

利用计算机断层扫描技术研究土壤改良措施下土壤孔隙

杨永辉^{1,2}, 武继承^{1,2}, 毛永萍³, 韩庆元⁴, 何方^{1,2}

(1. 河南省农业科学院植物营养与资源环境研究所, 郑州 450002; 2. 农业部作物高效用水原阳科学观测站, 原阳 453514; 3. 郑州市金水区总医院, 郑州 450001; 4. 武警河南总队医院, 郑州 450052)

摘要: 为探明不同土壤结构改良措施(秸秆覆盖、免耕、有机肥、保水剂)对土壤孔隙特征及分布的影响, 采用计算机断层(computed tomography, CT)扫描法定量分析了土壤孔隙的数目、孔隙度及孔隙在土壤剖面上的分布特征。结果表明: 不同措施均提高了土壤总孔隙数、大孔隙数及0.13~1.0 mm孔隙数, 且其孔隙度也相应提高。同时孔隙成圆率也得到了改善。各处理中以有机肥和免耕处理效果较佳, 其次为保水剂和秸秆覆盖, 对照最低。此外, 不同措施显著提高了土壤的田间持水量和>0.25 mm水稳性团聚体含量, 降低了土壤容重, 且各处理中, 仍以有机肥和免耕处理效果最佳, 其田间持水量分别较对照提高了15.9%和16.4%, 而土壤容重较对照降低了6.8%和8.8%。相关分析表明: 田间持水量、容重和>0.25 mm水稳性团聚体含量与土壤总孔隙度和大孔隙度呈显著或极显著正相关; 而土壤容重对于总孔隙度和大孔隙度及孔隙成圆率呈显著负相关。

关键词: 土壤, 秸秆, 土壤水分, 土壤改良, CT扫描, 土壤孔隙, 定量分析

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2013.23.014

中图分类号: S152.5

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2013)-23-0099-10

杨永辉, 武继承, 毛永萍, 等. 利用计算机断层扫描技术研究土壤改良措施下土壤孔隙[J]. 农业工程学报, 2013, 29(23): 99-108.

Yang Yonghui, Wu Jicheng, Mao Yongping, et al. Using computed tomography scanning to study soil pores under different soil structure improvement measures[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2013, 29(23): 99-108. (in Chinese with English abstract)

0 引言

近年来, 应用CT扫描技术进行土壤孔隙度^[1-3]和土壤孔隙空间分布状况等研究, 已成为研究土壤孔隙特征的新方法^[4-8]。与常规方法相比, CT扫描法具有不破坏土体和分析精度高(mm至 μm 尺度)^[9]等优点。相关研究^[10-12]表明, 利用CT扫描法可研究土壤孔隙度、孔隙表面分形维数、土壤孔隙的分布特征、土壤密度和土壤含水量空间分布, 以及非饱和导水率等土壤性质。同时, CT扫描技术能够准确揭示大孔隙(直径>1 mm)的数目、大小及位置^[10], 且由土壤容重计算获得的总孔隙度与CT扫描技术得到的结果较为一致^[13]。此外, 学者们^[7-8, 14]对含有各种大孔隙的原状土柱或填充土柱^[15]进行了CT扫描研究, 得到了土壤大孔隙数目、大小、形状及连通性等土柱横断面或纵断面上的分布特征。

免耕、秸秆覆盖、有机肥与表土作业等土壤结构改良措施可增加土壤有机质, 改良土壤结构^[16], 提高土壤肥力^[17]和土壤孔隙度, 降低容重, 促进作物生长^[18]。Eduardo等^[19]研究发现, 长年免耕能够提高土壤团聚体稳定性, 且0~5 cm的土层作用效果更为明显。Antonio等^[20]经过3 a的连续试验发现, 秸秆覆盖改善了土壤理化性质, 土壤孔隙度及土壤团聚体稳定性均得到了提高, 土壤有效水含量及导水能力也均显著提高。而刘定辉等^[21]研究发现, 秸秆还田结合免耕可增加10~20 cm土层通气孔隙的孔径, 降低了无效孔隙的孔径, 改善心土层的土壤结构, 提高耕层土壤的持水性能, 增加土壤水分库容量。同时, 有机肥或有机无机肥混施能够显著提高土壤和团聚体中的有机碳含量, 从而提高团聚体稳定性^[22-25]。而堆肥和农家肥可增加有机质含量^[22, 26], 并有利于大团聚体的形成, 从而提高团聚体稳定性^[27], 增加土壤蓄存水分和保持水土的能力。作为具有改善土壤结构的保水剂, 其可促进团粒形成^[28], 且可改善土壤孔隙特征^[15], 增加土壤毛管孔隙度和总孔隙度^[29], 提高土壤入渗能力^[30], 还可抑制表土结皮和土面蒸发等。有关这方面的研究已屡见不鲜, 但不同措施对土壤孔隙数量、大小及在土壤剖面上的分布的影响如何仍不

收稿日期: 2013-06-16 修订日期: 2013-10-13

基金项目: 公益性行业(农业)科研专项经费项目(201203077); 国家863计划项目(2013AA102904)

作者简介: 杨永辉(1978—), 男, 博士, 主要从事土壤生态与节水农业等方面研究。郑州 河南省农业科学院植物营养与资源环境研究所, 450002。Email: yangyongh@mails.ucas.ac.cn

清楚,而定量分析不同土壤结构改良措施对土壤孔隙的影响,对阐明其对土壤孔隙的作用机理具有重要的科学意义。

因此,应用 CT 扫描技术对土壤孔隙进行扫描,并对其图像孔隙参数进行比较与分析,可研究不同土壤结构改良措施对土壤的孔隙分布状况的影响,为不同土壤改善措施的合理应用及阐明其对土壤孔隙的作用机理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验设在河南省开封市通许县朱砂镇演武岗村进行,演武岗地处暖温带大陆性季风气候,全年太阳辐射总量 512.9 kJ/cm^2 ,年平均光照时数 2428 h ,日照百分率为 55%;年平均气温 14.2°C , $>10^\circ\text{C}$ 的有效积温 446°C ,无霜期 222 d,多年平均降水量 682.4 mm ,其中 7~9 3 个月降水量占全年降水量的 60%,年蒸发量为 1936 mm ,蒸发量是降水量的 3~4 倍。存在较严重的春旱和伏旱;土壤为砂质潮土,土壤母质为河流冲积物,该地区地势平坦,海拔 60 m,耕层有机质 11.98 g/kg 、全 N 0.85 g/kg 、全 P 0.78 g/kg 、水解氮 55.89 mg/kg 、速效磷 15.91 mg/kg 、速效钾 69.4 mg/kg 。土壤容重 1.32 g/cm^3 ,土壤机械组成为:砂粒 ($2\sim0.02 \text{ mm}$) 占 82.0%,粉粒 ($0.02\sim0.002 \text{ mm}$) 占 8.3%,黏粒 ($<0.002 \text{ mm}$) 占 8.7%。

