

秸秆还田配伍腐秆剂对小麦生长发育和肥料利用率的影响

马超¹, 周静², 朱远芄¹, 柴如山¹, 汪满照³, 郜红建^{1*}

(1. 安徽农业大学资源与环境学院农田生态保育与污染防控安徽省重点实验室, 合肥 230036;

2. 中国科学院南京土壤研究所, 南京 210008; 3. 霍邱县农业委员会, 霍邱 237400)

摘要: 秸秆促腐还田作为秸秆综合利用的重要方式之一而备受关注, 然而田间条件下秸秆配伍腐秆剂后的作用依然存在争议。通过在淮北平原布设田间试验, 比较不施肥 (CK)、单施化肥 (F)、化肥+秸秆 (SF) 和化肥+秸秆+腐秆剂 (SFD) 对冬小麦生长发育状况、籽粒产量和肥料利用率的影响。结果表明, 与处理 F 相比, 处理 SFD 小麦生长后期的群体茎蘖数、叶面积指数、地上部干重、穗粒数及其对化肥的生理效率显著增加 9.5%、18.6%、13.3%、6.2%、27.1%、85.2% 和 41.5% ($P < 0.05$), 籽粒产量亦有增加趋势 (增幅为 5.1%); 而处理 SFD 与处理 SF 相比, 除成穗数、氮肥吸收利用率和磷钾肥生理效率略有增加外, 其余指标均有不同程度下降, 降幅在 0.3%~26.3% 之间。从而可知, 在淮北平原进行秸秆化肥配施还田能够有效促进当季作物的生长发育, 改善氮肥的生理效率和提高产量, 配伍腐秆剂不会提升秸秆化肥配施还田的促生增效能力。

关键词: 秸秆还田; 腐秆剂; 淮北平原; 冬小麦; 生长发育; 肥料利用率

中图分类号: S512.11; S158

文献标识码: A

文章编号: 1672-352X (2018)03-0532-06

Effects of returning maize straw into field on the growth and nitrogen use efficiency of winter wheat under promoting decay condition

MA Chao¹, ZHOU Jing², ZHU Yuanpeng¹, CHAI Rushan¹, WANG Manzhao³, GAO Hongjian¹

(1. Anhui Province Key Laboratory of Farmland Ecological Conservation and Pollution Prevention, School of Resources and Environment, Anhui Agricultural University, Hefei 230036; 2. Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008; 3. Agriculture Committee of Huoqiu County, Huoqiu 237400)

Abstract: A field experiment was conducted at Huaibei Plain to study the effects of returning maize straw into field under promoting decay condition on the growth, development and chemical fertilizer use efficiency of winter wheat. The experiment included four treatments, i.e. no fertilizer (CK), chemical fertilizer alone (F), fertilizer + maize straw (SF), and fertilizer + maize straw + decomposing microorganisms (SFD). Plant samples of winter wheat were collected at wintering, jointing, heading and maturation stages to analyze the agronomic performance and chemical fertilizer use efficiency. Results showed that comparing with treatment F, treatment SFD significantly increased the tillers (No. of spike), leaf area index, dry matter accumulation, grains per spike and NPK physiology efficiency by 9.5%, 18.6%, 13.3%, 6.2%, 27.1%, 85.2% and 41.5% ($P < 0.05$), respectively. However, these indices decreased in the range of 0.3%-26.3%, except grains per spike, N apparent recovery efficiency, PK physiology efficiency compared to SF treatment. These findings indicated that returning straw into field could increase the growth, development and nitrogen use efficiency of winter wheat, but inoculating decomposing microorganisms failed to strengthen it. Therefore, more attention should be paid to selecting appropriate decomposing microorganisms for accelerating decomposition of crop straw in Huaibei Plain Region.

