

DOI: 10.11766/trxb202304190155

何阳波, 董俊琦, 曾蕙, 刘思宇, 王法明, 杨明萱, 郭再华. 香根草和紫花苜蓿水培根系分泌物缓解黏质红壤机械阻力模拟研究[J]. 土壤学报, 2024, 61 (5): 1224–1235.

HE Yangbo, DONG Junqi, ZENG Hui, LIU Siyu, WANG Faming, YANG Mingxuan, GUO Zaihua. Simulation of Lucerne and Vetiver Hydroponic Root Exudates to Alleviate Clayey Red Soil Penetration Resistance[J]. Acta Pedologica Sinica, 2024, 61 (5): 1224–1235.

香根草和紫花苜蓿水培根系分泌物缓解黏质红壤机械阻力模拟研究*

何阳波¹, 董俊琦¹, 曾蕙¹, 刘思宇¹, 王法明², 杨明萱³, 郭再华¹

(1. 华中农业大学资源与环境学院/农业部长江中下游耕地保育重点实验室, 武汉 430070; 2. 中国科学院华南植物园, 广州 510650; 3. 湖北大学生命科学学院, 武汉 430062)

摘要: 南方黏质红壤土壤机械阻力高, 本文采用两种植物根系分泌物处理土壤, 分析其对两种压实情况下的土壤机械阻力 (SPR) 影响。通过水培法提取须根系植物香根草和主根系紫花苜蓿根系分泌物, 分析其组成特征、并冷冻干燥获取分泌物干物质。分泌物干物质按照 4 种施加水平处理土壤, 之后对平衡后的重塑环刀土壤实施两种压实处理, 并分析土壤 SPR、含水量 (SWC)、团聚体和容重。结果表明: 紫花苜蓿根系分泌物中芳香基碳类、烷氧基碳类和羰基碳类相对含量 (3.23%、6.83%、55.09%) 较香根草高 (1.64%、4.12%、45.78%), 而疏水物质/亲水物质则呈现相反趋势。SPR 随分泌物施加水平升高而降低, 但只有施加水平 $\geq 0.2 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 时引起土壤 SPR 显著降低, 且紫花苜蓿降低 SPR 幅度较香根草明显。相关性和回归分析证明根系分泌物中较低的疏水性物质/亲水性物质比和较高的烷氧基碳类相对含量, 通过增加 SWC 和团聚体平均质量直径降低土壤 SPR。综上所述, 主根系植物根系分泌物对黏质红壤 SPR 的缓解效果优于须根系植物。

关键词: 根系分泌物; 土壤机械阻力; 黏质红壤; 绿肥植物

中图分类号: S152 文献标志码: A

Simulation of Lucerne and Vetiver Hydroponic Root Exudates to Alleviate Clayey Red Soil Penetration Resistance

HE Yangbo¹, DONG Junqi¹, ZENG Hui¹, LIU Siyu¹, WANG Faming², YANG Mingxuan³, GUO Zaihua¹

(1. Key Laboratory of Arable Land Conservation (Middle and Lower Reaches of Yangtze River), Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Huazhong Agriculture University, Wuhan 430070, China; 2. South China Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510650, China; 3. School of Life Sciences, Hubei University, Wuhan 430062, China)

Abstract: 【Objective】The objective of this study was to investigate the influence of fibrous and taproot plant root exudates, in terms of their relative composition and application rate, on soil penetration resistance (SPR) under specific compaction conditions (compaction, and compaction followed by wetting/drying), in order to evaluate the adverse effects of SPR on crop growth in clayey red soil. 【Method】Fibrous root vetiver and taproot lucerne were selected to collect hydroponic secretions. These secretions were then

* 国家重点研发计划项目 (2021YFC3100402) 资助 Supported by the National Key R&D Program of China (No.2021YFC3100402)

作者简介: 何阳波 (1984—), 女, 湖北武汉人, 博士, 副教授, 主要从事红壤地力提升研究。E-mail: kathy@mail.hzau.edu.cn

收稿日期: 2023-04-19; 收到修改稿日期: 2023-10-17; 网络首发日期 (www.cnki.net): 2024-02-01

analyzed to determine the root exudate composition, which was subsequently freeze-dried to obtain the original dry exudates. Clayey red soils (0~20 cm) were amended with different rates of dry root exudate materials (0, 0.02, 0.2, and 1 mg·g⁻¹, dry root exudates wt/soil wt), and left to equilibrate for one week in a 4 °C refrigerator. Soils amended with varying rates of dry root exudates were then compacted into steel cores (d= 5 cm and h= 5.1 cm) and subjected to two types of compaction. One subset of core samples was wetted to -33 kPa and compacted to 200 kPa stress (compaction), and another subset underwent 200 kPa stress followed by one cycle of saturation and drainage back to -33 kPa (compaction+w/d). The SPR, soil water content (SWC), aggregate properties, and bulk density (Bd) were determined. 【Result】 The results showed that: (1) The relative content of aromatic carbon, alkoxy carbon, and carbonyl carbon in the root exudates was higher in lucerne (3.23%, 6.83%, 55.09%) than that in vetiver (1.64%, 4.12%, 45.78%), whereas the ratio of hydrophobic to hydrophilic substances showed an opposite trend (0.52 for Lucerne and 0.86 for vetiver). (2) The SPR decreased as the exudate rate increased, with a significant decrease observed only when the root exudate application rate exceeded 0.2 mg·g⁻¹. For example, compared to the control, 0.2 mg·g⁻¹ root exudates application from lucerne and vetiver resulted in reductions of 29.4% and 11.4% in SPR, respectively. (3) At the same root exudate application rate, lucerne showed a higher degree of SPR reduction than vetiver under both compaction conditions. (4) The SWC increased with increasing exudate rate compared to the control. For example, compared to the control, the application of 1 mg·g⁻¹ root exudates resulted in an increase in SWC by 7.98% (compaction) and 21.65% (compaction + w/d) for lucerne, and 13.07% (compaction) and 11.15% (compaction + w/d) for vetiver. Furthermore, the aggregate mean weight diameter (MWD) also increased after root exudate treatments compared to the control. Correlation and regression analysis confirmed that a low ratio of hydrophobic to hydrophilic substances, a high proportion of alkoxy carbon, and a high exudate rate resulted in a low SPR value by improving SWC and aggregate MWD. 【Conclusion】 In conclusion, taproot plants showed a more apparent effect in alleviating SPR than fibrous roots in clayey red soil. Therefore, selecting appropriate taproot green manure has the potential to effectively reduce SPR in clay red soil by improving SWC and aggregate MWD.

