植物营养与肥料学报 2010,16(4):777-785
Plant Nutrition and Fertilizer Science

不同竞争强度间作体系氮素利用和土壤剖面无机氮分布差异

李秋祝[1,3], 余常兵[1], 胡汉升[1], 孙建好[2], 陈 伟[2], 李 隆[1*]
(1 中国农业大学资源与环境学院,北京 100193;
2 甘肃农业科学院土壤肥料与节水农业研究所,甘肃兰州 730070;
3 吉林大学植物科学学院,吉林长春 130062)

摘要:田间小区试验,研究大麦/玉米间作、小麦/玉米间作和蚕豆/玉米间作及其对应单作体系,在不施氮和施氮 225 kg/hm^2 情况下,对氮素吸收利用效率和土壤剖面无机氮变化的影响。结果表明,作物对养分的竞争能力与其根区土壤无机氮浓度和累积量密切相关。两作物共生期不施氮肥时,0—100 cm 土层,土壤剖面无机氮残留量是间作大麦和间作小麦根区分别比间作蚕豆根区减少 203～282 和 107～171 kg/hm^2;与大麦和小麦间作的玉米根区分别比与蚕豆间作的玉米根区减少 93～120 和 56～87 kg/hm^2。土壤无机氮累积量受作物类型、种间相互作用强度及实时土壤环境条件影响。种间相互作用提高了间作大麦和小麦的氮素当季回收率,但使与其间作的玉米氮素当季回收率降低。大麦/玉米和小麦/玉米竞争体系在不施氮肥时氮素利用效率最高。施用氮肥使大麦、小麦氮素收获指数降低,玉米氮素收获指数升高,对蚕豆无影响。在选择配对作物时,为获得间作优势要充分考虑作物竞争能力、土壤基础肥力条件、施肥水平及配套栽培措施等。低肥力土壤宜选择豆科/禾本科互惠体系,高肥力土壤宜选择禾本科/禾本科竞争体系。

关键词:大麦;小麦;蚕豆;玉米;间作;氮素利用率;土壤无机氮
中图分类号:S344.2;S153.6$^+$1　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1008-505X(2010)04-0777-09

Difference of nitrogen utilization and distribution of mineral nitrogen in soil profile by competitive abilities of intercropping systems

LI Qiu-zhu[1,3], YU Chang-bing[1], HU Han-sheng[1], SUN Jian-hao[2], CHEN Wei[2], LI Long[1*]
(*1 College of Resource and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100193, China;*
2 Institute of Soils, Fertilizers and Water-Saving Agriculture, Gansu Academy of Agricultural Sciences, Lanzhou 730070, China;
3 College of Plant Science, Jilin University, Changchun 130062, China)

Abstract: Difference of nitrogen utilization efficiency and distribution of mineral nitrogen in soil profile by barley/maize, wheat/maize, faba bean/maize intercropping systems and corresponding sole cropping systems with nitrogen application of 0 and N 225 kg/ha were conducted in field microplot experiment. The results indicated that competitive ability of crops for nutrition closely related to the concentration and accumulation of mineral nitrogen in crops root zone. Accumulation of mineral nitrogen under barley and wheat strip intercropped with maize decreased 203-282 and 107-171 kg/ha compared with faba bean intercropped with maize in 0-100 cm soil profile, respectively. Accumulation of mineral nitrogen under maize strip intercropped with barley and wheat reduced 93-120 and 56-87 kg/ha compared with maize intercropped with faba bean, respectively. Crops, interspecific competition and soil condition affected accumulation of mineral nitrogen in soil profile. Interspecific interaction increased nitrogen recovery efficiency for barley and wheat intercropped with maize, however, decreased that for maize intercropped with

收稿日期:2009-09-11　　**接受日期**:2009-12-26
基金项目:国家"十一五"科技支撑计划项目(2006BAD25B02)资助。
作者简介:李秋祝(1975—),女,吉林长春人,博士研究生,主要从事生物多样性与资源高效利用研究。E-mail:liqiuzhuwhy@sina.com
* 通讯作者 Tel:010-62734684, E-mail:lilong@cau.edu.cn

barley and wheat. Nitrogen utilization efficiency was highest in low soil fertility for competitive intercropping system. Nitrogen harvest index was reduced in barley and wheat with N fertilizer applied, but increased in maize and not changed in faba bean. Crops competition, soil fertility, rate of fertilizer application and cultural measure should be considered carefully in order to achieve intercropping advantage when we choice associated crops. Complement system of legumes/cereals were planted in low soil fertility and competitive system of cereals/cereals in high soil fertility.

Key words: barley; wheat; faba bean; maize; intercropping; nitrogen recovery efficiency; soil mineral nitrogen

间作是在同一田地上于同一生长期内,分行或分带相间种植两种或两种以上作物的种植方式[1]。我国间作种植的耕地面积超过2800万公顷[1],印度、拉丁美洲、非洲、东南亚等国家间作种植也很普遍[2]。间作可提高土地生产效率和资源利用效率[3-4],由间作形成的作物复合群体可产生互补作用。在低氮土壤上,不同类型作物如豆科与禾本科间作,由于豆科作物能够通过生物固氮能力来获得高产而倍受人们关注[5-7]。以往研究主要集中在豆科与禾本科作物间作上[2],但在我国西北半干旱灌溉农业生态区,生产上仍然有较大面积和多种类型的禾本科与禾本科间作形式[8],且都具有明显产量优势。甘肃省,小麦/玉米间作复种蔬菜面积1995年达20多万公顷,在6000多公顷的面积上单产超过15000 kg/hm^2[9];青海省,春小麦或冬小麦、青稞等麦类作物与玉米间作年均种植面积5000公顷左右;宁夏引黄灌区,小麦/玉米间作套种1995年面积达7.51万公顷[10]。禾本科与禾本科间作虽然具有产量优势,但两作物在共生期也存在竞争。已有报道指出,大麦竞争能力强于玉米[11],小麦竞争能力也强于玉米[12-14],蚕豆/玉米间作,作物间是弱竞争,以互惠为主[6],且间作后两作物根系在土壤剖面的分布和根系形态都发生了改变[15]。不同类型作物间作,根系相互作用如何影响土壤无机氮的累积和分布,则是众所关心的问题。

