

不同供水水平对玉米/豌豆间作系统 作物耗水特征的影响

牛伊宁¹, 刘冬梅², 罗珠珠¹, 柴 强^{1,2}

(1. 甘肃省干旱生境作物学重点实验室, 甘肃 兰州 730070; 2. 甘肃农业大学农学院, 甘肃 兰州 730070)

摘 要: 为探明根系分隔对间作群体产量、耗水量和水分利用效率的影响, 解析间作群体高产和提高水分利用效率的机理, 以玉米、豌豆为材料, 设置了单作豌豆、单作玉米、玉米间作豌豆三种种植模式和地方传统供水水平(高)、生育期灌水低于地方传统供水水平 10%(中)、生育期灌水水平低于地方传统供水水平 20%(低)三个灌水梯度, 并将玉米间作豌豆隔根方式分为塑料布分隔、尼龙网分隔和不分隔三种方式, 于 2011 年 4—10 月在甘肃省武威市绿洲农业区系统研究了不同供水条件和根系分隔模式下玉米间作豌豆的耗水特征。结果表明: 间作可以提高土地利用效率 13.01%~42.13%, 较单作平均提高作物水分利用效率 3.07%~43.38%; 不同间作处理的经济产量和生物产量比单作高 12.90%~30.45%; 不隔根间作作物产量比塑料布隔根处理高 13.79%~17.17%, 较尼龙网隔根处理高 1.12%~3.52%。未隔根间作处理时, 地方习惯灌水处理与低于 10% 灌水水平处理耗水量差异不显著, 但显著低于降低 20% 灌水的处理。与单作相比, 玉米/豌豆间作具有提高土地利用效率和作物产量的作用。隔根影响间作土地利用效率和产量的提高, 且当地的传统灌水习惯也有待改进。

关键词: 玉米/豌豆间作; 供水水平; 隔根; 土地当量比; 水分利用率; 收获指数

中图分类号: S275; S344.2 **文献标志码:** A

Characteristics of crop water consumption under maize/pea intercropping systems with different irrigation levels

NIU Yi-ning¹, LIU Dong-mei², LUO Zhu-zhu¹, CHAI Qiang^{1,2}

(1. Gansu Key Laboratory of Aridland Crop Science, Lanzhou 730070, China;

2. College of Agronomy, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: A field experiment was conducted to investigate the effect of root splitting on water use characteristics in maize/pea intercropping system. The crop grain yield and water use efficiency (WUE) were also determined. Maize (*Zea mays*) and pea (*Pisum sativum*) monoculture and their intercropping, with three irrigation strategies and three root separation methods as the main treatments were evaluated at oasis agriculture area in Wuwei city, Gansu Province from April to October, 2011. Plastic film separation, nylon mesh separation and non-separation as three root separation methods in maize/pea intercropping treatment, while the amount of water irrigation with local traditional apply (high level), less than traditional irrigation by 10% (medium level) and less than traditional irrigation by 20% (low level) as three irrigation strategies was used at crop growing period. Results showed that maize/pea intercropping increased the land equivalent ratios (LER) and crop WUE by 13.01%~42.13% and 3.07%~43.38% compared with monoculture, respectively. Crop grain yield and aboveground biomass of different maize/pea intercropping treatments were increased by 12.90%~30.45% compared to monoculture. Grain yield of root without separation treatments were 13.79%~17.17% higher than the root separated with plastic film, and 1.12%~3.52% higher than root separated by nylon treatment. The amount of water consumes was not significantly different between the medium irrigation treatment (10% lower than traditional irrigation) and local traditional irrigation, but it was significantly decreased than the lower irrigation (20% lower than traditional irrigation) treatment. In conclusion, compared to monoculture cropping, maize/pea intercropping system was beneficial to increase the LER and improve crop yield. Root splitting had no benefit on crop yield

improvement and on LER increasing in intercropping system.

Keywords: maize/pea intercropping; irrigation levels; root splitting; land equivalent ratios; water use efficiency; harvest index

自然条件下,作物群体的耗水量不仅受各种气象要素的影响,还受土壤水分、物理特性和作物因素的制约。间作套种消耗的水分绝对量因作物类型和环境条件差异很大,但与相应单作的加权平均比较,水分消耗量变化一般在 6%~7% 之间^[1]。因此,在水资源有限,但热量资源允许发展多熟种植的生态区域内,发展以间作为主体的多熟种植可作为提高有限水资源利用效率的途径之一。研究表明^[2],间套复合群体总耗水量与单作耗水量的加权平均差异极小,但水分利用效率间作比相应作物单作的加权平均值高 4%~99%,绝大多数高于 18%。间作作物生长期间根系在时间和空间上的错位分布是复合群体高产、高效的主要原因之一^[3-5],间套作有利于创造适宜作物生长发育的土壤水分环境,水分利用效率明显高于单作,但水分消耗量并没有改变^[6-7]。根系分隔技术将间作群体根系进行分离,控制了两种作物之间的水分和养分流动,通过对根系的调控来研究农田耗水特性,有利于解析间作群体高产和提高水分利用效率的机理。

