

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica



第31卷 第6期 Vol.31 No.6 **2011**

中国生态学学会
中国科学院生态环境研究中心
科学出版社

主办
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

第 31 卷 第 6 期 2011 年 3 月 (半月刊)

目 次

臭氧胁迫对水稻生长以及 C、N、S 元素分配的影响	郑飞翔,王效科,侯培强,等 (1479)
高含氮稻田深层土壤的氨氧化古菌和厌氧氨氧化菌共存及对氮循环的影响	王 雨,祝贵兵,王朝旭,等 (1487)
气候年际变率对全球植被平均分布的影响	邵 璞,曾晓东 (1494)
模拟升温 and 放牧对高寒草甸土壤有机碳氮组分和微生物生物量的影响	王 蓓,孙 庚,罗 鹏,等 (1506)
广州城区生态安全岛典型植物群落结构及物种多样性	莫 丹,管东生,黄康有,等 (1515)
中亚热带湿地松人工林生长过程	马泽清,刘琪璟,王辉民,等 (1525)
潜流人工湿地中植物对氮磷净化的影响	刘树元,阎百兴,王莉霞 (1538)
模拟氮沉降对两种竹林不同凋落物组分分解过程养分释放的影响	涂利华,胡庭兴,张 健,等 (1547)
苔藓植物对贵州丹寨汞矿区汞污染的生态监测	刘荣相,王智慧,张朝晖 (1558)
三峡库区泥、沙沉降对低位狗牙根种群的影响	李 强,丁武泉,朱启红,等 (1567)
上海崇明东滩互花米草种子产量及其萌发对温度的响应	祝振昌,张利权,肖德荣 (1574)
栲-木荷林凋落叶混合分解对土壤有机碳的影响	张晓鹏,潘开文,王进闯,等 (1582)
荒漠化对毛乌素沙地土壤呼吸及生态系统碳固持的影响	丁金枝,来利明,赵学春,等 (1594)
黄土丘陵沟壑区小流域土壤有机碳空间分布及其影响因素	孙文义,郭胜利 (1604)
种间互作和施氮对蚕豆/玉米间作生态系统地上部和地下部生长的影响	李玉英,胡汉升,程 序,等 (1617)
测墒补灌对冬小麦氮素积累与转运及籽粒产量的影响	韩占江,于振文,王 东,等 (1631)
植被生化组分光谱模型抗土壤背景的能力	孙 林,程丽娟 (1641)
北方两省农牧交错带沙棘根围 AM 真菌与球囊霉素空间分布	贺学礼,陈 程,何 博 (1653)
基于水源涵养的流域适宜森林覆盖率研究——以平通河流域(平武段)为例	朱志芳,龚固堂,陈俊华,等 (1662)
黑龙江大兴安岭呼中林区火烧点格局分析及影响因素	刘志华,杨 健,贺红士,等 (1669)
大兴安岭小尺度草甸火燃烧效率	王明玉,舒立福,宋光辉,等 (1678)
长江口中华鲟自然保护区底层鱼类的群落结构特征	张 涛,庄 平,章龙珍,等 (1687)
骨顶鸡等游禽对不同的人为干扰的行为响应	张微微,马建章,李金波 (1695)
光周期对白头鹇体重、器官重量和能量代谢的影响	倪小英,林 琳,周菲菲,等 (1703)
应用稳定同位素技术分析华北部分地区第三代棉铃虫虫源性质	叶乐夫,付 雪,谢宝瑜,等 (1714)
西花蓟马对蔬菜寄主的选择性	袁成明,郅军锐,曹 宇,等 (1720)
基于 Cyt b 基因序列分析的松毛虫种群遗传结构研究	高宝嘉,张学卫,周国娜,等 (1727)
沼液的定价方法及其应用效果	张昌爱,刘 英,曹 曼,等 (1735)
垃圾堆肥基质对不同草坪植物生态及质量特征的影响	赵树兰,廉 菲,多立安 (1742)
五氯酚在稻田中的降解动态及生物有效性	王诗生,李德鹏 (1749)
专论与综述	
景观遗传学:概念与方法	薛亚东,李 丽,吴巩胜,等 (1756)
期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 284 * zh * P * ¥ 70.00 * 1510 * 31 * 2011-03	



封面图说:美丽优雅的新疆夏尔西里森林草地原始景观。夏尔西里国家级自然保护区建立在新疆博乐北部山区无人干扰的中哈边境上,图中雪地云杉为当地的优势树种。

彩图提供:国家林业局陈建伟教授 E-mail: cites.chenjw@163.com

种间互作和施氮对蚕豆/玉米间作生态系统 地上部和地下部生长的影响

李玉英^{1,2}, 胡汉升², 程 序^{3,*}, 孙建好⁴, 李 隆²

(1. 南阳师范学院生命科学与技术学院, 河南南阳 473061; 2. 中国农业大学资源与环境学院, 北京 100193;

3. 中国农业大学农学与生物技术学院, 北京 100193; 4. 甘肃省农业科学院土壤肥料与节水农业研究所, 兰州 730070)

摘要:为河西走廊绿洲灌区豆科/禾本科间作体系的养分管理提供科学依据,于2007年在武威绿洲农业试验站应用田间原位根系行分隔技术研究了蚕豆/玉米种间互作和施氮对玉米抽雄期的根系空间分布、根系形态和作物地上部生长的影响。研究结果表明:种间互作和施氮均增加了玉米和蚕豆在纵向和横向两个尺度上的根重密度、根长密度、根表面积、根系体积。根长密度和根表面积与两种作物产量和氮素吸收均呈正相关,而与蚕豆的根瘤重呈负相关;抽雄期的土壤含水量与玉米产量和养分吸收呈显著的负相关。玉米根系可以占据蚕豆地下部空间,但蚕豆的根却较少到间作玉米的地下部空间,也就是间作后增加了玉米根系水平尺度的生态位。蚕豆和玉米根系主要分布分别在0—40 cm浅土层和0—60 cm土层,且间作玉米根系在60—120 cm比单作和分隔的多。因此,种间互作和施氮扩大了两作物根系纵向和横向的空间生态位,改变了作物根系形态,即扩展了两者水分和养分吸收的生态位,增加了作物吸收养分的有效空间,从而提高了间作生态系统的生产力。

关键词:蚕豆/玉米间作;根系行分隔;根系形态;施氮;地上部生长

Effects of interspecific interactions and nitrogen fertilization rates on above- and below- growth in faba bean/maize intercropping system

LI Yuying^{1,2}, HU Hansheng², CHENG Xu^{3,*}, SUN Jianhao⁴, LI Long²

1 College of Life Sciences and Technology, Nanyang Normal University, Henan Nanyang 473061, China

2 College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100193, China

3 College of Agronomy and Biotechnology, China Agricultural University, Beijing 100193, China

4 Institute of Soil and Fertilizer and Water-saving Agriculture, Gansu Academy of Agricultural Sciences, Lanzhou 730070, China

Abstract: Plant root systems play an important role in uptake of water and nutrients from soil. The spatial distribution, morphology of plant roots and above-ground growth can be influenced by interspecific interactions and N fertilization. Legume/cereal intercropping is broadly recognized as a sustainable production pattern because it can offer improved productivity, more effective utilization of resources, and reduce industrial N input by exploiting biological N₂ fixation as a more economic and environmentally-friendly way.

Little is known about the effects of below-ground interactions on the root morphology of intercropped crops under field. In order to verify the effects of legume/cereal intercropping and N fertilization on the root spatial distribution of crop root systems and their root morphological characters, as well as above-ground growth, a plot experiment featured by root separation by means of barrier and different N fertilization experiment were conducted at Wuwei Experimental Station (latitude 38°37' N, longitude 102°40' E) of Gansu Academy of Agricultural Sciences in 2007. Both experiments were designed as 2 × 2 two factors block design with three replicates. The roots of both crops at 0—120 cm soil layer were sampled at the harvest stage of faba bean by auger, i. e. at the tasselling stage of maize. The spatial distribution and

基金项目:国家“十一五”科技支撑计划资助项目(2007BAD89B01);国家重点基础研究计划资助项目(2006CB100200);国家自然科学基金资助项目(30670381)

收稿日期:2010-03-23; **修订日期:**2011-01-07

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: chengxu@cau.edu.cn

morphological characteristics of roots, above-ground biomass and N uptake of both crops, and nodule biomass of faba bean were analyzed. Furthermore, the correlations between above- and below-ground growth parameters were also analyzed.

The results showed that interspecific interactions and nitrogen application increased the root bulk density, root length density, root surface area and root volume of faba bean and maize in the vertical and horizontal dimensions. Root average diameter was reduced by interspecific interactions, and increased by nitrogen application. Root length density and root surface area of both crops were positively correlated with grain yield and N uptake, while the relationships between root length density and surface area, and nodule biomass of faba bean were negative. And the soil moisture at the tasselling stage and grain yield & N uptake of maize showed the significant negative correlations. The roots of intercropped maize could extend into the space of intercropped faba bean, whereas the less roots of intercropped faba bean expanded into the space of maize roots, suggesting the intercropping extended the root ecological niche of maize in the horizontal dimension. The roots of faba bean and maize mainly distributed in 0—40 cm and 0—60 cm soil layer, respectively. It was found that the roots of intercropped maize at 60—120 cm soil layer were more than that of mono-cropped maize and maize with root barrier, and the deeper distribution of roots of intercropped maize should be in favor of competition-recovery growth at the later growth stage.

In conclusion, both intercropping and N fertilizer expanded the root spatial niche of intercropped crops in the vertical and horizontal directions, and changed the root morphology of both crops. They increased the water and nutrient uptake, and the productivity of intercropping system was thus raised.

