

蚕豆/玉米间作系统经济生态施氮量及对氮素环境承受力

李玉英^{1,2}, 余常兵¹, 孙建好⁴, 李春杰¹, 李隆¹, 程序^{3*}

(1. 中国农业大学资源与环境学院, 北京 100094; 2. 南阳师范学院生命科学与技术学院, 南阳 473061;
3. 中国农业大学农学与生物技术学院, 北京 100094; 4. 甘肃农业科学院土壤与肥料研究所, 兰州 730070)

摘要: 通过河西走廊灌区田间试验, 对不同施氮水平下蚕豆/玉米间作系统的生产力、氮素吸收利用率及土壤无机氮累积量进行了研究, 并利用线性加平台模型探讨了间作系统的经济生态施氮量。结果表明间作系统的生产力与施氮量的线性加平台模型的相关性达到极显著水平($P < 0.001$), 0~160 cm 土壤无机氮累积量与施氮量间以二次曲线模型相关性最高; 种间互作显著提高系统生产力和氮素吸收, 增幅分别为23%和33%; 间作系统生产力、养分吸收量及土壤无机氮量随着施氮量的增加而增加; 高氮肥量和种间互作使作物发生氮素“奢侈吸收”。如果充分考虑到生产、生态和经济效益, 则间作系统适宜施氮量为186 kg/hm², 对应生产力为10.6×10³ kg/hm², 增产14%, 节约38%氮, 减少75%土壤无机氮残留。

关键词: 蚕豆/玉米间作; 氮素吸收利用率; 土壤无机氮累积; 适宜施氮量

中图分类号: S158

文献标识码: B

文章编号: 1002-6819(2008)-3-0223-05

李玉英, 余常兵, 李春杰, 等. 蚕豆/玉米间作系统经济生态施氮量及对氮素环境承受力[J]. 农业工程学报, 2008, 24(3): 223-227.

Li Yuying, Yu Changbing, Sun Jianhao, et al. Nitrogen environmental endurance and economically-ecologically appropriate amount of nitrogen fertilizer in faba bean/maize intercropping system [J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(3): 223-227. (in Chinese with English abstract)

0 引言

化肥的增产作用占到农作物增产的60%以上。然而, 过量氮肥的使用, 已造成严重的环境问题, 如地下水污染、水体富营养化、温室效应、生物多样性和生态系统稳定性降低、农作物病虫害加重等^[1-5]。在人口增长和粮食需求的驱动下, 肥料消费量仍在不断增加^[1]。因此, 在土地、水分、矿石等资源十分有限的情况下, 要解决粮食问题, 必须寻求既能高产又能高效利用资源的农业生产途径。间作、套种和林粮结合等农业经营系统正是在这种背景下发展起来的一系列有效利用土地的生产体系^[6]。豆科/非豆科间作结合了粮食生产, 利用了生物固氮的优点, 并可减少化肥的投入是一种稳产、高产、高效、可持续的种植体系, 在世界各地有广泛的分布^[7], 在中国分布面积较大, 如西北地区蚕豆/玉米和大豆/小麦、西南地区蚕豆/小麦和蚕豆/油菜、华东及华北地区花生/玉米等^[6, 8-11]。

蚕豆/玉米间作互惠系统不但能同时提高玉米和蚕豆的产量^[8-10], 且可以促进蚕豆结瘤固氮^[11, 12], 此外可减少土壤剖面无机氮残留^[13]。但是, 前人对于该间作系统的合理施氮量缺乏系统的研究。为了系统地探索该系统的合理施氮量, 本试验研究了施氮量和种植方式对间作系统生产力、氮素吸收利用以及土壤无机氮累积量的影响, 并利用线性加平台模型求算兼顾生产、生态和经济三效益的适宜施氮量, 旨在为该系统养分资源的合理利用与优化管理提供理论依据, 对走生产、生态“双赢”的可持续农业之路具有重要的理论价值和实践指导意义。