甘肃河西走廊地区光热资源丰富,适宜发展间套作种植。但因为当地降雨少,水资源不足,限制了当地农业的发展。如何充分利用当地充足的光热条件和有限的水资源,提高间作群体的水分利用效率,发展和完善间作群体的节水管理理论和技术,已成为该区多熟种植农业发展亟待解决的难题。为此,本研究以近年来规模化应用的玉米间作豌豆为研究对象,探讨了不同供水水平下根系分隔对间作群体的产量、耗水量和水分利用效率的影响,以期为构建禾豆间作高效节水技术提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验设置在甘肃省武威市甘肃农业大学与武威市农技中心校地联合绿洲农业科研教学基地(103°5'E,37°30'N),属冷温带干旱区,是典型的大陆性气候,日照充足,干旱少雨,春季多风沙,夏季有干热风。平均海拔 1 776 m,年平均降水量 156 mm 左右,降水年际变化小,但季节变化较大,主要集中在 7—9 月份,冬春季较干旱。农业土壤为厚层灌漠土。

1.2 试验设计

1.2.1 供试作物 供试春豌豆(*Pisum sativum*)为 MZ-1,春玉米(*Zea mays*)为武科 2 号。豌豆 2011

年 3 月 24 日播种,4 月 7 日出苗,6 月 30 日收获;玉米 2011 年 4 月 20 日播种,5 月 3 日出苗,9 月 26 日收获,两种作物共生期 78 d。单作豌豆及间作豌豆带施 225 kg·hm⁻²(尿素),150 kg·hm⁻²做基肥;单作玉米和间作玉米带施 360 kg·hm⁻²,按照基肥:大喇叭期追肥:灌浆期追肥=3:6:1 分施,施 225 kg·hm⁻²P₂O₅ 做基肥。

1.2.2 试验设计 试验设种植模式、灌水水平和隔根三个参试因子(表 1)。其中种植模式设单作豌豆、单作玉米、玉米间作豌豆三种形式;灌水水平设高(地方传统供水水平)、中(生育期灌水约低于地方传统供水水平 10%)、低(生育期灌水水平约低于地方传统供水水平 20%)三个梯度;玉米间作豌豆隔根方式分塑料布分隔、尼龙网分隔和不分隔三种方式,共 15 个处理,各处理 3 次重复,田间随机排列。

表 1 试验处理
Table 1 Treatments description

单作 豌豆 Pure pea	单作 玉米 Pure maize	玉米间 作豌豆 Maize/pea intercropping	尼龙网隔 根玉米间 作豌豆 Separate roots with nylon net	塑料布隔 根玉米间 作豌豆 Separate roots with plastic film
PI ₁	CI ₁	C/PI ₁	NC/PI ₁	PC/PI ₁
PI ₂	CI ₂	C/PI ₂	NC/PI ₂	PC/PI ₂
PI ₃	CI ₃	C/PI ₃	NC/PI ₃	PC/PI ₃

注:P-豌豆;C-玉米;C/P-玉米间作豌豆;I-灌溉水平(1,地方传统灌水量;2,低于地方传统灌水量 10%;3,低于地方传统灌水量 20%);N-尼龙网隔根;S-塑料布隔根。

Note: P-pea; C-maize; C/P-maize/pea intercropping; I-irrigation level (1: local traditional irrigation level; 2: 10% lower than traditional irrigation level; 3: 20% lower than traditional irrigation level); N-separate roots with nylon net; S-separate roots with plastic film.

小区面积 24 m²(6 m×4 m),每小区种两个自然带。单作豌豆(P):平作,播种量 150 kg·hm⁻²,每自然带种 4 行,行距 20 cm;单作玉米(C):平作,播种密度 8.25 万株·hm⁻²,每带种 2 行,行距 40 cm,地膜覆盖;玉米间作豌豆(C/P):田间结构如图 1 所示,豌豆带宽 80 cm,每带种 4 行,行距 15 cm,播种量 75 kg·hm⁻²;玉米带宽 80 cm,播种密度 5.25 万株·hm⁻²,每带种 2 行,行距 40 cm、株距 32 cm,地膜覆盖;塑料膜隔根玉米间作豌豆(PC/P):玉米豌豆共处区内,在距离豌豆 10 cm、玉米 20 cm 处用塑料薄膜隔根(图 1),隔根深度 1 m,其它田间结构同 P/C。