Key words: Root exudates; Soil penetration resistance; Clayey red soil; Green manure plant

红壤是分布于我国南方热带、亚热带地区重要的土壤资源之一。第四纪红黏土母质发育的红壤质地黏重、有机质含量较低,导致土壤机械阻力很高,限制作物根系下扎生长和产量^[1]。黏质红壤的高机械阻力在雨季和旱季均很普遍,在雨季 0~20 cm 表层红壤的机械阻力范围为 210~421 kPa; 在高温少雨的夏秋季,土壤机械阻力随着含水量降低升高至 2 500 kPa^[2]。传统耕作只能短暂缓解土壤机械阻力,另一种缓解土壤机械阻力的农业可持续发展措施是利用绿肥植物生物耕作。

生物耕作是一种利用植物根系改善土壤质量的方法^[3]。不同种类覆盖植物具有降低土壤机械阻力的不同潜能^[4-5]。绿肥根系通过降低土壤容重^[6]、改善土壤水分^[7]、提升土壤有机质^[8]等多种途径缓解土壤机械阻力。表层土壤有机质含量在 18 年黑麦草覆盖作物和免耕处理下从 4.6%提升至 5.3%,与此同时土壤机械阻力呈现显著降低趋势^[9]。植物根系分泌物作为土壤有机质来源之一^[10],对土壤机械阻力的影响不可忽略。国外学者用芡欧鼠尾草种子提取的分泌物模拟类根系分泌物,发现其对缓解土壤机械

压实有积极作用^[11]。类似地,玉米幼苗根系通过提高分泌物含量得以缓解沙培中沙子所引起的机械阻力及其对玉米生长的负面影响^[12]。但探究绿肥根系分泌物对黏质红壤机械阻力影响研究仍较为缺乏。

因植物根系分泌物获取困难,目前开展的根系分泌物对机械阻力影响研究大多局限于模拟的类根系分泌物,但是类根系分泌物不同于植物根系真实产生的分泌物(类型和含量),因此对土壤机械阻力可能会产生不同影响。根系分泌物组成在不同植物之间差异明显^[13-15],在同等条件下对缓解压实可能产生不同效果。本文采用须根系和主根系植物(香根草和苜蓿)根系分泌物,研究根系分泌物的相对含量和不同施加水平对黏质红壤在一定压实程度下的机械阻力影响。为红壤区合理选择轮作覆盖植物,降低土壤机械阻力提供依据。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

试验所用红壤来自湖北省咸宁市贺胜桥教育部

野外科学观测站 (30°01'45"N, 114°21'35"E), 海拔高度为 44.3 m。所在地区属于亚热带季风气候, 年平均气温为 16.6℃, 年平均降雨量为 1 437 mm, 降雨主要集中在春末夏初 (3—6 月), 年平均蒸发

量为 1 455 mm。本试验供试土壤是由第四纪红色黏土母质发育而成的红壤, 土壤基本性质见表 1。采集 0~20 cm 表层土壤, 在室内风干、过 2 mm 筛, <2 mm 土壤存于 4℃ 冰箱用于后续使用。

表 1 供试土壤基本理化性质

Table 1 Basic physical and chemical properties of tested soil

土壤类型 Soil type	土层深度 Depth	pH	容重	有机质	碱解氮	有效磷	速效钾	土壤颗粒组成 /%		
			Bulk density/ (g·cm ⁻³)	Organic matter/ (g·kg ⁻¹)	Alkaline hydrolysis N/ (mg·kg ⁻¹)			Available P/ (mg·kg ⁻¹)	Available K/ (mg·kg ⁻¹)	2~0.05 mm
红壤	0~10	5.22	1.35	11.53	56.95	30.17	175.00	19.22	35.20	45.57
Red soil	10~20	5.20	1.32	9.24	41.60	27.47	165.63	25.49	28.96	45.55

1.2 试验设计与分析

(1) 根系分泌物提取。选择须根系香根草 (*Vetiveria zizanioides* L.) 和主根系紫花苜蓿 (*Medicago sativa* L.), 分别在培养液中水培 (培养桶直径 18 cm, 高 22 cm), 用于后期收集根系分泌物。本研究培养液采用霍格兰营养液改良版, 按照每 3 d 一次的频率更换营养液, 第 1 次使用 1/4 浓度的营养液 (保持 3 d), 第 2 次使用 1/2 当量 (保持 3 d), 第 3 次以后用全量营养液。培养桶和植物一起放置到人工气候培养箱 (型号为 RXZ-300c) 中继续培养 20 d。培养箱设置相对湿度为 63%, 保持白天/夜晚 23/20℃, 光照时间遵循昼夜周期变化 (14/10 h), 整个培养周期约为 1 个月。之后将植株移至 0.5 mol·L⁻¹ 的 CaCl₂ 溶液中 (2 L), 在温室光线良好的条件下培养 4 h。然后用 250 mL CH₂Cl₂ 提取根洗液冲洗 3~4 次, 减压浓缩至 1.5 mL 左右, 再用烘干的无水硫酸钠干燥处理 (过夜)。整个水培过程中, 为了保证获得足够的根系分泌物, 每种植物设置 3 个培养桶进行水培 (3 株植物·桶⁻¹)。之后将每个培养桶中的根系分泌物的浓缩液 (1.5 mL) 混合待用。根系混合浓缩液分为两部分: 一部分用气相色谱质谱联用仪测量 (GC-MS) (7890A-5975C) 分析根系分泌物的类型和相对含量; 另一部分通过 R201 旋转蒸发器 (上海申胜生物技术有限公司) 和冷冻干燥机 (Gold-SIM FD5-3P) 冷冻干燥后, 得到根系分泌物固体干物质, 用于后续施加到土壤中。

(2) 土壤与根系分泌物混合、机械阻力测量。试验包括 8 个处理, 4 种根系分泌干物质物施加水平 [0 (对照 CK)、0.02、0.2 和 1.0 mg·g⁻¹; 施加水平=分泌物干物质质量 (mg)/土壤质量 (g)] 和 2 种压实方式。2 种压实方式包括: 200 kPa 压实 (压实 C) 和 200 kPa 压实后经历一次干湿循环 (压实+干湿循环: C+w/d), 即: 香根草压实 (香压 VC), 香根草压实+干湿循环 (香压干湿 VC+w/d), 紫花苜蓿压实 (苜压 LC), 紫花苜蓿压实+干湿循环 (苜压干湿 LC+w/d)。

土壤与根系分泌物分别按照不同施加水平混合, 保存于自封袋中, 保持 0.15 g·g⁻¹ 的含水量, 在 4℃ 冰箱中平衡 15 d。以施加水平 0.2 mg·g⁻¹ 为例, 将 72 mg 根系分泌物干物质与 360 g 风干土进行混合。将平衡后的土壤和根系分泌物混合物按照容重 1.2 g·cm⁻³ 重塑到环刀中 (d=5 cm, h=5 cm)。环刀土统一调整到 -33 kPa 水势并称量, 用于后续计算土壤含水量, 待达到 -33 kPa 水势后, 实施 2 种压实处理 (压实, 压实+干湿循环)。第一种压实处理: 采用万能压缩仪 (RGM-3005, 深圳瑞格尔仪器) 对土壤施加压力, 待万能压缩仪在 5 min 达到 200 kPa 后停止压缩, 此时土壤容重升高至约 1.41 g·cm⁻³, 用于模拟绿肥植物翻压还田或其他机械操作引起的压力。第二种压实处理为: 第二批环刀土壤施加 200 kPa 压力后, 土壤在室内进行一次干湿循环 (w/d) (土壤浸泡饱和 12 h, 之后在沙箱中排水

2~3 d, 使土壤再次回到-33 kPa 水势), 用于模拟压实后再经历田间干湿循环过程。对所有处理后的土壤用机械阻力仪 (WXGR-3.0/4.0 微型贯入仪) 分别测量机械阻力 (SPR), 每个环刀土样测 5 次 SPR。最后, 待机械阻力测量完成后, 将所有环刀土样在 105℃ 烘箱烘干。