Key Words: faba bean/maize intercropping; row root barrier; root morphology; N application rates; above-ground growth

根系是植物水分和养分吸收的重要器官。植物根系的生长发育及形态特征和地上部产量形成密切相关。根系与地上部相互作用的研究越来越多的受到重视^[1-4], 根系的研究已成为科研领域的重要内容。植物地下部竞争往往形式多样, 过程复杂^[5]。在发生竞争时, 有的植物倾向于形成庞大的根系, 占据更大的土壤体积^[6]; 有的植物向根系分配氮量, 使根系变细变长, 增加根系与土壤的接触面积, 以增加竞争能力^[7]; 有的则提高单位根系的吸收功能^[8]。根系对氮和磷供应充足的土壤中可以刺激侧根的发生和养分的流入^[9]。大的根系可以对整个根系供氮不足起到补偿作用。但存在种间竞争条件下, 根系增长使根长密度和氮素吸收有很高的相关性^[10-11]。根系形态参数如根长密度和根表面积对主要借扩散到达根表的那些养分有效性具有决定性作用。室内试验研究发现种间相互作用对间作作物根系形态产生影响^[7,8-14]。在大田条件下, 已有学者对不同的间作作物根系空间分布进行了研究^[15-23]。但种间互作和氮梯度在田间原位条件下对间作生态系统中作物的根系形态研究鲜见。本研究在大田条件下研究种间地下部根系分隔、作物种植方式及供氮强度对蚕豆/玉米间作生态系统作物根系空间分布、根系形态及地上部生长的影响, 揭示蚕豆/玉米种间互惠的根际生态学机制, 旨在为利用农田生物多样性提高豆科生物固氮及基于根际调控的间作系统养分管理提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于 2007 年在甘肃省农业科学研究院武威绿洲农业试验站进行。该地区位于河西走廊东端, 地处东经 102°40', 北纬 38°37', 海拔 1 504 m, 年均降水量 150 mm, 年均气温 7.7 °C, 潜在年蒸发量 2 021 mm, 无霜期 170—180 d, 日照时数 3 023 h, ≥0°C 和 10°C 的有效积温分别为 3 646 °C 和 3 149 °C, 年太阳辐射总量 5988 MJ/m², 春季多风沙, 夏季有干热风, 属典型的大陆性干旱气候生态区。

根系分隔试验和氮肥试验的前茬作物分别为单作大麦和单作小麦。供试土壤为石灰性灌漠土, 粉沙壤质, 土层深厚, 基本理化性质如表 1 所示。播前 0—20、20—40、40—60、60—80、80—100、100 cm 以下的土壤

容重,分隔试验分别为:1.26、1.47、1.52、1.44、1.30、和 1.37 g/cm³,氮肥试验分别为 1.47、1.57、1.58、1.53、1.48 和 1.55 g/cm³。

表 1 播前耕层土壤(0—20 cm)基本理化特性

Table 1 The basic physical and chemical properties of the soils (0—20 cm soil layer) before sowing

试验 Experiment	有机质 Organic matter /(g/kg)	速效磷 Olsen P /(mg/kg)	速效钾 Extractable K /(mg/kg)	总氮 Total N /(g/kg)	铵态氮 NH ₄ ⁺ -N /(mg/kg)	硝态氮 NO ₃ ⁻ -N /(mg/kg)	pH (H ₂ O, 2.5:1)
根系分隔试验 Root partition experiment	2.16	28.00	166.38	0.11	3.12	6.23	8.04
氮肥试验 N fertilizer experiment	1.51	22.72	55.05	0.13	1.41	10.13	7.71

1.2 试验设计和材料

1.2.1 地下部根系分隔试验

采用蚕豆/玉米根系分隔微区试验^[24]。试验为 2×2 两因素区组设计,即氮水平和根系分隔方式。设 2 个氮水平(尿素,含氮量 46%):0 和 150 kg/hm²,施磷量(三料过磷酸酸钙,含 P₂O₅ 44%)为 75 kg P/hm²。根系处理采用原位行分隔技术,设两个处理:(1)蚕豆和玉米根系之间塑料膜分隔(2.0 m 长,只有种间地上部竞争);(2)蚕豆和玉米根系之间不分隔(3.0 m 长,种间地上部和地下部竞争同时存在)。根系分隔采用 0.12 mm 厚优质农用棚膜,长度为 2.0 m,深度为 1.0 m,于 2006 年蚕豆出苗后进行埋膜(图 1a)。

不分隔区采用带状间作,每小区种 3 个组合带,其中一个组合带为取样带,另一个为作物成熟时的计产带。带宽 1.20 m,每带蚕豆为 2 行,行间距为 0.20 m,株距为 0.20 m;每带玉米为 2 行,行距为 0.40 m,株距为 0.3 m;相邻的玉米行和蚕豆行的距离为 0.3 m。小区面积为 6.0 m×3.6 m,小区间埂宽 0.5 m 以防止串水串肥,中间灌水沟宽 0.5 m,设 3 次重复。

供试蚕豆品种为临蚕 5 号(*Vicia faba* L. cv. Lincan No. 5),播种和收获日期分别为 3 月 19 日和 7 月 29 日。玉米品种为沈单 16 号(*Zea mays* L. cv. Shengdan No. 16),播种和收获日期分别为 4 月 15 日和 10 月 1 日。两作物共生期(玉米出苗至蚕豆收获)86 d。

试验不设农家肥,各小区均施磷肥,播前以基肥一次性撒施并翻入。氮肥的底肥占 1/2,其余 1/2 于拔节前和大喇叭口期(结合灌水)作为追肥分两次施入。其他管理同一般大田生产。

1.2.2 氮肥试验

试验为 2×2 两因素区组设计,即氮水平和种植方式。氮水平同根系分隔试验。3 种植方式:单作蚕豆、单作玉米(只有种内竞争)和蚕豆/玉米间作(种间地上部和地下部竞争同时存在)。小区间筑埂,区内种植方式随机排列。

单作和间作的种植方式相同。种植方式和田间管理同根系分隔试验的不分隔区。单作蚕豆和单作玉米分别种植 20 行和 10 行,小区面积均为 22.8 m²。蚕豆/玉米间作为 4 个组合带,小区面积为 27.36 m²。设 3 次重复。

1.3 样品采集和处理

1.3.1 地下部根系样品采集和处理

于蚕豆收获前(蚕豆出苗后约 110 d,玉米抽雄期)用根钻法取样。根钻钻头直径 5 cm,长 25 cm。分别于根系分隔试验中的不分隔蚕豆带内(faba bean with no partition, NF)、不分隔玉米带内(maize with no partition, NM)、不分隔蚕豆和玉米间(图 1 不分隔区)、分隔蚕豆和分隔玉米(maize with partition, PM)(图 1 分隔区)取样,氮肥试验中的间作蚕豆带内(intercropped faba bean, IF)、间作玉米带内(intercrop maize, IM)、间作蚕豆与间作玉米间(图 1 的不分隔区)、单作蚕豆(sole faba bean, SF,图 1)和单作玉米(sole maize, SM,图 1)取样。如图 1 所示每处理取两钻,即一钻的中心为作物位置,一钻的中心在 4 株作物的对角线中心(间作带之间两钻

均取两作物行距的 1/2 处),二钻合一为同一土层根系样品,每钻均取 0—120 cm 土深,每 20 cm 一层,共 6 个土样。将土样充分混合,称总鲜土重,称一份 20 g 左右土样(挑出根系)用烘干法测土壤含水量。

两种作物的根系主要根据根系组织结构和颜色来区分,蚕豆的根系是直根系,有明显的主根和侧根,在空气中暴露呈黑褐色;春玉米的根系是须根系,呈白色且表面较为光滑。将剩余土壤的根全部洗出,把土倒入 1 mm 土壤筛,于水盆中浸泡 1 h,然后冲洗干净,用镊子分离作物根系,于 6 号自封袋内-20℃冰柜内保存。扫描时常温解冻,用自来水冲洗后平铺于透明的有机玻璃根盒内,并注入 3 mm 左右深的水,置于 Epson 根系扫描仪上用透视扫描法扫描,扫描后用吸水纸吸去水分称鲜重,于信封内烘干,用万分之一天平称量,换算成不同土层 500 cm³ 土壤的根干重即根重密度(g/500 cm³)。并用 Win-Rhizo 根系分析软件(WinRhizo Pro Vision 5.0a)

对扫描根系图进行 25 级处理,对根系形态参数进行分析,计算出根长密度、根表面积、根体积、根系平均直径和不同直径分级的根形态参数。

1.3.2 作物样品采集和处理

于根系样品采集后,采集两种作物样品。

蚕豆样品:用铁锹挖约 0.50 m 深取出整株蚕豆 5 株,以保证所有根瘤取出,置于牛皮纸上分地上部和地下部。地上部样品处理:烘干称干重,粉碎后充分混合均匀,用以测定植株氮含量。地下部样品处理:轻轻抖落根上的土,落在纸上的根瘤及带根瘤的根一并放入 8 号自封袋内,于 1 mm 土壤筛中流水冲洗,摘可见根瘤、风干、称重。

