上反映根系的穿插和缠绕能

力^[16];②孔隙表面积密度,定义为单位体积内孔隙的面积,可以反映根系的粗细程度;③孔隙体积密度,定义为单位体积内孔隙的体积,表征了土柱内的根系粗细、长短等综合信息;④孔隙数密度,定义为单位体积内孔隙的数量,体现了植物根系形成孔隙的多少,侧面反映植物根系的健康生长情况。以上指标可通过 Skeletonize 3D 插件生成孔隙网络骨架,据此计算孔隙长度、体积、表面积和孔隙数与目标土柱体积进行比值运算获取^[17]。研究表明 CT 扫描获取的孔隙指标与植物根系之间具有较高相似性^[11]。在本研究微区土柱试验条件下土壤生物孔隙主要由百喜草根系发育而形成,因此以上孔隙结构指标可用于描述根系结构特征,从而与土壤抗侵蚀能力指标建立联系。

1.3 土壤分离能力测定

通过边坡水槽冲刷试验测定土壤分离速率。该水槽主体由有机玻璃制成,长 4 m,宽 0.3 m,深 0.2 m,在水槽底部使用清漆粘一层粒径 3 mm 左右的沙子模拟粗糙地表,借助框架结构和定滑轮装置调节水槽坡度,可调坡度范围为 $0^\circ \sim 30^\circ$ 。在水槽距下端 0.6 m 设置直径 11 cm 的土样室,将 PVC 土柱放入土样室进行冲刷试验。为了研究不同深度土壤抗侵蚀能力,使用薄刀片将 PVC 土柱从中间切开分为 5 cm 高的上下 2 层 (0—5 cm 和 5—10 cm) 分别进行冲刷。本研究借鉴 Nearing 等^[18]的试验方法,在冲刷前用微型雾状喷水壶喷洒土样至接近饱和,每个土样的喷洒水量约为 0.15 L,再静置约 12 h 之后将土柱放入水槽的土样室中,使土样表面与水槽底部保持同一平面。

根据西南山区生态退化坡面的坡度范围^[19],将试验坡度设定为 10° , 20° 和 30° ,同时依据区域典型侵蚀性降雨的地表产流能力^[20],将流量设定为 0.8, 1.6, 2.4, 3.2, 4.0 L/s,每个试验组合条件下进行 3 次重复,则 3 组坡度和 5 组流量组合共设计 45 次冲刷试验。分别于 7, 9, 11 月采集 45 个百喜草土柱并将其分开成为上下两层进行冲刷,3 个时段共完成 270 次冲刷试验。同时于 7 月和 11 月进行了两组共 90 次对照冲刷试验,将两组冲刷试验的结果取平均作为对照数据。为了减小土样边界效应影响并保证冲刷试验结束条件的一致性,每个土样冲刷至表层土壤被剥离 2 cm 为止^[21],用秒表记录放水冲刷时间,在 105°C 条件下用烘箱烘干 24 h 测定干物质,根据土样冲刷前后的干土质量差来计算土壤分离速率,计算公式为:

$$D_c = (W_b - W_a) / (1000 \cdot t \cdot A) \quad (1)$$

式中: D_c 为土壤分离速率 [$\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]; W_b 为试验前土样干质量 (g); W_a 为试验后土样干质量 (g);

t 为冲刷时间(s); A 为土样 PVC 管横截面积,取值 0.0095 m^2 。

试验过程中采用染色法测定水流表面流速,将表面流速乘以 0.8 得到平均流速,据此计算水力半径和水流剪切力等水动力学参数。水流剪切力在 WEPP (water erosion prediction project) 等侵蚀模型中应用,常被用来建立土壤分离速率关系并描述土壤抗侵蚀能力^[18,22],其计算公式为:

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

式中: τ 为水流剪切力(Pa); ρ 为水流密度(kg/m^3); g 为重力加速度; h 为水力半径(m); S 为水流坡降(%)。

1.4 数理统计方法

采用回归分析建立土壤抗侵蚀能力指标与植物孔隙指标之间的量化关系,通过确定性系数 R^2 评估回归方程拟合精度。主要包括:①为了量化土壤抗侵蚀能力指标,根据临界水流剪切力模型建立土壤分离速率与水流剪切力之间的线性回归关系,在此基础上计算细沟可蚀性和临界水流剪切力等因子;②为了进一步探究百喜草植物孔隙结构对土壤抗侵蚀能力的影响,将孔隙长度密度、表面积密度、体积密度和孔隙数密度 4 个孔隙指标与土壤分离速率及抗侵蚀能力指标建立回归关系;③采用单因素方差(ANOVA)和邓肯(Duncan)法进行多重比较,对比不同层次和不同时段根系以及土壤抗侵蚀能力指标的差异程度,统计分析的显著性水平为 $p < 0.05$ 。所有分析和制图均使用 Origin 2018 软件和 IBM SPSS Statistics 26 软件。

2 结果与讨论

2.1 百喜草土柱孔隙特征

图 1 所示为 7,9,11 月典型土柱孔隙数量密度随土层深度的分布特征。从不同时段来看,百喜草孔隙数密度整体上从 7 月到 11 月递增,体现了植物根系不断生长发育的趋势,说明百喜草根系对孔隙数密度的影响较大。

从垂直分布上来看,各时段的孔隙数都表现出由表层随深度下降,这一结果与 Katuwal 等^[23]和于师等^[24]报道的孔隙垂直分布趋势一致。本研究在约 4 cm 深度则存在一处峰值,尤其是在 9 月和 11 月表现较为显著,这可能是由于百喜草侧根发育的影响^[25]。整体上来看,7—9 月百喜草根系的发育主要集中在 6 cm 以上部位,而 6 cm 以下部位的根系发育则主要体现在 9—11 月时段。

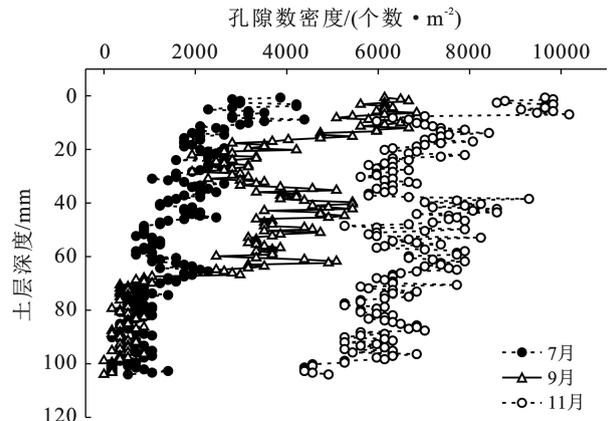


图 1 7,9,11 月样品的孔隙数密度沿土层深度(0—100 mm)的分布

Fig.1 Distribution of pore number density of samples in July, September and November along soil depth (0—100 mm)