据联合国粮农组织报道,在2007～2008年度间,全球大约施用氮肥12.8万吨[16],氮肥施用使粮食产量大幅度提高的同时氮肥利用效率却在下降。对于禾谷类作物而言,平均只有33%[17],大部分氮肥以地表径流、淋洗进入地下水、经微生物反硝化或挥发进入大气层等方式损失,成为环境隐患[18]。甘肃河西走廊灌区灌漠土上,光照充足、蒸发量大、大水漫灌方式加大了土壤无机氮的累积和淋失,既降低了肥料利用效率,又对地下水造成污染,严重威胁人体健康。在该地区田间原位条件下,采用不同竞争类型的间作体系(强竞争的大麦/玉米体系,协同或弱竞争的小麦/玉米体系及互惠的蚕豆/玉米体系)作为研究对象,研究施氮和不施氮土壤剖面无机氮分布和氮素吸收利用效率,探讨种间相互作用强弱对作物氮素利用及土壤无机氮残留、分布的影响,为该地区作物合理配置及间作带田施肥提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于2007年和2008年3～10月在甘肃省农业科学院土壤肥料与节水农业研究所白云绿洲农业试验站进行。地处38°37′ N,102°40′ E,年平均气温7.7℃,≥0℃和≥10℃的有效积温分别为3646℃和3149℃,无霜期170～180 d左右,年均太阳辐射总量5988 MJ/m^2,年均降雨量150～200 mm,潜在蒸发量2021 mm,属于典型的一季有余、两季不足的灌溉农业生态区。供试土壤为灌漠土,2007和2008年年降水量分别为199、111 mm;播前耕层(0—20 cm)基本理化性状:pH(H_2O,2.5:1)7.71、8.08,有机质15.1、20.26 g/kg,全氮0.13、0.98 g/kg,Olsen磷22.72、21.86 mg/kg,交换性钾55.05、125.7 mg/kg,无机氮29.8、31.5 kg/hm^2;0—100 cm土层无机氮为91、127 kg/hm^2。

1.2 试验设计

试验采用裂区设计,主区为施氮水平,用量分别为N 0和225 kg/hm^2,各处理磷肥(重过磷酸钙,含磷量40%)用量均为P 75 kg/hm^2;副区为7种种植方式:分别为大麦/玉米间作(IB/M)、小麦/玉米间作(IW/M)、蚕豆/玉米间作(IF/M)、大麦单作(SB)、小麦单作(SW)、蚕豆单作(SF)、玉米单作(SM)。3次重复。单作与间作施肥方式相同,1/2氮肥和全部磷肥于播前均匀撒施于土表,随耕翻入土,另外一半氮肥均分两次分别于玉米拔节前和大喇叭口前作为追肥施入。大麦和小麦施肥量为总肥量的3/4(第二次追肥时大麦、小麦已经收获)。

种植模式采用生产上广泛使用的带状间作,3 个带幅。大麦/玉米和小麦/玉米间作,带宽 1.5 m,其中玉米 2 行,行距和株距分别为 39 cm 和 30 cm,占地 52%; 大麦和小麦各 6 行,行距 12 cm,播种密度 550 株/m^2,占地 48%; 相邻的玉米行和麦类行间距离 25.5 cm。小区长 7 m,宽 4.5 m,面积 31.5 m^2。

蚕豆/玉米间作,带宽 1.2 m,玉米 2 行,行距和株距分别为 40 cm 和 30 cm,占地 2/3; 蚕豆 2 行,行距和株距均为 20 cm,占地 1/3; 相邻的玉米行和蚕豆行间距离 30 cm。小区长 7 m,宽 3.6 m,面积 25.2 m^2。

大麦和小麦单作各 30 行,玉米单作 12 行,蚕豆单作 18 行,各小区长 7 m,宽 3.6 m,面积 25.2 m^2,各作物单作与间作密度相同。

蚕豆播深 10 cm,大麦和小麦播深 4 cm,玉米播深 6 cm。小区间筑埂。自玉米出苗后每间隔 20 多天灌水 1 次,其中大麦和小麦各灌水 3 次; 蚕豆灌水 4 次; 玉米灌水 7 次。作物生长期间保证充分灌水,并人工除草。

间作两作物共生期(玉米出苗至大麦、小麦、蚕豆收获)70～80 d。各作物品种、播种密度及播种和收获日期见表 1。

表 1　作物品种、播种、收获及追肥日期

Table 1　Crops variety and dates of sowing, harvesting and additional fertilizer

年份 Year	作物 Crops	品种 Variety	播种日期 Sowing	收获日期 Harvesting	追肥日期 Additional fertilizer
2007	大麦 Barley(*Hordeum vulgare* L.)	甘啤四号 Ganpi No. 4	18-Mar	15-Jul	7-Jun
	小麦 Wheat(*Triticum aestivum* L.)	永良四号 Yongliang No. 4	18-Mar	15-Jul	7-Jun
	蚕豆 Faba bean(*Vicia faba* L.)	临蚕五号 Lincan No. 5	19-Mar	29-Jul	7-Jun,19-Jul
	玉米 Maize(*Zea mays* L.)	沈丹 16 Shendan No. 16	15-Apr	1-Oct	7-Jun,19-Jul
2008	大麦 Barley(*Hordeum vulgare* L.)	甘啤四号 Ganpi No. 4	19-Mar	18-Jul	28-May
	小麦 Wheat(*Triticum aestivum* L.)	永良四号 Yongliang No. 4	19-Mar	18-Jul	28-May
	蚕豆 Faba bean(*Vicia faba* L.)	临蚕五号 Lincan No. 5	19-Mar	31-Jul	28-May,23-Jul
	玉米 Maize(*Zea mays* L.)	沈丹 16 Shendan No. 16	16-Apr	5-Oct	28-May,23-Jul

