

华北旱作区夏播单间作种植模式吸氮效果及后茬效应

张亦涛, 刘宏斌, 张继宗*, 翟丽梅, 雷秋良, 尹昌斌

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

摘要:为筛选能够降低土壤硝态氮残留量并具有显著经济效益的华北旱作区夏播种植模式,在河北省徐水县设置夏播作物的不同单间作模式田间对比试验。结果显示,各处理中,玉米大豆间作的作物总吸氮量最大,使土壤硝态氮残留量明显降低并有较好的经济效益,其土地当量比也大于1,且在提高后茬冬小麦籽粒产量、秸秆产量、作物吸氮量方面效果较好。与玉米单作比较,玉米大豆间作模式0~200 cm土层硝态氮残留量降低56.66 kg·hm⁻²,作物整体吸氮量提高6.17 kg·hm⁻²,经济效益增加2 054.62元·hm⁻²;后茬冬小麦的籽粒产量、秸秆产量、作物吸氮量分别提高了197、673 kg·hm⁻²和5.91 kg·hm⁻²。

关键词:单作;间作;吸氮量;硝态氮残留量;经济效益;后茬作物

中图分类号:S181 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2012)04-0768-05

Nitrogen Uptake and Residual Effect of Different Summer Monocropping and Intercropping Patterns in Dry Farming Area in the North China Plain

ZHANG Yi-tao, LIU Hong-bin, ZHANG Ji-zong*, ZHAI Li-mei, LEI Qiu-liang, YIN Chang-bin

(Ministry of Agriculture Key Laboratory of Crop Nutrition and Fertilization/Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, CAAS, Beijing 100081, China)

Abstract: In order to screen a summer planting pattern which could not only reduce the soil NO₃-N residue content but also provide obvious economic benefits in North China Plain, a field contrast experiment of different single intercropping was conducted in Xushui County, Hebei Province. The results showed that corn soybean intercropping got the highest nitrogen uptake rate, and could reduce the soil NO₃-N residue content evidently, obtain better economic benefits at the same time. Moreover, this treatment got the land equivalent ratio of more than 1, had a good effect in increasing the aftercrop winter wheat grain yields, straw yields and nitrogen uptake. Compared with the traditional monocropping corn, corn soybean intercropping reduced the soil NO₃-N residue content of 0~200 cm by 56.66 kg·hm⁻², raised the total nitrogen uptake rate by 6.17 kg·hm⁻², and increased got economic benefits by 2 054.62 Yuan·hm⁻². Additionally, the aftercrop wheat grain yields, straw yields and nitrogen uptake rate under this treatment were enhanced by 197 kg·hm⁻², 673 kg·hm⁻², 5.91 kg·hm⁻², respectively.

Keywords: monocropping; intercropping; nitrogen uptake; NO₃-N residue; economic benefit; aftercrop

冬小麦-夏玉米轮作是华北平原主要轮作方式,但农户在两季作物上都投入大量氮肥,造成氮肥利用率远远低于全国平均水平^[1],而且土壤剖面中累积的大量硝态氮,在冬小麦季的过量灌溉和夏玉米季的强降雨过程中,容易引起严重的硝态氮淋洗,直接造成地下水硝酸盐富集,严重威胁水环境^[2-4]。这种冬小麦-夏玉米长期单一化的种植模式,尤其是夏季长期

播种玉米,降低了农田物种和生境多样性,造成农业生态系统整体抗逆自我调节功能的弱化,还带来了土壤质量退化和土地光热资源综合利用率低等问题,使农田环境和经济效益均受到严重影响^[5]。

有研究表明,不同农田轮作方式是防止养分损失的主要途径之一,作物类型及轮作类型不同,农田氮磷盈余差别较大,造成的淋失风险相差也很大^[6-9]。此外,相对单作而言,间套作可以显著减少土壤硝态氮淋失,还可以充分利用光热等自然资源,具有明显产量优势^[10-12];与单作相比,间作能够显著降低硝态氮在土壤中的积累,并在一定程度上提高间作作物对氮素的吸收^[14]。已有研究表明,禾豆科间作种植模式的生

