

华北平原 4 种主要农作物非根际和根际土壤活性碳氮和酶活性特征

王温澎, 邵云, 李英臣, 谷雪维, 曹丽茹, 位姗姗, 上官鑫彦, 朱瑞

(河南师范大学 生命科学学院, 河南 新乡 453007)

摘要:以两种豆科作物(大豆和花生)和两种非豆科作物(玉米和甘薯)为研究对象,对比研究不同作物非根际土和根际土无机氮、微生物量碳氮含量及与活性碳氮转化有关的酶活性的季节变化特征.结果表明:不同生长期内豆科作物根际土铵态氮和硝态氮含量显著高于非豆科作物;玉米生长季内非根际土硝态氮含量显著高于根际土,其他 3 种作物非根际土硝态氮含量小于根际土;4 种作物根际土微生物量碳(MBC)含量显著高于非根际土,根际土微生物量氮(MBN)在苗期显著高于非根际土;作物非根际土铵态氮与硝态氮和蔗糖酶存在显著负相关关系;非根际土硝态氮与蔗糖酶、脲酶和 β -葡萄糖苷酶活性存在显著正相关关系;根际土铵态氮和硝态氮与 MBC, MBN、蔗糖酶、 β -葡萄糖苷酶都存在显著正相关关系.

关键词:华北平原;根际土;无机氮;MBC;MBN;酶活性

中图分类号:S158.3

文献标志码:A

根际是植物、土壤、微生物共同影响的特殊生态区域,也是植物与土壤环境最紧密的接触面,对环境变化极为敏感;植物通过根系分泌物,根系凋落物等影响根际土壤特征,进而对整个土壤理化性质产生影响.不同作物种类根际土壤理化性质、微生物量及酶活性存在明显不同,且不同指标之间存在一定的相关关系^[1].在现有研究报道中,大多研究主要集中在自然生态系统,主要是针对不同植物和植被类型根际和非根际土的土壤微生物活性和群落组成、酶活性及营养元素含量之间相关关系及土壤肥力状况进行了综合评价^[1-4],对农田生态系统的研究主要集中在施肥和轮作等措施对单种作物根际土和非根际土壤理化性质及酶活性的影响^[5-11],而对不同作物生长季内非根际土和根际土活性碳氮组分及相关酶活性的研究相对较少.豆科植物在改良土壤肥力、保持水土方面功能显著,现在有关豆科植物对根际土壤微生物种群结构、酶活性及根瘤菌等土壤微生物特性的影响已进行了大量研究^[12-14],而豆科作物与非豆科作物生长季内对比研究还较少见.华北平原是我国重要粮食主产区,其中冬小麦和夏玉米产量分别占全国产量的 50%和 33%^[15],此区域农业的可持续发展对保证我国粮食安全具有重要意义.长期的麦玉复种模式导致该区域农田土壤环境破坏、土壤养分失衡、耕层肥力下降,对外源化肥投入要求量大等问题,科学合理的轮作措施是解决这些问题的有效措施之一.因此,加强豆科作物与非豆科作物在活性碳氮组分及相关酶活性变化特征的研究,有利于进一步了解固氮作物在营养利用、改善微生物等方面的作用,为选择不同的作物进行轮作、改善土壤肥力提供基础数据.

因此,本研究选取河南省获嘉县典型的两熟农田,以玉米、甘薯、大豆和花生 4 种作物作为研究对象,研究不同作物生长季内根际和非根际土壤无机氮营养含量、MBC, MBN 及相关酶活性变化,并对不同指标的相互关系进行探讨,以期进一步了解不同农作物对农田土壤性质和肥力的影响,为制定合理的轮作模式和施肥措施提供科学依据.

收稿日期:2017-12-11; **修回日期:**2018-06-01.

基金项目:国家重点研发计划(2016YFD0300203-3);国家自然科学基金青年基金项目(41601534);河南省教育厅科学技术研究重点项目(17A180027).

作者简介:王温澎(1992-),男,河南焦作人,河南师范大学硕士研究生,研究方向:农田土壤碳氮循环研究, E-mail: 1833213126@qq.com.

通信作者:李英臣(1982-),男,山东聊城人,河南师范大学讲师,博士,研究方向:土壤碳氮循环相关研究, E-mail: xi-ayuchen211@163.com.

