



农业资源与环境学报

CSCD 核心期刊
中文核心期刊
中国科技核心期刊

JOURNAL OF AGRICULTURAL RESOURCES AND ENVIRONMENT

欢迎投稿 <http://www.aed.org.cn>

长期施肥对砂姜黑土大孔隙形态和数量特征的影响

蔡太义, 李玮, 王志刚, 张丛志, 黄会娟, 白玉红, 张佳宝

引用本文:

蔡太义, 李玮, 王志刚, 张丛志, 黄会娟, 白玉红, 张佳宝. 长期施肥对砂姜黑土大孔隙形态和数量特征的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2022, 39(6): 1106–1114.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13254/j.jare.2022.0647>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

长期有机无机肥配施对红壤性水稻土微生物生物量和有机质结构的影响

蓝贤瑾, 刘益仁, 侯红乾, 吕真真, 冀建华, 冯兆滨, 刘秀梅

农业资源与环境学报. 2021, 38(5): 810–819 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0584>

华北平原不同施氮量与施肥模式对作物产量与氮肥利用率的影响

蔡媛媛, 王瑞琪, 王丽丽, 刘惠芬, 杨殿林, 谭炳昌

农业资源与环境学报. 2020, 37(4): 503–510 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2018.0254>

长期定位施肥和地膜覆盖对棕壤团聚体稳定性及其有机碳含量的影响

吕欣欣, 丁雪丽, 张彬, 孙海岩, 汪景宽

农业资源与环境学报. 2018, 35(1): 1–10 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2017.0199>

长期施肥下黑土玉米田土壤温室气体的排放特征

高洪军, 张卫建, 彭畅, 张秀芝, 李强, 朱平

农业资源与环境学报. 2017, 34(5): 422–430 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2017.0103>

我国不同区域粮食作物产量对有机肥施用的响应差异

任科宇, 徐明岗, 张露, 段英华, 王伯仁

农业资源与环境学报. 2021, 38(1): 143–150 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0150>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

蔡太义, 李玮, 王志刚, 等. 长期施肥对砂姜黑土大孔隙形态和数量特征的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2022, 39(6): 1106–1114.

CAI T Y, LI W, WANG Z G, et al. Effects of long-term fertilization on the morphology and quantity of macropores in vertisol[J]. *Journal of*

Agricultural Resources and Environment, 2022, 39(6): 1106–1114.



开放科学 OSID

长期施肥对砂姜黑土大孔隙形态和数量特征的影响

蔡太义^{1,2}, 李玮³, 王志刚¹, 张丛志², 黄会娟¹, 白玉红⁴, 张佳宝^{2*}

(1. 河南理工大学测绘与国土信息工程学院, 河南 焦作 454000; 2. 中国科学院南京土壤研究所, 南京 210008; 3. 安徽省农业科学院作物研究所, 合肥 230031; 4. 河南省科学院能源研究所有限公司, 郑州 450008)

摘要:为探明长期施肥对砂姜黑土大孔隙结构的影响,本研究选取 37 a 田间定位试验的 5 个处理:不施肥(CK)、单施化肥(NPK)、单施有机肥(M)、等氮条件下有机肥与化肥配施(MNPK)和高氮条件下有机肥与化肥配施(HMNPK),通过 X 射线 CT 扫描原状土柱(直径 7.4 cm,高 20 cm),利用图像处理技术进行土壤孔隙三维结构重建。结果表明,各处理下土壤团聚体结构内部以及团聚体之间均存在大孔隙,尤以 M 处理数量最多;分形维数和各向异性由大到小次序分别为 HMNPK>M>MNPK>NPK>CK 和 MNPK>CK>M>NPK>HMNPK。与 CK 相比,有机肥配施处理(M、MNPK、HMNPK)的大孔隙度分别增加 7、6、10 个百分点,大孔隙数量分别增加 41.5%、33.3%、26.8%。HMNPK 处理孔径分布呈剧烈的双峰曲线波动,第一和第二峰值分别出现在 395~577 μm 和 1 545~1 701 μm 处。主成分分析表明,<126 μm 孔径主要受粉粒含量影响,126~500 μm 孔径受容重影响,500~2 500 μm 孔径则受砂粒含量、黏粒含量、连通性和分形维数等多因素综合影响。研究表明,有机肥和无机肥长期配施,可显著改善砂姜黑土大孔隙数量和形态特征,尤以 HMNPK 处理效果最佳,而 NPK 处理效果不明显。分形维数和连通性可作为砂姜黑土结构改良的定量评价指标。

关键词:土壤孔隙;孔隙形态;长期施肥;显微 CT;砂姜黑土

中图分类号:S152

文献标志码:A

文章编号:2095-6819(2022)06-1106-09

doi: 10.13254/j.jare.2022.0647

Effects of long-term fertilization on the morphology and quantity of macropores in vertisol

CAI Taiyi^{1,2}, LI Wei³, WANG Zhigang¹, ZHANG Congzhi², HUANG Huijuan¹, BAI Yuhong⁴, ZHANG Jiabao^{2*}

(1. School of Surveying and Land Information Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China; 2. Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008; 3. Crop Research Institute, Anhui Academy of Agricultural Sciences, Hefei 230031, China; 4. Henan Academy of Science Institute of Energy Co., Ltd., Zhengzhou 450008, China)

Abstract: The effects of long-term fertilization on the macropore microstructure of vertisol were studied. In this study, soil pore structure was assessed using intact soil columns (7.4 cm diameter, 20 cm height), which were sampled from five long term fertilization treatments established in 1981, including no fertilizer(CK), inorganic fertilizer(NPK), a single application of organic fertilizer(M), a combination of inorganic fertilizer and organic manure with isonitrogen(MNPK), and a combination of inorganic fertilizer and organic manure with high nitrogen levels(HMNPK). Each column was scanned with X-ray microtomography(μCT) and quantified using image analysis. The results showed that there were macropores in the soil aggregate structure and between the aggregates in each treatment, in particular, the M treatment had the largest number of pores. The order of fractal dimension and anisotropy from large to small was HMNPK>M>MNPK>NPK>CK and MNPK>CK>M>NPK>HMNPK, respectively. Compared with CK, the organic manure treatments (M, MNPK, and HMNPK)