收稿日期:2011-10-16

基金项目:公益性行业(农业)科研专项经费资助(200903011)

作者简介:张亦涛(1986—),男,山东沾化人,硕士研究生,主要从事农田养分循环与环境研究。E-mail:ytzhang1986@163.com

* 通讯作者:张继宗 E-mail:jizongzhang@caas.ac.cn

态经济效益远远高于传统的麦玉连作种植^[13]。但在华北平原,特别是在河北徐水地区,鲜见能够降低土壤硝态氮残留并兼顾经济效益的旱作大田间作种植模式。为此,本文以华北平原典型旱作农田为研究对象,以合理的间作种植模式研究为切入点,通过田间对比试验,筛选既能有效控制长期单一化夏玉米种植下过量施肥带来的土壤硝态氮残留过高问题,又能提高农田经济效益的夏播大田间作种植模式。

1 材料与方法

1.1 供试农田

试验地设在河北省徐水县留村乡荆塘铺村,该区域地处北纬 38°09′~39°09′,东经 115°19′~115°46′,属大陆性季风气候,四季分明,光照充足,自然环境良好。年平均气温 11.9℃,年无霜期平均 184 d,年均降水量 546.9 mm,年日照时数平均 2 744.9 h。供试土壤为褐土,土壤基本理化性质见表 1。

1.2 试验设计

试验设置 5 个种植处理:玉米单作、大豆单作、红小豆单作、玉米大豆间作(玉米∥大豆)和玉米红小豆间作(玉米∥红小豆),每个处理 3 次重复,随机区组排列,夏播作物收获后在原处理小区上继续秋播种植冬小麦。各单作处理小区长 25 m,宽 7 m,面积为 175 m²,间作处理小区长 25 m,宽 9 m,面积 225 m²,各小区间用田埂隔开。玉米单作采用大小行种植方式,大行距 80 cm,小行距 50 cm,株距 25 cm;大豆单作、红小豆单作均采用等行距种植,大豆行距 35 cm,红小豆行距 30 cm,株距均为 20 cm。间作采用条带种植方式,每个小区包括 3 个玉米条带、3 个豆类条带,交错排列,相邻的玉米条带与豆类条带间距 20 cm;玉米

幅宽 1.8 m,行株距设置与单作相同;豆类幅宽 0.8 m,行距 27 cm,株距 20 cm;小麦行距 15 cm。

所有处理均不施农家肥,化肥按不同作物最佳施肥量分别施用,玉米施纯氮(N)225 kg·hm⁻²、纯磷(P₂O₅)75 kg·hm⁻²、纯钾(K₂O)75 kg·hm⁻²,其中氮肥按基肥:大喇叭口期追肥=1:1 分施;豆类各施纯氮(N)45 kg·hm⁻²、纯磷(P₂O₅)75 kg·hm⁻²、纯钾(K₂O)75 kg·hm⁻²,全部做基肥施用;小麦施纯氮(N)225 kg·hm⁻²、纯磷(P₂O₅)75 kg·hm⁻²、纯钾(K₂O)75 kg·hm⁻²,其中氮肥按基肥:拔节期追肥=1:1 分施;磷钾肥基施。玉米、大豆、红小豆均在 2010 年 6 月 21 日播种,作物播种后灌溉 1 次,出苗后及时间苗,作物生长期及时除杂草,红小豆在 9 月 13 日收获,玉米和大豆均在 10 月 6 日收获;小麦于 2010 年 10 月 8 日播种,小麦生育期灌溉 5 次,分别为出苗水、越冬水、起身水、孕穗水、灌浆水,于 2011 年 6 月 22 日收获。

1.3 采样

土样采集分别在试验前和收获后进行,试验前以整个供试农田为单元采样;收获后以各处理小区为单元取样,采取“S”形 5 点混合采样法,采样深度 200 cm,每 20 cm 为 1 层,单作处理以各自小区为单元采集土样,间作处理小区分玉米带、豆类(大豆或红小豆)带两部分采集土样,土样采集后分别冰冻保存待测。