1 材料与方法

1.1 研究地区概况

试验于2006年3~10月在甘肃省武威市永昌镇白云村进行, 地理位置38°37'N, 102°40'E, 海拔1504 m, 无霜期150 d左右, 年降雨量150 mm, 年蒸发量2021 mm, 年均气温7.7℃, 年日照时数3023 h, ≥10℃的有效积温为3016℃, 年太阳辐射总量140~158 kJ/cm², 属于典型的两季不足、一季有余的自然生态区。供试土壤为石灰性灌漠土, 耕层土壤pH值为8.01, 铵态氮、硝态氮、全氮、有机质、速效磷和速效钾分别为3.12、6.24、1.21×10²、2.19×10³、27.21和1.19×10³ mg/kg; 0~20、20~40、40~60、60~80、80~100和100 cm以下土层的土壤容重分别为1.26、1.47、1.52、1.44、1.30和1.37 g/cm³; 前茬作物为单作大麦。

1.2 试验设计

采用裂区设计, 主区为氮水平(尿素, 含氮量46%): 用量分别为0、75、150、225、300 kg/hm²; 副区为种植方式: 单作蚕豆、单作玉米、蚕豆/玉米间作; 3次重复。

采用带状间作, 3个带幅, 带宽1.20 m, 其中玉米2行, 行距和株距分别为0.40 m和0.30 m, 占地2/3; 蚕豆2行, 行距和株距均为0.20 m, 占地1/3; 相邻的玉米行和蚕豆行的距离为0.30 m。单作与间作密度相同。

小区面积19.80 m², 小区间筑埂以防止串水串肥。试验不设农家肥处理, 各小区均施三料磷肥(75 kg/hm²), 播前以基肥一次性撒施并翻入。氮肥施用方法: 基肥、拔节肥和大喇叭口追施(结合灌水)分别为50%、25%、25%。作物生长期间充分灌水并人工除草。试验期间降雨和灌水分布如图1。

供试蚕豆(*Vicia faba* L.)为临蚕5号(Lincan No.5), 3月18日播种, 4月17日出苗, 8月1日收获; 玉米(*Zea mays* L.)为沈单16号(Shendan No.16), 4月19日播种, 5月10日出苗, 10月4日收获, 两作物共处期(玉米出苗至蚕豆收获)86 d。

收稿日期: 2007-10-20 修订日期: 2008-02-22

基金项目: 国家“973”计划项目(2006CB100206)

作者简介: 李玉英(1969—), 女, 河南南召人, 副教授, 博士生, 主要从事农业生态方向的研究。北京 中国农业大学资源与环境学院, 100094。

Email: lyy00@yahoo.cn

*通讯作者: 程序(1944—), 男, 江苏无锡人, 教授, 博士生导师, 主要从事农业生态与生物质能源研究。北京 中国农业大学生物质工程中心, 100094

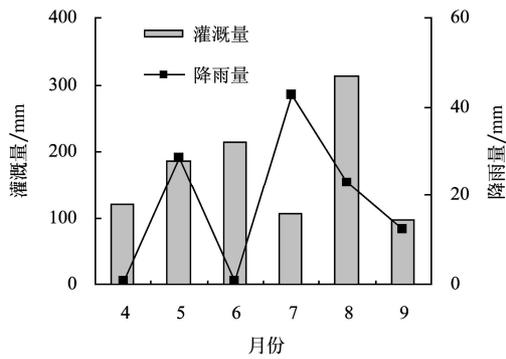


图1 试验期间降雨和灌溉分布

Fig.1 Distribution of precipitation and irrigation during experiment period

1.3 样品采集及分析方法

1.3.1 作物样品

分别于蚕豆和玉米成熟时,在保证离边行 0.5 m 以上条件下,于测产带取蚕豆 20 株和玉米 10 株考种,风干后用以测定植株氮含量。测产时将测产带考种剩下的所有植株收获,与考种样品一起作为实际测产量。采用 $H_2SO_4-H_2O_2$ 消煮,凯氏定氮法测定样品氮浓度^[14]。

