

# 黄土高原旱地苹果园油菜间作对土壤大孔隙结构的影响

何娜娜<sup>1</sup>, 贾如浩<sup>3</sup>, 叶苗泰<sup>1</sup>, 赵西宁<sup>1,2</sup>, 高晓东<sup>1,2</sup>

(1.西北农林科技大学水土保持研究所,陕西 杨凌 712100;2.中国科学院水利部水土保持研究所,陕西 杨凌 712100;3.西北农林科技大学水利与建筑工程学院,陕西 杨凌 712100)

**摘要:**采用 X-ray computed tomography(CT)技术研究了果树行间不同油菜间作密度(CK:清耕;L:低密度间作;M:中密度间作;H:高密度间作)对土壤大孔隙特征参数的影响。结果表明:油菜间作改善了果树行间(0—60 cm)土壤大孔隙特征,各土层的土壤大孔隙数量、大孔隙面积、大孔隙度等参数分别较清耕显著提高( $P < 0.05$ );不同间作密度对土壤大孔隙的作用不同,除 10—20 cm 外,中密度间作对土壤大孔隙度的改善效果均显著好于其他处理;中密度处理下大孔隙( $d > 1$  mm)在各土层间的数目多、差异小,并且在 0—30 cm 土壤剖面上的成圆率最高。中、高密度油菜间作的土壤大孔隙特征参数均优于清耕及低密度间作,而中密度间作的土壤大孔隙分布更均匀、形状更规则,是黄土高原旱地苹果园改善土壤结构的适宜间作密度。

**关键词:**大孔隙;油菜间作;土壤结构;X-ray CT;黄土高原

中图分类号:S152.4

文献标识码:A

文章编号:1009-2242(2021)01-0259-06

DOI:10.13870/j.cnki.stbcxb.2021.01.037

## Effect of Rape Intercropping on Soil Macropore Structure in Dryland Apple Orchard of the Loess Plateau

HE Nana<sup>1</sup>, JIA Ruhao<sup>3</sup>, YE Miaotai<sup>1</sup>, ZHAO Xining<sup>1,2</sup>, GAO Xiaodong<sup>1,2</sup>

(1.*Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100;*

*2.Institute of Soil and Water Conservation, CAS & MWR, Yangling, Shaanxi 712100;*

*3.College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100)*

**Abstract:** The X-ray computed tomography (CT) technique was used to study the effects of different rape intercropping densities (CK: clean tillage; L: low-density intercropping; M: medium-density intercropping; H: high-density intercropping) on the characteristics of soil macropores in the apple orchard. The results showed that compared with the CK, rape intercropping improved the characteristics of soil macropores between rows of apple trees (0—60 cm), and the number of soil macropores, macropores' area and macro porosity in each soil layer were significantly higher ( $P < 0.05$ ). The effects of different intercropping densities on the macropores were different in the same soil layer, except for 10—20 cm, the improvement effect of the medium-density intercropping on soil macro porosity was significantly better than that of other treatments. Under the medium-density treatment, the number of macropores ( $d > 1$  mm) was large, and the difference in macropores number between soil layers was small, and the rounding rate was the highest in 0—30 cm soil profile. The soil macropore characteristic parameters of medium and high-density rape intercropping were better than those of the clean tillage and low-density treatments, and that in the medium-density intercropping treatment, the distribution of macropores was more uniform and the shape was more regular, which was an appropriate intercropping density to improve soil structure for dryland apple orchards in the Loess Plateau.

**Keywords:** macropore; rape intercropping; soil structure; X-ray CT; the Loess Plateau

黄土高原是全球最大的优质苹果集中连片栽植区,苹果的栽植面积和产量分别占全国的 50%,全球的 25%

以上。然而该区年降雨量少且时空分配不均,难以满足果树生长需求,同时,果园管理多采用传统清耕模式,造

收稿日期:2020-06-05

资助项目:国家重点研发计划项目(2016YFC0400204);国家自然科学基金项目(41771316)

第一作者:何娜娜(1994—),女,甘肃庆阳人,在读硕士研究生,主要从事农业水土资源高效利用研究。E-mail:henana@nwfufu.edu.cn

通信作者:高晓东(1985—),男,河南郟城人,博士,研究员,主要从事农业水土资源高效利用研究。E-mail:gao\_xiaodong@nwfufu.edu.cn