1 研究地区与实验方法

1.1 研究区概况

试验点位于河南省获嘉县西彰仪村(35°17'N, 113°39'E)。该区域气候属暖温带大陆性季风气候, 年均气温 14.6 °C, 年均日照时数 2 058 h, 年均降雨量 557 mm, 无霜期 221 d。海拔高度 120 m, 地势平坦, 土壤肥沃, 土壤质地为轻壤土, 表层土壤(0~20 cm)基本理化性质如下: 有机质 34.64 g · kg⁻¹、全氮 0.97 g · kg⁻¹、速效磷 2.85 mg · kg⁻¹、速效钾 167.3 mg · kg⁻¹、pH 值 7.85(水土比 5 : 1)。

1.2 试验设计

试验于 2016 年 6 月冬小麦收获后开始, 试验选取 4 种作物, 分别为玉米、大豆、花生和甘薯。其中玉米为常规夏季种植作物, 花生和大豆为豆科固氮植物, 甘薯为另一种该区域种植的耗地作物。供试品种分别是: 玉米为‘洛单 248’, 大豆为‘驻豆 11’, 花生为‘鲁花 10’, 甘薯为‘商薯 19’。每种作物种植小区设置 3 个重复, 总共 12 个处理小区, 每块小区面积 667 m²。各种作物于 2016 年 6 月 15 日播种, 玉米、花生和大豆作物于 10 月 6 日收获, 甘薯于 11 月 4 日收获。各作物播种前统一施加复合肥 750 kg · hm⁻²(养分含量 40%, $m_N : m_{P_2O_5} : m_{K_2O} = 28 : 6 : 6$), 在作物快速生长期样品采集后追施复合肥 750 kg · hm⁻²(养分含量 45%, $m_N : m_{P_2O_5} : m_{K_2O} = 15 : 15 : 15$)。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 取 样

在作物生育期内, 分别于苗期(7 月 18 日), 快速生长期(8 月 20 日)和成熟期(9 月 18 日), 在各处理小区随机选取植株, 挖取根系, 采用抖根分离法收集根际土, 首先轻轻抖落大块不含根系的土壤作为非根际土, 然后用毛刷将根表附着的土收集起来作为根际土。根际和非根际土各自混合均匀, 放入车载便携式冰箱, 带回实验室后尽快过 2 mm 筛, 放入 4 °C 冰箱保存待测, 测定铵态氮、硝态氮、MBC, MBN 和土壤脲酶、蔗糖酶和 β -葡萄糖苷酶活性指标。

1.3.2 土壤指标测定方法

土壤铵态氮用 KCl 浸提-靛酚蓝比色-分光光度法、硝态氮含量采用 KCl 浸提-比色法测定; 土壤微生物量碳氮用氯仿熏蒸-K₂SO₄ 浸提法测定^[16]; 土壤脲酶采用靛酚蓝比色法测定, 酶活性用 24 h 每克土生成的氨的量表示; 土壤蔗糖酶采用 3,5-二硝基水杨酸比色法测定, 酶活性用 24 h 每克土生成的葡萄糖的量表示; 土壤 β -葡萄糖苷酶用每小时每克土生成的对-硝基酚- β -D-吡喃葡萄糖苷的量表示^[17]。

1.3.3 数据分析

采用 SPSS 16.0 软件对不同处理之间的数据进行 ANOVA 方差分析、多重比较(Duncans)相关性分析; 采用 Origin 9 作图。

2 结果与分析

2.1 不同作物非根际土和根际土铵态氮硝态氮含量变化

如图 1 所示, 不同作物在生长季内非根际土铵态氮含量整体呈玉米 < 甘薯 < 大豆 < 花生的趋势, 在快速生长期花生处理铵态氮含量显著高于其他 3 种处理; 大豆和花生处理的根际土铵态氮含量均高于玉米和甘薯处理, 大豆处理在苗期和成熟期根际土铵态氮含量显著高于玉米和甘薯处理, 花生处理在苗期、快速生长期铵态氮含量显著高于玉米和甘薯处理。大豆在苗期和成熟期根际土铵态氮含量显著高于非根际土, 在快速生长期差异没有达到显著水平; 花生、玉米和甘薯根际土和非根际土铵态氮含量在不同时期差异都没有达到显著水平。

苗期不同作物非根际土硝态氮含量表现为玉米 > 甘薯 > 大豆 > 花生(图 2), 且差异达到显著水平, 玉米和甘薯作物根际土硝态氮含量差异不显著, 都显著小于大豆和花生根际土硝态氮含量; 快速生长期玉米作物非根际土硝态氮含量最高, 大豆次之, 两者都显著高于甘薯和花生处理, 甘薯和花生处理之间硝态氮含量差异不显著, 快速生长期玉米和甘薯根际土硝态氮含量显著低于大豆和花生处理; 成熟期大豆处理根际土硝态

氮含量显著高于其他处理,花生处理次之,玉米处理最低.玉米非根际土硝态氮含量较高,不同时期都显著高于其根际土,且显著高于其他 3 种作物非根际土.大豆和花生处理不同时期硝态氮含量根际土大于非根际土,且除花生处理成熟期外差异都达到显著水平;甘薯处理在苗期根际土硝态氮含量显著高于非根际土,其他两个时期差异不显著.

