

DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2021.03.007

徐聪, 吴迪, 王磊, 等. 菌渣施用对黄河故道区低产田土壤理化性质、小麦根系生长和产量的影响. 土壤, 2021, 53(3): 491–498.

菌渣施用对黄河故道区低产田土壤理化性质、小麦根系生长和产量的影响^①

徐聪^{1,2}, 吴迪¹, 王磊¹, 李传哲¹, 杨苏¹, 孙丽¹, 汪吉东^{1,3*}, 张永春^{1,2}, 艾玉春¹

(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站, 南京 210014; 2 江苏大学环境与安全工程学院, 江苏镇江 212013; 3 江苏大学农业装备工程学院, 江苏镇江 212013)

摘要: 通过对两个小麦生长季进行田间监测, 探究了施用菌渣对黄河故道区低产田土壤理化性质、小麦根系生长和产量的影响。试验共设 7 个处理, 分别为不施用菌渣(CK), 施用低量(6 t/hm²; S1)、中量(12 t/hm²; S2)和高量秸秆质菌渣(18 t/hm²; S3), 施用低量(6 t/hm²; B1)、中量(12 t/hm²; B2)和高量木质菌渣(18 t/hm²; B3)。结果表明: 相比 CK, 施用菌渣后第 1 年和第 2 年的小麦产量分别增加了 32.4%~51.8% 和 38.8%~101.2%($P < 0.05$); 逐步回归结果显示, 每施用 1 t/hm² 的菌渣, 可提升小麦产量 0.21 t/hm² ($P < 0.01$); 不同菌渣类型间的小麦产量和经济效益无显著差异($P > 0.05$), 秸秆质菌渣 18 t/hm² 处理下可获得最高产量和经济效益; 施用菌渣 2 年后, 0~10 cm 土壤有机质显著提升 24.7%~57.7% ($P < 0.05$), 且 0~10 cm 土壤容重和紧实度分别降低了 11.6%~18.2% 和 20.8%~35.7% ($P < 0.05$; B1 处理除外); 根系形态指标与小麦产量间均呈正相关关系, 菌渣施用对小麦苗期根系总根长、总表面积、总体积和分叉数的增加有显著促进作用($P < 0.05$); 小麦产量与土壤有机质含量呈正相关关系, 与 0~10 cm 土壤容重和紧实度呈显著负相关关系($P < 0.05$), 说明菌渣施用后土壤有机质水平提升、物理结构改善是产量增加的关键机制。本研究表明, 针对土壤有机质水平低、物理结构较差的黄河故道区低产田, 施用菌渣是改善该地区土壤物理特性, 促进作物根系生长, 快速提升产量, 增加经济效益的有效手段。

关键词: 菌渣; 低产田; 小麦; 根系; 土壤理化性质

中图分类号: S512.1; S158.3 文献标志码: A

Using Mushroom Residues Improving Soil Physicochemical Properties, Wheat Root Growth and Yield in Low-yield Cropland of Ancient Yellow River Area

XU Cong^{1,2}, WU Di¹, WANG Lei¹, LI Chuanzhe¹, YANG Su¹, SUN Li¹, WANG Jidong^{1,3*}, ZHANG Yongchun^{1,2}, AI Yuchun¹

(1 Institute of Agricultural Resources and Environment, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences/Scientific Observation and Experimental Station of Arable Land Conservation of Jiangsu Province, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Nanjing 210014, China; 2 College of the Environment and Safety Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China; 3 College of Agricultural Equipment Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China)

Abstract: A two-year field experiment was conducted to evaluate the effect of applying mushroom residues on soil properties, wheat root growth and yield in the region of the ancient Yellow River. 7 treatments were designed, i.e., no mushroom residue (CK), straw-based mushroom residue at the rates of 6, 12, and 18 t/hm² (S1, S2, and S3 respectively), xylary mushroom residue at the rates of 6, 12, and 18 t/hm² (B1, B2, and B3 respectively). The results showed that compared with CK, applying mushroom residues increased wheat yield by 32.4%–51.8% and 38.8%–101.2% in the 1st and 2nd year, respectively ($P < 0.05$), and stepwise regression showed that applying 1 t/hm² mushroom residues improved crop yield by 0.21 t/hm² ($P < 0.01$). Applying straw-based mushroom residues of 18 t/hm² achieved the optimal agronomic and economic incomes, however, no significant differences in wheat yield and economic income were found between straw-based and xylary mushroom residues ($P > 0.05$). After the two-year application of mushroom residues, soil organic matter content increased by 24.7%–57.7% ($P < 0.05$), bulk density and compactness significantly decreased by 11.6%–18.2% and 20.8%–35.7%, respectively ($P < 0.05$; B1 excepted). Root traits showed

①基金项目: 江苏省重点研发计划项目(BE2019378)和江苏省农业科技自主创新资金项目(CX(17)1001)资助。

* 通讯作者(jdwang66@163.com)

作者简介: 徐聪(1990—), 男, 山东临沂人, 博士, 助理研究员, 主要从事土壤肥力质量与氮循环研究。E-mail: cxu@jaas.ac.cn

positive correlation with wheat yield. Applying mushroom residues significantly increased the total root length, surface area, total volume, and folks ($P < 0.05$). Wheat yield had positive correlation with soil organic matter content but significant negative correlation with 0–10 cm soil bulk density and compactness, which indicate that increasing soil organic matter and improving soil physical properties by applying mushroom residues are essential mechanisms for wheat yield enhancement. Our study indicates that for farmlands with low soil organic matter and less favorable physical structures in the low-yield cropland of ancient Yellow River area, applying mushroom residue is effective to improve soil physical properties and fertility, promote wheat root growth, increase wheat yield and economic income.