1.2 材料与方法

1.2.1 试验设计

采用大田试验,研究设置:处理 1:常规耕作(对照)、处理 2:保水剂(聚丙烯酰胺类, 60 kg/hm^2)、处理 3:秸秆覆盖(玉米秸秆粉碎 1 cm , 4500 kg/hm^2)、处理 4:有机肥(鸡粪, 750 kg/hm^2 ,氮、磷、钾质量分数分别为 1.5%、1.2%、0.8%)、处理 5:免耕,共 5 个处理。3 次重复,随机区组排列。播种前用普通过磷酸钙 (P_2O_5 90 kg/hm^2) 作肥底;N 肥 225 kg/hm^2 ,底施 50%,分别在小麦拔节期追施 30%和灌浆期 20%。本试验于 2009 年 10 月开始进行定位试验观测,试验处理为每年小麦播种前(10 月 25 日)进行,试验地块为小麦、玉米轮作制。小区面积 $4 \text{ m}\times 8 \text{ m}=32 \text{ m}^2$ 。于 2012 年 6 月 6 日小麦收获后进行原状土柱 ($0\sim13 \text{ cm}$)、环刀样 ($0\sim13 \text{ cm}$,) 及原状土 ($0\sim13 \text{ cm}$) 的采集。

1.2.2 CT 扫描测定方法

1) 原状土柱的采集

原状土柱采用内直径为 50 mm ,厚度 2 mm ,长度 130 mm 的 PVC 硬质管材进行采集。取样前,将 PVC 管的一端打磨成刀口,以便取样。分别在

大田试验中不同处理中取土柱 3 个重复。带回实验室后,放置于 4°C 左右的冰箱里待用。室内准备 2 根直径分别为 2.0 和 2.4 mm 的钢条,直立在 PVC 管中,并装入与原状土柱容重一致的土壤,填满后再将钢条拔出,制作出 2 个已知直径的大孔隙作为对照^[7-8],以确定孔隙阈值。

2) CT 扫描

本试验采用新型美国 CE 公司的 PET-CT (DISCOVERYST16) 256 层极速 CT 扫描仪。扫描土柱前,需重新设定医用 CT 装置的扫描参数。扫描峰值电压设定为 120 kV ,电流设定为 110 mA ,扫描时间设定为 1 s ,扫描厚度为 1 mm ,从距离土柱顶端 20 mm 处开始扫描,每隔 5 mm 扫描一个横截面,每个土柱扫描 20 幅横截面图片,共 15 个土柱(5 个处理,3 个重复),总共得到 300 幅扫描图像。扫描土柱不同土壤密度区在图像中以不同亮度表示,土壤大孔隙从图像中可清晰地显示出来^[14]。图片中密度越小的区域越黑,密度越大就越白。

3) 图像分析

将得到的 CT 扫描图片保存到计算机中,得到 JPG 格式的灰度图像。采用 ImageJ 1.44 版本软件^[31]对 CT 扫描图片进行图像分析。分析图像的尺寸选择 $50 \text{ mm}\times 50 \text{ mm}$,其面积为 2500 mm^2 。图片分析前,首先要将所得 CT 图像转换为 8 位图像,之后再进行图像分割。根据已知的大孔隙,设定其分割阈值,选取阈值为 70。图像分割后,得到黑白二值图像,白色部分为土壤基质,黑色部分为土壤孔隙。分析得到的孔隙特征参数为:孔隙数目、面积、周长及成圆率等。

至今,对大孔隙孔径的划分及其对大孔隙最小值的定义均没有得到一致的结论。Warner^[10]和 Luxmoore^[32]认为当量孔径(与一定的土壤水吸力相当的孔径) $>1 \text{ mm}$ 的孔隙是大孔隙;而 Beven^[33]认为当量直径大于 0.03 mm 的孔隙为大孔隙。Warner^[10]利用 CT 扫描技术,准确获得了 $>1 \text{ mm}$ 的大孔隙。本试验中所能辨别的最小当量孔径为 0.13 mm 。

因此,本研究的孔隙可分为大孔隙(当量直径 $\geq 1 \text{ mm}$)和当量直径为 $0.13\sim 1 \text{ mm}$ 孔隙 2 类。CT 测得的总孔隙数为大孔隙数与当量直径为 $0.13\sim 1 \text{ mm}$ 孔隙之和。CT 测定的大孔隙度或 $0.13\sim 1 \text{ mm}$ 孔隙度为大孔隙或 $0.13\sim 1 \text{ mm}$ 孔隙的面积占图像面积的百分数,总孔隙度为大孔隙度和 $0.13\sim 1 \text{ mm}$ 孔隙度之和。孔隙的成圆率可从如下公式计算得到

$$C=4\pi A/L^2 \quad (1)$$

式中, C 为成圆率,其值介于 1 和 0 之间; A 为孔隙面积, mm^2 ; L 为孔隙周长, mm 。

1.2.3 田间持水量、土壤容重和水稳性团聚体含量测定

田间持水量和土壤容重采用环刀法，水稳性团聚体含量测定采用湿筛法^[34]，取样土层深度为0~13 cm。

1.2.4 数据统计方法

全土壤剖面的孔隙参数、容重、田间持水量等为不同土层的平均值。不同土柱参数值均为3次重复的算术平均值。分析所得的数据应用统计学及相关的数理统计软件(DPS10.0)进行方差分析与处理。

2 结果与分析

2.1 不同处理对土壤总孔隙(>0.13 mm)、大孔隙(>1.0 mm)和0.13~1.0 mm孔隙特征的影响

从表1可知，不同处理均提高了土壤总孔隙、

大孔隙和0.13~1.0 mm孔隙数目，其中有机肥处理的各孔隙数目最多，其次为免耕、保水剂和秸秆覆盖，对照最少，其中大孔隙数分别比对照孔隙数目增加了197.7%、146.8%、89.5%、58.3%。而不同处理的土壤总孔隙度和大孔隙度均表现为：免耕>有机肥>秸秆覆盖>保水剂>对照($P<0.05$)。其中，免耕和有机肥处理的总孔隙度分别较对照高272.5%、242.5%，而其大孔隙度分别较对照高343.1%、302.7%。与大孔隙相比，0.13~1.0 mm孔隙数目虽明显多于大孔隙，但0.13~1.0 mm孔隙度所占比例却较低。因此，土壤总孔隙度的大小主要由大孔隙决定。各处理中以有机肥和免耕处理对于土壤孔隙数或孔隙度的提高幅度较大。

表1 不同处理0~13 cm土层平均土壤孔隙数、孔隙度及成圆率

Table 1 Average soil pore numbers, soil porosity and soil circularity in soil layer in different treatments of 0~13 cm soil layer