1.3 统计分析

土壤机械阻力、含水量等在不同处理间的差异采用 LSD 进行分析 ($P < 0.05$) (SPSS 25)。根系分泌物的种类、相对含量、浓度、含水量与土壤机械阻力之间的相关性及作图通过 Origin 2021 完成。

2 结 果

2.1 不同绿肥根系分泌物相对含量特征

水培根系分泌物主要可分为六大类, 分别为烷

基碳类、芳香基碳类、羰基碳类、烷氧基碳类、酸类、烯类 (表 2)。香根草和紫花苜蓿根系分泌物以烷氧基碳类占比最高, 相对含量分别为 45.78% 和 55.09%, 须根系香根草较主根系紫花苜蓿低 20%。其次, 相对占比第二高的为烷基碳类, 其含量分别为 41.15% (香根草) 和 28.75% (紫花苜蓿), 该物质在植物类型之间差异更明显, 表现为须根系香根草较主根系紫花苜蓿高 30%。再者, 羰基碳类的相对含量在根系分泌物中排第三位, 其含量香根草较紫花苜蓿处理低 39.6%。剩余的三种分泌物的相对含量较低, 且在香根草和紫花苜蓿之间差异较小。亲水类含量表现为香根草 (49.9%) < 紫花苜蓿 (61.92%), 而疏水类/亲水类比值香根草较高 (0.86), 紫花苜蓿较低 (0.52)。总之, 主根系紫花苜蓿的主要根系分泌物 (烷氧基碳类、羰基碳类) 和亲水类含量高于须根系香根草。

表 2 香根草和紫花苜蓿水培提取的根系分泌物相对含量

Table 2 Relative content of various hydroponic root exudates from vetiver and lucerne

植物种类 Plant type	水培根系分泌物成分占总体分泌物比值 Relative content of hydroponic root exudates to total root exudate/%						疏水类含量 Hydrophobic substances/%	亲水类 含量 Hydrophilic substances/%	疏水/亲水 Hydrophobic/ Hydrophilic
	烷基碳类 Alkyl carbon	芳香基碳类 Aromatic carbons	羰基碳类 Carbonyl carbons	烷氧基碳类 Alkoxy carbons	酸类 Acids	烯类 Alkenes			
	香根草 Vetiver	41.15	1.64	4.12	45.78	2.24			
紫花 苜蓿 Lucerne	28.75	3.23	6.83	55.09	0.68	5.42	31.98	61.92	0.52

2.2 不同根系分泌物对土壤机械阻力影响

在施加根系分泌物后, 土壤机械阻力发生了明显变化 (图 1a 和图 1b)。对照处理土壤机械阻力分别为 157.28 kPa (压实) 和 166.83 kPa (压实+w/d)。与对照相比, 无论哪种压实方式, 土壤机械阻力随分泌物添加水平升高呈现降低趋势, 其中施加水平 0.2 和 1.0 mg·g⁻¹ 较对照显著降低了土壤机械阻力, 而施加水平 0.02 mg·g⁻¹ 并未显著改变土壤机械阻力 (图 1a 和图 1b)。在同一根系分泌物水平处理下, 与对照相比, 根系分泌物对机械阻力的降低程度表现为紫花苜蓿高于香根草分泌物 (图 2)。以

0.02 mg·g⁻¹ 的施加水平为例, 紫花苜蓿相比对照对机械阻力的降低幅度分别为 29.38% (压实) 和 25.97% (压实+w/d), 而香根草相比对照对机械阻力的降低幅度分别为 11.44% (压实) 和 12.25% (压实+w/d)。

在同一根系分泌物水平处理下, 单独压实和压实+w/d 处理在两种植物类型之间表现出差异 (图 1c)。香根草根系分泌物对土壤机械阻力在单独压实和压实+w/d 处理之间没有显著变化 ($P < 0.05$)。相反, 紫花苜蓿分泌物处理对经历压实+干湿循环处理后的土壤机械阻力有显著降低作用 (图 1c)。

