

新型生物炭基氮肥对土壤-冬小麦系统氮素累积及相关生物活性的影响

张 雯, 何绪生, 耿增超*, 殷笑寒, 王秋铭, 孙怡萍

(西北农林科技大学资源环境学院, 农业部西北植物营养与农业环境重点实验室, 陕西 杨凌 712100)

摘 要:通过田间试验,研究了掺混型、吸附型和反应型3种新型生物炭基硝酸铵氮肥在冬小麦生长过程中对土壤氮素累积及冬小麦对氮素的利用状况和相关生物活性的影响。试验处理包括CK(不施氮肥,不施生物炭)、硝酸铵氮肥、生物炭、掺混型生物炭基氮肥、吸附型及反应型生物炭基氮肥。研究表明:不同工艺制备的生物炭基氮肥对土壤铵态氮的累积具有显著影响,吸附型和反应型处理在冬小麦生长季铵态氮平均值大于对照(CK),对于总氮、硝态氮和亚硝态氮累积量的影响不显著。除了生物炭单施处理外,其他处理均比CK显著提高冬小麦地上部的总氮累积量,但对冬小麦的氮素利用状况无显著影响,且三种炭基氮肥处理间无显著差异;施用不同类型生物炭基氮肥对土壤微生物量氮含量和硝酸还原酶活性具有提高作用,而对微生物量碳含量、亚硝酸还原酶和脲酶活性无显著影响。

关键词:生物炭基氮肥;速效氮;硝酸还原酶;亚硝酸还原酶;脲酶;微生物量碳;微生物量氮

中图分类号:S145.5 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2014)07-1394-08 **doi:**10.11654/jaes.2014.07.020

Effects of Different Biochar-based Nitrogen Fertilizers on Nitrogen Accumulation and Biological Activities in Soil-Winter Wheat System

ZHANG Wen, HE Xu-sheng, GENG Zeng-chao*, YIN Xiao-han, WANG Qiu-ming, SUN Yi-ping

(College of Nature Resources and Environment, Northwest A&F University, Ministry of Agriculture Key Laboratory of Plant Nutrition and Agro-environment in Northwest China, Yangling 712100, Shaanxi, China)

Abstract: Due to its large surface area and rich functional groups, biochar has been used as a carrier for slow-release fertilizers. In this study, the effects of three biochar-based nitrogen fertilizers (BNF) on nitrogen accumulation and biological activities in soil and winter wheat system were evaluated. The experiment treatments were: CK (0 nitrogen fertilizer and 0 biochar), ammonium nitrate only (AN), biochar only (BC), ammonium nitrate-biochar blending BNF (CH), ammonium nitrate adsorbed on biochar BNF (XF) and ammonium nitrate reacted with biochar BNF (FY). Ammonium accumulation in soil was significantly affected by BNFs, especially XF and FY. During winter wheat growth, the average contents of NH_4^+-N was higher in soils receiving XF and FY than in the control treatment. However, total nitrogen, nitrate and nitrite did not show treatment effects. Compared to CK, three BNFs significantly increased nitrogen accumulation in wheat above-ground parts, but had no influence on nitrogen utilization efficiency of wheat. Applying BNFs increased soil microbial biomass nitrogen and nitrate reductase activity, but did not affect soil microbial biomass carbon and nitrite reductase and urease activities. Further studies are necessary on agronomic and biological effects of biochar-based nitrogen fertilizers.

Keywords: biochar-based nitrogen fertilizer; available nitrogen; nitrate reductase; nitrite reductase; urease; microbial biomass carbon; microbial biomass nitrogen

收稿日期: 2013-12-02

基金项目:农业部“948”项目“生物炭技术引进及消化”(2010-Z19);林业局“948”项目“林果木生物质综合转化技术引进”(2009-4-64);陕西省攻关项目“高效生物炭基缓释肥配方及施用技术研究”(2010K02-12-1);陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2010JM5004);国家级大学生创新创业训练计划“生物炭基氮肥的氮素利用率及对生物活性影响研究”(201310712036)

作者简介:张 雯(1988—),女,在读硕士,主要从事养分有效化利用的研究。E-mail:suyanyihen@126.com

*通信作者:耿增超 E-mail:gengzengchao@126.com

生物质炭来源广、环境友好,具有大的比表面积、较强的离子交换性能^[1],且富含化学反应性官能团,可作为肥料的缓释载体以提高肥料的养分利用率^[2-3],即制备生物炭基氮肥。土壤及冬小麦氮素累积是保证土壤养分供给及冬小麦产量的重要指标,通过研究生物炭基氮肥对土壤-冬小麦系统氮素累积情况来评价其氮素利用情况具有重要意义。

反硝化过程是氮肥损失的重要生化途径之一^[4],该过程是在以硝酸还原酶和亚硝酸还原酶为主的反硝化酶作用下完成的,而脲酶作为土壤中最活跃的水解酶之一,有利于土壤有机氮向有效氮的转化,其活性可以用来表征土壤氮素状况^[5-6],故探究此3种酶活性对了解炭基氮肥氮素转化意义重大。土壤微生物量碳氮是土壤碳素和氮素养分转化和循环研究中的重要指标,能较为直观地反映土壤微生物和肥力的状况,因此测定土壤微生物量碳氮对了解土壤中炭基氮肥的养分转化循环具有重要理论价值^[7]。