处理 Treatments	孔隙数目 Number of pore/个			孔隙度 Porosity/%			成圆率 Circularity		
	总孔隙 Total pore	大孔隙 Macro pore	0.13~1.0 mm 孔隙 0.13~1.0 mm pore	总孔隙 Total porosity	大孔隙 Macro porosity	0.13~1.0 mm 孔隙 0.13~1.0 mm pore	总孔隙 Total pore	大孔隙 Macro pore	0.13~1.0 mm 孔隙 0.13~1.0 mm pore
对照 CK	17e	7c	10d	5.90d	4.80d	0.28d	0.70b	0.60c	0.81b
保水剂 Super absorbent polymers	32cd	14b	18c	10.35c	9.85c	0.50c	0.79ab	0.65bc	0.87a
秸秆覆盖 Straw mulching	27d	12b	15c	11.50b	10.89c	0.61b	0.76b	0.68b	0.88a
有机肥 Organic fertilizer	51a	22a	29a	20.21a	19.33b	0.88a	0.85a	0.70ab	0.90a
免耕 No-tillage	42b	19b	23b	21.98a	21.27a	0.71ab	0.88a	0.74a	0.92a

注：表中同一列不同的小写字母表示不同处理间的差异达显著($P<0.05$)水平，下同。

Note: Different small letters in the same row meant significant difference among different treatments at 0.05 level (LSD test). The same as below.

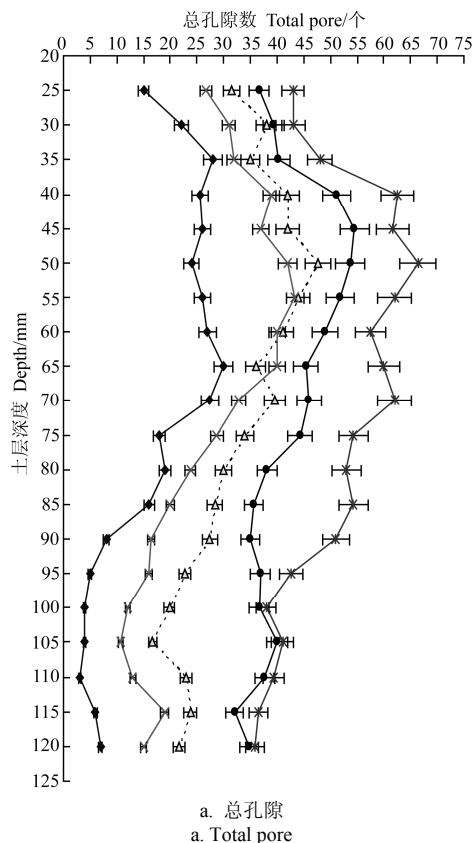
2.2 不同处理孔隙平均成圆率

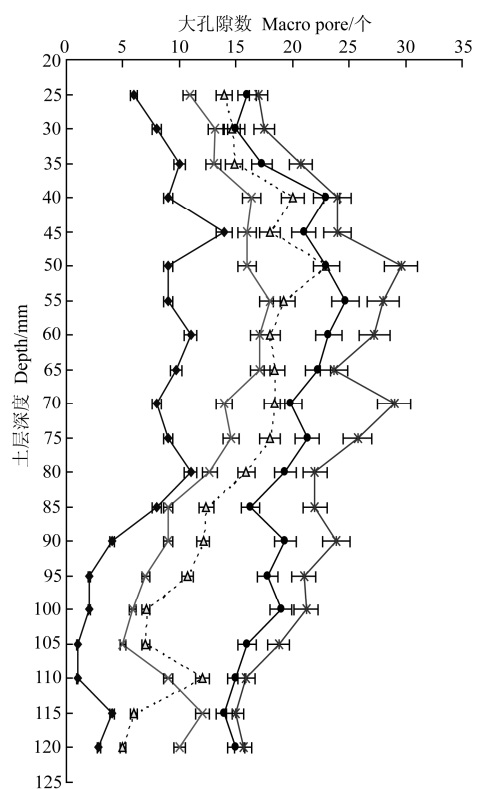
孔隙成圆率表征了孔隙的形态特征，其数值越接近于1，其孔隙形态越接近于圆。若孔隙面积相同，而孔隙周长越不规则，其成圆率则越小。不同孔隙形态特征会影响土体的通气性能和水分的传输。

从表1中可以看出，0.13~1.0 mm孔隙成圆率>总孔隙成圆率>大孔隙成圆率，说明，孔隙越小，其越近似圆形。总孔隙的成圆率表现为：有机肥>免耕>秸秆覆盖>保水剂>对照($P<0.05$)；大孔隙的成圆率表现为：免耕>有机肥>秸秆覆盖>保水剂>对照($P<0.05$)。而0.13~1.0 mm孔隙成圆率表现为：有机肥>免耕>秸秆覆盖>保水剂>对照。说明，不同土壤结构改良措施改善了土壤的孔隙形态，提高了土壤孔隙的成圆率，使土壤孔隙更接近圆形，有利于水分在土壤中的传输、保存及作物吸收利用。各处理中仍以免耕和有机肥处理效果较为显著。

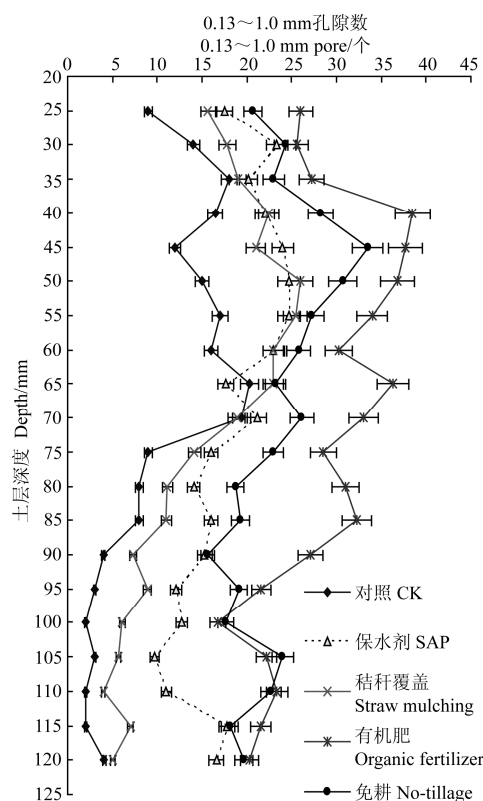
2.3 不同处理不同土层总孔隙数、大孔隙数及0.13~1.0 mm孔隙数分布特征

