



王楠, 徐俊平, 赵志伟, 等. 施氮水平对中温带典型白浆土微生物学特性的动态影响[J]. 华南农业大学学报, 2017, 38(2): 55-62.

施氮水平对中温带典型白浆土微生物学特性的动态影响

王楠¹, 徐俊平¹, 赵志伟², 徐伟宸¹, 王帅¹

(1 吉林农业科技学院 植物科学学院, 吉林 吉林 132101; 2 中国农业大学 农学院, 北京 100193)

摘要:【目的】结合玉米生育的关键时期,通过施氮水平的调控探究白浆土微生物学特性的规律变化。【方法】以玉米试验田为研究对象,通过不同施氮水平(0、150、200 和 250 kg·hm⁻²)的设置,研究中温带典型白浆土微生物生物量碳、氮以及脲酶、碱性磷酸酶、蛋白酶和过氧化氢酶活性对当季玉米生产过程不同施氮水平的动态响应。【结果】尿素的施入能够在玉米苗期激活释放脲酶相关的微生物,使脲酶活性增强,其作为底物,较低用量更易获得玉米拔节期较高的脲酶活性;在玉米苗期,施氮量增加有利于碱性磷酸酶活性的提升;随玉米的生长,施氮使碱性磷酸酶活性明显下降,不施氮反而会使该酶活性有所提升;尿素添加在起初阶段并不利于过氧化氢酶活性的改善,但随玉米的生长,不同施氮水平下过氧化氢酶活性均呈增加趋势;在玉米苗期,随施氮水平增加,蛋白酶活性也增加,但当施氮量增至 250 kg·hm⁻²时,蛋白酶活性有所降低;当玉米成熟后,不施氮和低量施氮更有利于蛋白酶活性的提升。尿素基施能够在玉米苗期降低微生物生物量碳(MBC)的水平,但随玉米的生长,施氮有利于 MBC 的保蓄和稳定;不施氮或过量施氮均有助于白浆土微生物生物量氮(MBN)的提升,而适量供氮则更利于其周转,向植物可利用的方向转化。【结论】集中过量施用尿素不利于土壤生物肥力的保蓄,综合考虑玉米产量及培肥效应,白浆土适宜的氮素用量应为 200 kg·hm⁻²。

关键词:施氮量;白浆土;酶活性;微生物生物量

中图分类号:S154.2; S158.5

文献标志码:A

文章编号:1001-411X(2017)02-0055-08

Effects of nitrogen application levels on microbiological characteristics of typical Albic soil in mid-temperate zone

WANG Nan¹, XU Junping¹, ZHAO Zhiyi², XU Weichen¹, WANG Shuai¹

(1 College of Plant Science, Jilin Agricultural Science and Technology University, Jilin 132101, China;

2 College of Agricultural Sciences, China Agricultural University, Beijing 100193, China)

Abstract:【Objective】To study changes in microbiological characteristics of Albic soil by regulating nitrogen application levels during the critical periods of maize growth. 【Method】Different levels of nitrogen (0, 150, 200 and 250 kg·hm⁻²) were applied to the maize field. The dynamic changes in the microbial biomass carbon, microbial biomass nitrogen and the activities of urease, alkaline phosphatase, protease and catalase from typical Albic soil in mid-temperate zone of eastern China under different nitrogen levels during the maize production process were studied. 【Result】Urea application increased urease activity in Albic soil at seedling stage by activating microorganisms related with urease release. Higher nitrogen level increased alkaline phosphatase activity at seedling stage. With the growth of maize, phos-

收稿日期:2016-05-17 优先出版时间:2017-01-10

优先出版网址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/44.1110.s.20170110.1423.016.html>

作者简介:王楠(1982—),女,讲师,博士,E-mail: wangnan664806@126.com; 通信作者:王帅(1982—),男,副教授,博士,E-mail: wangshuai419@126.com

基金项目:吉林省教育厅“十二五”科学技术研究项目(吉教科合字[2015]第375号);吉林农业科技学院博士启动基金(吉农院合字[2016]第B03号);吉林农业科技学院青年基金(吉农院合字[2015]第206号);吉林农业科技学院重点学科培育项目(吉农院合字[2015]第X006号)

phatase activity clearly decreased under different nitrogen levels, however, phosphatase activity increased with no nitrogen added. Urea addition at the initial stage was not beneficial for the improvement of catalase activity, but with the growth of maize, catalase activity increased under different nitrogen levels. At seedling stage, protease activity increased with the increase of nitrogen level, but decreased when the nitrogen level reached 250 kg · hm⁻². When the maize was mature, no nitrogen or low amount of nitrogen application was more beneficial for the improvement of protease activity. Urea as a base fertilizer reduced microbial biomass carbon (MBC) content at seedling stage, while with the growth of maize, nitrogen application helped the preservation and stability of MBC. No nitrogen or excessive nitrogen application increased microbial biomass nitrogen (MBN) content, while appropriate amount of nitrogen promoted MBN to turnover and convert into available nutrients for plants. 【Conclusion】The concentrated and excessive application of urea is not helpful to the preservation of soil biological fertility. Considering maize yield and soil fertility improvement, the appropriate amount of nitrogen application level in Albic soil is 200 kg · hm⁻².