Key words: returning straw into field; decomposing microorganisms; Huaibei plain; winter wheat; growth and development; fertilizer using efficiency

收稿日期: 2018-01-12

基金项目: 国家自然科学基金 (31700452), 安徽省自然科学基金 (1808085MD97) 和国家重点研发计划 (2016YFD0200107, 2016YFD0300901) 共同资助。

作者简介: 马超, 博士, 讲师。E-mail: chaoma@ahau.edu.cn

* 通信作者: 郜红建, 教授, 博士生导师。E-mail: hjgao@ahau.edu.cn

淮北平原是我国小麦的主产区之一,对保障国家粮食安全至关重要。但由于该区气候多变、年际间变化无规律、灾害性天气频发^[1],加之广泛分布着结构差、调水弱和肥力低的砂姜黑土,从而造成农田多为中低产田^[2-3]。高化肥、低有机肥(如作物秸秆)的农田施肥现状尽管可以维持淮北平原的小麦产量,但却造成土壤质量退化、肥料利用率下降和化肥面源污染等问题加重^[4-5]。此外,没有得到利用的作物秸秆被大量堆弃和焚烧还会引起资源浪费和大气污染^[6]。因此,在淮北平原进行秸秆还田利用研究对该区域农业可持续发展具有重要意义。

农作物秸秆中含有大量的有机质和氮磷钾等作物生长必需的营养元素,可通过微生物的腐殖化作用转化为优质的有机肥^[6-7]。前人研究结果表明:秸秆还田能够有效改善土壤理化性状、提高土壤肥力以及增加作物产量和对化肥的利用率^[8-10]。然而,也有报道认为,秸秆特别是禾本科秸秆还田当年,如果还田条件控制不当,秸秆腐解产物会对作物生长造成不良影响,导致出现平产或减产^[11-12]。例如,田仲和和高善民^[12]通过麦秸不均匀还田的微区模拟试验,发现局部地段秸秆堆积会导致还原物质过多积累,严重影响下茬水稻的出苗和分蘖。近年来,国内外农业科学工作者针对造成秸秆腐解缓慢的秸秆分子结构复杂、碳氮比不平衡和单一微生物降解效果差等问题进行了大量研究,指出在秸秆腐解过程中添加富含能分泌纤维素酶、半纤维素酶和木质素酶的微生物菌剂,能够加快当季还田秸秆腐解进程、缩短腐解时间,使大量秸秆直接还田也不影响下茬作物的生长^[7,13-14]。李庆康等^[15]研究表明:在稻、麦秸秆还田时施用腐秆剂对提高稻、麦产量具有明显效果;马超等^[16-17]研究也得出:秸秆还田时添加腐秆剂可以提高作物产量,增加养分和土壤活性有机碳含量。但同时关于秸秆快腐菌剂在实际田间推广应用效果不显著的研究也时有报道^[18-19]。由此,进一步开展大田试验,验证腐秆剂配施对秸秆还田培肥增效、促生增产的影响很有必要。

鉴于前期秸秆还田配伍腐秆剂的作用研究多集中在作物产量和土壤肥力方面^[13,16-17],关于作物生长发育及肥料利用效率的报道还比较缺乏,而实际上作物生长发育和肥料利用率或对于腐秆剂的响应或更加灵敏。因此,本研究拟通过在淮北平原砂姜黑土区进行田间试验,比较单施化肥、常规秸秆还田和秸秆配伍腐秆剂还田处理间冬小麦生长发育状况和肥料利用效率的差异,明确秸秆配伍腐秆剂还田后的促生、增效作用,为该区域农作物秸秆资源

的合理利用和小麦的增产稳产提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验区位于安徽省固镇县新马桥镇(33°90'N, 117°21'E),地处淮北平原南部,属暖温带半湿润季风气候,根据历史资料记载,该地区最高气温 44.5℃,最低气温-21.9℃,年平均气温 15.9℃,年降雨量在 610~1 500 mm 之间,无霜期在 220 d 左右。耕作制度为小麦-玉米轮作。试验田块位于安徽省新马桥原种场,田块平整,肥力均匀。供试土壤为砂姜黑土,相当于土壤系统分类中的潜育筒育潮湿变性土(Eutric Vertisols),土壤 pH、CEC、有机质、全氮、碱解氮、速效磷和速效钾含量分别为 7.2 cmol·kg⁻¹、19.4 cmol·kg⁻¹、14.0 g·kg⁻¹、0.85 g·kg⁻¹、82.0 mg·kg⁻¹、41.1 mg·kg⁻¹和 118.3 mg·kg⁻¹。

