文章编号:1000-7601(2017)03-0029-09 doi:10.7606/j.issn.1000-7601.2017.03.05

关中灌区冬小麦混种的产量及农田土壤水分利用效率

施成晓,陈 婷,冯 帆,王昌江,吕晓康,张 磊,廖允成,秦晓梁
(西北农林科技大学农学院,陕西 杨凌 712100)

摘 要: 为探明不同冬小麦品种混种对产量和水分利用效率的影响。选用冬小麦西农 979、小偃 22、矮抗 58 和西农 889,于 2013—2014 和 2014—2015 两年在西北农林科技大学斗口试验站开展田间试验,设置 4 个水平:单播(1L)、2 个品种混种(2L)、3 个品种混种(3L)和 4 个品种混种(4L),系统测定并比较不同混种水平群体生物量、子粒产量和农田土壤水分利用效率等。结果表明,灌浆期的混种群体光截获率、旗叶 SPAD 值、净光合速率和瞬时水分利用效率均显著大于单作群体。混种群体子粒产量和地上生物量均高于单作群体,子粒产量增幅随混种品种数量的增加逐渐降低,两年平均增幅为 7.92%(2L)、7.15%(3L)和 2.73%(4L),其中 2L 和 3L 达显著水平,地上生物量增幅随混种品种数量的增加逐渐升高,两年平均增幅为 1.08%(2L)、4.78%(3L)和 7.24%(4L),3L 和 4L 达显著水平,通径分析表明混播下子粒产量的增加得益于单位面积穗数和穗粒数增加。混种增加了群体浅层土壤含水量和深层土壤中的根系分布,显著降低群体耗水量,并显著提高群体水分利用效率(WUE),子粒 WUE 两年平均提高 11.93%(2L)、12.39%(3L)和 8.72%(4L),地上干物质 WUE 两年平均提高 3.3%(2L)、8.66%(3L)和 11.75%(4L)。不同品种冬小麦混种可以提高水分利用效率,增加子粒产量。

关键词: 冬小麦;混种;产量;地上生物量;水分利用效率
中图分类号: S512.1+1;S314 **文献标志码:** A

Production of mixed planting winter wheat and soil water efficiency in Guanzhong Irrigation Zone

SHI Cheng-xiao, CHEN Ting, FENG Fan, WANG Chang-jiang, LV Xiao-kang, ZHANG Lei, LIAO Yun-cheng, QIN Xiao-liang
(*College of Agronomy*, *Northwest A&F University*, *Yangling*, *Shaanxi* 712100, *China*)

Abstract: The field experiments were conducted in 2013—2014 and 2014—2015 at Doukou Experimental Station of Northwest A&F University to explore effects of mixed planting of four cultivated winter wheat varieties (Xinong 979, Xiaoyan 22, Aikang 58 and Xinong 889) on population yield and water use efficiency. The above-ground biomass of population, grain yield, water use efficiency were determined with pure stands of each variety (1L), mixture of two varieties (2L), mixture of three varieties (3L) and mixture of four varieties (4L). Results indicated that the canopy light interception rate, flag leaf SPAD value, net photosynthetic rate and instantaneous WUE of mixed population were significantly higher than those of monoculture group during filling period. Grain yield and above-ground biomass of mixed population were higher than those of monoculture group. The grain yield decreased with the increase in mixed level, and the average increase in two years were 7.92%(2L), 7.15%(3L) and 2.73%(4L) respectively, with the increase of 2L and 3L reaching significant level. Above-ground biomass showed an rising trend with the increase in mixed level , and the average increase in two years were 1.08%(2L), 4.78%(3L) and 7.24%(4L) respectively, with the increase of 3L and 4L reaching significant level. The increase in grain yield was attributed to the augment of spike number (per area) and ker-

收稿日期: 2016-03-14 **修回日期:** 2017-05-15
基金项目: 国家科技支撑计划(2015BAD22B03-05);陕西省科技统筹创新工程计划项目(2015KTZDNY01-02)
作者简介: 施成晓(1991—),男,云南大理人,硕士研究生,研究方向为旱区作物高效栽培。E-mail:shichengxiao0509@163.com。
通信作者: 廖允成,E-mail:yunchengliao@163.com。
秦晓梁,E-mail:xiaoliangqin2006@163.com。

nel (per spike). Mixed planting increased water content of upper soil layer and root distribution in deeper soil layer, and significantly decreased water consumption of population during whole growth period. Besides, mixed planting improved water use efficiency(WUE), average WUE of grain in two years increased by 11.93%(2L), 12.39%(3L) and 8.72%(4L), and average WUE of above-ground biomass in two years increased by 3.3%(2L), 8.66%(3L) and 11.75%(4L) respectively. It is concluded that mixed planting of cultivated winter wheat varieties could increase grain yield with better water use efficiency.

Keywords: winter wheat; mixture; yield; above-ground biomass; water use efficiency

在现代农业生产系统中,集约化单一种植模式造成农田生物多样性越来越低,作物病害越来越严重,农药投入越来越多,土壤退化侵蚀加重[1-2]。有学者提出利用生物多样性理论法则构建可持续农业生态系统是模拟自然生态系统的有效方法[3]。草地生物多样性研究发现单位面积生物产量随着混种品种多样性指数增加而增加[4-5]。利用不同作物构建混合群体是农业生产上模拟自然生态系统常用的方法[6],但不同作物成熟期不同的特点与发展农业机械化生产相矛盾,因此利用同种作物不同品种构建混种群体成为多样性理论在生产上应用的有效途径[7]。