成土壤抗蚀抑蒸保墒效果差,水分供需矛盾突出<sup>[1-2]</sup>,严重影响该区苹果产业的高质量发展。

绿肥间作是兼具有效蓄水和保水作用的果园管理模式<sup>[3-5]</sup>。已有研究<sup>[6]</sup>表明,黄土高原进行果园绿肥间作能够有效抑制土壤蒸发,增强“土壤水库”功能,进而改善果园土壤水分状况,减少水土流失。其中,改善土壤大孔隙结构是提升黄土高原土壤储水能力的关键所在。然而,目前关于黄土高原土壤大孔隙的量化研究<sup>[7-10]</sup>大多集中于天然林草对土壤大孔隙的影响,针对间作绿肥对果树行间土壤大孔隙结构影响的研究却较为薄弱。油菜由于兼具显著的生态和经济效益,成为近年来黄土高原清耕苹果园重点推荐的绿肥类型,但油菜间作如何影响果园土壤大孔隙特征,特别是不同间作密度对其影响的差异有多大,这些科学问题对旱作果园间作模式的确定十分关键,但尚未明确回答。

X-ray CT 扫描技术是近年来新兴的一种量化土壤大孔隙特征参数的方法<sup>[11]</sup>,该方法在不破坏原状土的前提下,能全面、快速、准确地扫描获得影像数

据,进而分析得到土壤大孔隙数目、大孔隙度及成圆率等参数<sup>[12-13]</sup>;同时,CT 扫描还可以实现土壤大孔隙结构的三维可视化,结果直观且可靠。此研究以黄土高原旱地果园为对象,借助 X-ray CT 扫描手段,研究不同油菜间作密度对果树行间土壤大孔隙三维分布、大孔隙数目、大孔隙度及成圆率等特征参数的影响,以期甄选出合理的油菜间作密度以改善果园土壤水分状况,并为果园间作绿肥管理模式的推广应用提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验区概况

研究区位于陕西省延安市宝塔区天河流域庙沟村(109°20'40.44"E,36°41'54.03"N),是典型的黄土高原丘陵区,海拔 1 246 m。该地区属于干旱半干旱气候,年平均气温为 9.4 °C,年均降水量 500 mm,7—9 月的降雨量占年降水总量的 60%~70%,全年无霜期为 170~186 天。土壤主要以黄绵土为主,属于粉壤土,土层深厚,土质均一,而有机质含量低,土壤贫瘠。样地土壤基本理化性质见表 1。

表 1 样地土壤基本理化性质

样地	土层深度/cm	粒度组成/%				有机碳含量/(g·kg <sup>-1</sup> )
		$\varphi \leq 0.002 \text{ mm}$	$0.002 \text{ mm} < \varphi < 0.02 \text{ mm}$	$0.02 \text{ mm} < \varphi < 0.05 \text{ mm}$	$0.05 \text{ mm} < \varphi < 0.2 \text{ mm}$	
L	0—60	2.56±0.094	23.62±1.197	40.17±0.249	2.901±0.066	3.868±0.080
M	0—60	2.60±0.116	24.62±1.251	40.49±0.325	2.901±0.066	4.014±0.159
H	0—60	2.65±0.134	25.85±0.978	40.25±0.357	2.901±0.066	3.933±0.118
CK	0—60	2.36±0.038	21.23±0.266	39.85±0.244	2.901±0.066	2.901±0.066

注:表中数据为平均值±标准差。下同。

### 1.2 供试材料

苹果园总面积 2 000 m<sup>2</sup>,果树为 22 年生红富士(*Malus pumila* Mill.),株行距为 3.5 m×4.0 m。白菜型油菜(*Brassica campestris* L.)具有耐寒、耐旱的优点,能较好适应黄土高原的气候条件,因此,试验选用品种为此类油菜的“延油 2 号”,8 月末以不同行距撒播于苹果树行间(图 1),次年 5 月初刈割后绿肥还田。

### 1.3 试验设计

试验设置行间清耕(对照 CK)、以行距为 1 m(低密度间作 L)、0.50 m(中密度间作 M)、0.25 m(高密度间作 H)在苹果树行间撒播油菜,共 4 个处理,每个处理占地 333 m<sup>2</sup>,2018 年与 2019 年重复试验。果园不同油菜间作密度的样地示意图 1。