塑料薄膜为厚 0.12 mm 的农用棚膜;尼龙网隔根玉米间作豌豆(NC/P):隔根材料为 300 目的尼龙网,其余设计同 PC/P。

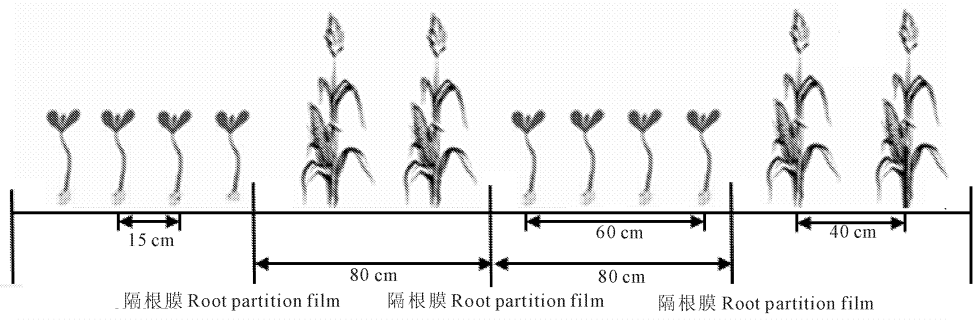


图 1 玉米间作豌豆的田间结构及隔根示意图
Fig.1 Distribution of intercropping crops and partition root film in maize/pea intercropping system

1.3 测定项目与方法

- 1.3.1 土壤水分 作物播种前和收获后,分别采用烘干法测定 0~120 cm 土壤含水量。
- 1.3.2 作物产量 作物收获时,采用小区收获法,测定其经济产量和生物产量。
- 1.3.3 土地当量比 土地当量比(LER, land equivalent ratio):LER 是量化分析间套作复合群体生产力及土地利用状况的指标^[8]。土地当量比利用下式计算:

$$LER = (Y_{ip}/Y_{sp}) + (Y_{im}/Y_{sm}) \tag{1}$$

式中, Y_{ip} 和 Y_{sp} 分别表示豌豆在间作和单作时的生物学产量或籽粒产量($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$); Y_{im} 和 Y_{sm} 分别表示玉米在间作和单作时的籽粒产量($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)。当 $LER > 1.0$ 时,表示作物有间作优势,当 $LER < 1.0$ 时为间作劣势。

- 1.3.4 水分利用效率 水分利用效率(WUE):作物的水分利用效率通常按照下式计算:

$$WUE = Y/ET \tag{2}$$

$$ET = P + I + \triangle W - R - DP \tag{3}$$

其中, Y 为作物籽粒产量($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$); ET 为全生育期土壤水分蒸散量(mm); P 为作物生长期降水量(mm); I 为作物生长期灌溉量(mm); $\triangle W$ 表示作物生长期土壤储存水的变化量(mm); R 为地表径流量, DP 为土壤水分净通量(向上为负,向下为正)^[9]。本研究中,由于试区地下水位较深,不存在向上的水分通量,在节水灌溉条件下,水分渗漏量和径流量也可以忽略不计,因此,作物水分利用效率按下式计算:

$$WUE = Y/(P + I + \triangle W) \tag{4}$$

WUE 反映作物生长过程中水分转化效率,也是评价缺水条件下作物生长适宜程度的指标^[10]。

1.4 数据处理

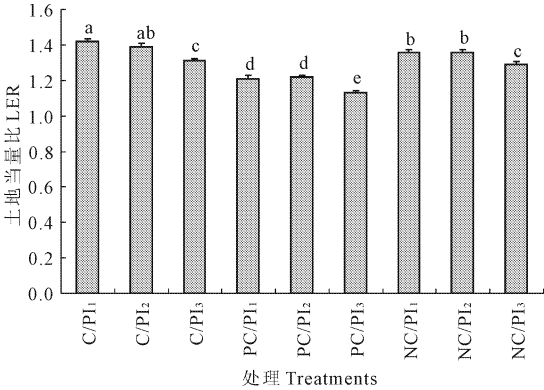
数据用 EXCEL 进行整理汇总;用 SPSS13 统计

软件进行方差分析和 LSD 多重比较。

2 结果与分析

2.1 间作土地当量比对隔根和灌水的响应

不同灌水水平和隔根处理下间作土地当量比(LER)均大于 1(图 2),可以使土地利用效率提高 13.01%~42.13%。隔根影响间作玉米与豌豆形成的补偿效应,影响土地利用率的提高,在 I_1 灌水水平下,不隔根的土地利用率分别比塑料隔根和尼龙网隔根处理提高了 14.79%和 4.23%,尼龙网隔根比塑料隔根提高了 11.03%。在 I_2 灌水水平下,不隔根分别比塑料隔根和尼龙网隔根土地利用率提高 12.23%、2.16%,不隔根和尼龙网隔根之间没有显著差异,但均与塑料布隔根差异显著;在 I_3 灌水水平下,不隔根比塑料隔根和尼龙网隔根的土地利用率分别提高 13.74%、1.53%,塑料隔根比尼龙网隔根降低 12.40%。



注:不同字母表示在 $P < 0.05$ 水平下差异显著。
Note: different letters indicated significance at $P < 0.05$ level.

