

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

云鹏^{1,2}, 高翔², 陈磊², 卢昌艾², 张金涛², 刘荣乐², 汪洪^{2*}, 林国林¹

(1 沈阳农业大学土地与环境学院, 辽宁沈阳 110866;

2 农业部作物营养与施肥重点开放实验室, 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 北京 100081)

摘要: 在河北衡水潮土上进行田间试验, 以当地习惯高氮用量(小麦季施 N 300 kg/hm², 玉米季施 N 240 kg/hm²)为对照, 研究冬小麦-夏玉米轮作体系中减少氮肥用量对玉米季植株生长、氮素吸收及根际土壤中无机氮与微生物量氮的影响。结果表明, 两季作物氮肥施用量减少 25% 和 40%, 对玉米产量、生物量及植株体内氮累积量未产生明显影响, 氮肥利用率提高。不同氮肥施用量对根际和非根际土壤铵态氮含量的影响不显著; 减少氮肥施用量, 对玉米根际土壤硝态氮含量也没有明显影响。在玉米苗期、抽雄期和成熟期, 习惯高施氮量处理的非根际土壤硝态氮含量较高, 其中抽雄期, 非根际土壤硝态氮含量较氮肥减施 40% 用量处理高出近一倍, 但非根际土壤微生物量氮水平含量明显降低。氮肥减施未影响根际土壤微生物量碳、氮含量, 反而增加了非根际土壤微生物量碳、氮水平。在高肥力的潮土上, 冬小麦/夏玉米轮作体系中适当减施氮肥并未影响玉米根际土壤氮素水平, 可保证玉米稳产, 实现减氮增效。

关键词: 施氮量; 夏玉米; 根际; 无机氮; 微生物量; 氮肥利用率

中国分类号: S513.01; S158.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1008-505X(2010)03-0567-08

Plant nitrogen utilization and soil nitrogen status in rhizosphere of maize as affected by various nitrogen rates in wheat-maize rotation system

YUN Peng^{1,2}, GAO Xiang², CHEN Lei², LU Chang-ai², ZHANG Jin-tao², LIU Rong-le², WANG Hong^{2*}, LIN Guo-lin¹

(1 College of Land and Environment, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, China;

2 Ministry of Agriculture Key Laboratory of Crop Nutrition and Fertilization/Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract: A field experiment was conducted on fluvo-aquic soil (aquic inceptisol) in Hengshui of Hebei province. The objective was to investigate the effects of different nitrogen rates on inorganic nitrogen and microbial biomass nitrogen in rhizosphere and non-rhizosphere soils, and nitrogen utilization by maize plants under the rotation system of winter wheat and summer maize. The results showed that in comparison to farmers' conventional N fertilization (300 kg/ha for winter wheat and 240 kg/ha for maize), reducing nitrogen application rates by 25% and 40% in the rotation system of winter wheat and summer maize did not significantly affect total biomass and total nitrogen accumulation of summer maize, but improved nitrogen use efficiency for maize plants. The soil NH₄⁺-N contents presented no significant difference among various nitrogen application rates. The NO₃⁻-N contents in rhizosphere soils did not significantly decreased with N application reduction, but decreased in non-rhizosphere soils. Especially in tasseling stage, the NO₃⁻-N contents in non-rhizosphere soils under conventional N rate were one times higher than that under 60% of conventional N rate. The concentrations of microbial biomass carbon and nitrogen in rhizosphere soils did not change under the treatments of different nitrogen application rates. However, the levels of microbial biomass carbon and nitrogen in non-rhizosphere soils were in-

收稿日期: 2009-04-10 接受日期: 2009-08-28

基金项目: 国家重点基础研究发展计划资助课题(2007CB109302); “十一五”国家科技支撑计划重点项目课题(2008DABA4B04)资助。

作者简介: 云鹏 (1983-), 男, 内蒙古呼和浩特人, 硕士研究生, 从事集约化农业条件下作物根际营养研究。

* 通讯作者 Tel: 010-82108662, E-mail: wanghong@caas.ac.cn

creased when reducing N application rates by 40%. It is suggested that in those area with excessive nitrogen application in the rotation system of winter wheat and summer maize, nitrogen application should be reduced to an appropriate rate.

Key words: nitrogen rate; summer maize; rhizosphere; inorganic nitrogen; microbial biomass; nitrogen use efficiency

近30年来,我国氮肥施用量迅速提高,从1980年的943.3万t增加到2007年的5608.8万t,增加了约4.9倍(复合肥按1/3算)^[1]。但氮肥利用率较低,当季利用率平均为30%左右,施肥过量是其中的一个重要原因^[2-3]。

在华北平原冬小麦-夏玉米轮作体系中,氮肥过量施用现象普遍。夏玉米生育期较短,耐肥性强,一般不会因施氮过量引起倒伏而造成减产,玉米生产中过量施用氮肥现象易被忽略^[4-5]。高旺盛等^[6]在河南温县和山东桓台两个高产县进行调查发现,冬小麦-夏玉米轮作体系中每年施氮量分别是587和625 kg/hm²;赵久然等^[7]调查表明,北京地区150块冬小麦田每季平均施氮量为309 kg/hm²,100块夏玉米田平均施氮量为256 kg/hm²,远远超过了高产条件下作物的吸氮量。巨晓棠等^[8]报道,在华北地区夏玉米-冬小麦-夏玉米轮作的3季作物累计习惯施氮量达900 kg/hm²,与优化施氮量225 kg/hm²相比,尽管用量增加了675 kg/hm²,但作物产量并没有提高。过量和不合理施用氮肥,导致农田中氮素的损失明显增加,氮肥利用率降低,也给环境带来了污染风险。在北方农业高度集约化生产地区,氮肥不合理施用、施量过高与地下水硝酸盐超标关系密切^[9]。