玉米样品:在取样区采样 5 株,用以测定植株干物质和氮含量。

作物成熟时在离边行 0.5 m 条件下按带收获,测定其生物学产量、籽粒产量和氮含量。

1.4 数据处理和统计分析

1.4.1 数据处理

种间地上部互作的贡献率(%)=(不分隔根瘤重-分隔根瘤重)×100/不分隔根瘤重

种间地下部互作的贡献率(%)=1-地上部互作贡献率

土地当量比(Land Equivalent Ratio, LER)常被用于衡量间作优势^[25]。LER 被定义为获得与间作相同产量所需的单作土地面积。计算公式如下:

$$LER = \text{间作蚕豆产量} / \text{单作蚕豆产量} + \text{间作玉米产量} / \text{单作玉米产量}$$

当 LER>1,表示间作比单作效率高。

根重密度(Root bulk density, RBD, g/500cm³),是指 500 cm³ 体积土壤内根的干重。

根长密度(Root length density, RLD, cm/500cm³),是指 500 cm³ 体积土壤内根的长度。

根表面积(Root surface area, RSA, cm²/500cm³),是指 500 cm³ 体积土壤内根的表面积。

根体积(Root volume, RV, cm³/500cm³),是指 500 cm³ 体积土壤内根的体积。

根平均直径(Root average diameter, RAD, mm),是指 500 cm³ 体积土壤内的不同土层根直径的平均值。

总根长密度(根重密度,根表面积,根体积),是指单位体积土壤内的不同土层根系相应参数之和。

1.4.2 统计分析

试验数据用 Microsoft Excel 2003 整理后,采用 SAS 软件(SAS Institute, 2001)进行统计分析。

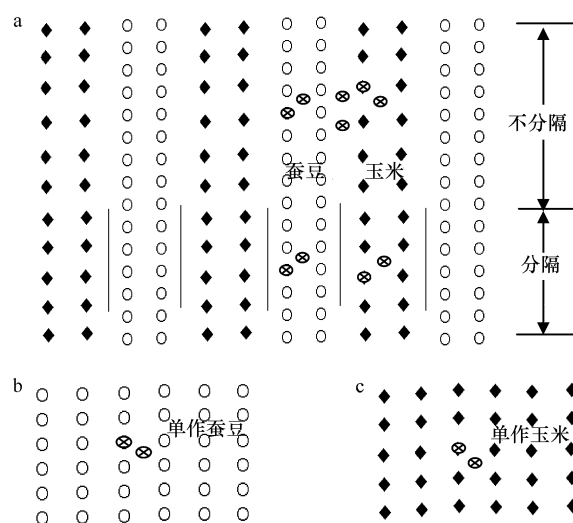


图1 根系分隔试验和氮肥试验的根钻法根系采样示意图

Fig. 1 Schematic diagram of root samples in root partition experiment and N fertilization experiment by auger

2 结果与分析

2.1 种间互作和施氮对作物根系空间分布的影响

2.1.1 种间互作和施氮对玉米根系空间分布的影响

在玉米抽雄期,与单作玉米(仅种内竞争)或根系分隔玉米(仅种间地上部竞争)相比,玉米与蚕豆根系互作(种间地上部和地下部竞争同时存在)使间作玉米根重密度在纵向(0—120 cm 土层)和横向(间作玉米带内、间作带间和对应间作蚕豆带内)上均有增加的趋势(表 2 和表 3)。

表 2 种间互作和氮肥对间作蚕豆和玉米根重密度的影响

Table 2 Effects of interspecific interactions and N fertilization on the root bulk density ($\text{g}/500 \text{ cm}^3$) of intercropped faba bean and maize

作物 Crop	氮水平 N level /(kg/hm^2)	土层深度 Soil depth /cm	分隔试验 Root partition experiment			氮肥试验 N fertilizer experiment		
			间作作物带内 Intercropping strip	间作带间 Strip between intercropped crops	对应间作 作物带内 Associated crop's strip	间作作物带内 Intercropping strip	间作带间 Strip between intercropped crops	对应间作 作物带内 Associated crop's strip
玉米 Maize	0	0—20	1.161a	0.020	0.002	1.472ab	0.040	0.014
		20—40	0.103b	0.042	0.007	0.064b	0.026	0.068
		40—60	0.081b	0.057	0.009	0.060b	0.022	0.071
		60—80	0.033b	0.052	0.020	0.029b	0.021	0.013
		80—100	0.018b	0.031	0.019	0.110b	0.060	0.009
		100—120	0.038b	0.031	0.003	0.008b	0.010	0.003
	150	0—20	1.448a	0.022	0.010	1.026ab	0.074	0.030
		20—40	0.083b	0.045	0.060	0.071b	0.042	0.026
		40—60	0.080b	0.041	0.009	0.045b	0.018	0.049
		60—80	0.024b	0.017	0.002	0.029b	0.016	0.037
		80—100	0.011b	0.027	0.002	0.043b	0.036	0.033
		100—120	0.021b	0.009	0.001	0.068b	0.031	0.045
蚕豆 Faba bean	0	0—20	2.806a	0.012	0.001	0.349	0.036	0.017
		20—40	0.047b	0.012	0.000	0.017	0.018	0.006
		40—60	0.030b	0.006	0.001	0.004	0.010	0.009
		60—80	0.009b	0.004	0.000	0.011	0.005	0.000
		80—100	0.004b	0.002	0.000	0.008	0.003	0.000
		100—120	0.003b	0.002	0.000	0.000	0.002	0.007
	150	0—20	3.689a	0.015	0.009	3.148a	0.070	0.007
		20—40	0.048b	0.007	0.003	0.272b	0.015	0.008
		40—60	0.021b	0.007	0.001	0.058b	0.013	0.002
		60—80	0.007b	0.001	0.000	0.008b	0.012	0.003
		80—100	0.010b	0.001	0.000	0.008b	0.002	0.000
		100—120	0.014b	0.001	0.000	0.010b	0.002	0.001

同一列不同字母表示同一氮水平下不同土层间有显著差异($n = 3, P < 0.05$)

在大田条件下,无论何种种植方式(间作、单作或是根系分隔),玉米根系在抽雄前可深达 120 cm,在 0—60 cm 土层的根重密度占 88.6%。与蚕豆根系互作的玉米根重密度几乎在各个土层均比单作玉米和根系分隔玉米的高,0—60 cm 土层间作玉米的根重密度比根系分隔和单作的分别增加了 64.0% 和 7.0%,60—120 cm 土层分别增加了 39.1% 和 137.1%。施氮玉米的根重密度在 0—60 cm 土层减少,比根系分隔和单作玉米根重密度分别减少了 17.4% 和 30.9%;但增加了 60—120 cm 土层的根重密度,比根系分隔和单作玉米根重密度分别增加了 7.8% 和 18.7%(表 2 和表 3),但没达到显著水平。

表 2 结果显示了根系互作和氮肥对玉米根系在水平尺度的影响,间作玉米带内的根系最多,占 82.1%,依次为蚕豆玉米间作带间和间作蚕豆带的玉米根系,分别为 10.6% 和 7.3%;此外,玉米根系在表层进入蚕豆带的很少,无论施氮与否,间作带间和蚕豆带内较深土层根系的分布比相应浅土层的多(图 2);氮肥(150 kg/hm^2)并没有促进间作玉米根系在间作玉米带内和间作带间的分布,但在与之间作的蚕豆带内显著增多,增幅为 27.3%。

表3 氮肥对根系分隔和单作蚕豆与玉米根重密度的影响

Table 3 Effect of N fertilization on the root bulk density ($\text{g}/500 \text{ cm}^3$) of faba bean and maize in sole system and root barrier treatment

作物 Crop	土层深度 Soil depth /cm	氮水平 N level/(kg/hm^2)			
		分隔试验 Root partition experiment		氮肥试验 N fertilizer experiment	
		0	150	0	150
玉米 Maize	0—20	1.255a	0.422	1.601a	0.871
	20—40	0.093b	0.100	0.152b	0.201
	40—60	0.061b	0.067	0.091b	0.091
	60—80	0.023b	0.121	0.091b	0.063
	80—100	0.014b	0.053	0.015b	0.048
蚕豆 Faba bean	100—120	0.0154b	0.033	0.022b	0.016
	0—20	3.842a	2.617a	0.698	5.953a
	20—40	0.153b	0.025b	0.032	0.133b
	40—60	0.025b	0.020b	0.021	0.039b
	60—80	0.006b	0.009b	0.040	0.015b
	80—100	0.002b	0.006b	0.002	0.050b
	100—120	0.010b	0.007b	0.006	0.011b

同一列不同字母表示同一氮水平下不同土层间有显著差异($n = 3, P < 0.05$)

2.1.2 种间互作和施氮对蚕豆根系空间分布的影响

在蚕豆成熟期,根系分隔试验和氮肥试验结果显示了蚕豆根系同样可生长至120 cm土层,但主要集中在0—40 cm土层,该层的根重密度占98.2%(表2和表3)。间作蚕豆、单作蚕豆和有根系分隔的蚕豆根系在各个土层的分布无明显差异。施氮蚕豆的根重密度在0—60 cm土层两个试验表现不一,却增加了60—120 cm土层的根重密度,比根系分隔和单作蚕豆根重密度分别增加了33.0%和43.73%(表2和表3)。

表2结果显示了根系互作和氮肥对蚕豆根系在水平尺度的影响,间作蚕豆带内、间作带间和间作玉米带的蚕豆根重密度分别占97.0%、2.4%和0.7%。与间作玉米根系相比,间作蚕豆进入玉米带的更少;氮肥显著地促进了蚕豆根系在间作蚕豆带内和间作带间生长,根重密度分别增加了121.9%和29.8%。

2.2 种间互作和施氮对作物根系形态的影响

2.2.1 种间互作和施氮对蚕豆玉米根长密度的影响

在大田条件下,玉米与蚕豆互作和氮肥均使玉米根长密度在纵向和横向两个尺度均显著地增加(图2和图3a、b)。在垂直方向,在0—60和60—120 cm土层的玉米根长密度分别占总根长密度的69.9%和30.1%。间作玉米根长密度在各个土层均比单作玉米和根系分隔玉米的高,0—60 cm土层间作玉米的根长密度比有根系分隔的和单作的分别增加了60.3%和86.0%,60—120 cm土层分别增加了172.4%和195.8%。施氮玉米的根长密度在0—120 cm土层比根系分隔和单作的分别增加了17.0%和21.1%;尽管施氮肥没有增加0—60 cm土层的根重密度,但使该土层的玉米根系增长,比有根系分隔的和单作的玉米根长密度分别增加了31.0%和22.9%(图2和图3)。在水平方向,间作玉米带内、间作带之间和间作蚕豆带的玉米根长密度分别占总根长密度59.1%、26.5%和14.4%;此外,尽管氮肥对其水平方向根重密度影响不太明显,以及在根系分隔试验中施氮并无显著增加间作带间和间作蚕豆带内的玉米根长密度,但在两个试验中施氮使玉米总根长密度增加了26.2%,在氮梯度试验中施氮均显著地增加了3个带玉米根长密度,增幅依次为18.6%、13.1%和205.0%(图2和图3)。