### 1.4 土样采集、扫描与分析

1.4.1 土样采集 采用直径 110 mm、高 600 mm、壁厚 3 mm 的 PVC 管,在营养生长期(2019 年 11 月)距离油菜行 10 cm 处采集 4 个处理样地中的原状土壤样品,各处理 3 个重复,低、中、高及对照组各样品依次编号为 L1、L2、L3、M1、M2、M3、H1、H2、H3、

CK1、CK2、CK3。用气泡膜包裹 PVC 管的管体及两端,以缓冲运输过程中的轻微碰撞。

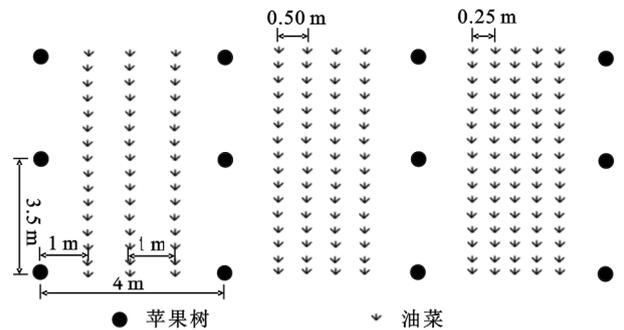


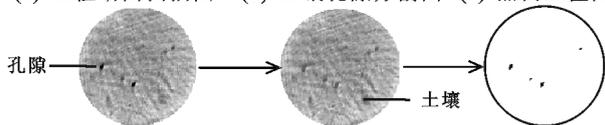
图 1 果园中低、中、高不同油菜密度间作样地示意

1.4.2 土样扫描 原状土柱 CT 扫描试验于 2019 年 11 月在陕西省杨凌农业高新技术产业示范区惠仁医院进行。CT 扫描仪的型号为 Revolution ACT 太行 GE 首台 32 层精准 CT(GE Measurement & Control, German Phoenix Company, Germany),该仪器主要用于人体医学扫描,在进行土柱扫描时重新将扫描参数分别设置为峰值电压 140 kV,电流为 300 mA,扫描时间为 21.4 s,螺距 1.0,像素 512×512,扫

描切片的厚度为 1 mm,图像的体素为  $0.053 \text{ mm}^3$ ,本试验中识别的最小当量孔径为 0.1 mm,每根土柱扫描 600 幅图像,共获得 7 200 幅图像。

1.4.3 图像分析 图像处理分析采用 ImageJ(1.48 版本)软件,由于取样时人为将 PVC 管砸入土体,导致 PVC 管壁与土体之间形成部分孔隙,并且扫描过程中存在硬化射束干扰,为避免这些因素影响结果,将感兴趣区(ROI)的直径确定为 100 mm,并去除掉土柱两端可能受扰动的 20 mm(20 张影像图),仅分析 ROI 内的土壤大孔隙分布状况。首先将 CT 扫描图像转换为 8-bit 图像,然后阈值设置为 40 进行分割<sup>[12]</sup>,得到的黑白二值图像能精准锁定影像上分布的孔隙,处理过程见图 2。该研究分析的大孔隙特征参数包括大孔隙数目、面积、周长及成圆率。然后,随机选择各处理的 2 个重复,借助 ImageJ 软件中 3D viewer 工具,基于样品的 560 张影像图(去除上下干扰层各 20 张)进行大孔隙三维结构重建。

(a) 土柱断面扫描图 (b) 土壤孔隙分割图 (c) 黑白二值图



注:黑白二值图中黑色区域为土壤孔隙,白色区域为土体。

图 2 典型图像处理过程示意

## 1.5 数据处理

大孔隙通常作为土壤水分和养分的优先流渠道,可促进水肥在土壤剖面中的快速运移且有效提升土壤蓄水能力<sup>[14]</sup>。一般依据当量直径( $d$ )(公式(1))衡量孔隙的大小。依据扫描仪器的精度及冯杰等<sup>[15]</sup>对大孔隙的界定,该试验将  $d > 0.19 \text{ mm}$  的土壤孔隙界定为大孔隙。 $d > 1 \text{ mm}$  的土壤大孔隙具有传导地表滞水和土壤悬着水的能力,是形成优先流的关键通道<sup>[16]</sup>,因此,研究也统计了各处理中此类大孔隙的数量,用以权衡土壤保蓄降水的能力。

$$d = 2 \left( \frac{A}{\pi} \right)^{0.5} \quad (1)$$

式中: $d$  为当量直径(mm); $A$  为孔隙面积( $\text{mm}^2$ ); $\pi$  为圆周率,取值 3.14。

大孔隙度是指土体间大孔隙体积占土柱总体积的百分数,表征土壤中空气和自由水所占体积分数,是评价农作物生长环境和土壤质量的关键指标。在黑白二值图像中,黑色区域代表土壤大孔隙,白色区域为土壤固态物质,因此黑色区域图像的面积占总图像面积的比重即为该层土壤图像的大孔隙度,计算方法为:

$$P = \frac{\sum_{i=0}^n A_i}{\pi \left( \frac{d_{\text{ROI}}}{2} \right)^2} \quad (2)$$