植株采取整株采集的方式采集地上部植株,在作物收获时以不同处理小区为单元,每种作物采集 5 株,秸秆与籽粒分开取样,105℃条件下杀青 30 min,85℃条件下烘干称重,粉碎待测;小麦在不同夏播处理的各作物条带上分别取样方 2 m²脱粒后测产量,籽粒、秸秆分开,然后折算单位面积产量。

表 1 供试土壤理化性质

Table 1 Physical and chemical properties of test soils

土层/cm	pH	全氮/ g·kg ⁻¹	全磷/ g·kg ⁻¹	全钾/ g·kg ⁻¹	有机质/ g·kg ⁻¹	速效磷/ mg·kg ⁻¹	速效钾/ mg·kg ⁻¹	NH ₄ ⁺ -N/ mg·kg ⁻¹	NO ₃ ⁻ -N/ mg·kg ⁻¹	容重/ g·cm ⁻³
0~20	8.70	1.09	0.76	23.40	18.56	8.98	82.45	1.24	12.95	1.32
20~40	8.61	0.60	0.60	23.30	10.62	3.34	68.92	1.64	7.41	1.33
40~60	8.63	0.52	0.53	23.70	9.84	2.64	68.46	1.34	4.93	1.33
60~80	8.56	0.49	0.58	23.40	8.51	3.05	95.50	1.72	4.61	1.35
80~100	8.55	0.60	0.50	23.20	9.65	3.17	114.16	1.45	4.01	1.42
100~120	8.58	0.67	0.50	22.80	10.99	4.99	117.42	1.82	4.63	1.33
120~140	8.55	0.57	0.46	21.90	9.67	2.26	99.70	1.25	3.87	1.29
140~160	8.65	0.31	0.49	22.90	5.49	1.78	54.94	1.29	3.69	1.34
160~180	8.63	0.16	0.47	22.80	4.54	2.09	38.15	1.78	3.74	1.35
180~200	8.59	0.28	0.50	24.30	4.93	2.75	86.64	1.51	2.89	1.41

1.4 样品检测与数据处理

种植前土样检测 pH 值、全氮、全磷、全钾、有机质、速效磷、速效钾、硝态氮、铵态氮和土壤容重等 10 个指标,作物收获后土样检测硝态氮,植株样分秸秆和籽粒分别检测全氮。土壤全氮采用半微量开氏法检测,植株全氮采用 $\text{H}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}_2$ 消煮后凯氏定氮法检测,土壤硝态氮采用流动分析仪 (TRAACS2000) 检测,其他检测指标均采用《土壤分析技术规范》^[11] 中相关检测方法。图表制作采用 Microsoft Excel 2003,数据差异的显著性分析采用 SPSS 16.0 (One-Way ANOVA) 软件进行。

1.5 计算公式

土地当量比 (LER) = $(Y_{ic}/Y_{mc}) + (Y_{ib}/Y_{mb})$

式中: Y_{ic} 和 Y_{ib} 分别代表间作玉米和间作豆类的产量; Y_{mc} 和 Y_{mb} 分别为单作玉米和单作豆类的产量。LER > 1 为间作优势, LER < 1 为间作劣势。

作物吸氮量 = $\sum (\text{植株各部分质量} \times \text{氮含量})$

土壤硝态氮残留量 = 土层厚度 (cm) × 土壤容重 ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$) × 土层硝态氮含量 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) / 10

经济效益 ($\text{元} \cdot \text{hm}^{-2}$) = 作物产量 ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) × 单价 (元) - 灌溉费用 ($\text{元} \cdot \text{hm}^{-2}$) - 化肥费用 ($\text{元} \cdot \text{hm}^{-2}$) - 种子费用 ($\text{元} \cdot \text{hm}^{-2}$) - 机械费用 ($\text{元} \cdot \text{hm}^{-2}$)