图 2 不同隔根及灌水量处理玉米间作豌豆的土地当量比
Fig.2 LER of different treatments under maize/pea intercropping systems

不隔根玉米间作豌豆时, I₃ 灌水水平 LER 比 I₁ 和 I₂ 灌水水平分别降低 7.75% 和 5.76%, 且差异显著; 塑料布隔根时, I₃ 灌水水平比 I₁ 和 I₂ 灌水水平分别低 7.08% 和 7.37%。尼龙网隔根下, I₃ 灌水水平比 I₁ 和 I₂ 灌水水平分别降低了 4.41%, 且差异显著。但是, 无论隔根与否, I₁ 和 I₂ 灌水水平下 LER 均无显著差异。

2.2 不同种植模式下作物产量对隔根和灌水的响应

间作具有显著提高玉米、豌豆经济和生物产量的优势(表 2)。间作经济产量和生物产量比两种单作的产量平均提高 21.27% 和 23.75%。在 I₁ 灌水

水平下, 不隔根、塑料布隔根、尼龙网隔根玉米间作豌豆的经济产量和生物产量分别比单作提高 30.49%、18.76%、27.96% 和 28.34%、19.16%、25.26%。在 I₂ 灌水水平下, 不隔根、塑料布隔根、尼龙网隔根玉米间作豌豆的经济产量和生物产量比单作分别提高 29.65%、18.75%、28.05% 和 27.17%、21.18%、24.59%, 间作优势显著。在 I₃ 灌水水平下, 不隔根、塑料布隔根、尼龙网隔根玉米间作豌豆的经济产量和生物产量分别比单作提高 27.62%、16.05%、26.80% 和 26.92%、23.94%、25.22%, 间作优势显著。

表 2 不同处理下的作物经济产量、生物产量及收获指数

Table 2 Grain yield, aboveground biomass and harvest index under different treatments

处理 Treatments	产量 Grain yield/(kg·hm ⁻²)		地上生物量 Aboveground biomass/(kg·hm ⁻²)		收获指数 Harvest index	
	豌豆 Pea	玉米 Maize	豌豆 Pea	玉米 Maize	豌豆 Pea	玉米 Maize
PI ₁	5411 ± 40.3a		12678 ± 61a		0.43 ± 0.006ab	
PI ₂	5356 ± 35.2a		12489 ± 47a		0.43 ± 0.009ab	
PI ₃	5302 ± 44.7a		12276 ± 83b		0.43 ± 0.012ab	
CI ₁		8046 ± 50.3a		19875 ± 70a		0.40 ± 0.005a
CI ₂		7993 ± 85.2a		19632 ± 170a		0.40 ± 0.007a
CI ₃		7621 ± 64.7b		19257 ± 230b		0.40 ± 0.012a
C/PI ₁	3538 ± 20.3b	6142 ± 75.2c	8009 ± 39.8c	14704 ± 196b	0.44 ± 0.006a	0.43 ± 0.005a
C/PI ₂	3462 ± 23.6b	6026 ± 68.2cd	7893 ± 52.8cd	14160 ± 87bc	0.44 ± 0.006a	0.43 ± 0.008a
C/PI ₃	3249 ± 21.5d	5684 ± 20.3e	7670 ± 37.7de	13629 ± 121cd	0.42 ± 0.009ab	0.42 ± 0.006a
PC/PI ₁	3083 ± 51.1ef	5199 ± 105f	7206 ± 10.9fg	13674 ± 652cde	0.42 ± 0.004ab	0.42 ± 0.005a
PC/PI ₂	3038 ± 12.6f	5177 ± 85.1f	7350 ± 41.5fg	13027 ± 282de	0.42 ± 0.012ab	0.40 ± 0.009a
PC/PI ₃	2827 ± 45.2g	4874 ± 87.4g	7056 ± 32.3g	12929 ± 200e	0.40 ± 0.015b	0.36 ± 0.017b
NC/PI ₁	3368 ± 15.6e	5973 ± 76.8d	7724 ± 44.1cd	14006 ± 185bc	0.44 ± 0.008a	0.43 ± 0.015a
NC/PI ₂	3337 ± 49.5cd	5941 ± 110.1d	7773 ± 63.7cde	13851 ± 301cde	0.42 ± 0.006ab	0.42 ± 0.003a
NC/PI ₃	3156 ± 19.3e	5677 ± 47.6e	7446 ± 60.2ef	13638 ± 134cde	0.42 ± 0.010ab	0.42 ± 0.008a

注: 同列中不同字母表示在 $P < 0.05$ 水平差异显著, 下同。
Note: different letters in the same column indicated significance at $P < 0.05$ levels; the same below.

