

李传哲,姚文静,杨 苏,等. 有机物料输入对黄河故道区土壤物理结构的影响[J]. 江苏农业科学,2022,50(16):245-250.

doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2022.16.036

# 有机物料输入对黄河故道区土壤物理结构的影响

李传哲<sup>1,2</sup>, 姚文静<sup>3</sup>, 杨 苏<sup>1</sup>, 徐 聪<sup>1</sup>, 马洪波<sup>1</sup>, 吴建燕<sup>4</sup>, 汪吉东<sup>1</sup>, 艾玉春<sup>1</sup>, 张永春<sup>1</sup>

(1. 江苏省农业科学院农业资源与环境研究所/农业农村部江苏耕地保育科学观测试验站, 江苏南京 210014;

2. 江苏徐淮地区淮阴农业科学研究所, 江苏淮安 223001; 3. 南京林业大学南方现代林业协同创新中心/竹类研究所, 江苏南京 210037;

4. 烟台泓源生物肥料有限公司, 山东烟台 264000)

**摘要:**通过研究不同种类有机物料添加对典型黄河故道区耕层土壤物理性状的改良效果, 以期为合理培肥、提升当地土壤耕地质量提供科学依据。以黄河故道区典型潮土和当地有机物料为供试材料, 连续2年进行定位试验, 设置CK(不施有机物料)、M1(有机肥6 t/hm<sup>2</sup>)及M2(有机肥12 t/hm<sup>2</sup>)、S1(秸秆菌渣6 t/hm<sup>2</sup>)及S2(秸秆菌渣12 t/hm<sup>2</sup>)、B1(树枝菌渣6 t/hm<sup>2</sup>)及B2(树枝菌渣12 t/hm<sup>2</sup>)共7个处理, 应用常规试验方法分析不同条件下土壤物理性状的变化。结果表明, 随着有机物料施用年限的增加, 土壤团聚体结构得到改善, >0.250 mm 粒径土壤水稳性团聚体的含量增加, <0.053 mm 粒径水稳性团聚体呈降低趋势, 且在0~10 cm 土层施用效果优于10~20 cm 土层; 有机物料输入可调节土壤三相, 减少液相比和气相比, 增加固相比, 降低土壤三相结构距离(STPED), 其中输入秸秆菌渣的S2处理土壤STPED值最低(25.31), 与输入树枝菌渣的B2处理相比无显著差异( $P>0.05$ ), 土壤三相均接近理想状态; 与CK相比, 有机物料施用可降低10~20 cm 土层土壤紧实度; 树枝菌渣可显著降低土壤容重, 显著提高土壤田间持水量和土壤毛管孔隙度, 透水透气性增强, 土壤板结状况得到缓解。说明外源有机物料输入对土壤物理性状有显著影响, 从土壤物理结构的改善效果考虑, 每年在耕作层施入树枝菌渣12 t/hm<sup>2</sup>为最佳施肥量。

**关键词:**黄河故道区; 有机物料; 水稳性团聚体; 土壤三相; 土壤紧实度; 土壤容重; 土壤物理结构

**中图分类号:** S181; S152.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2022)16-0245-06

黄河故道是指黄河改道之后留下的一段主河道, 西起河南省兰考县三义寨和东坝头, 流经豫、鲁、皖、

苏4省22个县(市), 总面积达2 204万hm<sup>2</sup>, 是淮河与黄河流域之间一个独特的地理单元<sup>[1]</sup>。黄河故道潮土区受成土母质及地形等因素的影响, 土壤具有沙性重、结构差、有机质含量低、养分缺乏等障碍问题<sup>[2]</sup>。其中, 江苏省北部的黄河故道区是重要的粮食主产区<sup>[3]</sup>, 提升该区域低产潮土肥力, 对于实现“藏粮于地、藏粮于技”战略目标及农业的可持续发展具有现实和长远意义。

土壤是构成土壤肥力的物质基础, 是由固、液、

收稿日期: 2021-09-26

基金项目: 江苏省重点研发计划(编号: BE2021378); 江苏省农业科技自主创新资金[编号: CX(21)3070]; 国家重点研发计划(编号: 2018YFD0800301-02)。

作者简介: 李传哲(1990—), 男, 山东菏泽人, 硕士, 助理研究员, 主要从事农业资源利用研究。E-mail: lichuanzhe66@163.com。

通信作者: 汪吉东, 博士, 研究员, 主要从事土壤肥力管理研究。E-mail: jdwang66@163.com。

[19] 张海林, 孙国峰, 陈继康, 等. 保护性耕作对农田碳效应影响研究进展[J]. 中国农业科学, 2009, 42(12): 4275-4281.