收稿日期:2022-09-15 录用日期:2022-09-28

作者简介:蔡太义(1972—),男,博士/博士后,副教授,主要从事土壤多源遥感、土壤健康及三维结构研究。E-mail:caity2008@hpu.edu.cn

*通信作者:张佳宝 E-mail:jlbzhang@issas.ac.cn

基金项目:国家自然科学基金面上项目(41671225);河南省重大科技专项(181100110400)

Project supported: The National Natural Science Foundation of China(41671225); The Key Science and Technology Project of Henan Province of China(181100110400)

increased the number of macropores by 41.5%, 33.3%, and 26.8%, while the porosity increased by seven, six, and ten percentage points, respectively. The fluctuations in the pore size distribution of HMNPK treatment were the most intense, with the first and second peaks appearing at 395~577 μm and 1 545~1 701 μm , respectively. Principal component analysis showed that pores <126 μm in size were mainly affected by particle content, 126~500 μm pores were affected by bulk density, and 500~2 500 μm pores were affected by multiple factors, including sand content, clay content, connectivity, and fractal dimension. Overall, this study demonstrates that long-term application of organic and inorganic fertilizers can significantly improve the morphology and quantity of macropores in vertisol, especially HMNPK treatment, while NPK alone caused no significant improvement. Fractal dimension and connectivity could be used as a quantitative evaluation index for improving the pore structure of vertisol.

Keywords: soil pore; pore morphology; long-term fertilization; micro-CT; vertisol

土壤孔隙是团聚体形成的破碎面,其在土壤水分保持、养分运移、气体交换、根系生长和维持生物多样性等方面具有重要作用^[1],因此在土壤结构研究中逐渐取代团聚体而成为代表性指标^[2]。目前,土壤孔隙的研究多集中于空气渗透性和土壤水分运移等方面^[3-5],其实质是有机肥和无机肥可以直接或间接将不同的有机物质和离子带入土壤,进而引发孔隙结构发生变化^[6]。土壤大孔隙(当量孔径一般大于0.03 mm)是土壤结构特征的关键组成部分^[7]。

长期施肥对潮土^[8]、水稻土^[9]和始成土^[10]等土壤孔隙结构影响的研究已取得明显进展。但对砂姜黑土的研究多集中在碳氮变化^[11]、耕作方式^[3]、作物产量^[12]、固碳效应^[13]等方面。砂姜黑土属于变性土,是一种与其母质特性和矿物组成密切相关的土壤^[14]。其富含的黏土矿物在自然状态下涨缩循环,易发育深裂缝和发生孔隙黏闭现象,对农业生产存在潜在的威胁。但砂姜黑土具有潜在的高自然肥力,因而一直受到国内外众多学者的广泛关注^[3,15-16]。

为了改良砂姜黑土的不良物理结构,前人已尝试采用了不同的技术(有机肥、粉煤灰、生物炭和改良剂等),并取得了一定进展^[17-18]。黄淮海区砂姜黑土面积约400万 hm^2 ,对区域粮食安全及高质量发展具有重要影响^[19-20]。目前,仅有少数学者从长期施肥对砂姜黑土孔隙特征及其与土壤持水能力等关系角度进行了研究^[21],针对长期施肥对砂姜黑土大孔隙形态和数量的系统研究明显不足,这限制了人们对长期施肥对砂姜黑土改良效果的科学认知。

本研究选取长期施肥定位试验(安徽濉溪杨柳砂姜黑土定位试验站)的5个不同处理,运用X射线计算机断层扫描(CT)和图像处理技术,解析砂姜黑土大孔隙形态和数量特征,揭示长期施肥条件下其结构的演化规律,旨在为黄淮海平原中低产田整治和高标准农田建设提供理论支撑。

1 材料与方法

1.1 长期试验设置和土壤取样

试验位于安徽省农业科学院作物研究所濉溪县杨柳试验站(116°45'E, 33°37'N, 图1)。供试土壤为砂姜黑土,成土母质为河湖相沉积物。试验始于1981年,试验前耕层土壤(0~20 cm)基础理化指标^[11]如下:pH 7.6,有机质 6.1 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,全氮 0.78 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ (C/N 为 7.8),全磷 0.47 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,碱解氮 64.10 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,有效磷 2.50 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。选取5个处理(表1),3个重复,小区面积 30 m^2 。小区间铸水泥作永久性田埂分离,中间有滴灌管道通向各种种植小区。种植方式为小麦-玉米轮作,种植品种为当年的主栽品种,每季作物收获后将地上部秸秆移除。4个施肥处理采用统一标准施氮量。处理Ⅱ~Ⅳ的总施氮量相等,处理Ⅳ和Ⅴ施入的氮素有机肥与无机肥各半量计算。氮、磷、钾肥分别为尿素(含纯N 46%)、过磷酸钙(含 P_2O_5 12%)、氯化钾(含 K_2O 60%)。有机肥为豆饼肥,水分含量 10%~15%,有机质 30%~40%、N 6%~7%、 P_2O_5 1%~3%、 K_2O 2%~3%,有机肥施量均按当季肥料养分的含量折算。有机肥和磷钾肥全部用作基肥,小麦和玉米的尿素基追比例和时间分别为6:4(拔节期)和3:5(大喇叭口期)。

2017年玉米收获后,每个处理随机抽取3个直径 74 mm、高度 200 mm 的原状土柱。取样时用反铲小心推动聚氯乙烯(PVC)管(下边缘削尖)垂直并逐渐进入土壤,样品完整取好后带回实验室,置于4℃冰箱,待用。同时从每个取样点附近利用环刀法测土壤容重,采集扰动的土壤样品以分析粒度分布和理化性质。

