

DOI: 10.11766/trxb201909250409

严磊, 张中彬, 丁英志, 王玥凯, 王永玖, 甘磊, 彭新华. 覆盖作物根系对砂姜黑土压实的响应[J]. 土壤学报, 2021, 58(1): 140–150.  
YAN Lei, ZHANG Zhongbing, DING Yingzhi, WANG Yuekai, WANG Yongjiu, GAN Lei, PENG Xinhua. Response of Cover Crop Roots to  
Soil Compaction in a Vertisol (Shajiang black soil) [J]. Acta Pedologica Sinica, 2021, 58(1): 140–150.

## 覆盖作物根系对砂姜黑土压实的响应\*

严磊<sup>1, 2</sup>, 张中彬<sup>2†</sup>, 丁英志<sup>2, 3</sup>, 王玥凯<sup>2, 3</sup>, 王永玖<sup>4</sup>, 甘磊<sup>1†</sup>,  
彭新华<sup>2</sup>

(1. 桂林理工大学, 广西环境污染控制理论与技术重点实验室科教结合科技创新基地, 广西桂林 541004; 2. 土壤与农业可持续发展国家重点实验室(中国科学院南京土壤研究所), 南京 210008; 3. 中国科学院大学, 北京 100049; 4. 安徽省龙亢农场, 安徽怀远 233426)

**摘要:** 轮作直根系的覆盖作物被认为是缓解土壤压实的有效手段, 但不同覆盖作物对土壤压实的适应性在不同气候和土壤条件下存在较大差异。为筛选更适宜缓解砂姜黑土压实的覆盖作物品种(模式), 在安徽典型砂姜黑土设置不压实(Non-compacted, NC)与压实(Compacted, C)处理, 通过种植不同覆盖作物(休闲、苜蓿、油菜、萝卜+毛苕子混播), 分析覆盖作物根系对压实土壤的响应。结果表明: 与不压实处理相比, 压实处理显著增加了 0~30 cm 土层土壤容重(8.65%); 显著增加了 0~27.5 cm 和 37.5~45 cm 土层的穿透阻力; 显著改变 0~20 cm 土层土壤收缩特征。同时, 土壤压实大幅度降低了 0~50 cm 土层苜蓿、油菜、萝卜+毛苕子的根干重密度, 增加了苜蓿、油菜、萝卜+毛苕子的根比表面积。压实处理下 50~70 cm 土层萝卜+毛苕子根干重密度、根体积密度和根长密度均大于苜蓿和油菜, 表明萝卜+毛苕子混播种植模式下根系穿透压实土壤能力最强。压实处理下不同覆盖作物地上覆盖度和生物量均表现为由大到小依次为萝卜+毛苕子、油菜、苜蓿。与不压实处理相比, 压实处理分别减少苜蓿、油菜、萝卜+毛苕子地上部分生物量的 62.5%、67.6%、15.8%, 地下部分生物量的 61.4%、57.7%、47.8%。因此, 萝卜+毛苕子种植模式下根系生长受压实影响最小, 在压实土壤中适应性最好。

**关键词:** 土壤压实; 土壤结构; 根系生长; 根系穿透力; 萝卜; 毛苕子

中图分类号: S584 文献标志码: A

## Response of Cover Crop Roots to Soil Compaction in a Vertisol(Shajiang Black Soil)

YAN Lei<sup>1, 2</sup>, ZHANG Zhongbing<sup>2†</sup>, DING Yingzhi<sup>2, 3</sup>, WANG Yuekai<sup>2, 3</sup>, WANG Yongjiu<sup>4</sup>, GAN Lei<sup>1†</sup>, PENG Xinhua<sup>2</sup>

(1. Guangxi Key Laboratory of Environmental Pollution Control Theory and Technology for Science and Education Combined with Science and Technology Innovation Base, Guilin University of Technology, Guilin, Guangxi 541004, China; 2. State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 3. University of Chinese Academy of

\* 国家自然科学基金项目(41771264, 41930753)、国家重点研发计划项目课题(2016YFD0300809)和江苏省重点研发计划项目(BE2017385)资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (Nos. 41771264 and 41930753), the National Key Research and Development Program of China (No. 2016YFD0300809) and the Primary Research & Development Plan of Jiangsu Province of China (No. BE2017385) .

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: zbzhang@issas.ac.cn; allen\_gl2006@163.com

作者简介: 严磊(1993—), 男, 江西万年人, 硕士研究生, 主要研究土壤结构与功能。E-mail: liyan@issas.ac.cn

收稿日期: 2019-09-25; 收到修改稿日期: 2019-12-31; 网络首发日期(www.cnki.net): 2020-03-11

Sciences, Beijing 100049, China; 4. Longkang Farm of Anhui Province, Huaiyuan, Anhui 233426, China)

**Abstract:** 【Objective】 As farming mechanization is developing rapidly in agriculture, more and more large-sized farming machines are running in farmlands, bringing high pressure onto the soils and making them higher in soil bulk density, and consequently lower in water and air permeability, which eventually lead to lower crop yields. Rotation with cover crops that have taproots going deep into the soil is believed to be an effective measure to improve soil structure and alleviate soil compaction. However, cover crops vary in adaptability to soil compaction with climate and soil properties. The objectives of this study were to investigate responses of cover crops different in species (modes) to soil compaction, and to verify which one is the best to adapt to soil compaction relative to region. 【Method】 A field experiment, laid out in a field of Vertisol in the Longkang Farm of Anhui, was designed to have two treatments different in soil compactness (not compacted vs compacted) and four cover crop treatments (Fallow, Alfalfa, Oil Rape, Radish + Hairy Vetch intercropped). Soil bulk density, penetration resistance, shrinkage behaviors, and cover crop root systems were measured and analyzed for characterizing response of the root systems of the cover crops to soil compaction. 【Result】 Results show that in the compacted treatment, soil bulk density in the 0~30 cm topsoil layer ( $P<0.05$ ) and soil penetration resistance in the 0~27.5 cm and 37.5~45 cm soil layers was significantly higher ( $P<0.05$ ), and soil shrinkage behavior in the 0~20 cm soil layer was altered, relative to those in the non-compacted treatment. Besides, in the compacted treatment, Alfalfa, Oil Rape and Radish+Hairy Vetch was lower in root dry weight density in the 0~50 cm soil layer, but higher in root specific surface area; Radish+Hairy Vetch was higher in average root dry weight density, root volume density and root length density in the 50~70 cm soil layer than Alfalfa and Oil Rape, indicating that Radish+Hairy Vetch was higher than Alfalfa and Oil Rape in root penetration capability. In the compacted treatment, in terms of coverage and shoot biomass, the cover crops exhibited an order of Radish+Hairy Vetch intercropping>Oil Rape>Alfalfa. Compared with the cover crops in the non-compacted treatment, Alfalfa, Oil Rape and Radish+Hairy Vetch in the compacted treatment was 62.5%, 67.6% and 15.8%, respectively, higher in shoot biomass and 61.4%, 57.7% and 47.8%, respectively lower in root biomass. 【Conclusion】 In conclusion, the root systems of Alfalfa, Oil Rape and Radish+Hairy Vetch respond differently to soil compaction. Radish + Hairy Vetch intercropping is the most adaptable to soil compaction.