不同灌水水平下玉米、豌豆、玉米间作豌豆的产量也有一定差异。其中单作豌豆在不同灌水水平下经济产量差异不显著, 但生物产量差异显著(表 2); 单作玉米则表现为不同灌水水平下经济产量差异显著, 但生物产量无显著差异。在无隔根玉米间作豌豆下, I₁ 灌水水平下经济产量和生物产量比 I₂ 和 I₃ 灌水水平分别提高 1.98%、7.72% 和 2.91%、5.02%, I₂ 灌水水平下经济产量和生物产量比 I₃ 灌水水平提高 5.85%、2.17%, 且差异显著; 在塑料隔根玉米间作豌豆下, I₁ 灌水水平下经济产量比 I₂ 和 I₃ 灌水水平提高 0.81%、7.01%, I₂ 灌水水平经济产量比 I₃ 灌水水平提高 6.26%, 且差异显著; 在尼龙网隔根玉米间作豌豆下, I₁ 灌水水平下经济产量比

I₂ 和 I₃ 灌水水平分别提高 0.67% 和 5.43%, I₂ 经济产量比 I₃ 提高 4.79%。可见, 低于地方 10% 的灌水水平下作物产量和当地灌水水平无显著差异, 而低于 20% 的灌水水平下作物产量显著低于当地灌水水平。

2.3 不同种植模式下作物耗水对隔根和灌水的响应

表 3 列出了单作和间作群体所有处理在整个生育期内的降水量、灌水量及耗水量。在 I₁ 灌水水平下, 单作豌豆的耗水量比不隔根、塑料布隔根、尼龙网隔根的耗水量减少 22.87%、22.81%、22.54%, 耗水量差异显著; 单作玉米的耗水量比不隔根、塑料布隔根、尼龙网隔根的耗水量分别增加了 19.12%、

19.18%、19.46%，且差异显著；不隔根、塑料布隔根、尼龙网隔根的耗水量比单作的平均耗水量低 0.38%、0.46%、0.80%，三个间作之间耗水量差异不显著。在 I₂ 灌水水平下，单作豌豆的耗水量比不隔根、塑料布隔根、尼龙网隔根的耗水量分别减少 31.19%、32.07%、31.57%，且差异显著；单作玉米的耗水量比不隔根、塑料布隔根、尼龙网隔根的耗水量增加了 20.21%、19.18%、19.77%，耗水量差异显著。在 I₃ 灌水水平下，单作豌豆的耗水量比不隔根、塑料布隔根、尼龙网隔根的耗水量分别减少 28.85%、30.37%、32.16%，耗水量差异显著；单作玉米的耗水量比不隔根、塑料布隔根、尼龙网隔根的耗水量分别增加了 10.11%、8.15%、5.72%，且差异显著；不隔根、塑料布隔根、尼龙网隔根的耗水量比单作的平均耗水量降低 0.38% ~ 10.75%。

表 3 不同处理下的土壤贮水量和作物耗水量的变化

Table 3 Soil water storage before crop sowing (SWs), after harvesting (SWh), and crop water consumption under different treatments					
处理 Treatments	播前土壤 贮水量 SWs /mm	降雨量 Rainfall /mm	灌水量 Irrigation /mm	收获后土 壤贮水量 SWh /mm	作物 耗水量 Water consume /mm
PI ₁	347	46	240	207 ± 4.85h	425 ± 4.79f
PI ₂	347	46	210	225 ± 4.22g	377 ± 4.23g
PI ₃	347	46	180	201 ± 0.29h	371 ± 0.24g
CI ₁	322	82	550	275 ± 7.28f	689 ± 7.24a
CI ₂	322	82	495	223 ± 9.80g	686 ± 9.76a
CI ₃	322	82	440	265 ± 5.39f	589 ± 5.49b
C/PI ₁	335	87	550	396 ± 3.13a	576 ± 3.02bc
C/PI ₂	335	87	495	350 ± 4.17b	567 ± 4.04c
C/PI ₃	335	87	440	320 ± 0.64de	542 ± 0.72de
PC/PI ₁	335	87	550	396 ± 5.28a	576 ± 5.13bc
PC/PI ₂	335	87	495	344 ± 2.00bc	573 ± 2.15c
PC/PI ₃	335	87	440	310 ± 0.90e	552 ± 0.93d
NC/PI ₁	335	87	550	398 ± 5.10a	574 ± 5.13c
NC/PI ₂	335	87	495	347 ± 3.17bc	569 ± 3.05c
NC/PI ₃	335	87	440	333 ± 5.47cd	529 ± 5.30e

隔根对间作复合群体耗水量的影响不明显，在 I₁ 和 I₂ 灌水水平和不同隔根处理下，玉米间作豌豆复合群体的耗水量无明显变化，表明在 I₁ 和 I₂ 灌水水平下作物耗水量无显著差异。在 I₃ 灌水水平下，不同的隔根处理间耗水量差异不显著，但 I₃ 灌水水平下耗水量显著低于 I₁ 和 I₂ 灌水水平。