1.3　样品采集和测定

各作物成熟后,将子粒与秸秆分开,风干后采用 $H_2SO_4-H_2O_2$ 消煮,凯氏定氮法测定植物样品氮浓度。

分别在麦类和蚕豆旺盛生长期(2007 年 6 月 17 日和 2008 年 6 月 17 日)及玉米旺盛生长期(2007 年 8 月 24 日和 2008 年 8 月 27 日),在各作物带下取 0—20、20—40、40—60、60—80 和 80—100 cm 的土壤。每处理取两钻,同层次混合,鲜土过 2 mm 筛后,准确称取 12 g,加入 100 mL 0.01 mol/L $CaCl_2$ 溶液,震荡 1 h,过滤后,用 TRACCS 2000 型连续流动分析仪测定土壤 NO_3^--N 和 NH_4^+-N 浓度。

1.4　有关参数的计算

氮素当季回收率(Nitrogen recovery efficiency, NRE) = (施氮处理地上部吸氮量-不施氮处理地上部吸氮量)/施氮量 × 100%。表示作物对氮肥的表观利用能力[19]。

氮素收获指数(Nitrogen harvest index, NHI) = 子粒吸氮量/地上部吸氮量。表示作物生长后期干物质由叶片和茎秆向子粒中转移程度的大小,即作物氮素利用能力大小。

土壤无机氮浓度(mg/kg) = 土壤硝态氮浓度 + 铵态氮浓度。

土壤无机氮累积量(kg/hm^2) = 各层土壤无机氮累积量之和。

试验数据用裂区试验设计的方差分析程序进行分析,利用 SAS 统计软件(SAS Institute, 2001)的 ANOVA 程序包进行 $LSD_{0.05}$统计检验。

2　结果与分析

2.1　不同间作体系作物根区土壤无机氮浓度差异

2007 年两作物共生期,土壤肥力较低,不施氮处理,在 20—40 cm 土层,与蚕豆间作的玉米根区土壤无机氮浓度为 5.23 mg/kg,显著高于与大麦和小麦间作的玉米及单作玉米(0.77～1.40 mg/kg)(图 1a),后三者间无差异,其他土层差异不显著; N 225 kg/hm^2 处理,则是与大麦间作的玉米无机氮浓度最高,为 6.60 mg/kg,其他种植方式范围在 2.55～3.44 mg/kg

之间,差异不显著(图1b);与玉米间作的大麦、小麦和蚕豆收获后,各土层间均无差异(图1c,d)。2008年土壤肥力较高,在共生期,不施氮处理,0—20 cm土层,各种植方式间土壤无机氮浓度无差异;20—60 cm土层,与大麦间作的玉米根区最低,为3.92~4.93 mg/kg,显著低于与蚕豆和小麦间作的玉米及单作玉米根区,分别是10.18~16.10、9.17~9.25和5.94~8.08 mg/kg(图1e);N 225 kg/hm^{2}处理,20—60 cm土层则是单作玉米和与蚕豆间作的玉米土壤无机氮浓度显著高于与大麦和小麦间作的玉米(图1f),分别为23.47~24.82、14.59~20.63和11.48~14.12、14.05~15.59 mg/kg。60 cm以下土层,虽然土壤无机氮浓度2008年比2007年高,但2年结果种植方式间差异均不显著。

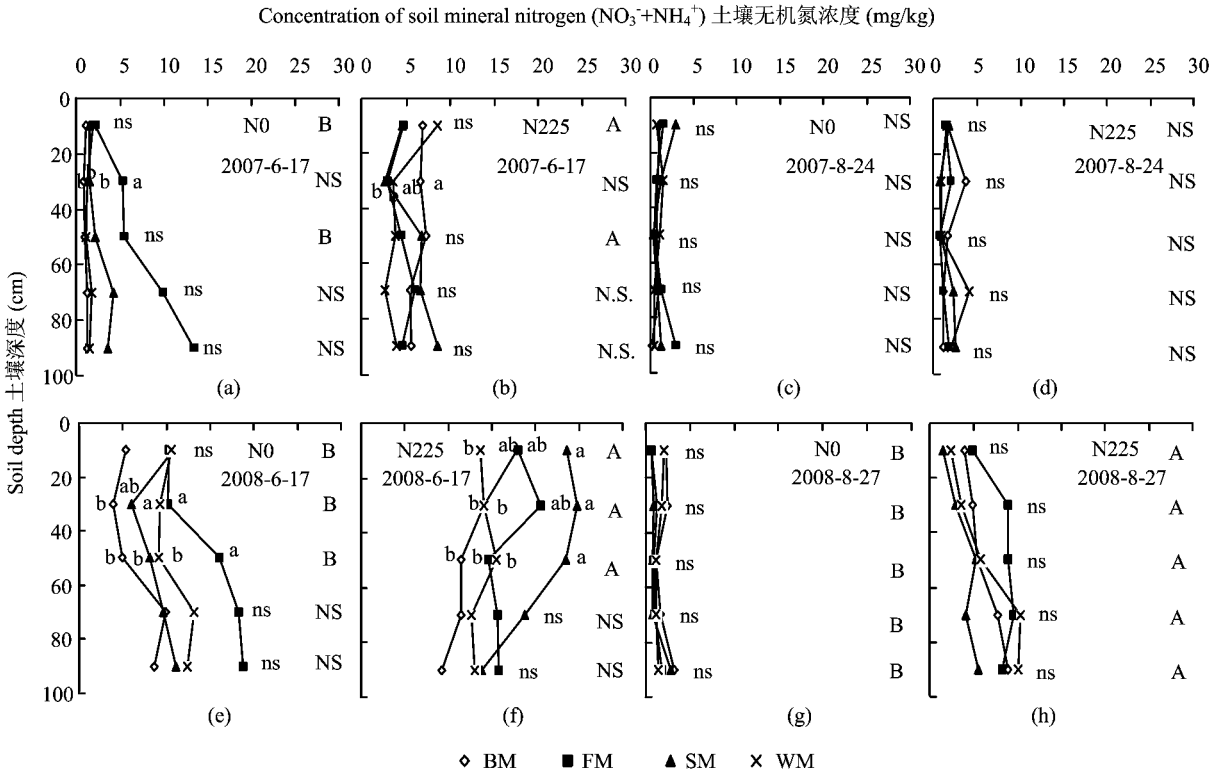

图1 种间相互作用和氮肥对玉米土壤剖面无机氮浓度的影响

Fig. 1 Effect of interspecific interaction and N fertilizer on concentration of mineral nitrogen in soil profile under maize strip