Key words: Mushroom residue; Low-yield cropland; Wheat; Root; Soil physical and chemical properties

目前我国农田总面积中仍有 70% 以上属于中低产田, 提高中低产田产量是落实“藏粮于地”战略、保障我国粮食安全的重要途径^[1]。黄河故道区是典型的中低产田区, 导致该地区作物产量低的主要原因为土壤有机质含量低、物理结构差等^[2]。加大有机物料投入, 改善土壤物理化学特性是黄河故道区中低产田耕地保育和地力提升的重要措施^[3]。然而, 商品有机肥价格较高, 在粮食作物生产中大面积推广施用存在一定困难^[4]。选择成本较低且产量提升效果显著的有机物料, 是形成可复制可推广的地力提升方案的必要条件。

中国是食用菌生产大国, 其年产量可达 3 842 万^[5], 大规模生产食用菌的同时也产生了大量的菌渣废弃物(每生产 1 kg 食用菌会产生菌渣 3.25 kg)。菌渣有机质含量高, 富含氮、磷、钾、微量元素、糖类、蛋白质、脂肪和纤维素等^[6], 养分含量与天然有机肥相当, 且价格低廉(每 t 仅 260 元左右), 是理想的还田有机物料^[7]。已有一些研究发现, 菌渣在提升土壤养分含量^[8]、改善土壤物理特性方面效果显著^[9]。我国菌渣再利用率仅为 33%, 将其还田可在提升地力的同时避免菌渣丢弃和焚烧造成的资源浪费和环境污染问题, 实现农业废弃物的循环利用^[8]。

小麦作为黄河故道区主要的粮食作物之一, 在保证区域粮食安全方面发挥着重要作用^[10]。关于菌渣施用对小麦产量和土壤肥力指标的影响, 前人已进行了相关研究。李春喜等^[11]的结果表明, 在黏壤土中施加菌渣可提高小麦产量 69.6%, 增加经济效益 123.5%。邓欧平等^[12]在成都平原进行的研究表明, 菌渣施用可分别提升土壤碱解氮、速效钾和有效磷含量 3.55% ~ 20.24%、2.84% ~ 31.97% 和 2.10% ~ 14.48%。陈源泉等^[13]在华北平原进行的长期定位试验发现, 施用菌渣 5 年后土壤总有机碳和易氧化有机碳水平显著提升, 年均增幅分别为 21.9% 和 33.75%。然而针对黄河故道区低产田, 目前还缺乏关于菌渣施用对小麦产量和土壤肥力影响及其机制的研究。

本研究选取黄河故道区典型低产田为试验地, 设置不同菌渣施用处理, 探究菌渣施用对小麦产量、土壤有机质含量及物理特性的影响。由于根系形态的建成是小麦产量形成的重要条件, 且显著受土壤物理特性影响^[14], 本研究也着重分析了小麦根系生长对菌渣施用的响应。研究可为探明菌渣施用的增产机制、挖掘中低产田区作物增产潜力提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地位于江苏省滨海县界牌镇三坝村。该地区为黄河故道区, 属暖温带向亚热带过渡的湿季风气候, 无霜期 223 d, 年平均气温 14.1℃, 年平均降雨量 942.6 mm。土壤类型为砂质潮土, 种植模式为小麦-玉米轮作, 为典型的低产田。试验开始前土壤基础理化性状见表 1。

表 1 供试土壤(0~20 cm)基础理化性质
Table 1 Soil basic physiochemical properties of tested soil

容重 (g/cm ³)	pH	土壤有机质 (g/kg)	全氮 (g/kg)	速效钾 (mg/kg)	有效磷 (mg/kg)
1.49	8.58	4.41	0.18	63.3	2.63

1.2 试验设计

试验始于 2017 年 6 月。选取当地食用菌种植中产生的两类主要菌渣: 秸秆质菌渣和木质菌渣作为供试材料, 共设 7 个处理, 分别为不施用菌渣(CK), 施用低量(6 t/hm²; S1)、中量(12 t/hm²; S2)、高量(18 t/hm²; S3)秸秆质菌渣, 施用低量(6 t/hm²; B1)、中量(12 t/hm²; B2)和高量(18 t/hm²; B3)木质菌渣。小区面积为 96 m², 每处理重复 3 次, 随机区组排列。

所有处理小麦季化肥施用量均一致, 分别为 N 270 kg/hm²、P₂O₅ 150 kg/hm² 和 K₂O 80 kg/hm², 其中氮肥为尿素, 基追比为 4 : 6; 磷肥和钾肥分别为过磷酸钙和硫酸钾, 均作为底肥一次性施入。供试秸秆

质菌渣全氮、全磷、全钾含量及 C/N 比值分别为 3.32、8.94、19.4 g/kg 和 77.7, 木质菌渣分别为 5.22、6.71、18.70 g/kg 和 62.8。菌渣于每季作物种植前进行施用, 且各处理每季施用量一致。其他农艺措施与当地农民常规操作相同。

1.3 样品采集与指标测定

在 2019 年小麦收获期对 0~10 cm 和 10~20 cm 土壤的有机质含量、容重和紧实度进行测定。土壤有机质含量、容重按土壤分析常规方法测定^[15]。土壤紧实度采用 TJSD-750-II 型紧实度仪测定(托普云农科技股份有限公司, 中国)。

