

不同有机替代对黄土旱塬土壤碳、氮组分及冬小麦产量的影响

姜丽伟¹, 谢英荷^{1,2,3}, 李廷亮^{1,2,3,4}, 刘凯¹, 张奇茹¹, 曹静¹, 邵靖琳¹

(1.山西农业大学资源环境学院,山西 太谷 030801;2.山西农业大学农业资源与环境国家级实验教学示范中心,山西 太谷 030801;3.山西农业大学山西省土壤肥料研究生教育创新中心,山西 太谷 030801;
4.黄土高原特色作物优质高效生产省部共建协同创新中心,山西 太谷 030801)

摘要: 探讨黄土旱塬冬小麦区不同有机肥替代化肥氮对小麦产量及土壤碳氮组分的影响,为该区减施化学氮肥、促进小麦提质增效和农业绿色可持续发展提供理论依据。于2019年在山西黄土旱塬冬小麦种植区设置100%化肥N处理(HF)、10%腐殖酸N+90%化肥N(F1)、30%腐殖酸N+70%化肥N(F3)、50%腐殖酸N+50%化肥N(F5)、10%有机肥N+90%化肥N(Y1)、30%有机肥N+70%化肥N(Y3)、50%有机肥N+50%化肥N(Y5)7个试验处理,系统研究了不同比例腐殖酸、有机肥替代化肥对小麦产量及产量构成和土壤碳、氮组分含量的影响。结果表明:F3、F5、Y3和Y5处理,分别较HF显著提高9.7%,8.0%,9.2%和18.2%。同时,Y5对土壤中各种活性有机碳、氮组分含量的提高均有显著促进作用,提高幅度在36.8%~114.4%和27.8%~105.4%;Y3处理下可溶性、水溶性、微生物有机碳、氮和轻组有机碳、氮组分的含量较HF显著提高21.1%~156.8%;F3和F5处理下土壤中可溶性、微生物和轻组有机碳、氮组分含量较HF显著提高25.4%~119.3%。可溶性有机碳、微生物有机氮、轻组有机氮与籽粒产量呈极显著正相关;可溶性有机氮通过促进公顷穗数增加而提高冬小麦产量;总有机碳、水溶性有机碳和微生物有机氮则通过提高穗粒数达到增产效果。综上,在黄土旱塬冬小麦种植区进行30%~50%的有机肥和腐殖酸替代化肥后,可达到显著增产效果,同时提高土壤中活性碳、氮组分的作用。其中,50%有机肥替代处理的增产与培肥地力效果更为显著,适宜在当地推广应用。

关键词: 有机替代; 有机碳组分; 有机氮组分; 冬小麦产量

中图分类号:S158.3

文献标识码:A

文章编号:1009-2242(2022)03-0286-07

DOI:10.13870/j.cnki.stbcbx.2022.03.041

Effects of Different Organic Substitutes on Soil Organic Carbon and Nitrogen Fractions and Winter Wheat Yield in Dryland of Loess Plateau

JIANG Liwei¹, XIE Yinghe^{1,2,3}, LI Tingliang^{1,2,3,4}, LIU Kai¹,

ZHANG Qiru¹, CAO Jing¹, SHAO Jinglin¹

(1.College of Resources and Environment, Shanxi Agricultural University, Taigu, Shanxi 030801; 2.National Experimental Teaching Demonstration Center of Agricultural Resources and Environment, Shanxi Agricultural University, Taigu, Shanxi 030801; 3.Shanxi Graduate Education Innovation Center of Soil and Fertilizer, Shanxi Agricultural University, Taigu, Shanxi 030801; 4.Ministerial and Provincial Co-Innovation Centre for Endemic Crops Production with High-quality and Efficiency in Loess Plateau, Shanxi Agricultural University, Taigu, Shanxi 030801)

Abstract: In order to discuss the influence of different organic fertilizers substitute chemical fertilizer nitrogen on wheat yield and soil carbon and nitrogen components in winter wheat area of the Loess Plateau, provide theoretical basis for reducing the application of chemical nitrogen fertilizers, promote wheat quality and efficiency and sustainable agricultural green development in this area, the effects of different ratios of humic acid and organic fertilizers substitute chemical fertilizers on wheat yield and yield composition and soil carbon and nitrogen content were systematically studied. The experiment set up 7 experimental treatments in the winter wheat planting area of Shanxi Loess Plateau in 2019: 100% chemical fertilizer N treatment (HF), 10% humic acid N+90% chemical fertilizer N (F1), 30% humic acid N+70% chemical fertilizer N (F3), 50% hu-

收稿日期:2021-09-26

资助项目:国家重点研发计划项目(2018YFD0200401);国家公益性项目(农业)科研专项(201503124)