品种混种能减轻生物胁迫和非生物胁迫对于作物产量造成的损害[3]。不同抗病性品种混种有效降低易感病品种发病率,减少农药使用,有利于减轻农田环境污染[8-9],并获得比单播平均产量更高更稳定的子粒产量[10],堪萨斯州和华盛顿州的小麦混播面积在10%~15%之间[11];在中国云南省,两年4 145hm^{2}水稻混播试验是世界上种植规模最大的混种试验之一,比起单播,混种使稻瘟病发病率降低94%,增产89%[12]。生物学性状互补的不同品种混种能更高效地利用环境中限制性资源,比如水分和养分,使混种群体获得高产[3]。高秆和中秆大麦混种能充分利用地上的光能,有极显著的增产效果[13],三个春小麦等比例混种在传统农田和有机农田中,发现两种农田中混种群体均具有增产和稳产效果[14]。

水资源缺乏是小麦生产面临的主要限制因素之一,干旱半干旱区挖掘小麦高产潜力的主要措施之一在于提高麦田水资源转化效率,最大限度地减少地表水分蒸发和增加深层土壤水分的高效吸收[15-17]。目前研究主要通过集雨技术、灌溉节水和工程节水来提高水分利用效率,比如沟垄覆膜种植[18-19];而不同的作物根系吸水能力存在差异[3],高效吸收深层土壤水分提高水分利用效率大多经过调节作物根系大小及根系分布来实现,增加根系在深层土壤中的分布可以增强根系吸收土壤水分,提高旱区谷类作物的水分利用效率[20-21]。通过不同品种混种来提高水分利用效率成为可能,目前成功的例子涉及大麦和春小麦[13-14],关于冬小麦的研究未见详细报道。

冬小麦是我国重要的粮食作物,但关于冬小麦品种混种的研究主要偏向于病虫害防治,且局限于两个品种,而不同冬小麦品种混种对环境资源利用潜力的研究较为欠缺,此外混种品种数量是否影响群体产量和水分利用效率也鲜有研究。因此,本研究选取4个不同冬小麦品种,设置4个混种水平,通过测定混种群体性状指标和对资源的利用特征,验证冬小麦多品种混种能否提高子粒产量,比较4个不同混种水平群体间产量和农田土壤水分利用等方面的差异,以期为冬小麦混种技术提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

本试验选用西农979(A)、小偃22(B)、矮抗58(C)和西农889(D)为材料,4个品种均为西北地区主栽品种。

1.2 试验地概况

试验于2013—2014(简称2013)、2014—2015(简称2014)两年在陕西省咸阳市泾阳县西北农林科技大学斗口试验站(108°52′E,34°36′N)进行。该区平均海拔高度427.4 m,年平均气温12.9℃,年日照时数2 095 h,全年太阳总辐射473.55 kJ·cm^{-2},年积温(≥10℃)4 415℃,平均无霜期218 d,年均降水量为540 mm左右。试验地以小麦—玉米一年两熟轮作种植为主,肥力均匀一致,供试土壤为塿土,试验地0~20 cm土层基本养分状况为:有机质14.60 g·kg^{-1},碱解氮99.40 mg·kg^{-1},速效磷22.24 mg·kg^{-1}。冬小麦生育期内降水量分别为188.3 mm和204.2 mm,分布情况如图1,12月到次年2月份降雨量较少,于12月底灌水一次,灌溉量分别为205 mm和197 mm。

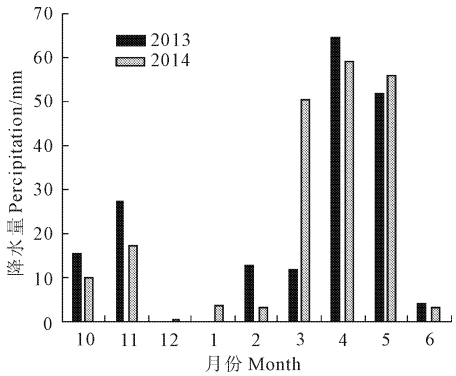

图 1　冬小麦生育期内降雨分布情况

Table 1　Rainfall distribution in growth period of winter wheat

1.3　试验设计

试验采用完全随机区组设计,采用不同品种分行混种,共 4 个混种水平:单播(1L)分 A、B、C 和 D 单种;两个品种混种(2L)分为 AB、AC、AD、BC、BD 和 CD 混种;三个品种混种(3L)分为 ABC、ABD、ACD 和 BCD 混种;四个品种混种(4L)分为 ABCD、CADB 和 BACD 混种。播种时间均为 10 月 12 日,收获期均为次年 6 月 6 日,人工条播,播种深度为 5 cm,小区长 2.5 m、宽 4 m,每个小区条播 16 行,行距 25 cm,单播与混种播种量均为 350 粒·m^{-2},各品种播种比例均为 1∶1,每处理三个重复,待出苗两周后定苗。试验地按常规进行水肥管理,播种前一次性配施尿素(N 375 kg·hm^{-2})、过磷酸钙(P_2O_5 120 kg·hm^{-2})、氯化钾(KCl 90 kg·hm^{-2})作为基肥。

1.4　测定指标及方法

1.4.1　*单位面积茎数积累动态*　小麦出苗两周后,每个小区每个品种选取出苗均匀的 1 m 样段,用地插牌标记,于冬前分蘖期(12 月 12 日)、拔节期(3 月 12 日)、孕穗期(4 月 14 日)、开花期(4 月 30 日)和灌浆期(5 月 20 日)统计该 1 m 样段茎数,各小区均折算成单位面积茎数,混种小区茎数取该小区各品种茎数平均值。

1.4.2　*旗叶 SPAD 值、旗叶面积和光合指标*　灌浆期用叶绿素含量测定仪(SPAD - 502 Chlorophyll Meter Model)随机测定每个小区每个品种旗叶 SPAD 值。矫正系数法测定旗叶叶面积:旗叶叶面积 = 长 × 宽 × 矫正系数,其中矫正系数依照刘自华[22]的方法,取值为 0.76。于灌浆期晴朗无风上午 9∶30—11∶30,用 Li - 6400XT(美国)光合仪测定净光合速率(Pn)和蒸腾速率(Tr),并计算旗叶瞬时水分利用效率(WUE_{leaf}): $WUE_{leaf} = Pn/Tr$。