于 2018 年和 2019 年小麦苗期对植株进行采样。每小区采集具有代表性的 10 株小麦样品, 根系取样深度为 0~30 cm。取样后将小麦植株带回实验室, 用水洗净后将根系与地上部分分离; 将洗净的根系置于装有水的有机玻璃盘上, 用镊子小心将根系展开, 避免根系重叠; 使用 EPSON PERFECTION V700 Photo 扫描仪对根系图像进行扫描, 使用根系图像分析软件 WinRHIZO(Regent Instruments, Canada)对根系进行分析, 得到总根长、总根表面积、根尖数和根系分叉数等指标。在测完根系形态指标后, 将根系转移到 60℃ 鼓风烘箱中烘干至恒重, 称量干物质质量。比根长(m/g)的计算方法为总根长(m)与根系干物质质量(g)的比值, 根组织密度(mg/cm³)为根系生物量(mg)与根系体积(cm³)的比值。两个种植季的小麦产量均采用样方法测定。

1.4 数据分析

采用公式(1)计算小麦生产的经济效益^[16]:

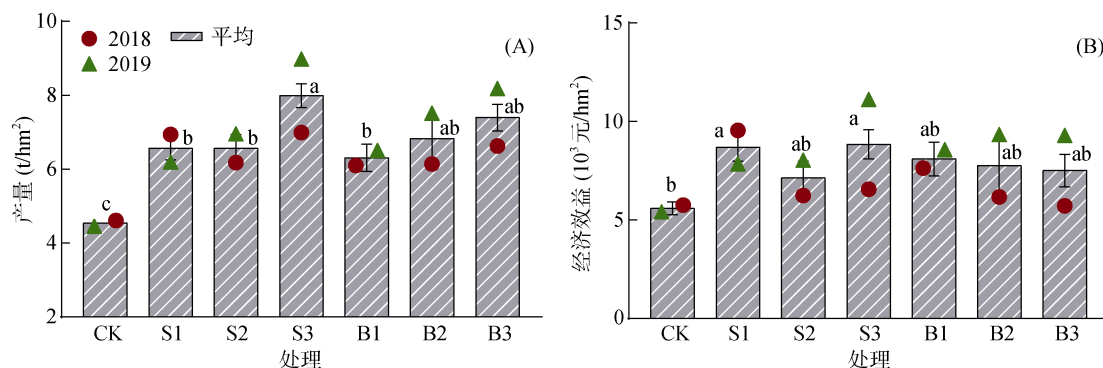
经济效益=籽粒产量 × 市场价格 - 生产成本 (1)
式中: 生产成本=机械投入 + 劳动成本 + 生产资料(种子+化肥)投入。小麦价格为 2.3 元/kg, 种子价格为 4.5 元/kg, 氮肥价格为 N 3.7 元/kg, 钾肥价格为 K₂O 5 元/kg, 磷肥价格为 P₂O₅ 5 元/kg, 两类菌渣价格均为 260 元/t, 劳动成本为 1 200 元/hm², 机械投入为 150 元/hm²。

试验中作物产量及经济效益分析基于 2018 年和 2019 年两年结果。土壤有机质、容重及紧实度为 2019 年单年数据($n=3$)。除不同根系直径范围下的根系指标组成为 2019 年单年数据外($n=3$), 其余根系形态指标均为 2018 年、2019 年两年数据的平均值($n=6$)。试验数据使用 Microsoft Excel 2016 进行整理, 采用 SPSS 22.0 软件进行统计分析, 运用最小显著差异法(LSD)对各处理数据进行多重比较($P<0.05$), 使用 GraphPad Prism 7 进行作图。

2 结果与分析

2.1 菌渣施用对小麦产量及经济效益的影响

施用菌渣处理的小麦产量均显著高于 CK($P<0.05$; 图 1A), 两个生长季平均增产幅度为 39.0%~63.3%。随着菌渣施用量的增加, 小麦产量呈增加趋势, 但同一施用水平下两种菌渣类型间的小麦产量无显著差异($P>0.05$)。相比 CK, 施用菌渣后经济效益平均增加 1 552~3 257 元/hm²(27.8%~58.4%; 图 1B)。各菌渣施用处理中, S3 处理的平均产量(7.99 t/hm²)和经济效益(8 838 元/hm²)均表现为最高, 且与 CK 间差异均达显著水平($P<0.05$)。



(图中误差线代表两季小麦产量平均值的标准误($n=6$); 不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$))

图 1 不同处理小麦产量(A)及经济收益(B)

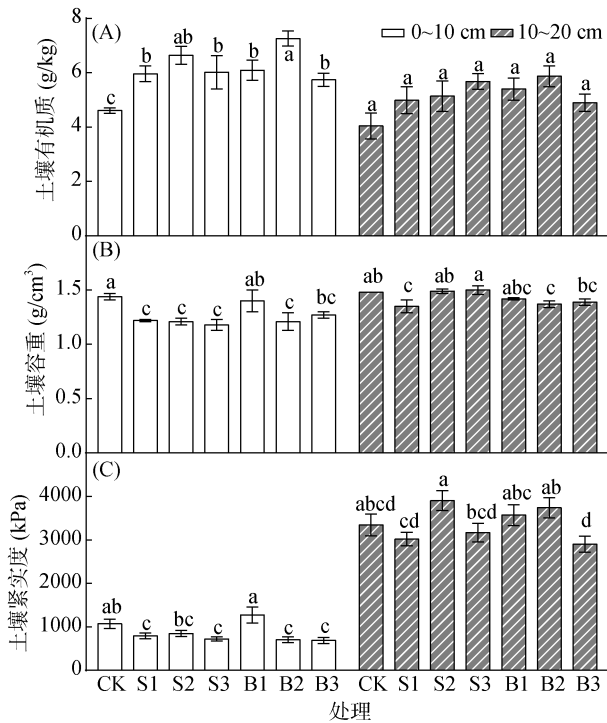
Fig. 1 Wheat yields (A) and economic incomes (B) under different treatments

