

减氮配施有机物质对麦田土壤性质和小麦产量的影响

李 皓¹, 甄怡铭¹, 张子旋¹, 王艳群¹, 付 帅¹,

刘晓明¹, 甄文超², 门明新¹, 彭正萍^{1,2}

(1.河北农业大学资源与环境科学学院,河北省农田生态环境重点实验室,河北 保定 071001;

2.华北作物改良与调控国家重点实验室,河北 保定 071001)

摘要: 探究氮肥减量配施有机物质的情况下对氮素利用状况及土壤肥力和小麦产量的影响,为我国华北平原区小麦生产中提高氮肥利用效率、实现节肥增效提供理论基础。通过田间试验,设置5个处理:不施氮肥(CK)、农民习惯施氮肥(FN)、减氮20%(80% FN)、减氮20%+生物有机肥(80% FN+OM)、减氮20%+生物炭(80% FN+BC),研究小麦生长关键期土壤容重、有机质、 NO_3^- -N和土壤微生物多样性的变化,测定小麦产量并计算氮素利用效率。结果表明,土壤容重受施入有机物质影响显著,成熟期0—20, 20—40 cm的80% FN+OM、80% FN+BC的土壤容重较80% FN分别下降3.83%~4.58%和2.96%~5.07%。成熟期0—40 cm的土壤有机质均以80% FN+OM最高,较其他施氮肥处理提高2.13%~18.81%。土壤 NO_3^- -N受施氮肥影响显著,挑旗期80% FN+OM和80% FN+BC处理的0—40 cm土壤 NO_3^- -N较高;灌浆期80% FN+BC处理的0—80 cm土层 NO_3^- -N均较高;而成熟期FN处理的土壤 NO_3^- -N残留较高。配施有机物质能提高土壤微生物多样性,增加细菌 OUT 数量,平衡各菌门间的相对丰度,使土壤微生态环境更加稳定。80% FN+OM的小麦产量和氮肥农学效率分别较其他施氮处理提高1.09%~7.34%和2.78%~41.49%。因此,减氮合理配施生物有机肥和生物炭能够改善土壤理化性质、提高土壤微生物多样性,增加小麦产量,且生物有机肥效果优于生物炭,说明科学施用氮肥搭配有机物质可以促进土壤的可持续利用。

关键词: 减氮; 有机物质; 小麦; 产量; 土壤性质

中图分类号: S153; S512

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2022)02-0166-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbxb.2022.02.022

Effects of Nitrogen Reduction Combined with Organic Matter on Soil Properties and Wheat Yield

LI Hao¹, ZHEN Yiming¹, ZHANG Zixuan¹, WANG Yanqun¹, FU Shuai¹,

LIU Xiaoming¹, ZHEN Wenchao², MEN Mingxin¹, PENG Zhengping^{1,2}

(1.College of Resources and Environmental Sciences, Key Laboratory of

Farmland Eco-Environment of Hebei, Hebei Agricultural University, Baoding, Hebei 071001;

2.State Key Laboratory of North China Crop Improvement and Regulation, Baoding, Hebei 071001)

Abstract: The nitrogen (N) use status and soil fertility and wheat yield were studied under the condition of reduced urea N input and combined with organic matter, to provide a theoretical basis for winter wheat cultivation in the North China Plain, in terms of improving the N use and fertilizer efficiencies. Field trials were carried out with five treatments: no N application (CK), farmer N application (FN), 20% reduction N application (80% FN), 20% reduction N application with bio-organic manure (80% FN+OM), and 20% reduction N application with biochar (80% FN+BC). In the study, the responses of soil bulk density, organic matter, NO_3^- -N, microbial diversity, yield, and N utilization of wheat were measured under winter wheat-maize rotation systematically. The results showed that soil capacity was significantly influenced by the application of organic matter. Compared with 80% FN, the soil bulk density in 80% FN+OM and 80% FN+BC were decreased by 3.83%~4.58% and 2.96%~5.07% in 0—20 and 20—40 cm at maturity

收稿日期: 2021-09-18

资助项目: 河北省重点研发计划项目(19226425D); 河北省人才工程培养项目(A201910003)

第一作者: 李皓(1995—), 男, 硕士研究生, 主要从事土壤生态研究。E-mail: 15131550070@163.com

通信作者: 门明新(1974—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事土壤生态环境及改良研究。E-mail: menmingxin@sina.com

彭正萍(1974—), 女, 教授, 博士生导师, 主要从事植物营养与生态环境研究。E-mail: pengzhengping@sina.com

stage, respectively. Soil organic matter content of 80% FN+OM was higher than other treatments, and greater by 2.13%~18.81% with 80% FN+OM than N fertilizer treatments in 0—40 cm at maturity stage. Soil NO_3^- —N was significantly affected by the application of N fertilizer. Soil NO_3^- —N was higher in 80% FN+OM and 80% FN+BC than other treatments in 0—40 cm at flag raising stage. Soil NO_3^- —N content with 80% FN+BC was higher than other treatments in 0—80 cm at grouting stage. The soil NO_3^- —N residues of FN treatment was higher than other treatments at maturity. Combined application of organic matter could improve soil microbial diversity, increase the number of bacteria OTU, balance the relative abundance of bacteria, and stabilize the soil micro ecological environment. The wheat yield and N agronomic efficiency with 80% FN+OM were 1.09%~7.34% and 2.78%~41.49% higher than other N application treatments, respectively. In the perspective of soil physical and chemical properties, N reduction combined with bio-organic manure rather than with biochar could promote soil quality through increasing soil physical and chemical properties, soil microbial diversity, and wheat production. It is recommended that scientific application of N fertilizer combined with organic matter could improve the sustainable utilization of soil.