第一作者:姜丽伟(1995—),男,硕士研究生,主要从事旱地作物-土壤互作调控研究。E-mail:1774048501@qq.com

通信作者:谢英荷(1958—),女,教授,博士,博士生导师,主要从事旱地作物-土壤互作调控研究。E-mail:xiyinghe@163.com

mic acid N+50% chemical fertilizer N (F5), 10% organic fertilizer N+90% chemical fertilizer N (Y1), 30% organic fertilizer N+70% chemical fertilizer N (Y3), 50% organic fertilizer N+50% chemical fertilizer N (Y5). The results showed that F3, F5, Y3, and Y5 treatments significantly improved 9.7%, 8.0%, 9.2% and 18.2% compared with HF, respectively. At the same time, Y5 significantly promoted the increase of the content of various active organic carbon and nitrogen components in the soil, and the increase range was between 36.8%~114.4% and 27.8%~105.4%; The content of soluble, water-soluble, microbial organic carbon, nitrogen and light organic carbon and nitrogen components under Y3 treatment was significantly increased by 21.1%~156.8% compared with HF. Compared with HF, the soluble, microbial, light organic carbon and the nitrogen content in the soil under F3 and F5 treatments were significantly increased by 25.4%~119.3%. At the same time, soluble organic carbon, microbial organic nitrogen, light group organic nitrogen had very significant positive correlations with grain yield. The soluble organic nitrogen could increase winter wheat yield by promoting the increase of ears per hectare. Total organic carbon, water-soluble organic carbon, and microbial organic nitrogen could increase yield by increasing the number of grains per spike. In conclusion, when 30%~50% organic fertilizer and humic acid were used for substitution of chemical fertilizer in winter wheat growing area of loess plateau, significant yield increase could be achieved, and the effects of active carbon and nitrogen components in soil could be improved. Among them, the 50% organic fertilizer replacement treatment has more significant effects on increasing yield and improving fertility, which is suitable for local promotion and application.

Keywords: organic substitutes; organic carbon fractions; organic nitrogen fractions; winter wheat yield

20世纪80年代起全球化肥用量不断增加,预计2030年将达到2.21亿t^[1]。黄土旱塬是我国重要的旱作农业区,冬小麦是该区主要的粮食作物,常年种植面积53万hm²以上,其产量约占全国小麦产量10%^[2],在实际农业种植中也存在大量盲目施肥的现象。针对当前化肥不合理施用对环境造成的潜在威胁,有机肥替代部分化肥将成为我国今后肥料施用的必然趋势,其对土壤养分的影响成为近年来土壤学与植物营养学的研究热点^[3-4]。

国内外很多学者^[5-7]研究表明,合理的替代比例具有促进作物的生长、改善产量构成、增加作物产量、提高土壤养分含量的效应。张丹^[8]发现,施用有机肥替代20%化学氮肥可在稳定稻麦产量的情况下,明显地提高稻麦两季氮肥的利用率;于昕阳等^[9]通过连续3年定位试验研究表明,合理的有机无机配比可以增加冬小麦地上部氮素吸收量和氮肥利用效率;谢军红等^[10]研究发现,在黄土高原半干旱区,干旱年份以50%和37.5%牛粪商品有机肥替代氮肥水平下,玉米籽粒产量和氮肥利用效率都显著高于单施氮肥,而丰水年各替代水平处理与单施氮肥相比无显著差异,表现为稳产;谢军等^[11]研究发现,施用有机肥替代部分化学氮肥,促进了氮素的吸收及向籽粒的转运,进而提高了玉米的产量和氮肥利用率;也有研究^[12-13]表明,施用有机肥能够提高土壤有机碳、氮含量。

综上所述,前人的研究多集中于某一区域有机肥一种替代比例对作物产量与肥料利用率等方面,缺乏

多种替代比例对土壤肥力效应等方面的比较分析,尤其是在黄土旱塬干旱贫瘠的土壤上,不同比例有机替代后对土壤中碳氮组分的系统影响缺乏研究。因此,本研究以典型黄土旱塬冬小麦种植区为试区,在当地常规施肥基础上进行不同比例的有机替代,着重对土壤中活性、缓效和惰性有机碳、氮各组分进行详细与深入研究,旨在为当地小麦的科学施肥、安全绿色持续生产提供一定的理论依据和技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

田间试验于2019—2020年在山西省洪洞县刘家垣镇东梁村(36°22'N,111°35'E)进行,该区位于山西省西南部,属暖温带大陆性季风气候,平均海拔648m,年均气温12.6℃,有效积温3326.9℃,多年平均降水量493.3mm,且年内分配不均匀,集中在7—9月,与冬小麦生育期严重错位,为典型的黄土高原旱作农业区。在试验期间(2019—2020年)生育期降水198.2mm,夏闲期降水293.3mm。供试土壤为石灰性褐土,表土砂粒、黏粒、粉粒含量分别为67.7%,28.7%,3.6%,质地为中壤土。播前0—20cm土壤理化性状:容重1.21g/cm³,有机质、全氮、全磷、全钾含量分别为10.4,0.7,0.1,40.2g/kg,硝态氮、有效磷、速效钾含量分别为16.6,7.8,238.9mg/kg,pH为7.9。

1.2 试验设计

本试验在等氮量条件下进行有机无机替代,试验

设置 7 个处理,分别为 100% 化肥 N 处理(HF)、10% 腐殖酸 N+90% 化肥 N(F1)、30% 腐殖酸 N+70% 化肥 N(F3)、50% 腐殖酸 N+50% 化肥 N(F5)、10% 有机肥 N+90% 化肥 N(Y1)、30% 有机肥 N+70% 化肥 N(Y3)、50% 有机肥 N+50% 化肥 N(Y5)。小区面积 5.2 m×18.4 m,各处理重复 4 次,呈完全随机排列。具体试验方案见表 1。供试氮肥为尿素(含 N 46%),磷肥为过磷酸钙(含 P₂O₅ 11%);有机肥为