2.2 菌渣施用对土壤有机质含量及物理指标的影响

相比 CK, 施用菌渣处理下 0~10 cm 土壤有机质含量显著提升 24.7%~57.7%($P<0.05$; 图 2A), 其

中 B2 处理下土壤有机质含量为 7.26 g/kg, 提升效果最明显; 施菌渣后 10~20 cm 土壤有机质含量也有增加趋势, 但差异未达显著水平($P>0.05$)。施用菌渣处

理下 0~10 cm 土壤容重均较 CK 呈降低趋势,降低幅度为 2.66%~18.81%,且除 B1 处理外,其余处理降幅均达显著水平($P<0.05$;图 2B);S1 和 B2 处理下 10~20 cm 土壤容重较 CK 显著降低($P<0.05$),但其他处理与 CK 间无显著差异($P>0.05$)。与土壤容重规律相似,相比 CK,施用菌渣后 0~10 cm 土壤紧实度也有降低趋势(B1 处理除外;图 2C),且 S1、S3、B2 和 B3 处理与 CK 间差异达显著水平($P<0.05$);但各处理下 10~20 cm 土壤容重无明显变化趋势($P>0.05$)。



(图中误差线代表标准误($n=3$);不同小写字母表示各土层下不同处理间存在显著差异($P<0.05$))

图 2 不同处理 0~10 及 10~20 cm 土壤有机质(A)、容重(B)及紧实度(C)变化

Fig. 2 Soil organic matter contents (A), bulk densities (B), and compactness (C) of 0–10 cm and 10–20 cm depths under different treatments

2.3 菌渣施用对小麦苗期根系形态指标的影响

相比 CK,施用秸秆菌渣和木质菌渣均显著($P<0.05$)增加小麦苗期总根长(47.9%~78.4%)和总根表面积(68.9%~96.9%;表 2),其中 B1 处理对总根长的提升效果最明显,B2 处理下的总根表面积最高。菌渣施用也有增加根系总体积的趋势,相比 CK 其增加比例为 68.7%~135.7%,且除 S2 处理外差异均达到显著水平($P<0.05$)。施用菌渣后小麦根尖数较 CK 增加了 64.7%~128.1%,其中 B3 处理增加最为显著($P<0.05$);根系分叉数较 CK 增加了 51.7%~124.2%,其中 B3 处理增加最为显著($P<0.05$)。施用菌渣对小麦根系平均直径没有显著影响($P>0.05$)。两种菌渣类型间小麦根系形态指标亦无显著差异($P>0.05$)。

不同根系直径范围下的根长、根表面积、根尖数如图 3 所示。小麦苗期根系中,0~0.5 mm 直径范围内的根长最长(1 150~1 759 cm),占苗期总根长的约 80%。直径 0~0.5 mm 和 0.5~1.0 mm 范围内的根表面积较高(45.77~100.76 cm²),同样占根系总表面积的约 80%。各处理下 0.5~1.0 mm 根直径范围内的根体积最大(0.77~1.61 cm³),而后随根直径的降低,根体积也呈降低趋势。不同直径范围下根尖数的变化规律与根长相似,根尖数较多的根系大多集中在 0~0.5 mm 直径范围内(根尖数为 3 733~6 709),占总根尖数的 98%。然而各处理在不同根直径范围下的根长、根表面积、根体积和根尖数均无显著差异($P>0.05$)。

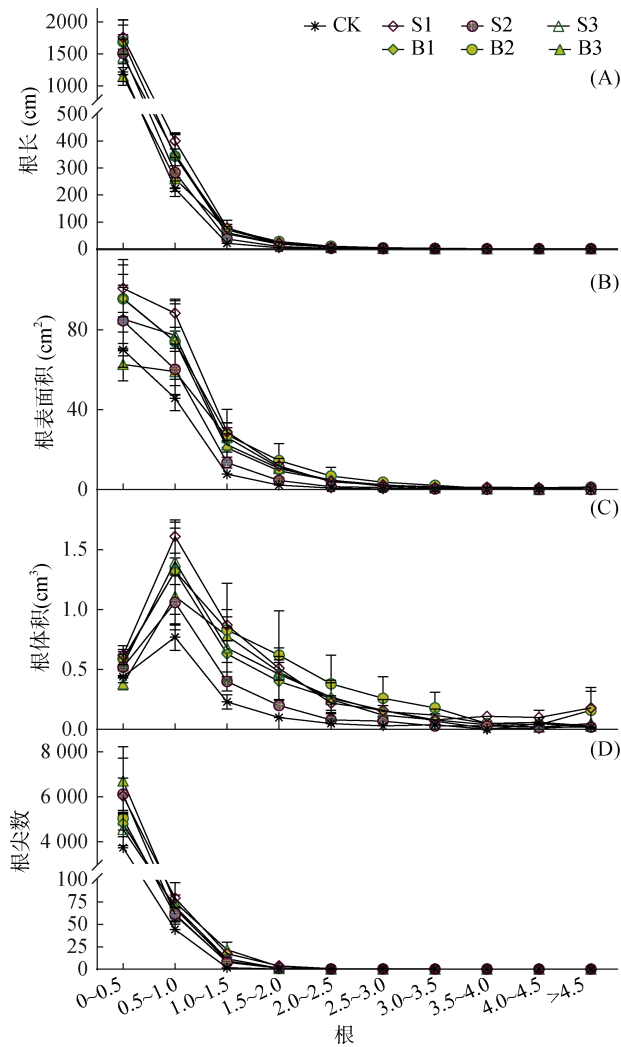
2.4 菌渣施用对小麦根系干物质质量、组织密度及比根长的影响

B3 处理下的小麦根系干物质质量最高(0.70 g/株),且显著($P<0.05$)高于其他处理(表 3)。施用菌渣后根系比根长有增加趋势(B3 处理除外),其中 S3 处理增加幅度最高(63.0%),且显著高于 CK($P<0.05$)。各处理中,B3 处理的根组织密度最高(3.80 mg/cm³);但其余菌渣施用处理的根组织密度均低于 CK,且除 B1 处理外,与 CK 间差异均达到显著水平($P<0.05$)。

