

# 单播与混播对两个冬小麦品种产量和水分利用效率的影响\*

刘琳<sup>1,3,4</sup> 李凤民<sup>1,2\*</sup> 徐炳成<sup>1,2</sup> 马守臣<sup>1,3</sup> 刘文兆<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>中国科学院水利部水土保持研究所黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西杨凌 712100; <sup>2</sup>兰州大学生命学院干旱与草地生态教育部重点实验室, 兰州 730000; <sup>3</sup>中国科学院研究生院, 北京 100039; <sup>4</sup>清华大学环境科学与工程系, 北京 100084)

**摘要** 选取黄土旱塬两个冬小麦品种长武 135和平凉 40, 采用生态替代法连续两年在田间条件下研究了单播和混播方式对冬小麦产量和水分利用效率的影响. 结果表明: 单播条件下平凉 40单位面积根量为 367160 g# m<sup>-2</sup>, 显著大于长武 135的 297131 g# m<sup>-2</sup>, 且其根系在各土层中分布较均匀, 表明与长武 135相比, 平凉 40吸收土壤水分的能力较强, 但其在单播条件下的产量和水分利用效率较低. 混播增加了平凉 40和长武 135根系在较深土层中的根量分布, 两品种根量分别比单播条件下多 13136和 8150 g# m<sup>-2</sup>, 混播增强了小麦根系对深层土壤水分的吸收利用, 提高了单位面积总产量, 增加了群体水分利用效率. 与平凉 40相比, 长武 135分配了更多的干物质到繁殖器官, 使其根量和地上营养器官的生物量减小, 从而提高了籽粒产量和收获指数, 表现出较高的水分利用效率.

**关键词** 冬小麦 产量 水分利用效率 单播 混播

**文章编号** 1001-9332(2008)01-0093-06 **中图分类号** Q945179 S51211 **文献标识码** A

Effects of mono2 and mixed culture on the grain yield and water use efficiency of two winter wheat cultivars LIU Lin<sup>1,3,4</sup>, LI Fengmin<sup>1,2</sup>, XU Bingcheng<sup>1,2</sup>, MA Shou2chen<sup>1,3</sup>, LIU Wen2zhao<sup>1</sup> (<sup>1</sup>State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling 712100, Shaanxi, China; <sup>2</sup>Key Laboratory of Arid and Grassland Ecology, School of Life Science, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China; <sup>3</sup>Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China; <sup>4</sup>Department of Environmental Science and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China). *Chin. J. Appl. Ecol.*, 2008, 19(1): 93-98

**Abstract** Taking two winter wheat (*Triticum aestivum* L.) cultivars Changwu 135 and Pingliang 40 commonly cultivated in the semiarid area on Loess Plateau as test materials and by the method of ecological replacement, a 2-year field experiment was conducted to study the effects of mono2 and mixed culture on the grain yield and water use efficiency of the cultivars. The results showed that under mono2 culture Pingliang 40 had a much higher unit area root biomass (367160 g# m<sup>-2</sup>) than Changwu 135 (297131 g# m<sup>-2</sup>), and a more uniform root distribution (i.e., a better root type for water absorption), but its grain yield and water use efficiency were lower than Changwu 135. Under mixed culture, the population root biomass of Pingliang 40 and Changwu 135 was 13136 g# m<sup>-2</sup> and 8150 g# m<sup>-2</sup> higher than that under mono2 culture, respectively, suggesting that mixed population could absorb the water in deeper soil layers and had higher total unit area biomass, which in turn increased the water use efficiency. Comparing with Pingliang 40, Changwu 135 allocated more dry matter to its productive organ, leading to its higher grain yield, harvest index and water use efficiency.

**Key words** winter wheat, yield, water use efficiency, mono2 culture, mixed culture

\* 中国科学院百人计划择优支持资助项目(C24016200).

\*\* 通讯作者. E-mail: fml@lzu.edu.cn

2006212204 收稿, 2007211206 接受.