1.2 CT扫描

采用解放军第91中心医院CT扫描中心的飞利浦16排螺旋CT对土壤样品进行扫描。该CT主要应

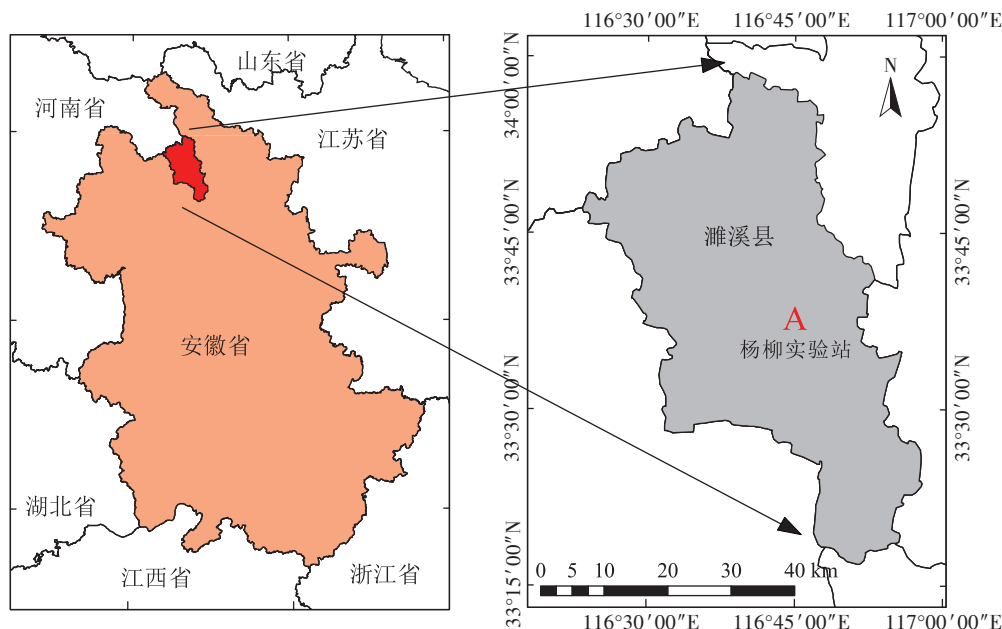


图1 试验区位置示意图

Figure 1 Schematic diagram of the location of the test area

表1 不同处理的肥料施用量

Table 1 Fertilizer application rate in different treatments

编号 Number	处理 Treatment	施肥量 Application rate
I	不施肥(CK)	0
II	单施化肥(NPK)	N 525 kg·hm ⁻² ·a ⁻¹ , P ₂ O ₅ 210 kg·hm ⁻² ·a ⁻¹ , K ₂ O 210 kg·hm ⁻² ·a ⁻¹
III	单施有机肥(M)	折合 N 525 kg·hm ⁻² ·a ⁻¹
IV	有机肥与化肥配施(等氮, MNPK)	处理 II、III 施肥量总和的 50%
V	有机肥与化肥配施(高氮, HMNPK)	处理 II、III 施肥量总和的 80%

用于医学领域,为保证扫描土壤样品图像的质量和精度,重新把扫描参数设定为:峰值电压 130 kV,电流 120 mA,扫描时间 1.9 s,扫描层厚 0.75 mm·层⁻¹,体素大小 0.4 mm×0.4 mm×0.4 mm。为了消除土壤含水量对 X 射线衰减值的影响,扫描前使每个土柱接近田间持水量。扫描时确保每个土柱垂直方向扫描 675 幅横截面。该 CT 设备立体等性像素分辨率为 0.4 mm,最薄扫描层厚度为 0.75 mm,参考 LUO 等^[22]对土壤大孔隙的研究,本研究中重建的土壤大孔隙结构是孔隙直径>0.75 mm 的土壤大孔隙。

1.3 图像处理与分析

采用 ImageJ 软件进行图像重建,采用背投影算法重建获得大小为 1 024×1 024 像素的 16 位 tiff 格式的灰度图像,再将其转存为 8 位 tiff 格式的灰度图像,灰

度值范围为 0~255。利用 Normalize 命令对图像进行归一化处理,将图像(512×512 像素)切割以排除土柱外的区域。然后重新采集 200×200×200 像素立方体图像作为热点区域,用中值滤波消除边缘效应。随后采用 Ostu 值法(阈值分割法),结合实际的土壤孔隙度反复调试确定每个图像的分割阈值,灰度图像通过阈值化被分割为两部分(黑色和白色分别代表土壤孔隙和基质)。图像二值化后,通过 ImageJ 插件(3D viewer)实现土柱孔隙结构的三维可视化(图 2)。同时,对于分割后的二值图像,利用 ImageJ 插件(3D object counter)获取土壤大孔隙数量,利用插件 BoneJ 分别计算土柱体积大孔隙度、分形维数、连通性、各向异性和孔径分布(依据孔隙灰度值直方图分布)等^[23]。

1.4 土壤粒径分布及理化性质分析

土壤粒径分布利用激光粒度分析仪(MasterSizer 2000,英国马尔文仪器有限公司)进行分析,测量范围为 2~1 500 μm。土壤有机质含量、土壤水分质量分数、容重和田间总孔隙度等指标按照常规方法^[24]测定。

1.5 统计分析和制图

使用 SPSS 21.0 统计软件对土壤孔隙类别和土壤性质进行单因素方差分析、相关性分析、回归和多元统计分析。在主成分分析(PCA)中,旋转方法采用 Kaiser 归一化的 Varimax (Varimax-normalize

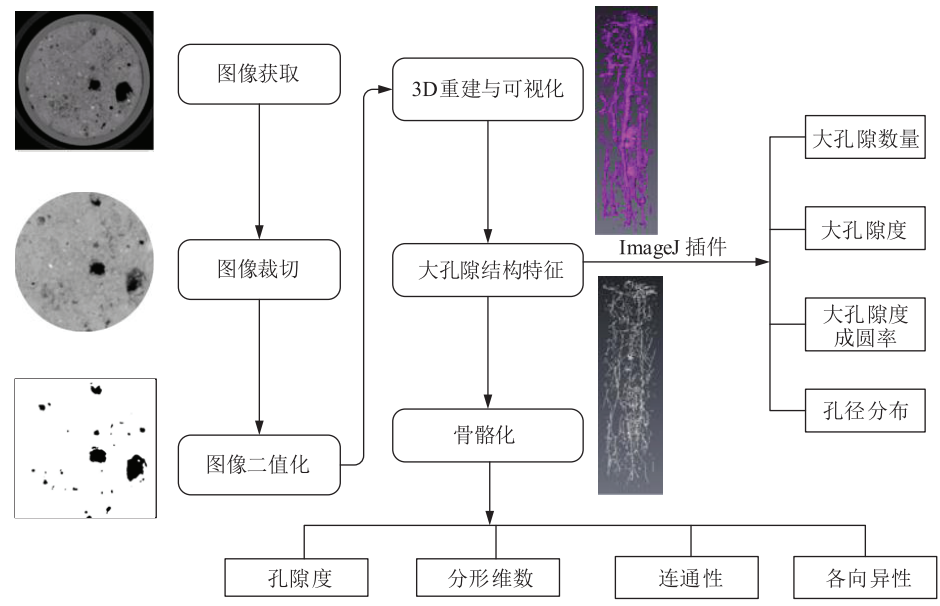


图2 大孔隙定量和图像处理流程^[22]