**Key words:** Soil compaction; Soil structure; Root growth; Root penetration; Radish; Hairy Vetch

随着农业机械化水平的提高，农用大型机械的使用频率和重量不断增加，田间土壤压实已经成为现代农业面临的主要问题<sup>[1]</sup>。祝飞华等<sup>[2]</sup>对关中农田土壤容重研究发现 0~60 cm 土层土壤容重介于 1.32~1.69 g·cm<sup>-3</sup> 之间，20~40 cm 土层土壤容重高达 1.67 g·cm<sup>-3</sup>，表明土壤压实严重。压实使得土壤颗粒重新排列得更加紧密，孔隙度减小，土壤紧实度增加，水分渗透能力下降，严重影响作物根系对水分和养分的吸收利用<sup>[3]</sup>。大量实验数据表明压实普遍导致作物减产 10%以上，最高可达 47%<sup>[4]</sup>。压实对土壤造成的危害持续时间可达 14 年之久<sup>[5]</sup>。因此，研究如何缓解土壤压实，对于促进作物生长，维护粮食安全等方面有重要的指导意义。

目前，最常用的缓解土壤压实的手段是深松法。深松虽能改善土壤物理性质，在一定程度上缓解土壤压实，但是深松容易破坏土壤中大孔隙连通性，

造成二次压实<sup>[6]</sup>。覆盖作物作为土壤保护性作物，多数覆盖作物的根系对土壤有较强的穿透能力。覆盖作物可通过根系的穿插改善土壤结构，提升土壤质量，从而缓解土壤压实，提高作物产量<sup>[7-8]</sup>。Chen 和 Weil<sup>[9]</sup>发现覆盖作物能改善压实土壤容重和土壤含水量，提高后茬作物玉米产量。不同覆盖作物的根系形态存在较大差异，因此，不同覆盖作物根系生长对土壤压实的响应差异较大。昭日格图和张玉旭<sup>[10]</sup>研究了不同覆盖作物对土壤硬度的影响，结果显示裸地土壤硬度最大，其次为黑麦种植地，最小的是毛野豌豆种植地。Chen 和 Weil<sup>[11]</sup>研究表明不同覆盖作物根系在同一压实水平下 25~50 cm 土层穿透能力由大到小依次为萝卜、油菜、黑麦。同时，气候和土壤等条件的差异，也会造成不同覆盖作物在不同区域的适应性存在较大差异<sup>[12-13]</sup>。因此，有必要针对特定区域开展不同覆盖作物根系对土壤压

实的响应研究。

砂姜黑土主要分布于我国河南南部、安徽北部等地区，土壤黏粒含量高，胀缩性强，干时紧实僵硬。詹其厚<sup>[14]</sup>的研究表明，砂姜黑土区耕层容重在 1.36~1.50 g·cm<sup>-3</sup> 之间，耕层以下土壤容重在 1.50 g·cm<sup>-3</sup> 以上。王玥凯等<sup>[15]</sup>的研究也显示免耕条件下砂姜黑土耕层容重为 1.48~1.57 g·cm<sup>-3</sup>，耕层以下容重为 1.55~1.62 g·cm<sup>-3</sup>，可见砂姜黑土压实严重。因此，本研究在安徽省砂姜黑土区设置压实与不压实处理，并以种植不同覆盖作物（休闲、苜蓿、油菜、萝卜+毛茛子混播）为研究对象，分析三种种植模式下覆盖作物根系对土壤压实的响应，从而筛选适宜该区域的覆盖作物来缓解土壤压实，进而提高作物产量。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

本试验地点位于安徽省龙亢农场（33°32'N，115°59'E），属暖温带半湿润季风气候，年均温度 14.8℃，年均降水量约 900 mm。土壤为河湖相石灰性沉积物发育的砂姜黑土。该区域种植模式主要为冬小麦/夏玉米一年两熟轮作制度，耕作方式主要为旋耕。试验实施前，该区域耕层平均土壤容重为 1.50 g·cm<sup>-3</sup>。

### 1.2 试验设计

试验于 2017 年 11 月玉米收获后开展。试验采取裂区设计，首先间隔设置不压实（Non-compacted, NC）和压实（Compacted, C）2 个主处理，每个主处理下设置 4 个副处理，分别是不种植覆盖作物（休闲）和种植不同覆盖作物（苜蓿、油菜、萝卜+毛茛子混播）处理，共 8 个处理，每个处理 3 次重复。该试验共 24 个小区，每个小区长宽分别为 10 m 和 7 m。压实处理通过大型农业机械凯特迪尔 KAT1504 轮式拖拉机（功率 150 Kw，四轮驱动，前轮胎型号 14.9-26，后轮胎型号 18.4-38（双胎），自重 7 400 kg）以轮迹平排的方式连续碾压 3 遍；不压实处理用深松机间隔深松至 35 cm 土层。为便于播种，用小型旋耕机浅旋 5~10 cm，然后采用人工撒种方式进行覆盖作物的播种。

### 1.3 土壤物理性质测定

在压实处理完成后，不压实处理深松前，立即

用土壤紧实度仪（SC900, RIMIK, 澳大利亚）分别测定不压实和压实处理下 0~45 cm 土层土壤紧实度，每隔 2.5 cm 土层记录一次测量结果，每个处理重复 30 次。

在休闲处理下，于 2018 年 5 月采用 100 cm<sup>3</sup> 不锈钢环刀分别取不压实和压实处理下原状土壤样品，取样深度分别为 0~10、10~20、20~30、30~50 cm，共取 48 个样品，用以测定土壤收缩特征和土壤容重。测定时，先将土壤样品饱和 72 h，然后让其在自然条件下脱水风干，当环刀样品风干后，将其放入烘箱中分别以 30℃、60℃、105℃ 逐步烘干。每当环刀样品损失 2~4 g 时称量样品重量，用深度游标卡尺测量环刀样品上表面六个固定位置的高度。天平的精确度为 0.01 g，深度游标卡尺精确度为 0.01 mm。风干过程假定土体的径向收缩和垂向收缩的收缩程度是一致的。收缩曲线的拟合采用 Peng 和 Horn<sup>[16]</sup>基于 Van-Genuchten 方程改进的模型，公式如下：

$$e(\theta) = e_r + \frac{e_s - e_r}{\left[1 + (\chi\theta)^{-p}\right]^q} \quad (1)$$

式中， $e(\theta)$  为土壤孔隙比，cm<sup>3</sup>·cm<sup>-3</sup>； $e_s$  为土壤饱和和孔隙比，cm<sup>3</sup>·cm<sup>-3</sup>； $e_r$  为土壤残余孔隙比，cm<sup>3</sup>·cm<sup>-3</sup>； $\theta$  为土壤水分比，cm<sup>3</sup>·cm<sup>-3</sup>； $\chi$ 、 $p$ 、 $q$  为无量纲拟合参数。根据方程（1）拟合出来的收缩曲线参数进而计算收缩曲线的最大斜率，具体原理和方法参见 Peng 和 Horn<sup>[16]</sup>。土壤收缩系数（COLE）用于描述土体在干燥和饱和两点间的收缩程度<sup>[17]</sup>，具体计算公式如下：

$$\text{COLE} = \frac{L_0 - L_{105^\circ\text{C}}}{L_{105^\circ\text{C}}} \quad (2)$$