根据 Donald<sup>[1-2]</sup> 的弱竞争理论, 植物个体适合性的强弱往往与种群适合性成反比. 具有 /理想株型 0 的植株个体表现出矮秆、小叶、株型紧凑和较低的个体适应性, 但具有较高的种群适应性, 并表现出较高的产量, 这曾被誉绿色革命<sup>[3-4]</sup>. 具有理想株型的群体在光限制的环境中, 优化了对光能的利用, 降低了个体对光照的竞争能力, 使整个作物群体不再为提高对光的竞争能力而支付代价, 节约下来的资源用于提高繁殖分配, 从而提高了产量和收获指数<sup>[5]</sup>.

不同地区的主导资源限制因子不同, 水分缺乏是黄土旱塬区最重要的限制因子, 所以该区作物间的竞争主要是根系对水分的竞争. 目前相关研究多集中在春小麦<sup>[6-9]</sup>上, 多数学者认为由具有适宜大小的根系和高水分利用效率个体组成的春小麦种群产量较高<sup>[9]</sup>, 但对冬小麦的研究较少. 同时已有研究对地上部分的关注较多, 而对地下部分的关注很少, 尽管研究已经表明, 长期自然选择导致该区作物的根系过于庞大<sup>[10]</sup>, 但适当调整根系大小, 将理想株型与根系联系起来<sup>[11-13]</sup>, 从根系生物量及其空间分布的角度塑造理想根型来提高籽粒产量, 还有待深入研究<sup>[14]</sup>. 为此, 本试验在黄土旱塬区大田试验条件下, 以单播和混播方式研究了不同品种冬小麦群体根型与产量、水分利用效率之间的关系, 为黄土高原的作物抗旱研究提供理论参考.

## 1 研究地区与研究方法

### 1.1 自然概况

试验在中国科学院长武黄土高原农业生态实验站进行. 该站位于陕西省咸阳市长武县境内 (35°12'N, 107°40'E), 海拔 1 200 m, 气候属于暖温带半湿润大陆性季风气候, 年平均气温 9.1℃, 无霜期 171 d, 地下水深 60 m, 种植业主要以冬小麦为主. 农业生产全部依赖天然降水, 属于典型的雨养农业区<sup>[15]</sup>. 该地 1957-1991 年的年平均降雨量为 576.13 mm, 2005 年和 2006 年试验期间的降雨量分别为 561.15 和 547.19 mm, 冬小麦生育期内有效降雨量分别为 352.19 和 326.19 mm.

### 1.2 试验设计

供试两个冬小麦 (*Triticum aestivum* L.) 品种分别为长武 135 (CW) 和平凉 40 (PL), 长武 135 是目前黄土旱塬区长武县种植的主要品种, 平凉 40 (PL) 是该地 1980-2000 年种植的主要品种, 两个品种的生育期基本一致.

分别于 2004 年和 2005 年的 9 月中旬播种, 次年 6 月收获. 小区面积 2 m @ 2 m, 埂宽 0.15 m, 随机区组排列, 3 次重复. 每小区 9 行, 东西走向, 人工点播, 播种密度为每公顷 119 @ 10<sup>6</sup> 粒. 采用 d&W 生态替代法 (即两个品种的总播种量不变, 而在播种比例上呈梯度变化的播种方式) 播种, 单播每行 CW 或 PL 种子 85 粒; 混播每行 CW 和 PL 共 85 粒, 两年试验均设单播和混播两种方式, 2004 年混播 CW BPL 种子数量按 8B: 2B 比例设置, 2005 年混播 CW BPL 种子数量按 5B: 5B 比例设置. 播种 1 周后出苗, 3 周后定苗, 其它管理同当地大田生产.

### 1.3 测定项目与方法

冬小麦播种和收获后用烘干法测定 0~40 cm 土层土壤含水量, 40 cm 以下土层土壤含水量用国产 CNC503DR 型中子仪测定; 于花期晴朗无云天气 9:00-11:00 用美国产 L26400 型光合仪测定冬小麦旗叶光合速率 ( $P_n$ ) 和蒸腾速率 ( $T_r$ ), 连续测定 3 d, 于花期测定株高、叶面积和地下生物量; 用样方收获法测定冬小麦地上生物量、产量、水分利用效率 (WUE)、相对产量和收获指数. 相关公式为:

$$WUE_i = P_n / T_r$$

式中,  $WUE_i$  为单叶水分利用效率.