土壤中微生物分解有机质释放养分,转化土壤碳素,固定无机营养元素形成微生物量^[10]。土壤微生物量是土壤氮养分的储备库,是植物可利用氮养分的一个重要来源。促使无机氮肥的微生物固定是减少损失的一个有效途径^[11]。根际是植物-土壤生态系统进行物质交换的一个活跃微域。根系分泌物增加,激发根际土壤微生物的生长和新陈代谢,微生物分布密集,活性强,有利于土壤中养分转化,对植物养分供应有着重要影响^[12]。

目前,对夏玉米生产中氮肥施用及土壤中氮素转化规律已有很多报道^[13-14],但在集约化农业生产条件下,减少氮肥施用量,对夏玉米植株生长及其根际土壤中无机氮、微生物氮影响还缺少深入研究。本研究选择河北衡水地区进行田间试验,以习惯高施氮量为对照,探讨冬小麦-夏玉米轮作体系中氮肥减施处理条件下夏玉米氮肥利用及根际与非根际土壤中无机氮与微生物量氮的动态变化,以期在集

约化农业生产地区建立优化施肥措施,提高氮肥利用率提供理论依据和技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验于2008年6月至10月在河北省农林科学院旱作所衡水实验站(38.01°N,115.32°E)进行。土壤类型为潮土,小麦播前0—20 cm土壤基本性状为有机质14.19 g/kg、全氮1.02 g/kg、全磷0.98 g/kg、全钾15.32 g/kg、碱解氮89.46 g/kg、Olsen-P 34.60 mg/kg、速效钾103.00 mg/kg、硝态氮12.14 mg/kg、铵态氮0.76 mg/kg、pH 8.52(水土比5:1)。

试验在冬小麦-夏玉米轮作体系下进行。设4个施氮量(N kg/hm²)处理,小麦季为0(不施氮肥)、180(60%习惯施肥量)、225(75%习惯施肥量)、300(习惯施肥量);相应小区玉米季设施氮(N kg/hm²)处理0(不施氮肥)、144(60%习惯施肥量)、180(75%习惯施肥量)、240(习惯施肥量),分别用T0、T1、T2、T3表示,3次重复,完全随机区组排列。小麦季氮肥50%作基肥,50%在返青期追施。各小区磷、钾肥用量为P₂O₅ 187.5 kg/hm²和K₂O 90 kg/hm²,全部作基肥一次施入;玉米季,氮肥50%为基肥、50%在大喇叭口期采集土壤和植株样品后追施,不施磷肥,各小区钾肥用量为K₂O 90 kg/hm²,作基肥一次施入。肥料用尿素(N 46.4%),过磷酸钙(P₂O₅ 17%),氯化钾(K₂O 60%)。供试冬小麦品种为衡观35,夏玉米品种为郑单958。在冬小麦收获后,在原相应的处理小区免耕播种夏玉米。每小区面积为长9.5 m×宽4.4 m。

1.2 样品采集及测定

分别于玉米苗期(7月8日)、大喇叭口期(7月26日)、抽雄期(8月14日)、成熟期(9月24日)在各处理小区随机选点,收获玉米地上部后,挖取根系,采用抖根分离法取根系所粘土壤为根际土壤,同时取相应植株行间土壤为非根际土壤。土壤过2 mm筛后,装入聚乙烯塑料袋中,放入-18℃冰柜中保存。植株地上部在105℃下杀青30 min,70℃下烘干至恒重,称干物质重。成熟期植株样品分地上部营养体和子粒两部分,统计子粒产量。

土壤硝态氮、铵态氮的测定:将冰冻的新鲜土

样解冻后,按土水比 1:5 加入 2 mol/L KCl 溶液浸提,靛酚蓝比色法^[15]测定土壤铵态氮含量; 220 nm 和 275 nm 双波长紫外吸光度校正法^[16]测定土壤硝态氮含量。

土壤微生物量碳、氮的测定:新鲜土样解冻后,调节至田间含水量的 40%~50%,25℃下密封预培养 7 d 后,采用氯仿熏蒸-K₂SO₄ 提取法测定土壤微生物量碳、氮^[17]。称取土壤样品 10.0 g(烘干基重),土:液比为 1:4,用重铬酸钾氧化法测定土壤微生物量碳;用凯氏定氮法测定氮含量,计算土壤微生物量氮。土壤微生物量碳 = E_c/K_c ,式中 E_c 表示熏蒸与未熏蒸土壤浸取有机碳的差值, K_c 为转换系数,取值 0.38。土壤微生物量氮 = F_N/K_N ,式中 F_N 为熏蒸与未熏蒸土壤浸取全氮的差值, K_N 为转换系数,取值 0.45。