式中， $L_0$  为土体饱和时的高度，cm； $L_{105^\circ\text{C}}$  为土体 105℃ 烘干之后的高度，cm。当 COLE<0.03，土壤具有较低的收缩能力，0.03<COLE<0.06 土壤具有中等的收缩能力，COLE>0.06 土壤具有较高的收缩能力。

### 1.4 覆盖作物生长特征测定

在覆盖作物苗期测定其地表覆盖度。将 1 m×1 m 的金属框架随机摆放在种植覆盖作物的小区内，摆放时注意放平，并通过照相机进行拍照收集，共采

集 36 张。首先将收集到的照片导入 WGeo 图片矫正工具中进行图片矫正,然后将照片导入 Photoshop CS6.0 中,将图片沿着金属框架边缘进行剪裁,并通过颜色替换将作物生长区替换成黑色,未生长区替换为白色。再利用 ImageJ1.51 计算出  $1\text{ m}\times 1\text{ m}$  金属框架内覆盖作物覆盖度。

在覆盖作物开花期,采用内径为 10 cm 的根钻对覆盖作物种植区 0~70 cm 土层内作物根系进行采集,每次采集深度为 10 cm。先将所取根系清洗干净,通过 WinRHIZO 根系分析系统 (Regent Instruments Inc, 加拿大) 测定根系特征参数 (根体积密度、根长密度和根比表面积),然后 80℃ 烘干称重,计算根干重密度和地下部分生物量。2018 年 5 月,通过样方法测定地上部分生物量,每个小区收割 3 个  $1\text{ m}^2$  面积的地上部分,风干后称重,计算生物量。

### 1.5 数据处理

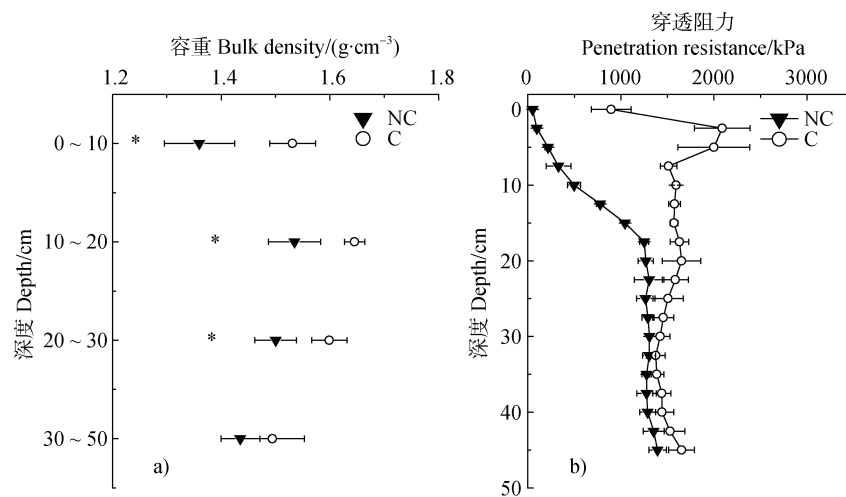
通过 MATLAB R2014a 对土样的收缩曲线进行拟合,以获取收缩曲线参数。采用 SPSS 17.0 进行单因素方差分析 (One-Way ANOVA),并用邓肯 (Duncan) 法进行多重比较,显著水平为  $P<0.05$ 。采用 Origin 2017 进行图形绘制。

## 2 结 果

### 2.1 压实对土壤容重和穿透阻力的影响

休闲地中,压实和不压实处理下不同土层深度土壤容重如图 1a) 所示。压实和不压实处理下,土壤容重随深度的变化趋势均是先增大后降低,在 10~20 cm 达到最大值,分别为  $1.65\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$  和  $1.54\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 。与不压实处理相比,压实处理显著增加了 0~30 cm 土壤容重 ( $P<0.05$ ),而对 30~50 cm 土壤容重的影响不显著 ( $P>0.05$ )。

覆盖作物种植前穿透阻力在 0~45 cm 土层内的变化结果如图 1b) 所示。不压实处理下,在 0~20 cm 土层穿透阻力随土层深度增大而增加,在 20 cm 土层达到稳定,以下深度则变化幅度小,保持 1 200~1 500 kPa。压实处理下,0~5 cm 土层内穿透阻力急剧增大并在 2.5 cm 土层形成峰值至 2 000 kPa 以上,5 cm 以下土层逐渐下降至 30 cm 土层,然后又呈增加趋势,总体上在 1 500 kPa 左右。与不压实处理相比,压实处理显著增加了 0~27.5 cm 和 37.5~45 cm 土层的穿透阻力 ( $P<0.05$ )。



注: 星号 (\*) 代表相同土层不同压实处理之间显著差异 ( $P<0.05$ )。NC: 不压实处理, C: 压实处理。下同。Note: Asterisk (\*) indicates significant difference between plots different in compactness in the same soil layer ( $P<0.05$ ). NC: Non-compacted, C: Compacted. The same below.

图 1 不同压实处理各土层土壤容重 (a)) 和土壤穿透阻力 (b))

Fig. 1 Soil bulk density (a) and penetration resistance (b) relative to soil layer and soil compactness

### 2.2 压实对土壤收缩特性的影响

由表 1 知,压实处理下,0~50 cm 土层内每一层土壤饱和孔隙比 ( $e_s$ ) 均较不压实处理显著下降 ( $P<0.05$ ); 0~40 cm 土层内每一层土壤残余孔隙比

( $e_r$ ) 也较不压实处理显著降低 ( $P<0.05$ )。由拟合方程的相关系数 ( $r$ ) 和均方根误差 (RMSE) 可知,方程 (1) 能很好地拟合出所有样品的收缩曲线 ( $r\geq 0.99$ ,  $\text{RMSE}<0.05$ )。

表 1 不同压实处理各土层土壤收缩曲线拟合参数

Table 1 The saturated void ratio ( $e_s$ ), residual void ratio ( $e_r$ ), fitting parameters ( $\chi$ ,  $p$ ,  $q$ ) of soil shrinkage curves, correlation coefficient ( $r$ ) and root mean square errors (RMSE) relative to soil layer and soil compactness (C) treatments

处理 Treatments	深度 Depth / cm	$e_s$	$e_r$	$\chi$	$p$	$q$	$r$	RMSE
不压实 Non-compacted	0~10	0.87Aa	0.57Aa	1.38Aa	29.39ABa	0.21Aa	0.995	0.007
	10~20	0.70Ca	0.45Ba	1.60 Aa	21.48Ba	0.15Aa	0.996	0.005
	20~30	0.72Ca	0.41Ba	1.64Aa	84.00Aa	0.22Aa	0.990	0.010
	30~50	0.82Ba	0.35Ca	2.43 Aa	7.83Ba	1.83Aa	0.992	0.013
压实 Compacted	0~10	0.70Ab	0.36Ab	1.80Ab	29.48Aa	0.28Aa	0.992	0.009
	10~20	0.59Ab	0.32Ab	1.90Ab	32.00Aa	0.16Aa	0.994	0.007
	20~30	0.64Ab	0.35Ab	1.82Aa	34.50Aa	0.22Aa	0.992	0.009
	30~50	0.76Ab	0.34Aa	2.67Aa	7.39Aa	1.45Aa	0.991	0.013

注：不同大写字母代表相同压实处理不同土层深度之间差异显著 ( $P<0.05$ )；不同小写字母代表相同土层深度不同压实处理之间差异性显著 ( $P<0.05$ )。Note: Different uppercase letters in the same column indicate significant difference ( $P<0.05$ ) between soil layers and plots different in soil compactness; Different lowercase letters in the same column indicate significant difference ( $P<0.05$ ) between plots different in soil compactness the same in soil depth.