两个田间试验结果显示在0—60 cm土层的蚕豆根长密度占85.0%(图2和图3)。氮肥试验中间作蚕豆根长密度与单作的无显著差异,只在浅土层表现为略增加的趋势;但在根系分隔试验中根系互作的蚕豆根长密度比根系分隔的均明显增加,平均增幅为52.8%;施氮可增加各土层的根长密度,平均增幅为70.6%。在水平方向,间作蚕豆带内、间作带间和间作玉米带的蚕豆根长密度分别占65.8%、29.1%和5.1%,由于进入玉米带的蚕豆根系较少,因此,在玉米带内的蚕豆根长密度只略有增加;与不施氮肥的间作蚕豆根长密度相比,施肥显著增加了间作蚕豆的根长密度,在以上3个带分别增加了65.9%、90.2%和50.8%,平均增加了

71.7% (图2和图3)。

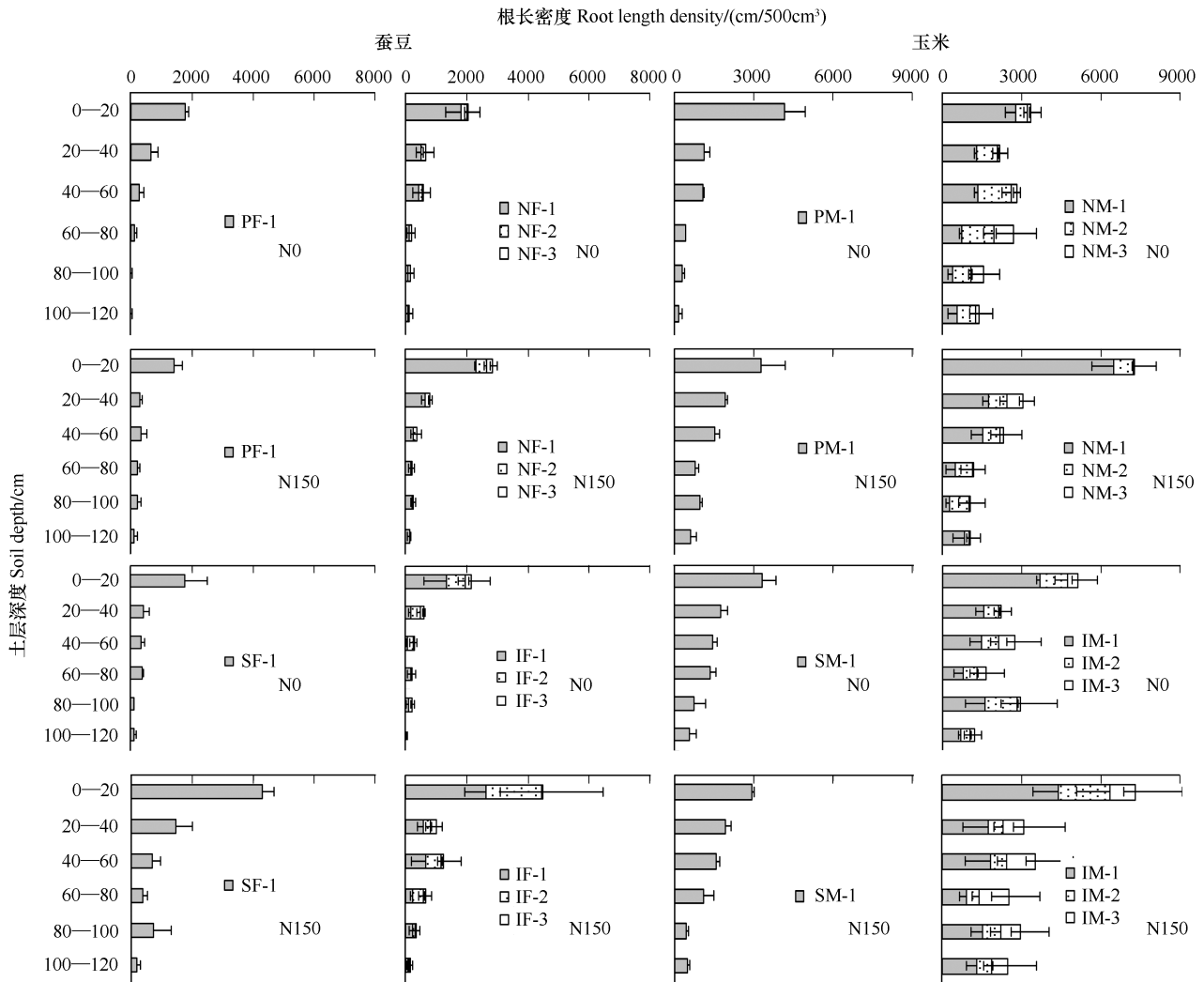


图2 种间互作和氮肥对蚕豆和玉米根长密度的影响

Fig.2 Effects of interspecific interactions and N fertilization on the root length density of faba bean and maize

$M \pm SE$ $n = 3$

2.2.2 种间互作和施氮对蚕豆玉米根表面积的影响

种间互作和施氮对蚕豆玉米的根表面积影响与对作物根长密度的影响趋势一致。图3结果显示,在0—60和60—120 cm土层的玉米根表面积分别占74.0%和26.0%;0—60 cm土层间作玉米的根表面积比根系分隔和单作的分别增加了66.2%和54.0%,60—120 cm土层分别增加了114.9%和157.7%。水平尺度上,间作玉米带内、间作带间和间作蚕豆带的玉米根表面积分别占65.7%、22.2%和12.1%;此外,施氮对间作玉米在水平尺度上的根表面积表现有所不同,氮梯度试验中在玉米带内减少,而在间作带间和间作蚕豆带内均呈增加的趋势,但根系分隔试验中在玉米带增加,而在间作带间和间作蚕豆带内减少,但施氮肥对间作玉米根表面积的影响总趋势是增加的,平均增加了10.4% (图3)。

氮梯度试验和分隔试验结果显示蚕豆根表面积在0—60 cm土层占89.9% (图3)。间作与单作的蚕豆根表面积无显著差异,但根系互作的蚕豆根表面积比根系分隔的在各个土层均有增加,平均增幅为17.0%。水平尺度上,间作蚕豆带内、间作带间和间作玉米带的蚕豆根表面积分别占74.8%、21.8%和3.5%;玉米带内的蚕豆根表面积增加量同样较少。施氮肥可增加各土层的根表面积,平均增幅为95.4%;与施氮间作蚕豆相

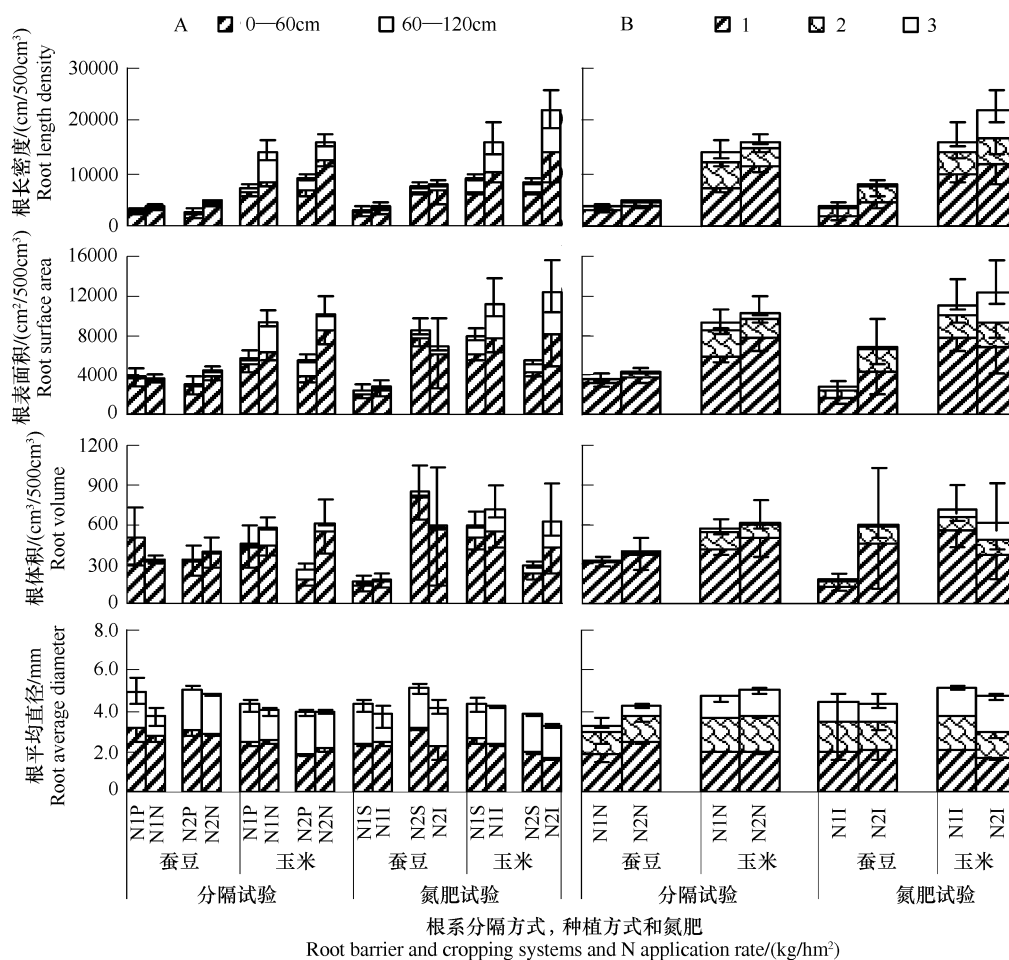


图3 种间互作和氮肥对蚕豆和玉米根系形态学参数垂直尺度(A)和水平尺度(B)的影响

Fig. 3 Effects of interspecific interactions and N fertilization on the parameters of the root morphology in 0–60 and 60–120 cm soil layers vertical dimension (A) and 0–120 cm soil layer horizontal dimension (B) of faba bean and maize

$M \pm SE$ $n=3$; P和N: 指根系分隔和不分隔. S和I: 指单作和间作. N1和N2: 施氮量. 1, 2, 3 分别指间作蚕豆或玉米带、间作带间和在对应间作作物带内的根系