1.2 试验设计

田间试验采用随机区组设计,共包括 5 个处理:①不施肥(CK);②单施化肥(F);③化肥+秸秆(SF);④化肥+秸秆+腐秆剂(SFD)。各处理重复 3 次,小区面积为 60 m²。单施化肥处理的施肥方案参照试验点测土配方施肥的建议,氮磷钾施用量分别为 N 225 kg·hm⁻², P₂O₅ 90 kg·hm⁻², K₂O 90 kg·hm⁻²,其中磷、钾肥做基肥一次性施入,氮肥按照基肥:返青肥:拔节肥=6:2:2 分次施用。秸秆采用秋季(前茬)收获的玉米秸秆(C/N 为 51,其中纤维素、半纤维素和木质素含量分别为 38.7%、21.7%和 19.3%),机械粉碎(长度小于 10 cm)后按全量还田标准称取还于相应处理小区,按 30 kg·hm⁻²撒施腐秆剂后,同其余小区一并进行翻耕操作。田间管理(如灌溉、防治病虫害等)按照当地农民习惯进行。

添加的腐秆剂选用商品有机废物发酵菌曲,该腐秆剂主要成分为:枯草芽孢杆菌(2.03×10⁸·g⁻¹)、米曲霉(0.31×10⁸·g⁻¹)、黑曲霉(0.64×10⁸·g⁻¹)、白地霉(1.21×10⁸·g⁻¹)和酿酒酵母(0.27×10⁸·g⁻¹),能产生大量的纤维素酶、半纤维素酶和木质素酶等物质,对秸秆中的纤维素、半纤维素和木质素等成分具有很好的分解能力。小麦品种选用皖麦 52,播种量为 187.5 kg·hm⁻²,行距 23 cm。

1.3 样品采集和指标测定

冬小麦生长发育状况:出苗后每小区随机选 3 个查苗样区(包括并列的 3 行 1 m 样段),于小麦越冬期(播种后 60 d)、拔节期(播种后 150 d)和抽穗期(播种后 190 d)进行茎蘖数、叶面积(叶面积

=长×宽×0.83)、株高和地上部干物重的观测和记录。

冬小麦产量构成要素和实际产量:小麦成熟后,除继续在上述查苗区进行茎蘖数(成穗数)调查外,同时还调查每穗平均粒数、千粒重和风干籽粒含水率;此外,每小区在查苗区外随机收割 20 m²进行脱粒、风干,而后再结合含水率计算单位公顷小麦产量。

小麦秸秆和籽粒氮素含量:首先从进行考种的样品中取出部分按照籽粒和秸秆进行分离,紧接着将籽粒和秸秆分别烘干,随后进行粉碎过筛(0.25 mm)和用浓 H₂SO₄-HClO₄ 消煮,最后通过凯氏定氮法测定其营养元素含量^[20]。