不同压实处理下 0~50 cm 土层内土壤收缩曲线如图 2 所示，所有曲线均呈现较好“S”形状。0~30 cm 土层压实处理下整个收缩曲线均低于不压实处理，随着深度的增加，压实和不压实处理下收缩

曲线间的差距逐渐减小。0~30 cm 土层，不压实处理下土壤收缩曲线较为平缓，而压实处理下土壤收缩曲线更加陡峭；并且随着深度的增加，压实和不压实处理下收缩曲线形状的差异逐渐减小。

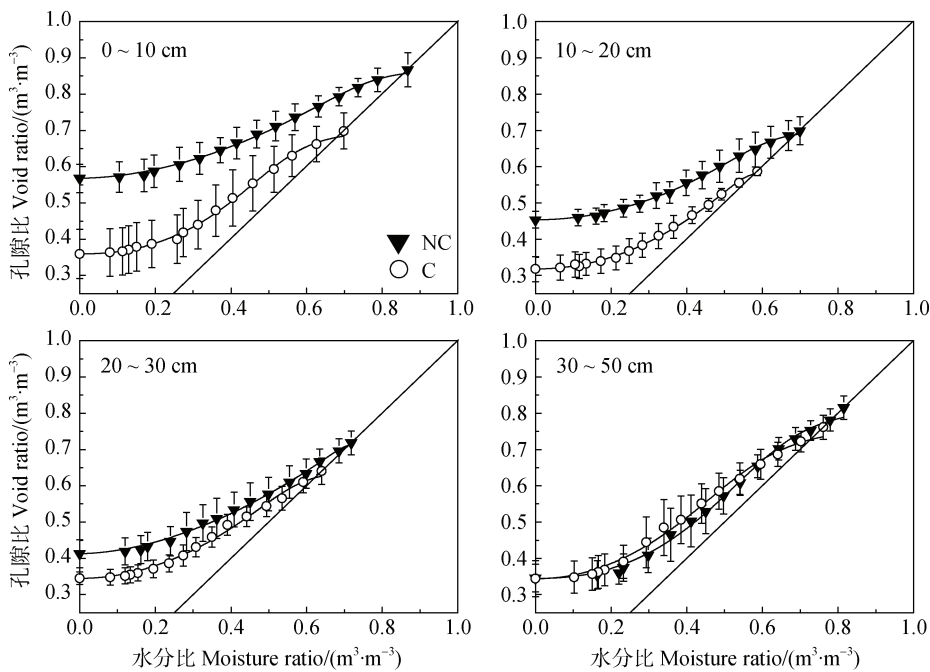


图 2 不同压实处理各土层土壤收缩曲线 (点为实际测量值，线为拟合值)

Fig. 2 Soil shrinkage curve relative to soil layer and soil compactness (Dots mean measured values and lines fitted values.)

土壤收缩系数均在 0.05 以上，表现为较强的收缩特性 (图 3a)。在压实和不压实处理下，土壤收

缩系数均随深度的增加表现为先减小后增大，在 30~50 cm 土层达到最大值，分别为 0.10 和 0.09。

压实处理 0~10 cm 土层的收缩系数显著高于不压实处理 ( $P<0.05$ ), 而 10~50 cm 土层两种处理土壤收缩系数的差异不显著 ( $P>0.05$ )。

0~30 cm 土层不压实处理下土壤收缩曲线最大斜率随深度的增加而增加, 而压实处理下土壤收缩曲线最大斜率随深度的增加而减小 (图 3b)。相比于不压实处理, 压实处理下 0~10 cm 和 10~20 cm 土层深度土壤收缩曲线的最大斜率显著增加 ( $P<0.05$ ), 分别为不压实处理的 1.59 倍和 1.41 倍。

### 2.3 压实对覆盖作物的影响

三种种植模式下覆盖作物根干重密度均随深度的增加而下降 (图 4)。相比不压实处理, 压实处理降低了 0~70 cm 土层苜蓿、0~60 cm 土层油菜和 0~50 cm 土层萝卜+毛茛子每一层 (10 cm) 的根干重密度, 平均降幅分别为 61.4%、57.8%和 48.2%。压实条件下, 三种种植模式下 0~10 cm 土层内覆盖作物根

干重密度由大到小依次为油菜 ( $1\ 719\ \text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )、苜蓿 ( $1\ 585\ \text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )、萝卜+毛茛子 ( $924\ \text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ); 10~30 cm 土层苜蓿根干重密度高于油菜和萝卜+毛茛子; 而 30~70 cm 土层, 萝卜+毛茛子根干重密度分别为苜蓿和油菜根干重密度的 1.13 倍和 1.55 倍。

根体积密度随深度的变化 (图 4) 表现出与根干重密度相同的变化趋势。0~70 cm 土层内压实处理较不压实处理分别降低了苜蓿、油菜、萝卜+毛茛子根体积密度的 63.68%、21.38%、43.40%。不压实情况下, 各土层苜蓿的根体积密度均明显高于油菜和萝卜+毛茛子; 0~30 cm 土层油菜的根体积密度平均高于萝卜+毛茛子 33.5%, 而 30 cm 以下土层油菜的根体积密度平均仅为萝卜+毛茛子 35.2%。压实条件下, 0~50 cm 土层苜蓿和油菜的根体积密度平均为萝卜+毛茛子的 1.67 倍和 1.79 倍, 而 50~70 cm 萝卜+毛茛子的根体积密度均为苜蓿、油菜的 2.29 倍。