Keywords: nitrogen reduction; organic matter; wheat; yield; soil properties

氮肥是作物生长所需氮素的重要来源,合理的氮肥施用是作物获得较高目标产量的关键^[1]。过量施用氮肥不仅造成浪费,也造成农业面源污染。农业污染源是总氮、总磷的主要来源,其排放量分别占排放总量的 57.2%和 67.4%^[2]。华北平原作为我国重要的农业生产基地之一,小麦播种面积占全国 51%,却提供了超过 58%的小麦产量^[3]。在实际生产中过度施用化肥虽然使个别地方作物产量增加,但增产潜力仍未充分发挥,氮肥投入增加、氮盈余较高、氮素利用效率低,养分投入不平衡,土壤性质遭受破坏等问题尤为突出^[4]。因此,对华北平原区进行科学合理氮肥施用方式的探索具有重要意义。

代新俊等^[5]研究发现,硝态氮肥和酰胺态氮肥的作物产量间没有显著差异,但酰胺态氮的氮素吸收效率和氮素生产效率较高。铵态氮肥处理的小麦产量和品质最差,酰胺态氮肥有利于改善籽粒蛋白质及面筋含量。追氮 75~135 kg/hm²时,随施氮量增加,强筋和中筋小麦产量及蛋白质产量均显著提高,各品种籽粒蛋白质及其组分含量、湿面筋、吸水率、面团形成时间和稳定时间均显著提高^[6]。杨明晓等^[7]报道,孕穗期追氮较其他时期(抽穗期、开花期)追氮可提高小麦籽粒产量、加工品质及地上部氮素吸收,同时优化籽粒蛋白质组成。有资料^[8]报道,作物产量随施氮量增加呈先增后降趋势,作物当季氮肥利用率随施氮量增加而降低。刘瑞等^[9]研究指出,随氮肥用量提高,土壤剖面 NO_3^- —N 累积量明显增加,其向土壤下层淋溶也趋于严重;当施氮量为 180~240 kg/hm²时,部分试验点的土壤氮素出现盈余;施氮量为 270~360 kg/hm²时所有试验点土壤氮素均明显盈余。对于氮肥不同施用方式的研究已有报道,袁浩等^[10]研究发现,在轻壤质土壤上推荐氮肥基追比 4:6 小麦

产量、水分利用和氮肥生产效率均高于其他氮肥基追比处理;曹宏磊等^[11]研究发现,氮肥减量 25%和添加生物炭在潮土和砂浆黑土上均在保证夏玉米产量的同时显著减少 NO_3^- —N 淋溶。

目前华北平原麦区关于氮肥科学合理施用的研究主要集中在无机氮肥品种、氮肥施用时期、氮肥施用方式和氮肥施用量对麦田土壤理化性质的研究^[12],关于有机物质与氮肥合理配施在不降低作物产量基础上还能改善土壤理化和生物学性质的研究尚少。因此,本文针对华北平原区施氮量大、氮肥利用率低、施氮模式单一等问题,研究在农民习惯施氮肥基础上减氮配施生物有机肥、生物炭等有机物质对生长期间土壤容重、有机质、 NO_3^- —N、土壤微生物多样性、小麦产量和氮素利用的影响,研究结果为华北地区小麦种植中合理施用氮肥、稳步提升小麦产量、培育土壤、提升土壤可持续利用能力等提供重要科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

本试验于 2019 年 10 月至翌年 6 月在河北省邢台市宁晋县贾家口镇白木村进行。研究地属温带大陆性气候,年平均气温 12.8℃,无霜期 198 天,年均日照时间 2 538.1 h,年均降水量 449.1 mm。供试土壤属轻壤质潮褐土,土壤基础理化性状见表 1。供试小麦为“济麦 22”,供试肥料为控释尿素(44%N)、过磷酸钙(16% P_2O_5)、磷酸二铵(15%N、42% P_2O_5)、氯化钾(60% K_2O)。生物有机肥(有益菌 ≥ 0.2 亿个/g,有机质 $\geq 40\%$)、生物炭(果木枝条炭化厌氧条件下 600℃高温热解,全碳含量 60.2%,全氮含量 6.8 g/kg,全磷含量 0.93 g/kg,全钾含量 10.4 g/kg)。

表 1 供试土壤基础理化性状

土层 深度/cm	pH	容重/ (g·cm ⁻³)	有机质/ (g·kg ⁻¹)	全氮/ (g·kg ⁻¹)	有效磷/ (mg·kg ⁻¹)	速效钾/ (mg·kg ⁻¹)
0—20	8.45	1.57	20.80	1.14	13.49	143.45
20—40	8.34	1.45	10.78	0.82	1.33	86.45