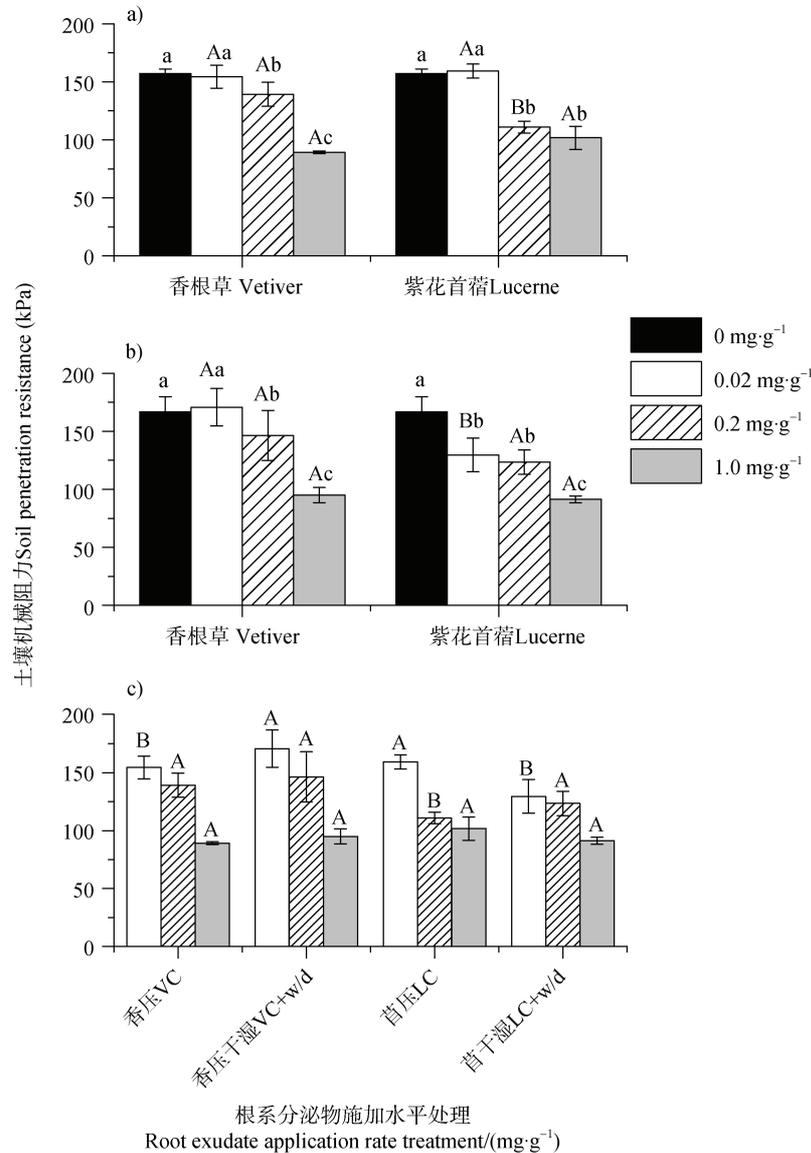


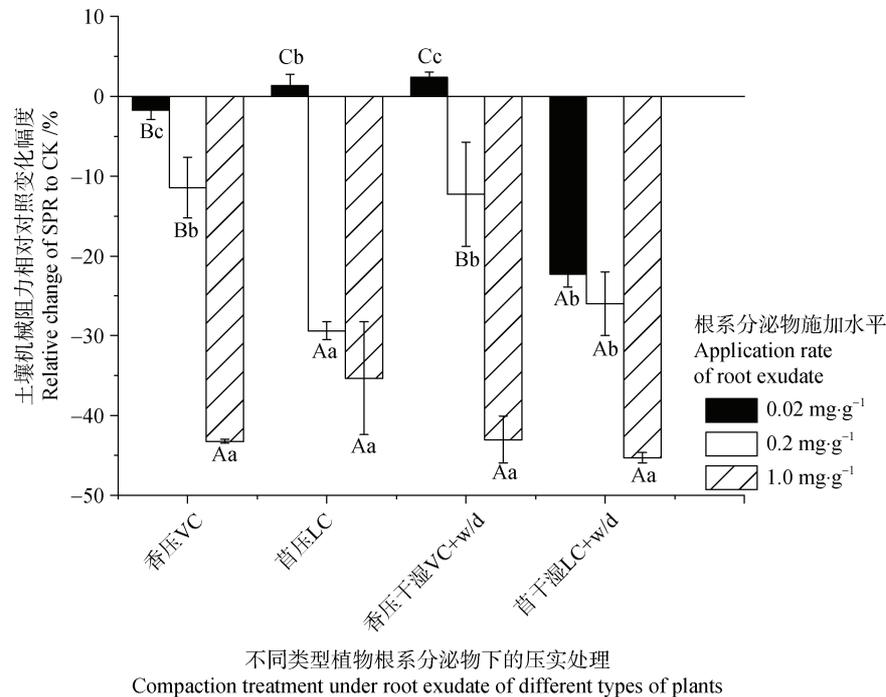
图1 土壤机械阻力 (SPR) 在根系分泌物处理之间的变化

Fig. 1 Variations of soil penetration resistance (SPR) among root exudate treatments

2.3 不同根系分泌物对土壤含水量、结构和容重影响

施加根系分泌物干物质后, 土壤含水量发生了相应变化 (图 3 a 和图 3 b)。对照土壤含水量分别为

0.41 cm³·cm⁻³ (压实) 和 0.42 cm³·cm⁻³ (压实+w/d)。与对照相比, 无论哪种压实方式, 土壤含水量仅在分泌物施加水平为 1 mg·g⁻¹ 情况下显著升高。在 1 mg·g⁻¹ 根系分泌物施加水平处理下, 根系分泌物相



注：不同小写字母表示土壤机械阻力变化幅度在根系分泌物 0.02、0.2 和 1.0 mg·g⁻¹ 几个施加水平之间存在显著差异，不同大写字母表示在同一根系分泌物施加水平下，所有处理之间存在显著差异。Note: Different lowercase letters indicate significant differences in the relative change value of SPR among application rates of root exudate (0.02, 0.2, and 1.0 mg·g⁻¹), and different capital letters indicate significant differences of the relative change value in SPR among compaction treatment at the same application rate of root exudate.

图 2 根系分泌处理后的土壤机械阻力相对对照的变化幅度

Fig. 2 The relative change of SPR after root exudate treatments to control

比对照对土壤含水量的提升程度表现为紫花苜蓿高于香根草 (图 3b)。在该水平下，紫花苜蓿分泌物对土壤含水量的提升幅度为 7.98% (压实) 和 21.65% (压实+w/d)，而香根草分泌物对土壤含水量的提升幅度为 13.07% (压实) 和 11.15% (压实+w/d) (图 3b)。此外，本文根系分泌物对土壤容重并无显著影响 (图 3c)。最后，施加根系分泌物干物质后，土壤的大团聚体百分含量 (2~0.25 mm) 和平均质量直径 (MWD) 与对照相比均呈现显著升高趋势 (图 4)。

2.4 植物根系分泌物、土壤含水量、容重和 SPR 的关系

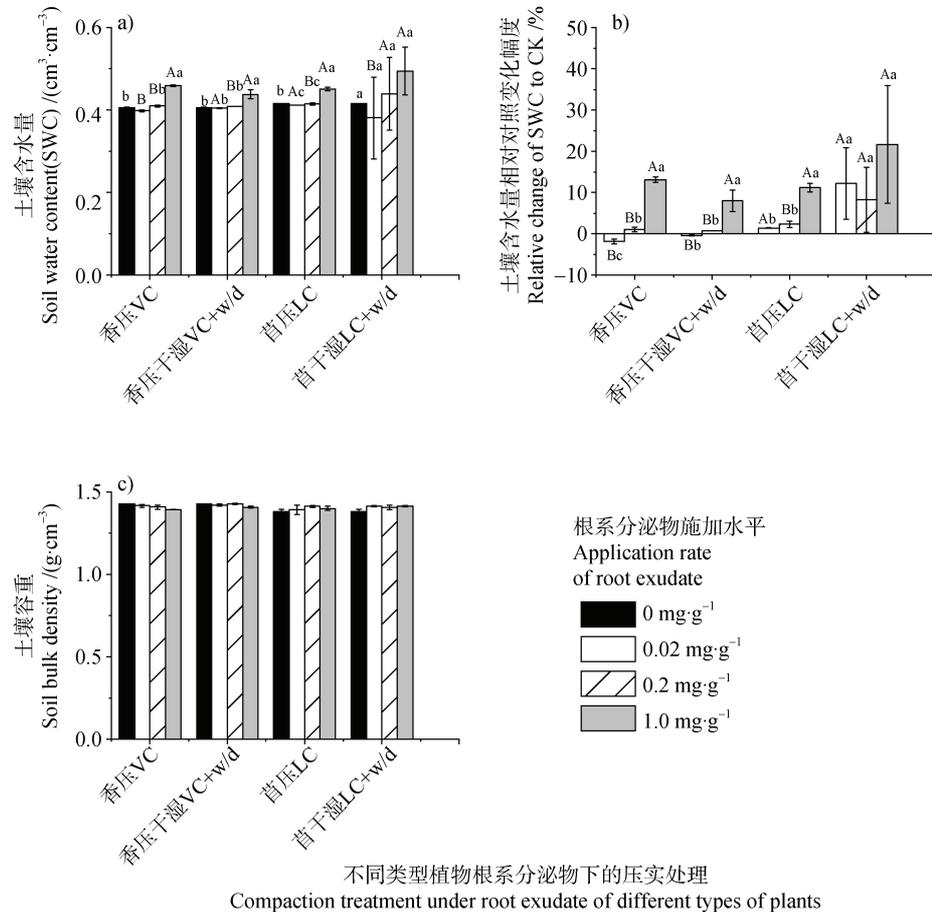
植物根系分泌物对土壤机械阻力的影响可以通过分泌物种类和施加水平与机械阻力之间的相关性分析得以证实。根系分泌物施加水平与 SPR 之间呈现负显著相关性 (图 5)，二者之间的线性回归分析也进一步证实了分泌物水平增加对降低土壤 SPR 有积极作用 ($y = -55.28x + 148.27$, $R^2 = 0.75$) (图 6)，这可以解释图 1 和图 2 中分泌物处理后的土壤 SPR 较