本研究通过对氮素转化过程速效氮动态变化的监测、氮素利用情况的计算以及与氮素转化相关的生物活性(硝酸还原酶、亚硝酸还原酶、脲酶及微生物量碳、氮)的研究,以探究新型生物炭基氮肥的氮素转化效率及生物活性对其的响应,为生物炭在新型肥料上的应用提供参考。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试材料共5种,分别为分析纯硝酸铵(含氮量35.01%)、生物质炭、掺混型生物炭基氮肥、吸附型生物炭基氮肥和反应型生物炭基氮肥。

供试生物质炭材料来自于陕西亿鑫生物能源科技开发有限公司,为农业废弃生物质材料(苹果树枝条等)在450℃裂解炉限氧环境下生产。供试生物质炭的基本性质见表1。

掺混型生物炭基氮肥:35份的硝酸铵与65份生物质炭于搅拌机中充分搅拌均匀即得含氮量为12%、pH为7.1的生物炭基氮肥。

吸附型生物炭基氮肥:将35份硝酸铵充分溶解于100份蒸馏水中,再倾入65份生物质炭,边加边搅拌30 min,平衡24 h后于60℃下烘干,得目标炭基氮肥,其pH为7.0。

反应型生物炭基氮肥:向反应釜内加入9.5份30%的硝酸溶液,随后倾入生物质炭6.5份,边加边搅拌15 min;在前述反应釜内加入15%的氨水溶液7份,继续搅拌30 min;平衡24 h后调节收集产物的pH至中性后,于60℃电热恒温鼓风干燥箱中烘干,产物即为含氮量12%、pH为6.8的反应型生物炭基氮肥。

1.2 试验地概况及田间设计

试验地设在陕西杨凌西北农林科技大学试验田,该地区年均日照时数2150 h,年平均气温12~14℃,年平均降雨量为621 mm,雨量主要集中在7—9月,春季降水偏少,属暖温带半湿润易干旱气候。无霜期为200~220 d。供试土壤的基本性质见表2。

试验于2012年10月至2013年6月进行。供试小麦品种为西北农林科技大学选育的小偃22。采用单因素随机区组设计,共设6个处理,分别为CK、生物质炭(BC)、硝酸铵(AN)、掺混型生物炭基氮肥(CH)、吸附型生物炭基氮肥(XF)和反应型生物炭基氮肥(FY),每个处理4次重复,小区面积为3 m×4 m,每个小区之间设0.5 m隔离带。氮磷钾施肥量折合成纯养分N-P₂O₅-K₂O为225-150-180 kg·hm⁻²,各肥料均作为底肥播种时一次性施入。冬小麦采取条播,播种量为150 kg·hm⁻²,同时设置保护行。冬小麦生育期内进行统一灌溉管理,共灌溉3次,分别为越冬水、返青水和抽穗期灌水,每次灌溉量750 m³·hm⁻²,约75 mm。

表1 供试生物质炭的基本性质

Table 1 Properties of biochar used in experiment

比表面积 Surface area/m ² ·g ⁻¹	密度 Specific gravity/g·cm ⁻³	灰分含量 Ash content/%	有机碳 Organic carbon/%	氮 Nitrogen/%	pH
86.70	1.11	13.98	72.38	1.18	9.99

表2 供试土壤的基本性质

Table 2 Properties of soil used in experiment

容重 Bulk density/ g·cm ⁻³	有机质 Organic matter/ g·kg ⁻¹	CEC/ cmol·kg ⁻¹	全氮 Total N/ g·kg ⁻¹	全磷 Total P/ g·kg ⁻¹	全钾 Total K/ g·kg ⁻¹	有效磷 Available P/ mg·kg ⁻¹	速效钾 Available/ mg·kg ⁻¹
1.31	14.69	7.6	0.83	0.02	21.23	0.49	211.03

1.3 土壤和植物样品的采集

分别于冬小麦播种前、小麦苗期、越冬期、拔节期、抽穗期和成熟期,用土钻进行S型5点取样,并混匀按四分法分取土样,过2 mm筛后保存于4℃的冰箱内,用于土壤硝态氮、铵态氮、亚硝态氮、土壤硝酸还原酶、亚硝酸还原酶、脲酶及土壤微生物量碳、氮的测定。将播种前和成熟期所采土样分取少量风干,用于土壤基本理化性质的测定。冬小麦成熟期,将每小区具代表性两行冬小麦(每行2 m)分别剪下麦穗和秸秆作为考种依据,另外再取两行2 m长的作物作为计产的参考。待其风干后测定冬小麦产量及生物量,取代表样粉碎用于植物全氮的测定(秸秆和籽粒两部分),最后计算氮素利用率。

