DOI: 10.3724/SP.J.1006.2020.93053

条带耕作错位种植对灌区春玉米产量形成与冠根特征的影响

张玉芹¹ 杨恒山^{1,*} 李从锋² 赵明² 罗方¹ 张瑞富¹

¹内蒙古民族大学农学院, 内蒙古通辽 028042; ²中国农业科学院作物科学研究所, 北京 100081

摘 要: 2017 年和 2018 年在内蒙古通辽市科尔沁区农业高新技术示范园区, 以农华 101 为供试材料, 采用条带耕作错位种植(苗带耕作, 15 cm+45 cm 小双行错位播种, TGCW)和等行常规种植(旋耕, 60 cm 等行距, CK)两种模式, 6.75 万株 hm^{-2} 、8.25 万株 hm^{-2} 、9.75 万株 hm^{-2} 3 个种植密度, 研究条带耕作错位种植模式对西辽河平原灌区春玉米冠根协调特征及产量形成的调控效应。结果表明, 相比于等行距常规种植, 条带耕作错位种植的产量显著提高, 其中 8.25 万株 hm^{-2} 增幅最明显, 2017 年和 2018 年分别提高 13.1% 和 13.8%, 该模式吐丝后干物质积累量及积累率具有明显优势, 较强的物质积累明显延缓了生育后期叶片衰老, 同时穗位上和穗位层透光率显著提高, 生育后期叶面积指数、净光合速率和群体光合势均显著高于 CK。该模式生育后期各土层植株根干重显著高于 CK, 高密度下更为明显, 且 20~60 cm 根系占比高, 吐丝期单位根重获得的籽粒产量和成熟期根冠比均具有明显优势。该模式的这些优点是促成西辽河平原灌区春玉米增产的主要原因之一。

关键词: 春玉米; 苗带条耕错位种植; 产量; 根冠特征

Effects of strip-till with staggered planting on yield formation and shoot-root characteristics of spring maize in irrigation area of Xiliaohe plain

ZHANG Yu-Qin¹, YANG Heng-Shan^{1,*}, LI Cong-Feng², ZHAO Ming², LUO Fang¹, and ZHANG Rui-Fu¹

¹College of Agronomy, Inner Mongolia University for the Nationalities, Tongliao 028042, Inner Mongolia, China; ²Institute of Crop Sciences, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China

Abstract: A field research was conducted in the Agricultural High-tech Demonstration Park in Horqin District of Tongliao, Inner Mongolia, using the maize variety Nonghua 101 with two cropping modes, including strip-till with staggered planting (seeding strip tillage, 15 cm + 45 cm narrow-double row staggered sowing, TGCW) and conventional tillage with equal row space (rotary tillage with row space of 60 cm, CK), and three planting densities (67,500 plants hm^{-2} , 82,500 plants hm^{-2} , and 97,500 plants hm^{-2}) in 2017 and 2018 to study the effect of strip-till with staggered planting on regulating spring maize yield formation and coordination characteristics of shoot-root in irrigation areas of Xiliao river plain. The model of that strip-till with staggered planting enhanced maize yield by 13.1% and 13.8% in 2017 and 2018, under the planting density 82,500 plants hm^{-2} compared with CK, respectively. The strip-till with staggered planting showed a distinct advantage on the amount and rate of dry matter accumulation after silking, which obviously delayed the senility of leaves in later growth stage, meanwhile, compared with CK, the light transmittance significantly increased in or above panicle layers. The leaf area index, net photosynthetic rate and population photosynthetic potential in the model of strip-till with staggered planting were higher than those in CK in late growth stage. At later growing stage, the strip-till with staggered planting had significantly higher root dry weight than CK in different soil layers, with the highest root ratio in 20–60 cm, especially under higher planting density. The grain yield against per unit of root weight at silking and root-shoot ratio at maturity had a distinct advantage. In conclusion the strip-till with staggered planting combined with high planting density can increase light transmission rate in above-spike layer in late growing stage, alleviate leaf area decline, increase production capacity, facilitate root growth and increase root ratio in deeper soil layers. Shoot-root coordination under dense planting is one of the main reasons facilitating yield increase of spring maize in irrigation areas of Xiliao river plain.