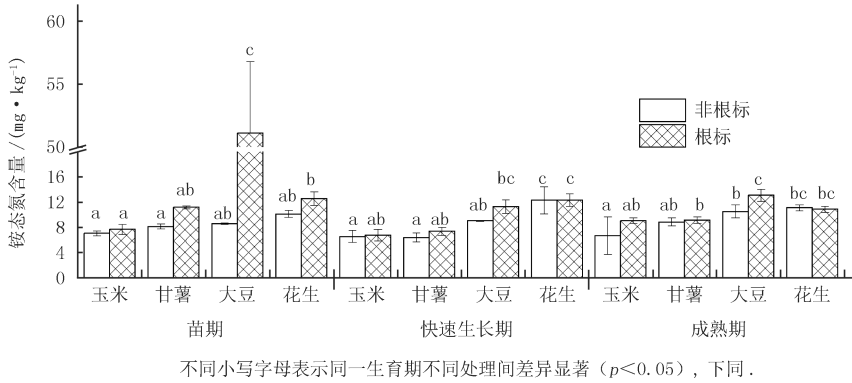


图 1 不同作物生长季内非根际土和根际土铵态氮含量变化特征

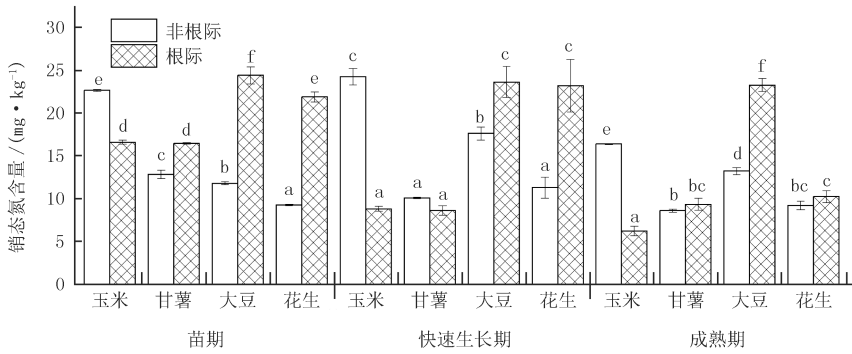


图 2 不同作物生长季内非根际土和根际土硝态氮含量变化特征

2.2 不同作物非根际土和根际土的微生物学特性

在整个生育期,不同作物处理根际土 MBC 含量均高于非根际土(图 3).苗期大豆根际土 MBC 含量最高,甘薯和花生次之,玉米最低;快速生长期大豆非根际土 MBC 含量高于其他 3 种处理,其余 3 种处理之间差异不显著,花生根际土 MBC 含量显著高于玉米、大豆和甘薯处理,3 种处理之间没有显著性差异;成熟期花生非根际土 MBC 含量显著高于玉米、甘薯和大豆处理,3 种作物处理间差异不显著;甘薯、大豆和花生根际土 MBC 含量显著高于玉米处理.

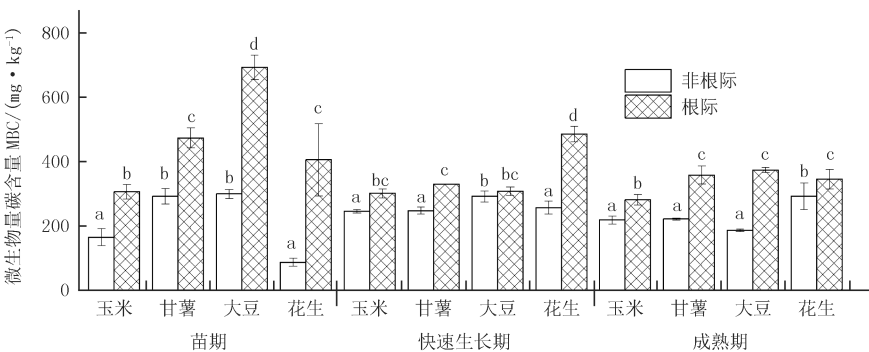


图 3 不同作物生长季内非根际土和根际土 MBC 含量变化特征

苗期不同作物根际土 MBN 含量显著高于非根际土,不同作物非根际土之间 MBN 差异没有达到显著水平,大豆根际土 MBN 含量显著高于其他 3 种作物处理根际土(图 4);快速生长期玉米非根际土 MBN 含量

高于根际土,其他作物处理根际土与非根际土之间差异不显著,各作物非根际土中玉米 MBN 含量最高,其他处理差异不显著,各作物根际土中花生 MBN 含量最低,玉米最高.成熟期不同作物根际土和非根际土之间 MBN 差异不显著,大豆非根际土和根际土 MBN 含量最高,显著高于玉米作物处理.