1.4 样品分析和指标计算

土壤硝态氮、铵态氮及亚硝态氮采用 $1\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ KCl浸提-AA3连续流动分析仪测定;植物全氮采用 $\text{H}_2\text{SO}_4+\text{H}_2\text{O}_2$ 消煮-凯氏定氮仪测定;土壤全氮采用半微量开氏法测定;土壤硝酸还原酶采用比色法测定^[8],即以硝酸钾为底物,加入2,4-二硝基酚抑制亚硝酸还原酶,将产生的亚硝酸根与Грисс试剂反应显色,于520 nm处测定酶促反应后生成的亚硝态氮的量,来表征硝酸还原酶的活性;土壤亚硝酸还原酶采用比色法测定^[9],即以亚硝酸钠为底物,将剩余的亚硝酸根与Грисс试剂反应显色,于520 nm处比色测定酶促反应后亚硝态氮的减少量,来表征亚硝酸还原酶的活性;土壤脲酶采用靛酚蓝比色法测定,以24 h后每克土壤中生成铵态氮的毫克数来表示其活性^[10];微生物量碳、氮分别采用氯仿熏蒸 ^{15}N - K_2SO_4 浸提-TOC仪测定和过硫酸钾氧化-紫外分光光度计测定。

速效氮含量($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)=硝态氮含量+亚硝态氮含量+铵态氮含量

氮肥利用率(%)=(施氮处理植株地上部吸氮量-不施氮处理植株地上部吸氮量)/施氮量 $\times 100$

氮素农学利用率($\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$)=(施氮处理产量-不施氮处理产量)/施氮量

氮素生理利用率($\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$)=(施氮处理产量-不施氮处理产量)/植株地上部吸氮量

氮素收获指数(%)=(籽粒吸氮量/植株地上部吸氮量) $\times 100$

1.5 数据处理

数据统计及绘图采用Microsoft Office Excel 2003软件进行。方差分析、多重比较及相关性分析采用DPS 7.05软件进行;采用单变量方差分析法(One-

way ANOVA)分析不同肥料处理对各指标的影响效应;采用最小显著极差法(LSD)比较各指标在不同肥料处理间的差异性,显著性水平设为 $\alpha=0.05$;采用双变量相关分析法(Bivariate correlations)计算各指标两两之间的Pearson相关系数。

2 结果与分析

2.1 施用不同氮肥土壤速效氮的动态变化

土壤中无机氮含量占全氮含量的比例不高,却是最易被作物吸收利用的氮素形态,故分析土壤无机态氮的动态变化具有重大农学意义。由图1a可以看出,与对照相比,施氮显著提高了土壤中硝态氮的含量;且在各生长期,施用3种生物炭基氮肥的硝态氮累积呈现无明显规律的差异性,三者生长期硝态氮累积量的平均值大于其他处理。相较于对照,施用氮肥显著提高了土壤铵态氮的累积量(图1b)。在苗期、越冬期和拔节期,施用CH、XF和FY 3种生物炭基氮肥的土壤铵态氮累积量差异显著,且XF和FY处理的生长期铵态氮平均值大于单施硝酸铵肥料。不同处理各生长期土壤亚硝态氮含量基本无显著性差异(图1c)。土壤中的无机氮素主要为硝态氮,因此速效氮含量的变化规律与硝态氮相似(图1d)。四种施氮处理的氮素含量均呈现出先升高后降低的单峰性趋势,主要与抽穗期和成熟期冬小麦对氮素的大量吸收和灌溉造成的硝态氮淋失有关。

2.2 不同氮肥处理对作物氮素累积及氮素利用效率的影响

由表3可以看出,耕层土壤全氮含量在6个处理间无显著差异。氮素累积量是冬小麦整个生育期对氮素营养吸收情况的反映,与不施氮处理(CK、BC)相比,施氮处理的冬小麦氮素累积量显著增加;但不同处理间差异不显著,籽粒中的氮素累积与植株总氮累积量呈极显著正相关($r=0.95^{**}$)。

相同施氮量条件下,氮肥利用率、生理利用率、农学利用率及收获指数在AN、CH、XF、FY 4个处理间均无显著差异。与其他包膜控释肥相比^[12-13],炭基氮肥的农学利用率高而氮素收获指数和氮素生理利用率较小,而且本试验的氮肥利用率为26.08%~29.72%,略低于朱兆良等^[14]报道的全国平均氮素利用率(30%~51%)。