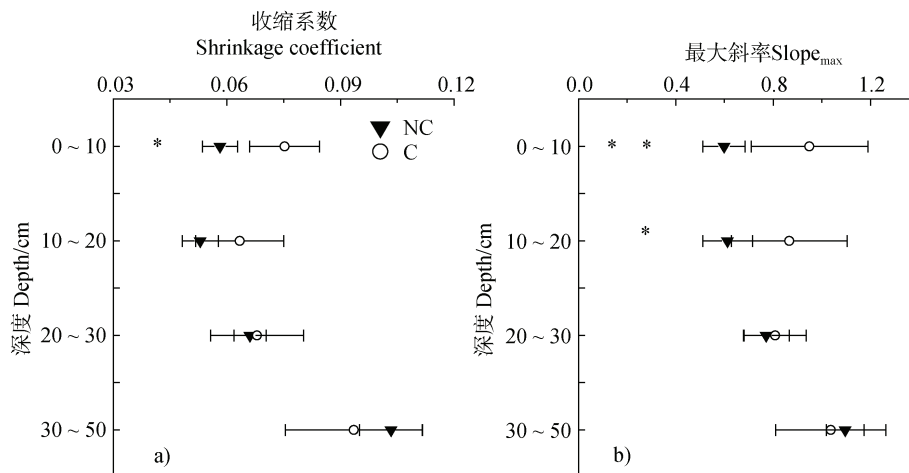


图 3 不同压实处理各土层土壤收缩系数 (a) 和最大斜率 (b)

Fig. 3 Variation of soil shrinkage coefficient (a) and maximum slope gradient (b) relative to soil layer and soil compactness

压实处理下, 0~20 cm 土层苜蓿的根长密度平均高于不压实处理 57.6%; 20 cm 以下土层苜蓿的根长密度平均低于不压实处理的 61.3% (图 4)。压实处理下 0~70 cm 土层, 油菜的根长密度每一土层均低于不压实处理 (平均减少 11.4%)。压实处理下 0~70 cm 土层 (除 40~50 cm 土层外) 萝卜+毛茛子的根长密度均高于不压实处理 (平均增加 46.7%)。在不压实处理下, 苜蓿根长密度均大于油菜和萝卜+毛茛子。在压实处理下, 0~30 cm 土层苜蓿的平均根长密度分别为油菜和萝卜+毛茛子的 3.00 倍和 3.31 倍, 而 30~70 cm 土层萝卜+毛茛子的平均根长

密度最大, 分别为苜蓿和油菜的 1.32 倍和 2.35 倍。

不压实处理下, 三种种植模式下覆盖作物根比表面积随深度的增加而逐渐增加 (图 4)。压实处理下, 0~30 cm 土层各覆盖作物根比表面积随深度增加而增加, 而 30 cm 以下土层根比表面积随深度波动较大、变异也较大。在不压实处理下, 10~40 cm 土层苜蓿根比表面积小于油菜和萝卜+毛茛子; 而压实处理下, 不同覆盖作物根比表面积差异不明显。压实处理下 0~70 cm 土层内苜蓿、油菜、萝卜+毛茛子的根比表面积均值较不压实处理分别增加了 91.5%、51.3%、19.7%。

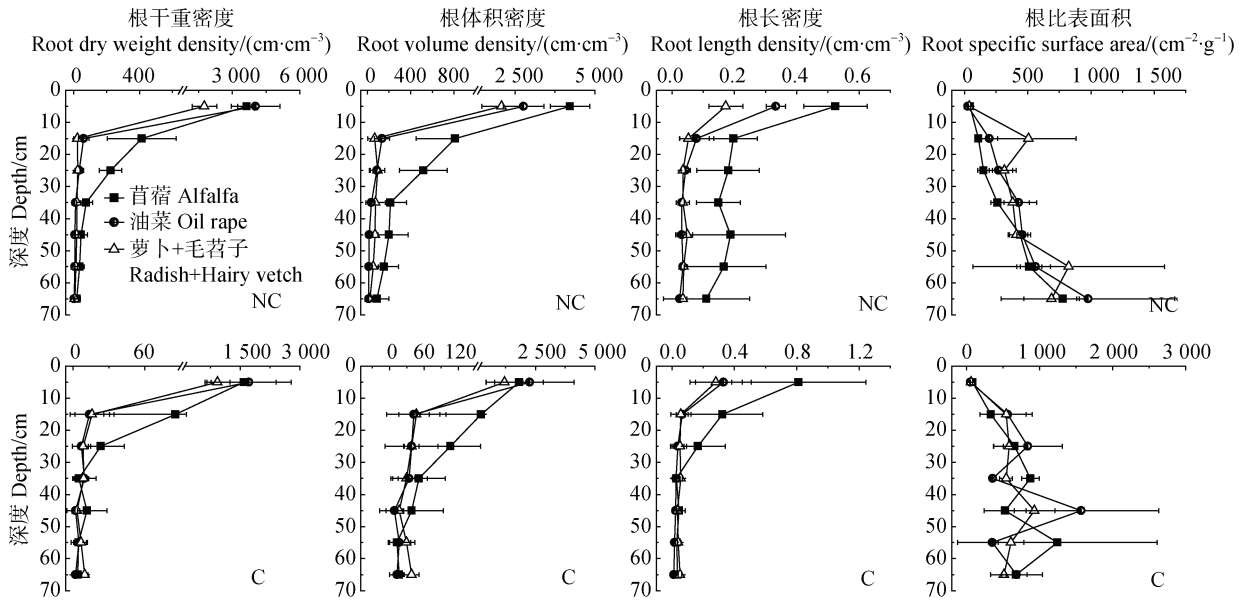
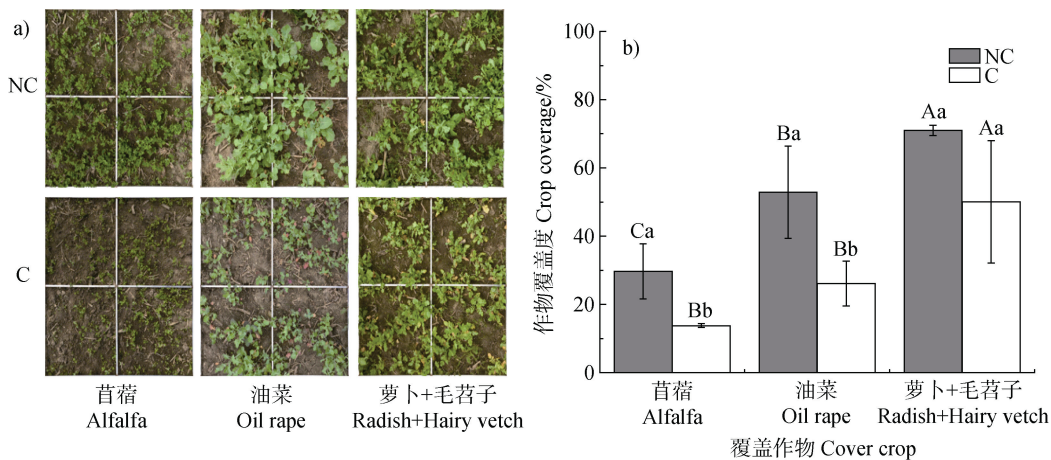


图 4 不同压实处理各土层覆盖作物根系生长参数

Fig. 4 Root dry weight density, root volume density, root length density and root specific surface area of the cover crops relative to soil compactness

如图 5a) 所示, 与不压实处理相比, 压实处理下苜蓿、油菜、萝卜+毛苕子作物长势均较弱, 覆盖度也较低; 压实处理下, 覆盖程度最好的为萝卜+毛苕子。定量分析表明, 不论压实与否, 萝卜+毛苕

子覆盖度均显著高 ( $P < 0.05$ ) 于苜蓿和油菜(图 5b))。与不压实处理相比, 压实导致苜蓿和油菜的覆盖度显著下降 ( $P < 0.05$ ), 降幅分别为 53.6%、50.6%, 而对萝卜+毛苕子的覆盖度影响不显著 ( $P > 0.05$ )。



注: 不同大写字母代表相同压实处理不同覆盖作物之间差异性显著 ( $P < 0.05$ ); 不同小写字母代表相同覆盖作物不同压实处理之间差异性显著 ( $P < 0.05$ )。下同。Note: Different uppercase letters indicate significant difference ( $P < 0.05$ ) between cover crop treatments in the plot of compacted soil; Different lowercase letters indicate significant difference ( $P < 0.05$ ) between the plots different in soil compactness but the same in cover crop treatment. The same below.