本研究由国家重点研发计划项目(2017YFD0201806)和国家自然科学基金项目(31960382)资助。

This study was supported by the National Key Research and Development Program of China (2017YFD0201806) and the National Natural Science Foundation of China (31960382)

* 通信作者(Corresponding author): 杨恒山, E-mail: yanghengshan2003@aliyun.com

第一作者联系方式: E-mail: zhyq369@126.com

Received (收稿日期): 2019-09-23; Accepted (接受日期): 2020-01-15; Published online (网络出版日期): 2020-01-24.

URL: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1809.S.20200123.1854.010.html>

Keywords: spring maize; strip-till with staggered cultivation; maize yield; crown-root characteristics

实现密植群体资源的高效利用已成为玉米稳产增效的主要途径^[1-2]。密植高效群体的构建是地上部光合与地下部根群吸收水分、养分相统一的反馈过程, 强大的根系吸收促进地上部的光合作用, 而充足的光合产物又会为根系的生长提供必需的营养物质, 二者共同组成了一个完整的光合生产系统^[3]。根系结构和吸收水分、养分功能与叶冠建成和光合作用相互协调, 就会有高的资源利用效率^[4]。目前西辽河平原灌区玉米种植密度为 $6.0 \times 10^4 \sim 6.5 \times 10^4$ 株 hm^{-2} , 还有较大增密空间, 增密后如何构建冠-根协调群体, 令生育后期维持较高的物质生产和根系活力, 减缓植株倒伏早衰, 实现高产高效, 是生产中亟待解决的问题^[5]。

研究表明, 作物根系下扎, 深层根系比例较高有效缓解了增密后生育后期叶面积指数的下降速度, 提高生育后期光合势, 延缓生育后期衰老, 增加产量^[6-7]。根系太小, 吸收能力受限, 地上部充足的水分和养分的供应会受到影响; 同样, 地上部分对根系生长也有促进作用, 根系所需的部分物质, 要靠地上部分的合成来供给, 因此, 玉米对水分和养分的高效利用可归功于根、冠结构功能的匹配。前人研究表明, 不同种植方式和株行距配置对玉米群体冠层特性和产量具有显著影响^[8-11], 宽窄行种植能优化不同叶层结构, 且增加深层土壤根系所占比例及活力。不同耕作方式及密度对根系有明显影响, 高密度下具有较窄的根伸长宽度、较陡的根角和较大的行间根系分布^[12-13]。宋日等^[14]等研究表明, 增加种植密度可抑制玉米根系下扎, 导致过多根系在表层土壤聚集, 张玉芹等^[15]研究表明, 合理的耕作和优化施肥等措施改善了根系环境条件和养分供应水平, 高密度条件下促进了下层根系的发生。栽培技术通过优化冠根特性对产量的贡献达 30%~50%^[16], 但利用单项栽培技术实现增产变得日益艰难。杨哲等^[17]提出, 缩小玉米产量差需要在选用耐密品种和优化养分管理的基础上, 综合优化栽培措施并发挥措施的互作效应, 实现冠-根协调密植高产。

中国农业科学院赵明研究员等提出的条带耕作小双行错位种植模式, 具有密植高产、节本增效的效果, 在东北、黄淮海等玉米主产区试验示范, 比当地传统种植增产 10.0%~14.7%^[18], 在内蒙古通辽连续 3 年试验, 高密度下表现出明显的增产效果。该

新型模式下玉米生长发育过程及其根冠特征与产量的关系尚不清楚。本研究以常规种植模式为对照, 探索条带耕作错位种植下春玉米产量变化、叶源特性及根系分布特征, 比较分析不同种植模式下密植群体冠根特性的差异性及其与产量的关系, 为西辽河平原灌区玉米密植高产高效栽培提供理论参考和技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验地区与试验地自然概况