[注(Notes):图中BM、FM、WM、SM分别指与大麦、蚕豆、小麦间作的玉米和单作玉米。小写字母表示不同种植方式间的差异;大写字母表示同一土层不同施氮量间的差异($P \leq 0.05$)。NS和ns表示无差异。BM, FM, WM and SM indicated maize intercropped with barley, faba bean, wheat and sole maize. Different lowercase letters indicated significant difference at $P \leq 0.05$ among different cropping systems. Capital letters indicated significant difference at $P \leq 0.05$ between rates of nitrogen application with same soil depth. NS and ns indicated there was no significant difference.]

2007年,0—60 cm土层,施用氮肥显著提高了间作大麦和单作大麦的土壤无机氮浓度;而间作小麦和单作小麦则是在0—40 cm土层施氮肥处理显著高于不施氮处理;施氮肥对间作蚕豆和单作蚕豆土壤无机氮浓度无影响。2008年,间作和施氮肥对大麦、小麦和蚕豆土壤无机氮浓度都无影响(图2)。

2.2 不同间作体系作物根区土壤无机氮累积量差异

不施氮肥时,在麦类和蚕豆旺盛生长期(6月中旬),与蚕豆间作的玉米根区土壤无机氮累积量显著高于与大麦、小麦间作的玉米及单作玉米,2007年分别为109、16、22和39 kg/hm^2,2008年分别为216、96、160和134 kg/hm^2;施用N 225 kg/hm^{2}时,0—100 cm土层,与蚕豆、大麦、小麦间作的玉米根区土壤无机氮累积量差异不显著(图3a,c)。

当与玉米间作的优势物种如大麦、小麦和蚕豆收获(7月中下旬)后,弱势物种(玉米)经过40 d左右的迅速恢复生长后,则玉米根区土壤无机氮累积量(8月下旬)差异消失(图3b,d)。

两年研究结果都表明,与玉米间作的大麦、小麦和蚕豆与对应单作相比,根区土壤无机氮累积量没有差异(图4a~f)。

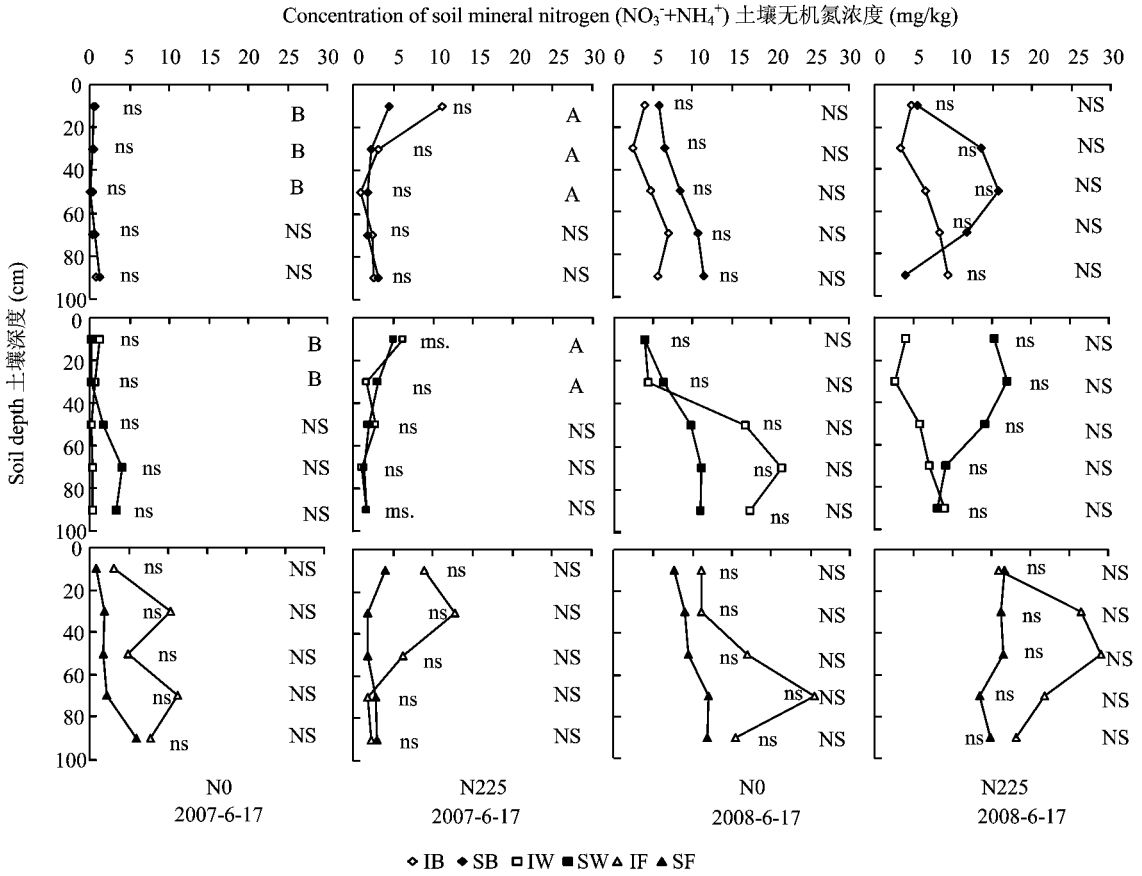

图 2　种间相互作用和氮肥对间作大麦、小麦和蚕豆及其对应单作作物土壤剖面无机氮浓度的影响

Fig. 2　Effect of interspecific interaction and N fertilizer on concentration of mineral nitrogen in soil profile under barley, wheat, faba bean intercropped with maize and corresponding sole crops

[注(Notes): 图中 IB,IW,IF 分别指与玉米间作的大麦、小麦和蚕豆; SB,SW,SF 分别指单作大麦、小麦和蚕豆。大写字母表示同一土层不同施氮量间的差异($p \leq 0.05$)。NS 和 ns 表示无差异。IB,IW and IF indicated that barley, wheat and faba bean intercropped with maize, respectively. SB, SW and SF indicated that barley, wheat and faba bean were cultured with sole crops. Capital letters indicated significant difference at $p \leq 0.05$ between rates of nitrogen application with same soil depth. NS and ns indicated there was no significant difference.]