2 结果与分析

2.1 不同夏播种植模式产量及土地当量比

夏播季,相对单作种植,玉米 || 大豆和玉米 || 红小豆两种夏播种植模式均有一定的产量优势,其土地利用率先均高于各单作种植。这两种间作模式的土地当量比均大于 1 (表 2),玉米 || 大豆的土地利用率提高了 27%,间作玉米、间作大豆产量较相同可比面积上单作玉米、单作大豆分别提高了 24.63%、30.51%;玉

米 || 红小豆的土地利用率提高了 30%,间作玉米、间作红小豆较相同可比面积上单作玉米、单作红小豆分别提高 24.58%、39.78%。

表 2 不同夏播种植模式的经济产量及土地当量比

Table 2 Yield and land equivalent ratio under different cropping patterns in the summer

处理	经济产量/ $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$	土地当量比
玉米	11 003±172	—
大豆	3 091±63	—
红小豆	2 583±87	—
玉米 大豆	玉米 9 142±75 大豆 1 345±55	1.27
玉米 红小豆	玉米 9 139±255 红小豆 1 203±19	1.30

注:间作物较相同可比面积上单作物增产率: (每公顷某间作物实际产量 - 与间作物实际占地面积相同的单作物产量) / 与间作物实际占地面积相同的单作物产量 × 100%。

2.2 不同夏播种植模式经济效益及环境效益

相对单作种植,玉米 || 大豆和玉米 || 红小豆两种夏播模式都可以显著 ($P < 0.05$) 提高农田经济效益 (表 3)。玉米 || 大豆种植经济效益最高,相对玉米单作、大豆单作分别提高了 12.09%、89.00%;玉米 || 红小豆种植经济效益低于玉米 || 大豆间作种植 54.19 $\text{元} \cdot \text{hm}^{-2}$,差异不显著,但相对玉米单作、红小豆单作种植分别提高了 11.71%、110.57%;大豆单作、红小豆单作种植的经济效益都显著低于其他种植模式,仅相对玉米单作种植就分别降低了 40.69%、46.92%,这也是华北旱作大田鲜见豆类单作种植的主要原因。

不同夏播种植的作物吸氮量差异显著 ($P < 0.05$) (表 3),玉米 || 大豆种植的作物吸氮量最高,达到 277 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,与玉米单作种植的吸氮量差异不显著,但显

表 3 不同夏播种植模式的经济效益和环境效益

Table 3 The economic and environmental benefits under different cropping patterns

处理	面积/ hm^2	施氮量/ $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$	经济效益/ $\text{元} \cdot \text{hm}^{-2}$	作物吸氮量/ $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$	土壤硝态氮残留量 (0~200 cm) / $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$
玉米	1	225	16 995 b	270±5 a	192±29 a
大豆	1	45	10 079 c	244±11 b	95±12 d
红小豆	1	45	9 021 c	152±4 c	107±10 d
玉米 大豆	玉米 0.67 大豆 0.33	150 15	19 049 a	177 100	92 44
玉米 红小豆	玉米 0.67 红小豆 0.33	150 15	18 995 a	200 54	106 48

注:1.不同字母代表各处理在 $P < 0.05$ 水平的差异显著性。下同。

2.计算取值:机械费用 300 $\text{元} \cdot \text{hm}^{-2}$,灌溉费用 150 $\text{元} \cdot \text{hm}^{-2}$;玉米种价格 8.00 $\text{元} \cdot \text{kg}^{-1}$,大豆种 12.00 $\text{元} \cdot \text{kg}^{-1}$,红小豆种 20 $\text{元} \cdot \text{kg}^{-1}$;2010 年玉米收购价格 1.80 $\text{元} \cdot \text{kg}^{-1}$,大豆收购价格 4.00 $\text{元} \cdot \text{kg}^{-1}$,红小豆收购价格 4.50 $\text{元} \cdot \text{kg}^{-1}$;尿素 2 100 $\text{元} \cdot \text{t}^{-1}$,过磷酸钙 800 $\text{元} \cdot \text{t}^{-1}$,进口硫酸钾 3 500 $\text{元} \cdot \text{t}^{-1}$ 。