1.2 试验设计

试验设 5 个处理,分别为不施氮肥(CK)、农民习惯施氮肥(FN)、减氮 20%(80%FN)、减氮 20%+生物有机肥(80%FN+OM)、减氮 20%+生物炭(80%FN+BC)。肥料用量:FN 为 N 300 kg/hm²,其他施氮肥处理的纯 N 用量为 FN 减氮 20%(240 kg/hm²),各处理均施用相同数量的 P₂O₅ 135 kg/hm²和 K₂O 105 kg/hm²,80%FN+OM 的生物有机肥用量为 450 kg/hm²,80%FN+BC 的生物炭用量为

3 000 kg/hm²;各施氮肥处理的氮肥基追比为 4:6。各处理 40%氮肥和全部磷、钾肥、有机肥和生物炭按照试验方案设计用量撒施地表,使用旋耕机耕翻土壤深度为 20 cm 左右,剩余 60%氮肥于拔节期追施。具体各处理施肥情况见表 2。每个处理重复 3 次,随机排列,共 15 个小区,面积为 48 m²(6 m×8 m)。小麦于 2019 年 10 月 11 日采用 15 cm 等行距播种,播种量 225 kg/hm²,其他管理措施同农户常规管理,2020 年 6 月 5 日收获。

表 2 试验处理及其施肥情况

处理	处理编号	施肥量/(kg·hm ⁻²)						
		纯氮 总量	基施 纯氮	追施 纯氮	磷肥 (P ₂ O ₅)	钾肥 (K ₂ O)	生物 有机肥	生物炭
不施氮肥	CK	0	0	0	135	105	0	0
农民习惯施氮肥	FN	300	120	180	135	105	0	0
减氮 20%	80%FN	240	96	144	135	105	0	0
减氮 20%+生物有机肥	80%FN+OM	240	96	144	135	105	450	0
减氮 20%+生物炭	80%FN+BC	240	96	144	135	105	0	3000

1.3 测定项目与方法

1.3.1 土壤样品采集与测定 分别在小麦生长的挑旗、灌浆(花后 15 天)和成熟期采集土样,使用环刀法测定 0—20,20—40 cm 土壤容重。取 0—100 cm 土样,每 20 cm 一层,鲜土采用 1 mol/L 的 KCl 溶液浸提,用 SmartChem 200 全自动化学分析仪测定 NO₃⁻-N 含量。取 0—40 cm 土样风干后过 1 mm 筛,使用外加热重铬酸钾容量法测定土壤有机质。灌浆期采集 0—20 cm 新鲜土壤,委托北京百迈客生物科技有限公司进行微生物多样性分析,基于 IlluminaMiseq 测序平台,采用双末端测序法(Paired-End)对细菌的 16S rDNA 基因的 V3—V4 区进行扩增及测序。

1.3.2 产量测定和氮肥农学效率计算 在小麦成熟期,每处理选取 3 组,每组割取 2 m×6 行小麦,将其全部脱粒,测定籽粒重及其含水量,按面积折算为含水量 12.5%的小麦籽粒产量。

氮肥农学效率(kg/kg)=(施氮区小麦产量—无氮区小麦产量)/氮肥施用量(kg/hm²)

1.4 数据处理

数据处理与分析用 Excel 2010 软件进行数据计算和相关表格绘制,SPSS 21.0 软件进行相关统计分析,Origin 9.0 软件进行绘图。

2 结果与分析

2.1 减氮配施有机物质对土壤容重的影响

从图 1 可以看出,随着小麦生育期的推进,各处

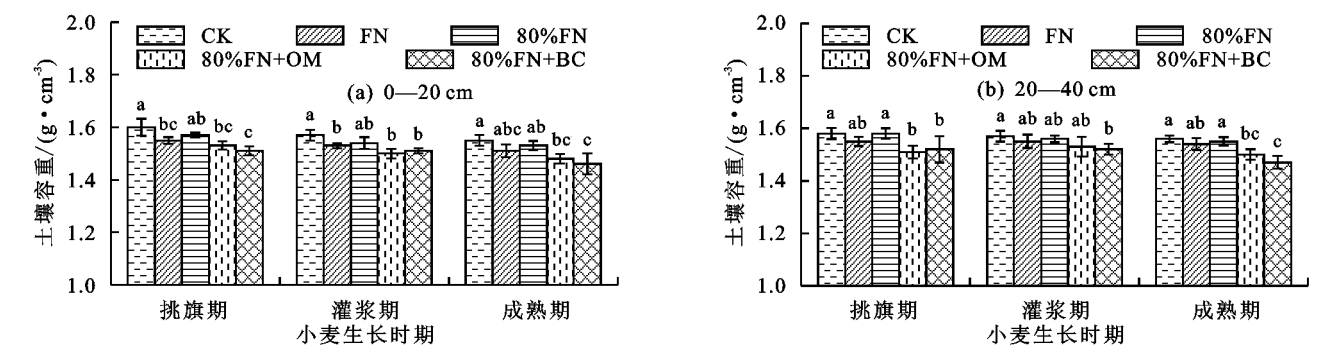
理土壤容重逐渐降低。0—20 cm,挑旗期各施氮处理中,80%FN 的土壤容重最高,较其他处理提升 1.72%~4.43%;灌浆期 80%FN+OM 的土壤容重下降幅度最大,分别较 FN 和 80%FN 下降 1.49%和 2.64%;成熟期 80%FN+BC 的容重最低,为 1.46 g/cm³,较其他施氮处理下降 0.02~0.07 g/cm³,80%FN+OM、80%FN+BC 的土壤容重较 80%FN 下降 3.83%~4.58%。20—40 cm 土层,挑旗期 80%FN 土壤容重显著高于 80%FN+OM 和 80%FN+BC 4.19%和 3.99%,但与 FN 差异不显著;灌浆期各施氮处理土壤容重差异不显著;成熟期 80%FN+OM 和 80%FN+BC 的土壤容重与 FN 相比分别下降2.39%和 4.66%,与 80%FN 相比分别下降 2.96%和 5.34%。表明减氮配施有机物料能够在降低氮肥用量的同时降低土壤容重,有利于改善土壤结构,增加土壤内空气和水分的流通,同时在小麦关键生长时期,土壤容重 0—20 cm 均低于 20—40 cm,这也有利于小麦前期的生长发育和后期土壤养分供应。