通辽市科尔沁区农牧业高新科技示范园区 ($43^{\circ}36'N$, $122^{\circ}22'E$) 海拔 180 m, 年平均气温 $6.8^{\circ}C$, $10^{\circ}C$ 的活动积温 $3200^{\circ}C$, 平均无霜冻期 154 d, 年均降水量 390 mm, 试验地土壤为灰色草甸土; 播前试验地耕层 (0~20 cm) 土壤: 2017 年含有机质 18.52 g kg^{-1} 、碱解氮 52.26 mg kg^{-1} 、有效磷 11.35 mg kg^{-1} 、速效钾 $110.83 \text{ mg kg}^{-1}$, 2018 年含有机质 19.63 g kg^{-1} 、碱解氮 50.81 mg kg^{-1} 、有效磷 13.20 mg kg^{-1} 、速效钾 $118.69 \text{ mg kg}^{-1}$ 。

1.2 试验设计

供试品种为农华 101, 株型紧凑, 株高 290~300 cm, 穗位高 98~105 cm, 成株叶片数 20~21 片; 试验设置苗带耕作错位种植 (TGCW) 和等行常规 (CK) 2 种植模式和 3 个密度水平 (6.75 万株 hm^{-2} 、 8.25 万株 hm^{-2} 、 9.75 万株 hm^{-2}), 每个处理 3 次重复, 共计 18 个小区, 小区长 30 m, 宽 3.6 m, 小区面积 108 m^2 。各处理均基施“澳特乐”缓控释肥 ($N-P_2O_5-K_2O$, 28-11-13) 750 kg hm^{-2} 。生育期间灌水同当地大面积生产, 共灌 4 次, 每次约 50 m^3 。2017 年 5 月 1 日播种, 9 月 28 日收获; 2018 年 5 月 2 日播种, 10 月 3 日收获。

条带耕作错位种植: 玉米收获后直接还田, 第 2 年采用玉米推茬清垄精播技术及条带深旋小双行精量播种机 (国家实用新型专利: ZL200920160482.1) 播种, 将前茬的秸秆切断、粉碎, 推至非播种带行间, 实现苗带清垄, 同时在播种带进行 12~15 cm 宽度的浅旋, 将原来的一个播种带一个单行直线播种, 改为一个播种带 15 cm 宽度的小双行交错种植, 播种带的植株呈对角状折线分布 (图 1)。

等行常规种植: 玉米收获后秸秆直接还田, 第 2 年旋耕后用当地普通播种机播种, 等行距 (60 cm) 一个单行直线播种。

图1 不同种植模式示意图和苗期田间照片

Fig. 1 Sketch map of different planting patterns and field photograph of seedling stage

1.3 测定项目与方法

1.3.1 地上生物量 在吐丝期、乳熟期和完熟期于各小区分别取代表性植株3株,按茎鞘、叶片、穗轴、苞叶和籽粒分开,在烘箱内105℃杀青30 min,80℃烘至恒重后,测定干物质重。

1.3.2 叶面积指数 标定好3株具代表性植株,分别于吐丝期和乳熟期测量叶片长、宽,单叶叶面积=长×宽×系数(未展开叶片系数为0.5,展开叶片系数为0.75),叶面积指数(LAI)=单株叶面积×单位土地面积内株数/单位土地面积。

1.3.3 净光合速率 在吐丝期、乳熟期分别选取各处理代表性植株5株,选择晴朗无云的天气,使用LI-6400 XT型便携式光合测定系统,以人工光源控制光照强度为 $1600 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$,于上午10:00选取叶片长度的50%处,测定玉米穗位叶净光合速率(NPR, $\mu\text{mol CO}_2 \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$),取平均值。

1.3.4 冠层透光率 在吐丝期选择晴天10:00—13:00时间段内,用SunScan植物冠层分析仪测定各处理冠层顶部(雄穗上方)、穗位上(穗上第4叶)、穗位(穗位叶)、穗位下(距地面20 cm)光合有效辐射量(PAR),每处理重复测量3次。

$$\text{冠层透光率}(\%) = \frac{\text{测定层PAR}}{\text{冠层顶部PAR}} \times 100$$

1.3.5 根系生物量 在吐丝期、乳熟期和完熟期,选取各小区同行内3株代表性连续的植株,以第1株1/2株距处到第3株1/2株距处为长,以1/2行距为宽,挖长方形样方分层取根,每层20 cm,共3层。将各土层内的所有根系标记分别装入自封袋内带回实验室,用水浸泡冲洗,洗净后挑出杂质和死根,于80℃烘干测定干重。

