

桑树大豆间作地上部和地下部的种间作用研究^①

郑晓媛，赵莉，许楠，张会慧，孙广玉*

(东北林业大学生命科学学院，哈尔滨 150040)

摘要：在田间条件下研究了桑树-大豆间作体系中地上部分和地下部分之间的相互作用。结果表明：在桑树和大豆间作的共生期间，间作桑树地上部生物量、光合速率、含N量、根系干重、根长密度和叶片硝酸还原酶活性(NRA)比单作桑树分别增加了65.9%、11.8%、17.8%、24.8%、139.8%和116.2%，而大豆呈现相反趋势，桑树和大豆间作期间存在明显的竞争关系。但是，间作大豆土壤微生物生物量碳和土壤脱氢酶活性分别比单作大豆高10.6%和3.5%，桑树和大豆间作存在种间促进作用。因此，桑树和大豆间作体系中种间促进作用和种间竞争作用是同时存在的。

关键词：桑树；大豆；间作；种间促进作用；种间竞争作用

中图分类号：S722

随着人口增加和耕地面积的减少，农林复合经济在各国农业生产中愈来愈受到重视。农林复合经济(agroforestry)是在一个土地利用单元中人为地把木本植物与农作物以及畜牧养殖多种成分结合起来的土地利用系统^[1]，具有相对高产稳产、有效利用土地资源、防治病虫害和杂草的作用^[2]。在农林复合经济模式，如间作、套种等研究中，不但具有植物与植物之间在水分、光、矿质营养等方面的竞争关系^[3]，也在种间促进作用(interspecific facilitation)^[4]，并且在间作模式、田间小气候、产量效益^[5]、铁营养^[6]、光能利用以及施肥量^[7]等方面开展了较多研究。桑树是近些年黑龙江省推广面积较大的树种，在脆弱生态区的植被恢复和林农经济方面发挥了非常重要的作用，尤其是桑树和大豆的农林复合模式，如：桑树有干、无干、速生和嫁接桑树与大豆间作等，已开始在黑龙江省大面积推广应用，并在桑树栽培生理研究方面积累了资

料。但是，有关桑树和大豆间作体系中的种间作用鲜为报道。为此，本文以桑树-大豆间作系统为研究对象，探讨桑树和大豆在间作共生期间地上部的生长特性和光合能力，以及根系生长、大豆根瘤和N素营养特点，旨在阐明桑树和大豆间作系统中地上和地下部之间的相互竞争和相互促进作用，为桑粮间作复合模式的结构和功能及系统的合理经营提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验地点的基本概况

试验于2007—2008年在黑龙江省延寿县延河镇桑树试验基地进行。该地点位于128°08'E, 45°23'N, 松花江北岸，属于温带半湿润大陆性气候，年日照2700 h，无霜期130~140天，≥10°C活动积温2600~2900°C，年降雨量570 mm。土壤为草甸白浆土，其理化性质见表1。

表1 供试土壤的理化性质(0~20 cm土层)

Table 1 Physical and chemical characteristics in experimental soil

有机质 (g/kg)	全N (g/kg)	全P (g/kg)	全K (g/kg)	碱解N (mg/kg)	速效P (mg/kg)	速效K (mg/kg)	pH
2.33	2.03	0.46	37.9	120.8	40.1	335.2	6.7

^①基金项目：国家自然科学基金项目(30771746, 31070307)、黑龙江省重点项目(GB07B306)、东北林业大学研究生创新项目、国家林业局项目(2010-29, 2011-32)和东北林业大学学术名师支持计划项目资助。

* 通讯作者(sungy@vip.sina.com)