植株中氮含量的测定:植株地上部营养体及子粒经烘干粉碎后用浓 H₂SO₄-H₂O₂ 消煮,采用半微

量凯氏定氮法测氮^[15]。

氮肥利用率(NUE) = (施氮处理植株吸氮量 - 不施氮处理植株吸氮量)/施氮量 × 100%。

数据进行方差分析(ANOVA),Duncan 新复极差法检验处理间差异显著性($P < 0.05$)。

2 结果分析

2.1 玉米不同生育期生物量变化及子粒产量

从抽雄期到成熟期,玉米地上部生物量增长幅度较大,达 2.3~2.8 倍。施氮处理的玉米地上部生物量高于不施氮处理,与习惯施肥量处理相比,冬小麦/夏玉米两季氮肥用量各减少 25% 和 40%,玉米地上部生物量没有明显降低(图 1)。

施用氮肥显著提高玉米子粒的产量,增产幅度为 26.5%~36.7%。与习惯施肥量处理相比,两季氮肥用量各减少 25% 和 40%,玉米子粒产量并没有下降。氮肥减施未影响玉米子粒产量(图 2)。

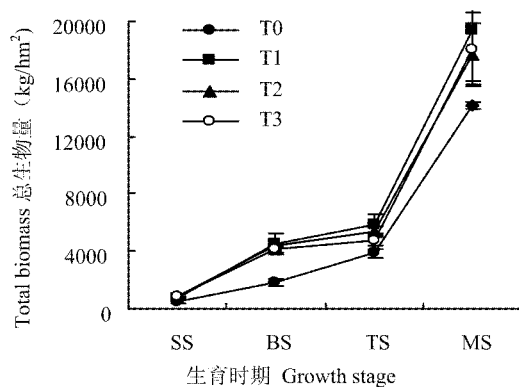


图 1 夏玉米地上部生物量的动态变化

Fig.1 The shoot biomass change of summer maize

[注(Note): SS—苗期 Seedling stage; BS—大喇叭口期 Bell-mouthed stage; TS—抽雄期 Tasseling stage; MS—成熟期 Mature stage.]

柱上不同小写字母表示处理间差异达 5% 显著水平 Different small letters above the bars means significant among treatments at the 5% level.]

2.2 玉米植株氮含量及氮累积

各氮处理的玉米地上部营养体中氮含量随生育期进程呈下降趋势。同一生育期,施氮处理的玉米地上部营养体的含氮量均高于不施氮处理,3 个施氮量处理间差异不显著(图 3a)。

玉米地上部氮素累积趋势与生物量累积的动态变化趋势一致,从苗期到大喇叭口期及从抽雄期到成熟期,这两个阶段玉米地上部氮素总累积增加幅度较大。施氮处理的玉米地上部氮累积量均高于不施氮处理,与 T3 相比,T1 和 T2 处理的玉米地上部氮累积量差异不显著(图 3b)。减少氮肥施用量并

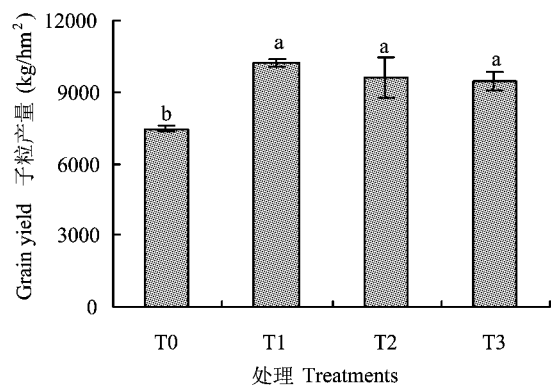


图 2 夏玉米不同氮用量处理下子粒产量

Fig. 2 Grain yield of summer maize with different N treatments

没有影响玉米地上部总吸氮量。

T1 处理的氮肥利用率为 50.7%,而 T2 和 T3 处理氮肥利用率分别为 32.8% 和 35.0%,氮肥用量减施 40% 提高了玉米氮肥利用率。

2.3 根际、非根际土壤无机氮含量的动态变化

由图 4 可知,在大喇叭口期,与非根际土壤相比,各处理根际土壤硝态氮含量明显较高,而其它 3 个时期,根际土壤硝态氮含量均低于非根际土壤。根际与非根际的土壤硝态氮含量在玉米不同生育期表现为先降低后升高再降低的变化趋势,抽雄期土壤硝态氮含量最高,这与在大喇叭口期取样后追施

氮肥有关。在苗期和抽雄期,施氮处理根际土壤中硝态氮含量明显高于不施氮处理,但3个施氮量处理间差异不显著。在大喇叭口期,只有习惯施肥量处理的根际硝态氮含量高于不施氮处理。在成熟期,施氮处理根际土壤中硝态氮含量与不施氮处理差异不显著且3个施氮量处理间差异不明显。除了大喇叭口期,其它时期施氮处理非根际土壤硝态氮

含量明显高于不施氮处理。尤其是在抽雄期,施氮处理的非根际土壤硝态氮含量增加幅度较大。其中T3处理的非根际硝态氮含量是不施氮处理的3倍,且较T1处理高出近1倍。与T3处理相比,同一生育期T1处理的非根际土壤硝态氮含量显著降低。T2处理的非根际土壤硝态氮含量与T3处理相比差异并不显著。