1.3.2 土壤样品

分别于蚕豆和玉米收获后在各处理中的蚕豆带和玉米带取土样,每带取样深度为 0~160 cm,每 20 cm 为一层,每带取 2 个点,鲜土样品取回后充分混合并过筛(0.25 目),称取 12 g,放入 -20℃ 冰箱,同时另取一份土样测定土壤含水率。测定前将样品解冻,加入 100 mL 0.01 mol/L 的 $CaCl_2$ 浸提,振荡 1.0 h,过滤后用流动分析仪(TRAACS2000)测定土壤硝态氮和铵态氮^[13]。

1.4 数据处理与统计分析

1.4.1 数据计算

间作优势:土地当量比(land equivalent ratio, LER)常被用于衡量间作优势^[7]。

$$LER = Y_{if}/Y_{sf} + Y_{im}/Y_{sm} \quad (1)$$

式中 Y_{if} 、 Y_{im} ——间作蚕豆和玉米的籽粒产量或氮吸收量, kg/hm^2 ; Y_{sf} 、 Y_{sm} ——单作蚕豆和玉米的籽粒产量或氮吸收量, kg/hm^2 。若 $LER > 1$,表明间作比单作利用更多的资源供作物生长;若 $LER < 1$,单作比间作更有效利用资源。

间作系统生产力(system productivity, SP , $kg \cdot hm^{-2}$)为

单位面积两种间作物籽粒产量的加权平均值。

$$SP = Y_{if} \times Z_f + Y_{im} \times Z_m \quad (2)$$

式中 Y_{if} 、 Y_{im} ——间作蚕豆和玉米的籽粒产量, kg/hm^2 ; Z_f 、 Z_m ——蚕豆和玉米在间作系统中所占的面积比例,其中 $Z_f = 0.33$, $Z_m = 0.67$ 。

间作系统和单作系统氮素吸收和土壤无机氮累积量计算同式(2)。

氮素收获指数(nitrogen harvest index, NHI)为成熟期单位面积植株籽粒氮素吸收量与植株总氮素吸收量之比。

$$NHI = GNU/NU \quad (3)$$

氮素吸收率(nitrogen uptake efficiency, NUE , kg/kg)为单位面积植株总氮素吸收量与单位面积施入的纯氮量之比。

$$NUE = NU/N_f \quad (4)$$

氮素干物质利用率(nitrogen dry matter production efficiency, $NDMPE$, kg/kg)为单位面积植株干物质质量与单位面积植株总氮素吸收量的比值。

$$NDMP = DM/NU \quad (5)$$

氮素经济利用率(nitrogen grain production efficiency, $NGPE$, kg/kg)为单位面积生产力与单位面积植株总氮素吸收量的比值。

$$NGPE = SP/NU \quad (6)$$

式中 GNU ——作物籽粒的吸氮量, kg/hm^2 ; NU ——作物秸秆和籽粒的总氮量, kg/hm^2 ; DM ——秸秆和籽粒的总干物质质量, kg/hm^2 ; N_f ——施入的纯氮量, kg/hm^2 。

1.4.2 统计分析

采用裂区设计的方差分析进行数据分析,线性加平台模型系利用 SAS 统计软件(SAS Institute, 2001)建立。

2 结果与分析

2.1 间作和氮肥对作物生产力的影响

间作显著地提高玉米产量,增幅为 16%。随着施肥量的增加,无论单作或是间作玉米籽粒产量均增加,施肥增加的产量幅度为 20%~92% (表 1)。

间作同样极显著地提高蚕豆产量,增幅为 60%,但施氮肥对蚕豆产量影响不显著(表 1)。

蚕豆/玉米间作系统具有显著的间作优势,无论施氮水平高低, LER 均大于 1,但氮肥对 LER 影响不显著。对于系统生产力趋势同玉米产量变化趋势,间作系统比单作系统生产力提高了 23%,施氮水平极显著地影响系统生产力(表 1)。