商品有机肥“地爱沃 2 号”,(N—P—K, 9.10%—0.48%—1.24%,有机质 46.00%);腐殖酸为腐殖酸水溶肥粉剂(N—P—K, 15.6%—0—4.95%)所有肥料在播前均匀翻耕入土。冬小麦供试品种为“临丰 3 号”,播量 150 kg/hm²。种植方式为利用现代农机进行垄膜沟播,2019 年播种时间在 10 月 20 日,收获时间在次年 6 月 3 日。冬小麦全生育期除自然降水外不灌溉,田间管理同当地农户一致。

表 1 试验方案

处理	化肥养分用量/ (kg·hm ⁻²) N—P ₂ O ₅ —K ₂ O	腐殖酸用量/ (kg·hm ⁻²)	有机肥用量/ (kg·hm ⁻²)	栽培方式
化肥 HF	150—60—0	0	0	
10% 腐殖酸氮 F1	135—60—0	96	0	
30% 腐殖酸氮 F3	105—60—0	288	0	垄上覆膜、沟内膜侧播种,播种 2
50% 腐殖酸氮 F5	75—60—0	479	0	行,行距 20 cm,垄宽 35 cm,沟
10% 有机肥氮 Y1	135—60—0	0	165	宽 30 cm
30% 有机肥氮 Y3	105—60—0	0	474	
50% 有机肥氮 Y5	75—60—0	0	823	

1.3 样品采集与测定

植物样品采集:于小麦收获期,随机收获每个小区中央 3 m×10 m 样方小麦,单独脱粒计产;每个小区选取具有代表性的 3 个 1 m 小麦样段进行收获,调查测定穗数、穗粒数及千粒重等产量构成因素。

土壤样品采集:于小麦收获期每个小区多点取样,采集 0—20 cm 土层土壤,每个小区 3 个点,用于土壤碳、氮组分的测定。

1.4 测定项目与方法

(1)小麦产量的测定:于小麦收获期,随机收获每个小区中央 3 m×10 m 样方小麦,单独脱粒计产;每个小区选取具有代表性的 3 个 1 m 长度小麦样段进行收获,调查测定穗数、穗粒数及千粒重等产量构成因素。

(2)土壤重组有机碳:将 25 mL 1.8 g/cm³ 的溴化锌溶液加入到盛有过 0.25 mm 筛 5 g 土样的离心管中振荡离心 3 次,再用 95% 的乙醇振荡离心 3 次,蒸馏水振荡离心 2 次后,将盛有土样的离心管置于 60℃ 下烘 48 h,最后土样磨细过 0.149 mm 筛,用重铬酸钾容量—外加热法^[14]测定。

(3)土壤轻组有机碳:采用土壤总有机碳和重组有机碳的差值法求得^[14]。

(4)土壤颗粒有机碳、水溶性有机碳、可溶性有机碳、易氧化有机碳、微生物量有机碳分别采用 5 g/L 的六偏磷酸钠溶液法^[14]、蒸馏水浸提,TOC 仪测定^[14]、1 mol/L KCL 浸提,TOC 测定^[15]、333 mmol/L KMnO₄ 浸提,分光光度计测定^[14]、氯仿熏蒸—

K₂SO₄ 浸提,TOC 仪测定其含量^[14]。

(5)土壤氮组分的测定^[15]:土壤重组有机氮、轻组有机氮、颗粒有机氮、可溶性有机氮、微生物量有机氮分别采用半微量开氏法测定、土壤总有机氮和重组有机氮的差值法求得,5 g/L (NaPO₃)₆ 溶液分散,半微量凯氏定氮法测定、5 mol/L 的 K₂SO₄ 浸提,TOC 仪测定、氯仿熏蒸—K₂SO₄ 浸提,TOC 仪测定。

1.5 数据处理

采用 Excel 2019 软件整理试验数据,SPSS 19.0 软件进行单变量方差分析,采用最小显著差异法(least significant difference method, LSD)进行显著性检验($P < 0.05$)。

2 结果与分析

2.1 不同有机替代对冬小麦产量及其构成要素的影响

由表 2 可知,不同有机替代下的冬小麦籽粒产量较 HF 处理均有所提高,其中, Y5 产量最高为 4 935.2 kg/hm²,显著高于其他处理 7.7%~18.2%,其次是 F3、F5 和 Y3 处理,产量均在 4 510.7~4 582.5 kg/hm²,分别较 HF 显著提高 9.7%, 8.0%, 9.2%;较 F1 显著提高 9.5%, 7.7%, 8.9%;较 Y1 显著提高 9.2%, 7.5%, 8.6%。而 F1 和 Y1 与 HF,则无显著差异,产量均在 4 176.6~4 197.0 kg/hm²。不同有机替代处理下冬小麦生物产量变化趋势与籽粒产量基本一致, F3 与 Y5 分别较 HF、F1、Y1 显著提高 12.5%, 11.9%, 11.8% 与 13.1%, 12.5%, 12.4%。说明 10% 的有机替代下对冬小麦增产较全量化肥并无显著作用,而 30%~50% 有机替代下可

以达到显著增产效果。

从产量构成要素来看,F3、F5 与 Y5 的穗数相对 HF 分别显著提高 7.8%,4.7%,8.5%,Y5 穗粒数也显著高于农户 18.8%,各处理最大值达到 27.22 粒/穗,千粒重各处理则表现为 Y3 显著较 Y5 高出

6.4%,但与其他处理无显著差异。收获指数各处理间也并无显著性差异。由此可见,F3、F5 通过提高穗数来达到增产的目的;而 Y1、Y3 和 Y5 则在提高穗数的前提下穗粒数也有显著提高,且 Y3 与 Y5 替代下穗粒数提高效果最为显著。