$$WUE_p = \text{单位面积籽粒产量} / \text{耗水量}$$

式中:  $WUE_p$  为群体水分利用效率; 耗水量为播种与收获时 0~200 cm 土壤水分的差值与生育期内降雨量的和.

$$RY_{ij} = Y_{ij} / (pY_i + qY_j); RYT = pRY_i + qRY_j$$

式中:  $RY_{ij}$  为相对产量;  $Y_i$  和  $Y_j$  分别为混播时品种  $i$  和  $j$  的产量;  $RYT$  为混播时的相对总产量;  $Y_i$  为单播时  $i$  的产量;  $p$ 、 $q$  分别为长武 135 和平凉 40 的播种比例<sup>[16]</sup>.

收获指数 = 单位面积粒质量 / 单位面积地上干物质量

### 1.4 数据处理

采用 SAS 6.10 和 Excel 软件进行数据处理.

## 2 结果与分析

### 2.1 单播和混播方式下冬小麦花期株高与叶面积

2005 年单播条件下 PL 株高比 CW 大 19.32 cm, 旗叶面积比 CW 大 31.88 cm<sup>2</sup>, 且差异达显著水平 (表 1); 与单播相比, 混播条件下 CW 的株高和旗叶面积增大, 而 PL 的株高和旗叶面积减小, PL 的株高和旗叶面积均显著大于 CW. 单播时 CW 的叶面积指数为 3.116, 显著小于 PL 的 3.154. 与单播相比, 混播条件下两个品种的叶面积指数显著大于单播的

表 1 单播和混播方式下冬小麦花期株高和叶面积

Tab 1 Plant height and leaf area index of winter wheat under monoculture and mixture at anthesis stage

项目 Item	小麦品种 Cultivar	2005					2006	
		单播 Monoculture	混播 Mixture				单播 Monoculture	混播 Mixture SB5
			8B2	6B4	4B6	2B8		
株高 Plant height (cm)	CW	751.21b	731.70b	741.04b	721.11b	691.92b	721.34b	671.40c
	PL	941.53a	951.28a	951.71a	981.07a	971.72a	881.47a	901.61a
旗叶面积 Flag leaf area (cm <sup>2</sup> )	CW	111.93d	131.69cd	161.40ab	131.67cd	111.26d	91.22e	91.78e
	PL	151.81c	181.50b	191.92b	151.67c	221.11a	111.66d	121.58d
叶面积指数 Leaf area index	CW	31.16c	31.76ab	31.83a	4.61a	31.64b	21.93d	31.23c
	PL	31.54b					31.45b	

同列数据后不同字母表示处理间差异显著 ( $P < 0.05$ ) Data in the same column with different small letters meant significant difference among different treatments at 0.05 level 下同 The same below.

CW, 随着 CW 播种比例的减少, 叶面积指数总体上表现为增大的趋势。2006年的变化趋势与 2005年相同。

2.1.2 单播和混播方式下冬小麦花期旗叶光合速率 ( $P_n$ )、蒸腾速率 ( $T_r$ ) 和单叶水分利用效率 ( $WUE_1$ )

2005年单播条件下 PL 的  $P_n$  为  $16153 \text{ Lmol CO}_2 \# \text{ m}^{-2} \# \text{ s}^{-1}$ , 显著小于 CW 的  $18108 \text{ Lmol CO}_2 \# \text{ m}^{-2} \# \text{ s}^{-1}$ ; 与单播相比, 混播条件下 CW 的  $P_n$  显著减小, 而 PL 无显著变化 (表 2)。单播条件下 CW 的  $T_r$  小于 PL, 但未达到显著水平; 与单播相比, 混播条件下 CW 的  $T_r$  显著增加, PL 则略有减小, 但未达到显著水平。

不同播种方式下冬小麦旗叶  $P_n$  和  $T_r$  的变化对  $WUE_1$  产生影响。单播时 CW 的  $WUE_1$  为 31.87, 显著高于 PL 的 31.57, 与单播相比, 混播降低了 CW 的  $WUE_1$ , 却使 PL 的  $WUE_1$  显著增加, 且各混播比例下

PL 的  $WUE_1$  均显著大于 CW。

2006年在混播条件下两个品种  $T_r$  与单播相比显著减小, 单播 CW 的  $WUE_1$  高于 PL, 但未达到显著水平, 其它指标之间的差异显著性与 2005年相同。