Key words:nitrogen application level; Albic soil; enzyme activity; microbial biomass

氮肥是作物优质、高产、高效所必需的大量元素,但过量施氮会使氮肥利用效率降低,多余氮素进入地下水,间接对生态环境及人畜健康造成危害。因此,盲目施氮不仅造成作物产量不稳、土壤结构恶化,而且使农业生产成本增加^[1]。

土壤微生物学特性包括微生物生物量及酶活性,两者皆可作为评价土壤肥力的重要指标^[2]。土壤微生物生物量是指土壤中体积在 5 ~ 10 μm³ 范围内、活的微生物总量,是土壤生物性状中最为活跃、最易变化的因子,主要涵盖微生物生物量碳 (Microbial biomass carbon, MBC) 和微生物生物量氮 (Microbial biomass nitrogen, MBN) 2 项内容。土壤酶来自微生物、植物及动物的活体或残体,是土壤生态系统中一切生化过程得以顺利进行的保障^[3],其活性高低能准确反映土壤生物活性和生化反应的强度^[4],对于氮素施用的响应更加敏感,可作为土壤生产力和肥力质量评价的早期指标^[5]。Fatemi 等^[6] 研究认为,氮素供给能够调控微生物活性、酶的产率以及有机质的分解过程。Song 等^[7] 通过室内培养,研究了尿素及硝酸铵添加对脲酶及 MBC 的影响,结果表明,无论氮素形态如何,其添加均可引起脲酶及 MBC 的降低。隗英华等^[1] 采用田间试验和室内分析相结合的手段研究了春玉米土壤矿质氮累积量及氮代谢关键酶活性对施氮水平的响应,指出土壤脲酶和硝酸还原酶活性随施氮量增加而表现为先增加后降低的规律,峰值在玉米拔节期和抽雄期出现。

现阶段,关于施氮水平对于土壤生物肥力影响规律的探究多采用室内培养手段^[7],尽管大田试验对某一指标进行了详尽分析,但仍缺乏系统性。鉴于此,本研究基于不同施氮水平的玉米田,结合玉米生育的关键时期,系统分析白浆土微生物学特性对

施氮水平的动态响应,旨在探索玉米合理的施氮水平及施用时间,为玉米氮肥后移施用技术的推广奠定理论基础。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验地选在吉林农业科技学院北大地玉米试验田 (126°28'46.81"E, 43°57'37.80"N), 田块地势平坦、肥力均匀,土壤类型为白浆土,土壤质地为砂壤土,气候类型属于温带大陆性季风气候,四季分明。试验采取裂区设计,共设 4 个处理,每个处理 3 次重复,共计 12 个小区,小区宽 1.3 m、长 6 m,每个小区栽种玉米 40 株,玉米品种为先玉 335,区组间随机排列,氮、磷、钾肥分别由尿素、重过磷酸钙和硫酸钾提供,商品有机肥由吉九肥业有限公司提供。

1.2 试验设计

以尿素施用量为调控因素,有机肥及磷、钾肥用量一致 (商品有机肥 1.5 t · hm⁻², P₂O₅ 90 kg · hm⁻² + K₂O 80 kg · hm⁻²), 所用肥料均采取一次性底肥施入,玉米栽种及其他田间管理措施一致。试验共设 4 个施氮水平: 0、150、200、250 kg · hm⁻², 分别用 N-0、N-150、N-200、N-250 表示。5 月 8 日开始播种,结合玉米生育规律,分别在玉米苗期 (5 月 28 日)、拔节期 (6 月 26 日)、大喇叭口期 (7 月 11 日)、灌浆期 (8 月 25 日) 和成熟期 (10 月 20 日) 依照五点采样法在各小区进行土样收集,用四分法剔除多余部分,保留约 2 kg 土样,挑去石砾和植物残根等杂物,过 2 mm 筛,将一部分新鲜土样 (1 kg) 置于 4 ℃ 条件下冰箱保存,用于土壤 MBC、MBN 测定,另一部分土样 (1 kg) 经风干后用于土壤酶活性的测定。

1.3 测定项目及方法

1.3.1 土壤微生物生物量 土壤 MBN 和 MBC 的测定均采用三氯甲烷熏蒸-K₂SO₄ 浸提法^[8]。称取一定质量 4 ℃ 冰箱中保存的新鲜土样,分别在三氯甲烷熏蒸前、后用 K₂SO₄ 溶液浸提土壤,浸提液中有有机碳含量采用 K₂Cr₂O₇ 加热氧化、FeSO₄ 滴定法测定,氮含量采用半微量凯氏定氮法测定。所采用的计算公式:MBC(μg·g⁻¹) = E_C/K_C,其中,E_C 为未熏蒸与熏蒸土壤浸取有机碳含量的差值,K_C 为转换系数(取值 0.38);MBN(μg·g⁻¹) = E_N/K_N,其中,E_N 为熏蒸与未熏蒸土壤矿质态氮含量的差值,K_N 为转换系数(取值 0.45)。

