

干旱灌区冬小麦根系的生长冗余*

侯慧芝¹ 黄高宝^{2**} 郭清毅² 王利立²

(¹ 甘肃农业大学资源与环境学院,兰州 730070; ² 甘肃农业大学农学院,兰州 730070)

摘要 采用管栽试验通过人为去除根系的方法对甘肃河西绿洲灌区 2 个冬小麦品种根系的形态特征及根系与地上部分的关系进行了研究。结果表明:去除根系的冬小麦的前期生长受到一定程度的限制,与对照相比,其根冠比及其它根系指标均有所下降,且根系去除程度越大降低幅度越大;生长后期小麦根系出现了超补偿效应;成熟期,去除 1/4 根系和去除 1/2 根系处理的冬小麦无论是主茎还是分蘖的穗长、穗质量、穗粒数、粒质量等均比对照增加,但前者主茎各项指标的增幅较大,而后者分蘖的各项指标增幅较大。初步确定冬小麦在充分灌溉条件下至少有 1/4 的根系是冗余的。

关键词 干旱灌区;冬小麦;根系;生长冗余;超补偿效应

中图分类号 Q948 文献标识码 A 文章编号 1000-4890(2007)09-1407-05

Growth redundancy of winter wheat root system in irrigated arid area. HOU Hui-zhi¹, HUANG Gao-bao², GUO Qing-yi², WANG Li-li²(¹College of Resource and Environment, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China; ²College of Agronomy, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China). *Chinese Journal of Ecology* 2007 26(9):1407-1411.

Abstract: By the method of root hand-removal, a tube experiment was conducted to study the morphological characteristics of root system and the relationships between root system and aboveground part of two winter wheat varieties collected from Hexi irrigated area of Gansu Province. The results indicated that at earlier growth stage, the growth of the wheat varieties with their roots partly removed was inhibited to a certain extent. Compared with CK, the root/shoot ratio and other root indices of root-removed wheat were decreased, and more decrement was observed with the roots more removed. At latter growth stage, the overcompensation effect of root system occurred. For the varieties with their roots removed, the spike length, spike mass, grain number per spike, and grain mass on the main stem and tillers were bigger than CK, and the removal of 1/4 roots had more advantages to main stem, while 1/2 roots removal was more beneficial to tillers. It was considered that under adequate irrigation, at least 1/4 of winter wheat roots could be redundant.

Key words: irrigated arid area; winter wheat; root system; growth redundancy; overcompensation effect.

1 引言

长期以来,大根系一直是抗旱作物品种选育中一个重要的衡量指标(Hurd,1974)。然而,追求大根系的育种方法并未给干旱、半干旱地区的产量带来实质性的提高(Donald,1981;Austin,1987;张大勇等,1995)。因此,许多学者对此提出质疑(Donald,

1981,1983)。自 20 世纪 90 年代提出生长冗余的概念(盛承发,1990)以后,如何从群体生态学的角度改善半干旱地区作物库源比,不少学者进行了理论探讨(张荣和张大勇,2000;李捷等,2002),多集中于根的深度、分布及形态特征等方面(李话和张大勇,1999)。根据生态学中的最优生活史对策原理(赵发清,1996),生物个体把同化的有限能量向某一功能的分配的增加必然造成对其它功能分配的相应减少,况且根系所消耗的能量要远远大于等量的地上部分(Passioura,1983)。所以,农业生产中存在

* 教育部博士点基金项目(20050733003)和甘肃省科学技术攻关计划资助项目(2GS042-A41-002-01)。

** 通讯作者 E-mail: Huanggh@gsau.edu.cn

收稿日期:2006-12-07 接受日期:2007-02-07

一个对于产量而言的最佳根系大小,超过这个临界值,个体竞争能力的提高反而会降低该个体向繁殖方面的能量分配,使产量下降(Donald,1981;张大勇等,1995)。对于旱农区作物种群内的个体而言,最佳根系大小有双重含义(Weiner,1990):一是使个体竞争能力达到最大,即进化上的最佳平衡,或称之为进化稳定对策;二是使群体单位面积产量达到最大,即农业生产上的最佳点。二者之间的差值就是我们所说的根系生长冗余(张大勇等,1995)。干旱区作物育种和栽培应该充分认识到这一点,并通过各种措施减少作物生长冗余以达到高产目的(党承林,1998;许宝泉等,2003)。本试验希望通过人为干扰得出干旱灌区冬小麦根系生长的冗余度(党承林,1999;韩明春,2005),为今后河西干旱区实施节水灌溉农业提供一定的理论依据。