2.3　不同种植体系氮素收获指数差异

表 2 看出,2007 年施氮处理后,与大麦和小麦间作的玉米及单作玉米氮素收获指数分别比不施氮处理增加 0.13、0.09 和 0.07,差异显著; 而间作大麦、间作小麦及单作大麦施氮处理后氮素收获指数分别比不施氮处理降低 0.2、0.2 和 0.09,差异显著; 施氮处理对间作蚕豆、单作蚕豆和单作小麦及与蚕豆间作的玉米氮素收获指数均无影响。

无论施氮和不施氮,间作都使大麦和小麦的氮素收获指数降低,分别降低 0.01～0.12 和 0.02～0.12,间作对蚕豆收获指数无影响。不施氮肥时,与大麦间作的玉米和单作玉米氮素收获指数最低,分别为 0.50 和 0.49,而施氮后则是与蚕豆间作的玉米最低,为 0.55。2008 年,施氮和间作对不同作物氮素收获指数均无影响。

2.4　不同种植体系氮素当季回收率差异

两年结果(表 3)表明,间作体系的氮素当季回收率都比对应单作体系增加,大麦/玉米间作分别比单作大麦和单作玉米增加 21.4%～22.8% 和 24.2%～33.6%; 蚕豆/玉米间作分别比单作蚕豆和单作玉米增加 1.6%～34% 和 18.2%～23.7%,说明种间相互作用可提高氮素回收率。

3　讨论

3.1　不同竞争强度间作体系中各作物产量、生物量和地上部氮素吸收量的变化

间作能够促进小麦/玉米体系中小麦产量、生物量及地上部氮素吸收量[14]; 而间作对互惠体系中蚕豆无影响[20]。间作在不施氮肥时抑制了大麦/玉米和小麦/玉米间作体系中玉米的生长和养分吸收[14,21]; 施氮肥后,与大麦间作的玉米能够恢复到

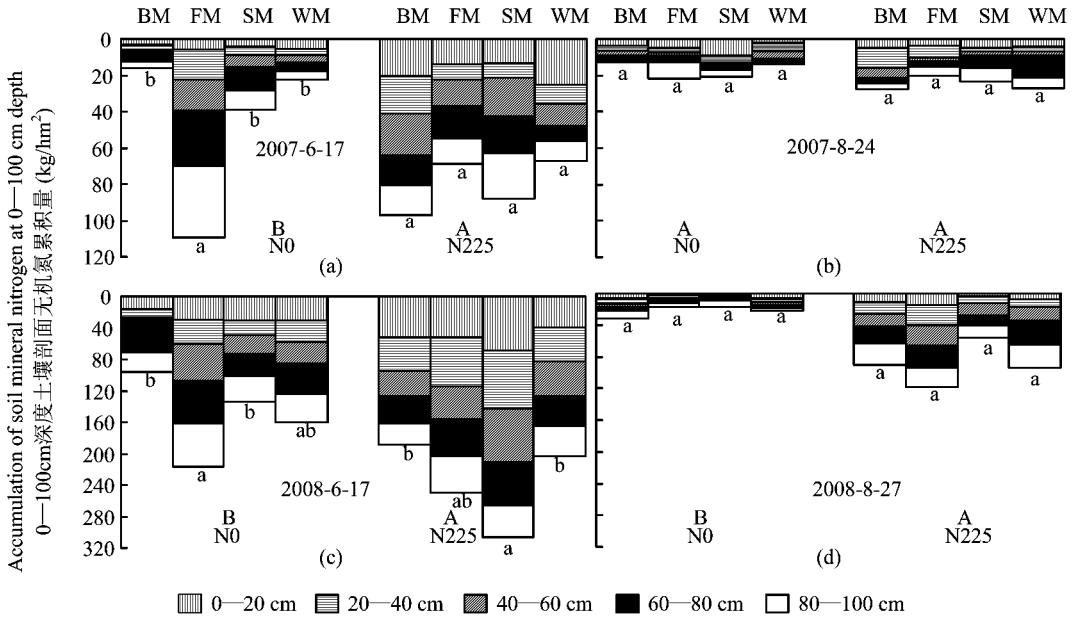

图3 种间相互作用和氮肥对玉米土壤剖面无机氮累积量的影响

Fig. 3 Effect of interspecific interaction and N fertilizer on accumulation of mineral nitrogen in soil profile under maize strip

[注(Note):图中BM,FM,WM,SM分别指指与大麦、蚕豆、小麦间作的玉米和单作玉米。小写字母表示不同种植方式间的差异;大写字母表示不同施氮量间的差异($P \leqslant 0.05$)。BM, FM, WM and SM indicated maize intercropped with barley, faba bean, wheat and sole maize. Different lower case letters indicated significant difference at $P \leqslant 0.05$ among different cropping systems. Capital letters indicated significant difference at $P \leqslant 0.05$ between rates of nitrogen application.]