2.1.3 单播和混播方式下冬小麦花期生物量及群体水分利用效率

2005年单播条件下 CW 的地上生物量为  $1137 \text{ kg} \# \text{ m}^{-2}$ , 小于 PL 的  $1141 \text{ kg} \# \text{ m}^{-2}$ , 但未达到显著水平; 与单播相比, 混播条件下随着 PL 播种比例的增加, 单位面积地上生物量显著增加 (表 3)。单播条件下 PL 的根系较大, 根量为  $0137 \text{ kg} \# \text{ m}^{-2}$ , 显著大于 CW。混播时群体水分利用效率随着 PL 播种比例的增加而增大, 单播时具有较小根量的 CW 具有较高的水分利用效率, 混播冬小麦群体的水分利用效率值较单播的 PL 增大。

表 2 单播和混播方式下冬小麦花期光合速率、蒸腾速率和单叶水分利用效率

Tab 2 Photosynthetic rate ( $P_n$ ), transpiration rate ( $T_r$ ) and water use efficiency per leaf ( $WUE_1$ ) of winter wheat under monoculture and mixture at anthesis stage

项目 Item	小麦品种 Cultivar	2005					2006	
		单播 Monoculture	混播 Mixture				单播 Monoculture	混播 Mixture SB5
			8B2	6B4	4B6	2B8		
光合速率 $P_n$ ( $\text{Lmol CO}_2 \# \text{ m}^{-2} \# \text{ s}^{-1}$ )	CW	181.08b	161.31c	151.43c	141.88cd	121.17d	201.32a	151.64c
	PL	161.53c	131.88cd	151.76c	161.52c	161.58c	171.96b	161.00bc
蒸腾速率 $T_r$ ( $\text{mmol H}_2\text{O} \# \text{ m}^{-2} \# \text{ s}^{-1}$ )	CW	41.67c	51.59bc	61.37a	61.09b	41.46cd	61.39a	51.49bc
	PL	41.63c	31.50d	41.51cd	41.96c	41.18cd	51.81bc	41.98c
单叶水分利用效率 $WUE_1$ ( $\text{Lmo} \# \text{ mmol}^{-1}$ )	CW	31.87a	21.92c	21.42d	21.44d	21.73cd	31.18bc	21.85c
	PL	31.57b	31.96a	31.49bc	31.33b	31.97a	31.09bc	31.21b

表 3 单播和混播方式下冬小麦的地上、地下生物量及水分利用效率

Tab 3 Shoot biomass, root biomass and water use efficiency of winter wheat population ( $WUE_p$ ) under monoculture and mixture

项目 Item	小麦品种 Cultivar	2005					2006	
		单播 Monoculture	混播 Mixture				单播 Monoculture	混播 Mixture SB5
			8B2	6B4	4B6	2B8		
地上生物量 Shoot biomass ( $\text{kg} \# \text{ m}^{-2}$ )	CW	11.41b	11.33b	11.36b	11.54a	11.50a	11.19b	11.13b
	PL	11.37b					11.30b	
地下生物量 Root biomass ( $\text{kg} \# \text{ m}^{-2}$ )	CW	01.30b	-	-	-	-	01.25b	01.25b
	PL	01.37a					01.29b	
群体水分利用效率 $WUE_p$ ( $\text{kg} \# \text{ mm}^{-1} \# \text{ hm}^{-2}$ )	CW	171.21c	161.14d	151.67e	151.41e	161.86d	181.20b	181.81a
	PL	151.29e					151.54e	

表 4 单播和混播方式下冬小麦产量和收获指数

Tab 4 Grain yield and harvest index of winter wheat under monoculture and mixture

项目 Item	小麦品种 Cultivar	2005					2006	
		单播 Monoculture		混播 Mixture			单播 Monoculture	混播 Mixture
		8B2	4B6	2B8	5B5	5B5		
产量 Yield ( $g\ m^{-2}$ )	CW	6181.33a	3481.33d	1941.33f	1271.33f	551.00g	6231.47a	2671.30e
收获指数 Harvest index	PL	0.50133b	0.233167e	0.369167d	0.426133c	0.551133b	0.533193b	0.379162d
	CW	0.160a	0.157b	0.152bc	0.153b	0.150c	0.152bc	0.151c
	PL	0.150c	0.155b	0.153b	0.153b	0.150c	0.141d	0.162a

2006年混播群体的地上生物量比单播有所降低,但未达到显著水平;混播显著降低了群体根量,与大根系品种 PL单播相比,混播群体根量减小了  $45158\ g\ m^{-2}$ .