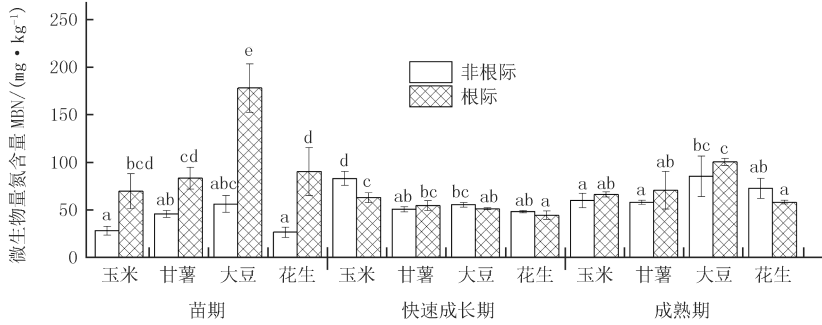


图4 不同作物生长季内非根际土和根际土 MBN 含量变化特征

苗期玉米和大豆非根际土 MBC/MBN 显著大于根际土,而花生非根际土 MBC/MBN 显著小于根际土(图 5);花生非根际土显著小于其他 3 种作物非根际土,其他 3 种作物差异不显著.快速生长期根际土 MBC/MBN 都高于非根际土,除大豆外其他 3 种处理差异都达到显著水平;玉米非根际土 MBC/MBN 都显著小于其他 3 种作物处理,根际土 MBC/MBN 玉米最小,大豆和甘薯居中,花生最大,3 组之间差异达显著水平.成熟期根际土 MBC/MBN 都高于非根际土,除玉米外其他 3 种处理差异都达到显著水平;大豆非根际土 MBC/MBN 都显著小于其他 3 种作物处理,大豆根际土 MBC/MBN 最小,花生最大.

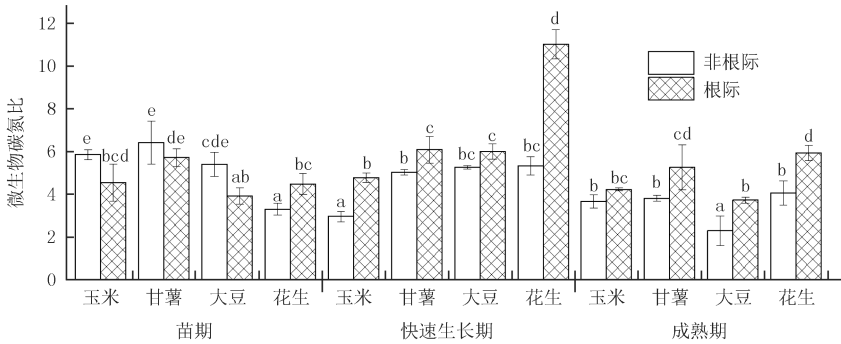


图5 不同作物生长季内非根际土和根际土 MBC/MBN 变化特征

2.3 不同作物非根际土和根际土的土壤酶活变化

苗期甘薯非根际土脲酶含量显著低于根际土,其他作物根际土和非根际土差异不显著,不同作物间根际土无显著差异(图 6).快速生长期玉米和花生根际土脲酶活性显著低于非根际土,其他两种作物差异不大;花生作物非根际土脲酶活性显著高于其他 3 种处理,其他 3 种作物处理之间差异不显著;甘薯和花生根际土脲酶活性显著高于玉米和花生处理,花生处理根际土脲酶活性最低.成熟期甘薯根际土脲酶活性显著高于非根际土,其他 3 种作物处理根际土和非根际土之间差异没有达到显著水平;玉米作物非根际土脲酶活性显著高于其他 3 种作物;花生作物根际土脲酶活性最低,显著低于玉米和甘薯处理,但是与大豆之间差异不显著.

如图 7 所示,苗期非根际土蔗糖酶活性甘薯<花生<大豆<玉米,且不同处理之间差异达到显著水平,根际土玉米<花生<大豆,差异也达到显著水平;玉米作物根际土蔗糖酶活性显著低于非根际土活性,而花生根际土活性显著高于非根际土活性,大豆根际土活性高于非根际土,但差异没有达到显著水平.快速生长期大豆非根际土蔗糖酶活性最低,玉米和花生处理居中,甘薯活性最高,3 组之间差异达到显著水平;大豆和花生处理根际土活性显著高于玉米和甘薯,玉米和甘薯之间差异不显著.成熟期不同作物根际土蔗糖酶活性都显著高于非根际处理;玉米非根际土活性显著高于其他 3 种处理,其他 3 种处理之间差异不显著,各作物根际土蔗糖酶活性差别不大.玉米,大豆作物整个生长季非根际土蔗糖酶活性呈逐渐降低趋势,花生和甘薯在生长季中期活性最高;玉米和甘薯根际土生长季内变化不大,大豆根际土蔗糖酶活性生长季内呈逐渐降低

趋势,花生苗期根际土蔗糖酶活性最高,后期有所下降.