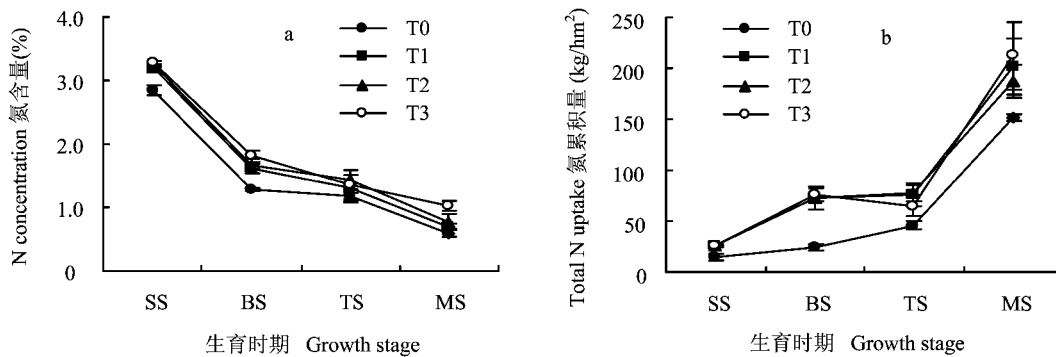


图3 夏玉米生育期地上部氮含量(a)和氮累积量(b)的动态变化

Fig. 3 The dynamics of N concentration (a) and N uptake (b) in shoots of summer maize

[注(Note): SS—苗期 Seedling stage; BS—大喇叭口期 Bell-mouthed stage; TS—抽雄期 Tasseling stage; MS—成熟期 Mature stage.]

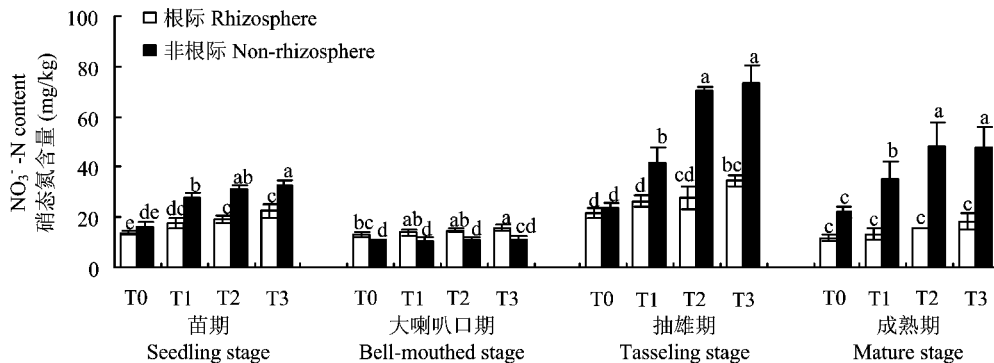


图4 玉米不同生育期根际与非根际土壤硝态氮含量动态变化

Fig. 4 The change of NO_3^- -N content in rhizosphere and non-rhizosphere soils at different growth stages of maize plant

[注(Note): 柱上不同小写字母表示同一生育期处理间差异达5%显著水平

Different small letters above the bars means significant among treatments at the 5% level.]

由图5看出,在夏玉米生育期间,根际与非根际土壤铵态氮含量都呈先下降再上升的变化趋势。在苗期铵态氮含量较高,抽雄期铵态氮含量较低。在苗期,除不施氮处理外,3个施氮处理根际土壤铵态氮含量均低于非根际土壤,在大喇叭口期,根际与非根际土壤铵态氮含量差异不明显。在抽雄期各处理根际土壤铵态氮含量高于非根际土壤,而在成熟期各处理根际土壤铵态氮含量低于非根际土壤。减少

氮肥施用量对于根际与非根际土壤铵态氮含量并没有显著影响。

2.4 根际与非根际土壤微生物量碳、氮的动态变化

从苗期到抽雄期T1和T2处理的非根际土壤微生物量碳呈现增加趋势,成熟期略有下降。而不施氮和T3处理非根际土壤微生物量碳呈先降低再升高再降低的趋势。在4个生育期,T1和T2处理非根际土壤微生物量碳高于不施氮和T3处理(图6)。

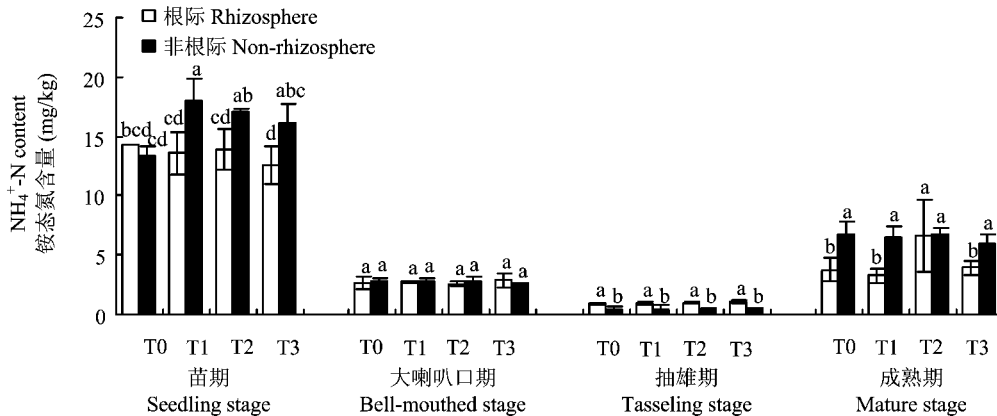


图 5 玉米不同生育期根际与非根际土壤铵态氮含量动态变化

Fig. 5 The change of NH_4^+ -N content in rhizosphere and non-rhizosphere soils at different growth stages of maize plants

[注(Notes): 柱上不同小写字母表示同一生育期处理间差异达 5% 显著水平

Different small letters above the bars means significant among treatments at the 5% level.]