Figure 2 The procedures for image analysis and quantification of macropore networks^[22]

algorithm)法。采用Sigma plot 12.5制图。

2 结果与讨论

2.1 土壤性质

不同处理0~20 cm土层的基本性质(表2)具有一定差异,但土壤质地没有发生变化,根据激光仪测定方法和吴克宁等^[25]对国内土壤质地分类应用的探讨,本研究采用美国土壤质地分类标准,实验土壤质地均为粉砂质黏土。在粒径分布中,MNPK处理的砂粒含量显著高于其他处理,NPK的粉粒含量显著高于其他处理,CK黏粒含量显著高于其他处理。施有机肥处理(M、MNPK和HMNPK)容重显著低于CK和NPK处理,表明有机肥处理能显著降低土壤容重。总体来看,各处理土壤孔隙度、有机质含量和土壤含水量变

化趋势基本一致,按照HMNPK≥M>MNPK>NPK>CK的次序呈逐渐减小趋势。M和HMNPK处理的有机质含量最高(但两者间无显著差异),分别为33.86 g·kg⁻¹和33.03 g·kg⁻¹,CK最低(20.86 g·kg⁻¹),处理间按照M>HMNPK>MNPK>NPK>CK顺序呈显著(*P*<0.05)降低趋势。

NAVEED等^[26]和ZHOU等^[27]的长期试验研究表明,有机肥和无机肥配施可增加有机质含量、增加总孔隙度和降低土壤容重,与本研究结果相似,这可能是由于随着有机肥的施用,土壤有机质增加,致使作物产量增加,生产更多作物残渣和根系,从而降低土壤容重和增加孔隙度^[28]。然而,无机肥料的长期施用效果表明,土壤容重和总孔隙度与CK没有显著差异,这与YAN等^[29]和房焕等^[30]研究结果一致。试验中有

表2 不同处理砂姜黑土0~20 cm土层的基本性质

Table 2 Basic properties of vertisol at 0~20 cm depths from different treatments

处理 Treatment	粒径分布 Size distribution/%			容重 Bulk density/(g·cm ⁻³)	孔隙度 Porosity/%	土壤含水量 Soil moisture/%	有机质 SOM/(g·kg ⁻¹)
	砂粒 Sand	粉粒 Silt	黏粒 Clay				
CK	13.1±0.4b	42.4±0.7b	44.5±0.3a	1.53±0.01a	42.40±0.40c	19±2c	20.86±1.57d
NPK	13.1±1.4b	44.8±1.7a	42.1±3.1c	1.51±0.18a	42.87±5.92c	21±2bc	27.93±0.68c
M	14.9±0.1ab	42.3±1.3b	42.8±1.4bc	1.44±0.03bc	45.58±1.07ab	23±2ab	33.86±1.88a
MNPK	15.3±2.7a	41.8±0.5b	42.9±2.2bc	1.48±0.01b	44.32±0.29b	22±1ab	30.21±1.59b
HMNPK	13.3±0.1b	43.1±0.4b	43.6±0.3b	1.41±0.03c	46.81±1.20a	24±3a	33.03±0.10a

注:砂粒指粒径>50 μm颗粒,粉粒指粒径在2~50 μm之间颗粒,黏粒指粒径<2 μm颗粒;不同小写字母表示同一土壤深度不同耕作处理间差异显著(*P*<0.05)。下同。

Note: Sand particle size >50 μm, silt particle size 2~50 μm, clay particle size <2 μm; Different lowercase letters indicate significant difference among tillage treatments at the same soil depth (*P*<0.05). The same below.

机肥相关处理对孔隙度、有机质含量的提升显著高于无机肥,一方面有机肥中的大分子物质对砂姜黑土中蒙脱石矿物涨缩过程中剪切力具有抑制作用,另一方面有机肥中的有机胶体、有机酸可以活化 CaCO_3 进而促进有机无机复合团聚体形成,增加团聚间孔隙^[31]。对于砂姜黑土而言,主要的黏合剂是土壤有机质,研究表明,与CK相比,NPK处理虽然显著增加土壤有机质含量,但容重和总孔隙度无显著变化,可能与NPK处理较低的黏粒含量有关(NPK和CK处理的黏粒含量分别为42.1%和44.5%),但具体原因尚需进一步深入研究。

2.2 大孔隙结构

2.2.1 大孔隙形态特征

(1) 大孔隙网络结构可视化

不同处理大孔隙三维结构明显不同(图3)。由图3可见,M处理中存在少量由蚯蚓洞穴形成的大孔隙(管径较大且连续),对比CK处理下的土壤大孔隙

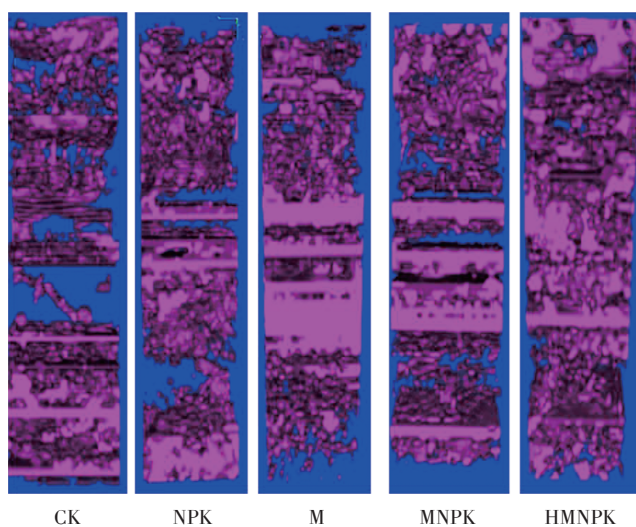


图3 不同处理土柱(内径74 mm,高度200 mm)土壤大孔隙结构的三维可视化

Figure 3 Three-dimensional visualization of soil macropore networks for the soil columns(74 mm in diameter after cutting and about 200 mm in vertical height) of different treatments