作者简介：郑晓媛(1983—)，吉林敦化人，女，硕士研究生，主要从事植物营养学研究。E-mail: xiaofeixiang45@yahoo.com.cn

1.2 试验材料和设计

试验用的桑树品种为秋雨桑,由黑龙江省桑蚕研究所提供,2007年6月在大田育苗,待苗高30 cm时起苗越冬储藏,2008年5月进行移栽。大豆品种为黑农34号,由黑龙江省农业科学院大豆所提供。试验设计单作桑树、单作大豆和桑树-大豆间作3种植方法。随机区组设计,3次重复,每小区12行,行长5 m,区间过道1 m,小区面积39.6 m²。试验采用垄作方式,垄距66 cm,单作桑树和大豆每小区12行,桑树-大豆间作为3行大豆1行桑树,即每小区共计3行桑树9行大豆。大豆播种时间为5月10日,人工点播,出苗后人工间苗,密度为30万株/hm²。在相同时间进行桑树移栽,密度为7 000株/hm²。在2007年秋天施农家肥30 000 kg/hm²和磷酸二铵150 kg/hm²,田间管理按常规进行。

1.3 植物生长速率的测定

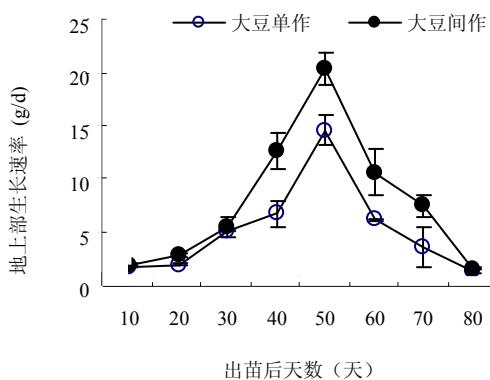
每15天在取样区分别取大豆和桑树的各部分样本,杀青后65℃下烘干至恒重,测定干重,大豆和桑树地上部分干重包括植株叶片和茎秆,以g/plant表示,以单位时间内干重的增长量计算植物生长速率(g/d)。

1.4 根系部分指标的测定

取长势一致且具有代表性的桑树和大豆植株,挖掘垄体内的植株根系,将土轻轻抖掉,然后用流水慢洗洗净根上所有附泥,在子叶节处将植株剪断,测定大豆单株根瘤数、根瘤干重、大豆和桑树根系干重。将从样地获取的根样分别装入塑料袋并编号,于低温(-4℃)保存带回实验室,采用WINRhizo根系分析系统(加拿大REGENT公司)测定根系的根长密度,并在65℃烘干测定干重。

1.5 叶片光合速率、叶绿素含量、硝酸还原酶活性和含氮量测定

利用CIRAS-1全自动光合测定系统(英国Hansatech



公司)测定大豆和桑树植株倒5叶的净光合速率;叶绿素含量按照Arnon^[8]方法测定;硝酸还原酶活性(NRA)的测定按照李合生^[9]的离体法测定,酶活力以每小时每克鲜样中产生的NaNO₂微克数(μg/(g·h))表示。

1.6 土壤微生物生物量碳和土壤脱氢酶活性测定

土壤微生物生物量C采用氯仿熏蒸,0.5 mol/L K₂SO₄浸提,浸提液中的有机C采用重铬酸钾氧化-硫酸亚铁滴定法,按照Turner等^[10]方法计算土壤微生物生物量C。土壤脱氢酶活性测定采用TTC比色法,活性以triphenylformazan(TPF) mg/(kg·d)表示。

2 结果与分析

2.1 桑树-大豆间作对生物量的影响

图1结果显示,在大豆出苗后的20天之内,大豆地上部分生物量明显高于桑树($p<0.01$),单作和间作大豆地上部分生物量的生长速率在2.34~3.42 g/d之间,而桑树为1.31~2.01 g/d。但是,在大豆出苗20天后,单作和间作的桑树地上部分生物量的增长速率明显高于大豆,在大豆出苗后50天左右达到最高峰,而后逐渐降低。同单作大豆相比较,间作大豆地上部分生物量的增长速率在出苗20天后明显降低,而间作桑树地上部分生物量的增长速率却明显高于单作桑树($p<0.01$)。在桑树和大豆间作中,经过20天生长之后桑树植株高度已经达到72.1 cm,而大豆植株高度只有35.4 cm,因此,与单作大豆群体相比,间作桑树的高度明显高于大豆,形成了较高桑树与较矮大豆的间作群体,其空间生态位与单作的桑树和大豆不同,相当于单一群体时的伞状结构,这种结构和生态位明显降低了间作大豆的光能截获量,降低了间作大豆的净光合速率(表2),大豆的生物生产量同单作比较明显下降。

