植物营养与肥料学报 2000,6(2):140～146
Plant Nutrition and Fertilizer Science

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

李　隆[1]，李晓林[2]，张福锁[2]，孙建好[1]，杨思存[1]，芦满济[1]
(1. 甘肃省农业科学院土壤肥料研究所，甘肃兰州 730070；2. 中国农业大学植物营养系，北京 100094)

摘要：采用田间小区试验和田间微区根系分隔试验，通过间作与相应单作成熟期氮磷钾养分吸收量和利用效率(单位养分吸收量所能生产的干物质量)的比较研究了小麦大豆间作中养分吸收和利用效率的变化。结果表明，间作作物氮、磷、钾养分吸收总量分别高出相应单作 24%～39%，6%～27%和 24%～64%；而间作氮、磷和钾的利用效率分别比单作低 5%～20%、5%～7%和 6%～32%。间作优势主要表现在养分吸收量的增加。间作大豆养分收获指数的提高使间作子粒产量优势比生物学产量优势更明显。种间根系分隔微区试验表明，间作作物养分利用效率的降低与两作物根系相互作用有关。

关键词：小麦大豆间作；小麦大豆单作；养分利用效率；间作优势
中图分类号：S344.2；Q945.12　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1008-505X(2000)02-0140-07

春小麦大豆间作在产量上具有明显的优势。间作产量优势的生物学基础在于资源的有效利用[1]；在作物营养方面主要是养分吸收量的增加和养分利用效率的提高[2]。我们通过两作物间养分吸收的动态变化明确了种间养分吸收的竞争动态，侧重比较了小麦或大豆间作时与分别单作时养分吸收量的差异[3]，但对整个间作系统中养分吸收量与两种单作作物的养分吸收量的差异未作综合评价。为此，开展了对间作系统中养分捕获和利用效率与两种作物单作比较，并应用 Trenbath 提出的土地当量比(LER)与资源(捕获)吸收和利用效率的数量关系[4]，分析养分吸收和利用效率对小麦大豆间作产量优势的贡献；并根据地下部分的试验评价地上部和地下部的贡献。

1　材料与方法

本试验的供试土壤、试验设计及养分浓度测定同李隆等："小麦大豆间作条件下作物养分吸收积累动态"一文[3]。

1.1　单位面积产量的分解[5]

$$\text{产量/单位面积} = (\text{产量/养分吸收量}) \times (\text{养分吸收量/单位面积}) \quad (1)$$

式右第 2 项为养分吸收(捕获)效率，第 1 项为养分利用效率。

1.2　养分吸收量的比较

采用文献给出的公式[5]，比较间作系统养分吸收量相对于单作养分吸收量的变化。这里单作养分吸

收稿日期：1998-10-09
基金项目：国家自然科学科学基金资助项目(39670435；39790100)。
作者简介：李隆(1962—)，男，甘肃省岷县人，博士，甘肃省农科院土肥所副研究员，主要从事作物营养与施肥研究工作。

收量不是指某一种作物的,而是单作小麦和单作大豆的养分吸收量以间作比例为权重的加权平均值。以磷为例:

$$\Delta PU\% = \{[PU_{ic}/(F_w \times PU_{sw} + F_s \times PU_{ss})] - 1\} \times 100 \quad (2)$$

式中 PU_{ic}为间作中小麦和大豆的总吸磷量,PU_{sw}和 PU_{ss}分别为单作小麦和单作大豆的吸磷量,F_w 和 F_s 分别为间作中小麦和大豆的比例,用公式 $F_w = D_w/(D_w + D_s)$计算,D_w 和 D_s 分别为间作中小麦和大豆相对于单作小麦和单作大豆种植密度的比率。由于本研究中间作和单作的密度在当量面积上是相等的,因此,$F_w = 0.75$, $F_s = 0.25$,与两作物分别在间作中所占面积的比例是相等的。实际上,$(F_w \times PU_{sw} + F_s \times PU_{ss})$为单作按间作比例为权重加权平均的单作吸磷量。ΔPU 的正或负反映了间作吸磷量相对于单作的增加或减少。氮和钾的计算方法相同。