对照土壤表现出显著降低的趋势。除了分泌物施加水平，烷氧基碳类、羧基碳类和疏水根系分泌物类型对土壤 SPR 起到了负面影响，尽管并不显著 (图 5)。土壤含水量也与土壤 SPR 之间呈现显著负相关，预示着当根系分泌物提高土壤含水量时将具有降低土壤 SPR 的正面作用 (图 5)。

3 讨论

3.1 植物类型对根系分泌物特征影响

植物根系分泌物是指在作物生长过程中，根系向外界环境分泌的各种有机无机物，通常包括相对低分子质量的有机物质、高分子的黏胶物质、根细胞脱落物及其分解产物以及气体、质子和养分离离子等。植物根系分泌物特征受作物种类、生长阶段、气候、土壤等多种因素影响^[16]。李伶俐等^[14]比较了不同主根系和须根系植物的根系分泌物组成差异，发现须根系植物番茄根系分泌物的疏水性物质 (2，



注: a) 和 b) 不同大写字母表示土壤含水量在同一根系分泌物施加水平下的压实处理之间存在显著差异, 不同小写字母表示土壤含水量在同一压实方式下的根系分泌物施加水平之间存在显著差异。Note: Different capital letters indicate significant differences of soil water content between compaction treatments under the same root exudate application rate and different lowercase letters indicate significant differences of soil water content between root exudate application rates under the same compaction.

图3 土壤含水量和容重在根系分泌物处理后的变化
Fig. 3 Variation of soil water content and bulk density under root exudate treatments

4-二叔丁基苯酚和邻苯二甲酸二丁酯) 高于主根系植物油菜的根系分泌物, 前者为 14.94 和 16.21 $\text{nmol}\cdot\text{kg}^{-1}$, 后者为 13.86 和 15.64 $\text{nmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。几种不同根系类型的绿肥植物(黑麦豆、高丹草)水培根系分泌的有机酸含量也呈现显著差异, 其中黑麦豆的总有机酸含量、琥珀酸和柠檬酸含量显著高于须根系高丹草^[17-19]。其次, 不同玉米品种在两种土壤(砂黏壤土和壤土)和两种气候条件(肯尼亚和德国)下的根系分泌物截然不同, 抗旱能力强的玉米品种较抗旱弱的品种分泌物量高 50.8%, 生长在肯尼亚半干旱热带气候条件下的根系分泌物中发现了更高比例的糖醛酸^[16]。再者, 同一植物在不同生长阶段其根系分泌物受不同时期的周围环境胁迫条件(如干

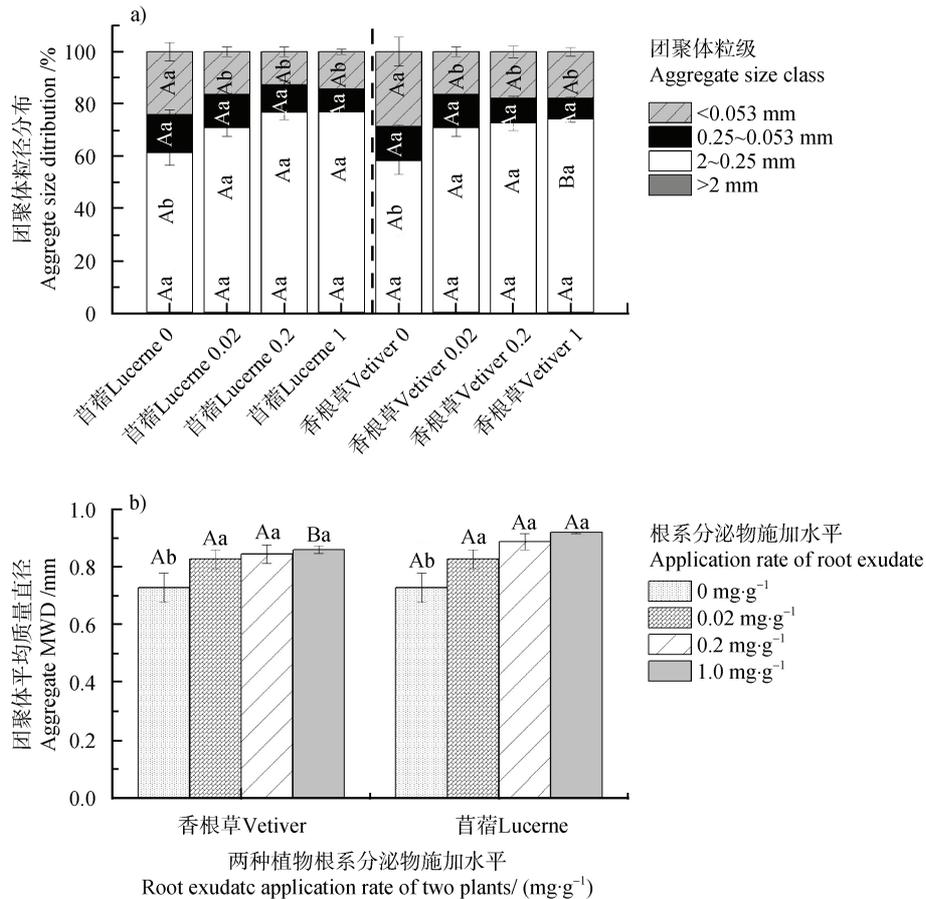
旱胁迫、养分胁迫、温度胁迫)的影响, 而产生不同的分泌物组成成分以应对非生物胁迫^[20-21]。因此, 在室内同等条件下(气候、水培、生长天数), 紫花苜蓿和香根草的根系分泌物的区别主要取决于须根系和主根系品种的差异。

3.2 根系分泌物对土壤机械阻力调控

本文室内研究结果证实了植物根系分泌物施加水平具有明显降低土壤 SPR 的作用, 但是只有当根系分泌物水平 $\geq 0.2 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 时才会起到有效降低黏质红壤 SPR 的效果(图 2)。在相同根系分泌物施加水平下, 主根系植物和须根系植物表现出显著不同的 SPR 降低幅度, 主根系植物紫花苜蓿的根系分泌物对 SPR 的降低幅度(25.96%~45.27%)高于须根

系香根草 (11.44%~43.22%)。这可能与分泌物的以下几个功能有关。第一,根系在生长过程中通过分泌大量分泌物起到类似润滑土壤的作用,其中根部乙烯富集浓度对调控穿透压实土壤能力非常重要,根系通过乙烯富集浓度实现降低土壤机械阻力而利于自身生长^[11-12]。第二,植物根系分泌物组成、施加水平不同,改变水土接触面、水分入渗、土壤持水量能力^[22],而土壤含水量恰恰是影响土壤机械阻力的关键因子,即较高的土壤含水量有助于降低土壤机械阻力^[7, 23-24]。Gabriel 等^[5]同样认为覆盖作物通过保持表层土壤含水量来降低土壤机械阻力。研究人员在小麦、玉米、羽扇豆、紫花苜蓿、油菜等植物的根际区均发现了较周围土壤更高的土壤含水量,并且他们认为根际土壤含水量的提高与根系分