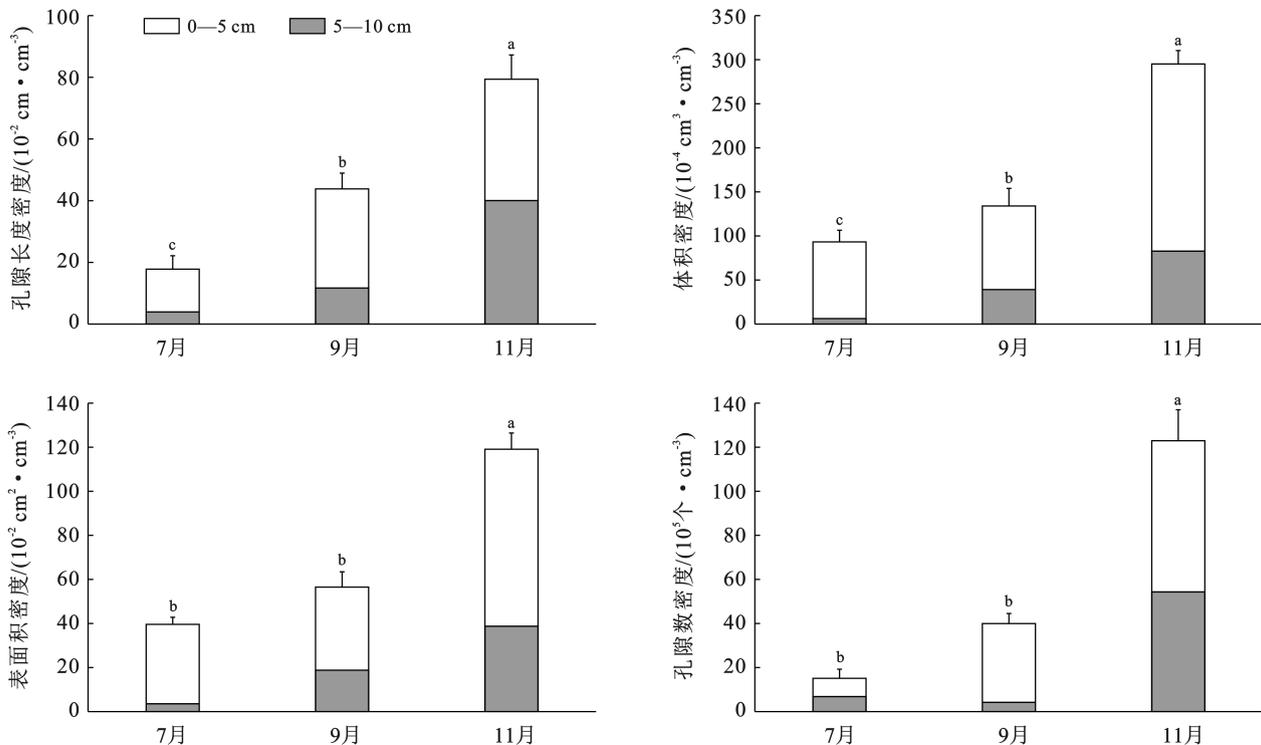
由图 2 可以看出,除 7 月的孔隙数密度和 11 月的孔隙长度密度指标之外,在同一生长时期下 0—5 cm 土层的孔隙指标均明显大于 5—10 cm 土层,这与图 1 所示的孔隙数密度的垂直分布趋势基本一致,说明 0—5 cm 层土壤中根系相对较为密集,这主要是由于上层百喜草根系可吸收更多的营养,使得根系变粗并生出更多的侧根所致^[26]。从时间变化上来看,各孔隙指标从 7—11 月整体上呈增加趋势,3 个时段孔隙指标整体均值差异具有统计学显著性($p < 0.05$),尽管 7—9 月时段的 0—5 cm 层土壤孔隙表面积密度及孔隙数密度等指标差异未达到统计学显著性($p > 0.05$),但 9—11 月之间的孔隙结构指标均具有显著性差异。与 7 月相比,11 月 0—5 cm 土层的孔隙长度密度、表面积密度、体积密度和孔隙数密度指标增幅分别达到 183.36%,122.92%,144.19% 和 730.27%,而 5—10 cm 土层上述 4 个指标的增幅则分别为 916.50%,988.48%,1 221% 和 694.74%,以上指标的动态演变特征体现了百喜草根系对土壤逐渐增强的固结能力。

2.2 土壤抗侵蚀能力的动态变化特征

基于边坡水槽冲刷试验的结果,统计不同时间、不同土层的平均土壤分离速率(见图 3)。从不同土层来看 0—5 cm 土层土壤分离速率显著低于 5—10 cm ($p = 0.001$),其中上层土壤分离速率均值为 $0.29\text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,下层均值为 $0.9\text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,在同一时段的下层土壤分离速率变化范围明显大于上层土壤,对应的箱型图上下限也偏高。从 3 个时段对比来看,7—11 月土壤分离速率呈逐渐减小趋势,9 月不同土层的平均土壤分离速率均显著低于 7 月(上层 $p = 0.003$,下层 $p = 0.01$),而 9 月和 11 月的上层土壤分离速率则不存在显著性差异($p = 0.06$),这可能