表 2 不同处理下小麦根系形态指标差异
Table 2 Wheat root traits under different treatments

处理	总根长(10 ³ cm)	总根表面积(cm ²)	根平均直径(mm)	根系总体积(cm ³)	根尖数	根系分叉数
CK	9.71 ± 0.24 b	10.34 ± 0.41 b	0.36 ± 0.01 a	0.089 ± 0.005 b	229 ± 13 b	569 ± 44 c
S1	16.44 ± 1.28 a	20.17 ± 0.26 a	0.40 ± 0.03 a	0.199 ± 0.011 a	414 ± 52 a	1 147 ± 107 ab
S2	14.60 ± 1.11 a	17.47 ± 2.17 a	0.35 ± 0.02 a	0.150 ± 0.012 ab	482 ± 107 a	863 ± 116 bc
S3	15.77 ± 1.90 a	19.99 ± 3.05 a	0.41 ± 0.02 a	0.204 ± 0.038 a	377 ± 27 ab	1 029 ± 155 ab
B1	17.32 ± 2.55 a	18.36 ± 0.51 a	0.39 ± 0.04 a	0.177 ± 0.015 a	396 ± 59 ab	1 096 ± 118 ab
B2	16.48 ± 0.82 a	20.36 ± 2.74 a	0.41 ± 0.03 a	0.209 ± 0.048 a	398 ± 25 ab	1 275 ± 196 a
B3	14.35 ± 0.63 a	18.68 ± 1.15 a	0.39 ± 0.02 a	0.186 ± 0.018 a	522 ± 61 a	1 000 ± 55 ab

注:表中数据为两个生长季监测结果的平均值±标准误($n=6$);同列不同小写字母表示不同处理间存在显著差异($P<0.05$);下同。



(误差线代表 2019 年监测结果平均值的标准误(n=3))

图 3 不同处理不同根系直径范围根系形态指标的组成
Fig. 3 Root morphological traits of different root diameter ranges under different treatments

2.5 小麦产量、菌渣施用量、根系生长指标、土壤有机质及物理指标间的关系

菌渣施用量与小麦产量呈显著正相关关系($P < 0.05$; 表 4), 表明菌渣施用显著促进小麦产量。菌渣施用量与 0 ~ 10 cm 及 10 ~ 20 cm 土壤有机质含量也

呈正相关关系, 但相关性未达显著水平($P > 0.05$)。菌渣施用量与 0 ~ 10 cm 土壤容重及紧实度均呈显著负相关关系($P < 0.05$), 但与 10 ~ 20 cm 土壤容重及紧实度间相关关系不显著($P > 0.05$)。

表 3 不同处理小麦根系干物质质量、比根长及根组织密度
Table 3 Wheat root dry mass, specific root lengths, and root tissue densities under different treatments

处理	根系干物质质量(g/株)	比根长(m/g)	根组织密度(mg/cm ³)
CK	0.25 ± 0.03 b	3.84 ± 0.48 bc	2.91 ± 0.36 ab
S1	0.38 ± 0.05 b	4.45 ± 0.82 b	1.95 ± 0.13 c
S2	0.30 ± 0.06 b	5.32 ± 0.87 ab	1.95 ± 0.23 c
S3	0.27 ± 0.07 b	6.26 ± 0.64 a	1.32 ± 0.08 c
B1	0.38 ± 0.08 b	4.77 ± 0.22 ab	2.19 ± 0.45 bc
B2	0.35 ± 0.06 b	4.77 ± 0.35 ab	1.93 ± 0.38 c
B3	0.70 ± 0.10 a	2.28 ± 0.37 c	3.80 ± 0.28 a

除比根长外, 小麦产量与根系生长指标间均呈正相关关系, 且与总根表面积、根尖数、根系分叉数和根系干物质质量间的相关性达显著水平($P < 0.05$; 表 4)。除根组织密度外, 菌渣施用量与其他根系生长指标均呈正相关关系, 但相关性未达显著水平($P > 0.05$)。除根平均直径和根组织密度外, 其余根系生长指标均与 0 ~ 10 cm 土壤有机质含量呈正相关关系, 且总根长、根系分叉数与 0 ~ 10 cm 有机质含量间相关性达显著水平($P < 0.05$); 但各根系生长指标与 10 ~ 20 cm 土壤有机质含量无显著相关性($P > 0.05$)。除根组织密度外, 各根系生长指标均与 0 ~ 10 cm 土壤容重呈负相关关系, 且根系总体积、根系分叉数与 0 ~ 10 cm 土壤容重间相关性达显著水平($P < 0.05$); 除根尖数和比根长外, 各根系生长指标与 10 ~ 20 cm 土壤容重也呈负相关关系, 但相关性未达显著水平($P > 0.05$)。除总根长、根系分叉数和比根长外, 各根系生长指标均与土壤紧实度呈负相关关系, 且根系干物质质量与 10 ~ 20 cm 土壤紧实度间相关性达显著水平($P < 0.05$)。