1.4 数据计算和分析

叶面积指数(LAI)=总叶面积/土地面积。

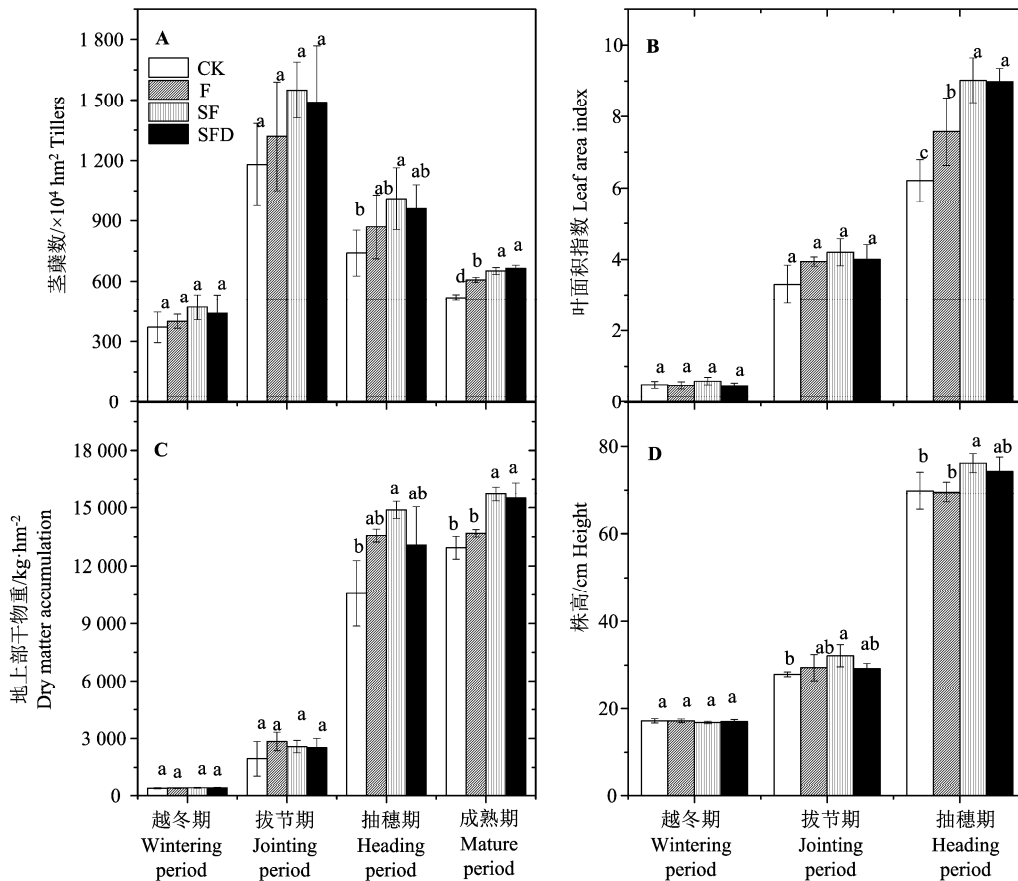
氮磷钾肥料利用率^[21]:吸收利用率(recovery efficiency, RE, %)=(施肥区作物营养元素吸收量-不施肥区作物营养元素吸收量)/施肥量×100;生理效率(physiological efficiency, PE)=(施肥区

经济产量-不施肥区经济产量)/(施肥区作物营养元素吸收量-不施肥区作物营养元素吸收量);农学效率(agricultural efficiency, AE)=(施肥区经济产量-不施肥区经济产量)/施肥量。试验数据采用 Microsoft Excel 2010 整理;采用 SPSS 16.0 的 One-Way ANOVA(单因素方差)和 Duncan test(邓肯检验)分析不同处理对小麦茎蘖数、叶面积、株高等生长生产指标和氮肥利用率的影响;图形制作均由 Origin 9.0 完成。

2 结果与分析

2.1 不同处理对当季冬小麦生长发育的影响

不同处理小麦群体茎蘖数随生育期变化趋势总体一致,呈现先增后减(图 1A)。其中,越冬期和拔节期的群体茎蘖数于各处理间没有明显差异;抽穗期时,除处理 SF 和 CK 之间差异显著外(P<0.05),其余处理间均无明显不同。成熟期不同处理的群体茎蘖数变化规律为:SFD>SF>F>CK,其



不同的小写字母代表不同处理在 P<0.05 水平差异显著。代号含义: CK, 对照; F, 单施化肥; SF, 化肥+秸秆; SFD, 化肥+秸秆+腐秆剂, 下同

Different letters on bars indicate significant differences among treatments at P < 0.05. CK, F, SF and SFD represent no fertilizer, chemical fertilizer alone, chemical fertilizer and straw, chemical fertilizer, straw and straw-decomposing microorganisms. The same below

图 1 不同处理对冬小麦生长发育的影响

Figure 1 Effects of different treatments on growth and development of winter wheat

表 1 不同处理对冬小麦产量构成因素及籽粒产量的影响

Table 1 Effects of different treatments on grain yield and yield components of winter wheat