在不同灌溉水平下作物的耗水量差异不同。单作豌豆耗水量表现为 I₁ > I₂ > I₃，I₁ 灌水水平作物耗

水量显著高于 I₂ 和 I₃ 灌水水平，I₂ 和 I₃ 灌水水平下作物耗水量差异不显著；单作玉米耗水量大小同单作豌豆，但 I₁ 和 I₂ 灌水水平耗水量均显著高于 I₃ 灌水水平；在不隔根间作模式下，I₁ 和 I₂ 灌水水平作物耗水量差异不显著，但显著高于 I₃；塑料布隔根间作和尼龙网隔根间作模式下作物耗水量均表现为差异显著。由此可知，为了提高作物的水分利用率，节省农业用水量，在当地的灌水水平上减少 10% 的灌水量是可行的。

2.4 不同种植模式下作物水分利用效率对隔根和灌水的响应

图 3 表示单作和间作群体处理的水分利用效率。在 I₁ 灌水水平下，间作的水分利用效率显著高于单作，间作不隔根、塑料布隔根、尼龙网隔根的水分利用效率分别比单作豌豆提高了 27.69%、15.17%、25.00%，比单作玉米提高了 32.82%、21.56%、30.32%，差异显著；在 I₂ 灌水水平下，间作不隔根、塑料布隔根、尼龙网隔根的水分利用效率分别比单作豌豆提高了 18.04%、4.79%、15.43%，比单作玉米提高了 32.47%、21.56%、30.32%；在 I₃ 灌水水平下，间作不隔根、塑料布隔根、尼龙网隔根的水分利用效率分别比单作豌豆提高了 12.50%、-2.98%、7.69%，比单作玉米提高了 22.91%、9.20%、18.68%。三个间作处理的水分利用效率分别比单作水分利用效率平均值提高 3.07% ~ 43.38%，在间作和单作水分消耗相似的情况下，间作水分利用效率明显高于单作。

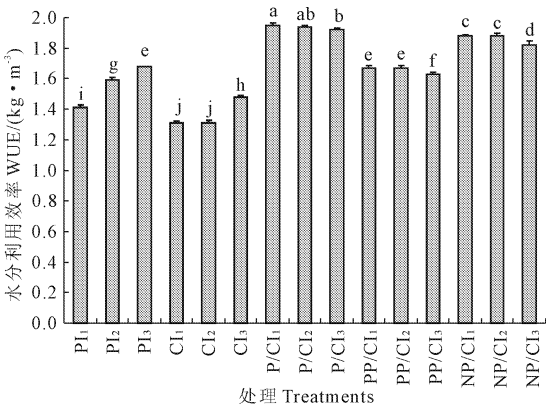


图 3 不同处理下玉米间作豌豆的水分利用效率

Fig.3 WUE of different treatments under maize/pea intercropping system

隔根对间作复合群体的水分利用率影响显著。在 I₁ 灌水水平下，三个玉米豌豆间作处理，耗水量差异不显著，但是无隔根的水分利用效率分别较塑料隔根、尼龙网隔根高 14.36% 和 3.59%，尼龙网隔

根比塑料布隔根的水分利用率提高 11.7%; 在 I_2 灌水水平下, 无隔根的水分利用效率分别较塑料隔根、尼龙网隔根高 13.92% 和 3.09%, 尼龙网隔根比塑料布隔根的水分利用率提高 11.7%, 差异显著; 在 I_3 灌水水平下, 无隔根的水分利用效率分别较塑料隔根、尼龙网隔根提高 15.10% 和 5.21%, 尼龙网隔根比塑料布隔根的水分利用率提高 10.44%。

单作豌豆时, I_3 处理水分利用效率分别比 I_1 和 I_2 处理高 16.07% 和 5.36%, I_2 低于当地 10% 灌水量的水分利用效率比 I_1 传统灌水处理的高 11.33%, 差异显著; 单作玉米, I_3 处理的水分利用效率比 I_1 和 I_2 处理均提高了 11.49%; 不隔根玉米间作豌豆, I_1 和 I_2 灌水水平下水分利用效率没有显著差异, 而 I_1 和 I_3 水分利用率差异显著; 在塑料布隔根玉米间作豌豆处理下, I_1 和 I_2 水分利用效率相当, 而 I_3 水分利用率比 I_1 和 I_2 降低了 2.40%, 且差异显著; 在尼龙网隔根玉米间作豌豆下, I_1 和 I_2 水分利用效率相等, 而 I_3 水分利用率比 I_1 和 I_2 降低了 3.19%, 且差异显著。这说明当地习惯性灌水和低于当地 10% 灌水对间作作物提高间作的水分利用效率是一样的, 可以用低于地方 10% 灌水代替当地习惯性灌水, 提高农业用水的利用效率。