比,施氮间作蚕豆的根表面积在3个带内均增加,平均增加了73.3%,但在间作玉米带内增加的相对较少(图3)。

2.2.3 种间互作和氮肥对玉米和蚕豆根体积的影响

种间互作和施氮对蚕豆玉米的根根体影响与对作物根长密度的影响趋势也一致。在0–60和60–120 cm土层的玉米根系体积分别占79.7%和20.3%;间作玉米根体积在各个土层均比根系分隔和单作的高,0–60 cm土层间作玉米的根体积比根系分隔和单作的分别增加了61.7%和33.5%,60–120 cm土层分别增加了75.5%和123.8%(图3)。水平尺度上,间作玉米带内、间作带间和间作蚕豆带的玉米根体积分别占69.9%、15.9%和14.2%;此外,与间作玉米根表面积相似,施氮对间作玉米在水平尺度上的根表面积表现有所不同,氮肥试验中在玉米带内减少,而在间作带间和间作蚕豆带内均呈增加的趋势,但在根系分隔试验中在玉米带增加,而在间作带间和间作蚕豆带内减少,从而使施氮与不施氮的间作玉米根体积差异不显著(图3)。

氮肥试验和分隔试验结果显示蚕豆根体积在0–60 cm土层占94.2%。根系互作的蚕豆根体积(间作蚕豆和不分隔蚕豆)与单作和根系分隔的之间无显著差异(图3)。在水平尺度上,间作蚕豆带内、间作带间和间作玉米带的蚕豆根系体积分别占84.2%、13.7%和2.2%;玉米带内的蚕豆根体积相对来说增加同样较少。施氮肥增加了蚕豆的根体积,平均增幅为149.2%;与施氮间作蚕豆相比,施氮间作蚕豆的根体积平均增加了

90.6%,但与根表面积相似,在玉米带内间作蚕豆根体积有所减少(图3)。

2.2.4 种间互作和氮肥对玉米和蚕豆根平均直径的影响

随着土层深度增加蚕豆和玉米的根系平均直径逐渐降低。

在60—120 cm土层的玉米根平均直径与0—60 cm土层相比,降幅为20.3%;间作玉米根平均直径在各个土层均比根系分隔和单作的低,平均为6.0%(图3)。水平尺度上,间作玉米带内、蚕豆玉米间作带间和间作蚕豆带的玉米根系平均直径依次为1.93、1.59和1.38 mm;此外,尽管施氮(150 kg N/hm²)对整个间作玉米根系平均直径无显著影响,但显著增加了间作玉米在间作蚕豆带内的根平均直径,平均增加了24.1%(图3)。

蚕豆根平均直径在0—60和60—120 cm土层分别2.78和1.73 mm。间作蚕豆根平均直径在各个土层比根系分隔的和单作的均低,平均降幅为14.9%(图3)。水平尺度上,间作蚕豆带内、间作带间和间作玉米带的蚕豆根平均直径分别为2.07、1.34、0.69 mm。施氮肥可增加各土层的根系直径,在较深土层增幅较多,平均增幅为13.8%(图3)。

2.3 种间互作和施氮对蚕豆根瘤的影响

由于在蚕豆成熟期,部分根瘤已衰退,蚕豆与玉米根系促进作用无盛花期和鼓粒期表现明显,即显著地促进蚕豆根瘤形成^[26],但在根系分隔试验和氮肥试验中种间互作的蚕豆根瘤重仍分别增加了17.7%和23.0% ($P>0.05$,表4),地下部根系互作对蚕豆结瘤的贡献率为85.5%。

与根系互作对根瘤的影响趋势一致,氮肥对蚕豆的根瘤发育在成熟期的影响不显著,但仍表现出氮素对根瘤的抑制作用。与不施氮相比,在根系分隔试验和氮肥试验中150 kg N/hm²处理的蚕豆根瘤重分别降低了23.7%和39.1% ($P>0.05$,表4)。

表4 种间互作和施氮对蚕豆根瘤的影响(成熟期)

Table 4 Effects of intercropping and N fertilization rates on the nodule biomass (g/plant) of faba bean at the maturity of faba bean in root partition experiment and N fertilizer experiment

氮水平 N level /(kg/hm ²)	分隔试验 Root partition experiment				氮肥试验 N fertilizer experiment		
	分隔 Solid barrier	不分隔 No barrier	平均 Mean	地下部的贡献率 Contribute rate /% of root interactions	单作 Sole faba bean	间作 Intercrop faba bean	平均 Mean
0	0.707±0.120	0.867±0.112	0.787 X	81.58±11.03	0.473±0.073	0.653±0.157	0.563 X
150	0.567±0.052	0.633±0.127	0.600 X	89.47±9.41	0.340±0.110	0.347±0.117	0.343 X
平均 Mean	0.637 A	0.750 A			0.407 A	0.500 A	

同一实验中相同大写字母表示分隔方式或种植方式或氮水平在0.05水平上差异不显著; M±SE, n=3

2.4 种间互作和施氮对作物地上部生长的影响

种间互作极显著地提高了蚕豆地上部总生物量、籽粒产量和氮素吸收(图4),在根系分隔试验中与分隔蚕豆相比,增幅分别为44.3%、51.8%和46.0% ($P<0.0001$),地下部根系互作的平均贡献率分别为69.3%、68.6%和66.2%;在氮肥试验中与单作蚕豆相比,增幅分别为62.0%、92.8%和75.1% ($P<0.0001$,图4)。而氮肥对蚕豆地上部的生长影响不显著($P>0.05$,图4)。

在0和150 kg N/hm²的供氮条件下,种间互作对玉米地上部生物量和氮素吸收的影响均不显著($P>0.05$,图4),但表现出增加的趋势,种间互作的玉米地上部生物量、籽粒产量和氮素吸收量比无种间地下部互作(分隔和单作)的玉米分别平均增加了3.7%、0.7%和12.4%。在根系分隔试验中与不施氮玉米相比,150 kg N/hm²处理的玉米地上部总生物量、籽粒产量和氮素吸收分别增加了82.8%、128.8%和108.6% ($P<0.0001$),地下部根系互作的平均贡献率分别为96.3%、85.6%和90.9%。在氮肥试验中,施氮对玉米地上部影响无在根系分隔试验中明显,可能土壤质地空间异质性,150 kg N/hm²处理的玉米地上部总生物量、籽粒产量和氮素吸收分别增加了32.3% ($P<0.05$)、34.7% ($P=0.057$)和46.2% ($P<0.05$)。

总之,蚕豆/玉米间作生态系统具有显著的间作优势,无论施氮与否,土地当量比(LER)均大于1,但施氮

对 LER 影响不显著。

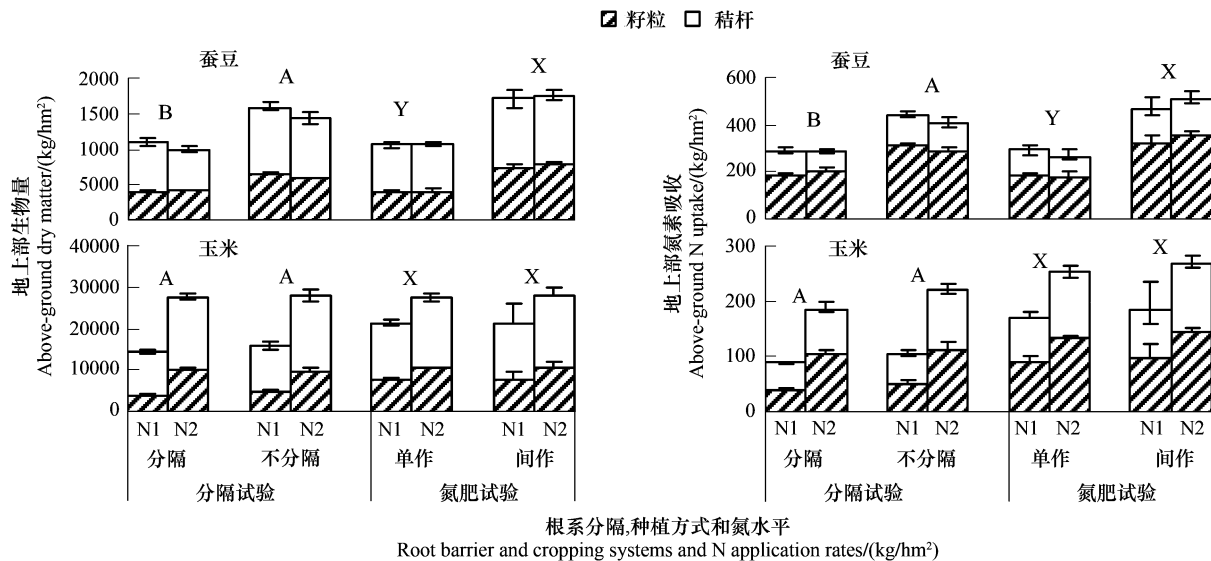


图4 种间互作和施氮对蚕豆和玉米地上部生物量和氮素吸收量的影响

Fig. 4 Effects of intercropping and N fertilization on the above-ground dry matter and N uptake of faba bean and maize in root partition experiment and N fertilizer experiment

同一实验中不同大写字母表示分隔方式或种植方式在 0.05 水平上差异显著. 同一实验中相同大写字母表示分隔方式或种植方式在 0.05 水平上差异不显著; $M \pm SE$, $n=3$

2.5 种间互作和施氮对土壤含水量的影响

从图 5 可见,在玉米抽雄期,不分隔蚕豆土壤含水量低于根系分隔蚕豆,0 和 150 kg N/hm²处理的不分隔蚕豆比分隔蚕豆分别降低了 0.8%—12.9% (除 0—20 cm) 和 5.9%—17.7%;施氮后使 0—120 cm 土层各层土壤含水量均降低,平均降低了 4.9%。氮肥试验中间作蚕豆在 20—120 cm 内各土层土壤含水量均低于单作蚕豆;施氮后各土层土壤含水量变化不一,但总的趋势是降低的,平均降低了 2.0%。