1.3.6 产量及其构成因素 测产面积为各小区30 m²,计算各测产区有效穗数,人工脱粒后测鲜粒重和含水率,并折算成含水量为14%产量。分别取10穗风干后考种,测定穗行数、行粒数、穗粒数和千粒重。

1.3.7 相关参数

吐丝前干物质积累量(kg hm^{-2})=吐丝期干物质积累量

吐丝后干物质积累量(kg hm^{-2})=完熟期干物质积累量-吐丝期干物质积累量

吐丝前干物质积累率(%)=吐丝期干物质积累量/成熟期干物质积累量×100

吐丝后干物质积累率(%)=吐丝后干物质积累量/成熟期干物质积累量×100

群体光合势 LAD (m² d hm⁻²)=[(L₁+L₂)/2]×(t₂-t₁)
式中, t₁ 和 t₂ 为相邻的生育时期, L₁ 和 L₂ 为 t₁、 t₂ 生育时期叶面积。

1.4 数据处理与分析

采用 Microsoft Excel 2007 整理数据, SPSS19.0 软件统计分析。

2 结果与分析

2.1 产量及其构成因素

由表 1 可知, 两种模式间同密度下有效穗数差异均未达显著水平, 穗粒数和千粒重均随种植密度

增加而显著减小。同密度模式间比较, 穗粒数均表现为 TGCW>CK, 且达显著水平; 千粒重两种模式间均未达显著水平; 产量除 2017 年 6.75 万株 hm⁻² 密度外, 其余均表现为 TGCW>CK, 其中, 8.25 万株 hm⁻² 密度下增产幅度最高, TGCW 较 CK 分别高 13.1% (2017 年)和 13.8% (2018 年)。

由表 2 可知, 产量和穗粒数差异种植模式和密度间 2 年均达到极显著水平($P<0.01$), 千粒重差异在密度间达到显著水平($P<0.05$), 种植方式间差异未达到极显著水平($P<0.05$); 种植方式与密度间交互作用的差异未达到显著水平, 说明增加密度可进一步增加玉米产量, 同密度下种植模式的改变对产量和穗粒数影响显著。

表 1 不同种植模式下春玉米产量及其构成因素
Table 1 Spring maize yield and its components under different planting patterns

年份 Year	种植密度 Plant density (×10 ⁴ ear hm ⁻²)	种植模式 Planting pattern	有效穗数 Effective spike (×10 ⁴ ear hm ⁻²)	穗粒数 Kernels per spike	千粒重 1000-kernel weight (g)	实测产量 Yield (t hm ⁻²)
2017	6.75	TGCW	6.31 c	554.00 a	397.67 a	11.25 c
		CK	6.27 c	522.33 b	386.00 ab	10.56 c
	8.25	TGCW	7.62 b	506.33 bc	375.00 abc	12.87 b
		CK	7.52 b	486.67 d	356.33 bc	11.38 c
	9.75	TGCW	9.02 a	463.00 d	354.67 bc	13.82 a
		CK	8.95 a	433.67 e	347.00 c	12.43 b
2018	6.75	TGCW	6.12 c	583.67 a	415.33 a	13.78 b
		CK	5.97 c	560.00 b	403.00 ab	12.84 c
	8.25	TGCW	7.65 b	554.00 b	386.67 bc	14.76 a
		CK	7.71 b	529.33 c	371.00 bc	12.97 c
	9.75	TGCW	9.12 a	516.00 c	367.00 cd	15.34 a
		CK	9.03 a	485.67 d	355.33 d	13.87 b

标以不同小写字母的值在同一年份不同处理间在 0.05 水平差异显著; TGCW: 条带耕作错位种植模式; CK: 等行常规种植模式。
In the same year, values within a column followed by different small letters can significantly different among treatments at the 0.05 probability level; TGCW: strip-till with staggered cultivation; CK: equal line spacing planting.