1.4.3　*光截获率*　灌浆期用 3415F 光量子测量仪测定每个小区群体冠层顶部(距离地面 1 m 处)和基部(距离地面 10 cm 处)的光量子,顶部随机测量 3 次,底部测量 8 次,计算各处理光截获率:光截获率 = $(Q_1 - Q_2)/Q_1 \times 100\%$,式中,$Q_1$ 为冠层顶部光量子(3 次测量平均值),Q_2 为基部光量子(8 次测量平均值)。

1.4.4　*产量及产量构成因素*　成熟前一周,每个小区每个品种随机取 15 个穗,统计穗粒数;成熟期每个小区每个品种取 1 m 长势均匀的样段,统计穗数和千粒重,并称量地上干物质(Y_b)和子粒重量(Y_g)。

1.4.5　*根系生物量*　收获后测定 0 ~ 160 cm 土层根系生物量,取样间隔为 20 cm,用内径为 9 cm 的根钻在每个处理各个品种所在的行内和行间分别打土取根,用孔径为 0.4 mm 的网筛洗出根系,并用镊子挑出杂质,80℃下烘干称重,并折算单位面积根系生物量。

1.4.6　*水分利用效率*　播种前采用五点取样法于试验地选取 5 个具有代表性样点,用烘干法测定 0 ~ 200 cm 土层土壤含水量;收获后用烘干法测定每个小区 0 ~ 200 cm 土层土壤含水量,采样剖面间隔均为 20 cm,测定土壤含水量(WC): $WC = (W_1 - W_2)/W_2 \times 100\%$,并计算每个小区耗水量($WU$): $WU = P + I + S$,式中:W_1 为湿土重,W_2 为干土重;P 为生育期内降水量,I 为生育期内灌溉量,S 为播种前和收获后土壤水分变化量,再计算水分利用效率 WUE: $WUE = Y/WU$,式中:Y 为小麦产量,包括地上生物量(Y_b)和子粒产量(Y_g)。

1.5　数据整理与统计

用 Microsoft Excel 2010 整理数据,文中各混种水平所有指标数据均为群体均值,即对各混种水平下各处理进行平均,得到各混种水平群体的平均值(1L 群体均值为 A、B、C 和 D 的平均值;2L 群体均值为 AB、AC、AD、BC、BD 和 CD 的平均值;3L 群体均值为 ABC、ABD、ACD 和 BCD 的平均值;4L 群体均值为 ABCD、CADB 和 BACD 的平均值),各混种水平群体均为三个重复,利用 SPSS19.0 统计分析软件进行单因素方差分析,Duncan 新复极差法检验显著性,显著性水平为 0.05,通过通径分析比较各混种水平群体子粒产量(Y)与产量构成因素(穗数:X_1、穗粒数:X_2、千粒重:X_3)之间的关系,Sigmaplot 12.5 绘图软件作图。

2　结果与分析

2.1　不同混种水平对株高的影响

西农 979 和矮抗 58 的株高在不同混种水平下

无显著变化($P>0.05$),其中矮抗 58 的株高随混种水平增加逐渐减小,小偃 22 和西农 889 在混种条件下株高均大于单作,2L 混种下增加不显著($P>0.05$),3L 和 4L 混种下均显著增加($P<0.05$)(表 1)。

2.2 不同混种水平冬小麦群体单位面积茎数变化动态

不同混种水平冬小麦群体单位面积茎数变化动态相同,随着生育期先增加后下降,拔节期达到最大值(图 2)。整个生长过程中,混种群体单位面积茎数均多于单作,开花期(4 月 30 日)前为:2L > 3L > 4L > 单播,开花期后表现为:3L > 2L > 4L > 单播,其中 2013 年混种群体单位面积茎数均显著多于单作($P<0.05$),2014 年混种群体单位面积茎数在开花期(4 月 30 日)前显著多于单作($P<0.05$),开花期后 3L 混种群体单位面积茎数显著多于单作和 2L、4L 混种群体($P<0.05$)。

表 1 不同混种水平对冬小麦株高的影响

Table 1 Effect of mixed level on plant height of winter wheat

混种水平 Mixture level	西农 979 Xinong 979		小偃 22 Xiaoyan 22		矮抗 58 Aikang 58		西农 889 Xinong 889	
	2013	2014	2013	2014	2013	2014	2013	2014
1L	78.6 a	80.7 a	86.1 c	90.0 b	68.8 a	73.3 a	82.7 b	84.3 b
2L	79.1 a	80.9 a	87.2 b	90.6 b	67.4 a	73.1 a	83.2 b	85.0 b
3L	78.0 a	80.4 a	89.3 a	92.5 a	67.8 a	72.0 a	84.3 a	87.0 a
4L	79.0 a	80.4 a	89.7 a	93.2 a	67.5 a	71.6 a	84.6 a	87.1 a

注:同列中不同字母表示同一品种不同混种水平间差异达 0.05 显著水平;表 2、表 3 相同。

Note: Different letters indicate significant difference between mixed level of same variety at 0.05 level. The same as below.