分隔试验中不分隔玉米在 0—120 cm 土层土壤含水量虽各层表现不一致,但总的低于根系分隔玉米,平均降低了 1.8%;施氮后使 80—100 cm 土层土壤含水量略有增加,但其他土层土壤含水量均降低,平均降低了 5.4% (图 5)。氮肥试验中间作玉米在 0—120 cm 内各土层土壤含水量均显著地低于单作玉米,平均降幅为 23.8%;施氮后除 100—120 cm 外其他土层土壤含水量均有所降低,平均降幅为 8.0% (图 5)。

结果表明,蚕豆玉米间作和施氮降低了土壤中含水量,换言之,促进了作物根系对水分和养分的吸收和利用。本研究表明间作能够更有效地利用土壤中有限的水资源,从而实现该间作生态系统稳产、高产,这对缓解我国农业生产中水资源危机,尤其降雨量极少的河西走廊绿洲灌区具有生产指导意义。

2.6 作物地下部根系参数与地上部生长的相关分析

如表 5 所示,根系参数中除了蚕豆根长密度和根瘤重与籽粒产量和氮素吸收呈正相关外,其他参数均为负相关 (表 5),且在浅土层相关程度高。土壤含水量对蚕豆籽粒产量的影响与对蚕豆结瘤的影响截然不同,呈负相关,但不显著,而与氮素吸收呈正相关 ($r=0.024$)。

抽雄前的根系不仅影响着该生长期玉米地上部生长,对玉米后期生长影响更大 (表 5),一方面,根长密度和根表面积与两个时期地上部参数表现为正相关,且根系平均直径在浅土层达到负相关显著程度,但在深土层为正相关 ($P>0.05$);另一方面,抽雄期的玉米庞大根系对玉米后期养分吸收极其重要,在深土层 (60—120 cm) 根系各个参数与玉米成熟收获时的总氮累积量均呈正相关,说明增加根系生长均可促进玉米养分吸收,尤其根长密度和根表面积。在浅土层 (0—60 cm 土层),根系越细越有利于玉米吸收养分和生长,但在深土层较长粗根系才能提高玉米养分提升,从而被利用。抽雄期的土壤含水量与玉米抽雄前期玉米生长和收获时氮

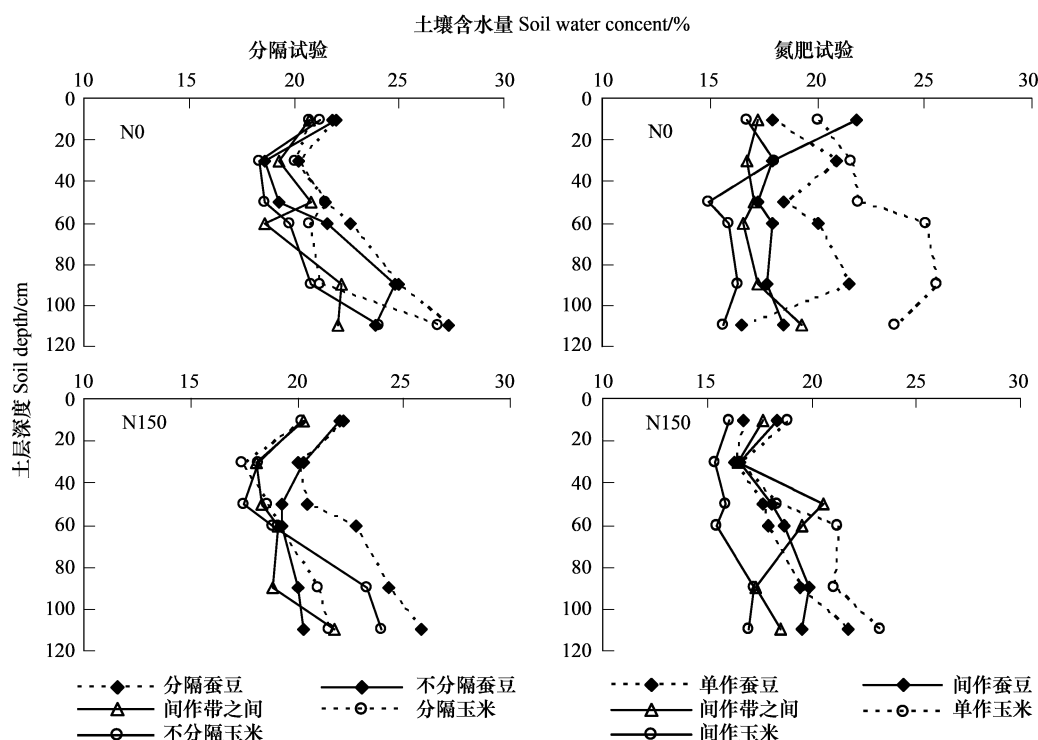


图5 种间互作和氮肥对土壤含水量的影响(玉米抽雄期)

Fig. 5 Effects of intercropping and N fertilization on the soil water content in 0—120 cm soil layer of faba bean and maize at the tasselling stage of maize in root partition experiment and N fertilizer experiment

$M \pm SE$, $n = 3$

素吸收呈显著的负相关,而此生长期的土壤含水量显著地影响着玉米收获时的籽粒产量和总氮累积(表5)。

3 结论

研究结果表明,种间互作和施氮均增加了玉米和蚕豆在纵向和横向两个尺度上的根重密度、根长密度、根表面积、根系体积。根长密度和根表面积与两种作物产量和氮素吸收均呈正相关,而与蚕豆的根瘤重呈负相关;土壤含水量与玉米产量和养分吸收呈显著的负相关,而与蚕豆的根瘤重呈正相关。玉米根系可以占据蚕豆地下部空间,但蚕豆的根却较少到间作玉米的地下部空间,即此生育期,玉米根系比蚕豆根系占的土壤体积大,也就是间作增加了玉米根系水平尺度的生态位。此外,蚕豆和玉米根系分别主要分布在0—40 cm 浅土层和0—60 cm 土层,且间作玉米根系较深土层比单作的分布多,即间作扩展了玉米根系垂直方向的生态位,较深根系分布有利于玉米后期的竞争恢复生长。尽管间作蚕豆根系分布没有象间作玉米扩展的明显,但与单作相比,其空间生态位同样得到了扩展。因此,间作扩大了两作物根系纵向和横向的空间生态位,即扩展了两者的水分和养分生态位,增加了作物吸收养分的有效空间,从而为蚕豆玉米间作优势奠定了根系生态学基础。

4 讨论

生物物种间相互作用一直是众多学者关注的热点。区分植物种内关系、种间地上部及地下部关系对植物种群以及生态系统生产力及进化的研究主要通过分隔技术来进行,研究发现生态系统生产力主要由种间关系决定的^[27-30]。有的学者认为土壤养分影响植物种间的关系^[31-32],而 Grime 则认为种间竞争强度不受土壤条件限制^[33]。近年来物种间互惠互利的研究成为众多学者关注的焦点^[22,24,34-35]。

Li 等对蚕豆/玉米间作互惠系统研究发现产量的间作优势主要源于种间地下部根系相互作用和根际过程^[22,24,34]。本研究通过根系分隔试验和氮肥试验更进一步证实这种种间互惠关系主要由于地下部根系作用,随着根系相互作用时间的延长,这种促进作用更加明显,尤其对豆科生长及固氮,共生期显著地提高了蚕

豆固氮能力^[36],增加了蚕豆根长密度、根表面积等根系形态学参数,从而促进了土壤氮素吸收,最终提高蚕豆产量。种内、种间地上部作用和种间地下部根系作用对蚕豆地上部生长和根系分布和形态程度不同,比较两个试验的结果发现,蚕豆种内相互作用对蚕豆生长的影响低于蚕豆/玉米种间地上部相互作用,由于种间根系相互作用改变了蚕豆地下部根系分布,尽管少量根系到玉米带内,但扩展了根系空间生态位,与此同时,使蚕豆的根系形态发现了变化,使根长、根表面积和根体积均呈增加的趋势。尽管相关分析发现蚕豆结瘤与其根系生长呈负相关,但根系生长显著促进了土壤氮素吸收,从而使间作蚕豆形成强大的地上部库强,又由于豆科生物固氮量主要由其地上部库强决定。因此,间作蚕豆地上部生长和其生物固氮优势主要由于种间地下部根系相互作用。

表5 作物根系参数和土壤含水量(0—120 cm)与地上部生长的相关性

Table 5 Pearson's correlations among the root parameters and soil water content in 0—120 cm soil layer, above-ground growth of faba bean and maize ($n=24$, including N0 and N150 treatments in both root partition and N fertilizer experiment)

参数 Parameters	蚕豆 Faba bean				玉米 Maize		
	氮水平 N level /(kg/hm ²)	籽粒产量 Grain yield /(kg/hm ²)	氮素吸收 N uptake /(kg/hm ²)	根瘤重 Nodule biomass /(g/plant)	氮水平 N level /(kg/hm ²)	籽粒产量 Grain yield /(kg/hm ²)	氮素吸收 N uptake /(kg/hm ²)
土壤含水量	-0.129	-0.147	0.024	0.323	-0.232	-0.445	-0.437
Soil water content /%	0.547	0.492	0.911	0.124	0.275	0.029	0.033
根重密度	0.358	-0.222	-0.233	0.173	0.245	-0.115	-0.091
Root bulk density /(g/500cm ³)	0.086	0.297	0.274	0.420	0.248	0.593	0.672
根长密度	0.472	0.130	0.040	-0.273	0.162	0.087	0.168
Root length density /(cm/500cm ³)	0.020	0.546	0.853	0.196	0.450	0.685	0.433
根表面积	0.437	0.078	0.156	-0.117	0.017	0.001	0.059
Root surface area /(cm ² /500cm ³)	0.033	0.718	0.467	0.585	0.936	0.999	0.783
根体积	0.354	-0.192	-0.250	0.053	0.261	-0.152	-0.127
Root volume /(cm ³ /500cm ³)	0.089	0.369	0.239	0.806	0.219	0.479	0.556
根平均直径	0.256	-0.396	-0.384	0.237	0.395	-0.294	-0.322
Root average diameter /mm	0.227	0.055	0.064	0.265	0.056	0.163	0.125
根瘤重	-0.660	0.298	0.391				
Nodule biomass /(g/plant)	<0.0001	0.110	0.033				