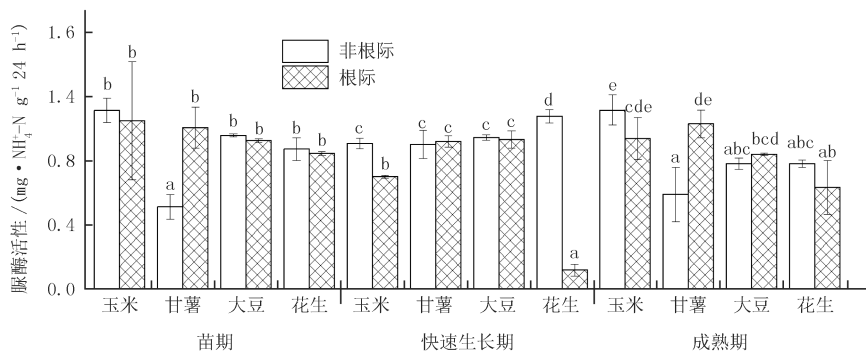


图 6 不同作物生长季内非根际土和根际土脲酶活性变化特征

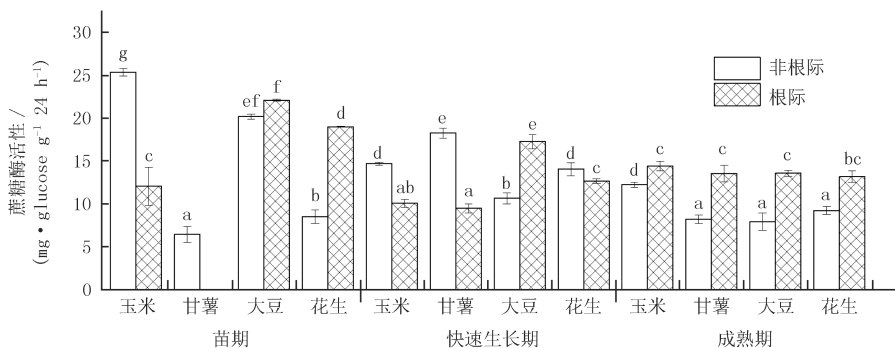


图 7 不同作物生长季内非根际土和根际土蔗糖酶活性变化特征

如图 8 所示,不同作物处理在苗期和成熟期 β -葡萄糖苷酶活性整体表现为根际土高于非根际土,且差异达到显著水平,快速生长期玉米和大豆根际土和非根际土酶活性差异不显著,甘薯和花生根际土酶活性明显高于非根际土.各作物处理非根际土酶活性呈先增加后降低的趋势,根际土不同作物季节变化趋势不同,玉米根际土酶活性无明显季节变化趋势,大豆根际土苗期最高,后期无明显变化,花生根际土快速生长期最高.苗期大豆根际土 β -葡萄糖苷酶最高,玉米最低;非根际土玉米最高;快速生长期根际土 β -葡萄糖苷酶活性花生显著高于甘薯,甘薯显著高于大豆和玉米,大豆和玉米之间差异不显著;非根际土不同作物之间差异不显著.成熟期 β -葡萄糖苷酶活性甘薯 > 花生 > 大豆 > 玉米,各处理差异达到显著水平;花生和玉米较高,大豆和甘薯较低.

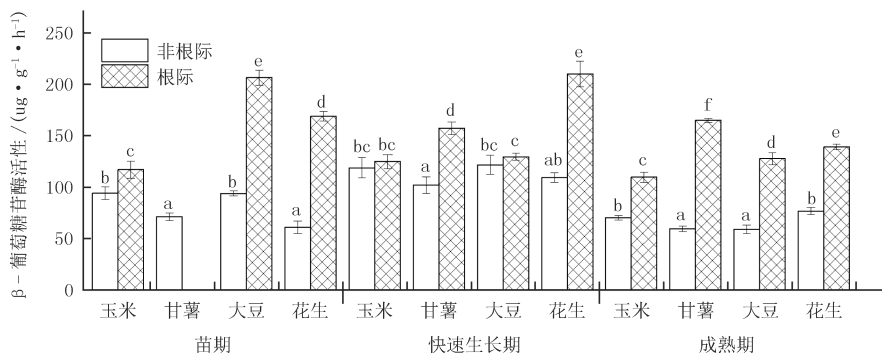


图 8 不同作物生长季内非根际土和根际土 β -葡萄糖苷酶活性变化特征

2.4 不同作物各指标间的相关分析

非根际土铵态氮含量和硝态氮和蔗糖酶存在显著负相关关系(表 1);硝态氮与蔗糖酶和 β -葡萄糖苷酶存在显著正相关关系,与脲酶存在显著相关关系;3 种酶之间存在极显著相关关系;如表 2 所示,根际土铵态氮与硝态氮、MBC,MBN、蔗糖酶和 β -葡萄糖酸苷酶之间呈极显著相关关系,硝态氮与 MBC 和蔗糖酶呈极显

著相关关系,与 MBN 和 β -葡糖糖苷酶呈显著相关关系;MBC 与 MBN、蔗糖酶和 β -葡萄糖苷酶存在显著相关关系;MBN 与蔗糖酶呈极显著相关关系;MBC/MBN 与脲酶呈极显著负相关关系,与 β -葡萄糖苷酶呈显著正相关关系;蔗糖酶与 β -葡萄糖苷酶呈显著正相关关系;脲酶与 β -葡萄糖苷酶呈显著负相关关系。