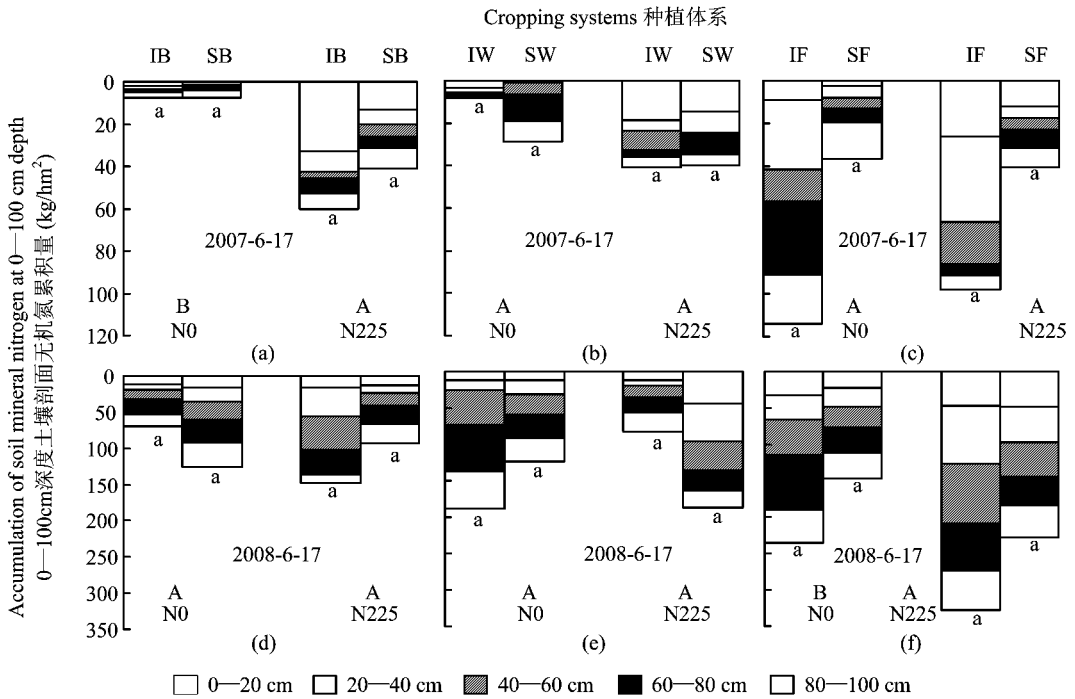

图4 种间相互作用和氮肥对间作大麦、小麦和蚕豆及其对应单作作物土壤剖面无机氮累积量的影响

Fig. 4 Effect of interspecific interaction and N fertilizer on accumulation of mineral nitrogen in soil profile under barley, wheat, faba bean intercropped with maize and corresponding sole crops

[注(Notes):图中IB,IW,IF分别指与玉米间作的大麦、小麦和蚕豆;SB,SW,SF分别指单作大麦、小麦和蚕豆。小写字母表示不同种植方式间的差异;大写字母表示不同施氮量间的差异($P \leqslant 0.05$)。IB, IW and IF indicated that barley, wheat and faba bean intercropped with maize, respectively. SB, SW and SF indicated that barley, wheat and faba bean were cultured with sole crops. Different lower case letters indicated significant difference at $P \leqslant 0.05$ among different cropping systems. Capital letters indicated significant difference at $P \leqslant 0.05$ between rates of nitrogen application.]

表 2　不同种植体系氮素收获指数的差异

Table 2　Difference of nitrogen harvest index in different cropping systems

年份 Year	施氮量 N rate (kg/hm²)	与不同作物间作的玉米 Maize intercropped with			单作玉米 Sole maize	大麦 Barley		蚕豆 Faba bean		小麦 Wheat	
		大麦 Barley	蚕豆 Faba bean	小麦 Wheat		间作 Intercrop.	单作 Sole	间作 Intercrop.	单作 Sole	间作 Intercrop.	单作 Sole
2007	0	0.50 bB	0.54 aAB	0.58 bA	0.49 bB	0.81 aA	0.82 aA	0.70 aA	0.68 aA	0.76 aB	0.78 aA
	225	0.63 aAB	0.55 aC	0.67 aA	0.56 aBC	0.61 bB	0.73 bA	0.70 aA	0.71 aA	0.66 bB	0.78 aA
2008	0	0.71 aA	0.71 aA	0.66 aA	0.69 aA	0.82 aA	0.79 aA	0.71 aA	0.66 aA	0.84 aA	0.84 aA
	225	0.70 aA	0.68 aA	0.65 aA	0.73 aA	0.80 aA	0.77 aA	0.58 aA	0.59 aA	0.80 aA	0.85 aA

注(Notes): 表中小写字母表示不同供氮水平间的差异(纵向比较),$P \leq 0.05$; 大写字母表示同一作物不同种植方式间的比较(横向比较),$P \leq 0.05$。Lower case letters and capitals indicated significant difference at $P \leq 0.05$ among rate of nitrogen application (vertical) and cropping systems (horizontal), respectively.

表 3　不同种植体系氮素当季回收率的差异(%)

Table 3　Difference of nitrogen recovery efficiency in different cropping systems

年份 Year	施氮量 N rate (kg/hm²)	大麦/玉米 Barley/Maize	蚕豆/玉米 Faba/Maize	小麦/玉米 Wheat/Maize	单作玉米 Sole maize	单作大麦 Sole barley	单作蚕豆 Sole faba	单作小麦 Sole wheat
2007	225	66.1 a	65.6 a	50.6 a	41.9	44.7	31.0	58.5
2008	225	45.9 a	30.5 ab	14.6 b	12.3	33.1	28.9	16.3

注(Note): 不同字母表示间作体系间差异,$P \leq 0.05$。Different letters indicated significant difference at $P \leq 0.05$ among intercropping systems.