结构,M处理表现出先增后减的变化趋势,说明有机肥对砂姜黑土大孔隙结构表层的影响大于底层。在CK处理中可观察到由根系形成的大孔隙(连续、圆形、孔径随着深度增加而减小)。NPK处理大孔隙孔径最小,HMNPK处理分布着最多的团聚体间孔隙(随机且连续分布)。从大孔隙密度看,CK处理最稀疏,HMNPK处理最密集,二者对比则较明显地展示出HMNPK处理可以很大程度上改善砂姜黑土的孔隙结构;从大孔隙的大小来比较则可以看出,NPK处理较M、MNPK和HMNPK处理孔隙整体偏小,而与CK处理无明显差异,说明有机肥对改善砂姜黑土大孔隙形态效果比无机肥更为显著。此外,5个处理均分布着较多的团聚体间孔隙,这可能是砂姜黑土干湿循环交替所致。LUO等^[22]的研究表明,牧草地土壤剖面分布着蚯蚓洞穴孔隙、团聚体间孔隙和根管孔隙,这些孔隙是蚯蚓在食物和空间上的竞争所致。

在土体剖面中,CK处理孔隙上下连通性最差,可能与较高的容重和较低的有机质含量有关(表2),NPK和MNPK处理次之,而M和HMNPK处理连通性最强,可能是由于后两个处理产生了大量有机质以及腐解的根系,从而促进了有机质积累,进而为微生物提供了充足的食物来源^[22],因此两个处理含有较多的自上而下且连通性较好的生物孔隙。此外,CK、NPK和MNPK剖面中有不连续的孔隙断裂现象,柱形土样的断层现象通常由于取样过程中用力不均匀,而图像中的齐整断裂现象可能是仪器扫描不完全所致。

(2) 大孔隙形态参数

分形维数表征的是土壤孔隙的自相似特性,是土壤孔隙不规则性的综合体现^[32]。由表3可知,HMNPK处理分形维数最大,CK和NPK处理较小,说明经过长期的施肥积累,土壤大孔隙结构逐步趋于复杂和稳定。相关性分析(表4)表明,分形维数与砂粒含量、土壤总孔隙度、连通性、土壤含水量和有机质含量呈显著正相关,而与容重和各向异性呈显著负相关($P <$

表3 不同处理孔隙数量、总孔隙度及代表性孔隙形态参数

Table 3 Total pore volumes and selected pore morphological parameters under different treatments

处理 Treatment	大孔隙数量 Number of macropores	大孔隙度 Macroporosity/%	分形维数 Fractal dimension	连通性 Connectivity	各向异性 Anisotropy
CK	786.0±33.5c	21±1.0b	2.54±0.12c	214.00±8.90e	0.79±0.03a
NPK	885.0±39.5b	22±1.1b	2.55±0.12c	386.08±15.36d	0.72±0.03b
M	1 112.0±55.3a	28±1.4a	2.59±0.13b	1 041.17±44.56b	0.76±0.03b
MNPK	1 048.0±45.6a	27±1.3a	2.56±0.13c	686.13±34.02c	0.80±0.04a
HMNPK	997.0±49.1ab	31±1.5a	2.69±0.13a	2 387.71±106.35a	0.68±0.03c

表4 代表性土壤孔隙性质和分类大孔隙的相关系数

Table 4 Correlation coefficient matrix of soil pore classes and selected soil parameters

指标 Index	砂粒含量 Sand content	粉粒含量 Powder content	黏粒含量 Clay content	容重 Bulk density	孔隙度 Porosity	土壤含 水量 Soil moisture	有机质 SOM	分形维数 Fractal dimension	连通性 Connectivity	各向异性 Anisotropy	孔隙 数量 Number of pores	<75 μm	75~ 126 μm	126~ 500 μm	500~ 2 500 μm
砂粒含量	1														
粉粒含量	0.131	1													
黏粒含量	0.134	-0.400	1												
容重	-0.815**	-0.439	0.157	1											
孔隙度	0.815**	0.439	-0.157	-1.000**	1										
土壤含水量	0.832**	0.458	0.064	-0.884**	0.884**	1									
有机质	0.776**	0.446	-0.054	-0.792**	0.792**	0.769**	1								
分形维数	0.676**	0.331	-0.273	-0.755**	0.755**	0.662**	0.589*	1							
连通性	0.725**	-0.179	-0.080	-0.572*	0.572*	0.501	0.274	0.743**	1						
各向异性	-0.260	-0.281	0.212	0.391	-0.391	-0.351	-0.306	-0.797**	-0.400	1					
孔隙数量	0.586*	0.496	0.092	-0.518*	0.518*	0.620*	0.772**	0.342	0.063	-0.034	1				
<75 μm	0	0.808**	-0.340	-0.338	0.338	0.247	0.494	0.052	-0.469	0.003	0.542*	1			
75~126 μm	-0.576*	0.418	-0.228	0.287	-0.287	-0.397	-0.073	-0.511	-0.840**	0.377	0.136	0.735**	1		
126~500 μm	-0.341	0.274	0.062	0.129	-0.129	-0.138	0.219	-0.166	-0.644**	-0.234	0.043	0.469	0.548*	1	
500~2 500 μm	0.376	-0.330	-0.017	-0.136	0.136	0.161	-0.212	0.207	0.702**	0.170	-0.077	-0.552*	-0.643**	-0.993**	1

注:**表示在0.01水平(双侧)上显著相关。*表示在0.05水平(双侧)上显著相关。
Note:** indicates significant correlation at the 0.01 level(two-sided). * indicates significant correlation at the 0.05 level(two-sided).

0.05)。CK处理大孔隙连通性最低,与CK相比,NPK处理和M、MNPK、HMNPK处理分别增加80.4%和3.8、2.2、10.2倍。相关性分析表明,大孔隙连通性与砂粒含量和500~2 500 μm土壤孔隙极显著正相关,与总孔隙度显著相关,而与75~500 μm土壤孔隙极显著负相关,与土壤容重显著负相关。CK和MNPK处理各向异性数值最高,NPK和M处理次之,HMNPK处理最低。相关性分析结果表明,各向异性仅与分形维数极显著负相关。

2.2.2 大孔隙数量特征

(1)大孔隙数量

不同处理土壤大孔隙数量存在较大差异(表3),数值范围从最小值786个(CK)增加到最大值1 112个(M处理)。其中,有机肥处理(M、MNPK和HMNPK)

较CK分别显著增加41.5%、33.3%和26.8%,较NPK分别增加25.6%、18.4%和12.7%。但M、MNPK和HMNPK三个处理间无显著差异。分别以大孔隙度、大孔隙数量作为响应变量,以黏粒、粉粒、砂粒、容重、有机质含量为自变量进行多元线性回归分析,结果(表5)表明,大孔隙数量与砂粒、粉粒、黏粒、容重和有机质含量均存在正相关关系。