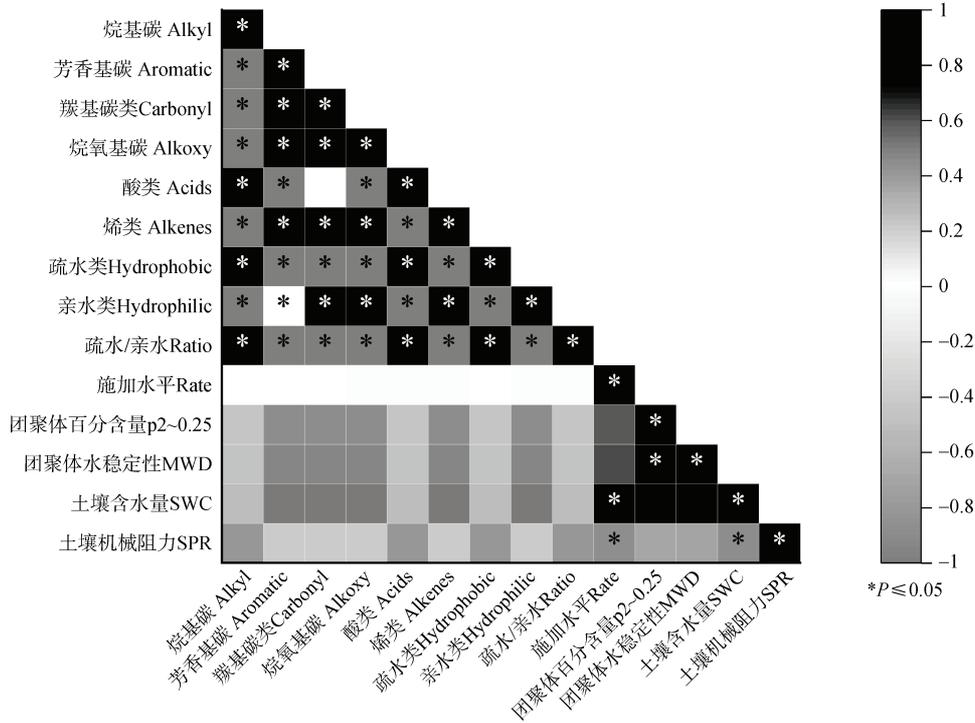
泌物有关^[12, 22, 24]。Carminati 等^[22]发现 0.013% (0.13 mg·g⁻¹) 的根系分泌物足以增加土壤颗粒之间的液体胶黏性桥梁,在 0.036%浓度下的孔隙中形成细丝将砂粒连接起来,这有助于提升持水能力。本文中当根系分泌物施加水平达到 0.02% (0.20 mg·g⁻¹) 时土壤机械阻力开始降低,与之类似。总之,植物根系分泌物通过从周围吸收大量水分(玉米幼苗根冠分泌物在湿润土壤中吸收的水分高达 180 g·g⁻¹)^[20, 25]、降低根系附近土壤表面水势^[22]等途径来抵抗和缓解土壤机械阻力。本文中施加根系分泌物后紫花苜蓿较香根草处理引起更高的含水量提升幅度(图 3),含水量与 SPR 二者之间的显著负相关性(图 5)也有助于解释紫花苜蓿的 SPR 较香根草处理具有更低的趋势。



注: a) 和 b) 不同小写字母表示相同粒径的团聚体百分含量或 MWD 在根系分泌物水平之间存在显著差异, 不同大写字母表示在同一根系分泌物水平下, 香根草和紫花苜蓿的土壤性质存在显著差异。Note: a) and b) Different lowercase letters indicate significant differences in the aggregate size percentage or MWD among application rates of root exudate, and different capital letters indicate significant differences in soil properties between vetiver and Lucerne at the same application rate.

图 4 土壤粒径分布和团聚体平均质量直径在根系分泌物处理后的变化

Fig. 4 Variation of aggregate size distribution and aggregate MWD under root exudate treatments



注：烷基碳、芳香基碳、羧基碳、烷氧基碳、酸类和烯类等根系分泌物类别相对于总根系分泌物的百分含量（%）；疏水类和亲水类分别为疏水性或亲水性根系分泌物的总物质含量；疏水/亲水为疏水性根系分泌物与亲水性根系分泌物含量的比值；施加水平为根系分泌物向土壤中的施加水平；团聚体百分含量为 2~0.25 mm 的团聚体百分含量；团聚体水稳定性为团聚体平均质量直径 MWD。

Note: Alkyl, Aromatic, Carbonyl, Alkoxy, Acids, and Alkenes are the relative content of each type of root exudate to total the root exudate (%); Hydrophobic and Hydrophilic: Total substances content of hydrophobic or hydrophilic root exudate; Ratio: Hydrophobic substance / Hydrophilic substance content ratio; Rate: Root exudate application rate to soil; p_{2-0.25}: 2~0.25 mm aggregate percentage; MWD: Aggregate mean weight diameter; SWC: Soil water content; SPR: Soil penetration resistance.

图 5 根系分泌物、土壤团聚体、含水量和土壤机械阻力指标之间的相关性

Fig. 5 Correlation results of parameters of root exudates, soil aggregate, soil water content, and soil penetration resistance

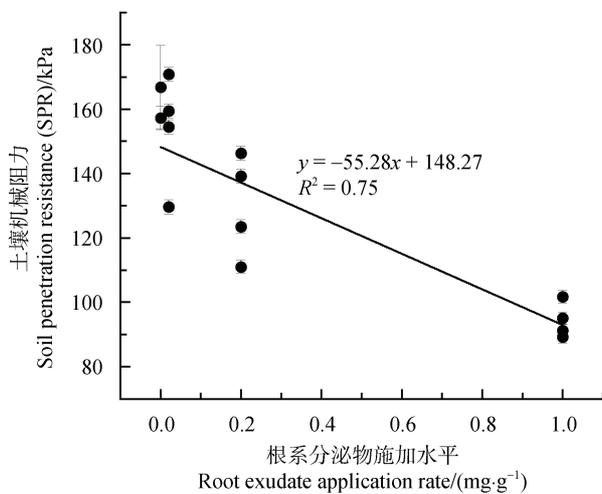


图 6 土壤机械阻力和根系分泌物施加水平之间的线性回归关系

Fig. 6 The regression relationship between SPR and root exudate application rate

根系分泌物的物质组成影响分泌物的喜水或疏水程度，从而影响土壤机械阻力。主根系植物蚕豆分泌有机酸的能力高于须根系小麦和玉米，该分泌物成分疏水性低造成与纯石英砂形成较小的接触角度（10°~22°）^[26]，从而影响土壤持水能力。本文紫花苜蓿的根系分泌物中主成分喜水类物质（烷氧基碳类）较香根草高，疏水/喜水值（0.52）也低于香根草（0.86）（表 2），相关性分析证明该数值有利于增高 SWC、降低 SPR（图 5），可以合理解释为什么施加相同水平的分泌物干物质下紫花苜蓿处理土壤机械阻力较低。类似的，黄土高原 10 年、20 年和 30 年的紫花苜蓿水培法提取的根系分泌物均以烷烃类为主（75%以上）^[27]，预示着烷烃类是影响土壤机械阻力的重要根系分泌物成分之一。