[20] 殷文, 柴强, 樊志龙, 等. 绿洲灌区典型种植模式的水热利用与碳排放和能值分析[J]. 应用生态学报, 2018, 29(11): 3658-3668.

[21] 刘天奇, 胡权义, 汤计超, 等. 长江中下游水稻生产固碳减排关键影响因素及技术体系[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2022, 30(4): 603-615.

[22] Gupta K, Kumar R, Baruah K K, et al. Greenhouse gas emission from rice fields: a review from Indian context[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2021, 28(24): 30551-30572.

[23] Song J Y, Chen Y T, Mao Q, et al. The effect of early season rice

varieties and establishment methods on greenhouse gas emissions in southeast China[J]. Cereal Research Communications, 2021, 49(4): 567-576.

[24] Wang W, Lai D Y F, Wang C, et al. Effects of inorganic amendments, rice cultivars and cultivation methods on greenhouse gas emissions and rice productivity in a subtropical paddy field[J]. Ecological Engineering, 2016, 95: 770-778.

[25] 白强, 董洁, 田园春. 中国碳排放权交易价格的波动特征及其影响因素研究[J]. 统计与决策, 2022, 38(5): 161-165.

[26] 张宁, 刘青君. 碳交易对碳达峰、碳中和目标的成本效益机制研究——基于试点省市高耗能行业的模拟[J]. 广东社会科学, 2022(2): 46-58.

气三相物质构成的一种颗粒性半无限介质,三者之间相互转化、相互联系。土壤三相是指土壤的固相(固相率)、液相(水分率)、气相(孔隙度)三者占土体的比例,反映土壤的松紧程度、充水和充气程度,是农田管理和土建工程中常用的土壤参数。理想状态的土壤三相结构是固体:液体:气体=50%:25%:25%<sup>[3]</sup>。土壤团聚体是土壤结构的基本单位,能够协调土壤水、肥、气、热的供应,对土壤熟化层的维持和稳定起重要作用<sup>[4-7]</sup>,是土壤结构和肥力的重要指标。土壤板结很大程度上是由于土壤团聚体结构较差导致土壤三相失衡,透水透气性差。土壤容重以及孔隙度是衡量土壤疏松度和结构状况的重要指标,直接影响土壤的通气性和蓄水保水能力<sup>[8]</sup>。土壤紧实度可预测土壤承载力、耕性和根系伸展的阻力,其大小可影响作物根系的穿孔和生长。土壤紧实度大,水分渗入难,肥料利用率低,阻碍植物根系生长,导致作物减产。土壤比重与土壤中矿物质组成和有机质含量有关。长时间施用单一化肥会加重土壤板结情况,导致土壤有益微生物减少,土壤环境变差。土壤物理结构对于提高作物产量尤为重要。前人研究表明,有机物料施入能够改善微生物介导的土壤生态系统<sup>[9]</sup>,改善土壤结构<sup>[10]</sup>等培肥效应。近年来,通过添加有机物料对土壤养分和产量的影响研究较多,但以黄河故道潮土区为研究对象,进行土壤沙性结构改良的研究鲜有报道。

有机物料类型多种多样,我国农业废弃物(菌菇渣和作物秸秆)储量大,其中菌菇渣在我国的用处广泛,因其容重小、透气性好,可用于制作园艺作物栽培基质<sup>[11]</sup>。此外,菌菇渣还田可促进有机污染物降解<sup>[12]</sup>,修复生态环境,提高经济效益<sup>[13]</sup>。菌菇渣含有丰富的纤维素、半纤维素、木质素、菌丝残体和矿物质等营养物质<sup>[14]</sup>,具有独特的理化性质,不仅可以促进微生物生长和繁殖,还能作为土壤改良剂,改善土壤结构。关于菌菇渣连续还田对土壤肥力影响的研究表明,菌菇渣与化肥配施可改善土壤酸化状况,增加大粒径团聚体含量和土壤速效养分含量<sup>[15]</sup>。但目前对于菌菇渣的利用存在认识不足和开发技术滞后等问题,导致菌菇渣利用率仅为33%<sup>[16]</sup>。