2.3 不同氮肥处理对土壤中相关酶活性的影响

2.3.1 硝酸还原酶

土壤硝酸还原酶是催化 NO_3^- 转化为 NO_2^- 的专性

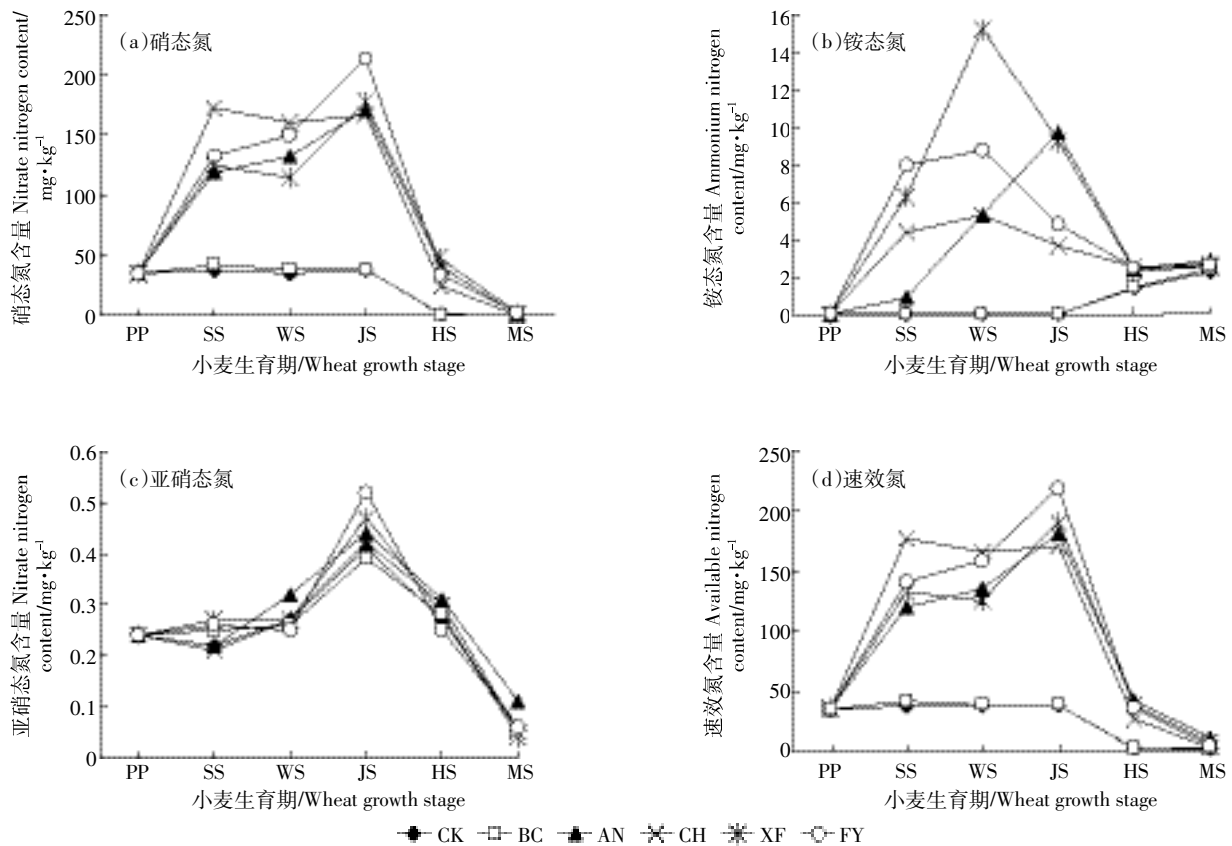


图 1 小麦生育期土壤氮素的动态变化

Figure 1 Dynamics of soil nitrogen during wheat growth under different treatments

表 3 不同处理的氮素累积与氮素利用率状况

Table 3 Nitrogen accumulation and use efficiency of wheat in different treatments

处理 Treatment	土壤全氮 Soil total N/ g·kg ⁻¹	冬小麦氮素累积量 N accumulation/g·kg ⁻¹		氮肥利用率 NUE/%	氮肥农学利用率 NFE/kg·kg ⁻¹	氮肥生理利用率 NPE/kg·kg ⁻¹	氮收获指数 NHI/%
		总氮 Total N	籽粒氮 Grain N				
CK	0.79±0.04a	29.77±2.69b	24.24±1.89bc	—	—	—	—
BC	0.84±0.05a	28.63±2.11b	23.66±1.38c	—	—	—	—
AN	0.87±0.07a	34.99±2.19a	26.82±1.53a	27.08±7.98a	9.37±4.42a	65.85±52.98a	76.66±0.68a
CH	0.86±0.07a	35.39±1.85a	26.54±2.05ab	29.72±10.53a	9.94±6.86a	54.80±35.44a	74.97±3.09a
XF	0.86±0.06a	34.45±2.26a	26.39±1.93ab	26.08±4.26a	9.70±3.50a	82.02±67.72a	76.60±2.16a
FY	0.82±0.03a	34.41±1.22a	25.37±0.80abc	26.72±13.31a	10.81±8.74a	61.08±31.03a	73.77±1.65a

注: 同列中不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)。

酶,其活性高低直接影响土壤硝态氮和亚硝态氮的含量。对同一时期不同处理土壤中硝酸还原酶活性的分析(图 2a)发现,在冬小麦苗期和越冬期,施氮处理的硝酸还原酶活性普遍高于未施氮处理,且 CH 显著高于 CK、BC 处理,活性值高达 $0.102 \text{ mg NO}_2\text{-N}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{土}\cdot 24 \text{ h}^{-1}$ 。越冬期受低温的影响,CK、BC 和 AN 处理的硝酸还原酶活性降至生育期最低点,而 CH、XF 和 FY 处理酶活性却降幅很小,可能与生物炭的施入加深土壤颜色、增加土壤吸热能力进而提高土壤温度有关。

同一处理不同时期的硝酸还原酶活性比较结果则显示出随着冬小麦生育期的推进,酶活性大致呈现出先降低后升高再降低的趋势。抽穗期小麦对养分的需求量较大,降低了土壤中硝酸还原酶的反应底物,从而降低了硝酸还原酶活性;在收获期硝酸还原酶活性较低则是由于土壤氮素含量进一步降低,小麦根系生命力减弱,分泌物减少所致。