根系还可以通过促进土壤碳固存、通过细丝粘

结黏粒从而促进良好的土壤结构形成途径来降低土壤穿透阻力^[23, 25, 28]。室内添加玉米根系分泌物或人工模拟的不同根系分泌物（如葡萄糖、乙酸等）至土壤，可以黏结土壤颗粒，促使水稳性团聚体（ $>1\text{ mm}$ ）含量分别较对照增加 2.38%（施加 1 d 后）和 28.4%（施加 30 d 后）^[29]。分泌物使高寒草甸土的团聚体平均质量直径增加了 28%~142%^[30]。本文土壤大团聚体百分含量（2~0.25 mm）和团聚体水稳性（MWD）在两种植物分泌物处理后显著提升（图 4 和图 5），这与长期紫云英还田下水稻土大团聚体提升趋势一致^[31]，推测在短时间内植物根系分泌物可以通过改变部分粒径团聚体来改变机械阻力。

单纯压实与压实+干湿循环处理后的土壤 SPR 在两种植物之间同样表现不同。香根草处理的 SPR 相对于对照变化幅度在单纯压实与压实+w/d 处理之间没有显著变化，而苜蓿处理的 SPR 相对于对照变化幅度在压实+w/d 后较单纯压实处理显著降低（图 1 和图 2）。这可能是因为根系分泌物在干燥后再湿润的过程对土壤湿润程度影响不同^[25]。本文室内试验证明紫花苜蓿分泌物在干湿循环后更有利于吸水，这意味着如果在大田经过多次干湿循环，紫花苜蓿对机械阻力缓解效果也要优于香根草。

本研究也存在一定局限性，根系分泌物通过水培收集并添加到土壤中，这种提取方法忽视了野外土壤环境（如温度、养分、水分胁迫等）的影响^[32]。尽管水培法提取的根系分泌物类型和相对含量与土壤中真实根系分泌物可能存在差异，水培养法所提取的主要根系分泌物在应对非生物胁迫（如盐碱胁迫、金属胁迫、养分胁迫等）中的作用机制已经被成功揭示^[21, 33-34]。同样采用紫花苜蓿和香根草在大田红壤通过两年试验，发现 1 年生紫花苜蓿和香根草对土壤机械阻力的影响趋势与室内基本一致，但在大田两种植物相比对照对土壤机械阻力降低幅度低于室内（附图 1）^[4, 35]。可见，即使两种植物的根系分泌物在室内和田间并非完全相同，降低土壤机械阻力程度也可能有所区别，但是它们降低黏质红壤机械阻力的趋势一致。此外，本研究仅关注了根系分泌物对土壤含水量在田间持水量附近的土壤机械阻力的缓解作用，在绿肥植物翻压还田时期（4—5 月），南方红壤区降雨历时长、频率高（如初春的连阴雨以及初夏的梅雨），此时土壤含水量很

高易接近田间持水量水平，研究此时土壤的机械阻力对后续轮作植物幼苗生长也很重要。干旱条件下植物根系分泌物证明具有影响生态系统功能^[36]，但是未来仍需要对干燥状态下的根系分泌物类型和对土壤机械阻力的关系进一步研究，明确根系分泌物调控黏质红壤机械阻力的生理机制。

4 结 论

本文研究了两种植物根系分泌物组成、施加水平对不同压实程度下的黏质红壤机械阻力的影响。发现根系分泌物施加水平（ $\geq 0.2\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ ）可以显著降低压实黏质红壤的机械阻力，分泌物施加水平越高降低土壤 SPR 的幅度越明显。在压实作用下，主根系紫花苜蓿的根系分泌物对黏质红壤 SPR 的降低幅度（35.6%）高于须根系香根草（27.3%），而且在经历压实+干湿循环后，紫花苜蓿处理对 SPR 降低幅度较香根草的降低幅度更明显。相关性分析证明植物类型引起的 SPR 的差异与其分泌物疏水性/喜水性物质比值、烷氧基碳类占比、土壤含水量和 2~0.25 mm 大团聚体含量显著相关。本文结果建议采用主根系紫花苜蓿作为改良黏质红壤机械阻力的绿肥植物。研究结果将对选择合理的主根系覆盖植物，通过其根系分泌物降低 SPR、提高黏质土壤质量具有积极意义。未来仍需关注不同生长阶段的覆盖植物根系分泌物动态变化对不同干旱程度胁迫下的黏质红壤机械阻力作用。

参考文献 (References)

- [1] Wang F, Li P, Chen J Z. The spatial characteristic of seasonal drought for sloping land in subtropical red soil[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2016, 47 (4): 820-826. [王峰, 李萍, 陈家宙. 亚热带红壤坡地季节性干旱空间特征[J]. 土壤通报, 2016, 47 (4): 820—826.]
- [2] Lin L R, He Y B, Chen J Z. The influence of soil drying-and tillage-induced penetration resistance on maize root growth in a clayey soil[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2016, 15 (5): 1112—1120.
- [3] Zhang Z B, Peng X H. Bio-tillage: A new perspective for sustainable agriculture[J]. Soil and Tillage Research, 2021, 206: 104844.
- [4] He Y B, Wu Z L, Zhao T M, et al. Different plant species exhibit contrasting root traits and penetration to variation in soil bulk density of clayey red soil[J]. Agronomy