表 1 非根际土无机氮、微生物量碳氮和酶活性指标之间的相关关系

	氨氮 NH_4^+-N	硝氮 NO_3^--N	MBC	MBN	MBC/MBN	蔗糖酶 Invertase	脲酶 Urease	β -葡萄糖苷酶 β -glucosidase
铵态氮 NH_4^+-N	1	-0.459 **	-0.002	-0.004	0.034	-0.395 *	-0.136	-0.182
硝态氮 NO_3^--N		1	-0.026	0.108	0.088	0.446 **	0.416 *	0.513 **
MBC			1	0.392 *	0.440 **	-0.010	-0.145	0.418 *
MBN				1	-0.507 **	-0.287	-0.144	0.054
MBC/MBN					1	0.253	-0.022	0.212
蔗糖酶 Invertase						1	0.640 **	0.495 **
脲酶 Urease							1	0.461 **
β -葡萄糖苷酶 β -glucosidase								1

** $p < 0.01$; * $p < 0.05$, $n = 36$, 下同

表 2 根际土无机氮、微生物量碳氮和酶活性指标之间的相关关系

	氨氮 NH_4^+-N	硝氮 NO_3^--N	MBC	MBN	MBC/MBN	蔗糖酶 Invertase	脲酶 Urease	β -葡萄糖苷酶 β -glucosidase
铵态氮 NH_4^+-N	1	0.461 **	0.845 **	0.863 **	-0.208	0.726 **	0.016	0.510 **
硝态氮 NO_3^--N		1	0.544 **	0.396 *	0.161	0.603 **	-0.252	0.357 *
MBC			1	0.775 **	0.098	0.620 **	-0.188	0.503 **
MBN				1	-0.528 **	0.677 **	0.257	0.255
MBC/MBN					1	-0.268	-0.732 **	0.376 *
蔗糖酶 Invertase						1	0.121	0.385 *
脲酶 Urease							1	-0.483 **
β -葡萄糖苷酶 β -glucosidase								1

3 讨论

根际作为养分进入作物的门户,根际过程决定着土壤中氮素的供应强度和有效性^[18].无机氮(主要为铵态氮和硝态氮)是作物吸收利用的主要氮素形态.不同形态氮素在根际的累积规律和迁移机理不同,铵态氮主要是通过扩散方式进行迁移^[19].本研究中铵态氮含量除苗期大豆处理外,整体表现为根际土高于非根际土,但是,差异没有达到显著水平,根际扩散作用可能是造成差异不显著的主要原因,苗期大豆作物由于强烈的根际固氮和微生物活动使得根际铵态氮含量显著高于非根际(图 3、图 4).本研究中大豆,花生和甘薯 3 种作物根际土硝态氮含量高于非根际土,且除甘薯在快速发育期和花生在成熟期外差异都达到显著水平,表明 3 种作物根际对硝态氮有一定的富集作用,这与钦绳武等^[17]研究结论一致,其认为硝态氮主要通过质流过程随植物吸收水分过程迁移,呈现往根部聚集的现象;富集作用根据不同作物类型和生长阶段有一定的差异^[20],大豆整个生长期根际硝态氮富集效应明显,甘薯在苗期,而花生在苗期和快速生长期有明显富集作用(图 2).与其他 3 种作物相反,玉米作物非根际硝态氮含量不同时期都显著高于根际土壤,原因可能为根际土硝态氮含量为作物吸收及微生物矿化释放共同作用的结果,硝态氮为旱地玉米吸收的主要氮素形态,由于植物根系的吸收,根际土壤中硝态氮出现亏缺现象^[5].玉米非根际土壤硝态氮含量整个生长季显著高于其他作物,原因可能为长期的麦玉复种模式及玉米对硝态氮养分的需求使得玉米作物处理中土壤中硝化作用强烈,

使更多的无机氮形态以硝态氮的形态存在.本研究发现大豆和花生两种豆科作物生长季内根际土和非根际土铵态氮含量明显高于两种非豆科作物玉米和甘薯的含量,大豆和花生根际土硝态氮含量高于玉米和甘薯,在苗期和快速生长期差异达到显著水平,表明豆科植物在改善土壤氮素含量方面发挥着一定的作用.

土壤酶活性是反应土壤肥力的有效生物学指标,可反映土壤养分转化能力的强弱.蔗糖酶和 β -葡萄糖苷酶对促进土壤碳水化合物水解,增加土壤中易溶性营养物质具有重要意义,脲酶则反映土壤有机态氮向有效态氮的转化能力和无机氮的供应能力.本研究发现非根际土壤蔗糖酶和 β -葡萄糖苷酶与硝态氮含量呈极显著相关关系,蔗糖酶与铵态氮含量有显著相关关系(表1),表明在研究区非根际土壤中蔗糖酶和 β -葡萄糖苷酶等与土壤碳水化合物水解性酶对无机氮营养的转化和吸收具有更重要的作用,土壤中较高氮素有效性使土壤活性碳组分为微生物活动的限制性因素.根际土壤中蔗糖酶和 β -葡萄糖苷酶都与铵态氮、硝态氮和MBC存在显著的相关关系,3种酶活性之间也存在显著的相关关系,表明不同酶之间不仅具有专一性,还具有共同性,特别是在土壤微生物量和活性较高的根际土壤中^[21],根际土壤中蔗糖酶和 β -葡萄糖苷酶同样为无机氮养分很好的指示指标.玉米和甘薯苗期和快速生长期非根际土蔗糖酶活性高于根际,而豆科作物大豆和花生在苗期和快速生长期非根际土蔗糖酶活性低于根际,原因可能为豆科作物通过固氮作物使根际有更高的氮源,促进了蔗糖酶活性,以产生更多的活性碳满足微生物和植物生长需求;而非豆科作物由于根际分泌物和根际碳沉降使蔗糖酶的分解受到一定的抑制.生长末期由于根际丰富的营养和微生物含量(图7),又缺乏作物竞争,使作物根际的土壤蔗糖酶活性高于非根际. β -葡萄糖苷酶活性整个生长季都表现为根际土高于非根际土^[2,22],但是在快速生长期差异较小,在其他两个时期都达到显著水平,原因可能为在快速生长期适宜的气候条件使得非根际土壤中 β -葡萄糖苷酶活性增加,加之此时期作物与微生物对养分竞争的加剧使得根际与非根际差异减小.