3 结论与讨论

间作套种增产、增效和提高水分、养分、光热资源利用效率的作用已经被大量研究证实^[5,9-11], 并被作为解决人口增长、耕地减少矛盾的重要对策在许多国家大面积应用。合理的间套作可以增产 30%~50%, 西北一熟灌区的小麦玉米间套作带田较一般高产田可增产 50% 以上, 部分增产幅度在 100%^[12], 带田比单作具有更高的水分生产效率和经济效益^[13-14]。本试验中, P/C、PP/C、NP/C 与单作相比, 土地利用效率提高了 13.01%~42.13%; 不同间作处理的经济产量和生物产量分别比两种单作的产量高 30.45%~12.90% 和 19.16%~28.34%。隔根影响豌豆与玉米间作形成的补偿效应, 间作群体中作物根系在空间上的重叠和生理生态学特性的改变是决定地下产量贡献大小的重要原因^[15]。在 I_1 灌水水平下, 不隔根处理与塑料布隔根处理相比, 产量高 14.45%, 主要是因为地下部分的补偿作用, 而 16.04% 的产量优势产生于对地上资源的补偿利用。不隔根处理与尼龙网隔根处理的产量优势差异为 3.52%, 这一优势来自于根系对土壤空间的叠加利用。

种植模式和灌水水平均影响豌豆、玉米全生育

期耗水量, 而隔根对豌豆间作玉米总耗水量影响较小。有研究表明, 间作干物质生产力提高, 但水分消耗量并没有改变^[7,16], 间套作消耗的水分与相应单作(加权平均)比较, 水分消耗量差异很小^[14]。本试验中, 单作比间作的耗水量高 0.38%~10.75%, 间作处理间耗水量差异不显著。单作豌豆处理的耗水量是 $I_1 > I_2 > I_3$, I_1 传统灌水处理的耗水量显著高于 I_2 (低于地方 10% 灌水)和 I_3 (低于地方 20% 的灌水)处理; 两个单作处理的耗水量差异不明显, 但 I_1 传统灌水处理和 I_2 (低于地方 10% 灌水)处理的耗水量显著高于 I_3 (低于地方 20% 的灌水)处理; 在不同隔根方式的间作处理内, 地方习惯灌水水平和低于 10% 灌水水平的耗水量差异不显著, 但显著低于 20% 灌水的耗水量。在不隔根方式下的间作处理内, 地方习惯灌水和低于地方 10% 灌水的耗水量显著低于 20% 灌水的耗水量; 在塑料布隔根间作和尼龙网隔根内, 作物耗水量的差异显著。

复合群体各配对作物根系的垂直分布表现为层次递减性^[17], 根系垂直生长呈多波顺次递推特点, 这种特性使根系生长中心和吸收中心交替出现, 提高了水分和养分的利用效率。Morris 等^[1]发现, 间作群体耗水量与单作耗水量的加权平均相比变化在 -6%~+7%, 但水分利用效率可提高 18%~99%。豌豆/玉米间套作中种间根系是弱竞争, 即豌豆根系仅占据较小的地下部空间即可满足其对养分需求, 而玉米可以占据两作物地下部空间, 扩大了根系的吸收空间, 表现出促进作用。本试验间作处理的水分利用效率分别比单作高 3.07%~43.38%。根间作用对豌豆/玉米水分利用效率的贡献率达到 3.09%~15.10%, 说明在灌水量减少的情况下, 作物对水分的利用更加显著。因此复合群体内间作作物生长期间根系分布在时间和空间上的错位是复合群体高产、高效的主要原因之一。豌豆间作玉米和单作在耗水量差异不显著的情况下, 间作水分利用效率比单作显著提高, 表明间作可以更好地利用土壤水分。低于地方 10% 的灌水和地方习惯灌水的水分利用效率和产量均无显著差异, 说明在实际生产中可以减少农业灌水量以降低农业生产成本。在复合群体高效管理技术的开发上, 应通过配对作物在空间上的合理布置、品种根系时空分布特征的合理利用使配对作物根系在土壤中适度叠加, 利用作物根际之间的补偿效应, 提高作物水分和营养品质的利用效率, 从而充分发挥间作群体增产、增效的作用。

(下转第 101 页)

dehydrogenase in the assessment of the response of soil to vermicompost and inorganic fertilisers[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2000, 32(6):479-483.

[18] Banafshe K, Farshid N, Nafiseh N, et al. Diversity of soil cellulase isoenzymes is associated with soil cellulasekinetic and thermodynamic parameters[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2011, 43(4):1639-1648.

[19] Eivazi F, Tabatabai M. Glucosidases and galactosidases in soils[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1988, 20(5):601-606.

[20] Batra L, Manna M. Dehydrogenase activity and microbial biomass carbon in salt affected soils of semiarid and arid regions[J]. *Arid Land Research and Management*, 1997, 11(3):295-303.

[21] Frankenberger W, Bingham F. Influence of salinity on soil enzyme activities[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1982, 46(6):1173-1177.