- Journal, 2022, 114 (1): 867—877.
- [5] Gabriel J L, García-González I, Quemada M, et al. Cover crops reduce soil resistance to penetration by preserving soil surface water content[J]. *Geoderma*, 2021, 386: 114911.
- [6] Li C, Wang J, Xing W C, et al. Effects of green manure on physical properties of topsoil in a dryland winter wheat field[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2022, 42 (2): 107—113, 121. [李超, 王俊, 邢文超, 等. 绿肥填闲种植对旱作冬小麦农田耕层土壤物理性质的影响[J]. *水土保持通报*, 2022, 42 (2): 107—113, 121.]
- [7] Fan Z L, Chai Q, Cao W D, et al. Ecosystem service function of green manure and its application in dryland agriculture of China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2020, 31 (4): 1389—1402. [樊志龙, 柴强, 曹卫东, 等. 绿肥在我国旱地农业生态系统中的服务功能及其应用[J]. *应用生态学报*, 2020, 31 (4): 1389—1402.]
- [8] Song J, Huang J, Gao J S, et al. Effects of green manure planted in winter and straw returning on soil aggregates and organic matter functional groups in double cropping rice area [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2021, 32 (2): 564—570. [宋佳, 黄晶, 高菊生, 等. 冬种绿肥和秸秆还田对双季稻区土壤团聚体和有机质官能团的影响[J]. *应用生态学报*, 2021, 32 (2): 564—570.]
- [9] Wulanningtyas H S, Gong Y T, Li P R, et al. A cover crop and no-tillage system for enhancing soil health by increasing soil organic matter in soybean cultivation[J]. *Soil and Tillage Research*, 2021, 205: 104749.
- [10] Panchal P, Preece C, Peñuelas J, et al. Soil carbon sequestration by root exudates[J]. *Trends in Plant Science*, 2022, 27 (8): 749—757.
- [11] Oleghe E, Naveed M, Baggs E M, et al. Plant exudates improve the mechanical conditions for root penetration through compacted soils[J]. *Plant and Soil*, 2017, 421 (1): 19—30.
- [12] Okamoto K, Yano K. Al resistance and mechanical impedance to roots in *Zea mays*: Reduced Al toxicity via enhanced mucilage production[J]. *Rhizosphere*, 2017, 3: 60—66.
- [13] Tu S X, Wu J. A review on research methods of root exudates[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2010, 19 (10): 2493—2500. [涂书新, 吴佳. 植物根系分泌物研究方法评述[J]. *生态环境学报*, 2010, 19 (10): 2493—2500.]
- [14] Li L L, Guo H X, Huang G H, et al. Physiological & ecological effects of companion-planted grow seedlings of two crops in the same hole[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33 (14): 4278—4288. [李伶俐, 郭红霞, 黄耿华, 等. 不同作物两苗同穴互作育苗的生理生态效应[J]. *生态学报*, 2013, 33 (14): 4278—4288.]
- [15] Hallett P D, Marin M, Bending G D, et al. Building soil sustainability from root–soil interface traits[J]. *Trends in Plant Science*, 2022, 27 (7): 688—698.
- [16] Nazari M, Bilyera N, Banfield C C, et al. Soil, climate, and variety impact on quantity and quality of maize root mucilage exudation [J]. *Plant and Soil*, 2023, 482: 25—38.
- [17] Hong C Q, Nie Y L. Effects of root exudates on plant nutrition[J]. *Ecology and Environment*, 2003, 12 (4): 508—511. [洪常青, 聂艳丽. 根系分泌物及其在植物营养中的作用[J]. *生态环境*, 2003, 12 (4): 508—511.]
- [18] Wang Y J, Wang T Q, Hou Z J, et al. Responses of root exudates to intercropping of Chinese milk vetch with rape [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2021, 32 (5): 1783—1790. [王亚君, 王腾琦, 侯志洁, 等. 根系分泌物对紫云英油菜间作的响应[J]. *应用生态学报*, 2021, 32 (5): 1783—1790.]
- [19] Li X Y, Liu H Y, Xue S Q, et al. Zinc mobilization effect by root exudates of different green manure[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2022 (1): 81—89. [李欣雨, 刘函亦, 薛少琪, 等. 几种绿肥的根系分泌物对土壤锌的活化效应[J]. *中国土壤与肥料*, 2022 (1): 81—89.]
- [20] Ahmed M A, Holz M, Woche S K, et al. Effect of soil drying on mucilage exudation and its water repellency: A new method to collect mucilage[J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2015, 178 (6): 821—824.
- [21] Li Y M, Yang F, Han P L, et al. Research progress on the mechanism of root exudates in response to abiotic stresses[J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2022, 28 (5): 1384—1392. [李月明, 杨帆, 韩沛霖, 等. 植物根系分泌物响应非生物胁迫机理研究进展[J]. *应用与环境生物学报*, 2022, 28 (5): 1384—1392.]
- [22] Carminati A, Benard P, Ahmed M A, et al. Liquid bridges at the root-soil interface[J]. *Plant and Soil*, 2017, 417 (1): 1—15.
- [23] Lardy J M, DeSutter T M, Daigh A L M, et al. Effects of soil bulk density and water content on penetration resistance[J]. *Agricultural & Environmental Letters*, 2022, 7. doi: 10.1002/ael2.20096.
- [24] Zhang Z B, Yan L, Wang Y K, et al. Bio-tillage improves soil physical properties and maize growth in a compacted Vertisol by cover crops[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2022, 86 (2): 324—337.
- [25] Moradi A B, Carminati A, Vetterlein D, et al. Three-dimensional visualization and quantification of water content in the rhizosphere[J]. *New Phytologist*, 2011, 192 (3): 653—663.
- [26] Zickenrott I M, Woche S K, Bachmann J, et al. An efficient method for the collection of root mucilage from different plant species—A case study on the effect of mucilage on soil water repellency[J]. *Journal of Plant*

- Nutrition and Soil Science, 2016, 179 (2): 294—302.
- [27] Bi B Y, Han F P. GC-MS analysis of root exudates of alfalfa in different cropping years on the Loess Plateau[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2018, 26(3): 611—617. [毕博远, 韩凤朋. 黄土高原不同种植年限紫花苜蓿根系分泌物 GC-MS 分析[J]. *草地学报*, 2018, 26 (3): 611—617.]
- [28] Wang Y K, Guo Z C, Zhang Z B, et al. Effect of tillage practices on soil physical properties and maize growth in Shajiang black soil(Vertisol)[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2019, 56 (6): 1370—1380. [王玥凯, 郭自春, 张中彬, 等. 不同耕作方式对砂姜黑土物理性质和玉米生长的影响[J]. *土壤学报*, 2019, 56 (6): 1370—1380.]
- [29] Song R, Liu L, Ma L Y, et al. Effect of crop root exudates on the size and stability of soil aggregate[J]. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 2009, 32 (3): 93—97. [宋日, 刘利, 马丽艳, 等. 作物根系分泌物对土壤团聚体大小及其稳定性的影响[J]. *南京农业大学学报*, 2009, 32 (3): 93—97.]
- [30] [30]Li Y, Zhong B, Chen D M, et al. Effects of root exudates of different carbon concentrations and sources on soil aggregate stability[J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2019, 25 (5): 1061—1067. [李杨, 仲波, 陈冬明, 等. 不同浓度和多样性的根系分泌物对土壤团聚体稳定性的影响[J]. *应用与环境生物学报*, 2019, 25 (5): 1061—1067.]
- [31] Xie K, Geng M J, Nie J, et al. Evolution of iron oxides in aggregates of paddy soil under long-term returning of Chinese milk vetch and combined application of chemical fertilizers [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2023, 60 (6): 1637—1649. [谢坤, 耿明建, 聂军, 等. 长期紫云英还田与化肥配施下水稻土团聚体中铁氧化物的演变规律[J]. *土壤学报*, 2023, 60 (6): 1637—1649.]
- [32] Zhao K, Zhou B H, Ma W Z, et al. The influence of different environmental stresses on root-exuded organic acids: A review[J]. *Soils*, 2016, 48 (2): 235—240. [赵宽, 周葆华, 马万征, 等. 不同环境胁迫对根系分泌有机酸的影响研究进展[J]. *土壤*, 2016, 48 (2): 235—240.]
- [33] Khorassani R, Hettwer U, Ratzinger A, et al. Citramalic acid and salicylic acid in sugar beet root exudates solubilize soil phosphorus[J]. *BMC Plant Biology*, 2011, 11: 121.
- [34] Vives-Peris V, Gómez-Cadenas A, Pérez-Clemente R M. *Citrus* plants exude proline and phytohormones under abiotic stress conditions[J]. *Plant Cell Reports*, 2017, 36 (12): 1971—1984.
- [35] Ali W, Yang M X, Long Q, et al. Different fall/winter cover crop root patterns induce contrasting red soil (Ultisols) mechanical resistance through aggregate properties[J]. *Plant and Soil*, 2022, 477 (1): 461—474.
- [36] Williams A, de Vries F T. Plant root exudation under drought: Implications for ecosystem functioning[J]. *New Phytologist*, 2020, 225 (5): 1899—1905.

(责任编辑：檀满枝)