从图1中可看出，不同土层其孔隙数目及类型存在一定的差异。随土层的加深，总孔隙数和大孔





b. 大孔隙 (>1.0 mm)
b. Macropore (>1.0 mm)



c. 0~0.13 mm 孔隙
c. 0~0.13 mm pore

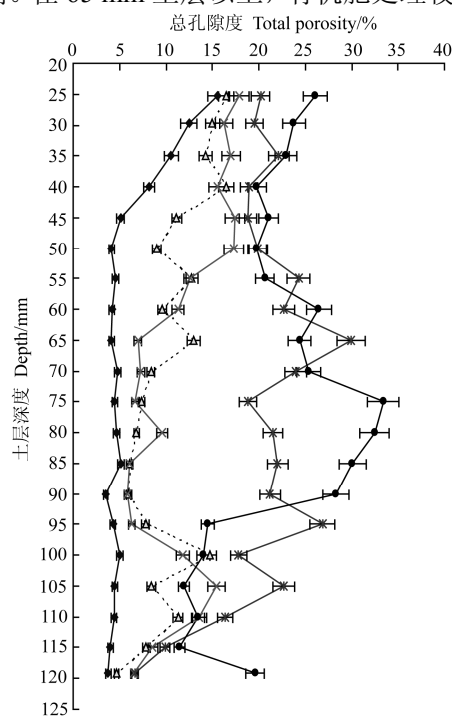
图1 各处理不同土层总孔隙数、大孔隙数和
0.13~1.0 mm 孔隙数

Fig.1 Number of total pore, macro pore and 0.13~1.0 mm pore in soil layer in different treatments

隙数及 0.13~1.0 mm 孔隙数表现为先增加后减少的趋势, 40~55 mm 土层的孔隙数目大于其他土层。对不同土层而言, 对照不同类型孔隙数目均最少, 而有机肥处理的总孔隙数、大孔隙数及 0.13~1.0 mm 孔隙数均显著大于其他处理, 其次为免耕处理, 保水剂处理的总孔隙数和大孔隙数次之, 且均大于秸秆覆盖的处理。但二者 0.13~1.0 mm 孔隙数在 35~60 mm 之间差异不显著。表明, 不同土壤结构改良措施不仅提高了土壤的大孔隙数目, 且 0.13~1.0 mm 孔隙数也相应提高, 因此土壤总孔隙数也相应提高, 各处理中以有机肥处理的效果最佳。

2.4 不同处理不同土层总孔隙度、大孔隙度及 0.13~1.0 mm 孔隙度分布特征

从图 2 中可知, 在 25~50 mm 土层, 土壤总孔隙度和大孔隙度表现为: 免耕>有机肥>秸秆覆盖>保水剂>对照 ($P<0.05$)。到 55 mm 土层以下, 秸秆覆盖处理的总孔隙度和大孔隙度迅速降低, 而保水剂处理的总孔隙度和大孔隙度虽然也有所降低, 但上下土层的孔隙度介于 5%~15%。免耕和有机肥处理的总孔隙度和大孔隙度在 25~90 mm 土层中均显著高于其他处理, 其总孔隙度和大孔隙度在 15%~35%, 尤其在 70~90 mm 土层, 免耕处理的总孔隙度和大孔隙度大于 25%, 且显著高于有机肥的处理。而对 0.13~1.0 mm 孔隙度而言, 随土层之加深各处理均有所降低。而处理间的差异增大, 尤其是秸秆覆盖的处理变化更大。而保水剂处理 0.13~1.0 mm 孔隙度在不同土层中相对较低, 但较对照高。在 65 mm 土层以上, 有机肥处理较其他处



a. 总孔隙度
a. Total porosity

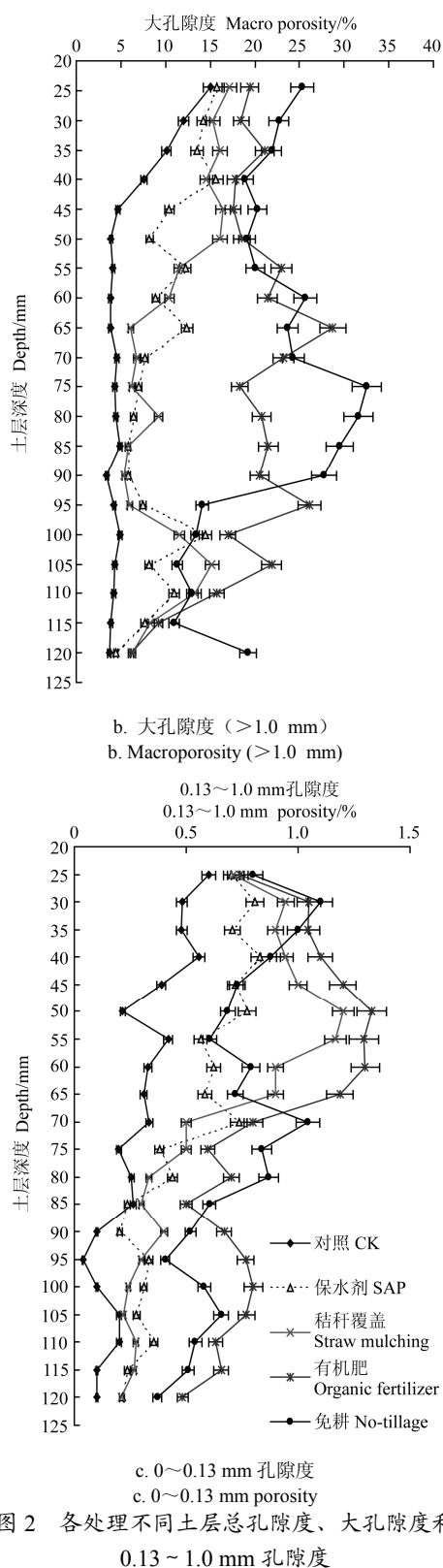


Fig.2 Porosity of total porosity, macro porosity and 0.13 ~ 1.0 mm porosity in soil layer in different treatments

理高,且在 90 mm 土层以下,其仍较高,其次为免耕、保水剂和秸秆覆盖处理。

综上所述,对照土壤的孔隙度在 40 mm 土层以下较为一致,其总或大孔隙度在 5%左右。而保水

剂和秸秆覆盖对于土壤孔隙改善主要体现在土壤表层,随土层的加深,其作用效果有所降低。而免耕和有机肥处理对 50~90 mm 土层之间的土壤总孔隙度和大孔隙度的提高更为显著。

2.5 不同处理不同土层孔隙成圆率分布特征

不同土层土壤孔隙成圆率如图 3。可看出,各处理的土壤孔隙成圆率在 0.65~0.90 之间。对照土壤的孔隙成圆率介于 0.65~0.75,且 85~110 mm 的孔隙成圆率显著低于其他土层,但随土层的加深,孔隙成圆率又增大,说明,对照土壤的孔隙成圆率波动较大。免耕和有机肥处理的成圆率介于 0.80~0.90,明显大于秸秆覆盖和保水剂的处理,且其上下土层的孔隙成圆率波动较小,从而有利于水分在土体中的传输。随土层的加深,保水剂处理的土壤孔隙成圆率先增大后减小再增大,且在 45 mm 土层以下,其成圆率均大于秸秆覆盖的处理。而秸秆覆盖处理的土壤孔隙成圆率在 25~90 mm 土层间保持在 0.75~0.80,但随土层的加深,其孔隙成圆率波动较大。