2.2 减氮配施有机物质对土壤有机质含量的影响

土壤有机质是土壤肥力的重要指标之一,由图 2 可知,在小麦关键生长时期,各施氮处理的土壤有机质含量均高于 CK。挑旗期 0—20 cm,80%FN+OM 和 80%FN+BC 土壤有机质显著提高,较 80%FN 分别提升 13.63%和 10.54%,较 FN 分别提升 4.39%和 7.31%;20—40 cm,80%FN+OM 的土壤有机质含量最高为

15.58 g/kg,较其他施氮处理提升 14.83%~28.42%;灌浆期各处理间土壤有机质变化与挑旗期相似;成熟期 0—20 cm,土壤有机质含量 80%FN+OM>80%FN+BC>FN>80%FN>CK,80%FN+OM 的土壤有机质含量较其他施氮处理提升 2.13%~13.56%,与 FN 和 80%FN 间差异显著;20—40 cm,与 FN 相比,80%FN 土壤

有机质含量下降 7.96%,而 80%FN+OM 和 80%FN+BC 分别提升 9.35%和 1.68%,80%FN+OM 处理较其他施氮处理提升 7.54%~18.81%。表明减少氮肥施用同时配施有机物质能够提升土壤有机质含量,但生物有机肥提升效果更明显。在全生育期内,80%FN 的土壤有机质显著低于 FN。



注:图中不同字母表示同一生长期不同处理间差异显著($P<0.05$)。下同。

图1 减氮配施有机物质对小麦生长关键时期不同土层容重的影响

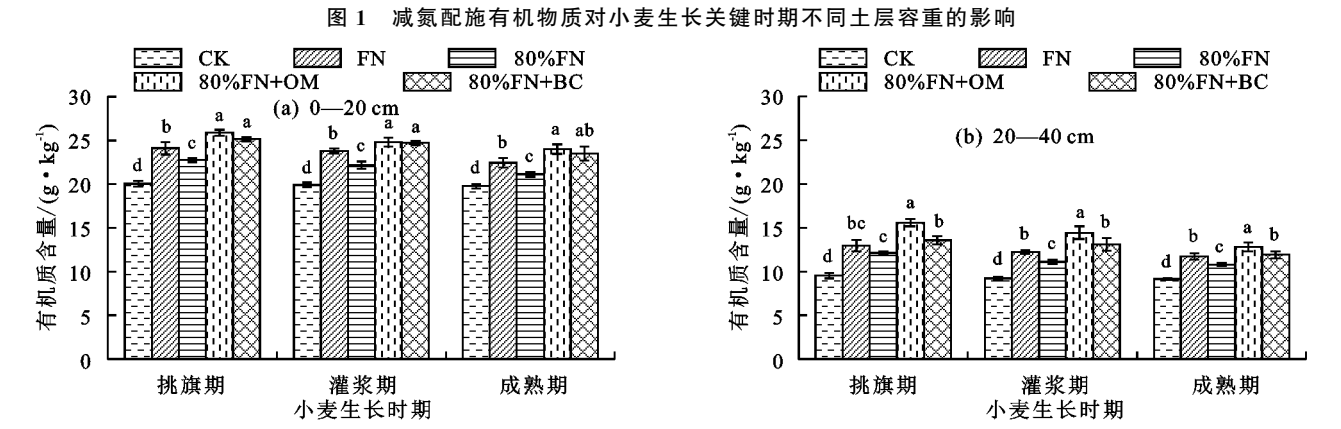


图2 减氮配施有机物质对小麦生长关键时期不同土层有机质含量的影响

2.3 减氮配施有机物质对土壤 NO₃⁻-N 含量的影响

从图3可以看出,施用氮肥可有效增加土壤无机氮含量。挑旗期除 FN 外,其他施肥处理的土壤 NO₃⁻-N 含量均先增再减,只有 FN 处理在 0—80 cm 内土壤 NO₃⁻-N 不断增加,说明该处理氮素由表层向下淋失。0—40 cm 的 80%FN+OM 和 80%FN+BC 处理土壤 NO₃⁻-N 较高,分别较 80%FN 处理在 0—20, 20—40 cm 显著提升 52.70%~59.68%和 40.10%~