菌菇渣作为当地最为丰富的有机肥源之一,如果具有与商品有机肥相当的保肥增产效果,不仅能促进菌菇渣的资源化利用,也能为黄河故道区土壤

结构改良提供新的思路和方法。本研究在秸秆还田的基础上,利用菌菇渣作为外源添加物,连续2年进行田间定位试验,跟踪监测黄河故道区菌菇渣及当地商品有机肥投入对土壤物理性状的影响,同时探究不同外源碳投入量对旱田农业生态系统物理性质的影响,为黄河故道区农业废弃物资源化利用、当地耕地质量提升和作物高产稳产提供数据支撑。

## 1 研究地区与研究方法

### 1.1 试验区概况

试验区位于江苏省东北部的滨海县三坝村(33°43'N,119°37'E),气候温和,降水充沛,地势较为平坦,属于温带半湿润气候,常年平均温度在14.1℃左右。

### 1.2 试验材料

本试验所用的阿古利斯有机肥由泰兴市阿古利斯生物科技有限公司提供,由中药渣发酵而来。秸秆菌渣和树枝菌渣为秀珍菇培养基废料,均为盐城市亭湖区春秋菌业专业合作社提供。有机物料养分含量见表1。供试土壤类型为脱盐潮土,土壤较为贫瘠,耕层(0~20 cm)土壤基本理化性质:全氮含量0.38 g/kg,碱解氮含量20.6 mg/kg,有效磷含量9.86 mg/kg,速效钾含量70 mg/kg,有机质含量5.58 g/kg,pH值8.57,容重1.43 g/cm<sup>3</sup>。主要农作物为冬小麦和玉米。

表1 有机物料的基本性质

物料	全氮含量 (g/kg)	全磷含量 (g/kg)	全钾含量 (g/kg)	有机碳含量 (g/kg)	C/N
商品有机肥	13.50	10.35	7.30	224	16.6
秸秆菌渣	6.58	3.20	7.95	258	39.2
树枝菌渣	16.60	5.81	5.61	328	19.8

### 1.3 试验设计

本试验为田间定位试验,采用完全随机排列,分别设置CK(不施有机物料)、M1(有机肥6 t/hm<sup>2</sup>)及M2(有机肥12 t/hm<sup>2</sup>)、S1(秸秆菌渣6 t/hm<sup>2</sup>)及S2(秸秆菌渣12 t/hm<sup>2</sup>)、B1(树枝菌渣6 t/hm<sup>2</sup>)及B2(树枝菌渣12 t/hm<sup>2</sup>)共7个处理,每个处理3个重复,共21个小区,每个小区面积为96 m<sup>2</sup>(长12 m,宽8 m)。试验区为小麦→玉米轮作制度,所有作物收获后秸秆全部还田,小麦品种为华麦7号,玉米品种为蠡玉31号。有机物料添加始于2017年6月玉米种植前,撒施于表层,并进行旋耕,玉米生

长期为当年6月至次年10月;小麦季同样在种植前撒施,小麦生长期从当年10月至次年6月。玉米株间距为25 cm,行间距为75 cm;小麦行间距为15 cm,籽粒种植密度为300 kg/hm<sup>2</sup>。玉米季和小麦季均一次性施入复合肥(N:P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>:K<sub>2</sub>O=18%:12%:10%)600 kg/hm<sup>2</sup>作基肥。玉米季在拔节期和大喇叭口期追施尿素,小麦季在返青期和拔节期追施尿素,追肥均占总氮用量的30%。土壤采集:以试验前期2017年6月采集的土样作为基础土样,以2018年6月和2019年6月小麦收获期及2017年10月和2018年10月玉米收获期采集的土样作为处理土样。

#### 1.4 测定项目与方法

土壤自然含水率的测定采用烘干法;容重的测定采用100 cm<sup>3</sup>环刀法;比重的测定采用比重瓶法;田间持水量的测定采用环刀法;紧实度采用澳大利亚CP40 II土壤紧实度仪于2019年3月15日(拔节期)测定;土壤水稳性团聚体采用湿筛法并利用TTF-100型土壤团聚体分析仪测定;土壤三相比分别于2018年和2019年小麦收获后采用DIK-1130型土壤三相仪测定。土壤三相结构距离指数(STPSD)计算公式<sup>[3]</sup>为

$$P_{\text{STPSD}} = (X_s - 50\%)^2 + (X_s - 50\%)(X_L - 25\%) + (X_L - 25\%)^2; X_G = 100\% - X_s - X_L。$$