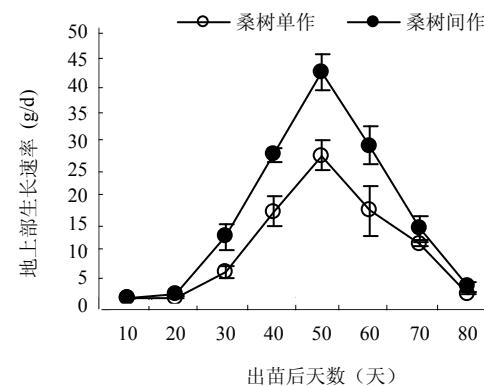


图1 桑树-大豆单作和间作地上部分生物量的生长速率

Fig. 1 Biomass growth rates above-ground of mulberry and soybean under sole and intercropping

表2 桑树-大豆间作体系地上部各项指标

Table 2 Indices above-ground in mulberry-soybean intercropping system

处理		净光合速率 (μmol/(m ² ·s))	叶片 NRA (μg/(g·h))	叶绿素含量 (mg/g)	含 N 量 (mg/plant)	生物量 (g/plant)
大豆	单作	23.4±1.3 A	21.3±0.6 A	3.84±0.24 A	151.4±3.9 A	31.5±1.8 A
	间作	18.3±2.7 A	16.4±1.3 B	3.16±0.31 B	134.5±3.1 B	22.7±1.5 B
桑树	单作	26.1±2.4 B	31.4±2.8 B	2.64±0.36 B	146.8±2.2 B	88.9±3.2 B
	间作	33.5±1.9 A	67.9±1.7 A	3.31±0.18 A	172.9±3.4 A	147.5±4.7 A

注: 表中不同字母表示同一作物单作和间作之间差异达到 $p<0.01$ 显著水平, 下表同。

2.2 桑树-大豆间作对地上部生理特性的影响

叶片叶绿素含量是决定植物光合速率和植物干物质生产的关键因素之一。表 2 结果显示, 单作大豆比间作大豆具有较高的叶绿素含量, 而单作桑树叶片的叶绿素含量明显低于间作桑树, 这一结果与间作引起大豆冠层的光截获量降低有关^[5]。 NO_3^- -N 是植物吸收土壤中 N 素的主要形态, 而叶片硝酸还原酶活性 (NAR) 的高低决定着植物吸收和利用土壤 N 素的首要条件。在本试验中, 间作桑树叶片 NRA 明显高于单作桑树 ($p<0.01$), 而间作明显降低了大豆叶片 NRA, 比单作大豆降低了 23.0%, 并达到了显著差异水平 ($p<0.01$)。间作桑树叶片硝酸还原酶的提高, 明显增加了桑树叶片的 N 素含量 (表 2), 比单作桑树叶片的含 N 量增加了 17.8%, 并达到显著差异水平 ($p<0.01$)。由此可见, 在桑树-大豆间作的共生期间, 促进了桑树生物量的增加, 一方面是由于叶绿素含量的增加而促进了桑树的净光合速率; 另一方面, 间作促进了桑树叶片硝酸还原酶活性的提高而增加了桑树叶片 N 素的积累, 从而使桑树生物量增加。光强是影响植物叶片光合作用最重要的环境因子之一, 参与调节植物体内许多含 N 化合物的合成与利用, 因而光强对植物体内

碳水化合物和含 N 化合物的含量以及碳氮代谢具有显著作用^[11]。研究表明, 光照一方面能够使硝酸还原酶去磷酸化, 提高硝酸还原酶活性; 另一方面能够改变细胞膜对 NO_3^- 的透性, 提高 NO_3^- 浓度, 间接提高硝酸还原酶活性^[12]。在本研究中发现, 间作降低大豆硝酸还原酶活性主要是由于冠层的光截获量的下降, 导致叶绿素含量和含 N 量降低, 最终使间作大豆的生物量低于单作大豆。