42.39%。灌浆期 0—80 cm 的土壤 NO₃⁻-N 均以 80%FN+OM 处理较高,FN 的土壤 NO₃⁻-N 明显降低 1.99~18.37 mg/kg,表明 80%FN+BC 处理显著提高土壤对 NO₃⁻-N 的固持。成熟期各处理相比于灌浆期土壤 NO₃⁻-N 含量降低,但 FN 各土层 NO₃⁻-N 含量仍高于其他处理,尤其在 20—40 cm 较其他施氮肥处理高出 7.88~14.13 mg/kg。表明在小麦成熟后,FN 处理的土壤 NO₃⁻-N 残留仍较多。

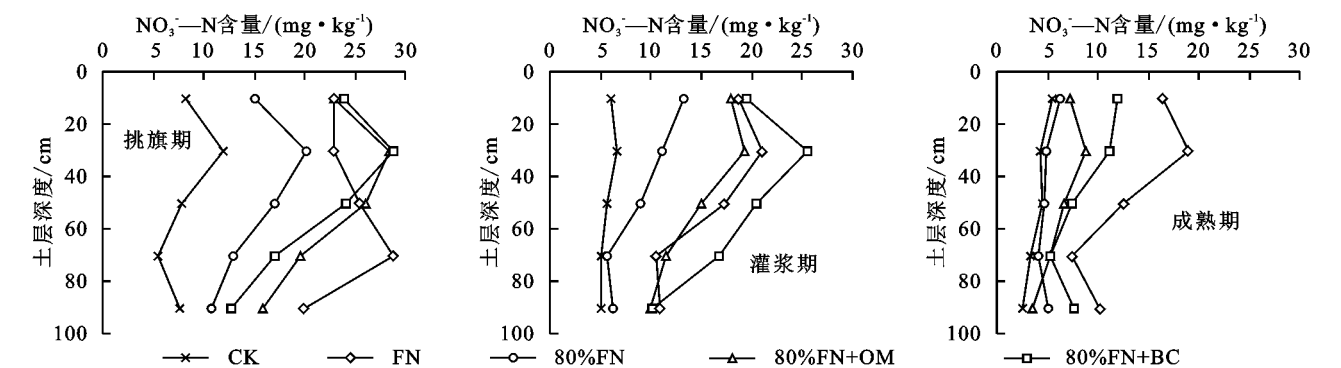


图3 减氮配施有机物质对土壤 NO₃⁻-N 含量动态变化的影响

2.4 减氮配施有机物质对土壤微生物多样性的影响

从表3可以看出,FN、80%FN、80%FN+OM、

80%FN+BC 的 Alpha 分析覆盖率均高于 99%,80%FN 的 OUT 数量最低。以 Chao1 和 ACE 指数

衡量物种丰度,Shannon 和 Simpson 指数衡量物种多样性。对各施氮肥处理进行细菌 Alpha 多样性统计分析,4 个指标均以 80%FN 最低。Chao1 指数和 Ace 指数, FN 显著高于 80%FN,但与 80%FN+OM、80%FN+BC 间差异不显著;80%FN+OM、

80%FN+BC 较 80%FN 分别增加 1.27%~2.04%和 1.46%~2.33%。80%FN+OM、80%FN+BC 的 Shannon 和 Simpson 指数均显著大于 80%FN 处理,表明配施生物有机肥和生物炭能提升土壤微生物丰度和多样性。

表 3 土壤细菌群落 Alpha 多样性指数

处理	OUT 数量	Chao1 指数	ACE 指数	Simpson 指数	Shannon 指数	覆盖率/%
FN	1542±36a	1582.25±12.18a	1577.75±13.26a	0.9970±0.0003a	9.40±0.08a	99.68
80%FN	1469±32b	1543.61±15.85b	1533.34±18.22b	0.9947±0.0010b	8.88±0.24b	99.65
80%FN+OM	1547±21a	1575.08±22.29ab	1569.06±18.40ab	0.9969±0.0002a	9.38±0.06a	99.81
80%FN+BC	1539±31a	1563.22±22.75ab	1555.70±25.74ab	0.9965±0.0011a	9.32±0.16a	99.88

注:表中数据为平均值±标准差;同列数字后不同字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。下同。

由图 4 可知,各处理土壤的优势菌门种类均相同,其中变形菌门(Proteobacteria)所占比例最大,为 33%以上,且处理间差异较小。其余依次为酸杆菌门(Acidobacteria)、放线菌门(Actinobacteria)、芽单胞菌门(Gemmatimonadetes)、拟杆菌门(Bacteroidetes)、绿弯菌门(Chloroflexi)、浮霉菌门(Planctomycetes)、疣微菌门(Verrucomicrobia)等。土壤优势菌门种类没有因施肥方式的改变而发生改变,但各菌群的丰度受到明显影响,80%FN 处理的土壤微生物均匀度较差,超过 80%的微生物由变形菌门、酸杆菌门、放线菌门和芽单胞菌门组成,不利于微生物环境的稳定。与 80%FN 相比,80%FN+OM、80%FN+BC 处理的酸杆菌门分别降低 44.82%和 47.56%,芽单胞菌门分别降低 43.50%和 50.39%,而其他优势菌门的均匀度得到提高,从而提高土壤微生物环境的稳定性。与 FN 相比,80%FN 的微生物均匀度下降,但 80%FN+OM、80%FN+BC 处理的均匀度有所提升,表明单纯减少氮肥施用对微生物环境不利,同时配施生物有机肥和生物炭等有机物料则可以避免破坏微生物环境,提高土壤的微生物多样性。