式中: $P_{\text{STPSD}}$ 为土壤三相结构距离指数; $X_s$ 为固相体积分数,大于25%; $X_L$ 为液相体积分数,%; $X_G$ 为气相体积分数,%。

土壤总孔隙度=(1-容重/比重)×100%;土壤毛管孔隙度(%)=田间持水量(%)×容重;土壤非毛管孔隙度(%)=土壤总孔隙度-土壤毛管孔隙度。

#### 1.5 试验数据处理

试验数据采用Excel 2010整理,运用SPSS 20.0软件进行数据分析,Excel 2010和Origin 8.0软件作图;显著性水平设定为 $\alpha=0.05$ 。

## 2 结果与分析

### 2.1 有机物料输入对土壤水稳性团聚体的影响

从图1和表2可以看出,有机物料施用可以改善土壤结构,明显增加耕层土壤>0.25 mm粒径团聚体含量。由于土壤质地属于粉沙质土,>2.000 mm粒径的团聚体含量较少,有机物料处理土样与CK处理相比,>2.000 mm粒径团聚体含量无明显变化。2018年0~10 cm耕层土壤中,各有机物料处理>0.250 mm粒径水稳性团聚体含量均高于10~20 cm土壤,表明施用有机物料主要改善了浅耕层土壤结构。在各处理0~10 cm土层中,2018年土壤水稳性团聚体主要分布在<0.053 mm范围内,占