表 4 小麦产量、菌渣施用量、根系生长指标、土壤物理属性之间相关性

Table 4 Correlation between wheat yield, mushroom residues application rate, root morphological traits, soil physical properties

	产量	菌渣施用量	总根长	总根表面积	根平均直径	根系总体积	根尖数	根系分叉数	根系干物质质量	比根长	根组织密度
产量	-	0.53*	0.37	0.44*	0.09	0.42	0.50*	0.43*	0.49*	-0.09	0.09
菌渣施用量	0.53*	-	0.15	0.31	0.17	0.32	0.31	0.15	0.34	0.05	-0.03
0 ~ 10 cm 有机质	0.31	0.40	0.46*	0.40	0.00	0.29	0.21	0.53*	0.05	0.24	-0.15
10 ~ 20 cm 有机质	0.47*	0.40	0.07	0.02	-0.01	0.00	0.02	0.05	-0.11	0.15	-0.11
0 ~ 10 cm 容重	-0.44*	-0.56**	-0.22	-0.42	-0.36	-0.45*	-0.28	-0.43*	-0.05	-0.11	0.26
10 ~ 20 cm 容重	0.04	0.04	-0.12	-0.23	-0.26	-0.25	0.04	-0.13	-0.33	0.28	-0.16
0 ~ 10 cm 紧实度	-0.56**	-0.72**	0.01	-0.14	-0.23	-0.19	-0.29	-0.16	-0.27	0.14	-0.13
10 ~ 20 cm 紧实度	-0.14	-0.18	0.13	-0.02	-0.27	-0.09	-0.12	0.11	-0.44*	0.32	-0.29

注: 表中数值代表相关系数, *和**分别表示相关性达显著($P < 0.05$)和极显著水平($P < 0.01$)。

根系生长指标及产量与其菌渣施用量、土壤有机质含量、容重和紧实度等指标间的逐步回归分析如表 5 所示。菌渣施用量显著影响小麦产量($P<0.01$), 可以解释 72% 的产量变异, 且每施用 1 t/hm² 的菌渣, 产量可提升 0.21 t/hm²。土壤有机质含量可解释 21% 的总根长变异($P<0.05$), 根据逐步回归方程可得出, 提升 1 g/kg 的有机质含量可增加总根长 260 m/株。0~10 cm 土壤容重可解释 20% 的根系体积变异, 降低 1 g/cm³ 的土壤容重可增加 0.33 cm³ 的根系体积。根系分叉数也可用土壤有机质含量解释($R^2=0.28$; $P<0.05$), 有机质上升 1 g/kg, 根系分叉数增加约 277 个。根系干物质量则受菌渣施用量影响显著($R^2=0.28$; $P<0.05$)。

表 5 小麦产量及根系生长指标与其影响因素的逐步回归分析

Table 5 Stepwise regression analysis of wheat yield with root morphological traits and soil physical properties

Y	逐步回归方程	R ²	P
产量 (t/hm ²)	Y=4.78+0.21AR	0.72	0.0001**
总根长 (10 ³ cm)	Y=32.24+26.01OM	0.21	0.0355*
总根表面积 (cm ²)	Y=51.30-22.95BD	0.18	0.0575
根平均直径 (mm)	Y=0.59-0.17BD	0.13	0.1075
根系总体积 (cm ³)	Y=0.63-0.33BD	0.20	0.0390*
根尖数	Y=453.66+8.04AR	0.09	0.1921
根系分叉数	Y=-247.71+277.48OM	0.28	0.0131*
根系干物质量(g/plant)	Y=1.11-0.23C+0.01AR	0.30	0.0421*
比根长 (m/g)	Y=-0.60+1.56C	0.10	0.1541
根组织密度 (mg/cm ³)	Y=5.57-0.93C	0.09	0.1962

注: 逐步回归所考虑的自变量有: 菌渣施用量, 0~10 cm 土壤容重、紧实度及有机质含量, 10~20 cm 土壤容重、紧实度及有机质含量。OM 为 0~10 cm 土壤有机质含量(g/kg), BD 为 0~10 cm 土壤容重(g/cm³), AR 为菌渣施用量(t/hm²), C 为 10~20 cm 土壤紧实度(10⁻³ kPa)。*和**分别代表达显著($P<0.05$)和极显著($P<0.01$)水平。

3 讨论

3.1 菌渣施用的增产效果

前人在华北集约化高产农田的研究发现, 施用菌渣可显著提高小麦产量 4.7%~69.64%^[11, 17]。但针对黄河故道区低产田, 关于菌渣投入对作物生产力提升效果的研究较少。本研究结果显示, 相比不施菌渣处理, 施用菌渣后第 1 年和第 2 年的小麦产量分别增加了 32.4%~51.8% 和 38.8%~101.2%($P<0.05$; 图 1A), 增产效果显著。本试验条件下, 随菌渣施用量的增加, 小麦产量呈增加趋势(图 1A), 同时, 逐步回归结果显示, 每施用 1 t/hm² 的菌渣, 可提升