处理 Treatment	有效穗数/ $\times 10^4 \cdot \text{hm}^{-2}$ No. of effective spikes	穗粒数 Grains per spike	千粒重/ g 1000-grain weight	籽粒产量/ $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ Grain yield
CK	518.7 \pm 14.3 ^c	30.1 \pm 1.1 ^c	46.4 \pm 1.8 ^a	4 066.5 \pm 602.2 ^b
F	606.7 \pm 12.5 ^b	32.4 \pm 2.2 ^b	45.6 \pm 0.8 ^a	5 850.3 \pm 517.8 ^a
SF	651.2 \pm 17.2 ^a	35.1 \pm 0.4 ^a	45.3 \pm 1.6 ^a	6 292.9 \pm 329.5 ^a
SFD	664.7 \pm 15.0 ^a	34.4 \pm 0.5 ^{ab}	44.9 \pm 1.2 ^a	6 148.2 \pm 234.4 ^a

注: 表中数据为平均值 \pm 标准差($n=3$)。同列数据后的不同字母代表不同处理在 $P<0.05$ 水平差异显著。代号含义同图 1。下同。

Note: Each value in the table is means \pm SD of 3 replicates. Different small letters within a column indicate significant differences among treatments at $P < 0.05$. Treatment codes are the same as Figure 1. The same below.

表 2 不同处理对冬小麦氮肥、磷肥和钾肥利用率的影响

Table 2 Effect of different treatments on nitrogen, phosphorus and potassium utilization efficiencies of winter wheat

处理 Treatment	N			P_2O_5			K_2O		
	吸收利 用率/% RE	生理效率 $/\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ PE	农学效率 $/\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ AE	吸收利 用率/% RE	生理效率 $/\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ PE	农学效率 $/\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ AE	吸收利 用率/% RE	生理效率 $/\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ PE	农学效率 $/\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ AE
	F	37.2 \pm 14.8 ^a	22.1 \pm 3.1 ^c	7.9 \pm 2.3 ^a	13.4 \pm 3.3 ^a	179.0 \pm 51.4 ^b	19.8 \pm 5.8 ^a	45.9 \pm 6.8 ^a	51.1 \pm 9.9 ^b
SF	32.3 \pm 4.8 ^a	30.6 \pm 1.1 ^a	9.9 \pm 1.5 ^a	11.4 \pm 5.4 ^a	240.8 \pm 72.1 ^{ab}	24.7 \pm 3.7 ^a	38.2 \pm 2.8 ^a	66.7 \pm 7.5 ^{ab}	24.7 \pm 3.7 ^a
SFD	33.1 \pm 2.3 ^a	28.1 \pm 4.9 ^{ab}	9.3 \pm 1.0 ^a	8.4 \pm 4.2 ^a	331.5 \pm 73.4 ^a	23.1 \pm 2.6 ^a	33.5 \pm 8.0 ^a	72.3 \pm 13.1 ^a	23.1 \pm 2.6 ^a

中秸秆还田处理 SF 和 SFD 的每公顷茎蘖数比处理 F 分别显著增加了 7.3% 和 9.6% ($P<0.05$)。

小麦生育前期各处理叶面积指数差异较小, 随着生育期递进各处理叶面积指数快速增加, 同时处理间的差异也逐渐变大(图 1B)。至抽穗期, 不同处理叶面积指数的变化趋势为: SF>SFD>F>CK, 处理 SFD 比处理 F 提升了 15.2% ($P<0.05$), 但与处理 SF 相比却下降了 4.8%。

由图 1C 可知, 各处理在分蘖期和拔节期的地上部干物重较小, 且处理间均没有明显差异; 抽穗期小麦地上部干物重迅速增加, 秸秆还田处理 SFD 和对照处理 CK 间差异达统计学显著水平 ($P<0.05$); 成熟期与抽穗期相比, 小麦植株生物量除单施化肥处理 F 外, 其余均有不同程度的增加, 秸秆还田处理优势更加明显, SF、SFD 处理较 F 处理分别显著提高 14.9% 和 13.3% ($P<0.05$)。

小麦株高对不同处理的响应与前述指标有所不同: 从拔节期开始, 不同处理间就显现出明显差异 ($P<0.05$); 抽穗期时, 处理 SF 和处理 F 间的差异也达到显著水平 ($P<0.05$), 处理 SFD 和 F 间的差异有所增加, 但尚未达到统计学显著水平(图 1D)。