2.5 减氮配施有机物质对小麦产量和氮肥农学效率的影响

从表 4 可以看出,各施氮处理间 FN 的有效穗数

最高,较其他处理提升 0.23%~4.30%;80%FN+BC 的千粒重最高,较其他处理提升 0.15%~2.45%,但二者差异均不显著。80%FN+OM 的穗粒数、产量和农学效率均为最高,分别较其他施氮肥处理提升 1.48%~9.23%,1.09%~7.34%和 2.78%~41.49%。表明减氮配施有机物质显著提高小麦产量及其构成指标,提高氮素农学效率。80%FN 虽然产量略低于 FN,但氮肥农学效率有所提升,说明过量施用氮肥对产量没有明显的作用,同时还会造成氮素浪费。

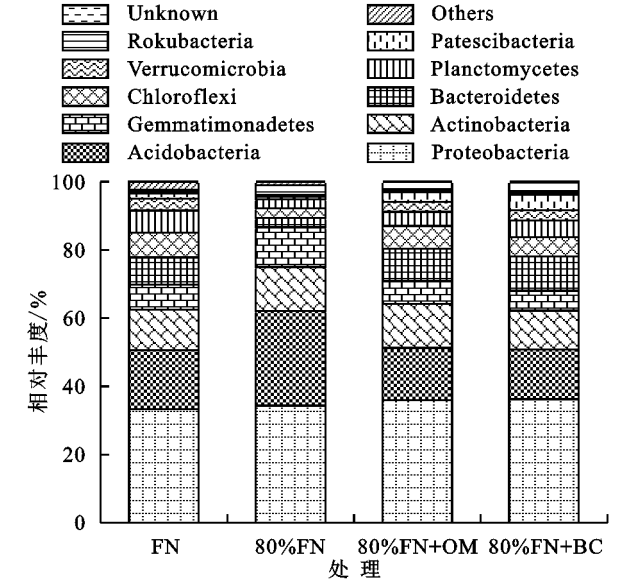


图 4 减氮配施有机物质对土壤细菌群落组成及丰度的影响

表 4 小麦产量性状及氮肥农学效率

处理	有效穗数/ (10 ⁴ hm ⁻²)	穗粒数	千粒重/g	产量/ (kg·hm ⁻²)	氮肥农学效率/ (kg·kg ⁻¹)
CK	611.44±13.74b	28.0±0.9c	44.1±0.4a	5316.1±157.5d	—
FN	728.69±14.63a	33.4±0.8b	44.9±1.4a	8370.6±148.5bc	10.18±0.49c
80%FN	698.65±14.63a	33.6±0.9b	43.9±1.2a	8173.2±138.6c	11.91±0.58b
80%FN+OM	726.98±22.89a	36.5±1.4a	44.3±1.3a	8773.2±305.4a	14.40±1.28a
80%FN+BC	711.44±26.20a	36.0±2.6ab	45.0±0.3a	8678.9±187.1ab	14.01±0.78a

3 讨论

在小麦各生长关键期,80%FN+OM 和 80%FN+BC 土壤容重均显著降低,80%FN 与 FN 比土壤容重

略有增加。成熟期,0—40 cm 的土壤容重均以 80%FN+BC 最低,较其他施氮肥处理降低 0.78%~5.07%(图 1),这与黄寅玲等^[13]报道的不施用氮肥和施用

70%氮肥会导致土壤容重提升,施用85%和95%氮肥会降低土壤容重的趋势一致。生物炭是一种高度芳香化且具有丰富碳源,有极强的稳定性和抗生物化学降解能力,还田后快速提高土壤有机碳^[14-15]。陈心想等^[16]报道,施用生物炭显著增加土壤有机碳,其增幅随生物炭用量增加而增加。生物有机肥部分替代化肥也会显著提高土壤有机质^[17]。本试验中,80%FN+OM处理在各关键期的土壤有机质均最高,挑旗期较其他施氮肥处理在0—20,20—40 cm分别增加2.79%~13.63%和14.83%~28.42%(图2)。这是由于该处理施用450 kg/hm²生物有机肥,其本身含有40%以上的有机质,其次包含有益菌0.2亿个/g以上,菌剂施入土壤后大量繁殖微生物,活化土壤养分,优化土壤碳氮平衡,也可以提高土壤有机质含量^[18]。全生育期内,与FN比较,80%FN的土壤有机质显著减少,Chao1、ACE、Shannon和Simpson指数也比较低,这是由于该处理施氮量较少,影响土壤碳氮比例,减弱土壤中微生物的繁殖和发育,降低前茬玉米秸秆腐熟程度,从而导致土壤有机质含量降低^[19]。所有处理的20—40 cm土壤容重与有机质有显著线性负相关($R>0.731$),即土壤有机质增加,土壤容重呈降低趋势。