著高于其他 3 种植模式,高出 $6.17\sim 124.56\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。相对单作种植,除玉米 || 大豆的玉米带吸氮量略低于相同面积上玉米单作以外,间作大豆吸氮量较相同可比面积上单作大豆提高了 22.95%,玉米 || 红小豆中间作玉米、间作红小豆吸氮量较相同可比面积上单作玉米、单作红小豆分别提高 11.11%、6.58%。

相对传统的玉米单作种植,玉米 || 大豆和玉米 || 红小豆两种夏播模式都可以显著降低($P<0.05$)夏茬作物收获后的土壤(0~200 cm)硝态氮残留量(表 3)。玉米单作种植 0~200 cm 土层硝态氮残留量达到 $192\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,分别高出玉米 || 大豆、玉米 || 红小豆间作种植 56.66 、 $37.97\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$;两种间作模式玉米条带土壤硝态氮残留相对相同面积上玉米单作都有明显降低,但间作大豆条带、间作红小豆条带相对相同面积上各作物单作出现了轻微增加。大豆单作土层(0~200 cm)硝态氮残留量最低,仅为 $95\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,与红小豆单作种植硝态氮残留差异不显著,但由于大豆单作、红小豆单作两种种植模式经济效益过低,不能被广大农户接受,因此即使其土壤硝态氮残留量最低,也不能进行大面积推广。

2.3 不同夏播种植模式的后茬效应

虽然各夏播种植模式对后茬冬小麦的影响并不显著,但玉米 || 大豆、玉米 || 红小豆两种夏播模式都能提高后茬冬小麦的籽粒产量、秸秆产量以及作物吸氮量(表 4),其中玉米 || 大豆种植提高幅度最大,其籽粒产量、秸秆产量以及作物吸氮量分别高出其他处理 $135\sim 197$ 、 $153\sim 673$ 、 $1.76\sim 5.91\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。

3 讨论

本研究表明,玉米 || 大豆和玉米 || 红小豆两种夏播种植模式的产量及经济效益显著优于单作种植($P<0.05$),其土地当量比均大于 1,经济效益分别达到 $19\,049.56$ 、 $18\,995.37\text{ 元}\cdot\text{hm}^{-2}$,尤以玉米 || 大豆经济效益最高,其作物吸氮量也显著高出其他处理 $6.17\sim 124.56\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。在间作体系中,豆科作物是发挥生物

多样性优势、提高资源利用效率最常用的作物^[14],与单作种植相比,玉米豆科作物间作群体内玉米的产量增加,而豆类的产量降低或不变^[15-16]。此外,相较玉米与其他作物间作,玉米 || 大豆和玉米 || 红小豆间作优势还表现在:充分利用高矮作物相间种植可以改善作物群体的光、热、水、肥等生态条件,增强作物抗逆性,促进作物生长,并有利于作物产量的提高和品质的改善^[17-19]。

相对单作,除玉米 || 大豆的玉米条带外,各间作物吸氮量都有提高,表现出一定的间作效应;间作模式也都能够降低主栽作物(玉米)条带的硝态氮残留,但也使间作大豆条带、间作红小豆条带硝态氮残留出现了轻微增加,这可能是因为玉米与豆类间作条件下,各作物氮素利用率提高,豆类固氮能力增强,减少了对化肥氮的依赖。

玉米 || 大豆和玉米 || 红小豆两种夏播模式的土层硝态氮残留量都显著低于传统的玉米单作种植($P<0.05$),分别降低了 56.66 、 $37.97\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,一方面可能是由于间作种植模式下条带分别施肥实际施氮量的减少,另一方面可能在于禾豆科间作提高了氮素利用率^[20-21]。同时,玉米 || 大豆夏播种植还能够提高后茬冬小麦的籽粒产量、秸秆产量以及作物吸氮量。虽然大豆单作、红小豆单作在夏播季的土层硝态氮残留量都显著低于其他种植模式,但这两种种植模式的经济效益和作物整体吸氮量都远远低于其他种植模式,因此该地区不适宜进行大豆单作和红小豆单作种植。