[22] Zahran H. Diversity, adaptation and activity of the bacterial flora in saline environments[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 1997, 25(3):211-223.

[23] Yuan B C, Xu X G, Li Z Z, et al. Microbial biomass and activity in alkalized magnesian soils under arid conditions[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2007, 39(12):3004-3013.

[24] Knight T R, Dick R P. Differentiating microbial and stabilized β - glucosidase activity relative to soil quality[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2004, 36(12):2089-2096.

[25] Xie C S, Lu R J, Huang Y. Effects of ions and phosphates on alkaline phosphataseactivityin aerobic activated sludge system[J]. *Biore-source Technology*, 2010, 101(1):3394-3399.

[26] Moscatelli M C, Lagomarsinob A, Garzillo A M V. β - Glucosidase kinetic parameters as indicators of soil quality under conventionaland organic cropping systems applying two analytical approaches[J]. *Ecological Indicators*, 2012, 13(6):322-327.

[27] Rao M A, Gianfreda L, Cristofaro A, et al. Kinetic behavior of synthetic organo and organo-mineral-urease complexes[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1995, 59(3):811-815.

[28] Saeed H, Farshid N. Effect of cow manure and sewage sludge on the activityand kinetics of L - glutaminase in soil[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2007, 43(10):491-494.

[29] Zaman M, Di H J, Cameron K C. A field study of gross of N mineralization and nitrification and their relationships to microbial biomass and enzyme activities in soils treated with dairy effluent an ammonium fertilizer[J]. *Soil Use and Management*, 1999, 15(3):188-194.

(上接第 88 页)

参 考 文 献:

[1] Morris R A, Garrity D P. Resource capture and utilization in intercropping, non-nitrogen nutrients[J]. *Field Crops Research*, 1993, 34(3-4):319-334.

[2] 黄高宝,张恩和.调亏灌溉条件下春小麦玉米间作农田根、水肥时空协调性研究[J].*农业工程学报*,2002,18(1):53-56.

[3] 刘广才,杨祁峰,李 隆,等.小麦/玉米间作优势及地上部与地下部因素的相对贡献[J].*植物生态学报*,2008,32(2):477-484.

[4] Mandal B K, Dasgupta S, Ray P K. Yield of wheat, mustard and chickpea grown as sole and intercropped with four moisture regimes[J]. *Indian Journal of Agricultural Sciences*, 1986, 56(8):577-583.

[5] 孔学夫,冯福学,柴 强.根系分隔对小麦玉米套作土壤水分状况的影响[J].*中国沙漠*,2014,34(3):780-785.

[6] Li L, Sun J H, Zhang F S, et al. Wheat/maize or wheat/soybean strip Intercropping I. Yield advantage and interspecific interaction on nutrients[J]. *Field Crops Research*, 2001, 71(2):123-137.

[7] Rahman T, Liu X, Hussain S, et al. Water use efficiency and evapotranspiration in maize-soybean relay strip intercrop systems as affected by planting geometries[J]. *Plos One*, 2017, 12(6):0178332.

[8] Mead R, Willey R W. The concept of a ‘Land Equivalent Ratio’ and advantages in yields from intercropping[J]. *Experimental Agriculture*, 2008, 16(3):217-228.

[9] Chai Q, Qin A, Gan Y, et al. Higher yield and lower carbon emission by intercropping maize with rape, pea, and wheat in arid irrigation areas[J]. *Agronomy for Sustainable Development*, 2014, 34(2):535-543.

[10] Tanwar S P S, Rao S S, Regar P L, et al. Improving water and land use efficiency of fallow-wheat system in shallow Lithic Calciorthid soils of arid region: Introduction of bed planting and rainy season sorghum-legume intercropping[J]. *Soil and Tillage Research*, 2014, 138:44-55.

[11] 毋玲玲,柴 强.河西绿洲灌区高产高效多熟种植模式筛选[J].*农业系统科学与综合研究*,2005,21(2):121-124.

[12] 胡恒觉,黄高宝.新型多熟种植研究[M].兰州:甘肃科技出版社,1999.

[13] 孟 文,常中央,魏新平.河西麦田不同种植模式的水效益比较[J].*甘肃农业大学学报*,1996,31(1):42-46.

[14] 李凤霞,黄 峰,徐阳春,等.春小麦不同种植模式水分利用效率比较[J].*节水灌溉*,2003,3:15-16,46.

[15] 齐万海,柴 强.不同隔根方式下间作小麦玉米的竞争力及产量响应[J].*中国生态农业学报*,2010,18(1):31-34.

[16] Natarajan M, Willey R W. The effects of water stress on yield advantages of intercropping systems[J]. *Field Crops Research*, 1996, 13(2):117-131.

[17] 张恩和,胡 华.小麦玉米带田根系竞争和补偿效应研究[J].*甘肃农业大学学报*,1997,32(4):295-297.