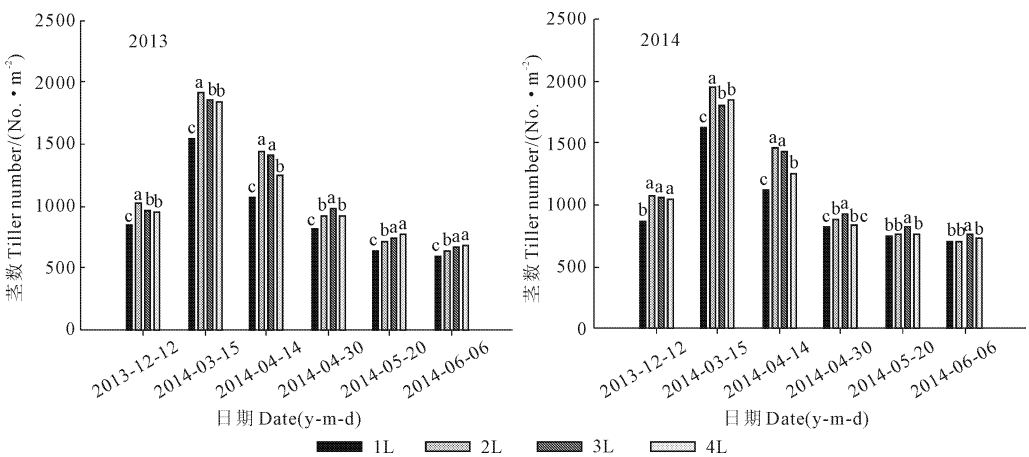

图 2 不同混种水平下冬小麦单位面积茎数积累变化动态

Fig.2 Dynamic change of tiller number of winter wheat at different mixed level

注:图中同一时期内不同字母表示 0.05 水平差异显著

Note: Different letters within the same date indicate significant difference at 5% level.

2.3 不同混种水平对冬小麦群体光截获率及旗叶 SPAD 值的影响

两年试验中,灌浆期各水平混种群体光截获率均大于单作群体,混种水平越高光截获率越大,2013 年灌浆期 3L 和 4L 混种群体光截获率显著大于单作($P<0.05$),2014 年灌浆期三个混种群体光截获率均显著大于单作($P<0.05$)(图 3a);2013 年灌浆期,3L 混种群体旗叶 SPAD 值显著大于单作($P<0.05$),2014 年灌浆期三个混种群体旗叶 SPAD 值显著大于单作($P<0.05$)(图 3b)。

2.4 不同混种水平对冬小麦群体旗叶面积、净光合速率、蒸腾速率和叶片瞬时水分利用效率的影响

灌浆期不同水平混种均显著影响冬小麦群体旗叶面积、净光合速率、蒸腾速率和叶片瞬时水分利用效率(表 2)。混种群体旗叶面积和净光合速率均显著大于单作群体($P<0.05$),两年结果均为 3L > 2L > 4L > 单播;混种群体旗叶蒸腾速率小于单播群体,两年试验均为单播 > 2L > 3L > 4L,其中 2014 年达到显著水平($P<0.05$);混播群体旗叶瞬时水分利用效率显著高于单播群体($P<0.05$)。

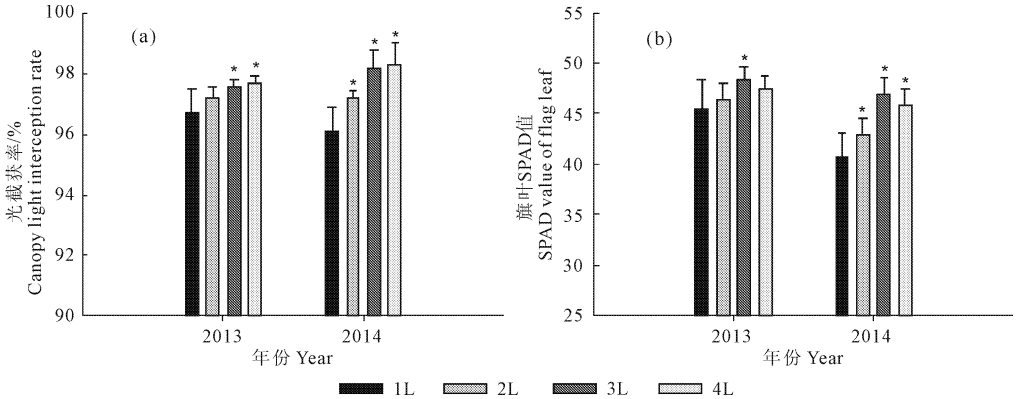

图 3　不同混种水平下冬小麦群体灌浆期光截获率和旗叶 SPAD 值

Fig.3　Canopy light interception rate and flag leaf SPAD value of population at different mixed level in filing stage

注:图中 * 表示间作与单播间在 0.05 水平达显著差异。

Note: * Indicates significant difference at 0.05 level between mixture and monoculture

表 2　不同混种水平冬小麦群体灌浆期旗叶面积、净光合速率、蒸腾速率和叶片瞬时水分利用率

Table 2　Flag leaf area, photosynthetic rate (Pn), transpiration rate (Tr) and leaf water use efficiency (WUE_{leaf}) of winter wheat population at different mixed level in filing stage

年份 Year	混合水平 Mixed level	旗叶面积 Flag leaf area /cm^2	净光合速率 Pn /(μmol·m^{-2}·s^{-1})	蒸腾速率 Tr /(mmol·m^{-2}·s^{-1})	叶片瞬时水分利用效率 WUE_{leaf} /(μmol·mmol^{-1})
2013	1L	20.31 d	15.79 c	8.48 a	1.86 c
	2L	23.88 b	16.14 bc	8.32 ab	1.94 b
	3L	24.89 a	16.53 a	8.27 ab	2.00 ab
	4L	23.14 c	16.49 ab	8.16 b	2.02 a
2014	1L	19.29 d	15.96 c	8.87 a	1.80 b
	2L	22.42 b	16.28 b	8.33 b	1.95 a
	3L	23.05 a	16.54 a	8.24 b	2.01 a
	4L	21.74 c	16.32 ab	8.13 b	2.01 a

2.5　不同混种水平对冬小麦群体根系分布的影响

不同冬小麦群体根系生物量主要分布在 0 ~ 0.8 m 土层,0 ~ 0.4 m 根系分布最多(图 4a)。在 0 ~ 0.2 m 土层,混种群体根系分布均少于单作群体,根系生物量所占比例也小于单作群体(图 4b);0.2 m 以下土层,混种群体根系分布均比单作群体多,土层越深,混种群体根系分布越多,深层根系所占比例比单作大,均表现为:4L > 3L > 2L > 单作。