1.3　养分利用效率的比较

仍以磷为例,这里定义磷利用效率的概念为单位磷吸收量所能生产的地上部干物质量。间作磷利用效率相对于单作的增减(ΔPUE)用如下公式计算[5]:

$$\Delta PUE = \{[Y_{ic}/PU_{ic}]/[F_w \times Y_{sw}/PU_{sw} + F_s \times Y_{ss}/PU_{ss}] - 1\} \times 100\% \quad (3)$$

式中 Y 是产量,下标与式(2)中的意义相同。ΔPUE 反映了作物间作后养分利用效率的增加或减少。氮和钾用同法计算。

1.4　养分吸收和利用效率对产量优势的贡献

土地当量比(LER)经常被作为间作优势的指标:

$$LER = (Y_{iw}/Y_{sw}) + (Y_{is}/Y_{ss}) \quad (4)$$

式中 Y_{iw}和 Y_{is}分别为间作中小麦和大豆的产量;Y_{sw}和 Y_{ss}分别为单作小麦和单作大豆的产量。以磷为例,定义小麦在间作和单作中的吸收量和利用效率分别为 A_{iw}、A_{sw}和 E_{iw}、E_{sw};相应大豆分别为 A_{is}、A_{ss}和 E_{is}、E_{ss}。则式(4)变为:

$$LER = (A_{iw}/A_{sw}) \times (E_{iw}/E_{sw}) + (A_{is}/A_{ss}) \times (E_{is}/E_{ss}) \quad (5)$$

令 $a_w = (A_{iw}/A_{sw}) - 1$, $a_s = (A_{is}/A_{ss}) - 1$; $e_w = (E_{iw}/E_{sw}) - 1$, $e_s = (E_{is}/E_{ss}) - 1$,代入(5)式并整理,得:

$$LER = 1 + (1 + a_w + a_s) + (e_w + e_s) + (a_w e_w + a_s e_s) \quad (6)$$

式中$(1 + a_w + a_s)$为由于间作引起的相对于单作养分吸收量增减对间作产量优势的贡献;$(e_w + e_s)$是由间作引起的相对于单作养分利用效率的变化对间作产量优势的贡献;同理,$(a_w e_w + a_s e_s)$则是养分吸收和利用效率交互作用对间作优势的贡献[4]。

氮和钾按同法计算。

2　结果与讨论

2.1　间作养分吸收量与单作养分加权平均吸收量的比较

2.1.1　氮　间作作物吸氮量明显增加。间作系统氮(N)吸收量为 180.0～206.1kg/hm^2,而单作小麦和单作大豆按间作比例加权平均的氮(N)吸收量为 145.1～148.5kg/hm^2,间作的氮吸收量高于单作 24%～39%(表 1)。从表 1 还可以看出,施磷有利于提高间作作物吸氮量,不施磷时间作比单作吸氮量增加 24%,施磷后间作比单作增加 39%。据报道,间作中竞争土壤和肥料氮能力强的作物可以使竞争能力弱的豆科作物固定大气氮的能力得到加强[6]。我们研究[3]已经明确,小麦大豆间作中小麦的竞争氮的能力比大豆强,一方面使间作小麦能吸收到更多的氮;另一方面,使大豆根区土壤氮素水平下降,甚至造成缺氮。缺氮会有利于豆科作物固氮能力的提高[7],从而使整个系统的吸氮量明显增加。此外,有研究认为,豆科/非豆科间作中豆科作物固定的氮可以向非豆科转移,被非豆科作物所利用[7],

这也可能是间作中氮吸收增加的机制之一。

表 1 收获时间作和单作系统中养分吸收量

Table 1 Comparisons of nutrients uptake between intercropping and sole cropping systems at maturity

养分 Nutrient	处理 Treatment	间作 Intercrops (kg/hm^2)	单作加权平均 Weighted mean for sole crops (kg/hm^2)	间作养分吸收量的增减 Changes in nutrient uptakes by intercrops relative to sole crops (ΔNU, ΔPU, ΔKU) %
氮 N	P_0	180.0	145.1	24
	P_{75}	206.1	148.5	39
磷 P	P_0	27.0	22.1	27
	P_{75}	25.8	24.5	6
钾 K	P_0	260.5	209.7	24
	P_{75}	351.3	213.9	64