表 2 不同处理小麦产量及其产量构成要素

处理	籽粒产量/ (kg·hm ⁻²)	生物产量/ (kg·hm ⁻²)	产量构成要素 穗数/(10 ⁴ 个·hm ⁻²)	穗粒数/ (粒·穗 ⁻¹)	千粒重/g	收获 指数/%
收获指数/%化肥 HF	4176.6c	10816.7b	510.9b	22.9b	34.4ab	38.6a
10%腐殖酸氮 F1	4186.8c	10876.7b	475.0cd	25.0ab	33.5ab	36.5a
30%腐殖酸氮 F3	4582.5b	12166.7a	550.7a	25.1ab	33.3ab	37.6a
50%腐殖酸氮 F5	4510.7b	12023.3ab	534.9ab	25.2ab	33.6ab	37.5a
10%有机肥氮 Y1	4197.0c	10883.3b	467.6d	25.4ab	33.8ab	38.6a
30%有机肥氮 Y3	4559.7b	11420.0ab	486.2cd	27.0a	34.8a	39.9a
50%有机肥氮 Y5	4935.2a	12233.3a	554.5a	27.2a	32.7b	40.3a

注:同列不同小写字母表示不同处理间差异显著($P<0.05$)。下同。

2.2 不同有机替代对碳组分含量的影响

由表 3 可知,总有机碳含量有机替代后,除 Y1 外其他处理均比纯化肥处理 HF 显著提高 56.7%~76.0%,Y3 提高幅度最大。活性有机碳虽然在土壤中含量低,但运移迅速,可以直接被微生物利用,对土壤质量变化反应敏感,通常以物理、化学和生物学分类方法划分为水溶性有机碳、可溶性有机碳、轻组有机碳、微生物有机碳和易氧化有机碳^[6]。Y5 与 Y3 水溶性有机碳含量分别较 HF 显著提高 90.9%,54.5%。在所有处理中,Y5、Y3、F5 可溶性有机碳含量较 HF 显著提高 21.1%~36.8%。F5 和 Y5 土壤中易氧化有机碳含量较 HF 显著高出 52.3%,47.1%。

微生物量碳是比土壤有机碳更敏感的肥力指标,可用来指示土壤肥力的动态变化和反映土壤质量状况。Y5

与 Y3 处理较 HF 与 F1 分别显著提高了 21.7%~68.0%,且 Y5 提高幅度最大为 68%与 64.2%。除 Y1 外,其余各处理轻组有机碳含量较 HF 均显著提高了 81.3%~156.8%,Y3 提高幅度达到了 156.8%,F1、F3、F5 和 Y5 分别较 HF 显著提高 99.6%,81.3%,119.3%和 114.4%。

有机替代处理下颗粒有机碳均较 HF 有所提高,含量为 3.30~3.98 g/kg,但其处理间无显著差异。F3 处理重组有机碳含量显著高于 F1 与 Y1,其他各处理间并无显著性差异。

由此可见,在 10%~50%有机替代条件下,可有效提高土壤总有机碳含量,同时,对活性有机碳含量的提高也有促进作用,30%~50%有机替代效果更为显著。而各有机替代处理对颗粒有机碳含量和重组有机碳并无显著影响。

表 3 不同有机替代耕层土壤有机碳组分含量

处理	总有机碳/ (g·kg ⁻¹)	活性有机碳				轻组有机碳/ (g·kg ⁻¹)	缓效有机碳	惰性有机碳
		水溶性有机碳/ (g·kg ⁻¹)	可溶性有机碳/ (g·kg ⁻¹)	易氧化有机碳/ (g·kg ⁻¹)	微生物有机碳/ (mg·kg ⁻¹)		颗粒有机碳/ (g·kg ⁻¹)	重组有机碳/ (g·kg ⁻¹)
HF	10.4c	0.11c	0.19c	1.72bc	105.46c	5.55c	3.16a	4.89ab
F1	16.4ab	0.12c	0.21bc	1.96abc	108.63c	11.08ab	3.48a	3.92b
F3	16.3ab	0.14bc	0.21bc	2.32ab	117.41bc	10.06ab	3.98a	6.26a
F5	16.3ab	0.12c	0.23ab	2.62a	115.12bc	12.17ab	3.30a	4.14ab
Y1	12.2bc	0.12c	0.16c	1.76bc	124.44bc	8.74bc	3.32a	3.46b
Y3	18.3a	0.17b	0.23ab	1.99abc	138.71b	14.25a	3.59a	4.02ab
Y5	16.6ab	0.21a	0.26a	2.53a	185.62a	11.9ab	3.52a	4.74ab

2.3 不同有机替代对氮组分含量的影响

土壤活性有机氮在几周或几个月内可以迅速转化,从而直接被植物、动物和微生物利用,主要包括可溶性有机氮、轻组有机氮和微生物机氮。由表 4 可知,F5 可溶性有机氮含量显著高于除 F3、Y5 外的其

他各处理,比 HF 高 46.7%,比 F1、Y1、Y3 分别提高 38.1%,38.3%,41.4%;F3、Y5 显著高于化肥处理 33.3%,27.8%,但与其他处理间差异不显著。微生物有机氮表现为,Y3 与 Y5 处理含量最高,分别较其他各处理显著提高了 63.6%~105.4%,分别比 HF