2.3 桑树-大豆间作对根系和土壤生物活性的影响

植物根系吸收水分和矿质元素直接影响植物的生长发育, 对于豆科植物的固 N 作用可供应地上部分的 N 素营养。表 3 结果显示, 在桑树和大豆间作的共生期间, 大豆根系干重和根瘤干重明显降低, 分别比单作大豆降低了 35.7% 和 45.3%, 说明间作显著降低了大豆的根系吸收功能。植物根长密度能反映出植物有效利用土壤空间的水分和矿质营养, 更好地反映植物根系的能力。可以看出, 间作明显降低了大豆的根长密度, 而明显提高了桑树的根长密度, 增加 1.4 倍 (表 3)。但是, 间作增加了土壤微生物生物量 C 含量, 提高了土壤脱氢酶活性 (表 3), 分别比单作大豆增加了 10.6% 和 17.3%, 比单作桑树增加了 12.5% 和 8.0%。

表3 桑树-大豆间作体系地下部各项指标

Table 3 Indices below-ground in mulberry-soybean intercropping system

处理		根瘤干重 (g/plant)	根系干重 (g/plant)	根长密度 (cm/cm ³)	土壤微生物生物量 C (mg/kg 土)	土壤脱氢酶活性 (TPE, mg/(kg·d))
大豆	单作	0.437±0.002 A	5.6±0.15 A	0.99±0.04 A	245.2±13.9 A	65.4±1.7 B
	间作	0.239±0.003 B	3.6±0.18 B	0.77±0.07 B	271.1±11.2 A	76.7±1.4 A
桑树	单作	-	36.7±1.1 B	2.41±1.36 B	252.6±12.2 B	79.1±2.1 A
	间作	-	45.8±1.2 A	5.78±0.18 A	284.3±14.1 A	85.4±2.7 A

2.4 间作对中间和靠近桑树的大豆植株生理和土壤指标的影响

大豆和桑树之间竞争关系在大豆行间也表现得非常明显。间作中临近桑树的大豆地上部生物量、N 素

吸收、根瘤干重、根系干重和根长密度低于中间行的, 可能是由于较高桑树的遮荫作用降低了大豆的光合速率的结果。与此同时, 桑树-大豆间作的微生物有机 C 和土壤脱氢酶活性高于单作桑树和大豆 (表 4)。表 4

显示, 间作体系中临近桑树的大豆植株的根长密度比中间行的根长密度降低了 35.8%, 说明临近桑树的大

豆与桑树的竞争性比中间行大豆要强, 这与花生研究结果相似^[13]。

表 4 间作大豆的中间行和靠近桑树行大豆的各项指标

Table 4 Indices in middle rows of soybean and rows adjacent to mulberry in intercropping system

处理	生物量 (g/plant)	净光合速率 (μmol/(m ² •s))	N 素吸收 (mg/plant)	根瘤干重 (g/plant)	根系干重 (g/plant)	根长密度 (cm/cm ³)
中间行	18.9 ± 1.3 a	23.2 ± 2.4 a	108.2 ± 7.3 a	0.411 ± 0.011 a	5.1 ± 0.3 a	1.03 ± 0.01 a
靠近桑树行	12.4 ± 1.1 b	19.7 ± 3.1 a	83.2 ± 4.8 b	0.175 ± 0.009 b	2.9 ± 0.2 b	0.52 ± 0.03 b

注: 表中不同字母表示间作大豆的中间行和靠近桑树行之间的差异达到 $p < 0.01$ 显著水平。

3 讨论和结论

叶片叶绿素含量是决定植物光合速率和干物质生产的关键因素之一, NO_3^- -N 是土壤中供给植物 N 素吸收的主要来源, 硝酸还原酶活性是植物利用土壤 N 素的首要条件。本试验中单作大豆比间作大豆具有较高的叶绿素含量, 而间作桑树叶绿素含量高于单作桑树(表 2), 间作桑树的 NRA 高于单作桑树, 桑树和大豆叶片中的 NRA 活性高于茎部和根系, 说明叶片中的 NO_3^- -N 含量高于根系。因此, 桑树与大豆的间作体系中叶片叶绿素含量的增加促进了叶片的光合速率, NRA 的提高促进了桑树 N 素的积累, 是间作桑树生物量的增长量明显高于单作的主要原因之一。