2 材料与方法

2.1 自然概况

试验于2005年9月—2006年7月在甘肃省武威市凉州区黄羊镇甘肃农业大学教学试验场进行。试验区位于甘肃河西走廊东端,属冷温带干旱区,是典型的大陆性气候,日照充足,干燥少雨,春季多风沙,夏季有干热风。平均海拔1531 m,平均降水量160 mm左右,蒸发量1919 mm,干燥度5.85,年平均气温7.8℃,1月最低平均气温-11.8℃,7月最高平均气温24.0℃。 ≥ 0 ℃积温为3513.4℃; ≥ 10 ℃积温为2985.4℃。全年无霜期为156 d,绝对无霜期118 d,年日照时数2945 h。年均大风日数12 d,沙尘暴日数为9 d,最多年沙尘暴日数为34 d。其中春季干旱,风速超过年平均风速,农田地表裸露。扩种冬小麦能大幅度增加冬季冬麦地表植被覆盖度,防止地表裸露和表土风蚀,减轻沙尘暴,具有节水防沙尘、提高收入等多种效用。本试验区传统的种植作物为春小麦,然而目前春改冬将成为该地区一项重要任务。

2.2 试验方法

2.2.1 供试品种 供试材料为繁13和新冬1号2个冬小麦品种。

2.2.2 田间设计 大田2005年9月中旬播种,播量 $337.50 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,行距15 cm,播深6 cm。基肥施肥量为纯氮 $192 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、五氧化二磷 $138 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 折合磷二铵 $300 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,尿素 $300 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。次年3月中旬,在大田中选择生长基本一致

的个体,移栽到PVC管子内。试验用管内径为11.0 cm,高25.0 cm。移栽密度为每管2株,稍长一段时间后统一间为每管1株。试验过程中每隔1 d灌1次水,均充分灌溉。4月26日(拔节中期)按以下处理进行人为干扰。本试验每个品种设2个处理(表1),每个处理设3个重复。

表1 试验处理描述

Tab.1 Description of treatments

	代码	处理描述
新冬1号	CK _X	保持植株完整根系
	Q _X	去除所有根系的1/4
	H _X	去除所有根系的1/2
繁13	CK _F	保持植株完整根系
	Q _F	去除所有根系的1/4
	H _F	去除所有根系的1/2

2.2.3 取样测定 选择在孕穗期(5月16日)、开花期(6月5日)和成熟期(7月5日)取样。

每次取样,地上部分称鲜质量后在烘箱中105℃杀青30 min,再烘干(85℃,12 h)称干质量;地下部分冲洗干净,一部分根称鲜质量后,在烘箱中烘干(85℃,12 h)称干质量;一部分根称鲜质量后用网格交叉点计数法测根系长度,网格表方格间距为1 cm,根长(cm)=交叉点数×方格间距(cm)×11/14,根半径和根表面积按Schenk等介绍的方法计算,其中,平均根半径(R)=SQRT(鲜根质量/根长/π),根系表面积(RSA)=根长×平均根直径×π,π=3.14。另外,根体积采用排水法进行测定(马元喜等,1999)。

成熟期地上部分收获后,进行考种(主要包括有效分蘖数、无效分蘖数、总分蘖数、株高、生物量、穗质量、穗长、穗粒数及粒质量等指标)。

2.4 统计分析

所有数据均采用DPS软件进行统计分析,用LSD法进行多重比较。

3 结果与分析

3.1 去除根系对冬小麦的株高、各生育期分蘖数的影响

去根处理的成熟期株高与对照相比略有增加,且去根程度越小,增加越大,但没有显著性差异(表2)。Q_X、H_X的株高分别比CK_X增加12.34%和6.64%,Q_F、H_F的株高分别比CK_F增加5.36%和4.38%。各处理在不同生育期对小麦分蘖数的影响