式中: $P$  为大孔隙度(%); $n$  为某张影像切片上的大孔隙总数; $A_i$  为影像切片截面上第  $i$  个大孔隙的面积( $\text{mm}^2$ ); $d_{\text{ROI}}$  为取数据前设置的感兴趣区直径(mm)。

大孔隙成圆率是指大孔隙横截面形状与标准圆形的接近程度,其值采用间接法公式(3)计算得到,可表征大孔隙的形态特征,其值越大,则说明大孔隙越规则,土柱截面上的大孔隙越规则说明其导水速率越高。特别在深层土壤中,规则大孔隙能在强降雨发生时蓄持更多的地表水分。

$$C = \frac{4\pi A}{L^2} \times 100\% \quad (3)$$

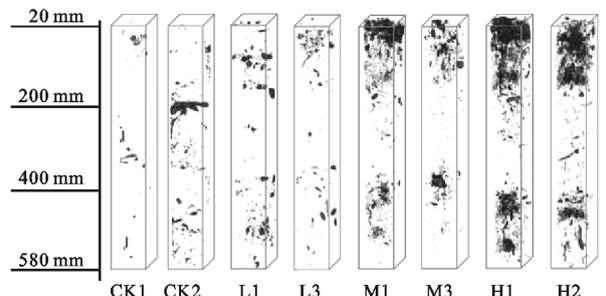
式中: $C$  为大孔隙成圆率,其值介于  $0 \sim 1$ ;  $A$  为大孔隙面积( $\text{mm}^2$ ); $L$  为大孔隙周长(mm)。

采用 Excel 2013 对大孔隙数目、大孔隙度、成圆率等数据进行统计,借助 SPSS 20.0 统计分析软件包中的 One-Way ANOVA 方差分析方法对统计结果进行分析,并采用 Origin 2016 软件绘制柱状图和线图。

## 2 结果与分析

### 2.1 油菜间作密度对果树行间土壤大孔隙三维结构的影响

不同处理部分土柱中的土壤大孔隙可视化三维结构见图 3。长方体边框的高度为 560 mm,深灰色部表示土体中大孔隙的分布状况,白色是土壤的固体部分。不同处理土壤大孔隙的数量和形状均有明显差异。除 CK2 中可能因苹果树根系所致的管状大孔隙分布外,行间清耕与低密度间作土柱中以体积小且零散分布的孔隙为主。较低密度间作而言,大孔隙在中、高密度间作土柱中分布数量更多、范围更广,同时,在高密度间作条件下,浅土层中分布着大量的孔隙,而且,根区底部的管状大孔隙分布数量也明显大于其他 3 个处理。



注:清耕(CK1, CK2),低密度间作(L1, L3),中密度间作(M1, M3),高密度间作(H1, H2)。

图 3 不同处理的土柱内大孔隙三维结构

### 2.2 油菜间作密度对果树行间土壤大孔隙特征参数的影响

2.2.1 对土壤大孔隙数目、面积及周长的影响 由表 2 可知,除 20—30 cm 土层外,低、中、高间作密度处理下大孔隙数目均显著高于对照处理( $P < 0.05$ )。

0—10 cm 土层增幅最大,分别较对照增加了 10.4, 12.2, 12.5 倍。间作密度对大孔隙数目的作用不同,高密度间作条件下,10—20, 20—30 cm 土层的大孔隙数目最大,而在 30—60 cm 土层内则中密度间作条件下的大孔隙总数目最多。

由表 2 中土壤大孔隙面积数据可知,0—60 cm 土层范围内,不同间作密度处理下土壤大孔隙面积均显著高于对照处理( $P < 0.05$ )。除 20—30 cm 土层外,中密度和高密度间作之间土壤大孔隙面积无显著