2.1.2 磷 间作能明显地提高作物的吸磷量。不施磷肥时,间作系统中吸磷量高于单作吸磷量达 27%;施用磷肥后,间作与单作的这种差异缩小,但间作仍高于单作 6%(表 1)。这一方面说明间作增加作物吸磷量;另一方面说明在缺磷条件下,间作比单作具有更明显的吸磷量优势。据报道,在小麦/白羽扇豆间作[8]和高粱/木豆间作中[9],白羽扇豆和木豆分别促进了与之相间作的小麦和高粱的吸磷量。其机制为磷胁迫条件下,白羽扇豆和木豆根系可分泌有机酸释放到土壤中,使土壤难溶性磷转化为作物可利用态磷。至于小麦大豆间作中观察到的这种磷吸收促进作用的机制,在盆栽试验中也观察到消除种间竞争作用后,小麦对大豆吸收磷的促进作用。此外,田间尼龙网分隔试验也观察到了小麦对磷的吸收从大豆根际效应得到了好处[3]。

2.1.3 钾 间作同样使吸钾量明显地提高。间作可使吸钾量提高 24%～64%。趋势与氮、磷相同。增施磷肥后这种差异更为明显(表 1)。

2.2 间作与单作养分利用效率的比较

2.2.1 生物学产量 表 2 中间作的养分利用效率(指单位养分吸收量所能生产的生物学产量或经济学产量)是间作作物地上部生物学产量之和除以间作作物地上部某养分的总吸收量;单作加权平均是单作按间作比例为权重加权平均的养分吸收效率。除处理 P_{75} 间作磷利用效率高于单作 5%外,其余均表现为间作利用效率低于单作,可见,从生物学产量的角度衡量养分利用效率,间作略低于单作或明显低于单作。值得注意的是,增施磷肥虽然大幅度提高了间作的氮钾吸收效率(表 1),但作物氮、钾的利用效率却明显下降(表 2)。增施磷肥未降低间作作物磷的利用效率,相反,还提高了 5%。

2.2.2 子粒产量 与生物学产量养分利用效率不同,间作作物子粒养分利用效率有增有减。不施磷肥,间作作物的氮、磷和钾利用效率比单作作物分别高 5%、3%和 5%。增施磷肥后,间作作物氮和钾利用效率均低于单作作物,分别降低 8%和 22%,磷的利用效率间作作物仍然高于单作作物。

2.2.3 养分收获指数 养分收获指数是指子粒中养分的累积量占地上部养分总累积量的比例,其比例的大小反映了作物生长后期养分由茎叶向子粒转移的强度。与单作相比,间作

表 2　收获时间作和单作系统中生物学产量的养分利用效率

Table 2　Comparisons of nutrients efficiency for dry matter between intercropping and sole cropping systems at maturity

养　分 Nutrient	处　理 Treatment	间　作 Intercrops (kg/kg)	单作加权平均 Weighted mean for sole crops (kg/kg)	间作养分利用效率的增减% Changes in nutrient use efficiency by intercrops relative to sole crops (ΔNUE, ΔPUE, ΔKUE)%
氮　N	P_0	82.2	87.7	−5
	P_{75}	74.4	93.3	−20
磷　P	P_0	537.7	580.3	−7
	P_{75}	593.3	565.8	5
钾　K	P_0	55.8	59.9	−6
	P_{75}	43.9	64.7	−32

小麦的氮收获指数有所下降,而间作大豆的氮收获指数却是增加的。所以,以生物学产量为基础的氮利用效率,间作低于单作,而以子粒产量为基础的氮利用效率则有所不同;间作小麦和间作大豆的磷收获指数保持不降低,甚至是增加的(表 4),这可以解释表 2 和表 3 中磷利用效率的差异。钾的收获指数则是间作小麦低于单作小麦,而间作大豆高于单作大豆。

表 3　收获时间作和单作系统中子粒产量的养分利用效率

Table 3　Comparisons of nutrients efficiency for grain yield between intercropping and sole cropping systems at maturity

养　分 Nutrient	处　理 Treatment	间　作 Intercrops (kg/kg)	单作加权平均 Weighted mean for sole crops (kg/kg)	间作养分利用效率的增减% Changes in nutrient use efficiency by intercrops relative to sole crops (ΔNUE, ΔPUE, ΔKUE)%
氮　N	P_0	34.1	32.9	5
	P_{75}	32.3	35.1	−8
磷　P	P_0	221.0	215.0	3
	P_{75}	257.2	212.3	21
钾　K	P_0	23.0	22.4	5
	P_{75}	19.2	24.3	−22