2.3.2 亚硝酸还原酶

通常来讲,土壤中硝酸还原酶活性较高时,可生

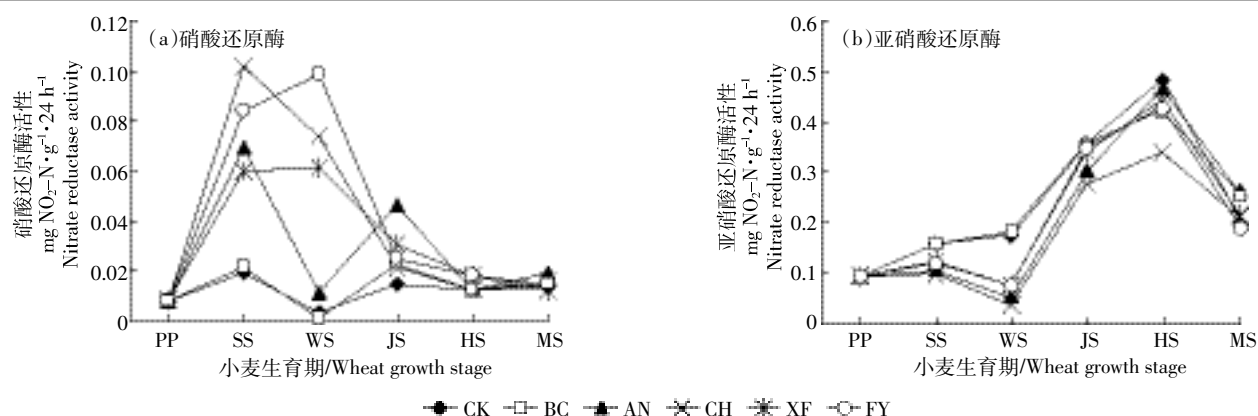


图2 不同处理对硝酸还原酶、亚硝酸还原酶活性的影响

Figure 2 Activities of nitrate/nitrite reductases in different treatments

成足够的 NO₂⁻ 为亚硝酸还原酶的催化过程提供充足的反应底物^[15],从而提高亚硝酸还原酶的活性。但本研究结果与此结论有差异,亚硝酸还原酶与硝酸还原酶活性规律并不同步。根据图 2b,同一时期不同处理均表现为氮肥的施用对亚硝酸还原酶活性无显著影响;而同一处理不同时期的结果则显示,土壤亚硝酸还原酶活性表现为先降低后升高(至生育期最高点后)再降低的趋势。亚硝酸还原酶活性在越冬期小幅度降低主要与低温抑制酶活性有关,拔节期和抽穗期酶活性提高则与温度缓慢回升为其提供了合适的环境条件有关,该趋势在成熟期又大幅度下降。这应该主要是由于此时土壤中的氮素营养已被消耗殆尽,降低了土壤中亚硝酸还原酶的反应底物。

2.3.3 脲酶

研究表明,脲酶因对土壤有机质中碳-氮键(CO-NH)的水解作用而在土壤氮素循环中具有重要的作用,与土壤肥力指标有较好的相关性^[16]。小麦不同生育期脲酶活性动态变化见图 3,与播种前相比,土壤中各处

理的脲酶活性均减小,耕层土壤中脲酶活性呈现先降低后升高再降低的趋势。脲酶活性的这一规律,主要是由于气温和土壤有机态氮素的变化所造成,其活性在收获期达到最低,且不同处理间土壤脲酶活性并无显著差异。

2.4 不同氮肥处理对土壤微生物量的影响

2.4.1 微生物量碳

土壤微生物量碳的消长反映微生物利用土壤碳源进行自身细胞建成并大量繁殖以及微生物细胞解体使有机碳矿化的过程^[17],在一定程度上可反映土壤微生物的种群数量大小及活性高低。同一处理不同时期的结果显示(图 4a),土壤中微生物量碳含量均经历了先升高后降低(至生育期最低点后)再小幅度上升的趋势,在冬小麦生育期内该指标波动范围较小,且均未达到差异显著水平,与 Wang 等^[18]的研究相似。整个波动过程中,各处理峰值出现的时间不同,CK、BC、AN 处理在越冬期时最高,而 CH、XF、FY 处理则均在拔节期含量达到最高。随着作物的生长发育和微生物的大量繁殖,有机碳逐渐被微生物利用而减少,全部处理于抽穗期骤降至生育期内最低值,而在成熟期小麦根系及残落物为土壤微生物的生存提供了丰富的养分和良好的生长环境,因此该时期又表现出小幅回升的趋势。

2.4.2 微生物量氮

土壤微生物量氮是活的微生物体内所含有的氮,含量较为稳定并决定于土壤氮素肥力的高低,其含量仅占土壤全氮的 3%~6%。根据图 4b,在土壤氮素营养供应充分且冬小麦需求量相对较少的苗期和越冬期,土壤中微生物量氮有所增加,意味着微生物对氮素的保护,可有效防止氮素的淋溶及挥发损失。在拔