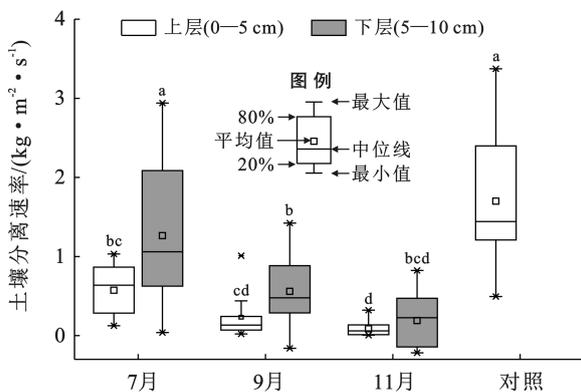
与表层土壤结皮发育和土体沉降等因素导致 9 月土壤分离速率降低有关^[27]。从整体上来看,土柱的土壤分离速率显著低于对照土柱($p < 0.001$),但 7 月下旬的百喜草土柱与对照组分离速率无显著性差异

($p = 0.42$),这是由于 7 月百喜草根系发育较弱,且下层根系比上层根系稀疏所致,这与郁耀闯等^[5]在黄土丘陵区须根系作物地得到的土壤分离速率变化趋势相似。



注:不同字母代表上下层整体间的差异性。

图 2 7,9,11 月 0—5 cm 及 5—10 cm 深度下土柱孔隙的长度密度、表面积密度、体积密度和数量密度对比
Fig.2 Comparison of length density, surface area density, volume density and quantity density of soil columns pores at depths of 0—5 cm and 5—10 cm in July, September and November



注:不同字母代表不同时期不同土层间的差异性。

图 3 不同时期及土层的土壤分离速率统计结果对比
Fig.3 Comparison of statistical results of soil detachment rate in different periods and soil layers

表 1 所示的回归分析的结果表明,土壤分离速率与各个时间段水流剪切力的线性方程确定性系数均呈现显著水平,说明水流剪切力线性方程可以用来预测土壤分离速率。根据细沟侵蚀的临界水流剪切力模型,表 1 中拟合方程斜率为细沟可蚀性参数,反映

细沟侵蚀强度随水流能量变化的速度;方程在 X 轴上的截距为临界水流剪切力参数,反映细沟侵蚀发生的难易程度^[28]。

表 1 不同土层不同时期土壤分离速率与水流剪切力的关系
Table 1 Relationship between soil detachment rate and shear stress in different soil layers and different periods

土层/cm	时期	水流剪切力	决定系数
0—5	7 月	$D_c = 0.047(\tau - 6.17)$	$R^2 = 0.65, p < 0.05$
	9 月	$D_c = 0.019(\tau - 6.36)$	$R^2 = 0.79, p < 0.05$
	11 月	$D_c = 0.013(\tau - 8.46)$	$R^2 = 0.66, p < 0.05$
	对照	$D_c = 0.130(\tau - 2.77)$	$R^2 = 0.84, p < 0.05$
5—10	7 月	$D_c = 0.122(\tau - 2.92)$	$R^2 = 0.86, p < 0.05$
	9 月	$D_c = 0.069(\tau - 4.49)$	$R^2 = 0.84, p < 0.05$
	11 月	$D_c = 0.050(\tau - 6.20)$	$R^2 = 0.88, p < 0.05$

注:式中 D_c 为土壤分离速率 $[\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})]$; τ 为水流剪切力(Pa)。

由表 1 中的回归方程可以看出,在同一时段上层土壤的细沟可蚀性因子显著低于下层土壤($p = 0.045 < 0.05$)。上层土壤在 3 个时段的平均细沟可蚀性因子为 0.026(s/m),是下层土壤平均细沟可蚀性因子