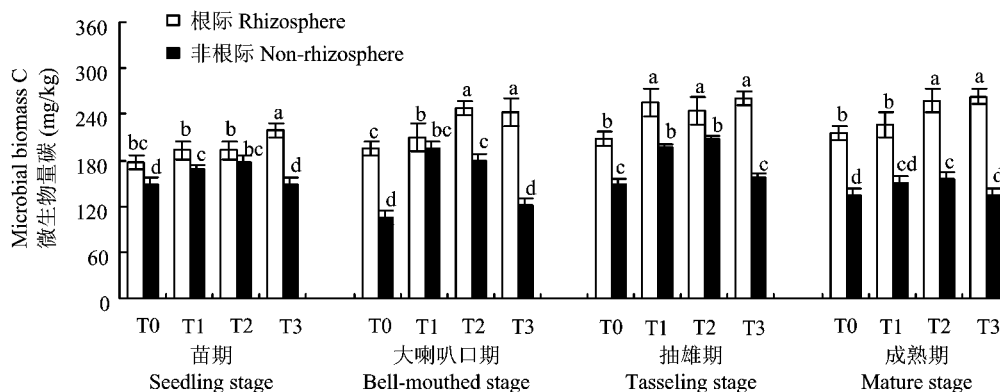


图 6 玉米不同生育期根际与非根际土壤微生物量碳的动态变化

Fig. 6 The dynamics of microbial biomass carbon in rhizosphere and non-rhizosphere soils at different growth stages of maize

[注(Notes): 柱上不同小写字母表示同一生育期处理间差异达 5% 显著水平

Different small letters above the bars means significant among treatments at the 5% level.]

在同一生育期,根际土壤微生物氮均高于非根际土壤微生物氮。与不施氮相比,施氮处理根际土壤微生物量氮较高,但 3 个施氮处理之间差异不显著。由此说明施用氮肥可显著增加根际土壤微生物量氮(图 7)。

在玉米 4 个生育期中, T1 和 T2 处理的非根际土壤微生物量氮含量均高于不施氮和 T3 处理, T1 和 T2 处理间差异不显著(图 7)。

综上所述,氮肥的施用可提高根际与非根际土壤微生物量碳、氮。减少氮肥用量 25%—40%, 不仅没有影响到根际土壤微生物量碳、氮水平,而且增加了非根际土壤微生物量碳、氮含量;而高量施氮使非根际土壤微生物量氮水平下降。

3 讨论

蔡祖聪等^[18]在河南潮土进行长期试验研究表明,冬小麦和夏玉米每季施氮 $\text{N } 150 \text{ kg/hm}^2$, 配合磷、钾施用,小麦和玉米产量最高,且年际之间变化小。但近些年来华北平原冬小麦-夏玉米轮作体系中,氮肥过量施用现象较为普遍。两季氮肥用量远高于 $\text{N } 300 \text{ kg/hm}^2$ ^[7-8]。本试验选在河北衡水地区高肥力土壤上进行,与习惯施氮量(小麦季 $\text{N } 300 \text{ kg/hm}^2$, 玉米季 $\text{N } 240 \text{ kg/hm}^2$) 相比,两季氮肥施用量分别减少 25% 和 40%, 玉米产量也没有明显下降,氮肥利用率提高。分析原因一是与土壤中养分水平较高有关。近些年来,作物生产水平的提高,部分地区过量施肥,作物根茬还田量增加,土壤质量和

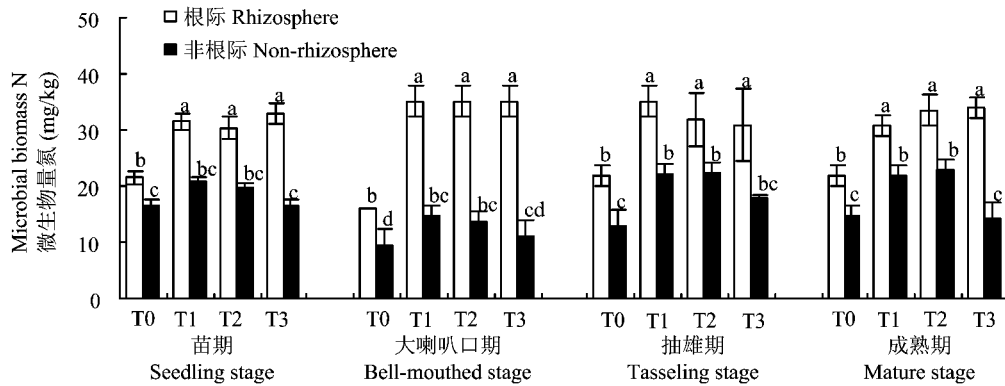


图7 玉米不同生育期根际与非根际土壤微生物量氮的动态变化

Fig.7 The dynamics of microbial biomass nitrogen in rhizosphere and non-rhizosphere soils at different growth stages of maize

[注(Notes): 柱上不同小写字母表示同一生育期处理间差异达5%显著水平 Different small letters above the bars means significant among treatments at the 5% level.]