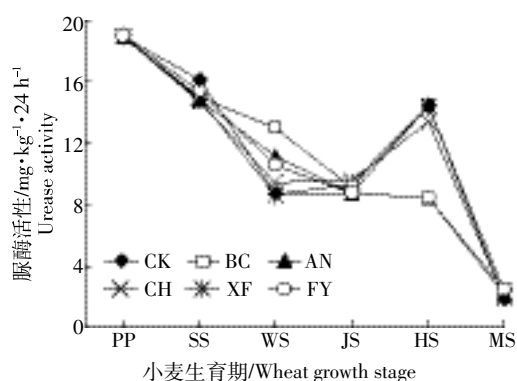


图3 不同处理对土壤脲酶活性的影响

Figure 3 Urease activity in different treatments

节期,作物对氮素的需求量迅速增加,微生物体内氮素开始释放出来供作物吸收利用,表现为该时期的CK、BC、AN处理微生物量氮含量降至最低点,之后随着作物的成熟收获及土壤中植株残落物的腐化,其含量又出现上升的趋势,但波动范围较小。与之不同的CH、FY处理,越冬期和拔节期均较苗期的微生物量氮有所提高,并在拔节期达到最高,且较其他四个处理达到差异显著水平;XF处理则在抽穗期达到最高,此时与其他处理差异显著。就冬小麦整个生育时期而言,所有处理对微生物量氮的影响规律不明显。本文结果与 McGill 等^[19]得到的施肥与不施肥相比微生物量氮无显著差异的结果相似。

3 讨论

3.1 生物炭基氮肥的田间养分释放

现有新型肥料多以控释肥为主,通过包膜或涂层以控制氮素养分的释放,可以达到较为理想的效果。与之不同的是,生物质炭基氮肥对硝酸铵的负载作用

是依靠静电引力或化学键的物理吸附,甚至有些肥料晶体只是附着在生物质炭的表面,因而所复合的炭基氮肥缓释效果有限。

前期室内试验中对炭基氮肥进行的研究显示^[20],制备工艺不同,养分释放特征存在差异,应用反应工艺制备的炭基氮肥对氮素养分的吸持作用要显著大于吸附工艺和掺混工艺。与室内试验中模拟的氮素释放规律不同,田间试验中不同类型肥料的养分释放并没有显著差异。作物根系与土壤中的各种微生物及酶之间存在复杂的互作效应^[21],使得不同类型炭基氮肥中氮素的释放受到生物化学循环过程的影响而不同于相对简单土壤环境条件下的释放规律。田间条件下,生物炭基氮肥氮素释放过程的影响效应还有待于进一步研究,制备工艺也需要相应的改进。

3.2 土壤微生物活性与不同形态氮素含量的关系

土壤中累积的 NO_3^- -N 含量增高时,反硝化作用会增强,导致硝酸还原酶的活性提高^[22],而施用生物炭能促进与 N 素利用相关的一系列酶的活性^[23]。通过对田

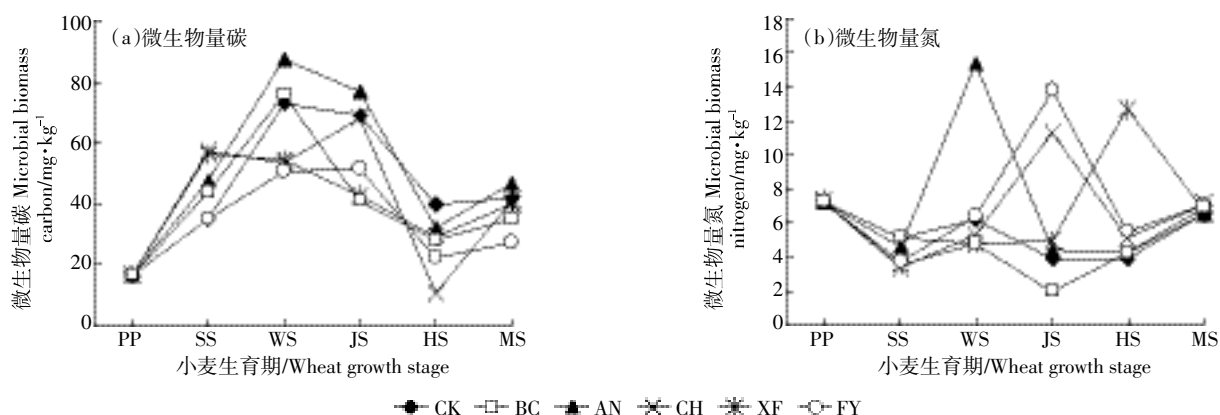


图 4 不同处理对微生物量碳、氮的影响

Figure 4 Soil microbial biomass C and N in different treatments

表 4 相关生物活性与速效氮含量相关性分析

Table 4 Correlation coefficients between biological activities and available nitrogen ($n=120$)

相关系数	脲酶	硝酸还原酶	亚硝酸还原酶	微生物量碳	微生物量氮	硝态氮	铵态氮	亚硝态氮
硝酸还原酶	0.27							
亚硝酸还原酶	-0.03	-0.51**						
微生物量碳	0.04	0.18	-0.40*					
微生物量氮	-0.17	-0.27	-0.02	0.23				
硝态氮	0.33	0.64**	-0.32	0.47**	0.22			
铵态氮	-0.03	0.52**	-0.32	0.19	0.04	0.63**		
亚硝态氮	0.46**	0.1	0.34	0.34	0.11	0.63**	0.23	
速效氮	0.31	0.64**	-0.33	0.46**	0.2	1.00**	0.65**	0.61**