1.3.2 土壤酶活性 脲酶活性以 NH₄⁺ - N 计,单位为 mg·g⁻¹·d⁻¹,采用苯酚钠-次氯酸钠比色法测定;碱性磷酸酶活性以酚计,单位为 mg·g⁻¹·d⁻¹,采用磷酸苯二钠比色法测定;过氧化氢酶活性以 0.1 mol·L⁻¹ 高锰酸钾的体积计,单位为 mL·g⁻¹·h⁻¹,采用高锰酸钾滴定法测定;蛋白酶活性以氨态氮计,单位为 mg·g⁻¹·d⁻¹,采用茚三酮比色法测定^[9]。

1.4 数据处理

用 Excel 2003 对数据进行整理,采用 SPSS 18.0 进行统计分析。采用单因素 ANOVA 分析和 Duncan's 多重极差检验法比较处理间差异。

2 结果与分析

2.1 施氮水平对土壤酶活性的动态影响

2.1.1 对脲酶活性的影响 脲酶是催化尿素水解的唯一酶,其活性变化与土壤氮素供应密切相关^[10]。如图 1a 所示,在玉米苗期,随施氮量增加,脲酶活性渐趋增加,这表明,在短期内,尿素施入能够激活释放脲酶相关的微生物,使该酶的活性增强,这与郭天财等^[11]所得结论“施氮水平提升可在一定程度上增强根际土壤脲酶活性”有相似之处。N-0 和 N-150 这 2 个处理条件下,脲酶随玉米生育期进行而表现为先升高后降低的规律,这与刘鹏涛等^[12]所得规律相似。N-200 和 N-250 这 2 个处理下的脲酶活性在苗期至拔节期略有下降,而后稳定在某一水平,然后在玉米灌浆期后直至成熟期,脲酶活性急剧降低。

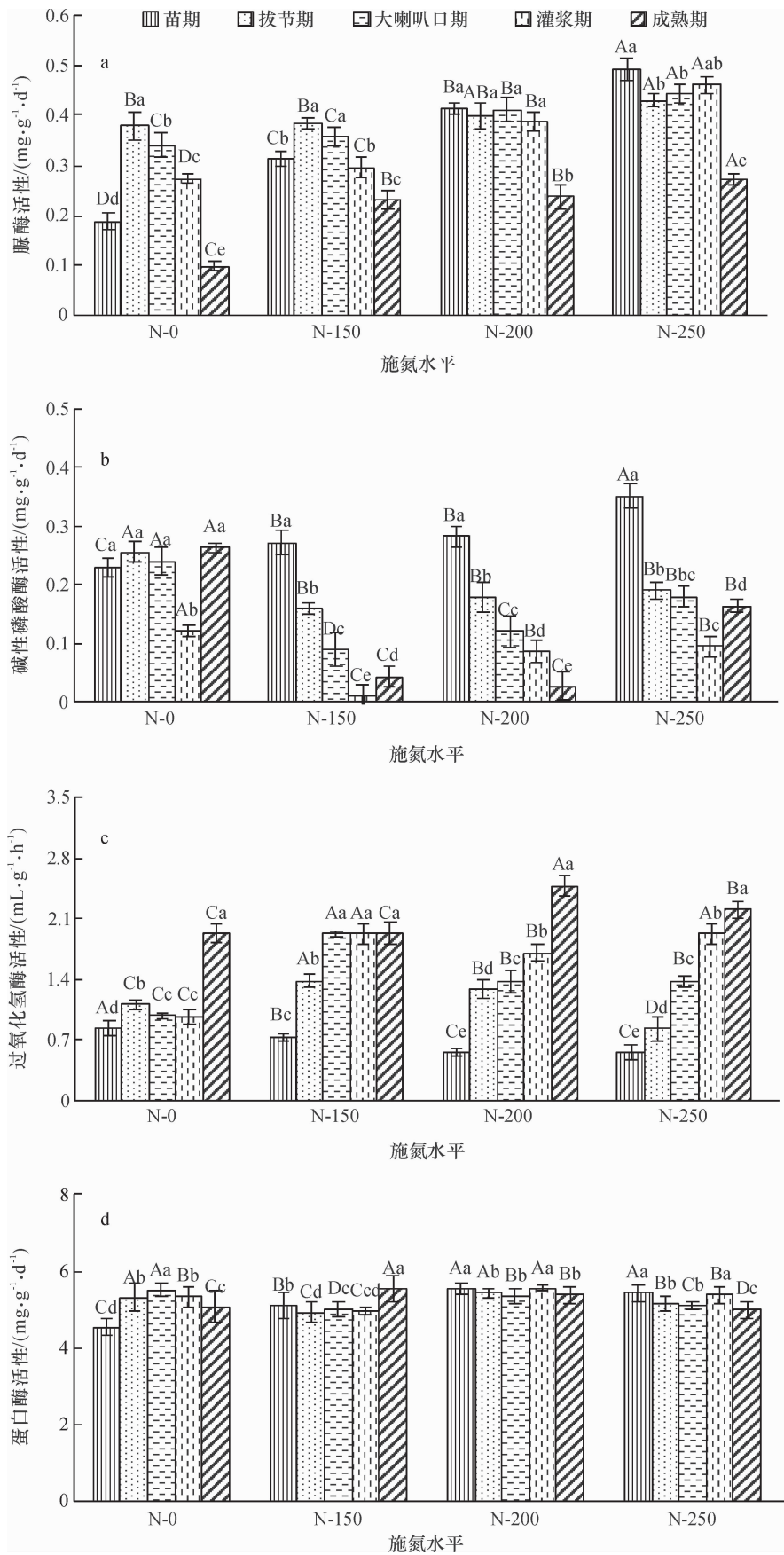
具体来看,N-0 和 N-150 这 2 个处理条件下脲酶活性在玉米拔节期迎来峰值,这与张俊丽等^[13]研究结果一致,可推断,尿素作为底物,较低用量更易获得较高脲酶活性,养分的迅速释放能够很好地解决玉米拔节期前供氮不足的问题,而在玉米大喇叭口期至成熟期阶段,经尿素转化的铵态氮除被利用外,