(0.08 s/m)的 0.33 倍;而上层土壤的临界水流剪切力指标则显著高于下层($p=0.027<0.05$),3 个时段的上层平均值(7.0 Pa)是下层土壤(4.54 Pa)的 1.54 倍,说明上层土壤抵抗细沟侵蚀的能力较强,发生细沟侵蚀的风险相对较低。从 7—11 月的不同时段来看,上下层土壤的细沟可蚀性均表现为递减的趋势,而临界水流剪切力则呈递增趋势,这与 Zhang G.H.等^[29]和郁耀闯等^[5]报道的不同土地利用土壤抗侵蚀能力指标演变趋势相同。以上细沟可蚀性和临界水流剪切力因子的分层差异及变化特征与图 1—2 中的孔隙指标结果相一致,说明百喜草根系形成的生物孔隙和土壤抗侵蚀能力之间存在密切关系。与对照土壤相比,除 7 月下层土壤较为接近之外,其余时段的土壤的细沟可蚀性因子均明显偏低,而临界水流剪切力则偏高,说明本试验条件下根系土壤的抗侵蚀能力强于对照土壤。需要指出,Knapen 等^[30]研究表明细沟可蚀性和临界水流剪切力相互独立,且两个因子之间不一定存在协同变化关系。而本研究结果显示,细沟可蚀性和临界水流剪切力分别从两个不同角度指示了百喜草根系发育对抗侵蚀能力的增强效应,两者之间表现出一致的协同变化趋势,这说明在本试验条件下植物根系兼具提高细沟侵蚀起始条件和降低侵蚀强度的作用。

2.3 百喜草土柱孔隙指标与土壤抗侵蚀能力的关系

由图 4 的回归分析结果可以看出,平均土壤分离速率和细沟可蚀性都随各孔隙指标值的增加而减少,说明在植物根系的作用下,土壤分离速率和细沟侵蚀发育强度减小,而临界水流剪切力随各孔隙指标值的增加而增加,说明植物根系作用提高了土壤发生分离所需条件,使得细沟侵蚀不易发生。以上结果进一步细化了细沟可蚀性和临界水流剪切力协同变化关系,同时也说明依托植物根系发育的孔隙指标能够表征土壤抗侵蚀能力指标的变化。4 个孔隙指标与 3 个抗侵蚀能力指标之间的关系可以用线性方程和幂函数方程描述,且不同指标的拟合方程精度存在差异,在描述土壤分离速率和细沟可蚀性指标方面,孔隙长度密度的幂函数方程效果最优,回归方程的确定性系数在 0.9 左右;由于孔隙长度密度指标主要表征了植物根系的穿插及缠绕能力,该指标越大说明百喜草根系网络与土柱中土壤的接触面积越大^[31],对土壤颗粒的串联黏结作用也越强,使土壤抵抗外力破坏的能力增强,在径流冲刷过程中能够降低土体发生崩解分离的速率^[32],因而孔隙长度密度的增大可有效减小土壤分离速率与细沟可蚀性。图 4 中所示的长度密度函数曲线与散点的分布趋势较为吻合,尤其是在分

离速率和细沟可蚀性较大的上半段拟合度明显优于其他指标,说明孔隙长度密度指标用于量化土壤分离速率和细沟可蚀性因子的精度最优。而对于临界水流剪切力因子来说,孔隙体积密度和表面积密度的回归方程确定性系数均在 0.95 以上,在所有孔隙指标中的效果最好;孔隙体积密度和表面积密度指标主要表征了土柱内根系的粗细程度,指标数值越大说明形成孔隙的植物根系越粗,粗根对土壤的机械加固作用提高了细沟侵蚀发生的临界水流剪切力条件^[33],因而这两个指标用于量化临界水流剪切力的精度最高。以上结果与 Zhang Baojun 等^[34]在黄土高原陡坡沟壑区开展的水槽试验整体趋势一致,但方程形式有所不同。Zhang Baojun 等^[34]报道的细沟可蚀性随根质量密度呈指数下降,临界剪切力随根系质量密度增加呈对数函数增加,这可能是由于土壤和植物类型不同导致的差异。

从整体上来看,在本研究试验条件下的 4 个孔隙指标中,孔隙长度密度、体积密度和表面积密度指标在土壤抗侵蚀能力指标预测中各有优势,体现了百喜草根系在土壤中的穿插、缠绕和固土作用,3 个指标的总体预测效果较为接近,其中孔隙表面积密度略优于另外两个指标。而孔隙数密度在 4 个指标中的预测效果较差,不推荐用于描述根系土抗侵蚀能力。