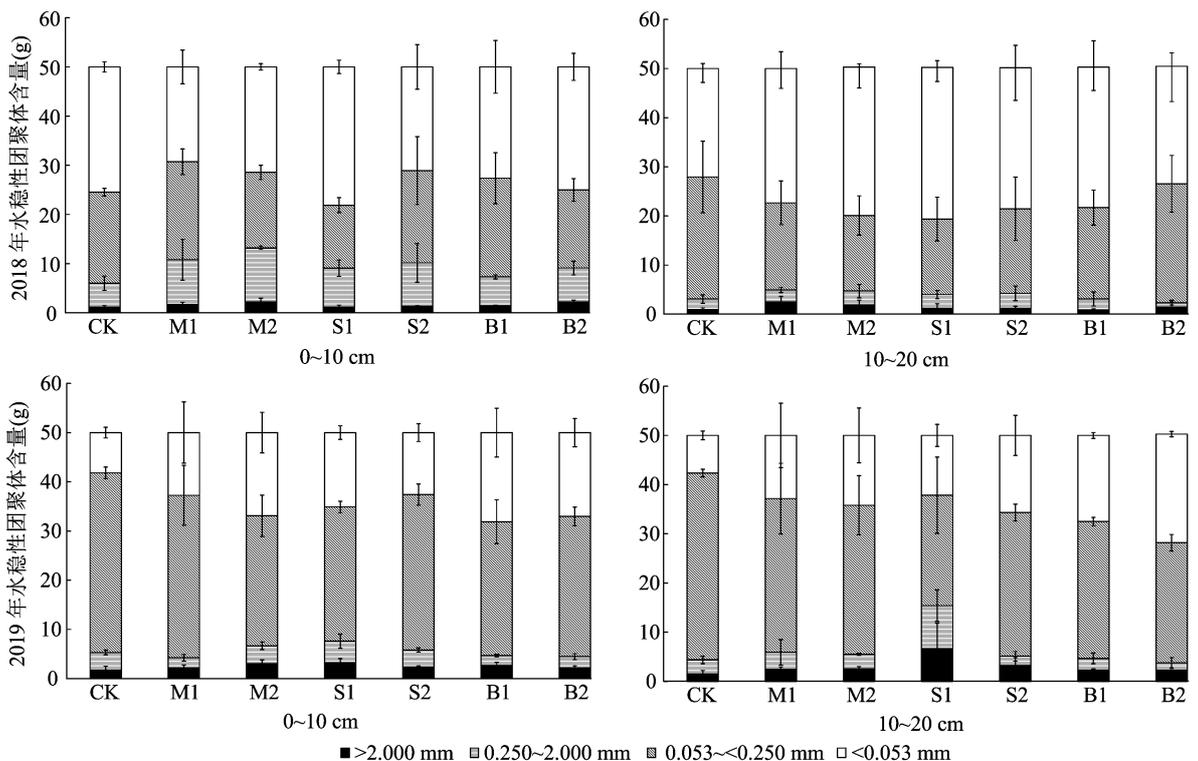


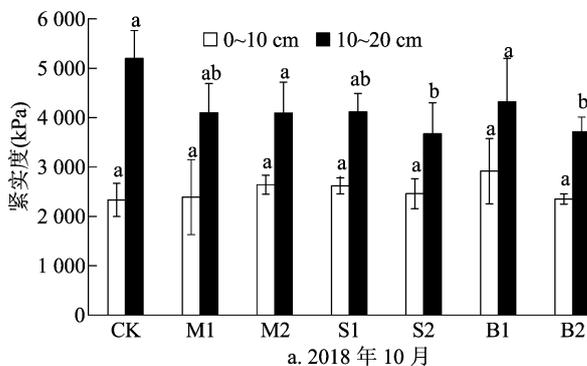
图1 土壤水稳性团聚体含量

总团聚体的 38.58% ~ 56.24%, 2019 年则以 0.053 ~ < 0.250 mm 粒径为主, 占比达到 52.82% ~ 73.06%, 表明随有机物料施用时间的延长会减少 < 0.053 mm 微团聚体含量, 增加 0.053 ~ < 0.250 mm 大团聚体含量。2018 年各处理 0 ~ 10 cm 耕层 0.250 ~ 2.000 mm 粒径团聚体含量与对照相比明显增加, 其中 M2 处理增幅最大 (129.79%)。有机物料施用 1 年 (2018 年) 后, 各处理 > 0.250 mm 粒径团聚体含量与对照相比的增加效果最佳, 增幅为 21.30% ~ 119.46%。

表 2 土壤三相结构距离指数

处理	STPSD
CK	36.88 ± 1.55a
M1	33.31 ± 2.79b
M2	30.49 ± 0.76bc
S1	29.45 ± 1.39c
S2	25.31 ± 0.59d
B1	29.70 ± 1.39c
B2	27.76 ± 0.71cd

注: 同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著 ( $P < 0.05$ )。表 3 同。



## 2.2 有机物料输入对土壤紧实度的影响

通过对每个试验小区进行数据分析, 结果显示 (图 2), 随着有机物料施用年限的增加, 土壤紧实度降低, 且 0 ~ 10 cm 土层土壤紧实度明显低于 10 ~ 20 cm 土层, 10 ~ 20 cm 土层土壤紧实度为 0 ~ 10 cm 土层的 1.32 ~ 5.90 倍, 说明表层土壤比深层土壤疏松。由图 2 可知, 在 2018 年 10 月, 有机物料施用均可降低 10 ~ 20 cm 土层的土壤紧实度, 与 CK 处理相比降幅为 16.8% ~ 29.4%, 但对 0 ~ 10 cm 土层的影响未达到显著水平。2019 年各处理土壤紧实度比 2018 年明显降低, 但处理间差异不显著, B2 处理 0 ~ 10 cm 土层土壤紧实度最低, 为 705 kPa, 比 CK 处理低 34.1%, S1 处理 10 ~ 20 cm 土层土壤紧实度最低, 为 3 019 kPa, 比 CK 处理低 17.9%。

## 2.3 有机物料输入对土壤三相的影响

由图 3 可知, 经过 2 年的施肥处理, 土壤三相比大多分布在理想状态的左上方, 表明液相占比大, 固相占比小。由三元相图和表 2 可知, 施用有机物料后, 土壤三相结构距离 (STPSD) 降低, 土壤结构有