2.3　养分吸收和利用效率对间作优势的贡献

间作优势的主要原因是养分吸收量的增加,而并非是利用效率的提高。土地当量比(LER)反映了间作产量优势的大小,当 LER＜1 时,无间作优势;当 LER＞1 时,有间作优势;从式(6)可以看出,LER 的大小,取决于养分吸收量项($1 + a_w + a_s$)、养分利用效率项($e_w + e_s$)和交互项($a_we_w + a_se_s$)的大小。氮吸收因子的贡献是正的,为 0.25～0.47,氮利用效率的贡献是负的,为 −0.24～−0.25。这意味着氮素利用效率不仅没有提高,相反利用效率下降了;交互作用的贡献时正时负;施磷有利于氮吸收对间作优势的贡献。在磷方面,吸收因子的贡献是正的,为 0.09～0.27;利用效率的贡献是负的,为 −0.11～−0.30;吸收和利用

表 4 间作与单作条件下作物的养分收获指数

Table 4 Harvest index of wheat and soybean in the intercropping and sole cropping

养分 Nutrient	处理 Treatment	小麦 Wheat		大豆 Soybean	
		间作 Intercropped	单作 Sole	间作 Intercropped	单作 Sole
氮 N	P_0	0.75	0.79	0.51	0.48
	P_{75}	0.66	0.81	0.62	0.47
磷 P	P_0	0.83	0.79	0.63	0.63
	P_{75}	0.79	0.79	0.63	0.56
钾 K	P_0	0.11	0.12	0.26	0.17
	P_{75}	0.08	0.13	0.21	0.17

效率交互作用的贡献也是正的。还可以看出,施磷使吸磷量对间作优势的贡献有所降低,不施磷时贡献为0.27,施磷后为0.09,说明在缺磷条件下,间作能够增加作物对磷的吸收,从而使间作优势明显。然而,改善磷营养后,土壤中磷含量高了,反而降低了植物对磷的吸收和利用。钾吸收对间作优势的贡献是正的,利用效率的贡献时正时负,交互作用的贡献也时正时负(表5)。

从表5还可看出,增施磷肥,提高了作物氮和钾的吸收效率对间作优势的贡献,说明氮和磷、磷和钾之间的正的交互作用。

表 5 养分吸收和利用效率对间作优势的贡献

Table 5 Contribution of uptake, utilization and interaction factors to the land equivalent ratio (LER)

养分 Nutrient	处理 Treatment	土地当量比 LER	吸收因子 Uptake factor $1+a_w+a_s$	利用因子 Utilization factor e_w+e_s	交互因子 Interaction factor $a_we_w+a_se_s$
氮 N	P_0	1.14	0.25	−0.24	0.13
	P_{75}	1.09	0.47	−0.25	−0.13
磷 P	P_0	1.14	0.27	−0.30	0.18
	P_{75}	1.09	0.09	−0.11	0.11
钾 K	P_0	1.14	0.24	0.07	−0.17
	P_{75}	1.09	0.66	−0.63	0.06

2.4 间作条件下根系对作物养分利用效率的影响

间作使小麦和大豆的氮利用效率均有所降低,小麦降低7.2%,大豆降低4.6%;小麦的磷利用效率提高3.6%,而大豆的磷利用效率降低19.4%。钾的利用效率与氮呈现类似的特点(表6)。表明间作中作物养分转化利用效率不仅仅是受地上部的相互影响,地下部根系相互作用也是很重要的方面。间作中养分利用效率对间作产量优势的负作用的原因可能也在于此。

从表6还可以看出,小麦的氮磷利用效率均高于大豆;钾的利用效率是小麦低于大豆。

表6　地下部分隔对间作养分利用效率的影响

Table 6　Effects of interspecific root partitions on nutrient efficiencies in intercrops

分隔 Partition	氮 Nitrogen		磷 Phosphorus		钾 Potassium	
	小麦 Wheat	大豆 Soybean	小麦 Wheat	大豆 Soybean	小麦 Wheat	大豆 Soybean
塑料膜 Plastic sheet	86.91	40.87	618.49	467.43	59.80	70.35
尼龙网 Nylon net	86.86	40.82	615.88	496.87	70.43	64.45
无分隔 No partition	80.66	39.00	640.86	376.80	55.66	63.76