翁玲云等^[20]报道土壤NO₃⁻-N累积量随施氮量增加而上升。本试验表明,各施氮处理土壤NO₃⁻-N含量随作物生育期延长,土壤NO₃⁻-N含量逐渐减少,垂直方向上随土壤深度增加NO₃⁻-N含量呈先升再降趋势。挑旗期,0—40 cm土层,80%FN+OM和80%FN+BC处理的土壤NO₃⁻-N含量较高,显著高于80%FN和FN处理,这有利于小麦吸收养分和根系生长发育;FN处理施氮量较大,导致氮素淋失严重,60—100 cm土壤硝态氮含量均最高。灌浆期0—80 cm土层均以80%FN+BC处理的土壤NO₃⁻-N较优,生物炭具有较大的比表面积,能更好地吸附固持土壤养分,从而提高土壤硝态氮含量。由于小麦生长过程中的养分吸收,成熟期各处理土壤硝态氮含量大幅度减少,但FN由于施氮量较大,此期氮素盈余较多(图3)。

Chen等^[21]使用qPCR、T-RFLP以及DGGE技术研究发现,生物炭可降低土壤中真菌丰度,而增加细菌丰度;夏雪等^[22]研究表明,施用氮肥提高土壤微生物群落碳源利用率、微生物群落的丰富度和功能多样性,中量氮肥120 kg/hm²施入土壤后土壤微生物群落丰度和Shannon指数最高。本研究表明,纯N用量为240 kg/hm²时,配施有机物料显著提升细菌Alpha

多样性,提升有益菌门相对丰度,使优势菌门均匀度提高,从而使土壤微生物环境更稳定(表3),这与黄媛媛等^[23]报道的生物有机肥和化肥合理配施有效促进土壤中不同类型微生物生长,提升土壤微生物丰富度和多样性的结果一致。本文通过配施生物有机肥和生物炭等有机物料的方式代替单纯增施化肥,提高土壤优势菌门的均匀度和微生物多样性(图4)。

彭正萍等^[24]研究发现,与农民习惯施氮量比,适当减少氮肥施用量不会影响作物产量和氮素吸收量,而氮素利用率、氮肥生产效率、氮肥农学效率均得到提高;裴雪霞等^[25]研究表明,与单施化肥相比,增施猪粪减施化肥2年度平均增产1.9%~16.5%。证实小麦产量80%FN+OM>80%FN+BC>FN>80%FN,80%FN+OM较FN、80%FN分别提升4.81%和7.34%,但80%FN与FN之间产量相差不显著,前者较后者提高氮肥农学效率(表4),表明适量减少氮肥施用的同时配施有机物质能够提升小麦产量和氮肥利用效率。通过土壤性质与小麦产量间的相关性分析表明,小麦产量与土壤容重呈显著负相关($R=0.778$),与土壤有机质呈极显著正相关($R=0.899$)。

4 结论

FN处理增加了小麦有效穗数,但对于产量提升的效果不明显,且导致土壤NO₃⁻-N淋溶增加和氮素利用率降低,不利于土壤持续利用。与FN相比,80%FN+OM和80%FN+BC均能降低土壤容重,提升土壤NO₃⁻-N、有机质含量以及小麦产量,同时提高土壤微生物多样性,而80%FN处理的小麦产量呈降低趋势。综合分析,80%FN+OM能够降低土壤容重,提升土壤有机质和NO₃⁻-N含量,同时增产效果最为明显。因此,适量减氮配施生物有机肥是能够在保障小麦产量的同时,提高土壤肥力的科学、绿色生态的氮肥施用模式。

参考文献:

- [1] 蔡媛媛,王瑞琪,王丽丽,等.施氮量与施肥模式对作物产量与氮肥利用率的影响[J].农业资源与环境学报,2020,37(4):503-510.
- [2] 武淑霞,刘宏斌,刘申,等.农业面源污染现状及防控技术[J].中国工程科学,2018,20(5):23-30.
- [3] 中华人民共和国统计局.中国统计年鉴[M].北京:中国统计出版社,2020.
- [4] 巨晓棠,谷保静.我国农田氮肥施用现状、问题及趋势[J].植物营养与肥料学报,2014,20(4):783-795.
- [5] 代新俊,杨珍平,陆梅,等.不同形态氮肥及其用量对强筋小麦氮素转运、产量和品质的影响[J].植物营养与肥料学报,2019,25(5):710-720.