注: * $P<0.05$, ** $P<0.01$ 。

间120个土壤样本的相关微生物、酶与速效氮进行相关分析(表4)也发现,硝酸还原酶、微生物量碳与速效氮的相关性均达到了极显著水平(相关系数分别为0.64、0.46)。但由于不同炭基氮肥的田间氮素释放没有显著差异,且生物炭的田间施用量远小于上述研究的施用量,不同炭基氮肥对土壤生物活性的影响也不显著。

土壤硝酸还原酶活性处于高水平时,可催化生成较多的 $\text{NO}_2\text{-N}$,能够为亚硝酸还原酶提供反应底物而提高其活性^[24]。田间试验中硝酸还原酶与亚硝酸还原酶呈极显著负相关($r=-0.51^{**}$),表现出相反的规律,可能与土壤水分、温度及有机质的矿化过程有关,还需要进一步的研究。在小麦生育期内,土壤硝酸还原酶、亚硝酸还原酶及微生物量均表现出明显的季节变化规律,只是其活性在生育期内波动峰值出现的时期不同。出现该现象的原因比较复杂,作物生长发育的根系分泌物含量、土壤微生物活性及酶活性之间存在强烈的互作效应,进而影响根系对土壤中不同形态速效氮的吸收,影响土壤养分的循环与转化。

4 结论

(1)相较于对照(CK、BC),施氮处理显著提高了土壤中速效氮的累积量,且均呈现出先升高后降低的趋势;施氮条件下的冬小麦氮素累积量显著增加,籽粒中的氮素累积与植株总氮累积量呈极显著正相关($r=0.95^{**}$);施用不同类型生物炭基氮肥的土壤铵态氮累积量具有显著性差异,但对冬小麦的氮素利用状况无显著影响。

(2)不同类型生物炭基氮肥的施用对土壤微生物氮含量和硝酸还原酶活性具有提高作用,但对微生物碳含量、亚硝酸还原酶和脲酶活性没有显著影响。相同处理不同时期的土壤生物活性则表现出明显的季节变化规律,呈现先升高后降低的趋势。土壤中的硝酸还原酶、亚硝酸还原酶及微生物量碳、氮与速效氮之间有显著相关关系。

(3)本研究中,生物炭基氮肥在田间的施用效果不明显,主要与炭基氮肥的制备工艺有关,因此在未来研究中应进一步完善工艺制备过程,拟改进工艺可从两个方面进行:一是将生物质原料进一步加工,并通过在制备过程中施加压力,再延长其平衡时间从而使得生物质炭更彻底地吸附硝酸铵;二是以磨成粉末状的生物质炭作为包裹材料,制备生物质炭包膜控释肥,以提高肥料利用率。

参考文献:

- [1] 何绪生,张树清,余 雕,等.生物炭对土壤肥料的作用及未来研究[J].中国农学通报,2011,27(15):16-25.
HE Xu-sheng, ZHANG Shu-qing, SHE Diao, et al. Effects of biochar on soil and fertilizer and future research[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2011, 27(15): 16-25.
- [2] 钟雪梅,朱义年,刘 杰,等.竹炭包膜对肥料氮淋溶和有效性的影响[J].农业环境科学学报,2006,25(增刊):154-157.
ZHONG Xue-mei, ZHU Yi-nian, LIU Jie, et al. Influence of bamboo-charcoal coating on N leaching and effectiveness of fertilizers[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2006, 25(Suppl): 154-157.
- [3] Magrini-Bair K A, Czernik S, Pilath H M, et al. Biomass derived, carbon sequestering, designed fertilizers[J]. *Annals of Environmental Science*, 2009, 3: 217-225.
- [4] 和文祥,魏燕燕,蔡少华.土壤反硝化酶活性测定方法及影响因素研究[J].西北农林科技大学学报:自然科学版,2006,34(1):121-124.
HE Wen-xiang, WEI Yan-yan, CAI Shao-hua. Study on assaying method and affecting factors of soil denitrification enzyme activity[J]. *Journal of Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forestry (Nat Sci Ed)*, 2006, 34(1): 121-124.
- [5] 薛 东,姚槐应,何振立,等.红壤酶活性与肥力的关系[J].应用生态学报,2005,16(8):1455-1458.
YAO Dong, YAO Huai-ying, HE Zhen-li, et al. Relationships between red soil enzyme activity and fertilizer[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005, 16(8): 1455-1458.
- [6] 和文祥,孙会明,朱明茂.汞镉对游离和固定化脲酶活性的影响[J].土壤学报,2003,40(6):946-951.
HE Wen-xiang, SUN Hui-ming, ZHU Ming-mao. Effects of Hg and Cd on free and immobilized urease activity[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2003, 40(6): 946-951.
- [7] 俞 慎,李振高.薰蒸提取法测定土壤微生物量研究进展[J].土壤学进展,1994,22(6):42-50.
YU Shen, LI Zhen-gao. Research progress of fumigation extraction method for the determination of soil microbial biomass[J]. *Progress in Soil Science*, 1994, 22(6): 42-50.
- [8] 武志杰,隗英华,陈利军,等.一种检测土壤硝酸还原酶活性的分析方法:中国,101271060A[P].2008-09-24.
WU Zhi-jie, JUAN Ying-hua, CHEN Li-jun, et al. A method of detecting soil nitrate reductase activity: China, 101271060A[P]. 2008-09-24.
- [9] 武志杰,孙志梅,张丽莉.一种检测土壤亚硝酸还原酶活性的分析方法:中国,1979134A[P].2007-06-13.
WU Zhi-jie, SUN Zhi-mei, ZHANG Li-li. A method of detecting soil nitrite reductase activity: China, 1979134A[P]. 2007-06-13.
- [10] 关松荫.土壤酶及其研究法[M].北京:农业出版社,1987.
Guan Song-yin. Soil enzymes and its methodology[M]. Beijing: Agricultural Press, 1987.
- [11] 鲁如坤.土壤农业化学分析方法[M].北京:农业出版社,1999:105-175.
LU Ru-kun. Agricultural chemistry analysis methods of soil[M]. Beijing: Agricultural Press, 1999: 105-175.