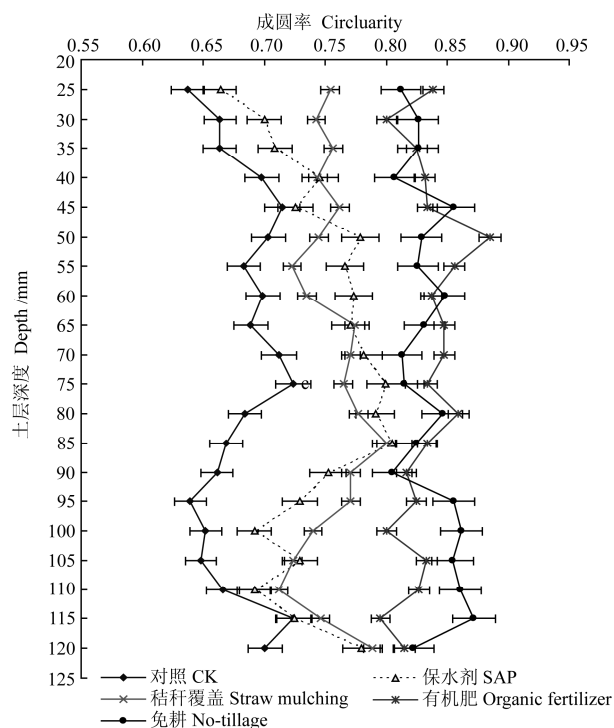


Fig.3 Average soil circle rates in soil layers in different treatments

说明,不同土壤结构改良措施改善了不同土层土壤孔隙的形态,使孔隙更加规则而接近于圆,有利于水分和气体在土壤中的传输与交换,且利于水分向下层土壤中运移,提高土壤的入渗能力。各处理中,免耕和有机肥处理较佳。

2.6 不同处理容重、田间持水量及水稳性团聚体含量分析

从表 2 中可看出, 采用不同土壤结构改良措施后, 其田间持水量均显著提高, 尤其是有机肥和免耕处理, 其分别较对照提高了 15.9% 和 16.4%, 其次为保水剂处理, 较对照提高了 11.4%。而秸秆覆盖处理与对照差异不显著。而作为土壤容重, 其大小由土壤孔隙和土壤固体的数量来决定, 容重越大土壤

孔隙所占比例越小, 反之越大。免耕处理的土壤容重最小, 其次为有机肥、保水剂、秸秆覆盖处理, 对照容重最大。表征土壤结构稳定性的 $>0.25\text{ mm}$ 水稳性团聚体含量表现为: 免耕 $>$ 有机肥 $>$ 保水剂 $>$ 秸秆覆盖 $>$ 对照。表明, 不同土壤结构改良措施通过改善土壤团聚体含量, 进而改善了土壤孔隙, 提高了土壤田间持水量, 降低了土壤容重, 从而改善了作物生长的土壤环境, 有利于作物的生长。

表 2 不同处理 0~13 cm 土层田间持水量、容重及土壤结构分析

Table 2 Analysis of field capacity, bulk density and soil structure in different treatments of 0-13cm soil layer

处理 Treatment	田间持水量 Field capacity/%	容重 Bulk density/(g·cm ⁻³)	$>0.25\text{ mm}$ 水稳性团聚体质量分数 Amount of $>0.25\text{ mm}$ soil aggregates/%
对照 CK	20.1c	1.47a	48.6d
保水剂 Superabsorbent polymers	22.4b	1.40bc	53.0c
秸秆覆盖 Straw mulching	20.6c	1.42ab	52.6c
有机肥 Organic fertilizer	23.3a	1.37c	64.0b
免耕 No-tillage	23.4a	1.34c	68.8a

2.7 不同指标相关性分析

对田间持水量、土壤容重及 $>0.25\text{ mm}$ 水稳性团聚体含量与 CT 扫描法测得的土壤孔隙参数进行相关性分析, 结果如表 3。

田间持水量和 $>0.25\text{ mm}$ 水稳性团聚体含量与各孔隙参数均成正相关关系, 其中, 田间持水量与总孔隙度、大孔隙度、 $0.13\sim 1.0\text{ mm}$ 孔隙度、大孔隙成圆率和 $0.13\sim 1.0\text{ mm}$ 孔隙成圆率呈显著正相关 ($P<0.05$), $>0.25\text{ mm}$ 水

稳性团聚体含量与总孔隙度和大孔隙度成极显著正相关 ($P<0.01$), 其与总孔隙成圆率和大孔隙成圆率呈显著正相关 ($P<0.05$), 但与其他孔隙参数相关性不显著。而各孔隙参数与容重成负相关关系, 其中, 容重与总孔隙度、大孔隙度、大孔隙成圆率和 $0.13\sim 1.0\text{ mm}$ 孔隙成圆率呈极显著负相关 ($P<0.01$), 与 $0.13\sim 1.0\text{ mm}$ 孔隙度和总孔隙成圆率呈显著负相关 ($P<0.05$), 而其他孔隙参数相关性不显著。

表 3 不同指标相关性分析

Table 3 Correlation analysis among different soil pore index

因素 Factors	总孔隙度 Total pore	大孔隙度 Macro pore	$0.13\sim 1.0\text{ mm}$ 孔隙度 $0.13\sim 1.0\text{ mm}$ pore	总孔隙度 Total porosity	大孔隙度 Macro porosity	$0.13\sim 1.0\text{ mm}$ 孔隙度 $0.13\sim 1.0\text{ mm}$ porosity	总孔隙成圆率 Total pore circularity	大孔隙成圆率 Macropore circularity	$0.13\sim 1.0\text{ mm}$ 孔隙成圆率 $0.13\sim 1.0\text{ mm}$ pore circularity
田间持水量 Field capacity	0.6601	0.6946	0.6284	0.8545*	0.8549*	0.8470*	0.6897	0.8798*	0.8030*
容重 Bulk density	-0.7238	-0.6799	-0.6752	-0.9273**	-0.9411**	-0.7806*	-0.9063*	-0.9925**	-0.9675**
$>0.25\text{ mm}$ 水稳性 团聚体含量 Amount of $>0.25\text{ mm}$ soil aggregates	0.7184	0.7541	0.6854	0.9655**	0.9560**	0.6688	0.8581*	0.8347*	0.7300

注: * ($P<0.05$); ** ($P<0.01$)。

3 讨论

土壤孔隙结构主要包括: 孔隙度、孔隙数目、孔隙半径、孔隙大小分布及成圆率等形态和数量特征, 以及孔隙的空间分布, 相互连通状况和孔隙之间相关性等空间分布特征。土壤孔隙结构直接影响水分在土表及土体内的迁移途径和方式, 其与土壤表面径流及渗透性之间具有密切关系^[35]。应用 CT 扫描技术可定量分析土壤孔隙的数目、孔隙度、成圆率及其孔隙分布特征, 且 CT 扫描技术还可准确