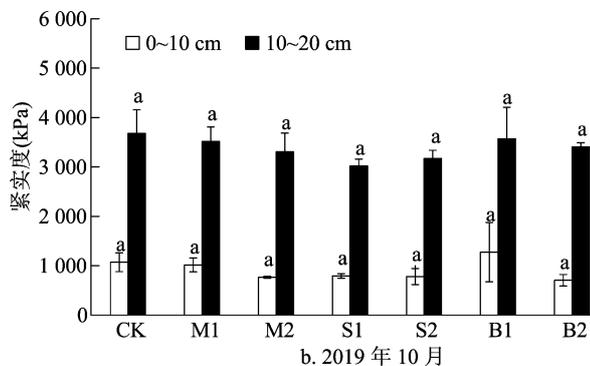


图 2 不同处理的土壤紧实度

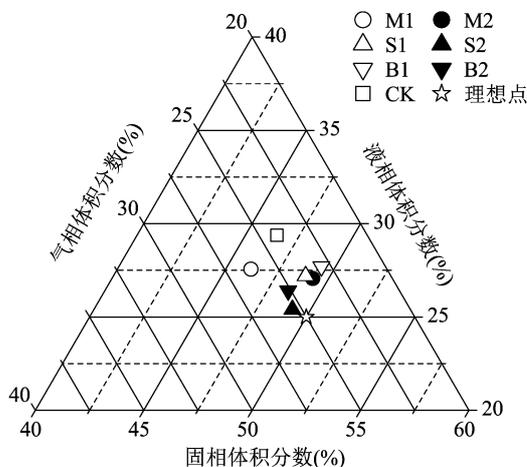


图 3 土壤三相结构二元三相图

明显的改善趋势。就 3 种有机物料而言, S2 和 B2 处理对潮土土壤结构改善效果最接近理想状态。有机肥施用 2 年后使土壤三相结构距离降低 3.57 ~ 11.57, 比 CK 处理降低 9.68% ~ 31.37%。

## 2.4 有机物料输入对土壤容重和孔隙度的影响

由表 3 可知, 添加不同有机物料对 0 ~ 20 cm 土层的土壤容重和孔隙度存在显著影响。经连续 2 年试验处理后, 土壤容重随着有机物料的施加而降低。如 M1 与 M2 处理相较于 CK 处理的土壤容重分别降低了 3.73% 和 8.96%。田间持水量、土壤总孔隙度、毛管孔隙度随着有机物料的施加量增加均呈现升高趋势, 如 M1、M2 处理相较于 CK 处理田间持水

量升高了 5.68% 和 16.76%，总孔隙度升高了 8.44%，毛管孔隙度升高了 17.65%、1.80% 和 6.47%。土壤非毛管孔隙度也随着有机物料的施加呈上升趋势，如 M1 处理与 CK 处理相比升高了

25.67%，M2 处理与 M1 处理相比升高了 16.03%。总体来看，在相同有机物料施用下，树枝菌渣对土壤容重和孔隙度的改善效果最好。

表 3 不同处理对土壤容重及孔隙度的影响

处理	容重 (g/cm <sup>3</sup> )	土壤比重	田间持水量 (%)	总孔隙度 (%)	毛管孔隙度 (%)	非毛管孔隙度 (%)
CK	1.34 ± 0.03a	2.21 ± 0.01c	20.76 ± 0.10e	39.1 ± 1.5d	27.8 ± 0.7bc	11.22 ± 2.13d
M1	1.29 ± 0.04ab	2.25 ± 0.01bc	21.94 ± 0.07d	42.4 ± 1.6c	28.3 ± 0.8bc	14.10 ± 2.44cd
M2	1.22 ± 0.01bc	2.26 ± 0.03bc	24.24 ± 0.29c	46.0 ± 0.4b	29.6 ± 0.2b	16.36 ± 0.66bc
S1	1.18 ± 0.02c	2.28 ± 0.04b	22.65 ± 0.32d	48.1 ± 0.7ab	26.8 ± 0.4c	21.30 ± 1.08a
S2	1.18 ± 0.05c	2.29 ± 0.06b	23.66 ± 0.21c	48.6 ± 2.4ab	27.9 ± 1.3bc	20.68 ± 3.64ab
B1	1.25 ± 0.02bc	2.39 ± 0.01a	25.57 ± 0.45b	47.8 ± 0.8ab	31.9 ± 0.5a	15.89 ± 1.21bcd
B2	1.19 ± 0.07c	2.42 ± 0.01a	28.00 ± 0.99a	50.7 ± 2.9a	33.4 ± 2.0a	17.27 ± 4.89abc

### 3 讨论

土壤物理性质决定土壤结构和土壤固、液、气三相占比，进而影响土壤中气体的输入和输出。通常来讲，土壤质地越疏松、容重越小，土壤孔隙度越大，气相占比越高，此时的气体交换通道越畅通，CO<sub>2</sub> 排放越快；反之土壤越紧实，固相比越大，则会阻抑土壤与大气之间的气体交换，增加土壤中 CO<sub>2</sub> 浓度，限制作物根系有氧呼吸<sup>[17]</sup>，对作物的生长产生不利影响。