显著提高 79.8%, 105.4%; F3、F5 分别较 HF 有显著提高 25.6%, 17.6%。轻组有机氮含量 Y5 分别较 HF 与 Y1 显著提高 95.5%, 79.2%, 其余各处理间无差异性显著。

有机替代处理 F3 与 F1 土壤颗粒有机氮含量分别较 HF 与 Y1 显著高出 63.6%, 50% 和 45.5%, 33.3%。重组有机氮含量只有 F3 较 HF 与 F1 显著提高 28.6%,

其他处理均差异不显著。不同有机替代处理后, 土壤全氮含量并无明显差异, 说明等氮量的有机替代对土壤全氮没有明显影响。

综上, 30%~50% 的有机替代对可溶性有机氮、微生物有机氮和轻组有机氮的提高均有促进作用, F3 对颗粒有机氮和重组有机氮的提高影响效果明显, 而其他各处理对二者影响并无明显效果。

表 4 不同有机替代耕层土壤有机氮组分含量

处理	全氮/ (g · kg ⁻¹)	活性有机氮			缓效有机氮	惰性有机氮
		可溶性有机氮/ (mg · kg ⁻¹)	微生物有机氮/ (mg · kg ⁻¹)	轻组有机氮/ (g · kg ⁻¹)	颗粒有机氮/ (g · kg ⁻¹)	重组有机氮/ (g · kg ⁻¹)
HF	0.89a	10.95c	8.34c	0.22c	0.11c	0.56b
F1	0.93a	11.63bc	8.84bc	0.27abc	0.16ab	0.56b
F3	1.00a	14.60ab	10.96b	0.30ab	0.18a	0.72a
F5	0.93a	16.06a	10.46b	0.34ab	0.14abc	0.59ab
Y1	0.93a	11.61bc	9.50bc	0.24bc	0.12bc	0.6ab
Y3	0.98a	11.36bc	13.56a	0.32ab	0.14abc	0.64ab
Y5	1.00a	13.99ab	15.02a	0.43a	0.14abc	0.62ab

2.4 土壤碳氮组分与小麦产量及产量构成因素间的相关分析

由表 5 可知, 各碳、氮组分对籽粒产量的影响均为正相关关系。其中, 水溶性有机碳、微生物有机氮和轻组有机氮均与冬小麦籽粒产量呈极显著正相关; 总有机碳、微生物有机碳、易氧化有机碳、轻组有机碳和可溶性有机氮与冬小麦籽粒产量呈显著正相关。总有机碳和轻组有机碳与穗粒数呈极显著正相关, 水溶性有机碳微生物有机氮、轻组有机氮均与穗粒数呈显著正相关; 可溶性有机氮和轻组有机氮与穗数呈极

显著正相关, 可溶性有机碳与穗数呈显著正相关。重组有机碳与千粒重呈显著负相关。

总有机碳与活性有机碳、氮组分对冬小麦产量提高有促进效果, 土壤全氮含量对冬小麦的产量影响并不明显。

不同的碳、氮组分通过促进不同的产量构成要素来达到增产的效果, 且总有机碳、水溶性有机碳、轻组有机碳和微生物氮通过促进穗粒数的增加达到增产效果; 可溶性有机碳、氮则通过提高穗数促进小麦增产; 轻组有机氮对二者均有显著影响。

表 5 土壤碳、氮组分与小麦产量及产量构成因素间相关分析 (N=21)

土壤碳、氮组分	籽粒产量	生物产量	穗数	穗粒数	千粒重
总有机碳	0.535*	0.392	0.081	0.703**	-0.057
可溶性有机碳	0.716**	0.335	0.285	0.489*	0.063
水溶性有机碳	0.418	0.209	0.457*	0.115	0.021
微生物有机碳	0.449*	0.097	0.382	0.072	0.020
易氧化有机碳	0.542*	0.284	0.287	0.257	-0.289
轻组有机碳	0.467*	0.348	0.007	0.684**	0.139
颗粒有机碳	0.114	-0.016	-0.097	-0.066	-0.149
重组有机碳	0.291	0.286	0.346	0.033	-0.437*
全氮	0.350	0.276	0.166	0.246	-0.097
可溶性有机氮	0.513*	0.455*	0.741**	0.222	-0.200
微生物有机氮	0.697**	0.090	0.237	0.502*	0.180
轻组有机氮	0.638**	0.407	0.657**	0.500*	-0.122
颗粒有机氮	0.231	0.054	0.055	0.123	-0.291
重组有机氮	0.257	0.353	0.110	0.063	-0.365

注: * 表示相关性达显著水平 ($P < 0.05$); ** 表示相关性达极显著水平 ($P < 0.01$)。

3 讨论

3.1 不同有机替代下冬小麦产量

本研究表明,进行有机替代的处理籽粒产量均较全量化肥处理有不同程度提高,F3、F5、Y3 和 Y5 分别较 HF 显著增产 9.7%,8.0%,9.2%,18.2%;其中,Y5 产量最高为 4 935.17 kg/hm²,较其他处理显著增产 8.2%~18.2%。原因为作物的产量与土壤养分的供应过程密切相关。化肥肥效快,能及时补充小麦生长发育所需的养分,有机肥作为作物的储备养分库营养丰富,但不能满足作物生长前期的养分需求^[17],而有机无机合理配施可以改善土壤性质,提高土壤肥力,协调肥料和土壤养分的供应强度,满足作物整个生育期的养分需求,从而促进作物生长^[18]。适宜比例的有机无机肥替代有助于增加小麦花前有效分蘖数,延长冬小麦灌浆进程,使小麦在整个生育期具有较强的光合能力,增加成穗数、穗粒数和千粒重,进而获得较高的籽粒产量^[19],与前人^[20]研究结果一致。