上行为相关系数 r , 下行为显著性 P 值, 斜体为相关显著。玉米收获时相关性的根系参数和土壤含水量为蚕豆收获时的玉米根系和土壤含水量

本研究中地下部根系相互作用对玉米产量形成与 Li 等结果有所不同^[24,34],可能由于受到氮素影响。研究发现蚕豆/玉米中玉米产量间作优势发挥必需在适宜的养分条件下,通过线性平台模型求得间作生态系统适宜的氮量为 186—200 kg N/hm²^[37]。本研究根系分隔试验中施氮量为 150 kg N/hm²,而 Li 等^[24,34]根系分隔试验中氮肥用量为 225 kg N/hm²,由于玉米是高需氮作物,可能由于养分不足使间作玉米在后期生长中不能充分恢复生长而使其产量与单作和根系分隔的玉米虽有所增加。由于蚕豆生长在养分不足条件下有利于其固氮功能,在养分充足条件下由于生物固氮是高耗能的过程,作物权衡其利益会吸收更多土壤氮素,从而使其地上部生长不受氮素调控。

References:

- [1] Dai J Y, E Y J, Gu W L. Studies on the relationship between root growth and yield in maize II. The interaction of root system and leaves of maize

- and its relation with yield. *Acta Agronomica Sinica*, 1988, 14(4): 310-314.
- [2] Zhang E H, Hu H. Studies on competition and compensation of the roots between spring wheat and spring corn under intercropping. *Journal of Gansu Agricultural Univeristy*, 1997, 32(4): 295-299.
- [3] Shinano T, Osaki M, Yamada S, Tadano T. Comparison of root growth and nitrogen absorbing ability between gramineae and leguminosae during the vegetative stage. *Soil Science and Plant Nutrition*, 1994, 40(3): 485-495.
- [4] Varldermeer J. *The Ecology of Intercropping*. Cambridge: Cambridge University Press, 1989.
- [5] Casper B B, Jackson R B. Plant competition underground. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 1997, 28: 545-570.
- [6] Schenk H J. Root competition: beyond resource depletion. *Journal of Ecology*, 2006, 94(4): 725-739.
- [7] Craine J M. Competition for nutrients and optimal root allocation. *Plant and Soil*, 2006, 285(1/2): 171-185.
- [8] Fransen B, Blijenberg J, de Kroon H. Root morphological and physiological plasticity of perennial grass species and the exploitation of spatial and temporal heterogeneous nutrient patches. *Plant and Soil*, 1999, 211(2): 179-189.
- [9] Robinson D. The responses of plants to non-uniform supplies of nutrient. *New Phytologist*, 1994, 127(4): 635-674.
- [10] Robinson D. Resource capture by localized root proliferation: why do plants bother? *Annals of Botany*, 1996, 77(2): 179-185.
- [11] Robinson D, Hodge A, Griffiths B S, Fitter A H. Plant root proliferation in nitrogen-rich patches confers competitive advantage. *Proceedings of the Royal Society Series: Biological Sciences*, 1999, 266(1418): 431-435.
- [12] Zuo Y M. Effect of maize intercropped with peanut on iron nutrition of peanut in Calcareous soil. Beijing: China Agricultural Univeristy, 1997.
- [13] Wang L. Effects of root exudates and nutrient heterogeneity on crop growth and root morphology in wheat/maize intercropping system. Beijing: China Agricultural Univeristy, 2007.
- [14] Hao Y R, Lao X R, Zhao B Q, Zhao B Q, Sun W H. Effect of root partition on the growth characteristics of intercropped wheat and corn. *Journal of Triticeae Crops*, 2003, 23(1): 71-74.
- [15] Liu H, Duan A W, Sun J S, Gao Y, Sheng X J, Liu Z D. Spatio-temporal distribution patterns of winter wheat and spring maize root systems under intercropping. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2007, 18(6): 1242-1246.
- [16] Zhao B Q, Zhang F S, Li Z J, Li F Z, Zhang X C, Sheng J X, Pan H J, Zhao J M, Yin Y B, Wu Z J. Vertical distribution and its change of root quantity & activity of crops in the "winter wheat || early spring maize / summer maize" cropping system II. The vertical distribution and its changes of root quantity & activity of the early spring inter-planted maize. *Acta Agronomica Sinica*, 2001, 27(6): 974-979.
- [17] Hauggaard-Nielsen H, Jensen E S. Facilitative root interactions in intercrops. *Plant and Soil*, 2005, 274(1/2): 237-250.
- [18] Zhang E H, Li L L, Huang G B, Huang P, Chai Q. Regulation of fertilizer application on yield and root growth of spring wheat-faba bean intercropping system. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, 13(8): 939-942.
- [19] Zhang E H, Huang G B. Spatio-temporal distribution characteristics of crop roots in intercropping systems. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003, 14(8): 1301-1304.
- [20] Song R, Mu Y, Wang Y L, Wu C S, Guo J X. Effect of maize/soybean intercropping on the morphological characteristics of crop roots. *Journal of Northeast Normal University (Natural Science Edition)*, 2002, 34(3): 83-86.
- [21] Liu G C. Difference and Its Mechanism of Interspecific Nutrition Competition in Different Intercropping Systems. Langzhou: Gansu Agricultural Univeristy, 2005.
- [22] Li L, Sun J H, Zhang F S, Guo T W, Bao X G, Smith F A, Smith S E. Root distribution and interactions between intercropped species. *Oecologia*, 2006, 147(2): 280-290.
- [23] Gao H M. Relationship between root distribution and interspecific interactions in faba bean / wheat intercropping system. Beijing: China Agricultural Univeristy, 2006.
- [24] Li L, Yang S C, Li X L, Zhang F S, Christie P. Interspecific complementary and competitive interactions between intercropped maize and faba bean. *Plant and Soil*, 1999, 212(2): 105-114.
- [25] Willey R W. Intercropping — its importance and research needs. Part 1. Competition and yield advantages. *Field Crop Abstract*, 1979, 32: 1-10.
- [26] Li Y Y, Sun J H, Li C J, Li L, Cheng X, Zhang F S. Effects of nitrogen fertilization rates on the agronomic and nodulation characteristics of intercropped faba bean. *Scientia Agricultura Sinica*, 2009, 42(10): 3467-3474.
- [27] Wilson J B. Shoot competition and root competition. *Journal of Applied Ecology*, 1988, 25: 279-296.
- [28] Thorsted M D, Weiner J, Olesen J E. Above- and below-ground competition between intercropped winter wheat *Triticum aestivum* and white clover *Trifolium repens*. *Journal of Applied Ecology*, 2006, 43(2): 237-245.
- [29] Andersen M K, Hauggaard-Nielsen H, Weiner J, Jensen E S. Competitive dynamics in two- and three-component intercrops. *Journal of Applied Ecology*, 2007, 44(3): 545-551.

- [30] Cook S J, Ratcliff D. study of the effects of root and shoot competition on the growth of green panic (*Panicum Maximum* var. *Trichglume*) seedlings in an existing grassland using root exclusion tubes. *Journal of Applied Ecology*, 1984, 21: 971-982.
- [31] Wilson S D, Tilman D. Competitive responses of eight old-field plant species in four environments. *Ecology*, 1995, 76(4): 1169-1180.
- [32] Cahill J F. What evidence is necessary in studies which separate root and shoot competition along productivity gradients? *Journal of Ecology*, 2002, 90: 201-205.
- [33] Grime J P. *Plant strategies, vegetation processes, and ecosystem properties*. Chichester: Wiley, 2001.
- [34] Li L, Li S M, Sun J H, Zhou L L, Bao X G, Zhang H G, Zhang F S. Diversity enhances agricultural productivity via rhizosphere phosphorus facilitation on phosphorus-deficient soils. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2007, 104(27): 11192-11196.
- [35] Cardinale B J, Wright J P, Cadotte M W, Carroll I T, Hector A, Srivastava D S, Loreau M, Weis J J. Impacts of plant diversity on biomass production increase through time because of species complementarity. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2007, 104(46): 18123-18128.
- [36] Li Y Y, Yu C B, Cheng X, Li C J, Sun J H, Zhang F S, Lambers H, Li L. Intercropping alleviates the inhibitory effect of N fertilization on nodulation and symbiotic N_2 fixation of faba bean. *Plant and Soil*, 2009, 323(1/2): 295-308.
- [37] Li Y Y, Yu C B, Sun J H, Li C J, Li L, Cheng X. Nitrogen environmental endurance and economically-ecologically appropriate amount of nitrogen fertilizer in faba bean/maize intercropping system. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2008, 24(3): 223-227.