单作玉米水平[11],而与小麦间作的玉米则可以超过单作玉米[13],与蚕豆间作的玉米则显著高于单作玉米。说明大麦/玉米强竞争体系在充足施氮或者覆膜后依然会有间作优势[21],小麦/玉米协同或弱竞争体系在适量施氮后具有间作优势,而蚕豆/玉米体系在不施氮肥或少量施氮时具有显著间作优势,在过量施氮后间作优势不明显[22]。本研究结果对于小麦/玉米和蚕豆/玉米体系与前人研究结果一致,而对大麦/玉米体系无论施氮与否在 2007 年产量都低于 2008 年[23],是因为 2007 年土壤基础肥力较低(表 1),0—20 cm 耕层土壤和 0—100 cm 根区土壤无机氮累积量都低于 2008 年。可见土壤肥力水平和供氮情况会影响间作体系的间作优势的发挥。

3.2　不同竞争强度间作体系中土壤剖面无机氮的分布

与不同作物间作后,在两作物共生期间,不施氮肥时玉米根区 100 cm 土层范围内土壤无机氮累积量有显著差异。与蚕豆间作的玉米根区无机氮累积量显著高于与大麦、小麦间作的玉米及单作玉米,这与 Li 等[24]的研究结果一致,可能是蚕豆的生物固氮功能减少了自身对土壤氮素的消耗[25],同时残留了较多土壤氮供玉米利用。研究结果表明,与大麦间作的玉米根区土壤无机氮累积量最低,可能是因为大麦根系可以生长到与之间作的玉米根区[21],并吸收利用玉米根区的有效氮,这是大麦竞争能力最强的原因。Hauggard-Nielsen 等[26]利用同位素^{32}P 技术证明,根系分布和根系对土壤氮素的竞争相关。种间相互作用强度和土壤肥力状况都可能影响间作玉米根区土壤无机氮累积量,但对间作大麦、小麦和蚕豆无显著影响。说明作物类型、种植方式及实时环境条件如年际间多种气象因素、土壤因素等,尤其是土壤水分状况,都会影响土壤中无机氮的累积量[27]。

Li 等[15]的田间试验表明,当小麦和蚕豆分别与玉米间作时,小麦根系可以生长到玉米根区,而蚕豆根系则不能生长到玉米根区,由此证明与小麦间作的玉米根区土壤无机氮累积量低于与蚕豆间作的玉米根区的原因是作物对养分的吸收受作物根系分布的影响。表明土壤中无机氮浓度和累积量与作物根系分布及其养分吸收能力密切相关。刘广才[21]研究表明,当大麦与玉米间作时,共生期间作大麦根系横向分布能够占据并利用两作物地下部的大部分空间,而间作玉米根系只能利用其根系范围较小的空间; 当玉米进入灌浆期(大麦收获后)间作玉米则占

据并利用两间作作物的大部分地下部空间,横向扩大了根系养分吸收的有效空间。因此,当间作中优势作物(大麦、小麦、蚕豆)收获后,竞争解除,玉米根系吸收范围扩大,在高肥力施氮条件下与不同作物间作的玉米带下土壤无机氮差异消失。说明施氮可以缓解大麦、小麦等对玉米生长的抑制作用,与Hauggard-Nielsen等[28]在小麦和豌豆间作中的研究结果一致。

党廷辉等[29]研究认为,旱地土壤中的硝态氮数量与氮素利用效率呈反比,因为旱地土壤中的无机氮以硝态氮为主[30-31]。本研究认为大麦、小麦和蚕豆分别与玉米间作后,玉米根区无机氮累积量恰好反映了各间作体系的竞争强度。因此,在选择作物搭配组合时,必须要考虑土壤中播前无机氮库残留情况和种间相互作用强弱。低肥力土壤宜选择豆科/禾本科间作体系,高肥力土壤宜选择禾本科/禾本科竞争体系。作物根区土壤无机氮累积量能够间接反映作物根系对土壤氮的吸收能力和作物竞争能力强弱。

3.3 不同竞争强度间作体系作物氮素利用的差异

无论间作大麦、小麦和蚕豆,与其单作相比,均提高了氮素当季回收率(2007年,蚕豆/玉米体系,不施氮处理除外),说明种间相互作用可以提高优势作物的氮肥吸收效率;与大麦和小麦间作的玉米氮素回收率显著低于与蚕豆间作的玉米和单作玉米,说明蚕豆能够促进玉米的氮素吸收,而大麦和小麦则抑制了玉米的氮素吸收[23]。因此,在选择配对作物时,为获得间作优势要充分考虑作物竞争能力、土壤基础肥力条件、施肥水平及配套栽培措施(如是否覆膜)等,这与刘广才究结果一致[21],但低肥力不施氮加剧种间竞争。

施肥使大麦和小麦氮素收获指数都有降低趋势,对蚕豆无影响,但却提高了与大麦和小麦间作的玉米的氮素收获指数。说明间作改善了竞争体系中玉米的氮素利用能力,这可能是因为大麦和小麦收获后的空带使进入旺盛生长期的玉米通风透光条件得到改善。与单作玉米和单作蚕豆相比,施肥和间作对蚕豆/玉米体系氮素利用能力无影响。

参考文献:

[1] 刘巽浩.耕作学[M].北京:中国农业出版社,1994.
Liu X H. The farming systems[M]. Beijing: China Agricultural Press,1994.

[2] Vandermeer J H. The ecology of intercropping[M]. Cambridge: Cambridge University Press,1989.

[3] Midore D J. Agronomic modification of resource use and intercrop productivity[J]. Field Crop Res. ,1993,34: 357-380.

[4] Francis C A. Biological efficiencies in mixed multiple-cropping systems[J]. Adv. Agron. ,1989,42: 1-42.

[5] Stern W R. Nitrogen fixation and transfer in intercrop systems[J]. Field Crop Res. ,1993,34: 335-336.

[6] Li L, Yang S C, Li X L *et al*. Interspecific complementary and competitive interactions between intercropped maize and faba bean [J]. Plant Soil,1999,212: 205-214.

[7] Knudsen M T, Hauggaard-Nielsen H, Jornsgard B, Jensen E S. Comparison of interspecific competition and N use in pea-barley, faba bean-barley and lupin-barley intercrops grown at two temperate locations[J]. J. Agric. Sci. ,2004,142: 617-627.

[8] 李隆.间作作物种间促进与竞争作用研究[D].北京:中国农业大学博士学位论文,1999.
Li L. Interspecific facilitative and competitive interactions between intercropped species[D]. Beijing: PhD dissertation of China Agricultural University,1999.

[9] 胡恒觉,黄高宝.新型多熟种植研究[M].兰州:甘肃科学技术出版,1999.18-204.
Hu H J, Huang G B. Research on new planting patterns of multiple cropping patterns[M]. Lanzhou: Gansu Science and Technology Press,1999.18-204.