不同作物根际土壤由于根系的代谢活动,根系分泌物和脱落物,使得土壤微生物能获得更高的碳源,从而提高了根际微生物量碳,Zhu等^[22]研究发现根际激发作用使土壤微生物量碳含量增加0%~28%;但不同作物不同时期有所差异,大豆在苗期根际MBC最高,表明此时期微生物数量较高,同时在此时期根际铵态氮、硝态氮和MBN含量也较高,这可能与根瘤菌数量增加有关,此时期固氮菌活跃.花生在快速生长期微生物量碳最高,同时铵态氮、硝态氮含量较高,表明在快速生长期花生的固氮菌快速繁殖和生长.土壤微生物量碳氮比在一定程度上反映了土壤中真菌和细菌的比例,碳氮比值越高,真菌所占的比例越高^[23].一般情况下细菌碳氮比在5:1左右,放线菌在6:1左右,而真菌在10:1左右^[24].大豆和花生根际土壤MBC/MBN苗期较低,表明苗期两种豆科作物细菌比例较高,快速生长期和成熟期,花生根际土壤MBC/MBN显著高于其他3种处理,表明花生真菌和放线菌比例增大.孟庆英等^[10]通过研究也发现施用根瘤菌在生长前期会明显增加细菌数量,生长中期和后期会增加细菌和放线菌的比例,这与本研究结论基本一致.不同作物在生长季内不同时期微生物群落和结构发生变化,不同作物变化情况有所差异,具体的改变有待进一步深入研究.

4 结 论

(1)两种豆科作物对土壤根际土和非根际土铵态氮都有明显的提高;大豆和花生硝态氮在根部积累量较高,在苗期和快速生长期明显高于玉米和甘薯,但豆科作物对非根际土的改变作用有限,玉米非根际土硝态氮含量明显高于其他3种作物.

(2)不同作物都有较强的根部激发作用,使根际土微生物碳氮含量高于非根际,激发作用苗期较强,快速生长期减弱;微生物碳氮比不同作物之间存在明显差异,且随不同生长阶段而变化,表明不同作物短期可改变微生物结构和组成,此结论有待于进一步深入研究.

(3)蔗糖酶和 β -葡萄糖苷酶活性与铵态氮、硝态氮和微生物量碳氮之间存在很好的相关关系,蔗糖酶和 β -葡萄糖苷酶等与活性碳转化的指标对研究区土壤养分有很好的指示作用.

参 考 文 献

- [1] Zhang C, Liu GB, Xue S, et al. Rhizosphere soil microbial activity under different vegetation types on the Loess Plateau, China [J]. Geoderma, 2011, 161: 115-125.