土壤肥力总体得以提高^[3]。徐艳等^[19]研究了20年来我国潮土有机质的变化发现,随着大量化学肥料投入,土壤有机质含量呈现增加的趋势。与第二次土壤普查结果相比,我国华北地区耕地土壤有机质和全氮含量稳中上升^[20]。耕地土壤有效氮含量也明显增加,部分农田已表现为过量累积。对华北平原冬小麦-夏玉米轮作体系中多年多点($n > 500$)的调查表明,作物生育期内0—90 cm土壤剖面硝态氮含量平均高于200 kg/hm²,远高于欧洲规定的农田土壤中硝态氮限量水平^[21]。另外原因在于环境中氮素养分可通过大气干湿沉降、灌溉水、非生物固氮等途径进入作物生产系统,成为作物营养的重要来源。

根际是养分从土壤进入作物系统的门户,根际过程决定着土壤中氮素的供应强度和有效性^[22]。本试验结果表明,与习惯高量施肥相比,减少氮肥施用量,玉米生育周期内根际中硝态氮含量没有明显降低,而硝态氮是旱地农田作物吸收的主要氮素形态,主要通过质流过程向根表迁移,往往会造成根际土壤中硝态氮的富集^[23],但伊藤^[24]通过数学模型对水稻根际氮素转运情况的研究认为土壤有机氮矿化供应的氮素是限制根际 NH_4^+ -N和 NO_3^- -N变化的主要因素,质流在氮素的根际供应中起很小的作用。由于植物根系的吸收,根际土壤中硝态氮也会出现亏缺状况^[22]。吴龙华等^[14]通过根盒盆栽试验表明,吉林省黑钙土和盐土上生长的玉米根际土壤中硝态氮含量均高于非根际土壤。而本试验是在田间进行,采用抖根法收集根际土壤样品,研究发现在玉米大喇叭口期,根际土壤硝态氮含量高于非根际土壤,但在其它生育期,根际土壤硝态氮水平较低,可

能与玉米植株对非根际土壤中硝态氮吸收利用较少有关。高量氮肥施用处理的非根际土壤硝态氮含量随之升高,将会增加硝态氮淋溶的风险。在大喇叭口期,3个施氮量处理的非根际土壤表层硝态氮含量与不施氮处理的差异不明显,这可能与此期间玉米吸氮量迅速增加,且降水较多促使了表层土壤硝态氮向深层移动有关。

本试验根际土壤微生物氮明显较非根际土壤高,而高量氮肥施用,土壤碳源不足,造成了非根际土壤微生物量氮下降。结果还显示,氮肥的施用能增加根际与非根际土壤微生物量碳、氮。这是由于施用氮肥可促进根系的生长^[25],进而加速了根系的代谢活动,根系分泌物、脱落物增多,向土壤微生物提供了较多的碳源,从而提高了根际及非根际微生物量碳。同时,化肥为微生物的生长提供了较多的氮源,刺激微生物的生长且施肥后微生物量氮的增加主要来自化肥氮^[26]。我们发现减少氮肥用量25%和40%,不仅没有影响到根际土壤微生物碳、氮水平,反而增加了非根际土壤微生物量碳、氮含量。这是由于在非根际土壤中,高量化肥施入后,形成了局部高浓度物质,改变了土壤理化性质和生物学特性,并不利于微生物的生长活动^[27]。此外,高量氮肥的施用,降低了土壤的C/N比,导致土壤原有有机质分解。而在根际土壤中,由于根际土壤中碳源较充足,且酶活性高于非根际,促进了微生物量的转化速度,使根际微生物量富集更加明显^[28],降低氮肥施用量对根际微生物量碳、氮的影响不显著。土壤微生物氮是表征土壤氮素肥力的重要指标^[29],本试验结果初步表明了氮肥减施可保持较高的根际土壤氮素肥力。

沈宏等^[30]在河南褐土上研究表明土壤微生物量碳、氮在整个玉米生长期呈先迅速上升,达到最大值,然后缓慢下降,以后逐渐趋于平稳的趋势。本试验中根际土壤微生物量氮在玉米大喇叭口期较高,而非根际土壤则在抽雄期表现较高。微生物碳、氮的变化趋势与上述研究不完全一致,这可能与作物品种、种植制度、土壤理化性质、土壤微生物种群和生物学特性等有关。

综上所述,与习惯氮肥高用量相比,冬小麦-夏玉米轮作体系中氮肥施用量减少25%和40%,对玉米地上部生物量、产量及氮吸收累积量无明显影响,而氮肥利用效率有所提高。究其原因,减氮处理下玉米根际土壤中氮素供应能力没有改变与之关系密切。本文结果表明氮肥减施处理,根际土壤硝态氮供应水平并没有明显降低,根际微生物量碳、氮含量尚未受到影响。

参 考 文 献:

- [1] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2008.
National Bureau of Statistics of China. China statistical yearbook[M]. Beijing: China Statistics Press, 2008.
- [2] 朱兆良. 我国氮肥的使用现状、问题和对策[A]. 李庆远, 朱兆良, 于天仁. 中国农业持续发展中的肥料问题[M]. 南京: 江苏科学技术出版社, 1998. 38-51.
Zhu Z L. The status, problems and countermeasures of nitrogen fertilizer application in China[A]. Li Q K, Zhu Z L, Yu T R. Fertilizer issues of sustainable agriculture development in China[M]. Nanjing: Jiangsu Science and Technology Press, 1998. 38-51.
- [3] 张福锁, 王激清, 张卫峰, 等. 中国主要粮食作物肥料利用率现状与提高途径[J]. 土壤学报, 2008, 45(5): 915-924.
Zhang F S, Wang J Q, Zhang W F *et al.* Nutrient use efficiencies of major crops in china and measures for improvement [J]. Acta Pedol. Sin., 2008, 45(5): 915-924.
- [4] 刘婷婷, 樊明寿, 李春俭. 不同氮效率玉米自交系对氮素供应的反应[J]. 华北农学报, 2005, 20(3): 83-86.
Liu T T, Fan M S, Li C J. Responses of maize inbred lines with contrasting N efficiency to different nitrogen supplies [J]. Acta Agric. Bor. - Sin., 2005, 20(3): 83-86.
- [5] 易镇邪, 王璞, 申丽霞, 等. 不同类型氮肥对夏玉米氮素累积、转运与氮肥利用的影响[J]. 作物学报, 2006, 32(5): 772-778.
Yi Z X, Wang P, Shen L X *et al.* Effects of different types of nitrogen fertilizer on nitrogen accumulation, translocation and nitrogen fertilizer utilization in summer maize [J]. Acta Agron. Sin., 2006, 32(5): 772-778.
- [6] 高旺盛, 黄进勇, 吴大付, 等. 黄淮海平原典型集约农区地下水硝酸盐污染初探[J]. 生态农业研究, 1999, 7(4): 41-43.
Gao W S, Huang J Y, Wu D F *et al.* Investigation on nitrate pollution in ground water at intensive agricultural region in Huanghe-huaihe-
- haihe Plain [J]. Ecol. Agric. Res., 1999, 7(4): 41-43.
- [7] 赵久然, 郭强, 郭景伦, 等. 北京郊区粮田化肥投入和产量现状的调查分析[J]. 北京农业科学, 1997, 15(2): 36-38.
Zhao J R, Guo Q, Guo J L *et al.* Investigation and analysis of yield status with chemical fertilizer input in crop land in Beijing [J]. Beijing Agric. Sci., 1997, 15(2): 36-38.
- [8] 巨晓棠, 刘学军, 张福锁. 冬小麦与夏玉米轮作体系中氮肥效应及氮素平衡研究[J]. 中国农业科学, 2002, 35(11): 1361-1368.
Ju X T, Liu X J, Zhang F S. Study on effect of nitrogen fertilizer and nitrogen balance in winter wheat and summer maize rotation system [J]. Sci. Agric. Sin., 2002, 35(11): 1361-1368.
- [9] 张维理, 田哲旭, 张宁, 李晓齐. 我国北方农用氮肥造成地下水硝酸盐污染的调查[J]. 植物营养与肥料学报, 1995, 1(2): 80-87.
Zhang W L, Tian Z X, Zhang N, Li X Q. The investigation of ground water NO₃⁻ - N pollution caused by N fertilizer in North China Plain [J]. Plant. Nutr. Fert. Sci., 1995, 1(2): 80-87.
- [10] Stevenson F J. Cycles of soil carbon, nitrogen, phosphorus, sulfur, micronutrients [M]. New York: John Wiley and Sons, inc., 1986.
- [11] Jackson L E, Burger M, Cavagnaro T R. Roots, nitrogen transformations, and ecosystem services [J]. Ann. Rev. Plant Biol. 2008, 59: 34-63.
- [12] Richardson A E, Barea J M, McNeill A M *et al.* Acquisition of phosphorus and nitrogen in the rhizosphere and plant growth promotion by microorganisms [J]. Plant Soil, 2009, 321: 305-339.
- [13] 赵蕾, 同延安, 赵护兵. 不同施氮量对夏玉米产量、氮肥利用率及氮平衡的影响[J]. 土壤肥料, 2006, (2): 30-33.
Zhan Y, Tong Y A, Zhao H B. Effect of different N rates on yield of summer maize, fertilizer N recovery and N balance [J]. Soils Fert., 2006, (2): 30-33.
- [14] 吴龙华, 张素君, 刘兰民, 等. 不同土壤类型和肥力玉米地土壤养分根际效应研究[J]. 应用生态学报, 2000, 11(4): 545-548.
Wu L H, Zhang S J, Liu L M *et al.* Rhizosphere effect to nutrients in different maize soils with different fertility levels [J]. Chinese J. Appl. Ecol., 2000, 11(4): 545-548.
- [15] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
Bao S D. Analysis technology of soil agricultural chemistry [M]. Beijing: China Agricultural Press, 2000.
- [16] 宋歌, 孙波, 教剑英. 测定土壤硝态氮的紫外分光光度法与其他方法的比较[J]. 土壤学报, 2007, 44(2): 288-293.
Song G, Sun B, Jiao J Y. Comparison between ultraviolet spectrophotometry and other methods in determination of soil nitrate-N [J]. Acta Pedol. Sin., 2007, 44(2): 288-293.
- [17] 吴金水, 林启美, 黄巧云, 肖和艾. 土壤微生物生物量测定方法及其应用[M]. 北京: 气象出版社, 2006.
Wu J S, Lin Q M, Huang Q Y, Xiao H A. Soil microbial biomass methods and application [M]. Beijing: Meteorological Press, 2006.
- [18] 蔡祖聪, 钦绳武. 华北潮土长期试验中的作物产量、氮肥利用率及其环境效应[J]. 土壤学报, 2006, 43(6): 905-910.
Cai Z C, Qin S W. Crop yield, N use efficiency and environmental