在木本植物和作物间作的共生期间, 由于树木和作物在间作中冠层高度的差异, 两者不但在营养和水分方面发生竞争, 而且争夺光合有效辐射^[5]。本试验中, 间作桑树叶绿素含量和 NRA 高于单作大豆(表 2), 改善了间作桑树的 N 素营养, 从而提高了间作桑树的光合速率。但是, 间作桑树降低了间作大豆的光能截获量, 从而降低了自然光强下大豆光合速率, 尽管在较低光强下植物光合速率因为叶绿素含量的增加和光饱和点、光补偿点降低可提高光合速率^[14]。间作大豆的地上部生物量、光合作用、N 素吸收、根瘤干重、根系干重和根长密度比单作大豆分别降低了 30.0%、13.5%、8.2%、46.0%、37.0% 和 24.0%, 相反, 间作桑树的地上部生物量、光合作用、N 素吸收、根系干重和根长密度比单作桑树分别增加了 65.9%、11.8%、17.8%、24.8% 和 139.8%。这种效应在桑树-大豆间作体系中大豆行间表现得非常明显, 即临近桑树的大豆地上部生物量、N 素吸收、根瘤干重、根系干重和根长密度均低于中间行大豆。进一步说明作物间作中的一种植物冠层截获光能的能力受到限制, 那么它在间作中的种间竞争能力必然受到限制^[15]。从根系生长状

况来看, 间作体系中大豆对 N 素的吸收、土壤有机 C 含量和土壤脱氢酶活性比单作大豆高, 这可能是间作体系中大豆具有较高的根系重量和根长密度, 同时根系干重和土壤微生物有机 C 含量、土壤脱氢酶活性以及 N 素吸收呈现明显的正相关关系 ($r = 0.87, 0.71$ 和 0.93), 可见。根系重量和根长密度的增加影响到植株对养分和水分的吸收, 也影响到土壤的生物活性。

总之, 桑树和大豆间作的共生期间的地上和地下部分的指标变化, 种间相互作用导致了桑树生长的正效应和大豆生长的负效应。这同土壤微生物的群体共生共存关系相似^[16], 即一种微生物促进另一种微生物的增长, 而另一种微生物抑制前一种微生物的生长。但是, 当两种植物生长在彼此接近时, 其生理生化特性和土壤生物指标会发生明显的改变, 不管它们之间是否具有相互促进作用, 但总会发生相互竞争作用^[17]。本试验结果表明, 在桑树-大豆间作的共生期间, 大豆生物量、N 素积累、叶绿素含量、根系生长和根瘤明显降低, 而大豆叶片、茎部和根系硝酸还原酶活性和土壤脱氢酶活性明显增强, 土壤微生物生物量 C 含量增加, 说明了桑树-大豆间作体系中的种间促进作用和种间竞争作用同时存在, 也就是说, 在同一个生态系统中, 植物之间的正效应和负效应是同时存在的。

参考文献:

- [1] Looy TV, Carrero GO, Mathijs E, Tollens E. Underutilized agroforestry food products in Amazonas (Venezuela): A market chain analysis. Agroforest Syst., 2008, 74: 127–141
- [2] Zhu YY, Chen HR, Fan JH, Wang YY, Li Y, Chen JB, Fan JX, Yang SS, Hu LP, Leung H, Mew TW, Teng PS, Wang ZH, Mundt CC. Genetic diversity and disease control in rice. Nature, 2000, 406: 718–722
- [3] Balandier P, Collet C, Miller JH, Reynolds PE, Zedaker SM.