图 5 不同压实和覆盖作物处理下作物覆盖度的实地图 (a)) 和统计图 (b))

Fig. 5 Coverage of cover crops relative to compactness and cover crop treatment, Spot figure (a)) and Statistics figure (b))

不同压实处理下覆盖作物地上、地下部分生物量如图 6a) 和 6b) 所示。不压实处理下, 油菜的地上部分生物量 (图 6a)) 最高 (5 422 kg·hm<sup>-2</sup>), 分

别为萝卜+毛苕子和苜蓿的 1.15 倍和 2.10 倍; 而压实处理下萝卜+毛苕子地上部分生物量显著大于苜蓿和油菜 ( $P < 0.05$ )。相比于不压实处理, 压实显著

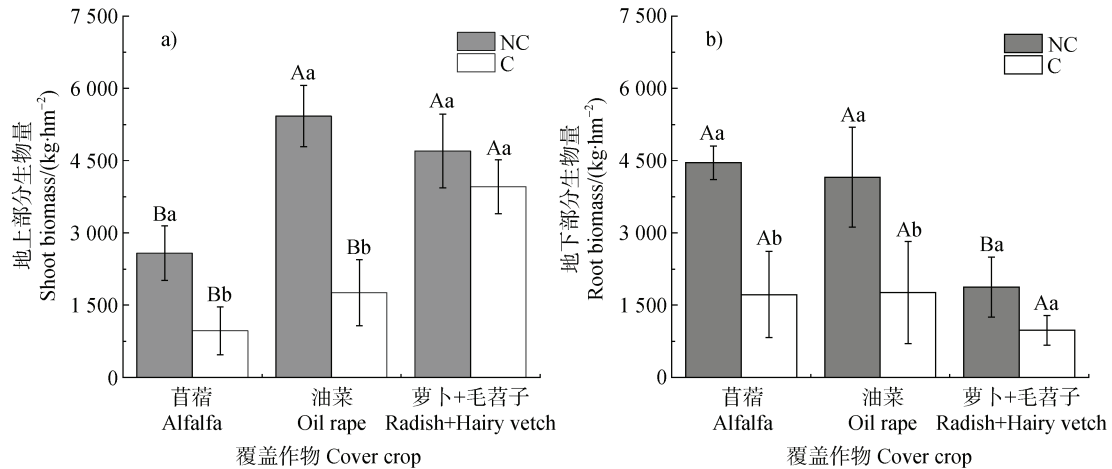


图 6 不同压实和覆盖作物处理下作物地上部分生物量 (a)、地下部分生物量 (b))

Fig. 6 Shoot biomass (a) and root biomass (b) relative to soil compactness and cover crop treatment

减少苜蓿和油菜两种作物地上部分生物量 ( $P < 0.05$ ), 减少比例分别为 62.5% 和 67.6%; 而压实仅降低萝卜+毛苕子地上部分生物量的 15.8%, 影响不显著 ( $P > 0.05$ )。

不压实处理下苜蓿和油菜地下部分生物量 (图 6b) 显著大于萝卜+毛苕子 ( $P < 0.05$ ); 压实处理下三种种植模式下覆盖作物地下部分生物量差异不显著 ( $P > 0.05$ )。压实处理较不压实处理显著减小苜蓿和油菜地下部分生物量 ( $P < 0.05$ ), 减小幅度分别为 61.4% 和 57.7%; 而萝卜+毛苕子的地下部分生物量仅减少 47.8%, 影响未达到显著水平 ( $P > 0.05$ )。

### 3 讨论

#### 3.1 压实对土壤容重、穿透阻力及收缩特性的影响

土壤穿透阻力与容重是衡量土壤物理质量的两个重要指标<sup>[18]</sup>。本研究显示压实显著增加了 0~30 cm 土层土壤容重, 影响了 0~45 cm 土层土壤穿透阻力 (图 1b))。高爱民等<sup>[19]</sup>研究割草机对苜蓿地土壤压实影响, 发现 0~30 cm 土层内土壤紧实度明显增加, 而王宪良等<sup>[20]</sup>的研究显示, 0~40 cm 土层压实处理土壤紧实度明显大于不压实处理, 且每一层土壤容重分别较不压实处理增加了 3.3%、17.2%、13.0%、11.0%, 压实影响深度能达到 40 cm 土层。土壤被压实的程度不仅取决于土壤类型, 还包括压实机械的荷载、轮胎接触面积及被压实的次数, 表层土壤受到的压实作用主要来自于轮胎的压力, 而压实深度主要取决于压实机械的荷载重量<sup>[21-22]</sup>。

本研究中土壤收缩系数大多在 0.06 以上, 属于强收缩能力土壤。这主要是由于砂姜黑土黏粒含量丰富, 黏粒矿物质主要以胀缩性强的蒙脱石为主<sup>[23]</sup>。宗玉统<sup>[24]</sup>报告砂姜黑土在 0~20 cm 和 20~40 cm 土层收缩系数的平均值分别为 0.099 和 0.098, 与本研究结果接近。压实或不压实处理下土壤的收缩能力随土壤容重的增加而下降 (图 1a), 图 3a)), 这与多数研究结果一致<sup>[25-26]</sup>。但是本研究发现 0~30 cm 土层内, 压实增加了土壤的容重, 同时也增加了土壤收缩系数, 提高了收缩曲线的最大斜率, 这与 Peng 等<sup>[27]</sup>的研究结果不同。Peng 等<sup>[27]</sup>指出压实前后土壤收缩曲线平行。然而 Schäffer 等<sup>[28]</sup>则发现高强度压实显著改变了收缩曲线的形状, 使其更为陡峭, 也增加了土壤收缩系数, 这与本研究的结果较为一致。土壤结构及其稳定性的变化会显著改变土壤的收缩行为, 土壤结构性越好、稳定性越强, 其收缩能力越弱<sup>[29-30]</sup>。本研究中使用大型拖拉机多次反复的压实破坏了土壤大孔隙结构及其稳定性, 因而导致土壤收缩幅度增加。收缩曲线最大斜率值作为衡量土壤结构稳定性的一个指标<sup>[17]</sup>, 压实后该斜率明显增加则进一步表明压实导致土壤结构恶化。