表 1 间作和氮肥对作物生产力的影响

Table 1 Effects of intercropping and nitrogen fertilizer on crop productivity

/ $kg \cdot hm^{-2}$

施氮量/ $kg \cdot hm^{-2}$	玉米			蚕豆			系统			LER
	单作	间作	平均	单作	间作	平均	单作	间作	平均	
0	6847 a	6476 a	6662 C	3584 a	5827 a	4705 A	5770 a	6262 a	6016 C	1.21 A
75	7214 b	8769 a	7992 C	3490 b	5953 a	4721 A	5985 b	7840 a	6912 C	1.38 A
150	8970 a	11902 a	10436 B	3475 b	5632 a	4554 A	7157 a	9833 a	8495 B	1.44 A
225	10823 b	12845 a	11834 AB	3838 a	5447 a	4642 A	8518 b	10404 a	9461 A B	1.30 A
300	12202 a	13422 a	12812 A	3399 b	5660 a	4530 A	9297 a	10861 a	10079 A	1.28 A
平均	9211 b	106823 a		3557 b	5704 a		7345 b	9040 a		1.32

注:同一作物体系下的同行不同小写字母表示种植体系差异显著,相同小写字母表示差异不显著($P < 0.05$); 同列中不同大写字母表示氮水平间差异显著($P < 0.05$),相同大写字母表示差异不显著。下同。

2.2 间作和氮肥对作物地上部氮素吸收的影响

试验结果表明, 作物氮素吸收规律与作物生产力趋势大致相同。间作极显著地提高玉米吸氮量, 增幅为35%。单作或是间作玉米吸氮量随着施氮量增加而增加, 增幅为18%~139% (表2)。

间作显著地提高蚕豆氮素吸收, 增幅为31%, 但氮肥对蚕豆氮素吸收影响不显著 (表2)。

与单作系统相比所有施氮水平下间作系统氮素吸收均表现

出一定的间作优势, LER 均大于1 (表2)。间作系统中无氮肥区作物吸收氮素总量为 $216 \text{ kg}/\text{hm}^2$ 。而施氮量增加到一定程度 (225 和 $300 \text{ kg}/\text{hm}^2$), 作物氮吸收差异不显著。从农田生态系统养分平衡角度看, 必须通过施肥补充相应的养分量, 保持系统养分的收支处于平衡状态, 农田生态系统才能持续与稳定。前人对蚕豆和玉米间作系统的氮吸收规律研究结果与本试验相似^[9, 10, 11-13]。

表2 间作和氮肥对作物地上部氮素吸收的影响

施氮量 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$	玉米			蚕豆			系统			LER
	单作	间作	平均	单作	间作	平均	单作	间作	平均	
0	111 a	132 a	122 C	295 a	386 a	340 A	172 b	216 a	194 C	1.25 A
75	111 b	178 a	143 C	283 b	399 a	341 A	168 b	250 a	209 C	1.54 A
150	167 a	216 a	191 B	290 b	387 a	338 A	208 b	272 a	240 B	1.35 A
225	239 a	305 a	272 A	280 b	384 a	332 A	253 b	331 a	292 A	1.34 A
300	239 b	343 a	291 A	306 a	344 a	325 A	261 b	344 a	302 A	1.34 A
平均	174 b	234 a		291 b	380 a		212 b	282 a		1.36

2.3 间作和氮肥对作物氮素吸收利用率的影响

氮肥对作物氮素吸收率影响显著, 而对氮素收获指数和利用率影响不显著 (表3)。随着施氮量增加, 无论单作系统或是间作系统呈现一致的变化趋势, 氮素吸收率呈下降趋势, 从3%下降至1%, 这主要是高氮条件下的氮肥“奢侈吸收”所致。种植体系对氮素吸收和利用影响也达显著水平 (表3), 间作系统

中氮吸收率和氮收获指数分别比单作系统增加39%和11%, 而经济利用率和干物质利用率下降, 且经济利用率明显低于干物质利用率, 说明在间作系统中尽管提高了作物的生产力, 但同时发生了作物氮素“奢侈吸收”现象。这种现象也发生在其他单作作物高氮量条件下^[4, 5, 15]。