- Designing forest vegetation management strategies based on the mechanisms and dynamics of crop tree competition by neighbouring vegetation. *Forestry*, 2006, 79: 3–27
- [4] Li L, Li SM, Sun JH, Zhou LL, Bao XG, Zhang HG, Zhang FS. Diversity enhances agricultural productivity via rhizosphere phosphorus facilitation on phosphorus-deficient soils. *PNAS*, 2007, 104: 11 192–11 196
- [5] Ghosh PK. Growth, yield, competition and economics of groundnut/cereal fodder intercropping in the semi-arid tropics of India. *Field Crops Res.*, 2004, 88: 227–237
- [6] Zuo YM, Zhang FS, Li XL, Can YP. Studies on the improvement in iron nutrition of peanut by intercropping with maize on a calcareous soil. *Plant Soil*, 2000, 220: 13–25
- [7] Ghosh PK, Manna MC, Bandyopadhyay KK, Tripathi AK, Wanjari RH, Hati KM, Misra AK, Acharya CL, Rao AS. Interspecific interaction and nutrient use in soybean/sorghum intercropping system. *Agron. J.*, 2006, 98: 1 097–1 108
- [8] Arnon DI. Copper enzymes in isolated chloroplasts: Polyphenol oxidase in *Beta vulgaris*. *Plant Physiol.*, 1949, 24: 1–15
- [9] 李合生主编. 植物生理生化实验原理和技术. 北京: 高等教育出版社, 2000: 125–127
- [10] Turner BL, Bristow AW, Haygarth PM. Rapid estimation of microbial biomass in grassland soils by ultra violet absorbance. *Soil Biol. Biochem.*, 2001, 33: 913–919
- [11] Zavala A, Ravetta AD. Allocation of photo assimilates to biomass, resin and carbohydrates in *Grindelia chiloensis* as affected by light intensity. *Field Crops Res.*, 2001, 69: 143–149
- [12] 陈龙正, 梁亮, 徐海, 宋波, 苏小俊, 袁希汉. 小白菜光合性能与硝酸还原酶活性关系的研究. *西北植物学报*, 2009, 29(11): 2256–2260
- [13] Reddy MS, Willey RW. Growth and resource use studies in an intercrop of pearl millet/groundnut. *Field Crops Res.*, 1981, 4: 13–24
- [14] 焦念元, 赵春, 宁堂原, 侯连涛, 付国占, 李增嘉, 陈明灿. 玉米-花生间作对作物产量和光合作用光响应的影响. *应用生态学报*, 2008, 19(5): 981–985
- [15] Midmore DJ. Agronomic modification of resource use and intercrop productivity. *Field Crops Res.*, 1993, 34: 357–380
- [16] Hodge S, Arthur W. Contramensal interaction between species. *Oikos*, 1996, 77: 372–375
- [17] Vandermeer J. *The Ecology of Intercropping*. New York: Cambridge University Press, 1989

Interspecific Interaction of Below-ground and Above-ground Indices in Mulberry–soybean Intercropping System

ZHENG Xiao-yuan, ZHAO Li, XU Nan, ZHANG Hui-hui, SUN Guang-yu

(College of Life Science, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China)

Abstract: A study was conducted in the field to investigate the interspecific interaction of below-ground and above-ground indices in mulberry-soybean intercropping system. The results showed that above-ground biomass, net photosynthetic rate in leaves, nitrogen content, root dry weight, root length density and nitrate reductase activity in leaves of intercropped mulberry increased 65.9%, 11.8%, 17.8%, 24.8%, 139.8% and 116.2% respectively compared to sole mulberry during the co-growth stage in mulberry/soybean intercropping system, but reduced in intercropped soybean, which indicated the interspecies competition between component crops. Soil microbial biomass C and dehydrogenase activity increased in intercropped soybean compared to sole soybean, which indicated the interspecies facilitation between component crops. It suggested that the coexistence of the interspecific competition and interspecific facilitation in mulberry/soybean intercropping system.

Key words: Mulberry (*Morus alba* L.), Soybean (*Glycine max* L.), Intercropping, Interspecific facilitation, Interspecific competition