不同(表2)。孕穗期和开花期,去根处理小麦的分蘖数比对照明显下降,且去除程度越大,下降越大。其中,在孕穗期, Q_X 、 H_X 的分蘖数分别比 CK_X 减少33.33%和59.26%,后者达显著水平; Q_F 、 H_F 的分蘖数分别比 CK_F 减少13.16%和50.00%,后者达显著水平。开花期各处理与对照的变化趋势跟孕穗期一样,只是没有显著性差异。成熟期,去根处理的分蘖数高于对照,且去除程度越大,增加越大。去根处理的有效分蘖数也高于对照,去除程度越小,增加越大。如 Q_X 、 H_X 的有效分蘖数分别比 CK_X 增加53.85%和30.77%,前者达显著水平; Q_F 、 H_F 的有效分蘖数均比 CK_F 增加20%,达显著水平。

表2 不同处理下冬小麦品种新冬1号和繁13株高、各生育期分蘖数的比较

Tab. 2 Plant heights and tillers of Xindong 1 and Fan 13 under different treatments

品种	处理	成熟期株高 (cm)	分蘖数(个)			成熟期有效分蘖数(个)
			孕穗期	开花期	成熟期	
新冬1号	CK_X	36.95 ^a	4.50 ^a	2.83 ^a	2.67 ^a	2.17 ^b
	H_X	39.35 ^a	1.83 ^b	2.67 ^a	3.83 ^a	2.83 ^{ab}
	Q_X	42.15 ^a	3.00 ^{ab}	2.67 ^a	3.50 ^a	3.33 ^a
繁13	CK_F	40.02 ^a	6.33 ^a	4.67 ^a	2.33 ^a	1.67 ^b
	H_F	40.43 ^a	3.17 ^b	3.17 ^a	3.50 ^a	2.00 ^a
	Q_F	42.28 ^a	5.50 ^{ab}	3.67 ^a	3.17 ^a	2.00 ^a

不同大写字母表示SSR 0.01水平差异显著,小写字母表示SSR 0.05水平差异显著,下同。

3.2 去除根系对根干质量、根长、根体积、根半径和根表面积的影响

根系功能主要取决于根表面积,它是代表根系吸收能力的指标,可作为衡量根系质量的一个标准(李话和张大勇,1999)。由表3可以看出,去根处理的根干质量、根长和根体积在孕穗期和开花期与对照相比都减少,且去除程度越大减少越大,在成熟期比对照都增加,均达到显著水平(繁13的根干质量例外),且去除程度越大增加越大。去根处理的根半径在孕穗期和开花期与对照相比均增加(孕穗期 Q_X 例外),在成熟期比对照都减少,其中新冬1号达显著性差异,繁13达极显著性水平。去根处理的根表面积在各生育期均比对照减少(孕穗期繁13例外)。

3.3 去除根系对干物质、根冠比及产量构成因素的影响

去根处理的干物质和根冠比在孕穗期和开花期均比对照减小(孕穗期 Q_X 的根冠比除外),并且去除程度越大,减小越大,但均没有显著性差异,说明

这两个冬小麦品种的根系都存在冗余。其中,在孕穗期 Q_X 、 H_X 的干物质分别比 CK_X 减少3.20%和45.37%,根冠比分别比 CK_X 减少26.17%和-15.93%; Q_F 、 H_F 的干物质分别比 CK_F 减少10.76%和12.98%,根冠比分别比 CK_F 减少20.63%和22.79%。在开花期, Q_X 、 H_X 的干物质分别比 CK_X 减少4.63%和46.04%,根冠比分别比 CK_X 减少57.81%和58.16%; Q_F 、 H_F 的干物质分别比 CK_F 减少11.09%和15.40%,根冠比分别比 CK_F 减少9.81%和18.14%。去根处理的干物质和根冠比在成熟期比对照都有所增加,干物质是去除程度越小增加越大,而根冠比则是去除程度越大增加越大(表4)。其中 Q_X 、 H_X 的干物质分别比 CK_X 增加7.36%和4.8%,根冠比分别比对照增加27.62%和37.34%; Q_F 、 H_F 的干物质分别比 CK_F 增加15.91%和3.50%,根冠比分别比对照增加4.87%和90.51%,且后者达极显著水平。