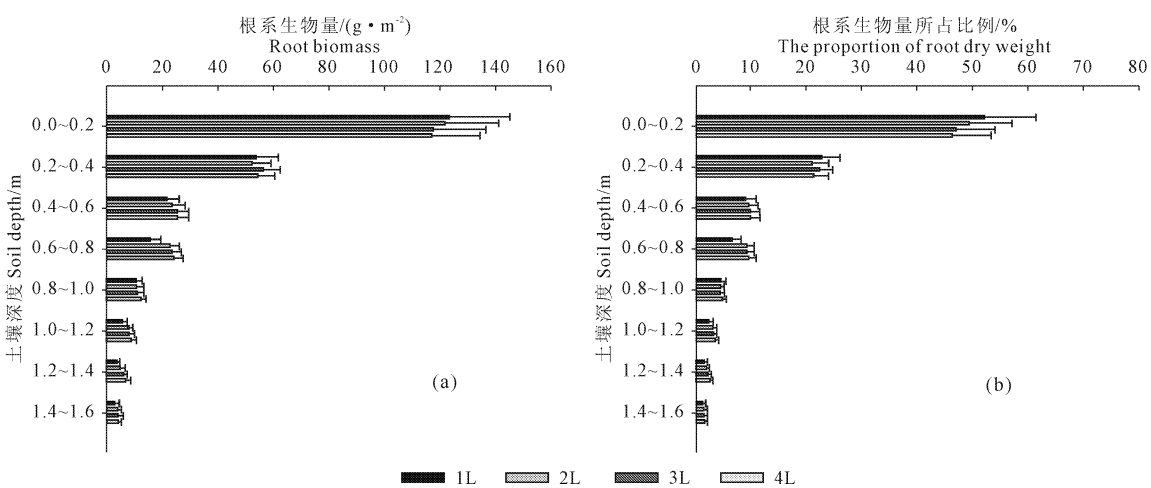

图 4　2014 年不同混种水平对冬小麦群体根系分布的影响

Fig.4　Effect of mixed level on root distribution of population in 2014

2.6 不同混种水平对冬小麦群体产量构成因素的影响

两年试验中,不同数量冬小麦品种混种均能增加单位面积穗数(表3),2013年三个混种群体穗数均显著增加,2014年3L和4L混种群体穗数显著增加($P<0.05$);不同混种水平群体穗粒数与单播相比,2L和3L混种的群体穗粒数高于单作,4L混种穗粒数低于单作,差异均不显著($P>0.05$);除3L混种群体千粒重在2013年大于单作外,其余混种群体千粒重均小于单作,差异均不显著($P>0.05$)。

通径分析表明(表4),单作群体的千粒重对子粒产量作用最大,穗粒数次之,单位面积穗数作用最小;2L和3L混种群体的千粒重对子粒产量作用最大,单位面积穗数次之,穗粒数最小;4L混种群体的穗粒数对子粒产量作用最大,单位面积穗数次之,千粒重作用最小。与单播相比,混播群体的单位面积穗数和穗粒数对子粒产量的贡献作用增大。

表3 不同混种水平对冬小麦群体穗数、穗粒数和千粒重的影响

Table 3 Effect of different mixed level on spike number, kernel number (per spike) and thousand kernel weight of winter wheat

混合水平 Mixed level	穗数 Spike number/m^2		穗粒数 Kernel number/spike		千粒重 Thousand kernel weight/g	
	2013	2014	2013	2014	2013	2014
1L	608 c	710 b	31.5 a	31.3 a	39.37 a	40.73 a
2L	647 b	716 b	32.1 a	32.7 a	39.30 a	40.43 a
3L	671 a	747 a	32.5 a	33.3 a	39.42 a	39.47 a
4L	668 a	727 ab	31.1 a	31.2 a	39.25 a	39.75 a

表4 不同混种水平群体子粒产量与产量构成因素(穗数、穗粒数和千粒重)之间回归模型及通径系数

Table 4 Results of regression model and path coefficient between grain yield (GY) and yield components (SN, SKN, TKW) at different mixed level

混种水平 Mixed level	产量构成因素 Yield components	通径系数 Path coefficient	回归模型 Regression model	R^2
1L	SN (X_1)	0.315	$Y=-1411.268+0.485X_1+5.742X_2+5.253X_3$	0.455*
	SKN (X_2)	0.387		
	TKW (X_3)	0.695		
2L	SN (X_1)	0.582	$Y=-1750.083+0.962X_1+14.830X_2+34.509X_3$	0.539*
	SKN (X_2)	0.406		
	TKW (X_3)	0.670		
3L	SN (X_1)	0.636	$Y=-2397.191+0.948X_1+18.228X_2+34.059X_3$	0.644*
	SKN (X_2)	0.579		
	TKW (X_3)	0.842		
4L	SN (X_1)	0.599	$Y=-2083.809+1.234X_1+24.816X_2+30.021X_3$	0.726*
	SKN (X_2)	0.836		
	TKW (X_3)	0.526		

注:*表示0.05水平上显著;SN—穗数,SKN—穗粒数,TKW—千粒重。

Note: * indicates correlation significance at 0.05 level. SN – Spike number, SKN – Spike kernel number, TKW – 1000-kernel weight.

2.7 不同混种水平对冬小麦群体土壤含水量、耗水量、收获指数和水分利用效率的影响

两年试验播前土壤含水量均大于收获期,收获后,混种群体0~1.2 m土层土壤含水量均大于单播群体(图5),不同混种水平冬小麦群体田间土壤含水量不同,说明不同混种群体耗水量不同(表5)。两年试验混种群体耗水量均显著少于单作($P<0.05$),表现为单作>2L>3L>4L,两年数据平均,混种能降低2.4%~4.3%的耗水量。2L和3L混种能显著提高群体子粒产量($P<0.05$),两年平均混种比单作增产7.92%(2L)、7.15%(3L)和2.73%(4L);3L和4L混种能显著增加地上干生物量($P<0.05$),两年平均混种比单作分别增加7.24%(4L)、4.78%(3L)和1.08%(2L)。不同混种水平群体收获指数也不同,2L混种群体收获指数最大,显著高于其它水平($P<0.05$),4L混种群体收获指数最低,显