- [2] Chaudhary DR, Gautam RK, Yousuf B, et al. Nutrients, microbial community structure and functional gene abundance of rhizosphere and bulk soils of halophytes [J]. *Applied Soil Ecology*, 2015, 91: 16-26.
- [3] 邱权, 李吉跃, 王军辉, 等. 西宁南山 4 种灌木根际和非根际土壤微生物、酶活性和养分特征[J]. *生态学报*, 2014, 34(24): 7411-7420.
- [4] 孟令军, 耿增超, 殷金岩, 等. 秦岭太白山区 6 种中草药根际与非根际土壤化学性质及酶活性[J]. *应用生态学报*, 2012, 23(10): 2685-2692.
- [5] 梁国鹏, Houssou A. Albert, 吴会军, 等. 施氮量对夏玉米根际和非根际土壤酶活性及氮含量的影响[J]. *应用生态学报*, 2016, 27(6): 1917-1924.
- [6] 郭天财, 宋晓, 马冬云, 等. 施氮量对冬小麦根际土壤酶活性的影响[J]. *应用生态学报*, 2008, 19(1): 110-114.
- [7] 王劲松, 樊芳芳, 郭珺, 等. 不同作物轮作对连作高粱生长及其根际土壤环境的影响[J]. *应用生态学报*, 2016, 27(7): 2283-2291.
- [8] 付智丹, 周丽, 陈平, 等. 施氮量对玉米/大豆套作系统土壤微生物数量级土壤酶活性的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2017, 25(10): 1463-1474.
- [9] 云鹏, 高翔, 陈磊, 等. 冬小麦-夏玉米轮作体系中不同施氮水平对玉米生长及其根际土壤氮的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2010, 16(3): 567-574.
- [10] 谭雪莲, 郭天文, 张国宏, 等. 轮作对马铃薯根际土壤微生物和酶活性的影响[J]. *灌溉排水学报*, 2016, 35(9): 45-50.
- [11] 李双, 高阳, 司转运, 等. 氮量与株间竞争对番茄幼苗根系形态、生物量积累及氮素利用的影响[J]. *灌溉排水学报*, 2018, 37(05): 13-18, 74.
- [12] 孟庆英, 张春峰, 于忠和, 等. 根瘤菌对大豆根际土壤微生物及大豆农艺性状的影响[J]. *大豆科学*, 2012, 31(3): 498-500.
- [13] 王从彦, 曹震, 王磊, 等. 豆科作物对根际土壤微生物种群及代谢的影响[J]. *生态环境学报*, 2013, 22(1): 85-89.
- [14] 杜天庆, 苗果园. 豆科牧草根际土壤脲酶活性的研究[J]. *中国生态农业学报*, 2007, 15(1): 25-27.
- [15] Wang J, Wang EL, Yang XG, et al. Increased yield potential of wheat-maize cropping system in the North China Plain by climate change adaptation[J]. *Climate Chang*, 2012, 113: 825-840.
- [16] 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: 156-157, 159-162.
- [17] 关松荫. 土壤酶及其研究方法[M]. 北京: 农业出版社, 1986: 274-276, 294-297.
- [18] Hinsinger P, Gobran GR, Gregory PJ, et al. Rhizosphere geometry and heterogeneity arising from root-mediated physical and chemical process [J]. *New Phytologist*, 2005, 168: 293-303.
- [19] 钦绳武, 刘芷宇. 土壤-根系微区养分状况的研究-VI. 不同形态肥料氮素在根际的迁移规律[J]. *土壤学报*, 1989, 26(2): 117-123.
- [20] 詹媛媛, 薛梓瑜, 任伟, 等. 干旱荒漠区不同灌木根际与非根际土壤氮素的含量特征[J]. *生态学报*, 2009, 29(1): 55-66.
- [21] 冯爱青, 张民, 李成亮, 等. 控释氮肥对土壤酶活性与土壤养分利用的影响[J]. *水土保持学报*, 2014, 28(3): 177-184.
- [22] Zhu B, Gutkneche JLM, Herman DJ, et al. Rhizosphere priming effects on soil carbon and nitrogen mineralization[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2014, 76: 183-192.
- [23] 王宁, 王美菊, 李世兰, 等. 降水变化对红松阔叶林土壤微生物生物量生长季动态的影响[J]. *应用生态学报*, 2015, 26(5): 1297-1305.
- [24] 李娟, 赵秉强, 李秀英, 等. 长期有机无机肥料配施对土壤微生物学特性及土壤肥力的影响[J]. *中国农业科学*, 2008, 41(1): 144-152.

Labile carbon and nitrogen content and correlative enzyme activities of rhizosphere and non-rhizosphere soils under four major crops in North China Plain

Wang Wenpeng, Shao Yun, Li Yingchen, Gu Xuewei, Cao Liru, Wei Shanshan, Shanguan Xinyan, Zhu Rui

(Life Science College, Henan Normal University, Xixiang 453007, China)

Abstract: A field experiment was conducted in Huojia County, Henan Province, two leguminous crops (soybean and peanut) and two non-legumes (maize and sweet potato) was selected to study the seasonal changes of inorganic nitrogen, microbial carbon (MBC) and microbial nitrogen (MBN) and the enzyme activities correlating with labile carbon and nitrogen. The results showed that ammonium nitrogen and nitrate nitrogen contents of leguminous crops were higher than two non-legumes in rhizosphere soil. The nitrate nitrogen content of corn in non-rhizosphere soil was higher than rhizosphere soil, however, the nitrate nitrogen content of other three crops in rhizosphere soil was higher than non-rhizosphere soil. The content of MBC of four crops in rhizosphere soil as a whole was higher than in non-rhizosphere soil during growing season, and the difference was significant except soybean in rapid growth period. The MBN of four crops in rhizosphere soil was higher than in non-rhizosphere soil in seeding stage. The ammonium nitrogen of non-rhizosphere soil exist significant negative correlation with nitrate nitrogen and invertase contents, the nitrate nitrogen of non-rhizosphere soil exist significant positive correlation with invertase, urease and β -glucosidase activities; There was significant positive correlation between ammonium nitrogen and nitrate nitrogen contents of rhizosphere soil and MBC, MBN, urease and β -glucosidase activities.

Keywords: North China Plain; rhizosphere soil; inorganic nitrogen; MBC; MBN; enzyme activities

[责任编辑 王凤产]