表 2 不同种植模式下春玉米产量及其构成的方差分析
Table 2 Analysis of variance of spring maize yield and yield components under different planting patterns

年份 Year	差异源 Source of difference	产量 Yield		穗粒数 Kernels per spike		千粒重 1000-kernel weight	
		F	P	F	P	F	P
2017	密度 Density (D)	41.466**	0.0021	41.318**	0.0234	70.16*	0.0140
	种植方式 Planting patterns (T)	24.614**	0.0025	49.993**	0.0010	5.37	0.1571
	密度×种植方式 D×T	1.113	0.3881	0.127	0.8823	0.48	0.6394
2018	密度 Density (D)	25.098**	0.0054	16.048**	0.0076	95.84*	0.0103
	种植方式 Planting patterns (T)	74.245**	0.0001	92.866**	0.0010	11.60	0.0794
	密度×种植方式 D×T	3.604	0.0938	0.977	0.4172	1.031	0.3916

*和**分别表示同年份不同处理 $P<0.05$ 和 $P<0.01$ 。
* and ** indicate significance among treatments at same year at $P<0.05$ and $P<0.01$, respectively.

2.2 干物质积累量及积累率

由表 3 可知, 同密度模式间干物质积累量吐丝前高密度(9.75 万株 hm^{-2})下表现为 $\text{TGCW}>\text{CK}$, 达显著水平; 吐丝后除 2018 年 6.75 万株 hm^{-2} 密度外, 均表现为 $\text{TGCW}>\text{CK}$, 达显著水平, 两年均以 9.75 万株 hm^{-2} 密度最高, 分别较 CK 高 9.23% (2017 年) 和 9.78% (2018 年)。同密度模式间积累率吐丝前除 2018 年 6.75 万株 hm^{-2} 外, 均表现为 $\text{CK}>\text{TGCW}$; 吐丝后除 2018 年 6.75 万株 hm^{-2} 外, 均表现为 $\text{TGCW}>\text{CK}$ 。说明 TGCW 模式在吐丝后物质积累能力较 CK 优势明显。

2.3 叶源特性

由表 4 可知, 同密度两种模式间吐丝期叶面积指数差异不显著, 净光合速率高密度(9.75 万株 hm^{-2})下 TGCW 显著高于 CK, 乳熟期二者各密度下均表现为 $\text{TGCW}>\text{CK}$, 且达显著水平。群体光合势吐丝期至乳熟期 9.75 万株 hm^{-2} 密度下 TGCW 显著高于 CK, 乳熟期至完熟期除 2018 年 6.75 万株 hm^{-2} 密度外, 均表现为 $\text{TGCW}>\text{CK}$, 且达显著水平, 以 9.75 万株 hm^{-2} 密度下更明显, 较 CK 高 13.2% (2017 年) 和 9.0% (2018 年)。

表 3 不同种植模式下春玉米吐丝前、后干物质积累量及积累率

Table 3 Dry matter accumulation and accumulation rate before and after silking of spring maize under different planting patterns						
年份 Year	种植密度 Plant density ($\times 10^4$ plants hm^{-2})	种植模式 Planting pattern	吐丝前 Before silking		吐丝后 After silking	
			积累量	积累率	积累量	积累率
			Dry matter accumulation (t hm^{-2})	Accumulation rate (%)	Dry matter accumulation (t hm^{-2})	Accumulation rate (%)
2017	6.75	TGCW	10.85 d	48.62	11.46 b	51.38
		CK	10.89 d	50.31	10.76 c	49.69
	8.25	TGCW	12.81 b	51.10	12.25 a	48.90
		CK	12.43 c	51.19	11.85 b	48.81
	9.75	TGCW	13.73 a	52.15	12.60 a	47.85
		CK	13.33 b	53.60	11.54 b	46.40
2018	6.75	TGCW	11.94 d	48.46	12.90 c	51.54
		CK	11.23 d	47.45	12.44 c	52.55
	8.25	TGCW	13.82 c	49.02	14.37 b	50.98
		CK	13.15 c	50.44	12.92 c	49.56
	9.75	TGCW	15.09 a	49.89	15.15 a	50.11
		CK	14.60 b	51.39	13.80 b	48.61

标以不同小写字母的值在同一年份不同处理间在 0.05 水平差异显著。处理同表 1。
In the same year, values within a column followed by different small letters can significantly different among treatments at the 0.05 probability level. Treatments correspond to those given in Table 1.