(2)大孔隙度

不同处理大孔隙度变化范围从21%(CK)到31%(HMNPK),与CK相比,HMNPK、M、MNPK和NPK处理的孔隙度分别增加10、7、6和1个百分点。其中,HMNPK、M和MNPK三个处理间无显著差异,均显著高于CK和NPK处理(两者间无显著差异)。此外,回归分析表明,大孔隙度与有机质和黏粒含量呈正相关,

表5 回归系数矩阵

Table 5 Regression coefficient matrix

响应变量 Response variable(y)	截距 Intercept b	砂粒 Sand a ₁	粉粒 Silt a ₂	黏粒 Clay a ₃	容重 Bulk density a ₄	有机质 SOM a ₅	R ²
大孔隙度 Porosity	1.370	-0.002	-0.344	0.130	-0.218	0.237	0.21
孔隙数量 Number of pores	-4 623.585	0.370	0.422	0.171	0.495	0.698	0.74

注:选择变量的相关因子符合多元回归方程 $y=b+a_1$ 砂粒+ a_2 粉粒+ a_3 黏粒+ a_4 容重+ a_5 有机质。相关因子在 $P<0.05$ 水平上显著。

Note: Correlation factors of selected variables following the multiple regression equation: $y=b+a_1$ Sand + a_2 Silt + a_3 Clay + a_4 Bulk density + a_5 SOM. Correlation factors are significant at $P<0.05$.

而与砂粒、粉粒和土壤容重呈负相关。

(3)孔径分布

图4和图5分别为不同处理孔径的孔隙度分布以及孔径百分数。图4表明,不同处理孔隙结构存在明显的层次性。其中HMNPK处理峰值变化最为显著,峰值分别出现在395~577 μm(第一峰值)和1 545~1 701 μm(第二峰值)。其他处理间峰值变化不明显,其第一和第二峰值分别出现在235~580 μm和690~1 110 μm处。ZONG等^[33]研究表明,砂姜黑土孔径分布呈陡峭的单峰曲线,与本研究双峰曲线不一致,这可能与砂姜黑土不同的土壤性质有关,ZONG等^[33]和本研究砂姜黑土的黏粒含量、有机质含量分别为44.5%和50.1%、20.86 g·kg⁻¹和15.76 g·kg⁻¹。

图5进一步表明,126~500 μm和500~2 500 μm孔径在孔隙结构中具有主导作用。在126~500 μm处,NPK和M处理孔径百分数显著($P<0.05$)高于CK、MNPK和HMNPK处理,但后三者间无显著差异,相关分析表明,126~500 μm孔径与75~126 μm孔径显著正相关,而与连通性呈极显著负相关;在500~2 500 μm处,NPK和M处理孔径百分数最低,分别显著低于CK、MNPK和HMNPK处理,相关性分析表明,500~2 500 μm孔径与连通性极显著正相关,与75~500 μm和<75 μm孔径分别呈极显著和显著负相关;在75~126 μm处,M处理孔径百分数最大,CK、NPK、MNPK处理间孔径百分数无显著差异但显著高于HMNPK处理,相关性分析则表明,75~126 μm孔径分别与连通性和<75 μm孔径呈极显著负相关和正相关。

2.2.3 主成分分析

为了定量评价不同变量的贡献度,选取15个变

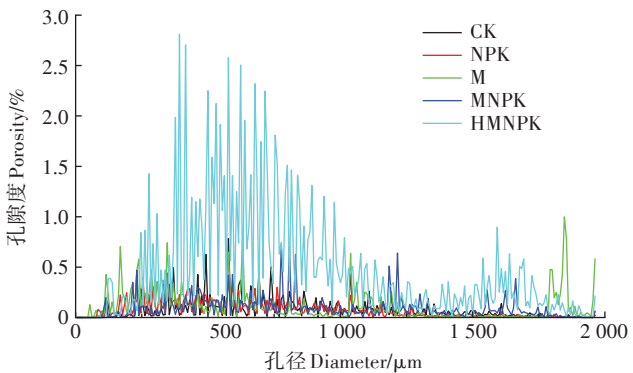
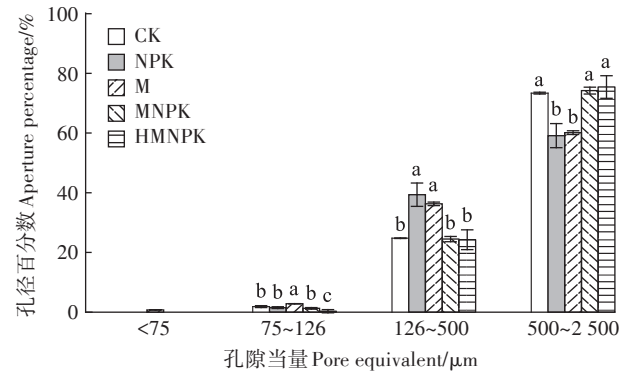


图4 不同处理孔径分布对应的孔隙度

Figure 4 Pore size distribution(PSD) of soil column from vertisol under different treatments

量采用最大化方差法提取主成分,对选出的因子再进行转轴。依据特征值大于1的原则选取共同因子个数,共选取4个组分,占比分别为34.71%、23.53%、16.56%和13.29%,总计可解释全部方差的88.09%(表6)。第1主成分中,贡献最大的正向变量是砂粒含量、孔隙度、土壤含水量、有机质含量、分形维数、连通性和孔隙数量,负向变量依次是容重、75~126 μm孔径和各向异性。第2主成分中,贡献较大的正向变量是<500 μm孔径和粉粒含量。第3主成分的正向和负向变量分别是各向异性和126~500 μm孔径。第



不同小写字母表示同一孔隙当量范围内不同耕作处理间差异显著($P<0.05$)

Different lowercase letters indicate significant difference among tillage treatments for the same pore equivalent ($P<0.05$)