- impact of a long-term fertilization experiment in fluvial aquic soil in North China [J]. *Acta Pedol. Sin.*, 2006, 43 (6): 905-910.
- [19] 徐艳,张凤荣,汪景宽,等. 20年来我国潮土区与黑土区土壤有机质变化的对比研究[J]. *土壤通报*,2004,35(2): 102-105.
Xu Y, Zhang F R, Wang J K *et al.* Temporal changes of soil organic matter in Ustic Cambisols and Udic Isohumosols of China in recent twenty years[J]. *Chin. J. Soil Sci.*, 2004, 35(2): 102-105.
- [20] 黄耀,孙文娟. 近20年来中国大陆农田表土有机碳含量的变化趋势[J]. *科学通报*,2007,51: 750-763.
Huang Y, Sun W J. Change trend of organic carbon in farmland surface soil of Mainland China during the past 20 years[J]. *Chin. Sci. Bull.*, 2007, 51: 750-763.
- [21] Cui Z L, Zhang F S, Miao Y X *et al.* Soil nitrate-N levels required for high yield maize production in the North China Plain[J]. *Nutr. Cycl. Agroec.*, 2008, 82: 187-196.
- [22] Hinsinger P, Gobran G R, Gregory P J *et al.* Rhizosphere geometry and heterogeneity arising from root-mediated physical and chemical processes[J]. *New Phytol.* 2005, 168(2): 293-303.
- [23] 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.
Qin S W, Liu Z Y. The nutrient status of soil-root interface VI. Distribution of different fertilizer-N in rhizosphere soil[J]. *Acta Pedol. Sin.*, 1989, 26 (2): 117-123.
- [24] 伊藤纯雄. 水稻根周边における窒素移动のモデル的解析[J]. *日本土壤肥料学杂志*, 1992, 63(6): 652-657.
Itoh S. Study of nitrogen transport around rice root by numerical model[J]. *Jpn. Soc. Soil Sci. Plant Nutr.*, 1992, 63 (6): 652-657.
- [25] 易镇邪,王璞,屠乃美. 夏播玉米根系分布与含氮量对氮肥类型与施氮量的响应[J]. *植物营养与肥料学报*,2009,15(1): 91-98.
Yi Z X, Wang P, Tu N M. Responses of roots distribution and nitrogen content of summer maize to nitrogen fertilization types and amounts[J]. *Plant. Nutr. Fert. Sci.*, 2009, 15(1): 91-98.
- [26] 韩晓日,郑国砥,刘晓燕,等. 有机肥与化肥配合施用土壤微生物量氮动态、来源和供氮特征[J]. *中国农业科学*,2007,40(4): 765-772.
Han X R, Zheng G D, Liu X Y *et al.* Dynamics, sources and supply characteristics of microbial biomass nitrogen in soil applied with manure and fertilizer [J]. *Sci. Agric. Sin.*, 2007, 40(4): 765-772.
- [27] 侯彦林,王曙光,郭伟. 尿素施肥量对土壤微生物和酶活性的影响[J]. *土壤通报*,2004,35(3): 303-307.
Hou Y L, Wang S G, Guo W. Effect of urea application amount on microbes and enzymes in soil[J]. *Chinese J. Soil Sci.*, 2004, 35 (3): 303-307.
- [28] 庞欣,张福锁,王敬国. 不同供氮水平对根际微生物量氮及微生物活度的影响[J]. *植物营养与肥料学报*,2000,6(4): 476-480.
Pang X, Zhang F S, Wang J G. Effect of different nitrogen levels on SMB-N and microbial activity[J]. *Plant. Nutr. Fert. Sci.*, 2000, 6(4): 476-480.
- [29] 薛菁芳,高艳梅,汪景宽,等. 土壤微生物量碳、氮作为土壤肥力指标的探讨[J]. *土壤通报*,2007,38(2): 247-250.
Xue J F, Gao Y M, Wang J K *et al.* Microbial biomass carbon and nitrogen as an indicator for evaluation of soil fertility [J]. *Chin. J. Soil Sci.*, 2007, 38(2): 247-250.
- [30] 沈宏,曹志洪,徐本生. 玉米生长期土壤微生物量与土壤酶变化及其相关性研究[J]. *应用生态学报*,1999,10(4): 471-474.
Shen H, Cao Z H, Xu B S. Dynamics of soil microbial biomass and soil enzyme activity and their relationships during maize growth[J]. *Chin. J. Appl. Ecol.*, 1999, 10(4): 471-474.