揭示大孔隙的数目、大小和位置^[10]。Asare 等^[36]应用 CT 技术对免耕地中 $\geq 0.54\text{ mm}$ 大孔隙进行了研究, 发现随着深度的增加, 大孔隙度降低。说明, 大孔隙的形成与地上残留物、植物根系类型及土壤动物等因素有关。杨永辉等^[15]研究发现, 保水剂的施用均提高了土壤剖面不同土层的土壤孔隙数目、孔隙度和孔隙成圆率, 改善了土壤孔隙, 提高了作物产量。

少、免耕及秸秆覆盖能够改善土壤结构和土壤孔隙, 增加土壤水分入渗, 提高土壤持水性能, 防

治土壤质量退化^[37-39]。赵红香等^[40]研究表明, 秸秆还田能增加土壤总孔隙度、降低毛管与非毛管孔隙度的比值。李江涛等^[41]研究发现, 长期施用畜禽粪便可显著提高耕层土壤大孔隙和中孔隙比例, 但土壤细孔隙比例降低。而陈学文等^[42]研究认为, 由于免耕条件下土壤的自然沉实作用, 使土壤容重增大, 土壤总孔隙度降低。

本研究发现, 通过不同土壤结构改良措施的实施, 其不仅提高了不同土层土壤的总孔隙数、大孔隙数及 0.13~1.0 mm 孔隙数, 且不同类型的孔隙度也相应增加, 随土层的加深其孔隙数目及孔隙度有降低的趋势, 在各处理中以有机肥和免耕处理的孔隙数目及孔隙度较大, 其次为保水剂和秸秆覆盖的处理。说明, 免耕避免了土壤中有机质的过度分解和土壤颗粒直接受到雨水打击而分离成细小颗粒, 促进土壤水稳性团聚体的形成, 从而改善了土壤结构和土壤孔隙特征, 提高了土壤的保水能力和水分利用效率, 进而促进作物增收。而有机肥的施入, 增加了土壤的有机碳和腐殖质的含量, 改善了土壤的团粒结构, 促进了土壤孔隙数目及其孔隙度的提高, 从而有利于作物生长。保水剂具有改善土壤结构的功能, 从而有利于土壤孔隙度的提高。秸秆覆盖不但可提高土壤的腐殖质, 且可使土壤疏松, 促进土壤孔隙的提高。同时, 秸秆覆盖、保水剂、免耕及有机肥等措施均显著提高了田间持水量和 >0.25 mm 水稳性团聚体含量, 降低了容重, 且以有机肥的效果最为显著。

土壤孔隙形态对于水分在土壤中的传输与保存非常重要。孔隙形状越不规则, 越不利于水分在孔隙中的传输, 但利于水分的保存。有研究发现^[43], 当土壤孔隙直径小于 0.99 mm 时, 孔隙之间的连通性较好, 有利于水分在孔隙中的传输。而作为反映孔隙形态的孔隙成圆率, 其值越大, 孔隙越近似于圆形, 说明其孔隙越规则, 越利于水分在土壤中的传输、保存及作物吸收与利用。本研究发现, 不同土壤结构改良措施均有利于土壤孔隙形态的改善, 提高了土壤孔隙的成圆率, 各处理中仍以免耕和有机肥处理效果为佳。

4 结 论

1) 不同土壤结构改良措施均提高了土体和不同土层的土壤总孔隙数目、大孔隙数、0.13~1.0 mm 孔隙数和总孔隙度、大孔隙度、0.13~1.0 mm 孔隙度及孔隙成圆率。各处理中以免耕和有机肥处理效果较佳, 其次为保水剂和秸秆覆盖的处理。其中, 免耕和有机肥处理的总孔隙度分别较对照高 272.5%、242.5%, 大孔隙度分别较对照提高了

343.1%、302.7%。

2) 不同土壤结构改良措施均显著提高了土壤田间持水量和水稳性团聚体含量, 降低了容重, 且各处理中, 以有机肥和免耕处理效果最佳, 其田间持水量较对照分别提高了 15.9% 和 16.4%, 其次为保水剂处理, 较对照田间持水量提高了 11.4%。秸秆覆盖处理与对照之间差异不显著。而免耕处理的容重最小, 其次为有机肥、保水剂、秸秆覆盖处理, 对照容重最大。

3) 土壤总孔隙度和大孔隙度对于田间持水量、容重和 >0.25 mm 水稳性团聚体含量的影响非常显著, 且土壤总孔隙度和大孔隙度越大, 田间持水量和 >0.25 mm 水稳性团聚体含量就越高。而容重对于总孔隙度和大孔隙度及孔隙成圆率的影响最为显著, 但容重越大总孔隙度和大孔隙度及孔隙成圆率越小, 表明容重的增加不仅降低了土壤孔隙度, 且影响了土壤孔隙的形状。

4) 本文采用 CT 扫描技术所能观测到的最小孔隙为 0.13 mm, 其所测得的土壤总孔隙度与常规方法相比, 如环刀法所得到的土壤绝对总孔隙度有一定的差异, 需要提高 CT 扫描的分辨率使土壤总孔隙度与实际值更为接近。

[参 考 文 献]

- [1] Peyton R L, Gantzer C J, Anderson S H, et al. Fractal dimension to describe soil macropore structure using X-ray computed-tomography[J]. Water Resources Research, 1994, 30(3): 691—700.
 - [2] Sander T, Gerke H H, Rogasik H. Assessment of Chinese paddy-soil structure using X-ray computed tomography[J]. Geoderma, 2008, 145(3/4): 303—314.
 - [3] Rasiyah V, Aylmore L A G. Characterizing the changes in soil porosity by computed tomography and fractal dimension[J]. Soil Science, 1998, 163(3): 203—211.
 - [4] Udawatta R R, Anderson S H, Gantzer C J, et al. Influence of prairie restoration on CT-measured soil pore characteristics[J]. Journal Environmental Quality, 2008, 37(1): 219—228.
 - [5] Udawatta R P, Anderson S H. CT-measured pore characteristics of surface and subsurface soils influenced by agroforestry and grass buffers[J]. Geoderma, 2008, 145(3): 381—389.
 - [6] Udawatta R P, Anderson S H, Gantzer C J, et al. Agroforestry and grass buffer influence on macropore characteristics: A computed tomography analysis[J]. Soil Science Society of America Journal, 2006, 70(5): 1763—1773.
 - [7] 冯杰, 郝振纯. CT 扫描确定土壤大孔隙分布[J]. 水科学进展, 2002, 13(5): 611—617.
- Feng Jie, Hao Zhenchun. Distribution of soil macropores