#### 3.2 不同覆盖作物根系对压实响应的差异

根系作为植物吸收和利用养分的重要器官, 生长发育受到土壤结构和压实程度等多因素影响<sup>[31]</sup>。压实一方面减少了土颗粒之间孔隙, 从而增加土壤穿透阻力, 限制根系的伸展; 另一方面, 压实导致土壤孔隙间的连通性较差, 降低了水分和养分的运输能力<sup>[32]</sup>。因此, 本研究发现压实影响最大的 0~



30 cm 土层,不同覆盖作物根干重密度和根体积密度均较不压实处理显著降低(图4)。但是本研究也发现压实对油菜根长密度影响相对较弱,甚至还增加了表层0~20 cm 苜蓿和除40~50 cm 土层外萝卜+毛苕子的根长密度;同时压实总体上增加了不同覆盖作物的根比表面积(图4)。Glab<sup>[33]</sup>研究发现压实增加了0~10 cm 土层苜蓿小于0.2 mm 的细根长度,降低了0~30 cm 土层苜蓿根系的平均直径。这一结果表明压实虽然降低了根系的生物量,不利于粗壮的主根生长,但同时一定程度上导致覆盖作物侧根等细小根系相对增加,提高了单位根系生物量吸收水分和养分的能力。在压实或不压实处理下,不同覆盖作物生长状况表现出明显的差异。在不压实处理下,苜蓿根系较油菜和萝卜+毛苕子表现出更强的穿透能力(图4),而苜蓿的苗期覆盖度和地上部分生物量却最低(图5b),图6a)。压实条件下,萝卜+毛苕子总根系生物量最低(图6b)),但却表现出最强的穿透能力,50 cm 以下土层其根干重密度、根体积密度和根长密度均高于苜蓿和油菜(图4),萝卜+毛苕子的苗期覆盖度和地上部分生物量也显著高于苜蓿和油菜(图5b),图6a)。有研究发现苜蓿根系发达,在不压实土壤中生长一年的苜蓿入土深度可达1~2 m;而在压实土壤中苜蓿根系生长受到抑制,生长一年的苜蓿根系入土深度多小于1 m<sup>[34-35]</sup>。萝卜被认为具有很强的穿透压实土壤的能力,Chen 和 Weil<sup>[11]</sup>报道萝卜的根系数量随着穿透阻力的增加而增加,而油菜和黑麦根系数量随穿透阻力增加而减小,这主要是由于萝卜粗壮的肉质根有利于其根系穿透高强度的土壤。此外,萝卜作为肉质储藏根,压实可能只对根的早期生长产生影响,对其后期生长影响较弱<sup>[36]</sup>。毛苕子是一种豆科作物,可以起到固氮的作用,地上部分生物量较大。毛苕子和非豆科作物萝卜混播有利于促进养分的吸收和作物地上、地下部分的生长<sup>[37]</sup>,而在压实胁迫下,这一效应可能更加显著。因此,在本研究中萝卜+毛苕子混播模式较苜蓿和油菜单一播种模式更适应压实的土壤条件,是更适宜用于缓解土壤压实的覆盖作物种植模式。

## 4 结 论

压实显著增加了砂姜黑土 0~30 cm 土层内土

壤容重,增加了0~27.5 cm 和37.5~45 cm 土层土壤穿透阻力,同时破坏了土壤结构,改变了0~20 cm 土层土壤收缩特性;压实降低了苜蓿、油菜、萝卜+毛苕子三种种植模式下覆盖作物的根干重密度和根体积密度,但增加了根比表面积。不压实处理下,苜蓿的根干重密度和根体积密度最大,穿透能力表现为最强,但受压实影响最严重。压实处理下,萝卜+毛苕子根系在压实土壤中穿透能力较苜蓿和油菜更强,且萝卜+毛苕子地上部分生物量、地下部分生物量及覆盖度受压实影响程度最小。因此,萝卜+毛苕子混合种植较单一的苜蓿或油菜种植能更好地适应压实的土壤,具有较好的缓解土壤压实的潜力。

## 参考文献 (References)

- [ 1 ] Wang X L, Wang Q J, Zhang X C, et al. The soil compaction forms and research status[J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2016, 38 (9): 264—268. [王宪良, 王庆杰, 张祥彩, 等. 田间土壤压实研究现状[J]. *农机化研究*, 2016, 38 (9): 264—268.]
- [ 2 ] Zhu F H, Wang Y Q, Hu W G, et al. Physical properties in soil profile of farmlands in Central Shaanxi[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2014, 32 (4): 145—150. [祝飞华, 王益权, 胡卫光, 等. 关中农田土壤剖面的主要物理性状研究[J]. *干旱地区农业研究*, 2014, 32 (4): 145—150.]
- [ 3 ] Li M X, Wen G S, Li Y Z. Research progress of response of crops to soil compaction stress[J]. *Shandong Agricultural Sciences*, 2019, 51 (1): 154—160, 167. [李孟霞, 文国松, 李永忠. 作物对土壤压实胁迫响应研究进展[J]. *山东农业科学*, 2019, 51 (1): 154—160, 167.]
- [ 4 ] Tim Chamen W C, Moxey A P, Towers W, et al. Mitigating arable soil compaction: A review and analysis of available cost and benefit data[J]. *Soil and Tillage Research*, 2015, 146: 10—25.
- [ 5 ] Berisso F E, Schjonning P, Keller T, et al. Persistent effects of subsoil compaction on pore size distribution and gas transport in a loamy soil[J]. *Soil and Tillage Research*, 2012, 122: 42—51.
- [ 6 ] Busscher W, Bauer P, Frederick J. Recomposition of a coastal loamy sand after deep tillage as a function of subsequent cumulative rainfall[J]. *Soil and Tillage Research*, 2002, 68 (1): 49—57.
- [ 7 ] Welch R Y, Behnke G D, Davis A S, et al. Using cover crops in headlands of organic grain farms: Effects on soil properties, weeds and crop yields[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2016, 216: 322—332.
- [ 8 ] Rosolem C A, Pivetta L A. Mechanical and biological approaches to alleviate soil compaction in tropical soils: Assessed by root growth and activity (Rb uptake) of