2.2 不同处理对当季冬小麦产量构成因素和籽粒产量的影响

小麦产量构成因素中, 有效穗数对不同施肥措施的影响最强, 穗粒数的次之, 千粒重的最小(表

1)。小麦有效穗数的变化规律与前文小麦成熟期群体茎蘖的一致, 不再赘述; 不同处理小麦穗粒数变化为: SF>SFD>F>CK, 其中处理 SF 较处理 F 显著增加 8.3% ($P<0.05$), SFD 处理与 SF 和 F 处理相比, 分别降低 2.0% 和增加 6.2%; 不同处理间小麦千粒重均无明显差异。一季种植后, 不同处理小麦的籽粒产量为: SF>SFD>F>CK, 处理 SFD 和 SF 与处理 F 相比分别增产 7.6% 和 5.1%, 处理 SFD 较处理 SF 减少 2.3%。

2.3 不同处理对当季冬小麦肥料利用率的影响

不同处理对小麦氮肥、磷肥和钾肥利用率的影响如表 2 所示。小麦对氮磷钾肥的吸收利用率均会因秸秆还田而有所下降, 降幅为 11.0%~37.3%, 但小麦对氮磷钾肥的生理效率和农学效率会在秸秆还田处理后得到提升。处理 SFD 与处理 F 相比, 氮磷钾的生理效率分别增加 27.1% ($P<0.05$), 85.2% 和 41.5%, 氮磷钾的农学效率分别增加 17.7%, 16.7% 和 16.7%; 而与 SF 相比, 除对磷、钾肥的生理效率有所提升外 (37.6% 和 8.3%), 其余均有不同程度的下降 (6.0%~8.1%)。

3 讨论

本研究通过安徽淮北平原区的田间试验, 重点比较了单施化肥、秸秆常规和配施腐秆剂还田对于

冬小麦生长发育和肥料利用状况影响的差异,明确了腐秆剂添加对于秸秆还田当年促生和增效作用的影响,丰富了秸秆配施腐秆剂还田研究的内容。结果显示:秸秆还田配伍腐秆剂与单施化肥相比,尽管产量没有显著提升,但却明显促进了小麦的生长发育(如茎蘖数、叶面积、干重和穗粒数)和氮磷钾肥的生理效率;而与常规秸秆还田相比,除成穗数、氮肥吸收利用率和磷钾肥生理效率略有增加外,其余指标均有所下降。

通过研究发现,与单施化肥处理相比,秸秆配伍腐秆剂还田在小麦生长后期可以显著提高小麦的群体茎蘖数、叶面积指数和地上部干物重(图1)。这与李庆康等^[15]研究结果一致,可能主要是因为秸秆还田后腐解转化形成的有机肥能够促进土壤内部物质和能量的转化,进而对作物的生长发育产生促进作用(如提高小麦的基本苗数)。本研究还发现秸秆配伍腐秆剂还田与单施化肥相比,能够对小麦产量产生积极影响(表1)。通过小麦产量的构成要素分析,笔者发现前者主要是借助显著增加小麦有效穗数和穗粒数来实现对产量的影响(表1)。这或与秸秆还田后小麦体内叶绿素积累增加,旗叶的光合作用与蒸腾作用加强,物质合成和转化得以促进有关^[22-23]。此外,与单施化肥处理相比,秸秆配施腐秆剂还田措施还能显著提高作物的肥料生理效率(表2)。这或归因于以下两方面:一是微生物在降解还田秸秆时需利用土壤中的无机氮,且难以在当季返还给作物,因而使得植物可吸收利用的氮素减少^[24]。二是秸秆还田引起的叶面积指数增加会提高小麦灌浆期的光合作用,促进糖和蛋白等物质的合成,提高氮素的转化效率^[25]。