表 4 不同种植模式下春玉米叶源特性

Table 4 Leaf source characteristics of spring maize under different planting patterns								
年份 Year	种植密度 Plant density ($\times 10^4$ plants hm^{-2})	种植模式 Planting pattern	叶面积指数		净光合速率		群体光合势	
			LAI		NPR ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)		LAD ($\text{m}^2 \text{ d hm}^{-2}$)	
			吐丝期 Silking	乳熟期 Milking	吐丝期 Silking	乳熟期 Milking	吐丝期-乳熟期 Silking-milking	乳熟期-完熟期 Milking-maturity
2017	6.75	TGCW	4.89 c	4.59 d	32.48 a	30.22 ab	151.68 d	104.94 e
		CK	4.71 c	4.18 e	29.72 ab	28.27 b	142.24 d	92.73 f
	8.25	TGCW	6.87 b	6.23 b	28.57 b	25.38 c	209.60 c	138.27 c
		CK	6.71 b	5.76 c	31.78 a	29.19 a	199.52 c	124.91 d
	9.75	TGCW	7.91 a	7.03 a	30.33 a	27.11 b	239.04 a	162.86 a
		CK	7.60 a	6.46 b	29.36 a	25.04 c	224.96 b	143.88 b
2018	6.75	TGCW	5.30 c	5.01 e	23.32 a	20.71 b	164.95 d	120.49 e
		CK	5.19 c	4.70 f	21.52 ab	18.75 c	158.25 d	112.38 e

(续表 4)

年份 Year	种植密度 Plant density ($\times 10^4$ plants hm^{-2})	种植模式 Planting pattern	叶面积指数 LAI		净光合速率 NPR ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)		群体光合势 LAD ($\text{m}^2 \text{ d hm}^{-2}$)	
			吐丝期	乳熟期	吐丝期	乳熟期	吐丝期-乳熟期	乳熟期-完熟期
			Silking	Milking	Silking	Milking	Silking-milking	Milking-maturity
	8.25	TGCW	6.56 b	6.01 c	19.32 bc	16.97 d	201.17 c	146.54 c
		CK	6.38 b	5.56 d	23.43 a	21.62 b	191.05 c	133.99 d
	9.75	TGCW	8.07 a	7.21 a	23.63 a	19.61 c	244.63 a	175.97 a
		CK	7.81 a	6.70 b	21.37 b	17.02 d	232.16 b	160.24 b

标以不同小写字母的值在同一年份不同处理间在 0.05 水平差异显著。处理同表 1。
In the same year, values within a column followed by different small letters can significantly different among treatments at the 0.05 probability level. Treatments correspond to those given in Table 1.

2.4 冠层透光率

由图 2 可知, 2 年春玉米不同层位的透光率随密度增加而下降, 且达显著水平。同密度两种模式间, 穗位

上和穗位均表现为 TGCW>CK, 且达显著水平; 穗位下在 8.25×10^4 株 hm^{-2} 和 9.75×10^4 株 hm^{-2} 密度下 2017 年无显著差异, 2018 年表现为 TGCW 显著高于 CK。

图 2 不同种植模式下春玉米不同层位透光率
Fig. 2 Light transmission rate in different layers of spring maize under different planting patterns
图中不同小写字母表示同一年份不同处理在 0.05 水平差异显著; SWS: 穗位上; SWC: 穗位层; SWX: 穗位下。
Bars superscripted by different small letters indicate significant differences among treatments in the same year at the 0.05 probability level.
SWS: upper ear leaf; SWC: ear leaf; SWX: under ear leaf.