3.2 不同有机替代下土壤碳组分含量

前人^[21]研究表明,有机肥施用能显著增加土壤有机碳及活性有机碳的含量,本试验结果表明,进行有机替代后耕层土壤可溶、水溶、易氧化、微生物、轻组和颗粒有机碳组分含量均有不同程度的增加。可溶性有机碳表现为 F5 与 Y3 含量均为 0.23 g/kg, Y5 含量最高为 0.26 g/kg;易氧化有机碳 F5 与 Y5 显著高于其他处理;水溶性有机碳、微生物有机碳和轻组有机碳均表现为, Y5 分别显著高于其他处理 23.5%~90.9%,34.9%~102.3%和 7.2%~68%;而颗粒有机碳与重组有机碳含量变化较 HF 均并不明显。原因为施用有机肥带来的有机碳源可以在土壤微生物的分解代谢和有机质腐解下释放出更多的活性有机碳^[22]。岳会锦等^[23]研究表明,20%与 40%的有机肥替代化肥处理下,土壤有机碳含量较全量化肥显著提高 11.4%,15.3%;余高等^[24]研究表明,50%有机氮替代化肥氮处理下,可提高土壤中有机碳、可溶性有机碳和易氧化有机碳含量,同时经济效益也达到最优效果;徐明岗等^[25]在 70%有机氮长期替代下研究结果得出,有机肥可直接增加土壤微生物可以利用的有机碳源,促进微生物生长,激发其活性,降低土壤有机质的氧化稳定性,从而增加土壤易氧化有机碳含量;练成燕等^[26]研究表明,有机替代有助于提高土壤微生物量,微生物的死亡裂解可以提高土壤可溶性有机碳,均与本研究结果一致。

3.3 不同有机替代下土壤氮组分含量

土壤有机氮库是土壤氮库的主要存在形式,约占

土壤氮库的 85%,是土壤氮素的主体和作物必需氮素的主要来源^[27]。可溶性有机氮、轻组有机氮以及微生物量氮是土壤活性氮库的重要组成成分^[28]。

本研究与 Yang 等^[29]研究结果一致,土壤全氮在各处理间差异不显著,但是随有机替代比例的提升呈增加趋势。活性有机氮组分有机替代均较 HF 有所提高,其中,F5 可溶性有机氮含量显著高于除 F3、Y5 外其他各处理 38.1%~51.6%,是由于有机肥自身含有较多的可溶性有机氮,在促进作物生长的同时返还到土壤的残留物增多。此外,进行有机替代后土壤微生物活性提高,从而可以降解更多的氮素^[30]。陈洁等^[31]通过 20 年的长期定位试验研究结果也表明,有机替代处理可溶性有机氮含量较全量化肥处理平均增加 20%。

刘益仁等^[32]研究表明,20%~30%猪粪替代化肥处理下,小麦收获期土壤中微生物氮含量显著高于全量化肥,与本试验结果一致,收获期土壤中微生物有机氮表现为 Y3 与 Y5 含量最高,显著高于其他处理,较其他处理分别显著高出 66.1%~116.1%;其原因为施肥直接增加根系生物量及根系分泌物,促进了微生物的生长,有机肥不但增加了土壤养分,直接为微生物提供了充足的碳源,还通过同化作用将较多的氮素转移到微生物体内被暂时固定,减少了氮素的损失^[33]。

宋震震等^[34]研究表明,50%有机替代处理下土壤中轻组有机氮含量较不替代处理显著提高 29.6%,本试验结果也表明,有机替代可提高土壤中轻组有机氮含量,且 Y5 效果最好,分别较 HF 与 Y1 显著提高 95.5%,79.2%。颗粒有机氮组分表现为 F5 与 F3 分别较其他处理显著高出 9.9%~86.5%,12.5%~80%,与前人^[35]研究结果一致。

重组有机氮稳定性强、不易被分解、难被作物吸收利用。本试验结果表明,进行 10%~50%的有机替代对土壤中重组有机氮组分含量并无显著影响,虽然有机替代处理时,有机物料直接投入,会造成重组有机氮含量的升高,但其有机物料投入后促进微生物大量繁殖对重组有机氮进行分解矿化,导致其与全量化肥处理无显著性差异。

3.4 碳、氮组分与小麦产量相关性

土壤有机碳、氮对作物产量等方面具有重要影响作用,有机物料的投入可直接提高土壤活性有机碳含量。水溶性有机碳、易氧化有机碳和轻组有机碳不仅为作物生长提供所需的养分,又为微生物代谢供给大量碳源,其含量直接影响土壤养分的有效性^[36]。有机碳经微生物分解矿化后直接被作物吸收利用,同时,促进植物的根系发育,增加对土壤养分的吸收利

用,从而达到增产效果。进行有机替代后,在作物生长发育所需速效氮前期由化肥提供,后期则由有机肥矿化分解提供,保证作物整个生育期的养分供应,其中,活性有机氮的作用尤为重要。张莉等^[37]连续3年进行玉米秸秆还田后,0—40 cm 土壤中有有机碳、可溶性有机碳均与小麦产量呈极显著正相关;王利民等^[38]研究表明,茶叶产量与总有机碳、微生物有机碳存在密切的直线相关关系。本试验也表明,有机替代可较全量化肥处理显著提高土壤中活性有机碳、氮组分(表3和表4),进行相关分析后可知,总有机碳及部分活性有机碳组分和活性有机氮组分与冬小麦籽粒产量呈显著正相关,其中,水溶性有机碳与冬小麦籽粒产量呈极显著正相关。从产量构成来看,可溶性有机氮与穗数呈显著正相关;微生物有机氮则与穗粒数呈显著正相关;轻组有机氮对穗粒数与穗数呈极显著正相关,此结果与胡乃娟等^[39]研究结果一致。