表3 各生育期不同处理下根系的几种重要指标比较

Tab. 3 Root indexes of different treatments at different growth stages

生育期	处理	根干质量 (g)	根长 (cm)	根体积 (ml)	根半径 (cm)	根表面积 (cm ²)
孕穗期	CK_X	0.23 ^a	2457.93 ^a	1.87 ^a	0.0156 ^a	247.10 ^a
	H_X	0.16 ^a	1813.00 ^a	1.37 ^a	0.0179 ^a	173.97 ^a
	Q_X	0.18 ^a	2171.46 ^a	1.45 ^a	0.0138 ^a	176.59 ^a
	CK_F	0.29 ^a	3017.48 ^a	2.58 ^a	0.0124 ^b	211.33 ^a
	H_F	0.19 ^a	1988.26 ^a	1.18 ^a	0.0192 ^a	237.50 ^a
	Q_F	0.20 ^a	2850.61 ^a	2.33 ^a	0.0165 ^{ab}	289.60 ^a
开花期	CK_X	0.51 ^a	5130.83 ^a	3.73 ^a	0.0145 ^a	460.13 ^a
	H_X	0.09 ^b	858.50 ^b	0.77 ^b	0.0159 ^a	83.42 ^b
	Q_X	0.20 ^{ab}	2008.57 ^{ab}	1.55 ^{ab}	0.0151 ^a	188.44 ^{ab}
	CK_F	0.54 ^a	8462.56 ^a	4.08 ^a	0.0122 ^b	652.44 ^a
	H_F	0.38 ^a	4944.24 ^a	2.97 ^a	0.0133 ^{ab}	410.88 ^a
	Q_F	0.47 ^a	5981.12 ^a	3.53 ^a	0.0136 ^a	505.85 ^a
成熟期	CK_X	0.26 ^a	3568.97 ^b	1.60 ^b	0.0139 ^a	382.83 ^a
	H_X	0.37 ^a	6097.00 ^a	2.45 ^a	0.0102 ^b	308.84 ^a
	Q_X	0.35 ^a	5407.38 ^{ab}	2.13 ^{ab}	0.0095 ^b	315.71 ^a
	CK_F	0.28 ^{bb}	5419.92 ^b	1.85 ^{bb}	0.0144 ^A	489.51 ^a
	H_F	0.55 ^{aA}	9205.63 ^A	3.73 ^{aA}	0.0109 ^B	472.24 ^a
	Q_F	0.35 ^{bAB}	6856.35 ^{AB}	2.45 ^{bAB}	0.0080 ^C	458.95 ^a

表4 各生育期不同去根处理间地上干物质、根冠比的比较
Tab. 4 Shoot dry matter and root/shoot ratio of different treatments at different growth stages

品种	处理	干物质(g)			根冠比(%)		
		孕穗期	开花期	成熟期	孕穗期	开花期	成熟期
新冬1号	CK_X	2.40 ^a	4.54 ^a	6.66 ^a	9.30 ^a	11.21 ^a	3.91 ^a
	H_X	1.31 ^a	2.45 ^a	6.98 ^a	11.73 ^a	4.69 ^a	5.37 ^a
	Q_X	2.32 ^a	4.33 ^a	7.15 ^a	7.82 ^a	4.73 ^a	4.99 ^a
繁13	CK_F	2.11 ^a	6.04 ^a	6.85 ^a	13.31 ^a	9.48 ^a	4.11 ^B
	H_F	1.83 ^a	5.11 ^a	7.09 ^a	10.28 ^a	7.76 ^a	7.83 ^A
	Q_F	1.88 ^a	5.37 ^a	7.94 ^a	10.57 ^a	8.55 ^a	4.31 ^B

由表4可以看出:从孕穗期到开花期,去根处理的干物质增加量与对照基本持平。如CK_X的干物质增加了89.56%,而Q_X、H_X干物质分别增加了87.26%、86.77%;CK_F的干物质增加了186.71%,而Q_F、H_F的干物质分别增加了178.73%、185.64%。从开花期到成熟期去根处理的干物质增加量与对照相比明显增大。如CK_X的干物质增加了46.70%,而Q_X、H_X的干物质分别增加了184.90%和65.13%;CK_F的干物质增加了13.41%,而Q_F、H_F的干物质分别增加了38.75%和47.86%。

由表5可以看出,根系去除后整株生物量和主

茎生物量均比对照增大,去除1/4根系的增加幅度大,去根处理的无效分蘖生物量比对照减小,去除1/4根系的减小幅度大。去根处理后无论是主茎还是分蘖的穗长、穗质量、穗粒数和粒质量与对照相比都有所增加。其中去除1/4根系主茎的穗长、穗质量、穗粒数和粒质量增加较大,新冬1号分别比对照增大6.79%、19.11%、21.46%和17.87%,繁13分别比对照增大17.36%、34.54%、21.46%和40.60%;而去除1/2根系分蘖的穗长、穗质量、穗粒数和粒质量增加较大,新冬1号分别比对照增大13.29%、17.25%、16.72%和14.29%,繁13分别比对照增大15.68%、30.64%、36.95%和32.70%。