3　小结

1) 与单作相比,间作明显地提高了作物对氮磷钾养分的吸收量,但降低了氮磷钾养分的利用效率;两者相抵,其净结果表现为间作产量优势。

2) 间作产量优势在营养方面的基础主要是由于养分吸收量的增加,即吸收量的贡献大于养分利用效率的贡献;交互作用的贡献有正有负。

3) 地下部种间根系的相互作用对间作养分利用效率的下降有重要影响。

4) 增施磷肥有利于提高氮和钾的吸收及其对间作优势的贡献。

参考文献

[1] Willey R W. Intercropping—its importance and research needs. Part 1. Competition and yield advantages[J]. Field Crop Abstr., 1979, 32:1～10.

[2] Chowdhury M K and Rosario E L. Comparison of nitrogen, phosphorus and potassium utilization efficiency in maize/mungbean intercropping[J]. J. Agri. Sci. Camb., 1994, 122:193～199.

[3] 李隆,杨思存,李晓林,张福锁. 小麦大豆间作条件下作物养分吸收积累动态[J]. 植物营养与肥料学报, 1999, 5(2):163～171.

[4] Trenbath B R. Resource use by intercrops[A]. *In*: Francis CA (ed). Multiple cropping systems[M]. Macmillan, New York, 1986.

[5] Morris R A and Garrity D P. Resource capture and utilization in intrcropping: non－nitrogen nutrients[J] Field Crops Research, 1993, 34:319～334.

[6] Rerkasem B, Rerkasem K, Peoples M B, Herridge D F and Bergerson F J. Measurement of N_2 fixation in maize (*zea may* L.)-ricebean (*Vigna umbellata* [Thumb.] Ohwi and Ohasi) intercrops[J]. Plant and Soil, 1988, 108:125～135.

[7] Stern W R. Nitrogen fixation and transfer in intercrop systems[J]. Field Crops Research, 1993, 34:335～356.

[8] Gardner W K and Boundy K A. The acquisition of phosphorus by *Lupinus albus* L. IV. The effect of interplanting wheat and white lupin on the growth and mineral composition of the two species[J]. Plant and Soil, 1983, 70:391～402.

[9] Ae N, Arihara J, Okada K, Yoshhara T and Johansen C. Phosphorus uptake by pigeon pea and its role in cropping systems of the Indian subcontinent[J]. Science, 1990, 248:477～480.

Uptake and utilization of nitrogen, phosphorus and potassium as related to yield advantage in wheat/soybean intercropping

LI Long[1], LI Xiao-lin[2], ZHANG Fu-suo[2], SUN Jian-hao[1], YANG Si-cun[1], LU Man-ji[1]
(1. *Institute of Soil and Fertilizer, Gansu AAS, Lanzhou* 730070; 2. *Dept. of Plant Nutrition CAU, Beijing* 100094)

Abstract: Nitrogen, phosphorus and potassium absorption efficiency and utilization efficiency in the intercropping or sole cropping of wheat and soybean were investigated by field plot and microplot experiments. The results showed that nitrogen, phosphorus and potassium uptakes by intercropped species were higher than the weighted means of uptakes by sole cropping species; Increases in N, P and K uptake by intercropped species over sole cropping species were 24% ~ 29%, 6% ~ 27% and 24% ~ 26%, respectively. However, nitrogen, phosphorus and potassium utilization efficiency (kg biomass per kg nutrient uptake) were reduced due to intercropping. The reductions in the N, P and K utilization efficiency of intercropping ranged from 5% to 20%, from 5% to 7% and from 6% to 32%, respectively. Land equivalent ratio(LER) analysis in term of N, P and K utilization efficiency showed that the increase in LER over unity was due largely to a higher total uptake of nutrients by the component crops in the intercropping than by the sole crops. The greater nutrient harvest index of intercropped soybean than that of sole soybean also contributed to the yield advantage. Interspecific root partition experiment demonstrated that interspecific root intermingle also affected nutrient utilization efficiency in intercropping.

Key word: wheat/soybean intercropping; nitrogen; phosphorus; potassium; utilization efficiency; intercropping advantage