- [6] 马瑞琦,陶志强,王德梅,等.追氮量对强筋和中筋小麦产量与品质的影响[J].植物营养与肥料学报,2019,25(10):1799-1807.
- [7] 杨明晓,吴伟,张钧浩,等.不同追氮时期对强筋小麦产量、品质及氮素吸收利用的影响[J].河北农业大学学报,2020,43(2):11-18.
- [8] 巨晓棠.氮肥有效率的概念及意义:兼论对传统氮肥利用率的理解误区[J].土壤学报,2014,51(5):921-933.
- [9] 刘瑞,戴相林,周建斌,等.不同氮肥用量下冬小麦土壤剖面累积硝态氮及其与氮素表观盈亏的关系[J].植物营养与肥料学报,2011,17(6):1335-1341.
- [10] 袁浩,王继唯,李赟虹,等.氮肥基追比对小麦产量、土壤水分分布及利用的影响[J].水土保持学报,2020,34(5):299-307.
- [11] 曹宏磊,朱宁远,颜廷梅,等.生物炭/DCD 对于淮河流域主要类型土壤 NO_3^- —N 淋失的影响[J].南京大学学报(自然科学版),2016,52(1):56-64.
- [12] 周伟,吕腾飞,杨志平,等.氮肥种类及运筹技术调控土壤氮素损失的研究进展[J].应用生态学报,2016,27(9):3051-3058.
- [13] 黄寅玲,雷忠顺,郑涛,等.不同施氮量对冬小麦产量、效益及土壤理化性状的影响[J].作物杂志,2020(1):130-135.
- [14] Leng L J, Huang H J, Li H, et al. Biochar stability assessment methods: A review[J].Science of the Total Environment,2018,647:210-222.
- [15] 史登林,王小利,段建军,等.氮肥减量配施生物炭对黄壤稻田土壤有机碳活性组分和矿化的影响[J].应用生态学报,2020,31(12):4117-4124.
- [16] 陈心想,何绪生,耿增超,等.生物炭对不同土壤化学性质、小麦和糜子产量的影响[J].生态学报,2013,33(20):6534-6542.
- [17] 张迎春,颜建明,李静,等.生物有机肥部分替代化肥对莴笋及土壤理化性质和微生物的影响[J].水土保持学报,2019,33(4):196-205.
- [18] 王俊红,王星琳,王康,等.生物有机肥替代化肥对小麦根际土壤环境的影响[J].华北农学报,2021,36(4):155-162.
- [19] 赵俊晔,于振文,李延奇,等.施氮量对土壤无机氮分布和微生物量氮含量及小麦产量的影响[J].植物营养与肥料学报,2006,12(4):466-472.
- [20] 翁玲云,杨晓卡,吕敏娟,等.长期不同施氮量下冬小麦—夏玉米复种系统土壤硝态氮累积和淋洗特征[J].应用生态学报,2018,29(8):2551-2558.
- [21] Chen J H, Liu X Y, Zheng J W, et al. Biochar soil amendment increased bacterial but decreased fungal gene abundance with shifts in community structure in a slightly acid rice paddy from Southwest China[J].Applied Soil Ecology,2013,71:33-44.
- [22] 夏雪,谷洁,车升国,等.施氮水平对壤土微生物群落和酶活性的影响[J].中国农业科学,2011,44(8):1618-1627.
- [23] 黄媛媛,马慧媛,黄亚丽,等.生物有机肥和化肥配施对冬小麦产量及土壤生物指标的影响[J].华北农学报,2019,34(6):160-169.
- [24] 彭正萍,刘亚男,李迎春,等.持续氮素调控对小麦/玉米轮作系统氮素利用和表观损失的影响[J].水土保持学报,2015,29(6):74-79.
- [25] 裴雪霞,党建友,张定一,等.化肥减量配施有机肥对旱地小麦产量、品质 and 水分利用率的影响[J].水土保持学报,2021,35(4):250-258.
- (上接第 165 页)
- [13] 赵龙山,梁心蓝,张青峰,等.裸地雨滴溅蚀对坡面微地形的影响与变化特征[J].农业工程学报,2012,28(19):71-77.
- [14] 尹武君,王健,刘旦旦.地表水层厚度对雨滴击溅侵蚀的影响[J].灌溉排水学报,2011,30(4):115-117.
- [15] 王子轩,吴发启.模拟降雨条件下坡度对关中地区壤土溅蚀的影响[J].土壤学报,2021,58(6):1416-1422.
- [16] 郭维敏,李晓丽,王文,等.坡度对紫红色砒砂岩击溅侵蚀的影响[J].中国水土保持科学,2019,17(1):1-9.
- [17] Michał B, Magdalena R, Agata S, et al. The mass ratio of splashed particles during raindrop splash phenomenon on soil surface[J].Geoderma,2019,347:40-48.
- [18] 程金花,秦越,张洪江,等.华北土石山区模拟降雨下土壤溅蚀研究[J].农业机械学报,2015,46(2):153-161.
- [19] 张兴义,乔宝玲,李健宇,等.降雨强度和坡度对东北黑土区顺坡垄体溅蚀特征的影响[J].农业工程学报,2020,36(16):110-117.
- [20] 沈海鸥,肖培青,李洪丽,等.黑土坡面不同粒级泥沙流失特征分析[J].农业工程学报,2019,35(20):111-117.
- [21] 王磊,师宏强,刘刚,等.黑土区宽垄和窄垄耕作的顺坡坡面土壤侵蚀对比[J].农业工程学报,2019,35(19):176-182.
- [22] 郭维敏,李晓丽,王文,等.坡度对紫红色砒砂岩击溅侵蚀的影响[J].中国水土保持科学,2019,17(1):1-9.