表5 收获时不同处理各测定项目的比较

Tab. 5 Comparison of determining items of different treatments at harvest

品种	处理	穗长(cm)		整株生物量(g)	主茎生物量(g)	无效分蘖生物量(g)	穗质量(g)		穗粒数(个)		粒质量(g)	
		主茎	分蘖				主茎	分蘖	主茎	分蘖	主茎	分蘖
新冬1号	CK _X	6.48 ^a	5.19 ^a	6.67 ^a	2.40 ^a	0.17 ^a	1.57 ^a	2.84 ^a	27.17 ^a	53.83 ^a	1.23 ^a	2.17 ^a
	H _X	6.77 ^a	5.88 ^a	6.98 ^a	2.58 ^a	0.14 ^a	1.72 ^a	3.33 ^a	28.67 ^a	62.83 ^a	1.36 ^a	2.48 ^a
	Q _X	6.92 ^a	5.79 ^a	7.15 ^a	2.67 ^a	0.06 ^a	1.87 ^a	3.13 ^a	33.00 ^a	57.33 ^a	1.45 ^a	2.32 ^a
繁13	CK _F	6.97 ^a	6.44 ^a	6.85 ^a	2.88 ^b	0.36 ^a	1.94 ^a	2.35 ^a	29.50 ^a	37.00 ^b	1.33 ^a	1.59 ^a
	H _F	7.58 ^a	7.45 ^a	7.09 ^a	3.04 ^{ab}	0.27 ^a	2.08 ^a	3.07 ^a	31.00 ^a	50.67 ^a	1.46 ^a	2.11 ^a
	Q _F	8.18 ^a	7.11 ^a	7.94 ^a	3.64 ^a	0.07 ^a	2.61 ^a	2.61 ^a	35.83 ^a	39.00 ^{ab}	1.87 ^a	1.82 ^a

4 讨论

4.1 冬小麦根系生长在充分灌溉条件下存在一定的冗余

在土壤干旱条件下根多有利于吸水,在充分灌溉条件下土壤不缺水,根多当然就成了冗余。本试验中,两个冬小麦品种在根系去除后生长都没有受到影响。去根处理的植株在生育前期和中期的干物质和根冠比虽然比对照减少,但均没有显著性差异。在成熟期其根干质量、根长、根体积等根系衡量指标以及干物质、根冠比、穗长、穗质量、穗粒数、粒质量等产量构成因素都比对照增加。说明冬小麦根系在充分灌溉条件下存在一定的生长冗余。所以,可以肯定在一定干旱条件下冬小麦的部分冗余根系仍然可以保证其正常生长。

4.2 冬小麦的补偿和超补偿效应

去除根系的植株在生长前期遭到人为的破坏生长受到限制,分蘖数较少。随后为了抵抗破坏对自身的影响,产生了适应机制——补偿(原保忠等,1998),以弥补破坏造成的损失,因而刺激产生了更多的分蘖,以至于到后期分蘖数超过对照。这说明

去除一部分根系后(少部分冗余根系也被去除),剩下的冗余根系能满足植株的生长要求,植株也发展新根系以补充损失的冗余量实现“冗余补充(redundancy recruitment)”。较大程度的人为破坏(去除1/2根系的处理)加大了植株的营养生长,而生殖生长受到了限制,所以其有效分蘖数比去除1/4根系的处理少。

研究表明(马元喜等,1999)根系生长量在开花期达最大。本试验去除根系的处理在成熟期根系生长量比开花期大,可能因为遭到人为破坏后生长前期植株的生长受到一定程度的限制,在生长中期虽然产生了一定的冗余补充但还没有完全恢复,在生长末期根系生长产生了超补偿效应,根系生长量达最大。

本试验,从孕穗期到开花期,去根处理的干物质增加量与对照基本持平;从开花期到成熟期去根处理的干物质增加量与对照相比明显增大。说明受到人为干扰的冬小麦在生长中期根系生长产生了补偿效应,而在生长末期产生了超补偿效应。