3 结论

本文通过 CT 扫描技术和变坡水槽冲刷试验,量化了 3 个时段种植百喜草的土柱孔隙结构指标和抗侵蚀能力因子,分析了土柱孔隙结构和抗侵蚀能力的关系,得出主要结论如下。

(1) 揭示了种植百喜草的土柱孔隙结构指标(孔隙长度密度、体积密度、表面积密度和数量密度)在 3 个时段(5—7, 7—9, 9—11 月)的增长发育趋势,发现其增长幅度主要体现在 9 月到 11 月之间,且表层 0—5 cm 土层的孔隙指标显著大于 5—10 cm 土层。

(2) 土壤抗侵蚀能力与土柱孔隙结构的变化趋势一致,其中细沟可蚀性因子随百喜草生长时间的增加逐渐减小,而临界水流剪切力指标则增大,表层土壤的平均细沟可蚀性因子(0.026 s/m)是下层的 0.33 倍,平均临界水流剪切力(7.0 Pa)则是下层土壤的 1.54 倍。

(3) 依托植物根系发育的孔隙指标构建了用于表征土壤抗侵蚀能力指标的拟合方程,结果表明孔隙长度密度与土壤分离速率和细沟可蚀性的关系最密切,而孔隙体积密度和表面积密度用于量化临界水流剪切力的精度最高,综合整体拟合效果来看,孔隙表面积密度在 4 个孔隙结构指标中表现最优。