差异,均显著大于低密度间作( $P < 0.05$ )。由此可见,间作油菜能够有效增加果树行间单位土体内的土壤大孔隙面积,同时间作密度对土壤大孔隙面积的影响较大,中、高密度间作油菜增加土壤大孔隙面积的效果比低密度更显著。此外,间作油菜也显著增加了 0—60 cm 土层的大孔隙周长( $P < 0.05$ ), 0—20 cm 土层内不同间作处理之间的平均孔隙周长差异不显著( $P > 0.05$ ),而高密度间作条件下 20—30 cm 土层内大孔隙周长显著大于其他处理( $P < 0.05$ )。

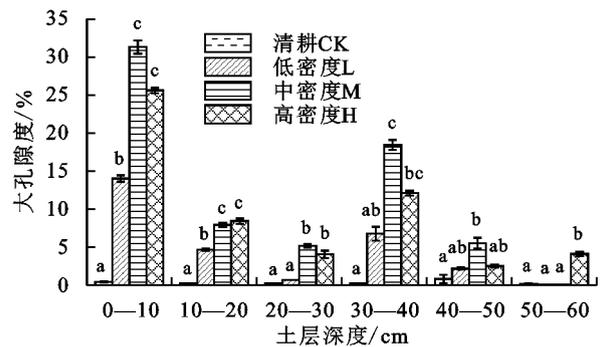
表 2 不同处理下各土层土壤大孔隙参数

土层深度/cm	处理	大孔隙数目	大孔隙面积/mm <sup>2</sup>	大孔隙周长/mm	大孔隙度/%	成圆率
0—10	L	80±4b	11.06±1.05b	3.96±0.19b	14.03±0.59b	0.117±0.014b
	M	93±5b	22.53±0.93c	3.39±0.33b	31.33±3.03d	0.187±0.015c
	H	95±4b	21.90±2.56c	3.39±0.39b	25.61±1.61c	0.135±0.018b
	CK	7±2a	0.35±0.02a	0.78±0.24a	0.44±0.14a	0.006±0.002a
10—20	L	44±3b	3.88±0.42b	2.63±0.21b	4.68±0.18b	0.043±0.002b
	M	53±5c	6.85±0.19c	2.72±0.19b	7.94±0.35c	0.038±0.009c
	H	78±3d	6.61±0.82c	3.01±0.03b	8.44±0.50c	0.087±0.001b
	CK	6±1a	0.16±0.06a	0.30±0.02a	0.22±0.09a	0.043±0.032a
20—30	L	13±2a	0.74±0.11b	1.09±0.17b	0.69±0.00a	0.011±0.001b
	M	13±2a	0.52±0.14ab	1.16±0.16b	5.16±0.33c	0.003±0.001a
	H	38±4b	4.04±0.16c	1.89±0.25c	4.08±0.68b	0.049±0.003c
	CK	6±1a	0.18±0.01a	0.32±0.09a	0.22±0.05a	0.003±0.0a
30—60	L	37±1b	2.32±0.25b	1.45±0.11b	3.04±1.11b	0.011±0.001a
	M	42±1c	10.68±0.29c	2.35±0.09c	8.00±0.07d	0.004±0.001a
	H	34±3b	11.09±0.70c	2.54±0.10c	6.24±0.18c	0.048±0.003a
	CK	29±1a	0.46±0.06a	0.64±0.21a	0.40±0.22a	0.003±0.0a

注:表中不同小写字母表示相同土层内不同处理间差异显著( $P < 0.05$ )。

2.2.2 对土壤大孔隙度的影响 由表 2 可知,不同土层各间作密度处理下大孔隙度相比较对照处理均有显著差异( $P < 0.05$ )。而且不同间作密度之间大孔隙度差异较大,因此,进一步对各土层不同处理之间进行显著性分析。由图 4 可知,在 0—10 cm 土层上,中、高密度间作的大孔隙度极显著高于清耕和低密度间作( $P < 0.01$ ),且清耕与低密度间作之间也存在极显著差异( $P < 0.01$ )。10—20 cm 土层内大孔隙度的分布差异性与 0—10 cm 相同,但 3 种间作密度的大孔隙度大幅降低,分别降低了 66%, 76%, 67%。各处理在 20—30 cm 土层中大孔隙度达到根区上层(0—40 cm)的最小值,中、高密度间作的大孔隙度极显著( $P < 0.01$ )高于清耕和低密度间作。30—40 cm 范围内,各间作处理下的大孔隙度略有增高,相比较而言,中密度间作的大孔隙度极显著( $P < 0.01$ )高于清耕和低密度间作,而高密度间作的大孔隙度仅与清耕处理有极显著差异( $P < 0.01$ )。40—50 cm 土层中,中密度间作的土壤大孔隙度极显著( $P < 0.01$ )高于其他处理。然而,50—60 cm 土层中,高密度处理的大孔隙度最大。结果表明,0—50 cm