图5 不同处理分类孔径的百分数

Figure 5 Aperture percentage under different treatments

表6 主成分矩阵

Table 6 Correlation between variables and principal components

变量 Variate	成分1 Element 1	成分2 Element 2	成分3 Element 3	成分4 Element 4
砂粒含量 Sand content	0.914	-0.146	0.141	0.251
粉粒含量 Powder content	0.359	0.747	0.142	-0.301
黏粒含量 Clay content	-0.093	-0.245	-0.111	0.855
容重 Bulk density	-0.930	-0.181	-0.081	0.032
孔隙度 Porosity	0.930	0.181	0.081	-0.032
土壤含水量 Soil moisture	0.906	0.135	0.092	0.171
有机质 SOM	0.795	0.446	-0.015	0.263
分形维数 Fractal dimension	0.869	-0.045	-0.281	-0.322
连通性 Connectivity	0.730	-0.626	-0.029	-0.184
各向异性 Anisotropy	-0.507	-0.063	0.714	0.368
孔隙数量 Number of pores	0.576	0.459	0.318	0.372
<75 μm 孔径	0.149	0.932	0.234	-0.087
75~126 μm 孔径	-0.509	0.787	0.225	-0.042
126~500 μm 孔径	-0.248	0.731	-0.574	0.197
500~2 500 μm 孔径	0.278	-0.793	0.488	-0.171

4主成分的正向变量是黏粒含量。

三维载荷图(图6)表明4类主成分被分成4个组合。其中 $<75\ \mu\text{m}$ 孔径与粉粒含量高度关联,说明该级别孔径受粉粒含量影响较大; $126\sim 500\ \mu\text{m}$ 孔径与土壤容重高度相关; $500\sim 2\ 500\ \mu\text{m}$ 孔径受到砂粒含量、黏粒含量、连通性、分形维数等多因素的综合影响。这进一步表明,土壤过程(土壤粒径分布、容重变化、有机质动态、土壤水分运移)能对土壤孔隙结构(孔径分布和孔隙形态等)产生较大影响^[33-34],因此,土壤孔隙结构可作为砂姜黑土长期施肥效应的敏感性评价指标^[35],对砂姜黑土质量(有机质)提升和障碍因子消减具有重要意义。

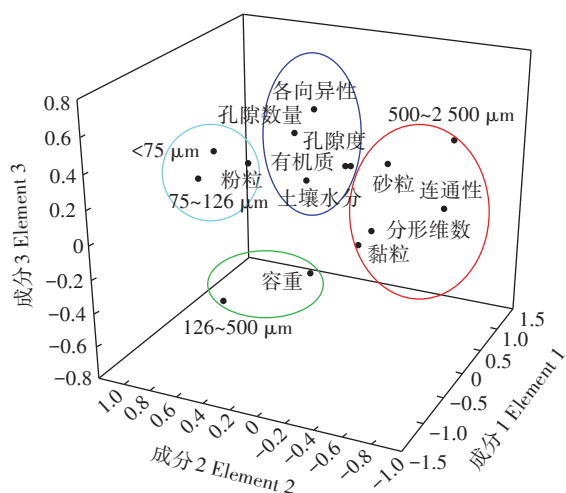


图6 主成分3D载荷图

Figure 6 PCA loading 3-D plot

3 结论

(1)基于显微CT的37 a定位试验表明,有机肥配施处理可增加土壤有机质含量,无论在容重、孔隙度和含水量等基本性质方面,还是在孔隙连通性和分形维数等形态方面,均明显优于对照和无机肥处理;与对照相比,有机肥配施处理的大孔隙度和大孔隙数量分别增加6~10个百分点和26.8%~41.5%。因此,长期进行有机肥和无机肥配施,可明显改善砂姜黑土大孔隙形态和数量特征,尤以高氮条件下处理效果最佳,而单施无机肥的改良效果则不明显。

(2)回归分析和主成分分析表明,土壤过程(土壤粒径分布、容重变化、有机质动态、土壤水分运移)对土壤孔隙结构(孔径分布和孔隙形态等)具有较大影响,因此,土壤孔隙结构可作为砂姜黑土长期施肥效应的敏感性评价指标,分形维数和连通性可作为砂姜黑土障碍因子诊断和地力提升的敏感性定量评价指标。

参考文献:

- [1] TSENG C L, ALVES M C, CRESTANA S. Quantifying physical and structural soil properties using X-ray microtomography[J]. *Geoderma*, 2018, 318:78-87.
- [2] RABOT E, WIESMEIER M, SCHLÜTER S, et al. Soil structure as an indicator of soil functions: A review[J]. *Geoderma*, 2018, 314:122-137.
- [3] WANG Y K, ZHANG Z B, JIANG F H, et al. Evaluating soil physical quality indicators of a vertisol as affected by different tillage practices under wheat-maize system in the North China Plain[J]. *Soil and Tillage Research*, 2021, 209:104970.
- [4] PENG X H, HORN R, HALLETT P. Soil structure and its functions in ecosystems: Phase matter & scale matter[J]. *Soil and Tillage Research*, 2015, 146:1-3.
- [5] 蔡太义, 黄会娟, 白玉红, 等. 基于显微CT研究不同复垦年限土壤孔隙的微结构特征[J]. *煤炭学报*, 2018, 43(11):3196-3203. CAI T Y, HUANG H J, BAI Y H, et al. Using X-ray CT scanning to quantify the microstructural characteristics of soil pore in mining areas along a reclamation time[J]. *Journal of China Coal Society*, 2018, 43(11):3196-3203.
- [6] BRONICK C J, LAL R. Soil structure and management: A review[J]. *Geoderma*, 2005, 124(1/2):3-22.
- [7] 高朝侠, 徐学选, 赵娇娜, 等. 土壤大孔隙流研究现状与发展趋势[J]. *生态学报*, 2014(11):2801-2811. GAO Z X, XU X X, ZHAO J N, et al. Review on macropore flow in soil[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014(11):2801-2811.
- [8] XIN X L, ZHANG J B, ZHU A N, et al. Effects of long-term (23 years) mineral fertilizer and compost application on physical properties of fluvo-aquic soil in the North China Plain[J]. *Soil & Tillage Research*, 2016, 156:166-172.
- [9] SCHWEIZER S A, GRAF-ROSENFELLNER M, BHAT N A, et al. Responses of soil organic carbon, aggregate diameters, and hydraulic properties to long-term organic and conventional farming on a vertisol in India[J]. *Land Degradation & Development*, 2022, 33(5):785-797.
- [10] DAL FERRO N, DELMAS P, DUWIG C, et al. Coupling X-ray microtomography and mercury intrusion porosimetry to quantify aggregate structures of a cambisol under different fertilisation treatments[J]. *Soil and Tillage Research*, 2012, 119:13-21.
- [11] LI W, CHEN H, CAO C F, et al. Effects of long-term fertilization on organic carbon and nitrogen dynamics in a vertisol in eastern China[J]. *Open Journal of Soil Science*, 2018, 8:99-117.
- [12] 王道中, 花可可, 郭志彬. 长期施肥对砂姜黑土作物产量及土壤物理性质的影响[J]. *中国农业科学*, 2015, 48(23):4781-4789. WANG D Z, HUA K K, GUO Z B. Effects of long-term fertilization on crop yield and soil physical properties in lime concretion black soil[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, 48(23):4781-4789.
- [13] 李玮, 孔令聪, 张存岭, 等. 长期不同施肥模式下砂姜黑土的固碳效应分析[J]. *土壤学报*, 2015, 52(4):943-949. LI W, KONG L C, ZHANG C L, et al. Effect of long-term fertilization on carbon sequestration in lime concretion black soil relative to fertilization pattern[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2015, 52(4):943-949.