4 结论

综上所述,在黄土旱塬冬小麦种植区进行30%~50%的有机肥和腐殖酸替代化肥后,不但有显著的增产效果,而且对土壤中水溶性有机碳、可溶性有机碳、轻组有机碳、微生物有机碳和氮等组分的含量均有显著促进提升作用,且微生物有机氮、轻组有机氮、可溶性有机碳对小麦产量提高具有重要促进作用。其中,50%有机肥替代处理增产和培肥地力的效果更显著,适宜在当地推广应用。

参考文献:

- [1] 国家统计局.中国统计年鉴[J].北京:中国统计出版社,2019.
- [2] 李廷亮,谢英荷,高志强,等.黄土高原旱地小麦覆膜增产与氮肥增效分析[J].中国农业科学,2018,51(14):2735-2746.
- [3] Neumann K, Verburg P H, Stehfest E, et al. The yield gap of global grain production: A spatial analysis[J]. *Agricultural Systems*,2010,103(5):316-326.
- [4] 杜为研,唐杉,汪洪.我国有机肥资源及产业发展现状[J].中国土壤与肥料,2020(3):210-219.
- [5] 林治安,赵秉强,袁亮,等.长期定位施肥对土壤养分与作物产量的影响[J].中国农业科学,2009,42(8):2809-2819.
- [6] Liu H F, Zhang J Y, Ai Z M, et al. 16-Year fertilization changes the dynamics of soil oxidizable organic carbon fractions and the stability of soil organic carbon in soybean-corn agroecosystem [J]. *Agriculture Ecosystems and Environment*,2018,265:320-330.
- [7] 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.
- [8] 张丹.湖北稻麦轮作系统中有机无机肥料配施效应研究[D].南京:南京农业大学,2016.
- [9] 于昕阳,翟丙年,金忠宇,等.有机无机肥配施对旱地冬小麦产量、水肥利用效率及土壤肥力的影响[J].水土保持学报,2015,29(5):320-324.
- [10] 谢军红,柴强,李玲玲,等.有机氮替代无机氮对旱作全膜双垄沟播玉米产量和水氮利用效率的影响[J].应用生态学报,2019,30(4):1199-1206.
- [11] 谢军,赵亚南,陈轩敬,等.有机肥替代化肥氮提高玉米产量和氮素利用效率[J].中国农业科学,2016,49(20):3934-3943.
- [12] Guo L Y, Wu G L, Li Y, et al. Effects of cattle manure compost combined with chemical fertilizer on topsoil organic matter, bulk density and earthworm activity in a wheat-maize rotation system in Eastern China [J]. *Soil and Tillage Research*,2016,156:140-147.
- [13] Shafi M, Azamshah S, Bakht J, et al. Enhancing soil fertility and wheat productivity through integrated nitrogen management [J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*,2012,43(11):1499-1511.
- [14] 张勉.夏闲期轮耕对旱地麦田土壤理化性状及有机碳组分的影响[D].山西 太原:山西农业大学,2017.
- [15] 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.
- [16] 徐明岗,于荣,王伯仁.土壤活性有机质的研究进展[J].土壤肥料,2000(6):3-7.
- [17] 郝小雨,高伟,王玉军,等.有机无机肥料配合施用对设施番茄产量、品质及土壤硝态氮淋失的影响[J].农业环境科学学报,2012,31(3):538-547.
- [18] Wei W L, Yan Y, Cao J, et al. Effects of combined application of organic amendments and fertilizers on crop yield and soil organic matter: An integrated analysis of long-term experiments [J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*,2016,225:86-92.
- [19] 赵隽,董树亭,刘鹏,等.有机无机肥长期定位配施对冬小麦群体光合特性及籽粒产量的影响[J].应用生态学报,2015,26(8):2362-2370.
- [20] 李太魁,寇长林,郭战玲,等.有机氮替代部分无机氮对砂姜黑土冬小麦产量及氮肥利用率的影响[J].江苏农业科学,2021,49(5):97-101.
- [21] Chen D M, Yuan L, Liu Y R, et al. Long-term application of manures plus chemical fertilizers sustained high rice yield and improved soil chemical and bacterial properties [J]. *European Journal of Agronomy*,2017,90:34-42.
- [22] 吴家梅,霍莲杰,纪雄辉,等.不同施肥处理对土壤活性