214 单播和混播方式下冬小麦根系分布

两个品种冬小麦的根系主要分布在 80 cm 以上土层, 0~ 50 cm 土层的根量最大(图 1). 2006年单播时 PL的单位面积根量显著大于 CW,且 PL在 40 cm 以上土层分布的根量比 CW 多  $37175\ g\ m^{-2}$ ,表明 PL在土壤表层分布的根系较多,可以利用有限的降水资源. PL在 60 cm 以下土层分布的根量比 CW 多  $5184\ g\ m^{-2}$ ,但未达到显著水平. 与 CW 相比, PL根系在各土层中的分布较均匀. 混播降低了冬小麦根系在表土中的分布,在 40 cm 以上土层,混播群体根量分别比 CW 和 PL 单播时的根量小  $36158$ 和  $74133\ g\ m^{-2}$ ;在 60~ 100 cm 土层中,由于混播群体根系对水分产生种间竞争,增大了群体

根系在较深土层的分布,其根量分别比 CW 和 PL 单播时增大了  $13136$ 和  $8150\ g\ m^{-2}$ . 两年的测定结果变化趋势一致.

215 单播和混播方式下冬小麦籽粒产量和收获指数

2005年单播条件下, CW 的产量为  $618133\ g\ m^{-2}$ ,显著大于 PL的  $550133\ g\ m^{-2}$ (表 4). 混播条件下, CW 和 PL比例不同,两个品种的产量差异情况不同. 当 CW 和 PL的播种量分别占该品种单播时播种量的 80%时, CW 产量为 PL的 63118%,差异达极显著水平,为 CW 单播产量的 56133%;此时,混播 PL产量和单播 PL产量几乎相等. 2006年两品种混播比例为 5B5 时, CW 产量相当于单播产量的 42187%, PL产量相当于单播产量的 71110%.

2005年单播时 CW 的收获指数为 0.160 显著大于 PL的 0.150. 混播时两品种的收获指数差异不显著,各播种比例的收获指数均值都为 0.153,其中 CW 的收获指数比单播时减少了 1117%,差异达显著水平,而 PL增加了 6%. 2006年 PL的收获指数由单播时的 0.141 显著增加到混播时的 0.162,而混播 CW 的收获指数与单播相比略有下降.

设定单播的相对总产量为 1,混播时 PL 在各播种比例下的相对产量均大于 1,即混播时 PL 产量大于其同等面积单播时的产量,而 CW 小于 1. 两个品种产量之和的相对总产量 (CW+ PL),随着 PL在混播中所占比例的增加而略有增加. 两年的测定结果一致(表 5).

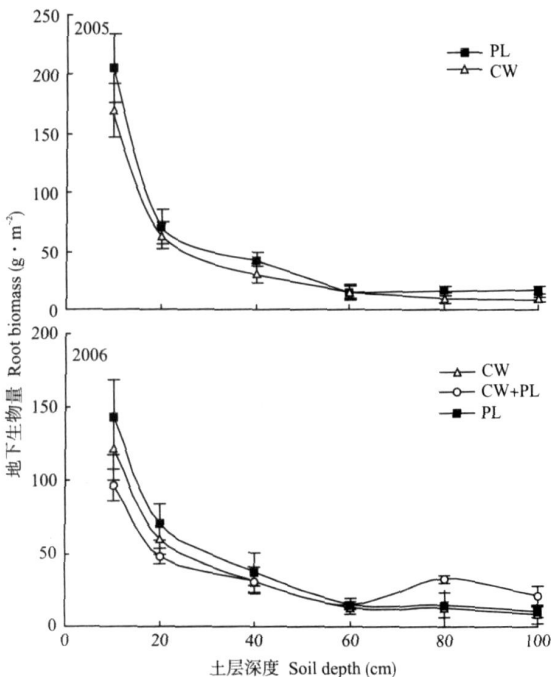


图 1 单播和混播方式下不同土层深度冬小麦根量分布  
Fig 1 Root biomass distribution in different soil layers for winter wheat under monoculture and mixture