著低于单播($P<0.05$)。混种能显著提高群体水分利用效率($P<0.05$),两年试验平均各混种群体子粒水分利用效率分别提高 12.39%(3L)、11.93%(2L)和 8.72%(4L),地上干物质水分利用效率随混种水平增加而增加,分别提高 11.75%(4L)、8.66%(3L)和 3.3%(2L)。

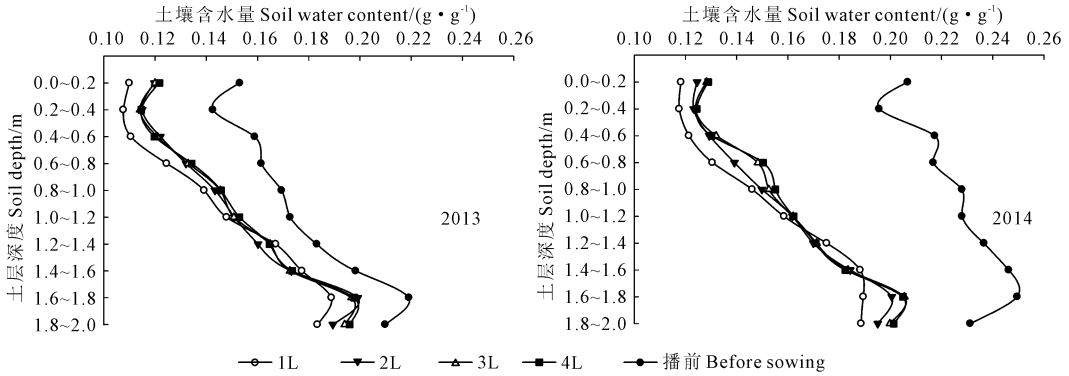

图 5　冬小麦播前和收获后土壤含水量

Fig.5　Soil water content before sowing and after harvest

表 5　不同混种水平对产量、总耗水量、收获指数和水分利用效率的影响

Table 5　Effect of different mixed levels on yield, total water consumption, harvest index and water use efficiency

年份 Year	混种水平 Mixed level	耗水量 *WU* /mm	子粒产量 Y_g /(t·hm^{-2})	地上干物质量 Y_b /(t·hm^{-2})	收获指数 *HI*	子粒水分利用效率 WUE_g /(g·m^{-2}·mm^{-1})	地上干物质水分利用效率 WUE_b /(g·m^{-2}·mm^{-1})
2013	1L	645.16 a	7.23 b	15.72 b	0.46 c	1.12 c	2.44 c
	2L	627.85 b	7.83 a	15.98 b	0.49 a	1.25 a	2.54 b
	3L	625.37 b	7.79 a	16.57 a	0.47 b	1.25 a	2.65 a
	4L	622.45 b	7.47 b	16.97 a	0.44 d	1.20 b	2.72 a
2014	1L	649.19 a	7.03 c	15.63 b	0.45 bc	1.08 c	2.41 b
	2L	635.19 ab	7.56 a	15.71 b	0.48 a	1.19 ab	2.47 b
	3L	621.77 b	7.49 a	16.28 ab	0.46 b	1.20 a	2.62 a
	4L	615.79 c	7.18 b	16.65 a	0.43 c	1.17 b	2.70 a

3　讨　论

混种被认为是一种能提高作物产量和产量稳定性的生产技术[23-24],已有的混种研究结果间有较大差异,许多混种试验表明在正常或恶劣环境下均具有产量优势[24-28]。本研究选取了四个生育期接近的冬小麦品种,进行单作和三个不同水平的混种,发现地上生物量随混种品种数量的增加而增加,这与已有的生态学领域的研究结果一致[25-26];混种群体产量均高于单作,这与 Fang[15] 和刘琳等[27]对两个冬小麦品种混种的研究结果一致,说明混种是一种能提高冬小麦产量的有效栽培技术。关于混种群体产量构成因素影响产量的机理,有研究发现不同株高春小麦品种混种群体增产均得益于穗数、穗粒数和千粒重的增加[28];本研究通径分析结果与前人的研究一致,不同冬小麦品种混种增产得益于混种群体单位面积穗数和穗粒数在子粒产量贡献比重的增大,这说明混种群体具有较大的库容。源库学说认为较大的库容能力能促进光合物质的合成与运转[29],关于冬小麦源库关系的研究发现,较强的库容可以促进叶片光合活性和增加光合产物[30-31];此外光合作用是冬小麦产量形成的基础,开花后旗叶被公认为对产量贡献最大的叶片[15],增加旗叶叶面积[28],延长旗叶光合时间[3]有利于提高产量,本研究发现三个混种水平群体灌浆期旗叶 SPAD 值、旗叶面积和旗叶净光合速率均显著大于单作,表明灌浆期混种群体旗叶光合活性大于单作,能合成更多光合物质。说明混种群体与单作群体相比,既有较大的源,同时有较大的库容,源与库相互作用、相互调节是获得高产的重要原因之一。此外,相对于 2L 和 3L,4L 混种群体子粒产量出现显著下降,可能原因是 4L 混种群体品种组合只有一种,也可能是样方面积不够大,混种优势没有体现出来。

混种群体增产也得益于各品种株高的差异,由

不同株高麦类品种组成的混合群体可以产生互补效应,表现出产量优势[28,32],本研究中,具有不同株高的三个混种群体同样获得较单作更高的产量。说明混种群体的株高差异具有避免同一空间受光冲突的作用,较好地缓解了群体与个体间的矛盾,使混种群体处于优势状态。混种群体中各品种对光照、养分等资源的竞争会影响子粒产量高低[32],高秆品种在混合群体种间竞争中是优势品种,获取和利用资源的能力强于矮秆品种,在混种条件下高秆品种株高增大、产量增加,矮秆品种株高降低、产量降低[15-16];本研究中高秆品种小偃22和西农889在混种条件下株高增大,且随混种品种数量的增加而增加,矮秆品种矮抗58的株高随混种品种数量的增加而呈现降低趋势,中秆品种西农979的株高基本不变,说明小偃22和西农889在混种群体中为优势品种,矮抗58处于劣势。因此适当降低矮秆品种在混种群体中的比例,有利于改善矮秆品种的光照条件,充分发挥混种的增产优势,但不同生态条件下高矮秆品种的具体比例仍需进一步研究。