4.3 冬小麦在充分灌溉条件下至少有1/4的根系是冗余的

本试验去除根系处理的穗长、穗质量、穗粒数、

粒质量等指标与对照相比都增大。但去除 1/4 根系处理主茎的各项指标增加幅度较大,而去除 1/2 根系处理分蘖的各项指标增加幅度较大。成熟时有时由于分蘖太多会出现“青黄不接”的现象,即主茎已完全成熟,而分蘖还未成熟,所以分蘖多不一定能增产,但可以推测冬小麦在充分灌溉条件下至少有 1/4 的根系是冗余的。

冗余根系使得植株在遭到竞争抑制或扰动受损的情况下继续维持正常活力。在受损较小的情况下,植株依靠冗余而不必进行伤口恢复和器官再生就可很快恢复到正常。如果受损影响到了冗余,植株也会及时进行自我修复,保持足够的冗余量。这种有效的“替代”与“补偿”对策显然对激烈的竞争极为有利(任明讯和吴振斌,2001)。

本试验虽然是盆栽试验,但结果具有一定的理论意义,为今后河西干旱区实施节水灌溉农业提供了一定的理论依据。然而由于盆栽苗和大田作物生长环境大相径庭,再者本试验的去根处理在大田试验中的操作上具有一定困难,所以大田中的试验结果如何还有待进一步研究。

参考文献

党承林,王崇云. 1999. 生态系统的能量冗余与热力学第二定律. *生态学杂志*, **18**(1):53-58.

党承林. 1998. 也谈作物的冗余. *生态学杂志*, **17**(4):70-74.

韩明春,吴建军,王芬. 2005. 冗余理论及其在农业生态系统管理中的应用. *应用生态学报*, **16**(2):375-378.

李话,张大勇. 1999. 半干旱地区春小麦根系形态特征与生长冗余的初步研究. *应用生态学报*, **10**(1):26-30.

李捷,吴慎杰,杨小鹏,等. 2002. 半干旱区春小麦生长冗余的研究. *湖北农业科学*, (1):26-27.

马元喜. 1999. 小麦的根. 北京:中国农业出版社:102.

任明讯,吴振斌. 2001. 植物的冗余及其生态学意义. I. 大型水生植物生长冗余研究. *生态学报*, **21**(7):1072-1078.

盛承发. 1990. 生长的冗余——作物对于害虫超越补偿作用的一种解释. *应用生态学报*, **1**(1):20-30.

许宝泉,张荣,张大勇,等. 2003. 旱农区春小麦根系生长冗余与碳平衡关系的研究. *西北植物学报*, **23**(6):958-963.

原保忠,王静,赵松岭. 1998. 植物补偿作用机制探讨. *生态学杂志*, **17**(5):45-49.

张荣,张大勇. 2000. 半干旱区春小麦不同年代品种根系生长冗余的比较实验研究. *植物生态学报*, **24**(3):298-303.

张大勇,姜新华,赵松龄,等. 1995. 半干旱区作物根系生长冗余的生态学分析. *西北植物学报*, **15**(5):110-114.

张大勇,姜新华,赵松龄. 1995. 再论生长冗余. *草业学报*, **4**(3):17-22.

赵发清. 1996. 作物的生长冗余和生命体的节约原则. *生态学杂志*, **15**(1):32-34.

Austin RB. 1987. Some crop characteristics of wheat and their influence on yield and water use// Srivastava JP, ed. *Drought Tolerance in Winter Cereal*. New York: John Wiley & Sons:325-336.

Donald CM. 1981. Competitive plants, communal plants, and yield in wheat crops//Evans LT, ed. *Wheat Science: Today and Tomorrow*. Cambridge: Cambridge University Press:223-247.

Donald CM, Hamblin J. 1983. The convergent evolution of annual seed crops in agriculture. *Advances in Agronomy*, **36**:9-143.

Hurd EA. 1974. Phenology and drought tolerance in wheat. *Agricultural Meteorology*, **14**:39-55.

Passioura JB. 1983. Root and drought resistance. *Agricultural Water Management*, **7**:256-280.

Weiner J. 1990. Plant population ecology in agriculture// Ronald C, ed. *Agroecology*. New York: McGraw Hill Publishing Company:235-261.

作者简介 侯慧芝,女,1980年生,硕士研究生。主要从事农业生态学的研究。E-mail:houhuizhi666@yahoo.com.cn
责任编辑 李凤芹