- soybean and maize grown in rotation with cover crops[J]. *Soil Use and Management*, 2017, 33 ( 1 ): 141—152.
- [ 9 ] Chen G H, Weil R R. Root growth and yield of maize as affected by soil compaction and cover crops[J]. *Soil and Tillage Research*, 2011, 117: 17—27.
- [ 10 ] Zhao R, Zhang Y X. Effects of different cropping and tillage methods on soil physical properties in ramie cultivation. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2017, 45( 21 ): 82—85. [昭日格图, 张玉旭. 蓖麻栽培地不同覆盖作物和耕作方式对土壤物理性质的影响. *江苏农业科学*, 2017, 45 ( 21 ): 82—85.]
- [ 11 ] Chen G H, Weil R R. Penetration of cover crop roots through compacted soils[J]. *Plant and Soil*, 2010, 331 ( 1/2 ): 31—43.
- [ 12 ] Li H Y, Hu T C, Cao Q H, et al. Effect of improving soil fertility by planting different green manures in different patterns in dryland[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2016, 22 ( 5 ): 1310—1318. [李红燕, 胡铁成, 曹群虎, 等. 旱地不同绿肥品种和种植方式提高土壤肥力的效果[J]. *植物营养与肥料学报*, 2016, 22( 5 ): 1310—1318.]
- [ 13 ] Zeng S, Zhang L, Zhang Y P. The status of green manure production application and processes on green manure returning to field[J]. *Hunan Agricultural Sciences*, 2017 ( 9 ): 132—134. [曾莎, 张炼, 张玉平. 绿肥生产应用现状及绿肥还田研究进展[J]. *湖南农业科学*, 2017( 9 ): 132—134.]
- [ 14 ] Zhan Q H. Study on genetic features of vertisol arable land and its agricultural utilization technology[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2011. [詹其厚. 砂姜黑土耕地土壤性状特点与农业综合利用技术研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2011.]
- [ 15 ] 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.]
- [ 16 ] Peng X, Horn R. Modeling soil shrinkage curve across a wide range of soil types[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2005, 69 ( 3 ): 584—592.
- [ 17 ] Fang H, Zhang Z B, Li D M, et al. Temporal dynamics of paddy soil structure as affected by different fertilization strategies investigated with soil shrinkage curve[J]. *Soil and Tillage Research*, 2019, 187: 102—109.
- [ 18 ] Yang S Q, Wu H J, Han R Y, et al. A review of soil compaction in farmland[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2016, 47 ( 1 ): 226—232. [杨世琦, 吴会军, 韩瑞芸, 等. 农田土壤紧实度研究进展[J]. *土壤通报*, 2016, 47 ( 1 ): 226—232.]
- [ 19 ] Gao A M, Han Z S, Wu J F. Experimental research on alfalfa soil compaction by mowing machine[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2007, 23 ( 9 ): 101—105. [高爱民, 韩正晟, 吴劲锋. 割草机对苜蓿地土壤压实的试验研究[J]. *农业工程学报*, 2007, 23 ( 9 ): 101—105.]
- [ 20 ] Wang X L, Wang Q J, Li H W, et al. Effect of tyre induced soil compaction on soil properties and crop root growth under no-tillage system[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery*, 2017, 48( 6 ): 168—175. [王宪良, 王庆杰, 李洪文, 等. 免耕条件下轮胎压实对土壤物理特性和作物根系的影响[J]. *农业机械学报*, 2017, 48 ( 6 ): 168—175.]
- [ 21 ] Lamandé M, Schjønning P. Transmission of vertical stress in a real soil profile. Part II: Effect of tyre size, inflation pressure and wheel load[J]. *Soil and Tillage Research*, 2011, 114 ( 2 ): 71—77.
- [ 22 ] Liu N, Li X J, Guo B, et al. Simulation analysis on influencing factors of reclamation soil compaction in mechanical compaction process[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014, 30 ( 1 ): 183—190. [刘宁, 李新举, 郭斌, 等. 机械压实过程中复垦土壤紧实度影响因素的模拟分析[J]. *农业工程学报*, 2014, 30 ( 1 ): 183—190.]
- [ 23 ] Zhao Z H, Zhang C Z, Cai T Y, et al. Effects of different stable organic matters on physicochemical properties of lime concretion black soil and maize yield[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2015, 23( 10 ): 1228—1235. [赵占辉, 张丛志, 蔡太义, 等. 不同稳定性有机物料对砂姜黑土理化性质及玉米产量的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2015, 23 ( 10 ): 1228—1235.]
- [ 24 ] Zong Y T. The physical obstacle factors of Shajiang black soils and its improvement[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013. [宗玉统. 砂姜黑土的物理障碍因子及其改良[D]. 杭州: 浙江大学, 2013.]
- [ 25 ] Wei C L, Gao W D, Li L J, et al. Effects of initial conditions on soil shrinkage characteristic of Shajiang black soil[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery*, 2017, 48 ( 10 ): 229—236, 271. [魏翠兰, 高伟达, 李录久, 等. 不同初始条件对砂姜黑土收缩特征的影响[J]. *农业机械学报*, 2017, 48 ( 10 ): 229—236, 271.]
- [ 26 ] Xing X G, Ma X Y. Effects of soil drying process on soil shrinkage characteristic[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery*, 2016, 47 ( 6 ): 148—153. [邢旭光, 马孝义. 土壤失水过程对土体收缩特性的影响[J]. *农业机械学报*, 2016, 47 ( 6 ): 148—153.]
- [ 27 ] Peng X, Zhang Z B, Wang L L, et al. Does soil compaction change soil shrinkage behaviour?[J]. *Soil and Tillage Research*, 2012, 125: 89—95.
- [ 28 ] Schäffer B, Schulin R, Boivin P. Shrinkage properties of repacked soil at different states of uniaxial

- compression[J]. Soil Science Society of America Journal, 2013, 77 ( 6 ): 1930—1943.
- [ 29 ] Mallory J J, Mohtar R H, Heathman G C, et al. Evaluating the effect of tillage on soil structural properties using the pedostructure concept[J]. Geoderma, 2011, 163 ( 3/4 ): 141—149.
- [ 30 ] Peng X, Dörner J, Zhao Y, et al. Shrinkage behaviour of transiently-and constantly-loaded soils and its consequences for soil moisture release[J]. European Journal of Soil Science, 2009, 60 ( 4 ): 681—694.
- [ 31 ] Alameda D, Villar R. Linking root traits to plant physiology and growth in *Fraxinus angustifolia* Vahl. seedlings under soil compaction conditions[J]. Environmental and Experimental Botany, 2012, 79: 49—57.
- [ 32 ] Batey T. Soil compaction and soil management-a review[J]. Soil Use and Management, 2009, 25 ( 4 ): 335—345.
- [ 33 ] Głab T, Głab T. Effect of soil compaction on root system morphology and productivity of alfalfa ( *Medicago sativa* L. ) [J]. Polish Journal of Environmental Studies, 2011, 20 ( 6 ): 1473—1480.
- [ 34 ] Fychan R, Crotty F, Scullion J, et al. Effects of forage species and sward-lifting on compacted soil. Grassland & Forages in High Output Dairy Farming Systems Symposium of the European Grassland Federation. 2015.
- [ 35 ] Sum H R , Wu R X , Li P H , et al. Rooting depth of alfalfa[J]. Acta Agrestia Sinica ,2008,16( 3 ):307—312. [孙洪仁, 武瑞鑫, 李品红, 等. 紫花苜蓿根系入土深度[J]. 草地学报, 2008, 16 ( 3 ): 307—312.]
- [ 36 ] Figueiredo P G, Bicudo S J, Chen S B, et al. Effects of tillage options on soil physical properties and cassava-dry-matter partitioning[J]. Field Crops Research, 2017, 204: 191—198.
- [ 37 ] Tiemann L K, Grandy A S, Atkinson E E, et al. Crop rotational diversity enhances belowground communities and functions in an agroecosystem[J]. Ecology Letters, 2015, 18 ( 8 ): 761—771.

( 责任编辑: 陈荣府 )