还有所流失,脲酶活性不断降低,甚至在后期出现玉米“脱肥”现象。而较高水平氮素用量的 2 个处理(N-200 和 N-250)则分别在玉米大喇叭口期和灌浆期仍保持较高的脲酶活性。可见,在一定范围内,氮素用量越大,土壤脲酶活性的作用时间越长。对比玉米苗期与成熟期间脲酶活性的结果可知,N-0、N-150、N-200 和 N-250 处理的脲酶活性降低幅度分别为 47.1%、26.2%、42.6% 和 44.7%,由此可见,不施氮处理的脲酶活性损失量要远高于其他供氮处理,氮素的适量供给能够稳定白浆土脲酶活性水平,相比较而言,150 kg·hm⁻² 的纯氮量更有利于降低脲酶活性的损失。

2.1.2 对碱性磷酸酶活性的影响 磷酸酶是促进有机磷化合物分解的酶类^[10],其可加速有机磷的脱磷速度,磷酸酶的活性对于土壤磷素有效性具有重要作用^[14]。如图 1b 所示,在玉米苗期,施氮量增加有利于碱性磷酸酶活性的提升,然而,随着玉米生育期的进行,各处理下碱性磷酸酶活性的变化规律不一。与不施氮的 N-0 处理相比,施氮处理条件下的碱性磷酸酶活性有明显的下降趋势,分析其原因,也许是因为氮肥施入能够改善碱性磷酸酶活性,而该成分的降解产物为无机磷,玉米在生育前期对无机磷的消耗较高,土壤磷素含量的降低使得碱性磷酸酶活性减弱,另外,有研究表明,磷、钾肥的施入也易造成磷酸酶活性的降低^[14]。

在玉米灌浆期,除 N-200 处理外,其余处理下的碱性磷酸酶活性均降至“谷底”,玉米灌浆期是需磷的第 2 高峰,此期土壤磷素消耗较大,间接抑制了磷酸酶的活性,焦晓光等^[15]研究认为,土壤处于缺磷状态,磷酸酶活性较低。而在玉米成熟期时,有效磷含量因玉米需求量少而得到全量磷素的补充,加之秋收季节水、气、热条件良好,产磷酸酶微生物活跃,再次提升了碱性磷酸酶的活性,在此过程中,N-200 处理下碱性磷酸酶活性表现为一直降低的趋势,最终降幅达到 9.1%,而 N-150 和 N-250 处理条件下的降幅分别为 8.4% 和 5.3%。相反,不施氮处理反而有助于碱性磷酸酶活性的增加,增幅达 4.8%,这可能是因为不施氮,土壤矿化程度较弱,腐殖化作用有所增强,尽管历经玉米生育期,但最终使碱性磷酸酶活性在稳定中有所增加。

2.1.3 对过氧化氢酶活性的影响 过氧化氢酶活性可以表征土壤腐殖化强度及有机质积累程度^[10]。作为土壤中物质和能量转化的一种氧化还原酶,其在一定程度上可以表征土壤生物氧化过程的强弱^[14]。如图 1c 所示,尽管不同施氮水平下的土壤过



各图中,相同生育期的柱子上方,凡是具有一个相同大写字母者,表示不同施氮处理间差异不显著 (Duncan' 法, $P > 0.05$);同一施氮处理的柱子上方,凡是具有一个相同小写字母者,表示不同生育期差异不显著 (Duncan' s 法, $P > 0.05$)。

图 1 施氮水平对玉米田土壤酶活性的动态影响

Fig.1 Dynamic effects of N application levels on the enzyme activities of soil from corn field

氧化氢酶活性变化规律有所不同,但整体均呈现增加的趋势。在玉米苗期,施氮条件下的白浆土过氧化氢酶活性均小于无氮处理,这表明,氮素施用后会对原有微生物间的生态平衡产生干扰作用,使过氧化氢酶活性受到抑制。而随着生育期进行,在拔节期,除较高水平施氮 N-250 处理外, N-150 和 N-200 的过氧化氢酶活性均得到大幅改善,腐殖化作用有所增强,而在玉米大喇叭口期以后,施氮处理条件下的过氧化氢酶活性均大于无氮处理。对比玉米苗期和成熟期,过氧化氢酶的活性均获提升, N-0、N-150、N-200 和 N-250 处理的增幅分别为 57.1%、62.3%、77.8% 和 75.0%。