4 结论

本研究表明,相对传统单作种植,夏播间作种植具有明显经济和环境效益,玉米 || 大豆、玉米 || 红小豆相对玉米单作在产量及经济效益上都有显著性优势,分别增加收益 $2\,054.62$ 、 $2\,000.43\text{ 元}\cdot\text{hm}^{-2}$,其中以玉米 || 大豆经济效益最高,其作物吸氮量也显著高于其他各处理,同时其土层硝态氮残留量也显著低于玉米单作、玉米 || 红小豆,并且可以提高后茬冬小麦的

表 4 不同夏播种植模式的后茬效应

Table 4 Residual effect of different summer cropping patterns

夏播处理	后茬作物	籽粒产量/ $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$	秸秆产量/ $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$	作物吸氮量/ $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$
玉米	小麦	$7\,633\pm 289\text{ a}$	$7\,500\pm 346\text{ a}$	$179\pm 4\text{ a}$
大豆	小麦	$7\,633\pm 354\text{ a}$	$7\,733\pm 1\,002\text{ a}$	$182\pm 37\text{ a}$
红小豆	小麦	$7\,633\pm 764\text{ a}$	$7\,933\pm 1\,021\text{ a}$	$184\pm 18\text{ a}$
玉米 大豆	小麦	$7\,830\pm 110\text{ a}$	$8\,173\pm 366\text{ a}$	$184\pm 21\text{ a}$
玉米 红小豆	小麦	$7\,695\pm 446\text{ a}$	$8\,020\pm 1\,135\text{ a}$	$183\pm 24\text{ a}$

籽粒产量、秸秆产量以及作物吸氮量。因此,从经济、环境以及对后茬作物的影响综合分析,玉米||大豆夏播种植模式优势明显,可以作为河北徐水地区旱作大田最佳种植模式推广。

参考文献:

- [1] 巨晓棠,刘学军,邹国元,等.冬小麦/夏玉米轮作体系中氮素的损失途径分析[J].中国农业科学,2002,35(12):1493-1499.
JU Xiao-tang, LIU Xue-jun, ZOU Guo-yuan, et al. Evaluation of nitrogen loss way in winter wheat and summer maize rotation system[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2002, 35(12): 1493-1499.
- [2] 巨晓棠,张福锁.中国北方土壤硝态氮的累积及其对环境的影响[J].生态环境,2003,12(1):24-28.
JU Xiao-tang, ZHANG Fu-suo. Nitrate accumulation and its implication to environment in north China[J]. *Ecology and Environment*, 2003, 12(1): 24-28.
- [3] 寇长林,巨晓棠,高 强,等.两种农作体系施肥对土壤质量的影响[J].生态学报,2004,24(11):2548-2556.
KOU Chang-lin, JU Xiao-tang, GAO Qiang, et al. Effects of fertilization on soil quality in two different cropping systems[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(11): 2548-2556.
- [4] 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分析[J].植物营养与肥料学报,2006,12(3):285-293.
ZHONG Qian, JU Xiao-tang, ZHANG Fu-suo. Analysis of environmental endurance of winter wheat/summer maize rotation system to nitrogen in North China Plain[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2006, 12(3): 285-293.
- [5] 尤民生,刘雨芳,侯有明.农田生物多样性与害虫综合治理[J].生态学报,2004,24(1):117-122.
YOU Min-sheng, LIU Yu-fang, HOU You-ming. Biodiversity and integrated pest management in agroecosystems[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(1): 117-122.
- [6] Owens L, Edwards W M, Shipitalo M J. Nitrate leaching through lysimeters in a corn-soybean rotation[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1995, 59: 902-907.
- [7] Nevens F, Reheul D. Crop rotation versus monoculture; yield, N yield and ear fraction of silage maize at different levels of mineral N fertilization[J]. *Netherlands Journal of Agricultural Science*, 2001, 49: 405-425.
- [8] 林青慧.黄浦江上游水源保护区不同农田种植模式的环境效应研究[D].北京:中国农业科学院,2004.
LIN Qing-hui. Study on environmental effect of different planting patterns for riverhead protect region of Huangpu Upriver [D]. Beijing: The Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2004.
- [9] 许仙菊.上海郊区不同作物及轮作农田氮磷流失风险研究[D].北京:中国农业科学院,2007.
XU Xian-ju. Studies on nitrogen and phosphorus losses risk in different crop and rotation farmlands in Shanghai suburb[D]. Beijing: The Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2007.
- [10] 李 隆,李晓林,张福锁,等.小麦/大豆间作条件下作物养分吸收利用对间作优势的贡献[J].植物营养与肥料学报,2000,6(2):140-146.
LI Long, LI Xiao-lin, ZHANG Fu-suo, et al. Uptake and utilization of nitrogen, phosphorus and potassium as related to yield advantage in wheat/soybean intercropping[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2000, 6(2): 140-146.
- [11] Zhang F S, Li L. Using competitive and facilitating interactions in intercropping systems enhances crop productivity and nutrients use efficiency[J]. *Plants and Soil*, 2003, 248: 305-312.
- [12] 刘均霞.玉米/大豆间作条件下作物根际养分高效利用机理研究[D].贵州:贵州大学,2008.
LIU Jun-xia. Studies on the efficient use of nutrients in maize/soybean intercropping[D]. Guizhou: Guizhou University, 2008.
- [13] 张 伟,陈源泉,隋 鹏,等.华北平原粮田替代型复合种植模式生态经济比较研究[J].中国农学通报,2009,25(8):241-245.
ZHANG Wei, CHEN Yuan-quan, SUI Peng, et al. Research of eco-economy on substitution planting patterns in the North China Plain[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2009, 25(8): 241-245.
- [14] 叶优良,李 隆,孙建好,等.3种豆科作物与玉米间作对土壤硝态氮累积和分布的影响[J].中国生态农业学报,2008,16(4):818-823.
YE You-liang, LI Long, SUN Jian-hao, et al. Effect of intercropping three legume crops with maize on soil nitrate-N accumulation and distribution in the soil profile[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2008, 16(4): 818-823.
- [15] Lesoing G W, Francis C A. Strip intercropping effects on yield and yield components of corn, grain sorghum, and soybean[J]. *Agronomy Journal*, 1999, 91: 807-813.
- [16] 李志贤,王建武,杨文亨,等.广东省甜玉米/大豆间作模式的效益分析[J].中国生态农业学报,2010,18(3):627-631.
LI Zhi-xian, WANG Jian-wu, YANG Wen-ting, et al. Benefit of sweet corn/soybean intercropping in Guangdong Province[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2010, 18(3): 627-631.
- [17] Sekamatte B M, Ogenga Latigo M, Russell Smith A. Effects of maize-legume intercrops on termite damage to maize, activity of predatory ants and maize yields in Uganda[J]. *Crop Protection*, 2003, 22: 87-93.
- [18] 李潮海,苏新宏,孙敦立.不同基因型玉米间作复合群体生态生理效应[J].生态学报,2002,22(12):2096-2103.
LI Chao-hai, SU Xin-hong, SUN Dun-li, et al. Ecophysiological characterization of different maize(*Zea mays* L.) genotypes under mono- or inter-cropping conditions [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, 22(12): 2096-2103.
- [19] 刘秀珍,张阅军,杜慧玲.水肥交互作用对间作玉米、大豆产量的影响研究[J].中国生态农业学报,2004,12(3):75-77.
LIU Xiu-zhen, ZHANG Yue-jun, DU Hui-ling. Effects of moisture-fertilizer interaction on the yields of maize and soybean under the condition of inter-cropping[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2004, 12(3): 75-77.
- [20] 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]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2005, 105(3): 483-491.
- [21] Whitmore A P, Schrder J J. Intercropping reduces nitrate leaching from under field crops without loss of yield: A modelling study [J]. *European Journal of Agronomy*, 2007, 27(1): 81-88.