土层内中密度间作油菜均可以显著提高果树行间土壤的大孔隙度。



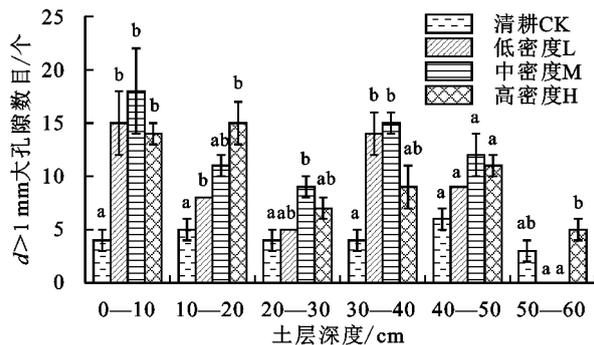
注:图柱上方不同小写字母表示不同处理间差异极显著( $P < 0.01$ )。

图 4 不同处理下各土层大孔隙度分布

### 2.3 油菜间作密度对果树行间 $d > 1$ mm 的土壤大孔隙的影响

由图 5 可知,不同处理下苹果树行间各土层  $d > 1$  mm 的大孔隙数目差异较大。0—10 cm 土层,各间作密度均显著( $P < 0.05$ )增大了土壤中  $d > 1$  mm 的大孔隙数目,而不同间作密度之间差异不明显( $P > 0.05$ )。10—20 cm 土层中,中、高密度间作大孔隙数目显著( $P < 0.05$ )多于清耕和低密度处理,而低、中

密度间作中土壤大孔隙数目较 0—10 cm 分别降低了 47%, 39%。20—30 cm 土层内, 低、中、高密度间作的大孔隙数目分别是 5, 9, 7 个, 达到根区上层(0—50 cm)的最小值, 中密度处理显著高于其他处理( $P < 0.05$ )。30—40 cm 土层内低、中、高密度间作的大孔隙数目较 20—30 cm 分别增加了 9, 6, 2 个, 其中, 低密度与中密度间作的土壤大孔隙数目显著( $P < 0.05$ )大于清耕和高密度间作。各处理间大孔隙数目在 40—50 cm 土层中无显著( $P > 0.05$ )差异。50—60 cm 土层中, 低、中密度间作的大孔隙数目降为 0, 与高密度处理有显著( $P < 0.05$ )差异。中密度间作油菜在 0—10, 20—30, 30—40, 40—50 cm 4 个土层内形成的  $d > 1$  mm 的大孔隙数目均最多, 但与低密度和高密度间作并不存在显著( $P > 0.05$ )差异; 而在 10—20, 50—60 cm 2 个土层内, 高密度间作油菜形成的  $d > 1$  mm 的大孔隙数目达到 4 个处理的最大值, 并且 50—60 cm 土层上的大孔隙数目与低、中密度间作有显著差异( $P < 0.05$ ), 但大孔隙的总数目少。结果表明, 中密度间作下苹果树行间  $d > 1$  mm 的大孔隙数目多, 且不同土层之间大孔隙数目的差异小。



注: 图柱上方不同小写字母表示不同处理间差异显著( $P < 0.05$ )。

图 5 不同处理下各土层  $d > 1$  mm 的大孔隙数目分布

## 3 讨论

### 3.1 油菜间作对果树行间大孔隙特征的影响

土壤结构是土壤功能发挥的基础, 定量获取土壤大孔隙信息, 对于促进水、气协调运移、改善黄土高原旱地果园的水分环境意义重大, 与赵世伟等<sup>[7]</sup>量化分析的结果一致, 本研究发现, 果园间作油菜与行间清耕相比土壤大孔隙特征差异显著。低、中、高密度处理的大孔隙数目、面积、周长及大孔隙度等均显著高于清耕处理( $P < 0.05$ )(表 2)。一般情况下, 土壤大孔隙的成因有 3 类: 其一, 土壤动物的生命活动可以形成土壤孔隙, 比如蚯蚓通常形成在土壤剖面上连续分布的管状大孔隙; 其二, 植物根系生长形成连续分布的管状大孔隙, 其大小通常随着土层深度的增加而减小<sup>[17]</sup>; 其三, 冻融或者干湿交替形成体积小、分布随机且不连续的大孔隙<sup>[18-19]</sup>。由表 3 可知, 0—20