- characterized by CT[J]. *Advances in Water Science*, 2002, 13(5): 611—617. (in Chinese with English abstract)
- [8] 吴华山, 陈效民, 陈黎. 利用 CT 扫描技术对太湖地区主要水稻土中大孔隙的研究[J]. *水土保持学报*, 2007, 21(2): 175—178.
- Wu Huashan, Chen Xiaomin, Chen Jie. Study on macro pore in ma in paddy soils in tai-lake region with CT[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2007, 21(2): 175—178. (in Chinese with English abstract)
- [9] Gantzer C J, Anderson S H. Computed tomographic measurement of macroporosity in chisel-disk and no-tillage seedbeds[J]. *Soil and tillage research*, 2002, 64(1): 101—111.
- [10] Wamer G S, Nieber J L, Moore I D, et al. Characterizing macropores in soil by computed tomography[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1989, 53(3): 653—660.
- [11] Anderson S H, Peyton R L, Gantzer C J. Evaluation of constructed and natural soil macropores using X-ray computed tomography[J]. *Geoderma*, 1990, 46(1): 13—29.
- [12] Peyton R L, Anderson S H, Gantzer C J. Applying X-ray CT to measure macropore diameters in undisturbed soil cores[J]. *Geoderma*, 1992, 53 (3/4): 329—340.
- [13] Phogat V K, Aylmore L A G. Evaluation of soil structure by using computer assisted tomography[J]. *Australian Journal of Soil Research*, 1989, 27(2): 313—323.
- [14] 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.
- Zhao Shiwei, Zhao Yonggang, Wu Jinshui. Quantitative analysis of soil pores under natural vegetation successions on the Loess Plateau[J]. *Science of China: Earth Science*, 2010, 40(2): 223—231. (in Chinese with English abstract)
- [15] 杨永辉, 武继承, 韩庆元, 等. 保水剂对土壤孔隙影响的定量分析[J]. *中国水土保持科学*, 2011, 9(6): 88—93.
- Yang Yonghui, Wu Jicheng, Han Qingyuan, et al. Quantitative analysis of the effect of water-retaining agent on soil pores[J]. *Science of and Water Conservation*, 2011, 9(6): 88—93. (in Chinese with English abstract)
- [16] 雷金银, 吴发起, 王健, 等. 保护性耕作对土壤物理特性及玉米产量的影响[J]. *农业工程学报*, 2008, 20(10): 40—45.
- Lei Jinyin, Wu Faqi, Wang Jian, et al. Effects of conservation tillage on soil physical properties and corn yield[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2008, 20(10): 40—45. (in Chinese with English abstract)
- [17] 康红, 朱保安, 洪利辉, 等. 免耕覆盖对旱地土壤肥力和小麦产量的影响[J]. *陕西农业科学*, 2001(9): 1—3.
- Kang Hong, Zhu Baoan, Hong Lihui, et al. Effects of zero-tillage and mulching on the soil fertility and wheat yield in the arid land[J]. *Shaanxi Agricultural Sciences*, 2001(9): 1—3. (in Chinese with English abstract)
- [18] Acharya C, Sharma P D. Tillage and mulch effects on soil physical environment root growth, nutrient uptake and yield of maize and wheat on an alfisol in north-west India[J]. *Soil and Tillage Reseach*, 1994(4), 32: 291—302.
- [19] Eduardo M, Juan-Pablo F, Paola S, et al. Soil physical properties and wheat root growth as affected by no-tillage and conventional tillage systems in a Mediterranean environment of Chile[J]. *Soil and Tillage Research*, 2008, 99(2): 232—244.
- [20] Antonio J, Lorena M Z, Juan G. Effects of mulching on soil physical properties and runoff under semi-arid conditions in southern Spain[J]. *Catena*, 2010, 81(1): 77—85.
- [21] 刘定辉, 陈尚洪, 舒丽, 等. 四川盆地丘陵区秸秆还田少免耕对土壤水分特征的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2009, 27(6): 119—128.
- Liu Dinghui, Chen Shanghong, Shu Li, et al. Impact of straw mulching no-tillage on soil water characteristics of paddy field in hilly area in Sichuan basin[J]. *Agricultural Research in the Arid Area*, 2009, 27(6): 119—128. (in Chinese with English abstract)
- [22] Celik I, Ortasa I, Kilicb S. Effects of compost, mycorrhiza, manure and fertilizer on some physical properties of a Chromoxerert soil[J]. *Soil and Tillage Research*, 2004, 78(1): 59—67.
- [23] Zhang P J, Zheng J F, Pan G X, et al. Changes in microbial community structure and function within particle size fractions of a paddy soil under different long-term fertilization treatments from the Tai Lake region, China[J]. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 2007, 58(2): 264—270.
- [24] Lee S B, Lee C H, and Jung K Y. Changes of soil organic carbon and its fractions in relation to soil physical properties in a long-term fertilized paddy[J]. *Soil and Tillage Research*, 2009, 104(2): 227—232.
- [25] Li Z P, Liu M, Wu X C, et al. Effects of long-term chemical fertilization and organic amendments on dynamics of soil organic C and total N in paddy soil derived from barren land in subtropical China[J]. *Soil and Tillage Research*, 2010, 106(2): 268—274.
- [26] Pagliai M, Vignozzi N, Pellegrini S. Soil structure and the effect of management practices[J]. *Soil Till Res*, 2004, 79(2): 131—143.
- [27] 陈欣, 史奕, 鲁彩艳, 等. 有机物料及无机氮对耕地黑土团聚体水稳性的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2003, 9(3): 284—287.
- Chen Xin, Shi Yi, Lu Caiyan, et al. Effect of organic