[10] 卢良恕.中国立体农业概论[M].成都:四川科学技术出版社,1999.
Lu L S. The introduction of the comprehensive multistoried and dimension agriculture in china[M]. Chengdu: Sichuan Science and Technology Press,1999.

[11] 刘广才,李隆,黄高宝,等.大麦/玉米间作优势及地上部因素和地下部因素的相对贡献研究[J].中国农业科学,2005,38(9): 1787-1795.
Liu G C, Li L, Huang G B *et al*. Intercropping advantage and contribution of above-ground and below-ground interactions in the barley-maize intercropping[J]. Sci. Agric. Sin. ,2005,38(9): 1787-1795.

[12] Li L, Sun J H, Zhang F S *et al*. Wheat/maize or wheat/soybean strip intercropping Ⅰ. Yield advantage and interspecific interactions on nutrients[J]. Field Crops Res. ,2001,71: 123-137.

[13] 刘广才,杨祁峰,李隆,孙建好.小麦/玉米间作优势及地上部与地下部的相对贡献[J].植物生态学报,2008,32(2): 477-484.
Liu G C, Yang Q F, Li L, Sun J H. Intercropping advantage and contribution of above-and below-ground interactions in wheat-maize intercropping[J]. J. Plant Ecol. ,2008,32(2): 477-484.

[14] 余常兵,孙建好,李隆.种间相互作用对作物生长及养分吸收的影响[J].植物营养与肥料学报,2009,15(1): 1-8.
Yu C B, Sun J H, Li L. Effect of interspecific interaction on crop growth and nutrition accumulation[J]. Plant Nutr. Fert. Sci. ,2009,15(1): 1-8.

[15] Li L, Sun J H, Zhang F S *et al*. Root distribution and interactions between intercropped species[J]. Oecologia,2006,147:

280 –290.

[16] FAO. Current world fertilizer trends and outlook to 2011/2012 [R]. Rome, Italy,2008.

[17] Raun W R, Johnson G V. Improving nitrogen use efficiency for cereal production[J]. Agron. J. ,1999,91: 357 –363.

[18] Vitousek P M, Mooney H A, Lubchenco J *et al*. Human domination of earth's ecosystems[J]. Science,1997,277: 494 –499.

[19] 巨晓棠,张福锁. 关于氮肥利用率的思考[J]. 生态环境,2003,12(2): 192 –197.
Ju X T, Zhang F S. Thinking about nitrogen recovery rate[J]. Ecol. Environ. ,2003,12(2): 192 –197.

[20] Li W X, Li L, Sun J H *et al*. Effect of nitrogen and phosphorus fertilizers and intercropping on uptake of nitrogen and phosphorous by wheat, maize and faba bean[J]. J. Plant Nutr. ,2003,26(3): 629 –642.

[21] 刘广才. 不同间套作系统种间营养竞争的差异性及其机理研究[D]. 兰州: 甘肃农业大学博士学位论文,2005.
Liu G C. Difference and its mechanism of interspecific nutrition competition in different intercropping systems [D]. Lanzhou: PhD dissertation of Gansu Agricultural University,2005.

[22] Li Y Y, Yu C B, Cheng X *et al*. Intercropping alleviates the inhibitory effect of N fertilization on nodulation and symbiotic N_2 fixation of faba bean[J]. Plant Soil,2009,323: 295 –308.

[23] Li Q Z, Sun J H, Wei X J *et al*. Overyielding and interspecific interactions mediated by nitrogen fertilization in faba bean, wheat and barley-maize strip intercropping systems [J]. Plant Soil, 2010. (accepted,under revised).

[24] Li W X, Li L, Sun J H *et al*. Effects of intercropping and nitrogen application on nitrate present in the profile of an Orthic Anthrosol in Northwest China[J]. Agr. Ecosyst. Environ. ,2005, 105: 483 –491.

[25] Chu C X, Shen Q R, Cao G L. Nitrogen fixation and N transfer from peanut to rice cultivated in aerobic soil in an intercropping system and its effect on soil N fertility[J]. Plant Soil,2004,263: 17 –27.

[26] Hauggard-Nielsen H, Ambus H, Jensen E S. Temporal and spatial distribution of roots and competition for nitrogen in pea-barley intercrops-a field study employing ^{32}P technique[J]. Plant Soil, 2001,236: 63 –74.

[27] 叶优良. 间作对氮素和水分利用的影响[D]. 北京: 中国农业大学博士学位论文,2003.
Ye Y L. Effect of intercropping on nitrogen and water use[D]. Beijing: PhD dissertation of China Agricultural University,2003.

[28] Hauggard-Nielsen H, Jensen E S. Evaluating pea and barley cultivars for complementarity in intercropping at different levels of soil N availability[J]. Field Crops Res. ,2001,72: 185 –196.

[29] 党廷辉,戚龙海,郭胜利,郝明德. 旱地土壤硝态氮与氮素平衡、氮肥利用的关系[J]. 植物营养与肥料学报,2009,15(3): 573 –577.
Dang T H, Qi L H, Guo S L, Hao M D. Relationship between soil nitrate, nitrogen balance and utilization in rainfed land[J]. Plant Nutr. Fert. Sci. ,2009,15(3): 573 –577.

[30] 戴明宏,陶洪斌,王利纳,等. 华北平原春玉米种植体系中土壤无机氮的时空变化及盈亏[J]. 植物营养与肥料学报,2008,14(3): 417 –423.
Dai M H, Tao H B, Wang L N *et al*. Spatial-temporal dynamical of soil mineral nitrogen and balance analysis during spring maize season[J]. Plant Nutr. Fert. Sci. ,2008,14(3): 417 –423.

[31] 李玉英. 蚕豆/玉米种间相互作用和施氮对蚕豆结瘤固氮的影响研究[D]. 北京: 中国农业大学博士学位论文,2008.
Li Y Y. Effect of interspecific interactions and nitrogen levels on nodulation and nitrogen fixation of faba bean in faba bean/maize intercropping[D]. Beijing: PhD dissertation of China Agricultural University,2008.