水分亏缺是当前农业生产面临的主要障碍之一,减少作物生育期内无效水分的消耗和损失,提高土壤水分利用效率是增加干旱半干旱地区作物产量的有效措施[15-16]。本研究发现灌浆期混种群体具有比单作群体更多的单位面积茎数和显著大于单作群体的光截获率,混合群体具有较大冠层郁闭度,对表层土壤有较好的遮挡,有利于降低土壤水分蒸发量[33],在降雨量和灌溉量相同的条件下,混种群体耗水量随混种品种数增加而减少。此外灌浆期混种群体旗叶瞬时水分利用效率和SPAD值均比单作高,有利于提高混种群体水分利用效率。增加根系在深层土壤中的分布可以促进根系接近并吸收深层土壤水分[20-21],提高旱区水分转化率和利用效率[8]。本研究发现不同混种水平群体根系在浅层土壤中(0~0.4 m)的分布均少于单作群体,在深层土壤中的分布比单作群体多,促进混种群体高效吸收利用深层土壤水分,使混种群体浅层土壤水分含量高于单作。然而4L混种群体子粒水分利用效率低于2L和3L混种群体,原因可能是4L混种群体的收获指数小于2L和3L群体,导致4L混种群体地上生物量水分利用效率较大,但子粒水分利用效率较低。

4 结 论

在关中灌区,与冬小麦单作相比,混种能增加群体光截获率、旗叶SPAD值、净光合速率和瞬时水分利用效率;混种增加群体子粒产量和地上生物量,子粒产量增幅随混种品种数量的增加逐渐降低,平均增幅为2.73%~7.92%,地上生物量增幅随混种品种数量的增加逐渐升高,平均增幅为1.08%~7.24%;混种能增加麦田浅层土壤含水量和深层土壤中的根系分布,提高群体子粒和地上干物质的麦田土壤WUE,降低群体耗水量。

参 考 文 献:

[1] Giller K E, Beare M H, Lavelle P, et al. Agricultural intensification, soil biodiversity and agro-ecosystem function[J]. Applied Soil Ecology, 1997,(6):3-16.

[2] Griffon M. Développement durable et agriculture: la révolution doublement verte[J]. Cahiers Agriculture, 1999,8:259-267(in English with Greman abstract).

[3] Paul A G, Tariq M, Richard T. Can wheat varietal mixtures buffer the impacts of water deficit? [J]. Crop & Pasture Science, 2015,66:757-769.

[4] Hector A, Schmid B, Beierkuhnlein C, et al. Plant Diversity and Productivity Experiments in European Grasslands[J]. Science, 1999, 286:1123-1127.

[5] Tilman D, Wedin D, Knope J. Productivity and sustainability influenced by biodiversity in grassland ecosystem[J]. Nature, 1996,379:718-720.

[6] 高 东,何霞红,朱书生.利用农业生物多样性持续控制有害生物[J].生态学报,2011,31(24):7617-7624.

[7] 郭世保.小麦多品种混播对条锈病的控制作用研究[D].杨凌:西北农林科技大学,2012.

[8] Faraji J. Wheat cultivar blends: A step forward to sustainable agriculture[J]. African Journal of Agricultural Research, 2011,6:6780-6789.

[9] Zeller S L, Kalinina O, Flynn D F B, et al. Mixtures of genetically modified wheat lines outperform monocultures[J]. Ecological Applications, 2012,22:1817-1826.

[10] Kiϑer L P, Skovgaard I M, Østergard H. Grain yield increase in cereal variety mixtures: A meta-analysis of field trials[J]. Field Crops Research, 2009,114(3):361-373

[11] Cowger C, Weise R. Winter wheat blends (mixtures) produce a yield advantage in North Carolina[J]. Agronomy Journal, 2008,100:169-177.

[12] Zhu Y Y, Chen H R, Fan J H, et al. Genetic diversity and disease control in rice[J]. Nature, 2000,406:718-722.

[13] 徐信光,郭本森,郭幼操.大麦中高秆品种混作的增产因素探讨[J].浙江农业学报,1992,4(3):145-146.

[14] Kaut A H E E, Mason H E, Navabi A, et al. Performance and stability of performance of spring wheat variety mixtures in organic and conventional management systems in western Canada[J]. Journal of Agricultural Science, 2009,147:141-153.

[15] Fang Y, Xu B C, Liu L, et al. Does a mixture of old and modern winter wheat cultivars increase yield and water use efficiency in water-limited environments? [J]. Field Crops Research, 2014,156:12-21.

[16] Fang Y, Liu L, Xu B C. The relationship between competitive ability

and yield stability in an old and a modern winter wheat cultivar[J]. Plant Soil, 2011,347:7-23.

[17] 张　荣,张大勇.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[J].植物生态学报,2000,24(3):298-303.

[18] 韩　娟,廖允成,贾志宽,等.半湿润偏旱区沟垄覆盖种植对冬小麦产量及水分利用效率的影响[J].作物学报,2014,40(1):101-109.

[19] 张　玉,韩清芳,成雪峰,等.关中灌区沟垄集雨种植补灌对冬小麦光合特征、产量及水分利用效率的影响[J].应用生态学报,2015,26(5):1382-1390.

[20] Palta J A, Chen X, Milroy S P, et al. Large root systems: Are they useful in adapting wheat to dry environment? [J]. Plant Biology, 2011,38:347-354.

[21] King J, Bingham I, Gregory P, et al. Modeling cereal root systems for water and nitrogen capture: towards an economic optimum[J]. Annals of Botany, 2003,91:383-390.