- 有机碳和甲烷排放的影响[J].生态学报,2017,37(18):6167-6175.
- [23] 岳会锦,陶瑞,褚贵新.滴灌棉田有机碳组分对不同比率有机无机肥配施的响应[J].新疆农业科学,2014,51(9):1630-1637.
- [24] 余高,陈芬,谢英荷,等.有机肥替代化肥比例对黄壤土活性有机碳及酶活性的影响[J].中国蔬菜,2020(4):48-55.
- [25] 徐明岗,于荣,孙小凤,等.长期施肥对我国典型土壤活性有机质及碳库管理指数的影响[J].植物营养与肥料学报,2006,12(4):459-465.
- [26] 练成燕,张桃林,王兴祥,等.有机物料对红壤几种形态碳氮及酸度的影响[J].中国农业科学,2009,42(11):3922-3932.
- [27] 朱兆良,张绍林,尹斌,等.太湖地区单季晚稻产量—氮肥施用量反应曲线的历史比较[J].植物营养与肥料学报,2010,16(1):1-5.
- [28] Sequeira C H, Alley M M, Jones B P. Evaluation of potentially labile soil organic carbon and nitrogen fractionation procedures [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2011, 43(2): 438-444.
- [29] Yang X Y, Wei D R, Sun B H, et al. Effects of contrasting soil management regimes on total and labile soil organic carbon fractions in a loess soil in China [J]. Geoderma, 2012, 177-178: 49-56.
- [30] 梁斌,李俊良,杨学云,等.施肥对麦田土壤可溶性有机氮的影响[J].生态学报,2016,36(14):4430-4437.
- [31] 陈洁,梁国庆,周卫,等.长期施用有机肥对稻麦轮作体系土壤有机碳氮组分的影响[J].植物营养与肥料学报,2019,25(1):36-44.
- [32] 刘益仁,徐阳春,李想,等.有机肥部分替代化肥对土壤微生物生物量及矿质态氮含量的影响[J].江西农业学报,2009,21(11):70-73,79.
- [33] 井大炜,邢尚军.鸡粪与化肥不同配比对杨树苗根际土壤酶和微生物量碳/氮变化的影响[J].植物营养与肥料学报,2013,19(2):455-461.
- [34] 宋震震,李絮花,李娟,等.有机肥和化肥长期施用对土壤活性有机氮组分及酶活性的影响[J].植物营养与肥料学报,2014,20(3):525-533.
- [35] 刘俊第,刘骏,胡亚林,等.植被恢复对红壤侵蚀区土壤氮组分的影响[J].土壤通报,2019,50(1):115-123.
- [36] Zhu L Q, Hu N, Zhang Z, et al. Short-term responses of soil organic carbon and carbon pool management index to different annual straw return rates in a rice - wheat cropping system [J]. Catena, 2015, 135: 283-289.
- [37] 张莉,李玉义,逢焕成,等.玉米秸秆颗粒还田对土壤有机碳含量和作物产量的影响[J].农业资源与环境学报,2019,36(2):160-168.
- [38] 王利民,邱珊莲,林新坚,等.不同培肥茶园土壤微生物量碳氮及相关参数的变化与敏感性分析[J].生态学报,2012,32(18):5930-5936.
- [39] 胡乃娟,韩新忠,杨敏芳,等.秸秆还田对稻麦轮作农田活性有机碳组分含量、酶活性及产量的短期效应[J].植物营养与肥料学报,2015,21(2):371-377.
- (上接第 279 页)
- [10] 陈利娜,李小川,丁晓纲,等.基于地统计学与 GIS 技术的森林土壤养分空间变异性研究[J].林业与环境科学,2016,32(5):14-21.
- [11] 刘攀,冯长焕.正态标准化数据无量纲处理在因子分析中的应用[J].内江师范学院学报,2017,32(12):54-58.
- [12] 宁理科.地形地貌对天山山区降水的影响研究[D].新疆 石河子:石河子大学,2013.
- [13] 朱立平,姚鲁峰.2005 青藏高原环境变化研讨会纪要[J].地理学报,2005,60(6):1041-1044.
- [14] 张金龙,陈英,葛劲松,等.1997—2010 年青海湖环湖区土地利用/覆盖变化与土地资源管理[J].中国沙漠,2013,33(4):1256-1266.
- [15] 黄焱宇.甘肃省土壤有机质含量空间分布及与土地利用的关系[D].兰州:甘肃农业大学,2009.
- [16] 杨帆,徐洋,崔勇,等.近 30 年中国农田耕层土壤有机质含量变化[J].土壤学报,2017,54(5):1047-1056.
- [17] 董莉丽,杨波,李晓华,等.陕西省土壤有机质含量及其与影响因素的关系[J].水土保持通报,2017,37(4):85-91.
- [18] 杨东,刘强.基于 GIS 和地统计学的张掖市甘州区土壤全氮/有机质的空间变异特征分析[J].土壤通报,2011,42(3):593-597.
- [19] 钟聪,李小洁,何园燕,等.广西土壤有机质空间变异特征及其影响因素研究[J].地理科学,2020,40(3):478-485.
- [20] Han C H, Wang Z L, Si G C, et al. Increased precipitation accelerates soil organic matter turnover associated with microbial community composition in topsoil of alpine grassland on the eastern Tibetan Plateau [J]. Canadian Journal of Microbiology, 2017, 63(10): 811-821.
- [21] 张法伟,李英年,汪诗平,等.青藏高原高寒草甸土壤有机质、全氮和全磷含量对不同土地利用格局的响应[J].中国农业气象,2009,30(3):323-326.
- [22] 申若禹,张吴平,王国芳,等.基于地统计学的山西省不同类型土壤有机质空间变异分析研究[J].山东农业科学,2019,51(4):110-116.
- [23] 于芳,李海明.基于地统计学和 GIS 的湖北省土壤有机质空间变异性研究[J].江苏农业科学,2019,47(15):282-286.
- [24] 黄元仿,周志宇,苑小勇,等.干旱荒漠区土壤有机质空间变异特征[J].生态学报,2004,24(12):2776-2781.