- [14] PAL D K, WANI S P, SAHRAWAT K L. Vertisols of tropical Indian environments: Pedology and edaphology[J]. *Geoderma*, 2012, 189: 28–49.
- [15] 李雅男, 慕兰, 牛银霞, 等. 豫中平原褐土、潮土、砂姜黑土养分状况分析及培肥措施[J]. 农业科技通讯, 2018(8): 151–154. LI Y N, MU L, NIU Y X, et al. Analysis of nutrient status and fertilization measures of cinnamon soil, tidal soil and Shajiang black soil in central Henan Plain[J]. *Bulletin of Agricultural Science and Technology*, 2018(8): 151–154.
- [16] 王擎运, 何咏霞, 陈景, 等. 秸秆或粉煤灰添加对砂姜黑土持水性及小麦抗旱胁迫的影响[J]. 农业工程学报, 2020, 36(2): 95–102. WANG Q Y, HE Y X, CHENG J, et al. Effects of straw or fly ash addition on water holding capacity of typical Shajiang black soil and drought stress tolerance in wheat[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2020, 36(2): 95–102.
- [17] LU S G, SUN F F, ZONG Y T. Effect of rice husk biochar and coal fly ash on some physical properties of expansive clayey soil (vertisol)[J]. *Catena*, 2014, 114: 37–44.
- [18] SUN F, LU S. Biochars improve aggregate stability, water retention, and pore-space properties of clayey soil[J]. *J Plant Nutr Soil Sci*, 2014, 177: 26–33.
- [19] YU X, FU Y, LU S. Characterization of the pore structure and cementing substances of soil aggregates by a combination of synchrotron radiation X-ray micro-computed tomography and scanning electron microscopy[J]. *European Journal of Soil Science*, 2017, 68(1): 66–79.
- [20] CAI T Y, WANG Z G, GUO C S, et al. Effects of biochar and manure co-application on aggregate stability and pore size distribution of vertisols[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2022, 19(18): 11335.
- [21] RUAN R J, ZHANG Z B, TU R F, et al. Variable responses of soil pore structure to organic and inorganic fertilization in a vertisol[J]. *International Agrophysics*, 2021, 35(2): 221–228.
- [22] LUO L, LIN H, LI S. Quantification of 3-D soil macropore networks in different soil types and land uses using computed tomography[J]. *Journal of Hydrology*, 2010, 393(1): 53–64.
- [23] HILDEBRAND T, RUEGSEGG P. A new method for the model-independent assessment of thickness in three-dimensional images[J]. *Journal of Microscopy*, 1997, 185: 67–75.
- [24] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 三版. 北京: 中国农业出版社, 2005. BAO S D. Soil agrochemical analysis[M] 3rd Edition. Beijing: China Agriculture Press, 2005.
- [25] 吴克宁, 赵瑞. 土壤质地分类及其在我国应用探讨[J]. 土壤学报, 2019, 56(1): 227–241. WU K N, ZHAO R. Soil texture classification and its application in China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2019, 56(1): 227–241.
- [26] NAVEED M, MOLDRUP P, VOGEL H-J, et al. Impact of long-term fertilization practice on soil structure evolution[J]. *Geoderma*, 2014, 217/218: 181–189.
- [27] ZHOU H, FANG H, MOONEY S J, et al. Effects of long-term inorganic and organic fertilizations on the soil micro and macro structures of rice paddies[J]. *Geoderma*, 2016, 266: 66–74.
- [28] XU L Y, WANG M Y, SHI X Z, et al. Effect of long-term organic fertilization on the soil pore characteristics of greenhouse vegetable fields converted from rice-wheat rotation fields[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 631/632: 1243–1250.
- [29] YAN X, ZHOU H, ZHU Q, et al. Carbon sequestration efficiency in paddy soil and upland soil under long-term fertilization in southern China[J]. *Soil & Tillage Research*, 2013, 30: 42–51.
- [30] 房焕, 李奕, 周虎, 等. 稻麦轮作区秸秆还田对水稻土结构的影响[J]. 农业机械学报, 2018, 49(4): 297–302. FANG H, LI Y, ZHOU H, et al. Effects of straw incorporation on paddy soil structure in rice-wheat rotation system[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2018, 49(4): 297–302.
- [31] 詹其厚, 张效朴, 袁朝良. 秸秆还田改良砂姜黑土的效果及其机理研究[J]. 安徽农业大学学报, 2002(1): 53–59. ZHAN Q H, ZHANG X P, YUAN C L. Study on amelioration effect and mechanism of returning straw into vertisol[J]. *Journal of Anhui Agricultural University*, 2002(1): 53–59.
- [32] DATHE A, TARQUIS A M, PERRIER E. Multifractal analysis of the pore and solid phases in binary two-dimensional images of natural porous structures[J]. *Geoderma*, 2006, 134(3): 318–326.
- [33] ZONG Y T, YU X L, ZHU M X, et al. Characterizing soil pore structure using nitrogen adsorption, mercury intrusion porosimetry, and synchrotron-radiation-based X-ray computed microtomography techniques[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2015, 15(2): 302–312.
- [34] ZAFFAR M, LU S G. Pore size distribution of clayey soils and its correlation with soil organic matter[J]. *Pedosphere*, 2015, 25(2): 240–249.
- [35] YU X, WU C, FU Y, et al. Three-dimensional pore structure and carbon distribution of macroaggregates in biochar-amended soil[J]. *European Journal of Soil Science*, 2016, 67(1): 109–120.