可见,尿素添加尽管在起初阶段不利于白浆土过氧化氢酶活性的改善,但随着玉米的生长,根系分泌作用及土壤温度增加,微生物活性改善,也促进了土壤腐殖化强度,使得过氧化氢酶活性呈现增加的趋势。因施氮所引起过氧化氢酶活性的增加有利于催化土壤中的过氧化氢反应,使其残存的 H_2O_2 有效转化为 H_2O 和 O_2 ,从而避免了植物体内因 H_2O_2 浓度过高而发生的生理毒害^[16]。

2.1.4 对蛋白酶活性的影响 土壤蛋白酶能将各类蛋白质及肽类化合物水解为氨基酸,其活性与土壤氮素营养状况密切相关^[17]。如图 1d 所示,在玉米苗期,施氮条件下的土壤蛋白酶活性大于无氮处理,总体表现为随施氮量增加,蛋白酶活性也增加的规律,但当施氮量增加至 $250\text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时,蛋白酶活性有所降低。在苗期,氮素施入为微生物提供了较易利用的营养物质,间接提升了蛋白质及肽类化合物水解的速率,但过量施氮又对该过程有所抑制。随后,各处理条件下蛋白酶活性的动态变化规律有所不同, N-200 和 N-250 处理在玉米大喇叭口期白浆土蛋白酶活性降至谷底(仅为 $0.053\ 5$ 和 $0.051\ 2\text{ mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$),玉米在该期需肥量较大,外源氮素被利用或被淋失,均对蛋白酶活性产生不利影响, N-150 处理下蛋白酶活性的最低值出现在玉米拔节期,可见,少量供氮可提早使蛋白酶活性降至最低,此后,在玉米大喇叭口期,该酶活性略有增强,这也许是因为 $150\text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 的纯氮量无法满足玉米需肥高峰时对氮的需求,土壤一部分有机态氮转化为无机态氮而引起蛋白酶活性的增加所致,在玉米成熟期,低量氮供应使玉米底叶过早枯黄脱落,从而参与土壤碳素循环,间接改善了蛋白酶活性。 N-200 和 N-250 处理条件下的蛋白酶活性在玉米灌浆期再次得

到提升,这是由于玉米根系数量及有机分泌物增加,促进了微生物水解蛋白质类物质所致,而在玉米成熟期,随土壤温度降低,根系分泌能力大为削弱,微生物活性受到抑制,蛋白酶活性受制约而衰减。 N-0 处理没有外源氮素供应,白浆土蛋白酶活性波动幅度相对较大,在玉米苗期至大喇叭口期,随玉米需肥量增加,有机态氮不断向无机态氮转化,从而满足玉米生长需求,在此期间,蛋白酶活性由 $0.045\ 3\text{ mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ 增至 $0.055\ 1\text{ mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$,增幅达 17.8%。在玉米大喇叭口期后,玉米需氮程度渐趋平缓,且土壤有机态氮转化数量有限,蛋白酶活性逐渐降低,直至玉米成熟。对比玉米苗期及成熟期后白浆土蛋白酶活性可知,不施氮(N-0)和低量施氮(N-150)更有利于蛋白酶活性的提升,增幅分别为 10.6% 和 7.9%,而 N-200 和 N-250 这 2 个较高水平施氮则可稳定土壤有机态氮的转化效率,使蛋白酶活性稳定在较低水平。

2.2 施氮水平对土壤微生物生物量的动态影响

2.2.1 对微生物生物量碳(MBC)的影响 如图 2a 所示,在玉米苗期,与不施氮(N-0)处理相比,施氮的 3 个处理,其土壤 MBC 均有所降低。可推断,集中施氮可促使微生物活性急剧增加^[18],促进矿化作用,使其自身碳含量损失。另外,集中施氮亦会对土壤 pH 产生较大程度的瞬时影响,对微生物所处的生存环境构成威胁,通过对土壤团聚体造成短期破坏而使 MBC 有所降低,这一规律与于树等^[19]报道一致。随着玉米的生长,各施氮处理条件下 MBC 所表现的规律不一, N-0 和 N-150 处理下的 MBC 在玉米大喇叭口期达到峰值,而 N-200 和 N-250 处理则分别在拔节期和灌浆期达到 MBC 的峰值。通常,在拔节期以后的几个时期,水、热状况较好,微生物生长和繁衍速度较快,宋日等^[20]研究认为,气温升高可使留在土壤中的玉米根茬在分解前期释放更多的简单有机物,亦或玉米根系的分泌物和脱落物渐趋增加,为微生物繁殖提供充足的能源和营养源。作为活性有机营养库,微生物的快速更新可使 MBC 渐趋增加,而后,随气温的渐趋降低以及玉米生物量积累至恒值后, MBC 才逐渐稳定,较高水平施氮可使 MBC 的增高趋势延长至玉米成熟期。从数据波动的状况来看,不施氮的 N-0 处理,其 MBC 的波动幅度为 $26.0 \sim 41.6\ \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$,远大于其他施氮处理,这表明,氮肥施入有利于 MBC 的稳定,而不施氮肥,土壤 MBC 易受外界环境因素干扰,较易波动。对比玉米苗期和成