表3 间作和氮肥对作物氮素吸收利用率的影响

施氮量 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$	氮素收获指数		氮素吸收率/ $\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$		氮素经济利用率/ $\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$		氮素干物质利用率/ $\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$	
	单作	间作	单作	间作	单作	间作	单作	间作
0	0.56 a	0.64 a			33.55 a	28.83 a	95.05 a	77.78 a
75	0.52 b	0.64 a	2.24 b	3.33 a	36.25 a	31.42 a	98.58 a	82.73 a
150	0.57 a	0.60 a	1.39 b	1.81 a	34.32 a	36.10 a	91.95 a	87.99 a
225	0.58 a	0.58 a	1.12 b	1.47 a	34.15 a	31.45 a	82.90 a	78.73 a
300	0.54 a	0.62 a	0.87 b	1.145 a	35.72 a	31.54 a	83.78 a	79.01 a
平均	0.56 b	0.62 a	1.40 b	1.94 a	35.11 a	32.63 b	89.30 a	82.12 b

2.4 间作和氮肥对土壤无机氮累积的影响

作物根系分布直接影响到作物养分的吸收。蚕豆/玉米间作根系分布研究表明^[17], 蚕豆根系保持在70~80 cm, 进入玉米根区的数量很少, 而玉米根系可进入到蚕豆根区, 和蚕豆根系共同生长, 且深度长至100 cm土层, 因此本研究中把0~100 cm 土层作为作物根层有效层, 在100~160 cm土层中的无机氮视为氮素损失, 如果后者过高, 将该施氮量对农业生态环境有潜在隐患。表4结果表明, 在不施氮条件下, 蚕豆和玉米共生期和作物完全收获后, 无论蚕豆地或是玉米地, 0~100 cm 和100~160 cm两个土层中, 间作土壤无机氮累积量都低于单作, 且0~100 cm 土层无机氮累积量比在100~160 cm土层高, 但种植方式对两个土层中无机氮累积量影响均不显著。可能蚕豆/玉米间作在共生期由于蚕豆生物固氮而提高了土壤肥力, 促进两作物氮素吸收利用, 并最终减少了土壤无机氮累积。

随着施氮量的增加, 无论单作系统或是间作系统无机氮量在各个土层均增加, 并达显著水平。在共生期低氮条件下 (75 和 $150 \text{ kg}/\text{hm}^2$) 两个土层无机氮累积与对照差异不显著, 但高氮量 ($300 \text{ kg}/\text{hm}^2$) 与其他氮量均达到显著水平; 施肥后间作土壤无机氮累积比单作有所增加, 但差异不显著 (表4)。而在作物全部收获后, 只有高氮水平与其他施氮量达显著水平, 间作后可降低0~160 cm土层无机氮累积40% (表4)。试验结果显示了施氮量对土壤剖面无机氮的影响。本研究中土壤无机氮残留量与类似研究相比较低^[13], 可能由于灌水量较多引起作物生长期无机氮下移^[16]。

国外的一些研究表明当作物收获后0~120 cm 的土壤中硝态氮含量分别 >50 、 $>120 \text{ kg}/\text{hm}^2$, 土壤溶液中的硝态氮浓度 >10 、 $>20 \text{ mg}/\text{kg}$ ^[18], 收获后土壤中的硝态氮的累积量和土壤溶液中的硝态氮含量呈正相关。因此, 将收获后土壤中残留的硝态氮

控制在一定的范围是兼顾生产和生态的施氮量的一个重要指标, 欧盟将这个值定为 90 kg/hm^2 ^[18]。本研究中玉米收获后 $0\sim 160 \text{ cm}$ 土壤无机氮累积量在低氮量时出现明显的一个缓冲过程, 即先平滑后上升的趋势(图2)。这与大多数类似试验出现的趋势一致^[14]。而钟茜等通过小麦玉米轮作体系对氮素环境承

受力的研究表明玉米收获后土壤残留硝态氮随着施氮量增加直线上升, 认为硝态氮控制在 150 kg/hm^2 作为环境可接受的值^[19]。类似试验结果差异主要与作物类型、种植体系、试验地土壤播前无机氮及田间管理密切相关。