本研究表明，施入不同有机物料连续 2 年后，土壤团聚体结构得到改善，0 ~ 20 cm 土层 > 0.250 mm 土壤大团聚体含量增加，并且随着施用量的增加呈现上升趋势，< 0.053 mm 粒径团聚体含量平均值明显下降。本研究结果与张志毅等的研究结果<sup>[18]</sup>一致，施用有机物料均会增加 > 0.250 mm 粒径团聚体含量，主要原因是有机物料自身含有丰富的养分（包括有机残体和菌丝等），还田后会增加土壤有机质含量，而有机质是形成土壤团聚结构的主要胶结物质<sup>[19]</sup>。

土壤固、液、气三相比是评价土壤水肥气热相互关系的重要参数<sup>[20]</sup>。本研究通过连续 2 年施加有机物料使土壤气相和液相体积分数降低，固相升高，土壤 STPSD 值呈逐渐减少趋势，并且随着有机物料施用量的增加，土壤三相比比例分配接近理想状态。但有机物料施用并不是越多越好，当施肥量超过最高产量施肥量时，作物的产量随施肥量的增加而减少，生产投入成本增加但收益却减少<sup>[21]</sup>。已有

研究表明，施用过多的有机物料会导致土壤中水分蒸发过快，土壤气体增多，土壤变得过于松散，土壤结构变差，使土壤三相比偏离理想值<sup>[22]</sup>。

土壤紧实度是土壤对外界垂直穿透力的反抗力，往往受土壤质地本身以及外源施压如大型机器碾压等影响，土壤紧实度过高往往会抑制作物根系生长的下扎，影响作物产量<sup>[23]</sup>。本研究结果表明，随着有机物料用量增加，土壤紧实度逐渐下降，土壤板结状况得到缓解。并且树枝菌渣输入可使土壤紧实度下降的更明显，这可能与树枝菌渣具有多孔结构、比表面积大有关。土壤容重与土壤孔隙度密切相关，土壤容重大，土壤孔隙度变小，土壤越紧实，直接影响作物根系正常生长和根系活力，进而影响产量。本研究中施加有机物料后土壤容重显著降低，土壤总孔隙度和毛管孔隙度整体增加，也符合土壤紧实度变化的趋势，除了与有机物料的比表面积大有关<sup>[24]</sup>，也可能与施加有机物料会影响土壤中动物和微生物的活性有关<sup>[25-27]</sup>。本研究以江苏省黄河故道区资源丰富的菌菇渣为外源有机物料，与施用商品有机肥对比，能获得与商品有机肥相同甚至更高的土壤改良效果，并且成本更低，为提高该区域作物生产的生态效益和经济效益提供理论和技术支撑。

### 4 结论

有机物料输入能够显著改善黄河故道区土壤结构：(1) 明显改善 0 ~ 10 cm 土层土壤团聚体结构，提高 > 0.250 mm 粒径土壤水稳性团聚体含量，

降低  $<0.053$  mm 粒径水稳性团聚体含量,增强土壤团聚体稳定性;(2)显著改善土壤三相比,增加固相比,减少液相比和气相比,降低 STPED 值,缓解土壤板结;(3)显著降低土壤容重和 10 ~ 20 cm 土层土壤紧实度,提高土壤总孔隙度和毛管孔隙度,增加田间持水量,创造良好的土壤物理条件。从土壤物理结构的改善效果考虑,本研究明确了该地区有机物料效益最适施肥量,在耕作层施入  $12 \text{ t/hm}^2$  的树枝菌渣对该地区土壤物理结构的改良效果最佳。