0.21 t/hm² 的小麦产量($P<0.01$; 表 5)。这表明在产量水平较低的黄河故道区, 可通过增施菌渣来快速提升作物产量。黄河故道区土壤有机质含量低, 且质地较砂, 施用化肥后易产生氮素的淋溶和径流损失^[18], 不利于作物高产。菌渣的 C/N 比较高(62.8~77.7), 施用后有利于微生物对土壤氮素的固持, 起到“保肥”作用, 提高氮肥利用率和作物产量^[19]。本研究中, 相同施用量下, 菌渣类型对小麦产量无显著影响, 可能是由于秸秆质菌渣和木质菌渣理化性质较相近, 且施用年限较短^[20-21]所致。经济效益分析发现, S3 处理下的小麦产量(7.99 t/hm²)和经济效益(8 838 元/hm²)在各处理中均为最高(图 1), 表明在黄河故道区将秸秆质菌渣按 18 t/hm² 水平还田可获得较高农学和经济效益。

3.2 菌渣施用对土壤有机质含量的影响

有机质含量是土壤肥力的重要指标。Han 等^[20]通过整合全国 68 个长期定位试验结果进行的 meta 分析表明, 土壤有机质含量与作物产量呈极显著正相关, 每增加 1 g/kg 的土壤有机质可提升作物年产量 238 kg/hm²。本研究土壤基础有机质含量仅为 4.41 g/kg, 显著低于我国耕层土壤(0~20 cm)有机质平均水平(20.69~21.89 g/kg^[22]), 是限制该地区作物产量的主要因子之一。本研究结果显示, 施用菌渣 2 年后, 0~10 cm 土壤有机质显著提升 24.7%~57.7%($P<0.05$; 图 2A), 且土壤有机质含量与小麦产量均呈正相关关系(表 4), 因此, 菌渣施用下土壤有机质水平的提升是小麦产量增加的重要途径。无论施用秸秆质菌渣或木质菌渣, 土壤有机质含量均在 12 t/hm² 菌渣施用水水平下达到最高, 继续增加施用量土壤有机质反而呈降低趋势(图 2A)。这可能是由于随着菌渣施用量的增加, 新添加的碳源对原土有机质分解的激发效应加强, 导致 18 t/hm² 施用水水平下的总有机碳累积较 12 t/hm² 水平低^[23]。

3.3 菌渣施用对土壤物理特性和根系生长的影响

黄河故道区土壤高砂低黏, 其较高的土壤机械阻力是限制作物根系生长和产量形成的关键因素之一^[24]。前人研究表明, 施用有机物料对土壤物理特性的改善和作物根系的建成有显著促进作用^[25]。本试验结果显示, 菌渣施用量分别可以解释 0~10 cm 土壤容重和紧实度总变异的 31.4% 和 51.8%($P<0.05$; 表 4), 且相比 CK, 施用菌渣后 0~10 cm 土壤容重显著降低了 11.6%~18.2%, 紧实度显著降低了 20.8%~35.7%($P<0.05$; B1 处理除外; 图 2), 说明施用菌渣可显著降低土壤机械阻力。

本研究通过对两个小麦生长季的根系生长指标进行监测发现, 菌渣施用对根系总根长、总表面积、总体积和分叉数的增加有显著的促进作用($P<0.05$); 但除 B3 处理外, 施用菌渣处理下的根系平均直径及根系干物质量与 CK 无显著差异($P>0.05$), 因此其比根长较 CK 呈增加趋势(表 2 和表 3)、根组织密度呈降低趋势(表 3)。与本试验结果类似, Keeling 等^[26]的研究也发现, 有机物料施用未显著影响小麦根系干物质积累量。该结果说明菌渣的施用主要促进根系分叉, 增加单位根系干物质量下的根长^[27]。小麦产量与根系形态指标均呈正相关关系, 且小麦苗期的根系总表面积、平均直径、总体积、根尖数、分叉数和根系干物质量与 0~10 cm 土壤容重和紧实度均呈负相关(表 4)。因此可以认为菌渣施用后土壤表层容重和紧实度的降低是促进小麦苗期根系生长, 增加产量的重要因素^[28]。此外, 菌渣施用后土壤孔隙度增加^[29]、保水保肥能力增强^[30], 为根系生长创造的水、肥、气、热协调的耕层结构也可能是促进小麦苗期根系生长的重要原因^[3]。

4 结论

本研究通过两季小麦田间试验发现, 在土壤肥力水平较低的黄河故道区, 施用菌渣可显著提升小麦产量 39.0%~63.3%($P<0.05$), 且每施用 1 t/hm² 的菌渣, 小麦产量增加 0.21 t/hm²($P<0.01$)。施用秸秆质菌渣 18 t/hm² 可获得最高农学和经济效益。施用菌渣 2 年后, 土壤理化性质显著改善, 0~10 cm 土壤有机质含量显著提升 24.7%~57.7%($P<0.05$), 0~10 cm 土壤容重和紧实度分别显著降低 11.6%~18.2%、20.8%~35.7%($P<0.05$; B1 处理除外)。施用菌渣有利于小麦苗期根系的建成, 对根系总根长、总表面积、总体积和分叉数的增加有显著的促进作用($P<0.05$)。本研究结果表明, 在土壤有机质含量低, 物理结构较差的黄河故道区低产田, 施用菌渣是改善该地区土壤物理特性, 促进作物根系生长, 快速提升作物产量, 增加经济效益的有效手段。

参考文献:

[1] Yan H M, Ji Y Z, Liu J Y, et al. Potential promoted productivity and spatial patterns of medium- and low-yield cropland land in China[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2016, 26(3): 259–271.

[2] Zhang Z, Li Q, Liu G B, et al. Soil resistance to concentrated flow and sediment yields following cropland abandonment on the Loess Plateau, China[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2017, 17(6): 1662–1671.

[3] Pu X Z, Zhang G J, Zhang P P, et al. Effects of straw management, inorganic fertiliser, and manure amendment on soil microbial properties, nutrient availability, and root growth in a drip-irrigated cotton field[J]. *Crop and Pasture Science*, 2016, 67(12): 1297–1308.