cm 土层内中、高密度间作处理下, 油菜根长密度明显高于低密度, 这与对应土层中孔隙参数的分布规律相吻合, 因此, 推测间作油菜与清耕处理之间的差异由油菜根系生长所致, 同时, 该区降雨少且时空分布不均, 频繁的干湿交替也是形成较多零散大孔隙的原因。值得注意的是, 首先, 高密度处理的三维大孔隙结构在表层(2—20 cm)的分布明显比中密度处理密集(图 3), 与该层大孔隙参数的量化结果相反(图 4), 有研究<sup>[20]</sup>表明, 草地中植物根系大多集中在 0—20 cm 的土层上, 特别是在 0—10 cm, 而根系分泌物使土体内团聚体数量增多<sup>[21]</sup>, 推测其原因可能是高密度处理的根系在 2—20 cm 土层密集分布, 同时产生较多分泌物, 进而增加了零散小孔隙的分布数量。其次, 不同土层深度孔隙参数的分析结果(图 4 和图 5)表明, 10—30 cm 范围内, 根系参数显著降低, 在 20—30 cm 达到最低值。以往研究<sup>[22]</sup>表明, 频繁踩踏会导致土壤颗粒压实, 使根系生长的阻力增加, 而实际生产中果园的经营程序比较复杂, 工作量大, 长期以来的踩踏使果树行间近地表层土壤紧实, 虽然播种前进行了翻耕, 但深度只达到地表以下 15 cm 左右, 因此, 根系在 20—30 cm 土层生长受到巨大阻力, 土壤大孔隙分布也相对较少。

表 3 不同处理下根长密度 单位:  $m/m^3$

土层深度/cm	低密度 间作油菜	中密度 间作油菜	高密度 间作油菜
0—20	695.29±135.21	939.55±178.70	1084.50±208.99
20—40	445.97±88.65	575.88±89.87	550.75±83.63
40—60	259.40±35.15	240.34±8.63	284.47±24.39

### 3.2 油菜间作对果树行间土壤水力性能的影响

土壤表层的结构特征对黄土高原降水资源的转化、储存和利用有着重要影响, 土壤导水速率大小及“土壤水库”作用能否充分发挥取决于土壤表层大孔隙结构的分布状况。其中  $d > 1$  mm 的大孔隙是能够形成优先流的关键通道, 决定土壤中水分的流速、流态、流量及持水性能。研究表明, 中密度间作油菜时果树行间形成了相对较多  $d > 1$  mm 的大孔隙, 不同土层之间大孔隙数目的差异小。此外, 土壤大孔隙成圆率表征着大孔隙形状的规则程度, 其值会随根系活动而变化, 还与地上生长的植被类型和植被种植密度相关<sup>[23-24]</sup>。本研究表明, 中密度能够有效提高表征土壤水力性能的关键参数, 改善土壤孔隙结构。

## 4 结论

(1) 油菜间作改善了果树行间(0—60 cm)土壤大孔隙特征, 各土层的土壤大孔隙数量、大孔隙面积、大孔隙度等参数分别较清耕显著提高( $P < 0.05$ )。各间作密度对土壤大孔隙的作用不同, 除 10—20 cm

外,中密度间作对土壤大孔隙度的改善效果均显著好于其他处理。

(2)中、高密度处理下  $d > 1$  mm 的大孔隙数目无显著差异( $P > 0.05$ ),但中密度处理下大孔隙( $d > 1$  mm)在土层间的数目多、差异相对较小、并且在 0—30 cm 土壤剖面上的成圆率较高,大孔隙形状特征更规则。