[22] 刘自华.冬小麦叶面积矫正系数及叶面积指数的研究[J].河北农业科学,1996,(1):12-14.

[23] Malezieux E, Crozat C, Dupraz M, et al. Mixing plant species in cropping systems: concepts, tools and models[J]. Agronomy for Sustainable Development, 2009,29:43-62.

[24] Wolfe M S. Crop strength through diversity[J]. Nature, 2000,406:681-682.

[25] 陈　欣,唐建军.农业系统中生物多样性利用的研究现状与未来思考[J].中国生态农业学报,2013,21(1):54-60.

[26] 袁　烨,刘国华,陈立云.作物混种研究进展[J].作物研究,2008,22(5):381-385.

[27] 刘　琳,李凤民,徐炳成,等.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[J].应用生态学报,2008,19(1):93-98.

[28] 权文利,陈志国,连利叶,等.不同株高品种混播对青海春小麦产量的影响[J].西北农业学报,2013,22(8):15-20.

[29] 刘克礼,翟利剑,高聚林,等.春小麦源库特性及其关系的研究(Ⅱ)——群体库源比及其与产量的关系[J].麦类作物学报,2003,23(4):63-65.

[30] 郭文善,封超年,严六零,等.小麦开花后源库关系分析[J].作物学报,1995,21(3):334-340.

[31] Kiaer L P, Skovgaard I M, Ostergard H. Effects of inter-varietal diversity, biotic stresses and environmental productivity on grain yield of spring barley variety mixtures[J]. Euphytica, 2012,185:123-138.

[32] Gallandt E R, Dofing S M, Reisenauer P E, et al. Diallel analysis of cultivar mixtures in winter wheat[J]. Crop Science, 2001,41:792-796.

[33] Wall G, Kanemasu E. Carbon dioxide exchange rates in wheat canopies. Part I. Influence of canopy geometry on trends in leaf area index, light interception and instantaneous exchange rates[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 1990,49:81-102.

(上接第 28 页)

[26] 周振民. 黄土高原丘陵沟壑区苹果园水肥耦合试验研究[J].灌溉排水学报, 2009, 28(2): 109-111.

[27] 朱德兰,王文娥,楚　杰.黄土高原丘陵区红富士苹果水肥耦合效应研究[J].干旱地区农业研究,2004,22(1):152-155.

[28] 赵可夫.玉米抽雄后不同叶位叶对子粒产量的影响及其光合性能[J].作物学报,1981,7(4):259-266.

[29] 许华森,毕华兴,王若水,等.晋西黄土区苹果农作物间作系统经济效益[J].中国水土保持科学,2014,12(4):81-85.

[30] 王　平,周道玮,张宝田.禾-豆混播草地种间竞争与共存[J].生态学报,2009,29(5):2560-2567.

[31] 薛　亮,周春菊,雷杨莉,等.夏玉米交替灌溉施肥的水氮耦合效应研究[J].农业工程学报,2008,24(3):91-94.

[32] 孙文涛,孙占祥,王聪翔,等.滴灌施肥条件下玉米水肥耦合效应的研究[J].中国农业科学,2006,39(3):563-568.

[33] 徐泰森,孙　扬,刘彦萱,等.膜下滴灌水肥耦合对半干旱区玉米生长发育及产量的影响[J].玉米科学,2016,(5):118-122.

[35] 周罕觅,张富仓,Roger Kjelgren,等.苹果幼树生理特性和水分生产率对水肥的响应研究[J].农业机械学报,2015,46(4):77-87.

[36] 王翠玲.水肥耦合对草莓生长、产量品质及水肥利用效率的影响[D].泰安:山东农业大学,2010.

[37] 刘　闯.巨桉林+草间作模式中牧草产量效应及其生理生态学特征研究[D].雅安:四川农业大学,2008.

[38] 张继澍.植物生理学[M].北京:高等教育出版社,2006:112.

[39] 陆文娟,李伏生,农梦玲.不同水肥条件下分根区交替灌溉对玉米生理特性和水分利用的影响[J].生态学报,2014,34(18):5257-5265.

[40] 陈修斌,李翊华,许耀照.温室番茄对水肥耦合的光合特性及叶绿素荧光参数响应[J].土壤通报,2015,46(3):687-693.

[41] 石多琴,柴　强,于爱忠.水氮互作全膜覆盖玉米光合特性和叶水势的日变化[J].甘肃农业大学学报,2014,49(1):54-59+64.

[42] 李文惠,尹光华,谷　健,等.膜下滴灌水氮耦合对春玉米产量和水分利用效率的影响[J].生态学杂志,2015,34(12):3397-3401.

[43] 尹光华,刘作新,李桂芳,等.辽西半干旱区春小麦氮磷水耦合产量效应研究[J].农业工程学报,2005,21(1):41-45.

[44] 胡云飞,郁继华,肖雪梅,等.滴灌条件下水肥耦合对青花菜生理特性及产量和品质的影响[J].灌溉排水学报,2016,35(2):72-76

[45] 袁宇霞,张富仓,张　燕,等.滴灌施肥灌水下限和施肥量对温室番茄生长、产量和生理特性的影响[J].干旱地区农业研究,2013,31(1):76-83.

[46] 于亚军,李　军,贾志宽,等.旱作农田水肥耦合研究进展[J].干旱地区农业研究,2005,23(3):220-224.

[47] 张发明,杨克军,李佐同,等.肥密组合对寒地半干旱区膜下滴灌玉米产量的影响[J].干旱地区农业研究,2016,34(2):32-37.

[48] 张玉峰,杨武德,白晶晶,等.冬小麦产量与子粒蛋白质含量协同变化特点及水肥调控[J].中国农业科学,2006,39(12):2449-2458.

[49] 张珂珂,周苏玫,张　嫚,等.减氮补水对小麦高产群体光合性能及产量的影响[J].应用生态学报,2016,27(3):863-872.