本研究中配施腐秆剂的秸秆还田与常规秸秆还田相比,在冬小麦的生长发育、产量和肥料利用率等方面不但没有促进作用,而且还出现抑制趋势。这说明在实际大田生产中,腐秆剂的效果和室内模拟的大不相同,对于作物生长发育和产量等的影响很不稳定。由前人研究可知,腐秆剂效果不明显可能有以下几个原因:1)供试土壤本身的肥力水平较高,能够充分供给试验所用播量小麦的养分需求,会掩盖腐秆剂促腐提升的那部分肥力的作用;2)微生物菌剂对生存环境中的pH、温度和通气状况等均有严格的要求,倘若腐秆剂中功能微生物不能适应供试土壤的环境,将难以存活或发挥作用^[26];3)参与秸秆降解的微生物种群除受外源接种的影响外,还会受到秸秆施用时的碳氮比的影响^[27-28],恰当的碳氮比或会降低接种外源菌引起的秸秆降解加速

作用比重;4)腐秆菌成功进入土壤后不单会影响还田秸秆的降解,还可能对土著微生物群落产生影响,而秸秆的降解是需要外源菌和土著菌共同作用实现的^[29-30],故当外源腐秆菌接种后削弱土著微生物群落的降解功能时,腐秆剂配施后不仅不会促进秸秆腐解,甚至还会抑制降解。由于供试土壤养分含量除有效磷外,其余的均处于较低水平(见1.材料方法部分供试土壤性质),因此腐秆剂配施引起的那部分肥效不可能被忽略。至于前文所述的砂姜黑土的不良性状和测土配方施肥建议的氮肥用量(碳氮比)是否会分别通过影响腐秆菌存活和降解微生物群落功效而造成本研究的结果,则因没有进行接种菌株存活率和还田秸秆腐解率调查而难于判断。不过,从秸秆配伍腐秆剂还田后小麦生长发育和肥料利用率较常规秸秆还田有所下降的结果来看,供试土壤性状和初始碳氮比也不会是主要原因。因此,本研究的结果最可能是外源腐秆菌进入土壤后与土著降解秸秆的微生物发生竞争而导致群落的总降解能力下降。

4 结论

常规秸秆还田能够显著促进淮北平原冬小麦生长发育、提高穗粒数和氮磷钾的生理效率;配施腐秆剂后,秸秆还田的促生和增效作用并没有出现进一步提升;外源腐秆剂的类型或是决定秸秆配伍腐秆剂还田措施效用的关键因素。因此,今后有必要在淮北平原进一步开展腐秆剂类型对作物生长生产和肥料利用率影响的研究,从而集成切实有效的秸秆促腐还田措施。

参考文献:

- [1] 祁宦. 近 50 年安徽淮北平原降水变化特征分析[J]. 中国农业气象, 2009, 30(2): 138-142.
- [2] 詹其厚, 张效朴. 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, 29(1): 53-59.
- [3] 曾希柏, 张佳宝, 魏朝富, 等. 中国低产田状况及改良策略[J]. 土壤学报, 2014, 51(4): 675-682.
- [4] ZHU Z L, CHEN D L. Nitrogen fertilizer use in China: Contributions to food production, impacts on the environment and best management strategies[J]. Nutr Cycl Agroecosys, 2002, 63(2/3): 117-127.
- [5] 雷之萌, 韩上, 武际, 等. 淮北砂姜黑土区小麦氮肥适宜用量研究[J]. 现代农业科技, 2016(10): 194-195.
- [6] HEARD J, CAVERS C, ADRIAN G. Up in smoke- nutrient loss with straw burning[J]. Better Crops, 2006, 90(3): 10-11.
- [7] 李文学, 李力, 李俊, 等. 小麦秸秆高效腐解菌复合系 WSS-1 的选育及其菌群分析[J]. 生态学报, 2010, 30(3): 759-764.