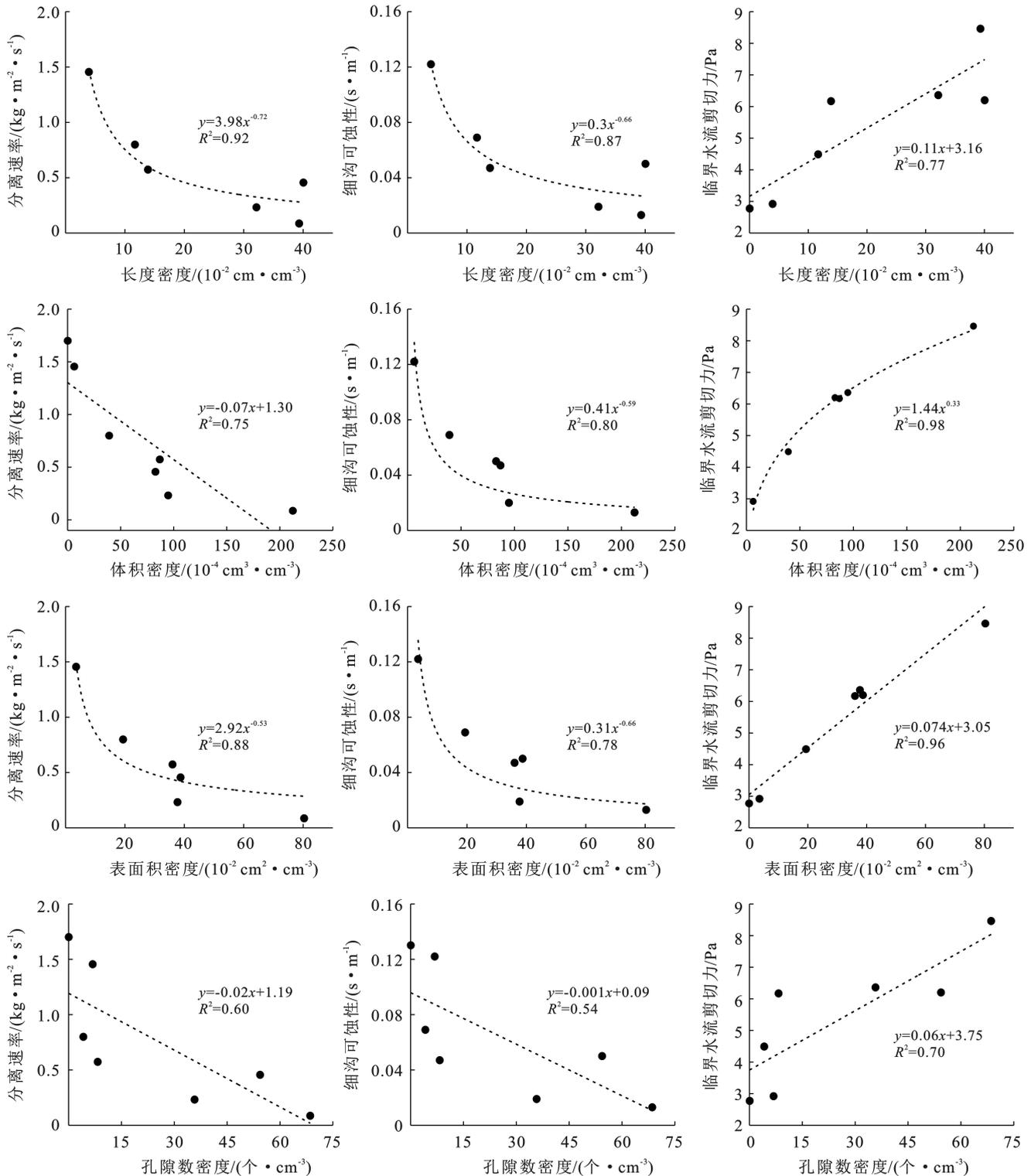


图 4 百喜草根系形成的土壤孔隙指标与抗侵蚀能力的关系

Fig.4 Relationship between soil pore index and erosion resistance formed by Bahiagrass roots

本研究主要探讨了 CT 扫描条件下百喜草根系形成的孔隙结构与土壤抗侵蚀能力之间的关系并未考虑不同土壤类型抗侵蚀能力差异对研究结果的影响。在未来研究中,应结合区域水土流失风险,选择代表性土壤和植物类型设置组合试验,系统研究不同土壤和植物组合条件下根系对土壤结构的影响及其

CT 扫描表征,深入揭示原位扫描孔隙结构指标与土壤抗侵蚀能力之间的量化关系。

[参 考 文 献]

- [1] 袁仁文,刘琳,张蕊,等.植物根际分泌物与土壤微生物互作关系的机制研究进展[J].中国农学通报,2020,36(2):