表4 不同时期间作和氮肥对土壤无机氮累积量的影响

施氮量 /kg·hm ⁻²	土层 /cm	蚕豆收获			玉米收获		
		单作系统	间作系统	平均	单作系统	间作系统	平均
0	0~100	46.0a	41.1a	43.5 C	22.4a	15.5a	18.9 B
	100~160	39.1a	33.8a	36.5 C	12.0a	8.6a	10.3 C
75	0~100	42.6a	44.0a	43.3 C	18.5a	10.9a	14.7 B
	100~160	31.6a	40.9a	36.2 C	8.0a	3.5a	5.7 BC
150	0~100	57.9a	55.8a	56.8 BC	20.5a	14.6a	17.5 B
	100~160	48.7a	46.4a	47.5 BC	8.5a	8.8a	8.6 BC
225	0~100	70.0a	78.8a	74.4 B	38.5a	13.8a	26.2 AB
	100~160	52.0a	63.7a	57.9 AB	24.1a	13.2a	18.7 B
300	0~100	145.4a	152.9a	149.1 A	47.8a	28.0a	37.9 A
	100~160	74.1a	73.4a	73.7 A	36.7a	26.9a	31.8 A
平均	0~100	72.4a	74.5a		29.5 a	16.5 b	
	100~160	49.1a	51.6a		17.9a	12.2a	

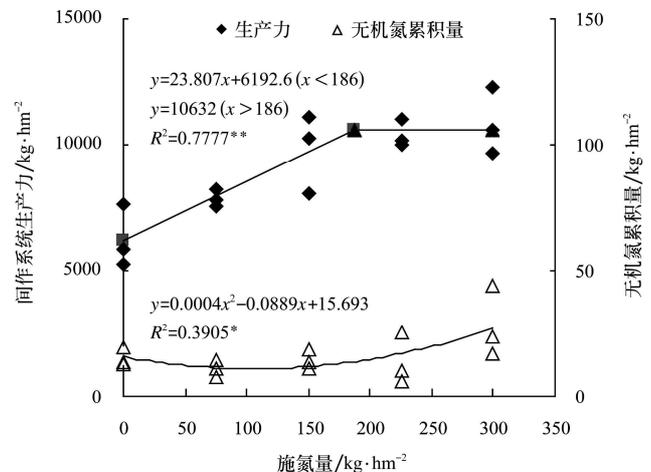
2.5 间作系统合理施氮量及对氮素环境承受力

利用线性加平台模型模拟施氮量与生产力的关系, 其决定系数最高, 并达到极显著水平($P < 0.001$), 当施氮量超过拐点值(186 kg/hm^2)时, 间作系统生产力便不再增加。玉米收获后施氮量和 $0\sim 160 \text{ cm}$ 土壤剖面无机氮累积量的关系则以二次曲线模型决定系数最高(图2)。对试验数据进行模型模拟和计算机处理, 施氮量与生产力式(7)和土壤无机氮累积量式(8)函数方程分别为:

$$\begin{cases} y = 23.807x + 6192.6 (x < 186) \\ y = 10632 (x > 186) \end{cases} \quad (7)$$