[4] Yazan D M, Fraccascia L, Mes M, et al. Cooperation in manure-based biogas production networks: An agent-based modeling approach[J]. *Applied Energy*, 2018, 212: 820–833.

[5] 中国食用菌协会. 2018 年度全国食用菌统计调查结果分析[OL]. 2019-12-27(2020-03-18). <http://www.cefa.com.cn/2019/12/27/10663.html>.

[6] 梁海恬, 何宗均, 高贤彪, 等. 菇渣、草炭、蛭石混合基质化处理产物对番茄苗期发育特性的影响[J]. *华北农学报*, 2015, 30(4): 194–199.

[7] Gao X S, Lan T, Deng L J, et al. Mushroom residue application affects CH₄ and N₂O emissions from fields under rice-wheat rotation[J]. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 2017, 63(6): 748–760.

[8] Paredes C, Medina E, Bustamante M A, et al. Effects of spent mushroom substrates and inorganic fertilizer on the characteristics of a calcareous clayey-loam soil and lettuce production[J]. *Soil Use and Management*, 2016, 32(4): 487–494.

[9] 栗方亮, 王煌平, 张青, 等. 稻田施用菌渣土壤团聚体的组成及评价[J]. *生态与农村环境学报*, 2015, 31(3): 340–345.

[10] 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.

[11] 李春喜, 刘晴, 邵云, 等. 有机物料还田和减施氮肥对小麦氮素利用及经济效益的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2019, 37(6): 214–220.

[12] 邓欧平, 李瀚, 周稀, 等. 菌渣还田对土壤有效养分动态变化的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2014, (4): 18–23.

[13] 陈源泉, 隋鹏, 严玲玲, 等. 有机物料还田对华北小麦玉米两熟农田土壤有机碳及其组分的影响[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(S2): 94–102.

[14] Zhang P P, Gebrewahid T W, Zhou Y, et al. Seedling and adult plant resistance to leaf rust in 46 Chinese bread wheat landraces and 39 wheat lines with known Lr genes[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2019, 18(5): 1014–1023.

[15] 史瑞和, 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 农业出版社, 1980.

[16] Zhang Y T, Wang H Y, Lei Q L, et al. Optimizing the nitrogen application rate for maize and wheat based on yield and environment on the Northern China Plain[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 618: 1173–1183.

[17] 聂胜委, 李向东, 张玉亭, 等. 不同菌渣肥施用量对小麦产量及其构成因素的影响[J]. *河南农业科学*, 2015, 44(6): 76–80.

[18] Gu L M, Liu T N, Wang J F, et al. Lysimeter study of nitrogen losses and nitrogen use efficiency of Northern Chinese wheat[J]. *Field Crops Research*, 2016, 188: 82–95.

[19] Sugihara S, Funakawa S, Kilasara M, et al. Effect of land management on soil microbial N supply to crop N uptake in

- a dry tropical cropland in *Tanzania*[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2012, 146(1): 209–219.
- [20] Han X, Xu C, Dungait J A J, et al. Straw incorporation increases crop yield and soil organic carbon sequestration but varies under different natural conditions and farming practices in China: A system analysis[J]. *Biogeosciences*, 2018, 15(7): 1933–1946.
- [21] Karim A J M S, Egashira K, Yamada Y, et al. Long-term application of organic residues to improve soil properties and to increase crop yield in terrace soil of Bangladesh[J]. *Journal of the Faculty of Agriculture, Kyushu University*, 1995, 39(3/4): 149–165.
- [22] Yan X Y, Cai Z C, Wang S W, et al. Direct measurement of soil organic carbon content change in the croplands of China[J]. *Global Change Biology*, 2011, 17(3): 1487–1496.
- [23] Wu L, Zhang W J, Wei W J, et al. Soil organic matter priming and carbon balance after straw addition is regulated by long-term fertilization[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2019, 135: 383–391.
- [24] Bengough A G, McKenzie B M, Hallett P D, et al. Root elongation, water stress, and mechanical impedance: A review of limiting stresses and beneficial root tip traits[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2011, 62(1): 59–68.
- [25] 陈贵, 张红梅, 沈亚强, 等. 猪粪与牛粪有机肥对水稻产量、养分利用和土壤肥力的影响[J]. *土壤*, 2018, 50(1): 59–65.
- [26] Keeling A A, McCallum K R, Beckwith C P. Mature green waste compost enhances growth and nitrogen uptake in wheat (*Triticum aestivum* L.) and oilseed rape (*Brassica napus* L.) through the action of water-extractable factors[J]. *Bioresource Technology*, 2003, 90(2): 127–132.
- [27] Feng G Z, Zhang Y J, Chen Y L, et al. Effects of nitrogen application on root length and grain yield of rain-fed maize under different soil types[J]. *Agronomy Journal*, 2016, 108(4): 1656–1665.
- [28] Lucas S T, D'Angelo E M, Williams M A. Improving soil structure by promoting fungal abundance with organic soil amendments[J]. *Applied Soil Ecology*, 2014, 75: 13–23.
- [29] Ball B C, Bingham I, Rees R M, et al. The role of crop rotations in determining soil structure and crop growth conditions[J]. *Canadian Journal of Soil Science*, 2005, 85(5): 557–577.
- [30] Li L J, Han X Z, You M Y, et al. Carbon and nitrogen mineralization patterns of two contrasting crop residues in a Mollisol: Effects of residue type and placement in soils[J]. *European Journal of Soil Biology*, 2013, 54: 1–6.