(3)中密度间作油菜可有效改善土壤大孔隙的特征参数及表征土壤水力性能的关键参数,是黄土高原旱地苹果园改善土壤结构的适宜间作密度。

#### 参考文献:

- [1] 宋小林,赵西宁,高晓东,等.黄土高原雨水集聚深层入渗(RWCD)系统下山地果园土壤水分时空变异特征[J].应用生态学报,2017,28(11):3544-3552.
- [2] 贾如浩,杨建利,赵西宁,等.二元覆盖对苹果树低耗水生育期土壤水分的影响[J].应用生态学报,2019,30(12):4082-4090.
- [3] 凌强,赵西宁,高晓东,等.间作经济作物对黄土丘陵区旱作红枣土壤水分的调控效应[J].应用生态学报,2016,27(2):504-510.
- [4] Lin B B. The role of agroforestry in reducing water loss through soil evaporation and crop transpiration in coffee agroecosystems [J].Agricultural and Forest Meteorology,2010,150(4):510-518.
- [5] Chen C F, Liu W J, Wu J E, et al. Can intercropping with the cash crop help improve the soil physico-chemical properties of rubber plantations? [J]. Geoderma, 2019,335:149-160.
- [6] Ling Q, Gao X D, Zhao X N, et al. Soil water effects of agroforestry in rainfed jujube (*Ziziphus jujube* Mill.) orchards on loess hillslopes in Northwest China [J].Agriculture, Ecosystems and Environment,2017,247:343-351.
- [7] 赵世伟,赵勇钢,吴金水.黄土高原植被演替下土壤孔隙的定量分析[J].中国科学:地球科学,2010,40(2):223-231.
- [8] 鞠忻倪,贾玉华,甘森,等.黄土沟壑区不同地形部位土壤大孔隙特征研究[J].土壤学报,2018,55(5):1098-1107.
- [9] 冯璐,丁康,屈媛媛,等.黄土塬边坡植被类型对土壤孔隙的影响[J].草业科学,2020,37(4):625-634.
- [10] Li T C, Shao M A, Jia Y H. Application of X-ray tomography to quantify macropore characteristics of loess soil under two perennial plants [J]. European Journal of Soil Science,2016,67(3):266-275.
- [11] Cnudde V, Boone M N. High resolution X-ray computed tomography in geosciences: A review of the current technology and applications [J].Earth Science Reviews,2013,123:1-17.
- [12] Wang J M, Qin Q, Bai Z K. Characterizing the effects of opencast coal-mining and land reclamation on soil macropore distribution characteristics using 3D CT scanning [J].Catena,2018,171:212-221.
- [13] Hu X, Liu Y L, Liu Y, et al. Exclosure on CT-measured soil macropore characteristics in the Inner Mongolia grassland of northern China [J].Journal of Soils and Sediments,2018,18:718-726.
- [14] Rab M A, Haling R E, Aarons S R, et al. Evaluation of X-ray computed tomography for quantifying macroporosity of loamy pasture soils [J].Geoderma,2014,213:460-470.
- [15] 冯杰,郝振纯.分形理论在描述土壤大孔隙结构中的应用研究[J].地球科学进展,2004,19(增刊1):270-274.
- [16] Luxmoore R J. Micro, meso, and macroporosity of soil [J].Soil Science Society of America Journal,1981,45:671-672.
- [17] 孟晨,牛健植,骆紫藤,等.华北土石山区森林土壤大孔隙对土壤理化性质及根系的响应[J].水土保持学报,2019,33(3):94-100.
- [18] Luo L F, Lin H, Li S C. Quantification of 3-D soil macropore networks in different soil types and land uses using computed tomography [J].Journal of Hydrologic,2010,393(1/2):53-64.
- [19] 赵云朵,胡霞.基于 CT 研究冻融对高寒草甸土壤孔隙结构的影响[J].水土保持学报,2020,34(3):362-367.
- [20] Peng H Y, Li X Y, Li G Y, et al. Shrub encroachment with increasing anthropogenic disturbance in the semi-arid Inner Mongolian grasslands of China [J].Catena,2013,109:39-48.
- [21] 赵冬,许明祥,刘国彬,等.用显微 CT 研究不同植被恢复模式的土壤团聚体微结构特征[J].农业工程学报,2016,32(9):123-129.
- [22] Brevik E C. Forty years of soil formation in a South Georgia, USA borrow pit [J].Soil Horizon,2013,54:20-29.
- [23] Xia H Y, Zhao J H, Sun J H, et al. Dynamics of root length and distribution and shoot biomass of maize as affected by intercropping with different companion crops and phosphorus application rates [J].Field Crop Research,2013,150:52-62.
- [24] Kim H, Anderson S H, Motavalli P P, et al. Compaction effects on soil macropore geometry and related parameters for an arable field [J].Geoderma,2010,160:244-251.