- materials and inorganic N on water stability of aggregates in cultivated black soil[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2003, 9(3): 284—287. (in Chinese with English abstract)
- [28] Sojka R E, Bjorneberg D L, Entry J A, et al. Polyacrylamide in agriculture and environmental land management[J]. *Advances in Agronomy*, 2007, 92(1): 75—162.
- [29] 何传龙, 李布青, 殷雄, 等. 新型抗旱保水剂对土壤改良和作物抗旱节水作用的初步研究[J]. *安徽农业科学*, 2002, 30(5): 771—773.
- He Chuanlong, Li Buqing, Yin Xiong, et al. Preliminary study on the application of novel super-absorbents in soil improvement and drought resistant and water-saving for crop growth[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2002, 30(5): 771—773. (in Chinese with English abstract)
- [30] 杨永辉, 武继承, 吴普特, 等. 秸秆覆盖与保水剂对土壤结构、蒸发及入渗过程的作用机制[J]. *中国水土保持科学*, 2009, 7(5): 70—75.
- Yang Yonghui, Wu Jicheng, Wu Pute, et al. Effect mechanism of straw mulching and water-retaining agent on soil structure, evaporation, and infiltration process[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2009, 7(5): 70—75. (in Chinese with English abstract)
- [31] Abramoff M D, Magelhaes P J, Ram S J. Image processing with image[J]. *Biophotonics International*, 2004, 11(7): 36—42.
- [32] Luxmoore R J. Micro-, meso-, and macroporosity of soil[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1981, 45(3): 671—672.
- [33] Beven K, Germane P. Water flow in soil macropores. II A combined flow model[J]. *Journal of Soil Science*, 1981, 32(1): 15—29.
- [34] 中国科学院土壤研究所. 土壤物理性质测定方法[M]. 北京: 科学出版社, 1978.
- [35] Poesen J, Ingelmo-Sanehez F. Runoff and sediment yield from top-soils with different porosity as affected by rock fragment cover and position[J]. *Catena*, 1992, 19(5): 451—474.
- [36] Asare S N, Rudra R P, Dickinson W T, et al. Soil macroporosity distribution and trends in a no-till plot using a volume computer tomography scanner[J]. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 2001, 78(4): 437—447.
- [37] 杜建涛, 何文清, Vinay Nangia, 等. 北方旱区保护性耕作对农田土壤水分的影响[J]. *农业工程学报*, 2008, 24(11): 25—29.
- Du Jiantao, He Wenqing, Vinay Nangia, et al. Effects of conservation tillage on soil water content in northern arid regions of China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2008, 24(11): 25—29. (in Chinese with English abstract)
- [38] 陈浩, 李洪文, 高焕文, 等. 多年固定道保护性耕作对土壤结构的影响[J]. *农业工程学报*, 2008, 24(11): 122—125.
- Chen Hao, Li Hongwen, Gao Huanwen, et al. Effect of long-term controlled traffic conservation tillage on soil structure[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2008, 24(11): 122—125. (in Chinese with English abstract)
- [39] 陈源泉, 隋鹏, 高旺盛, 等. 中国主要农业区保护性耕作模式技术特征量化分析[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(18): 1—7.
- Chen Yuanquan, Sui Peng, Gao Wangsheng, et al. Quantitative analysis on technological characteristics of different conservation tillage parems in major agricultural regions of China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2012, 28(18): 1—7. (in Chinese with English abstract)
- [40] 赵红香, 迟淑筠, 宁堂原, 等. 科学耕作与留茬改良小麦-玉米两熟农田土壤物理性状及增产效果[J]. *农业工程学报*, 2013, 29(9): 113—122.
- Zhao Hongxiang, Chi Shuyun, Ning Tangyuan, et al. Covering farming pattern to improve soil physical properties and crop yield in wheat-maize cropping system[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2013, 29(9): 113—122. (in Chinese with English abstract)
- [41] 李江涛, 钟晓兰, 张斌, 等. 长期施用畜禽粪便对土壤孔隙结构特征的影响[J]. *水土保持学报*, 2010, 2(6): 137—180.
- Li Jiangtao, Zhong Xiaolan, Zhang Bin, et al. Soil pore structure properties as affected by long-term application of poultry litter and livestock manure[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2010, 2(6): 137—180. (in Chinese with English abstract)
- [42] 陈学文, 张晓平, 梁爱珍, 等. 耕作方式对黑土耕层孔隙分布和水分特征的影响[J]. *干旱区资源与环境*, 2006, 26(6): 114—120.
- Chen Xuewen, Zhang Xiaoping, Liang Aizhen, et al. Tillage effects on soil pore size distribution and soil moisture in Northeast China[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2006, 26(6): 114—120. (in Chinese with English abstract)
- [43] 吕菲, 刘建立, 何娟. 利用 CT 数字图像和网络模型预测近饱和土壤水力学性质[J]. *农业工程学报*, 2008, 24(5): 10—14.
- Lü Fei, Liu Jianli, He Juan. Prediction of near saturated soil hydraulic properties by using CT images

and network model[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of

the CSAE), 2008, 24(5): 10—14.(in Chinese with English abstract)

Using computed tomography scanning to study soil pores under different soil structure improvement measures

Yang Yonghui^{1,2}, Wu Jicheng^{1,2}, Mao Yongping³, Han Qingyuan⁴, He Fang^{1,2}

(1. Institute of Plant Nutrition & Resource Environment, Henan Academy of Agricultural Sciences, Zhengzhou 450002, China;

2. Yuanyang Experimental Station of Crop Water Use, Ministry of Agriculture, Yuanyang 453514, China; 3. General Hospital of Jinshui District of Zhengzhou, Zhengzhou 450001, China; 4. Corps Hospital of Armed Police in Henan, Zhengzhou 450052, China)

Abstract: Soil pore structure plays an important role in the ways of soil water movement in both topsoil and subsoil, and has a close relationship with soil surface runoff and permeability. Soil pore structure has evident spatial characteristics which includes soil porosity, pore number, pore radius, spore size distribution, circularity, morphological and quantitative characteristics, and the distribution of pore space, correlations between connectivity, and spatial pore distribution. In recent years, CT scanning has been introduced to study the characteristics of soil pores. CT image is applied to research the soil pore distribution, the density of soil spatial distribution and size, soil porosity, pore surface fractal dimension, the spatial distribution of soil moisture, and the unsaturated hydraulic conductivity of soil properties. Meanwhile, CT scanning has accurately revealed the number, size, and location of macro pores (>1 mm in diameter). No-tillage, straw mulching, application of organic fertilizer and superabsorbent polymers (SAP) can increase soil organic matter content, improve soil structure, increase soil fertility and soil porosity, and thus decrease soil bulk density and promote crop growth. However, further study will be needed to study the impact of different measures on the soil pore number, size, and distribution of soil pores in the soil profile. Therefore, in order to investigate the effect of different improvement measures for soil structure, such as straw mulching, no-tillage, application of organic fertilizer and super absorbent polymers, on the characteristics of soil pores and its distribution in different soil layer, CT scanning was used to quantitatively analyze soil pore numbers, soil porosity, and distribution of soil pores in different soil profiles. The results showed that the numbers of soil total pores, macro pores, and 0.13-1.0 mm pores were significantly increased in different soil improving treatments in contrast to CK treatment, and the porosity and circularity were improved. The optimal soil improvement measures occurred in treatments that applied organic fertilizer and no-tillage, and then were followed by the treatments of applying SAP and straw mulching, CK treatment was the lowest. In addition, soil field capacity and the amount of water stable aggregate of >0.25 mm were significantly improved in different soil structure improvement measures, however, soil bulk density was decreased in each treatment. The optimal soil improvement measures were also found in treatments that applied organic fertilizer and no-tillage, compared with treatment CK, soil water capacity was increased by 15.9% and 16.4% in treatment applications of organic fertilizer and no-tillage, respectively. In addition, corresponding soil bulk density was decreased by 6.8% and 8.8%, respectively. The correlation analysis among different soil pore indexes showed that these significantly or extremely significantly positive correlations were found between the field soil water capacity, and soil bulk density and the amount of water-stable aggregate of >0.25 mm and soil total porosity and macro porosity. However, soil bulk density and soil total porosity and macro porosity and pore cycle rate were submitted to a significantly negative correlation.

Key words: soils, straw, soil moisture, soil improvement, CT (computed tomography) scanning, soil pore, quantitative analysis

(责任编辑: 刘丽英)