参考文献:

- [1] 戴俊英, 鄂玉江, 顾慰连. 玉米根系的生长规律及其与产量关系的研究 II. 玉米根系与叶的相互作用及其与产量的关系. *作物学报*, 1988, 14(4): 310-314.
- [2] 张恩和, 胡华. 小麦玉米带田根系竞争和补偿效应研究. *甘肃农业大学学报*, 1997, 32(4): 295-299.
- [12] 左元梅. 石灰性土壤上玉米/花生间作改善花生铁营养的效应与机制. 北京: 中国农业大学, 1997.
- [13] 王磊. 小麦/玉米间作体系根系分泌物及养分空间异质性对作物生长及根系形态的影响. 北京: 中国农业大学, 2007.
- [14] 郝艳如, 劳秀荣, 赵秉强, 孙伟红. 隔根对小麦/玉米间套种植生长特性的影响. *麦类作物学报*, 2003, 23(1): 71-74.
- [15] 刘浩, 段爱旺, 孙景生, 高阳, 申孝军, 刘战东. 间作模式下冬小麦与春玉米根系的时空分布规律. *应用生态学报*, 2007, 18(6): 1242-1246.
- [16] 赵秉强, 张福锁, 李增嘉, 李凤超, 张新春, 申加祥, 潘海军, 赵甲美, 尹玉波, 武传杰. 间套作条件下作物根系数量与活性的空间分布及变化规律研究 II. 间作早春玉米根系数量与活性的空间分布及变化规律. *作物学报*, 2001, 27(6): 974-979.
- [18] 张恩和, 李玲玲, 黄高宝, 黄鹏, 柴强. 供肥对小麦间作蚕豆群体产量及根系的调控. *应用生态学报*, 2002, 13(8): 939-942.
- [19] 张恩和, 黄高宝. 间套种植复合群体根系时空分布特征. *应用生态学报*, 2003, 14(8): 1301-1304.
- [20] 宋日, 牟瑛, 王玉兰, 吴春胜, 郭继勋. 玉米、大豆间作对两种作物根系形态特征的影响. *东北师范大学学报(自然科学版)*, 2002, 34(3): 83-86.
- [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. 兰州: 甘肃农业大学, 2005.
- [23] 高慧敏. 小麦/蚕豆间作体系种间相互作用与根系分布的关系. 北京: 中国农业大学, 2006.
- [26] 李玉英, 孙建好, 李春杰, 李隆, 程序, 张福锁. 施氮对蚕豆/玉米间作系统蚕豆农艺性状及结瘤特性的影响. *中国农业科学*, 2009, 42(10): 3467-3474.
- [37] 李玉英, 余常兵, 孙建好, 李春杰, 李隆, 程序. 蚕豆/玉米间作生态系统经济生态施氮量及对氮素环境承受力. *农业工程学报*, 2008, 24(3): 223-227.

CONTENTS

Influences of elevated ozone on growth and C, N, S allocations of rice	ZHENG Feixiang, WANG Xiaoke, HOU Peiqiang, et al (1479)
Coexistence, biodiversity and roles of ammonia-oxidizing archaea and anaerobic ammonium-oxidizing bacteria in deep soil layer of high nitrogen loaded paddy field	WANG Yu, ZHU Guibing, WANG Chaoyu, et al (1487)
The impact of interannual climate variability on the mean global vegetation distribution	SHAO Pu, ZENG Xiaodong (1494)
Labile and recalcitrant carbon and nitrogen pools of an alpine meadow soil from the eastern Qinghai-Tibetan Plateau subjected to experimental warming and grazing	WANG Bei, SUN Geng, LUO Peng, et al (1506)
The structure and species diversity of plant communities in ecological safety islands of urban Guangzhou	MO Dan, GUAN Dongsheng, HUANG Kangyou, et al (1515)
The growth pattern of <i>Pinus elliottii</i> Plantation in central subtropical China	MA Zeqing, LIU Qijing, WANG Huimin, et al (1525)
The effect of two wetland plants on nitrogen and phosphorus removal from the simulated paddy field runoff in two small-scale Subsurface Flow Constructed Wetlands	LIU Shuyuan, YAN Baixing, WANG Lixia (1538)
Effect of simulated nitrogen deposition on nutrient release in decomposition of several litter fractions of two bamboo species	TU Lihua, HU Tingxing, ZHANG Jian, et al (1547)
Ecological monitoring of bryophytes for mercury pollution in Danzhai Mercury Mine Area, Guizhou Province, China	LIU Rongxiang, WANG Zhihui, ZHANG Zhaohui (1558)
Influence of silt deposition and sand deposition on <i>Cynodon dactylon</i> population in low-water-level-fluctuating zone of the Three Gorges Reservoir	LI Qiang, DING Wuquan, ZHU Qihong, et al (1567)
Seed production of <i>Spartina alterniflora</i> and its response of germination to temperature at Chongming Dongtan, Shanghai	ZHU Zhenchang, ZHANG Liquan, XIAO Derong (1574)
Effects of decomposition of mixed leaf litters of the <i>Castanopsis platyacantha</i> - <i>Schima sinensis</i> forest on soil organic carbon	ZHANG Xiaopeng, PAN Kaiwen, WANG Jinchuang, et al (1582)
Effects of desertification on soil respiration and ecosystem carbon fixation in Mu Us sandy land	DING Jinzhi, LAI Liming, ZHAO Xuechun, et al (1594)
The spatial distribution of soil organic carbon and its influencing factors in hilly region of the Loess Plateau	SUN Wenyi, GUO Shengli (1604)
Effects of interspecific interactions and nitrogen fertilization rates on above- and below- growth in faba bean/mazie intercropping system	LI Yuying, HU Hansheng, CHENG Xu, et al (1617)
Effects of supplemental irrigation based on measured soil moisture on nitrogen accumulation, distribution and grain yield in winter wheat	HAN Zhanjiang, YU Zhenwen, WANG Dong, et al (1631)
Anti-soil background capacity with vegetation biochemical component spectral model	SUN Lin, CHENG Lijuan (1641)
Spatial distribution of arbuscular mycorrhizal fungi and glomalin of <i>Hippophae rhamnoides</i> L in farming-pastoral zone from the two northern provinces of China	HE Xueli, CHEN Cheng, HE Bo (1653)
Study on optimum forest coverage for water conservation: a case study in Pingtonghe watershed (Pingwu section)	ZHU Zhifang, GONG Gutang, CHEN Junhua, et al (1662)
Spatial point analysis of fire occurrence and its influence factor in Huzhong forest area of the Great Xing'an Mountains in Heilongjiang Province, China	LIU Zhihua, YANG Jian, HE Hongshi, et al (1669)
Combustion efficiency of small-scale meadow fire in Daxinganling Mountains	WANG Mingyu, SHU Lifu, SONG Guanghui, et al (1678)
Community structure of demersal fish in Nature Reserve of <i>Acipenser sinensis</i> in Yangtze River estuary	ZHANG Tao, ZHUANG Ping, ZHANG Longzhen, et al (1687)
Behavioral responses of the Common Coots (<i>Fulica atra</i>) and other swimming birds to human disturbances	ZHANG Weiwei, MA Jianzhang, LI Jinbo (1695)
Effects of photoperiod on body mass, organ masses and energy metabolism in Chinese bulbul (<i>Pycnonotus sinensis</i>)	NI Xiaoying, LIN Lin, ZHOU Feifei, et al (1703)
Larval host types for the 3 rd <i>Helicoverpa armigera</i> in Bt cotton field from North China determined by $\delta^{13}\text{C}$	YE Lefu, FU Xue, XIE Baoyu, et al (1714)
Selectivity of <i>Frankliniella occidentalis</i> to vegetable hosts	YUAN Chengming, ZHI Junrui, CAO Yu, et al (1720)
Genetic structure of <i>Pine caterpillars</i> (<i>Dendrolimus</i>) populations based on the analysis of Cyt b gene sequences	GAO Baojia, ZHANG Xuwei, ZHOU Guona, et al (1727)
Pricing method and application effects of biogas slurry	ZHANG Changai, LIU Ying, CAO Man, WANG Yanqin, et al (1735)
Effects of compost from municipal solid waste on ecological characteristics and the quality of different turfgrass cultivars	ZHAO Shulan, LIAN Fei, DUO Li'an (1742)
Degradation kinetics and bioavailability of pentachlorophenol in paddy soil-rice plant ecosystem	WANG Shisheng, LI Depeng (1749)
Review and Monograph	
Concepts and techniques of landscape genetics	XUE Yadong, LI Li, WU Gongsheng, ZHOU Yue (1756)

2009 年度生物学科总被引频次和影响力因子前 10 名期刊*

(源于 2010 年版 CSTPCD 数据库)

排序 Order	期刊 Journal	总被引频次 Total citation	排序 Order	期刊 Journal	影响力因子 Impact factor
1	生态学报	11764	1	生态学报	1.812
2	应用生态学报	9430	2	植物生态学报	1.771
3	植物生态学报	4384	3	应用生态学报	1.733
4	西北植物学报	4177	4	生物多样性	1.553
5	生态学杂志	4048	5	生态学杂志	1.396
6	植物生理学通讯	3362	6	西北植物学报	0.986
7	JOURNAL OF INTEGRATIVE PLANT BIOLOGY	3327	7	兽类学报	0.894
8	MOLECULAR PLANT	1788	8	CELL RESEARCH	0.873
9	水生生物学报	1773	9	植物学报	0.841
10	遗传学报	1667	10	植物研究	0.809

★《生态学报》2009 年在核心版的 1964 种科技期刊排序中总被引频次 11764 次,全国排名第 1;影响力因子 1.812,全国排名第 14;第 1—9 届连续 9 年入围中国百种杰出学术期刊;中国精品科技期刊

编辑部主任: 孔红梅

执行编辑: 刘天星 段 靖

生态学报
(SHENGTAI XUEBAO)
(半月刊 1981 年 3 月创刊)
第 31 卷 第 6 期 (2011 年 3 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA
(Semimonthly, Started in 1981)
Vol. 31 No. 6 2011

编 辑	《生态学报》编辑部 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085 电话:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn	Edited by	Editorial board of ACTA ECOLOGICA SINICA Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China Tel:(010)62941099 www.ecologica.cn Shengtaixuebao@rcees.ac.cn
主 编	冯宗炜	Editor-in-chief	FENG Zong-Wei
主 管	中国科学技术协会	Supervised by	China Association for Science and Technology
主 办	中国生态学会 中国科学院生态环境研究中心 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085	Sponsored by	Ecological Society of China Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
出 版	科 学 出 版 社 地址:北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717	Published by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷	北京北林印刷厂	Printed by	Beijing Bei Lin Printing House, Beijing 100083, China
发 行	科 学 出 版 社 地址:东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717 电话:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net	Distributed by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net
订 购	全国各地邮局	Domestic	All Local Post Offices in China
国外发行	中国国际图书贸易总公司 地址:北京 399 信箱 邮政编码:100044	Foreign	China International Book Trading Corporation Add:P. O. Box 399 Beijing 100044, China
广告经营 许可证	京海工商广字第 8013 号		