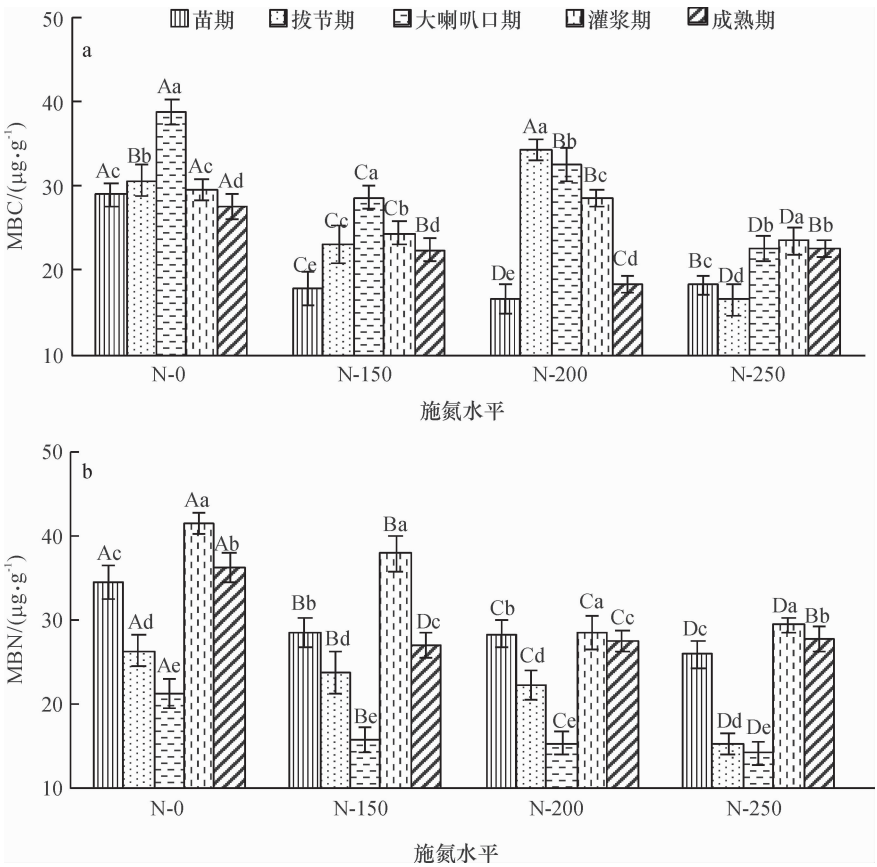
熟期 MBC 的变化可知,N-150、N-200 和 N-250 施氮处理的 MBC 增幅分别达 20.8%、9.6% 和 18.7%,而 N-0 处理下的 MBC 反而有 4.5% 的损失,这也说明,施氮有利于玉米田白浆土 MBC 的保蓄及稳定,其中,200 kg · hm⁻² 的施氮量更有利于 MBC 的转化。

2.2.2 对微生物生物量氮(MBN)的影响 如图 2b 所示,基于玉米苗期不同施氮水平,尽管处理间 MBN 的含量有所差异,但随玉米的生长,各处理 MBN 的波动规律具有相似性,均表现为先降低后增高再略有降低。在玉米整个生育期,N-0 处理下白浆土的 MBN 皆大于施氮处理。在玉米苗期至大喇叭口期,各处理条件下白浆土的 MBN 均呈明显的下降趋势,在该阶段,MBN 的矿化效率较高,缓慢释放无机氮素供植物利用。MBN 的基础含量能够表征土壤供氮能力大小^[21],在此过程氮素用量越大,MBN 越低,可见,一次性过量施氮对于白浆土中微生物保蓄氮素确有抑制作用。

而玉米大喇叭口期至灌浆期,各施氮水平下的

MBN 均获较大程度提升,这可能是因为此期土壤水、热条件适宜,玉米根系数量增多、分泌物增加而使微生物繁衍能力增强所致。在玉米成熟后,根系分泌作用减弱、气温降低,微生物活性也有所衰退,特别是不施氮和较低供氮水平下(N-0 和 N-150),白浆土的 MBN 有所下降,比照灌浆期结果,其降低幅度分别达 12.7% 和 29.0%,较高施氮水平的 2 个处理(N-200 和 N-250),其 MBN 基本稳定在灌浆期的水平,降低幅度仅为 3.5% 和 5.5%。

对比玉米苗期及成熟期白浆土 MBN 的前后差异可知,N-0 和 N-250 处理均有助于 MBN 的提高,增幅分别为 4.6% 和 6.4%,而 N-150 和 N-200 处理则对白浆土 MBN 有所消耗。可见,不施氮或过量施氮均有助于土壤 MBN 的提升,前者是因为矿化作用减弱而使 MBN 增加,而后者是因过量氮素迫使微生物蓄积更多氮素所导致,均不利于玉米的田间生产,因此,适量氮素既能确保玉米产量提升,同时增加 MBN,使更多活性氮素蓄积在土壤中。