$$y = 0.0004x^2 - 0.0889x + 15.693 \quad (8)$$

将式(7)和式(8)联立方程组, $x = 186 \text{ kg/hm}^2$, 即在蚕豆/玉米间作系统中经济生态施氮量为 186 kg/hm^2 , 其生产力为 $10.6 \times 10^3 \text{ kg/hm}^2$ 。蚕豆和玉米当季价格分别为 1.36 元/kg 和 1.40 元/kg , 其经济效益是 $13.3 \times 10^3 \text{ 元/hm}^2$ 。在经济生态施氮量条件下求得间作系统 $0\sim 160 \text{ cm}$ 土壤剖面无机氮残留量是 24 kg/hm^2 , 即在河西走廊当前生产条件下间作系统对氮素环境承受力界定在此值左右, 对农田生态环境来说是相对安全的。但单作系统随着施氮量增加, 生产力一直上升, 达到 303 kg/hm^2 才达到其最高生产力 9305 kg/hm^2 , 而土壤无机氮累积量已达到 94 kg/hm^2 。结果表明, 该间作系统与单作系统相比, 在节约38%氮条件下, 增产14%, 且减少75%无机氮残留; 与该生产体系农民传统施氮量(225 kg/hm^2)相比, 降低了17%氮消耗。本试验结果的普遍性还需要在不同地区试验来验证, 在以后验证试验设计中应考虑将两种作物分开施肥, 这样对豆科/禾本科间作系统氮素管理更合理。但在本试验作物系统中 186 kg/hm^2 施氮量仍可作为一种兼顾生产、生态和经济效益的平衡施肥的参照值。



注:*, **表示系统生产力和无机氮累积量与施氮量间相关性分别达到显著和极显著程度

图2 施氮对蚕豆/玉米间作系统生产力和 $0\sim 160 \text{ cm}$ 土层无机氮累积量的影响

Fig.2 Effects of nitrogen fertilizer on system productivity and inorganic nitrogen accumulation in $0\sim 160 \text{ cm}$ soil layer by intercropped faba bean and maize

3 结论

1) 蚕豆玉米间作系统具有显著的间作优势, 极显著地提高系统生产力和氮素吸收。间作系统生产力、养分吸收量及土壤无机氮累积量随着施氮量的增加而增加, 但如果施氮量增加到一定程度(300 kg/hm^2), 其生产力及吸氮量增加不显著, 而土壤无机氮累积显著地增加, 多施的氮肥就会损失掉, 既增加了生产成本, 又加重了环境的负担。

2) 间作系统显著地提高氮素收获指数和氮素吸收率, 但降低了氮素利用率。氮素吸收率随着施氮量增加而降低, 施氮量对氮素吸收率影响显著, 而对其他3个氮素指标影响不显著, 在该系统中高氮肥量和种间互作使作物发生氮素“奢侈吸收”现象。

3) 间作系统生产力与施氮量间的线性加平台模型达到极显著水平, 而土壤无机氮累积量与施氮量间以二次曲线模型相关性最高。蚕豆/玉米间作系统经济生态适宜施氮量为186 kg/hm², 相对应生产力为10.6×10³ kg/hm², 可减少75%无机氮残留。在考虑经济生态效益时, 施氮量186 kg/hm²既能维持蚕豆玉米间作系统稳产, 又有利于农田生态环境的保护。