#### 参考文献:

- [1] 黄以柱. 黄河故道区域土地资源开发利用研究[J]. 自然杂志, 1995,17(4):211-215.
- [2] 李培培,汪强,文倩,等. 不同还田方式对砂质潮土理化性质及微生物的影响[J]. 生态学报,2017,37(11):3665-3672.
- [3] 李传哲,章欢,姚文静,等. 生物炭配施氮肥对典型黄河故道区土壤理化性质和冬小麦产量的影响[J]. 应用生态学报,2020,31(10):3424-3432.
- [4] 卢金伟,李占斌. 土壤团聚体研究进展[J]. 水土保持研究, 2002,9(1):81-85.
- [5] 王清奎,汪思龙. 土壤团聚体形成与稳定机制及影响因素[J]. 土壤通报,2005,36(3):415-421.
- [6] 文倩,赵小蓉,陈焕伟,等. 半干旱地区不同土壤团聚体中微生物量碳的分布特征[J]. 中国农业科学,2004,37(10):1504-1509.
- [7] 朱建彬,郭相平,谢毅,等. 秸秆隔层还田及水氮管理对设施土壤团聚体及固碳特征的影响[J]. 江苏农业学报,2021,37(3):632-638.
- [8] 王瑞,武威,刘涛,等. 耕地土壤容重作用及其调控途径研究进展[J]. 北方园艺,2020(4):135-141.
- [9] Strickland M S, Callahan M A Jr, Gardiner E S, et al. Response of soil microbial community composition and function to a bottomland forest restoration intensity gradient[J]. Applied Soil Ecology,2017, 119:317-326.
- [10] 张久明,迟凤琴,宿庆瑞,等. 不同有机物料还田对土壤结构与玉米光合速率的影响[J]. 农业资源与环境学报,2014,31(1):56-61.
- [11] 周祥,严媛媛,陈爱晶. 食用菌菌渣资源化利用研究进展[J]. 食用菌,2018,40(1):9-12.
- [12] 李春喜,李斯斯,邵云,等. 有机物料还田对冬小麦农田土壤温室气体排放影响的研究[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2019,27(6):815-824.
- [13] 谢沂希,谢尚春,刘慧,等. 双孢蘑菇菌渣还田下水稻土 Cu、Cd、Pb、Zn 相关性分析及污染评价[J]. 农业资源与环境学报, 2018,35(6):518-526.
- [14] Xie X L, Guo X B, Zhou L, et al. Study of biochemical and microbiological properties during co-composting of spent mushroom substrates and chicken feather[J]. Waste and Biomass Valorization,2019,10(1):23-32.
- [15] 胡杨勇,马嘉伟,叶正钱,等. 稻耳轮作制度下连续菌渣还田对土壤肥力性状的影响[J]. 水土保持学报,2013,27(6):172-176.
- [16] 范文丽,王升厚,赵英明. 施用杏鲍菇菌糠对土壤主要养分含量及番茄品质的影响[J]. 辽宁农业科学,2013(3):84-85.
- [17] 何娜,王立海. 压实对土壤理化特性及土壤呼吸的影响研究进展[J]. 森林工程,2010,26(1):7-11.
- [18] 张志毅,熊桂云,吴茂前,等. 有机培肥与耕作方式对稻麦轮作土壤团聚体和有机碳组分的影响[J]. 中国生态农业学报(中英文),2020,28(3):405-412.
- [19] 史奕,陈欣,沈善敏. 有机胶结形成土壤团聚体的机理及理论模型[J]. 应用生态学报,2002,13(11):1495-1498.
- [20] 梁海,陈宝成,韩惠芳,等. 深松 35 cm 可改善潮棕壤理化性质并提高小麦和玉米产量[J]. 植物营养与肥料学报,2019,25(11):1879-1886.
- [21] 陈伦寿. 报酬递减律与合理施肥[J]. 北京农业大学学报, 1982,8(1):69-76.
- [22] 李晓龙,高聚林,胡树平,等. 不同深耕方式对土壤三相比及玉米根系构型的影响[J]. 干旱地区农业研究,2015,33(4):1-7,29.
- [23] 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.
- [24] Laird D A, Fleming P, Davis D D, et al. Impact of biochar amendments on the quality of a typical Midwestern agricultural soil[J]. Geoderma,2010,158(3/4):443-449.
- [25] Birk J, Steiner C, Teixeira W, et al. Microbial response to charcoal amendments and fertilization of a highly weathered tropical soil[M]. Amazonian Dark Earths: Wim Sombroek's Vision,2009:309-324.
- [26] 李传哲,杨苏,姚文静,等. 有机物料输入对土壤及玉米籽粒重金属来源解析及风险评估[J]. 农业环境科学学报,2020,39(6):1230-1239.
- [27] 杨苏,李传哲,王静,等. 有机物料投入对作物产量及潮土固碳的影响[J]. 江苏农业学报,2020,36(3):569-576.