各图中,相同生育期的柱子上方,凡是具有一个相同大写字母者,表示不同施氮处理间差异不显著 (Duncan's 法, $P > 0.05$);同一施氮处理的柱子上方,凡是具有一个相同小写字母者,表示不同生育期差异不显著 (Duncan's 法, $P > 0.05$)。

图 2 施氮对玉米田土壤微生物生物量的动态影响

Fig. 2 Dynamic effects of N application levels on the microbial biomass of soil from corn field

3 讨论与结论

3.1 对土壤酶活性的影响

玉米苗期,在 $0 \sim 250 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 的施氮范围,随氮素用量增加,白浆土中脲酶、碱性磷酸酶和蛋白酶活性均呈规律性增加,而较高施氮水平 ($250 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) 对蛋白酶活性有所抑制。杨丽娟等^[22]指出,土壤酶活性与微生物活性有显著相关关系,施用氮肥可促进土壤微生物活性^[23],因此,短期内尿素的供应可激活与土壤酶相关的微生物活性,然而,过量施用氮肥又会抑制一部分微生物的活性^[24]。

在 N-0 和 N-150 这 2 个处理条件下,脲酶活性在玉米拔节期达到峰值,此期,玉米对氮素的吸收速率最大^[23],可推断,尿素作为底物,较低氮素用量更易获得较高的脲酶活性,促进养分的迅速释放,间接缓解玉米拔节期供氮不足的问题^[25-27];在玉米苗期过后,施氮处理下的碱性磷酸酶活性均有下降趋势,这表明,氮肥施入尽管能改善磷酸酶活性,但释磷作用恰逢玉米需磷高峰,土壤无机磷含量的减少使碱性磷酸酶活性受到削弱。在玉米灌浆期至成熟期,除 N-200 处理外,其余 2 个施氮处理下碱性磷酸酶活性均有所回升,这是因为灌浆期是玉米吸磷的第 2 高峰,当土壤供磷能力无法满足玉米生长需要时,其根系就会释放更多磷酸酶以促进土壤有机磷化合物的水解转化^[28]。同比之下,不施氮处理,白浆土矿质化程度较弱,腐殖化作用有所改善,除在灌浆期由于玉米需磷程度较大对白浆土磷酸酶活性有所减弱外,其他生育期均可促使碱性磷酸酶活性稳中有增。

在玉米苗期,施氮处理下白浆土过氧化氢酶活性皆小于无氮处理,氮肥施用使土壤酸化程度加剧,间接抑制了过氧化氢酶活性。随着玉米生育期的延续,施氮处理下过氧化氢酶活性均有不同程度提升,可以推断,施氮有利于腐殖化程度的提升,间接改善过氧化氢酶的活性^[29],促进了植株对其体内 H_2O_2 的分解,有利于防止 H_2O_2 对生物体的毒害作用,在此过程中, $200 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 施氮处理的效果最佳。对比玉米生育期起始和终了阶段,不施氮和低量施氮 ($150 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) 均有利于白浆土蛋白酶活性的提升,而 200 和 $250 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 这 2 个较高水平的供氮处理则更有益于稳定白浆土有机态氮的转化效率,间接使蛋白酶活性保持在较低水平。

3.2 对微生物生物量的影响

在玉米苗期,与不施氮相比,施氮处理能够有效降低 MBC 和 MBN 的水平,这表明尿素的集中施用一方面能增加微生物矿化作用而使 MBC 降低,另一

方面对微生物产生瞬时的生理毒害,使 MBN 减少,可见,一次性施用较大的尿素对于白浆土微生物保蓄碳、氮的能力确有抑制。随玉米生育期进行,基于不同施氮水平,白浆土 MBC 和 MBN 的变化规律不一。

在玉米拔节期过后,水热状况良好,微生物增殖速度较快,成为活性有机营养库,使 MBC 逐渐增加,而后,随气温降低以及玉米生物量积累至恒值后, MBC 趋于稳定,较高水平施氮可使 MBC 的增高趋势延长至玉米成熟期以后,整体来看,施氮有利于白浆土 MBC 的保蓄和稳定,其中, $200 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 施氮量更有利于 MBC 的转化。

对比玉米苗期及成熟期白浆土 MBN 的变化可知,不施氮或过量施氮 ($250 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) 皆有利于白浆土 MBN 的蓄积,矿质化作用减弱以及过量氮素胁迫是该规律产生的主要原因,两者皆不利于玉米生产,而适量供氮 (150 和 $200 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) 则更利于微生物氮素向植物可利用的方向转化,综合考虑,适量氮素 ($200 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) 既能保障玉米产量又能增加 MBN,使更多活性氮素蓄积于白浆土中。

参考文献:

- [1] 隗英华,孙文涛,韩晓日,等. 春玉米土壤矿质氮累积及酶活性对施氮的响应[J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(6): 1368-1377.
- [2] WANG R, DORODNIKOV M, YANG S, et al. Responses of enzymatic activities within soil aggregates to 9-year nitrogen and water addition in a semi-arid grassland[J]. Soil Biol Biochem, 2015, 81: 159-167.
- [3] 曹慧,孙辉,杨浩,等. 土壤酶活性及其对土壤质量的指示研究进展[J]. 应用与环境生物学报, 2003, 9(1): 105-109.
- [4] DE LA PAZ JIMENEZ M, DE LA HORRA A, PRUZZO L, et al. Soil quality: A new index based on microbiological and biochemical parameters[J]. Biol Fertil Soil, 2002, 35(4): 302-306.
- [5] PIOTROWSKA A, WILCZEWSKI E. Effects of catch crops cultivated for green manure and mineral nitrogen fertilization on soil enzyme activities and chemical properties[J]. Geoderma, 2012, 189/190: 72-80.
- [6] FATEMI F R, FERNANDEZ I J, SIMON K S, et al. Nitrogen and phosphorus regulation of soil enzyme activities in acid forest soils[J]. Soil Biol Biochem, 2016, 98: 171-179.
- [7] SONG Y Y, SONG C C, TAO B X, et al. Short-term responses of soil enzyme activities and carbon mineralization to added nitrogen and litter in a freshwater marsh of North-east China[J]. Eur J Soil Biol, 2014, 61: 72-79.

- [8] 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,1999.
- [9] 关松荫. 土壤酶学研究方法[M]. 北京:中国农业出版社,1986.
- [10] 刘建新. 不同农田土壤酶活性与土壤养分相关关系研究[J]. 土壤通报,2004,35(4):523-525.
- [11] 郭天财,宋晓,马冬云,等. 氮素营养水平对小麦根际微生物及土壤酶活性的影响[J]. 水土保持学报,2006,20(3):129-131.
- [12] 刘鹏涛,赵如浪,冯佰利,等. 黄土高原春玉米田不同耕作处理土壤酶活性的变化[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版),2010,38(7):54-58.
- [13] 张俊丽,高明博,温晓霞,等. 不同施氮措施对旱作玉米地土壤酶活性及 CO₂ 排放量的影响[J]. 生态学报,2012,32(19):6147-6154.
- [14] 孙瑞莲,赵秉强,朱鲁生,等. 长期定位施肥对土壤酶活性的影响及其调控土壤肥力的作用[J]. 植物营养与肥料学报,2003,9(4):406-410.
- [15] 焦晓光,魏丹,隋跃宇. 长期施肥对黑土和暗棕壤土壤酶活性及土壤养分的影响[J]. 土壤通报,2011,42(3):698-703.
- [16] QIU X K, DONG Y J, WAN Y S. Effects of different fertilizing treatments on contents of soil nutrients and soil enzyme activity[J]. Soils, 2010, 42(2):249-255.
- [17] 陈文婷,付岩梅,隋跃宇,等. 长期施肥对不同有机质含量农田黑土土壤酶活性及土壤肥力的影响[J]. 中国农学通报,2013,29(15):78-83.
- [18] ZHANG X, DONG W, DAI X, et al. Responses of absolute and specific soil enzyme activities to long term additions of organic and mineral fertilizer[J]. Sci Total Envir, 2015, 536:59-67.
- [19] 于树,汪景宽,王鑫,等. 不同施肥处理的土壤肥力指标及微生物碳、氮在玉米生育期内的动态变化[J]. 水土保持学报,2007,21(4):137-140.
- [20] 宋日,吴春胜,牟金明,等. 玉米生育期内土壤微生物量碳和酶活性动态变化特征[J]. 吉林农业大学学报,2001,23(2):13-16.
- [21] 李东坡,陈利军,武志杰,等. 不同施肥黑土微生物量氮变化特征及相关因素[J]. 应用生态学报,2004,15(10):1891-1896.
- [22] 杨丽娟,须晖,邱忠祥,等. 菜田土壤酶活性与黄瓜产量的关系[J]. 植物营养与肥料学报,2000,6(1):113-116.
- [23] 刘善江,夏雪,陈桂梅,等. 土壤酶的研究进展[J]. 中国农学通报,2011,27(21):1-7.
- [24] 马冬云,郭天财,宋晓,等. 尿素施用量对小麦根际土壤微生物数量及土壤酶活性的影响[J]. 生态学报,2007,27(12):5222-5228.
- [25] 王冬梅,王春枝,韩晓日,等. 长期施肥对棕壤主要酶活性的影响[J]. 土壤通报,2006,37(2):2263-2267.
- [26] 孙甜田,范作伟,彭畅. 长期定位施肥对玉米生育期内土壤酶活性的影响[J]. 玉米科学,2015,23(3):112-118.
- [27] 兰宇,韩晓日,杨劲峰,等. 长期不同施肥棕壤玉米地酶活性的时空变化[J]. 植物营养与肥料学报,2011,17(5):1197-1204.
- [28] 孙瑞莲,赵秉强,朱鲁生,等. 长期定位施肥田土壤酶活性的动态变化特征[J]. 生态环境,2008,17(5):2059-2063.
- [29] 罗来超,吕静霞,魏鑫,等. 氮肥形态对小麦不同生育期土壤酶活性的影响[J]. 干旱地区农业研究,2013,31(6):99-102.

【责任编辑 李晓卉】