【参 考 文 献】

- [1] 程 序, 邱化蛟, 朱万斌, 等. 中国农业与可持续发展[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- [2] 吕 耀. 农业生态系统中氮素造成的非点源污染[J]. 农业环境保护, 1998, 17 (1): 35-39.
- [3] 陈文新, 李季伦, 朱兆良, 等. 发挥豆科植物-根瘤菌共生固氮作用——从源头控制滥施氮肥造成的面源污染[EB/OL]. <http://www.isp.cas.cn/html/Dir/2006/10/09/14/41/32.html>, 2006-10-9/2007-3-5.
- [4] 李荣刚, 崔玉亭, 程 序. 苏南太湖地区水稻氮肥施用与环境可持续发展[J]. 耕作与栽培, 1999, (4): 49-63.
- [5] 黄进宝, 范晓晖, 张绍林, 等. 太湖地区黄泥土壤水稻氮素利用与经济生态适宜施氮量[J]. 生态学报, 2007, 27 (2): 588-595.
- [6] 佟屏亚. 我国耕作栽培技术成就和发展趋势[J]. 耕作与栽培, 1994, 65 (4): 1-7.
- [7] Willey RW. Intercropping - its importance and research needs part I. competition and yield advantages[J]. Field Crop Research, 1979, (32): 1-10.
- [8] Li Long, Sicun Yang, Xiaolin Li, et al. Interspecific complementary and competitive interactions between intercropped maize and faba bean [J]. Plant Soil, 1999, (212): 105-114.
- [9] Li Long, Zhang Fusuo, Li Xiaoling, et al. Interspecific facilitation of nutrient uptake by intercropped maize and faba bean[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2003, (65): 61-71.
- [10] Li Long, Li Shuming, Zhou Lili, et al. Diversity enhances agricultural productivity via rhizosphere phosphorus facilitation on phosphorus-deficient soils[J]. PNAS, 2007, 104 (27): 11192-11196.
- [11] 房增国. 豆科/禾本科间作的氮铁效应及对结瘤固氮的影响[D]. 北京: 中国农业大学, 2004.
- [12] Fan Fenliang, Zhang Fusuo, Song Yana, et al. Nitrogen fixation of faba bean interacting with a non-legume in two contrasting intercropping systems [J]. Plant Soil, 2006, 283: 275-286.
- [13] Li Wenxue, Li Long, Sun Jianhao, et al. Effects of intercropping and nitrogen application on nitrate present in the profile of an Orthic Anthrosol in Northwest China [J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2005, 105: 483-491.
- [14] 鲍士旦. 土壤农化分析(第3版)[M]. 北京: 中国农业出版社, 2005.
- [15] 张福锁, 马文奇. 肥料投入水平与养分资源高效利用的关系[J]. 土壤与环境, 2000, 9 (2): 36-38.
- [16] 李世清, 李生秀. 半干旱地区农田生态系统中硝态氮的淋失[J]. 应用生态学报, 2000, (11): 240-242.
- [17] Li Long., Sun Jianhao., Zhang Fusuo, et al. Root distribution and interaction between intercropped species [J]. Oecologia, 2006, 147, 280-290.
- [18] Jemison J M, Fox R H. Nitrate leaching from nitrogen fertilized and manured corn measured with zero-tension pan lysimeters [J]. Journal of Environmental Quality, 1994, (7): 258-2611.
- [19] 钟 茜, 巨晓棠, 张福锁. 华北平原冬小麦/夏玉米轮作体系对氮素环境承受力的研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2006, 12 (3): 285-293.

Nitrogen environmental endurance and economically-ecologically appropriate amount of nitrogen fertilizer in faba bean/maize intercropping system

Li Yuying^{1,2}, Yu Changbing¹, Sun Jianhao⁴, Li Chunjie¹, Li Long¹, Cheng Xu^{3*}

(1. College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100094, China;

2. College of Life Sciences and Technology, Nanyang Normal University, Nanyang, Henan 473061, China;

3. College of Agronomy and Biotechnology, China Agricultural University, Beijing 100094, China;

4. Institute of Soils and Fertilizers, Gansu Academy of Agricultural Sciences, Langzhou 730070, China)

Abstract: The effects of nitrogen application rates on the productivity, nitrogen uptake and utilization, and soil inorganic nitrogen accumulation were investigated in faba bean/maize intercropping system through field experiment conducted in Hexi Corridor of Gansu Province. The economically-ecologically appropriate amount of nitrogen fertilizer applied was further studied on the basis of linear plus plateau model. The results showed that the correlations between the productivity and soil inorganic nitrogen accumulation and nitrogen fertilizer were significant by linear plus plateau model and quadratic curve model respectively. Compared with sole cropping system, intercropping significantly increased system productivity and nitrogen acquisition by 23% and 33%, respectively. The productivity, nitrogen uptake and utilization efficiency, and soil inorganic nitrogen accumulation of intercropping increased with the increase of nitrogen application rate, indicating that over abundant nitrogen uptake existed under high nitrogen fertilizer and intercropping. The optimized nitrogen application rate was 186 kg/hm², considering both ecological and economic benefits. Under this nitrogen application rate condition, the intercropping productivity was 1.06×10⁴ kg/hm², increasing by 14%, saving 38% nitrogen input, and decreasing by 75% inorganic nitrogen accumulation, compared with sole cropping system.

Key words: faba bean/maize intercropping system; nitrogen uptake and utilization efficiency; soil inorganic nitrogen accumulation; appropriate amount of nitrogen fertilizer