- 26-35.
- [2] 刘均阳,周正朝,苏雪萌.植物根系对土壤团聚体形成作用机制研究回顾[J].水土保持学报,2020,34(3):267-273.
- [3] 刘定辉,李勇.植物根系提高土壤抗侵蚀性机理研究[J].水土保持学报,2003(3):34-37.
- [4] 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.
- [5] 郁耀闯,王长燕.黄土丘陵区须根系作物地土壤分离季节变化研究[J].土壤,2016,48(5):1015-1021.
- [6] 郁耀闯,王长燕.黄土区大豆和马铃薯田土壤临界剪切力季节动态[J].干旱地区农业研究,2018,36(1):50-55.
- [7] Peth S, Chenu C, Leblond N, et al. Localization of soil organic matter in soil aggregates using synchrotron-based X-ray microtomography [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2014,78:189-194.
- [8] 李宗超,胡霞.小叶锦鸡儿灌丛化对退化沙质草地土壤孔隙特征的影响[J].土壤学报,2015,52(1):242-248.
- [9] 周虎,李文昭,张中彬,等.利用X射线CT研究多尺度土壤结构[J].土壤学报,2013,50(6):1226-1230.
- [10] 周虎,李保国,吕贻忠,等.不同耕作措施下土壤孔隙的多重分形特征[J].土壤学报,2010,47(6):1094-1100.
- [11] 高宙,胡霞.基于CT扫描研究灌丛根系对土壤大孔隙的影响[J].水土保持研究,2020,27(3):315-319.
- [12] 祁子寒,王云琦,王玉杰,等.根系对浅表层土大孔隙分布特征及饱和渗透性的影响[J].水土保持学报,2021,35(5):94-100.
- [13] 徐泽荣,陈世平,徐泽堂,等.百喜草的特性与应用前景[J].草业与畜牧,2014(1):25-33.
- [14] Luo Lifang, Lin H, Li Shuangcai. Quantification of 3D soil macropore networks in different soil types and land uses using computed tomography [J]. *Journal of Hydrology*, 2010, 393(1/2):53-64.
- [15] Zhang Zhongbin, Liu Kailou, Zhou Hu, et al. Linking saturated hydraulic conductivity and air permeability to the characteristics of biopores derived from X-ray computed tomography [J]. *Journal of Hydrology*, 2019, 571:1-10.
- [16] 房昊天,翁白莎,常文娟,等.高寒草甸根系分布特征及与土壤温湿度关系的研究[J].草地学报,2022,30(3):612-621.
- [17] Doube M, Klosowski M M, Arganda-Carreras I, et al. BoneJ: free and extensible bone image analysis in ImageJ [J]. *Bone*, 2010,47(6):1076-1079.
- [18] Nearing M A, Bradford J M, Parker S C. Soil detachment by shallow flow at low slopes [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1991,55(2):339.
- [19] 刘斌涛,宋春风,史展,等.西南土石山区土壤流失方程坡度因子修正算法研究[J].中国水土保持,2015(8):49-51.
- [20] 伍冰晨,齐实,郭郑曦,等.西南山区林地空间格局和微地形对坡面地表产流的影响[J].农业工程学报,2021,37(8):108-116.
- [21] 张光辉.冲刷时间对土壤分离速率定量影响的实验模拟[J].水土保持学报,2002(2):1-4.
- [22] Cao Longxi, Zhang Keli, Zhang Wei. Detachment of road surface soil by flowing water [J]. *Catena*, 2009, 76(2):155-162.
- [23] Katuwal S, Norgaard T, Møldrup P, et al. Linking air and water transport in intact soils to macro-porosity by combining laboratory measurements and X-ray computed tomography [J]. *Geoderma*, 2012:9-20.
- [24] 于师,李珍玉,王梦珂,等.不同种植间距对香根草植物边坡优先流发育特征的影响[J].水土保持通报,2022,42(3):49-56.
- [25] 王长燕.黄土区直根系作物地土壤分离生长季动态[J].宝鸡文理学院学报(自然科学版),2016,36(3):52-58.
- [26] 蒋敏,孙博瑞,周少梁,等.不同灌水深度条件下枣树根系空间分布及土壤水分研究[J].北方园艺,2022(6):77-83.
- [27] Ghidex F, Alberts E E. Plant root effects on soil erodibility, splash detachment, soil strength, and aggregate stability [J]. *Transactions of the Asae*, 1997,40(1):129-135.
- [28] Nearing M A, Foster G R, Lane L J, et al. A process-based soil erosion model for USDA: water erosion prediction project technology [J]. *Transactions of the Asae*, 1989,32(5):1587-1593.
- [29] 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.
- [30] Knapen A, Poesen J, De Baets S. Seasonal variations in soil erosion resistance during concentrated flow for a loess-derived soil under two contrasting tillage practices [J]. *Soil and Tillage Research*, 2007,94(2):425-440.
- [31] 尚永泽,马波,李占斌,等.黄土丘陵沟壑区不同草灌植被土壤分离速率及其主导因素[J].水土保持通报,2022,42(2):46-52.
- [32] 张晓艳,周正朝.黄土高原地区草地植被调控土壤水蚀机理的研究进展[J].草业科学,2015,32(1):64-70.
- [33] 雷俊山,杨勤科,郑莉莉.黄土坡面细沟侵蚀试验研究及土壤抗冲性评价[J].水土保持通报,2004(2):1-4.
- [34] Zhang Baojun, Zhang Guanghui, Yang Hanyue, et al. Soil resistance to flowing water erosion of seven typical plant communities on steep gully slopes on the Loess Plateau of China [J]. *Catena*, 2019,173:375-383.