表 5 长武 135 和平凉 40 在混播条件下的相对产量  
Tab 5 Relative yield of CW and PL under monoculture and mixture

项目 Item	小麦品种 Cultivar	8B2	6B4	4B6	2B8	5B5
相对产量 Relative yield	CW	0.170b	0.152c	0.151c	0.144d	0.186a
	PL	2.112a	1.168b	1.129d	1.125d	1.142c
相对总产量 Relative total yield	CW + PL	0.199c	0.199c	0.198c	1.109b	1.114a

### 3 讨论

不同根型对作物产量和水分利用效率产生的影响不同<sup>[14]</sup>。在水分成为主要限制性因子的黄土旱塬,作物根系生长有两种趋势:或者使个体适应性达到最大,或者使群体面积产量达到最大<sup>[6,17]</sup>。Passiura认为<sup>[10]</sup>,理论上每公顷小麦达到500 kg的根量就可以保证群体对土壤中水分的充分利用,而小麦的实际根量是该值的5~8倍。本试验结果表明,单播和混播群体的冬小麦根量均远大于Passiura的理论值。与冬小麦品种长武135相比,平凉40根量和在各土层中的分布较多,根系较大,且在各土层中分布较均匀。这种根型可以更好地利用各层土壤中存储的水分,对水分的吸收利用能力较强,但由于合成的干物质大量用于根系的生长,使得其在单播时表现出较低的产量和水分利用效率。混播使根系在深层土壤中的分布增加,提高了根系对深层土壤水分的吸收利用,提高了单位面积总产量和群体水分利用效率。半干旱区小麦高产潜力的挖掘在于提高有限水资源的转化效率及收获指数,水分转化效率低的品种不具有产量上的优势<sup>[8,18]</sup>。张荣等<sup>[9]</sup>研究认为,半干旱区春小麦地方品种/和尚头0较现代品种/陇春82750的水分利用效率低,其产量也较低,但群体水分利用效率较高。不同基因型小麦的水分利用效率与植株叶片具有密切的关系<sup>[19]</sup>,单株水平上的水分利用效率与小麦的根干质量和根长呈显著线性负相关关系<sup>[20]</sup>。随着小麦倍性的增加,生物量水分利用效率和产量水分利用效率均显著升高,且后者的升高程度要大于前者<sup>[21]</sup>。由具有与降水条件相适应的适宜大小的根系和高水分利用效率的个体组成的小麦种群具有较高的产量输出<sup>[9]</sup>。本试验中,长武135转移了更多的光合产物到籽粒,减少了根量和地上营养器官的质量,从而提高了籽粒产量和收获指数,表现出较高的水分利用效率。表明小麦品种籽粒产量的提高与根系的减少、较深土层中根量的减少和对水资源竞争能力的下降相关。

黄土高原地区小麦普遍存在对深层土壤水分利用不足的现象,如甘肃定西1~2 m土层保存有大量的可利用水分,但当春小麦遇到干旱胁迫时只有0~1 m土层内的水分被根系完全吸收<sup>[6,17]</sup>。本试验结果表明,冬小麦在0~50 cm土层的根量最大,这不仅与冬小麦品种的根型有关,还与土壤类型和结构有关,相关研究还有待进一步开展。