- [12] 易镇邪, 王璞. 包膜复合肥对夏玉米产量、氮肥利用率与土壤速效氮的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2007, 13(2): 242-247.
- YI Zhen-xie, WANG Pu. Effect of coated compound fertilizer on yield, nitrogen use efficiency and soil available nitrogen in summer maize[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2007, 13(2): 242-247.
- [13] 陈贤友, 吴良欢, 韩科峰, 等. 包膜尿素和普通尿素不同掺混比例对水稻产量与氮肥利用率的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(4): 918-923.
- CHEN Xian-you, WU Liang-huan, HAN Ke-feng, et al. Effects of different mixture rates of coated urea and prilled urea on rice grain yield and nitrogen use efficiency[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2010, 16(4): 918-923.
- [14] 朱兆良, 文启孝. 中国土壤氮素[M]. 南京: 江苏科技出版社, 1992.
- ZHU Zhao-liang, WEN Qi-xiao. Nitrogen in soil of China[M]. Nanjing: Jiangsu Science Press, 1992.
- [15] 王苏平, 辉建春, 林立金, 等. 施肥制度对川中丘陵区玉米不同生育期土壤反硝化酶活性的影响[J]. 水土保持研究, 2012, 19(3): 274-283.
- WANG Su-ping, HUI Jian-chun, LIN Li-jin, et al. Effects of fertilizer system on soil denitrification enzyme activity at different growth stage of maize in hilly regions of middle Sichuan[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2012, 19(3): 274-283.
- [16] 李东坡, 武志杰, 陈利军, 等. 长期培肥黑土脲酶活性动态变化及其影响因素[J]. 应用生态学报, 2003, 14(12): 2208-2212.
- LI Dong-po, WU Zhi-jie, CHEN Li-jun, et al. Dynamics of urease activity in a long-term fertilized black soil and its affecting factors[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003, 14(12): 2208-2212.
- [17] 王继红, 刘景双, 于君宝, 等. 氮磷肥对黑土玉米农田生态系统土壤微生物量碳氮的影响[J]. 水土保持学报, 2004, 18(1): 35-38.
- WANG Ji-hong, LIU Jing-shuang, YU Jun-bao, et al. Effect of fertilizing N and P on soil microbial carbon and nitrogen of black soil corn agroecosystem[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2004, 18(1): 35-38.
- [18] Wang Z M, Zhu P L, Huang M D, et al. Straw carbon decomposition in situ in field and characteristics of soil biomass carbon turnover[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2003, 40(3): 446-453.
- [19] McGill W B, Camnon K R, Robertson J A, et al. Dynamic of soil microbial biomass and water soluble organic C in Breton L after 50 years of cropping to two rotations[J]. *Canadian Journal of Soil Science*, 1986, 66: 1-19.
- [20] 张雯, 耿增超, 何绪生, 等. 生物质炭基氮肥中试制备工艺及特性分析[J]. 农业机械学报, 2014, 45(3): 129-133, 147.
- ZHANG Wen, GENG Zeng-chao, HE Xu-sheng, et al. Pilot preparation technology and properties of new biochar-based nitrogenous fertilizers[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2014, 45(3): 129-133, 147.
- [21] 张妹婷. 石灰性土壤中不同硝化抑制剂的抑制效果及其机理探讨[D]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2010.
- ZHANG Mei-ting. The study of inhibitory effect and mechanism of different nitrification inhibitors in calcareous soil[D]. Xianyang: Northwest A&F University, 2010.
- [22] 雍太文, 杨文钰, 向达兵, 等. 不同种植模式对土壤氮素转化及酶活性的影响[J]. 应用生态学报, 2011, 22(12): 3227-3235.
- YONG Tai-wen, YANG Wen-yu, XIANG Da-bing, et al. Effects of different planting modes on soil nitrogen transformation and related enzyme activities[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2011, 22(12): 3227-3235.
- [23] Lehmann J, Joseph S. Biochar for environmental management: Science and technology[M]. Oxford: Earthscan Publications Ltd., 2009.
- [24] Wang S Q, Han X Z, Qiao Y F, et al. Effects of land uses and fertilization systems on soil enzyme activities and nutrients[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2009, 15(6): 1311-1316.