- [8] 王磊, 朱林, 陶少强, 等. 麦玉秸秆还田对土壤养分动态变化的影响[J]. 安徽农业大学学报, 2010, 37(4): 791-794.
- [9] 郑学博, 张祥志, 崔键, 等. 秸秆全量还田条件下配施化肥对沿淮砂姜黑土培肥及玉米产量的影响[J]. 土壤, 2012, 44(6): 972-976.
- [10] 闫翠萍, 裴雪霞, 王姣爱, 等. 秸秆还田与施氮对冬小麦生长发育及水肥利用率的影响[J]. 中国生态农业学报, 2011, 19(2): 271-275.
- [11] 胡晓军, 郑皓皓, 贾敬业, 等. 麦秸还田耕层酚酸的时间变化及其对夏玉米幼苗生长和产量的影响[J]. 生态学杂志, 2001, 20(3): 9-11.
- [12] 田仲和, 高善民. 麦秸还田不均匀对直播水稻生长的影响及对策[J]. 土壤肥料, 2002 (1): 26-29.
- [13] LIEBICH J, SCHLOTTER M, SCHÄFFER A, et al. Degradation and humification of maize straw in soil microcosms inoculated with simple and complex microbial communities[J]. Eur J Soil Sci, 2007, 58(1): 141-151.
- [14] 陈帅, 刘峙嵘, 曾凯. 腐秆剂对水稻秸秆腐解性能的影响[J]. 环境工程学报, 2016, 10(2): 839-844.
- [15] 李庆康, 王振中, 顾志权, 等. 秸秆腐解剂在秸秆还田中的效果研究初报[J]. 生态环境学报, 2001, 10(2): 124-127.
- [16] 马超, 周静, 郑学博, 等. 秸秆促腐还田对土壤养分和小麦产量的影响[J]. 土壤, 2012, 44(1): 30-35.
- [17] 马超, 周静, 刘满强, 等. 秸秆促腐还田对土壤养分及活性有机碳的影响[J]. 土壤学报, 2013, 50(5): 915-921.
- [18] ABRO S A, 把余玲, 田霄鸿, 等. 温度与微生物制剂对小麦秸秆腐解及土壤碳氮的影响 [J]. 西北农林科技大学学报 (自然科学版), 2012, 40(1): 115-122.
- [19] SU P, BROOKES P C, HE Y, et al. An evaluation of a microbial inoculum in promoting organic C decomposition in a paddy soil following straw incorporation[J]. J Soil Sediment, 2016, 16(6): 1776-1786.
- [20] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- [21] 郑学博, 崔键, 马超, 等. 施肥措施对砂姜黑土小麦生长性状、营养元素累积及产量的影响[J]. 中国生态农业学报, 2012, 20(5): 550-555.
- [22] 李素娟, 陈继康, 陈阜, 等. 华北平原免耕冬小麦生长发育特征研究[J]. 作物学报, 2008, 34(2): 290-296.
- [23] 刘义国, 林琪, 王月福, 等. 秸秆还田与氮肥耦合对冬小麦光合特性及产量形成的影响[J]. 中国生态农业学报, 2007, 15(1): 42-44.
- [24] 张媛媛, 李建林, 王春宏, 等. 氮素和生物腐解剂调控下稻草还田对水稻氮素积累及产量的影响[J]. 土壤通报, 2012, 43(2): 435-438.
- [25] 林非非, 李金才, 魏凤珍, 等. 秸秆还田条件下播种水和氮肥底追比对冬小麦旗叶荧光特性和产量的影响[J]. 安徽农业大学学报, 2014, 41(5): 731-737.
- [26] VAN VEEN J A, VAN OVERBEEK L S, VAN ELSAS J D. Fate and activity of microorganisms introduced into soil[J]. Microbiol Mol Biol R, 1997, 61(2): 121-135.
- [27] 张蓓. 碳氮比及腐熟菌剂对玉米秸秆发酵的影响[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2012.
- [28] ZHOU Z H, WANG C K, ZHENG M H, et al. Patterns and mechanisms of responses by soil microbial communities to nitrogen addition[J]. Soil Biol Biochem, 2017, 115: 433-441.
- [29] XIONG W, GUO S, JOUSSET A, et al. Bio-fertilizer application induces soil suppressiveness against *Fusarium* wilt disease by reshaping the soil microbiome[J]. Soil Biol Biochem, 2017, 114: 238-247.
- [30] 史央. 红壤中秸秆降解的微生物演替及应用研究[D]. 南京: 南京师范大学, 2003.