### 参考文献

- [1] Donald CM. The breeding of crop ideotype *Euphytica*, 1968, 17: 385-403
- [2] Donald CM. Competitive plants communal plants and yield in wheat crops// Evans LT, Peacock WJ eds *Wheat Science - Today and Tomorrow*. Cambridge University Press, 1981: 223-247
- [3] Donald CM, Hamblin J. The convergent evolution of annual seed crops in agriculture *Advances in Agronomy*, 1983, 36: 97-143
- [4] Duan SS (段舜山), Gu WX (谷文祥), Zhang DY (张大勇), et al. Relationship between root system characteristics and drought resistance of wheat populations in semiarid region *Chinese Journal of Applied Ecology (应用生态学报)*, 1997, 8(2): 134-138 (in Chinese)
- [5] Zhao SL (赵松岭), Li FM (李凤民), Zhang DY (张大勇), et al. Crop production is a population process *Acta Ecologica Sinica (生态学报)*, 1997, 17(1): 100-104 (in Chinese)
- [6] Zhang DY (张大勇), Jiang XH (姜新华), Zhao SL (赵松岭), et al. An ecological analysis of growth redundancy in root systems of crops under drought conditions *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica (西北植物学报)*, 1995, 15(5): 110-114 (in Chinese)
- [7] Zhang R (张荣), Zhang DY (张大勇), Yuan BZ (原保忠), et al. A study on the relationship between competitive ability and productive performance of spring wheat in semiarid regions of loess plateau *Journal of Plant Ecology (植物生态学报)*, 1999, 23(3): 205-210 (in Chinese)
- [8] Zhang R (张荣), Zhang DY (张大勇). A comparative study on root redundancy in spring wheat varieties released in different years in semiarid area *Journal of Plant Ecology (植物生态学报)*, 2000, 24(3): 298-303 (in Chinese)
- [9] Zhang R (张荣), Sun GJ (孙国钧), Li FM (李凤民), et al. A study on the relationship of competitive ability, water using efficiency and yield of two spring wheat varieties *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica (西北植物学报)*, 2002, 22(2): 235-242 (in Chinese)
- [10] Passiura JB. Root and drought resistance *Agricultural Water Management*, 1983, 7: 256-280
- [11] Chen YM (陈亚明), Fu H (傅华), Zhang R (张荣), et al. The present situation and prospect of researches on hydraulic redistribution between the interface of root and soil *Acta Ecologica Sinica (生态学报)*,

- 2004 24(5): 1040-1047 (in Chinese)
- [12] Zhang YQ (张永清), Miao GY (苗果园). Effects of soil root growing space on root physiological characteristics and grain yield of sorghum. Chinese Journal of Applied Ecology (应用生态学报), 2006, 17(4): 635-639 (in Chinese)
- [13] Liu HS, Li FM. Root respiration, photosynthesis and grain yield of two spring wheat in response to soil drying. Plant Growth Regulation, 2005, 46: 233-240
- [14] Zhang DY, Sun GJ, Jiang XH. Dominant s ideotype and growth redundancy: A game theoretical analysis. Field Crops Research, 1999, 61: 179-187
- [15] Liang YL (梁银丽). The introduction of Loess Plateau Agricultural Ecology Experiment Station of Chinese science institution. Dynamics Research of Resource Environment Network (资源生态环境网络研究动态), 1997, 8: 41-42 (in Chinese)
- [16] Meekins JE, McCarthy BC. Competitive ability of *Alliaria petiolata* (garlic mustard, Brassicaceae), an invasive nonindigenous forest herb. International Journal of Plant Science, 1999, 160: 743-752
- [17] Zhang DY (张大勇), Jiang XH (姜新华), Zhao SL (赵松岭). Further thoughts on growth redundancy. Acta Prataculturae Sinica (草业学报), 1995, 4(3): 17-22 (in Chinese)
- [18] Bazzaz FA. Reproductive allocation in plants // Fenner M. eds. Seeds: The Ecology of Regeneration in Plant Communities. England: CABI Publishing, 2000: 1-29
- [19] Zhang SQ (张岁岐), Shan L (山仑), Deng XP (邓西平). The relationship between the change of WUE and root growth in wheat evolution. Chinese Science Bulletin (科学通报), 2002, 47(17): 1327-1331 (in Chinese)
- [20] Zhang ZB (张正斌), Shan L (山仑). Relationships of water use efficiency in wheat flag leaf. Chinese Science Bulletin (科学通报), 1997, 42(17): 1877-1880 (in Chinese)
- [21] Huang ML (黄明丽), Deng XP (邓西平), Zhou SL (周生路), et al. Grain yield and water use efficiency of diploid, tetraploid and hexaploid wheats. Acta Ecologica Sinica (生态学报), 2007, 27(3): 1113-1121 (in Chinese)

---

作者简介 刘琳, 女, 1979年生, 博士研究生. 主要从事植物生理生态和环境生态研究. E-mail: liulin\_li@yahoo.com.cn

责任编辑 张凤丽

---