2.5 根干重及根分布

2.5.1 不同土层根干重 由表 5 可知, 密度对不同土层根系干重影响显著, 2 年不同土层根干重均随密度增加而降低。除吐丝期 0~20 cm 土层外, 种植方式对根干重影响显著, 同密度两种种植模式中, 吐丝期根干重 0~20 cm 均无显著差异, 20~40 cm 和 40~60 cm 均表现为 TGCW>CK, 达显著水平, 且随密度增加, 二者差异增大, 6.75 万株 hm^{-2} 、8.25 万株 hm^{-2} 、9.75 万株 hm^{-2} 密度下 20~40 cm 土层 2 年平均增加了 25.4%、35.9%和 42.9%, 40~60 cm 土层分别增加 32.5%、39.1%和 41.2%; 乳熟期除 0~20 cm 的 6.75 万株 hm^{-2} 密度外, 均表现为 TGCW>CK, 且达显著水平, 6.75 万株 hm^{-2} 、8.25 万株 hm^{-2} 、9.75 万株 hm^{-2} 密度下 20~40 cm 土层 2 年平均增加

23.0%、28.8%和 35.1%, 40~60 cm 土层分别增加 19.2%、37.0%和 50.4%; 完熟期各土层深度均表现为 TGCW>CK, 且达显著水平。
2.5.2 不同土层根分布比例 由表 6 可知, 2 年各时期 0~20 cm 土层深度根系分布比例均表现为 CK>TGCW, 20~40 cm 和 40~60 cm 土层深度根系分布比例 TGCW>CK, 吐丝期随密度增加差异增大, 6.75 万株 hm^{-2} 、8.25 万株 hm^{-2} 、9.75 万株 hm^{-2} 密度下 20~40 cm 土层 2 年平均增加 0.95%、1.40%和 1.67%, 40~60 cm 土层 2 年平均增加 0.64%、0.67%和 0.68%; 乳熟期 8.25 万株 hm^{-2} 下差异最大, 20~40 cm 土层 2 年平均增加 0.75%, 40~60 cm 土层 2 年平均增加 0.79%, 6.75 万株 hm^{-2} 下差异最小。说明 TGCW 模式有利于根系生长, 且下层根系更为明显。

表 5 不同种植模式下不同土层春玉米根干重
Table 5 Root dry weight in different soil layers of spring maize under different planting patterns (kg hm⁻²)

土层深度 Soil depth (cm)	种植密度 Plant density (×10 ⁴ plants hm ⁻²)	种植模式 Planting pattern	2017			2018		
			吐丝期 Silking	乳熟期 Milking	完熟期 Maturity	吐丝期 Silking	乳熟期 Milking	完熟期 Maturity
0–20	6.75	TGCW	23.35 a	21.02 a	18.39 a	24.42 a	20.93 a	19.53 a
		CK	23.58 a	20.37 b	16.49 b	23.79 a	20.16 a	17.68 b
	8.25	TGCW	19.37 b	17.94 c	14.82 c	20.36 b	18.13 b	15.49 c
		CK	19.58 b	16.81 d	13.59 d	19.71 b	17.05 c	14.06 d
	9.75	TGCW	17.24 c	15.85 e	11.75 e	17.92 c	15.94 d	12.25 e
		CK	17.58 c	14.92 f	10.34 f	17.56 c	14.57 e	11.01 f
	<i>F</i> 值	密度 Density (D)	40.21**	167.66**	105.67**	605.89**	318.40**	460.93**
	<i>F</i> -value	种植方式 Planting patterns (T)	7.99	10.87*	15.82**	26.82	44.73*	61.18*
		密度×种植方式 D×T	0.23	1.05	2.94	0.51	0.40	1.48
20–40	6.75	TGCW	1.31 a	1.13 a	0.78 a	1.44 a	1.16 a	0.88 a
		CK	1.01 bc	0.81 c	0.56 c	1.19 bc	1.09 b	0.63 bc
	8.25	TGCW	1.25 a	0.97 b	0.68 bc	1.29 b	1.06 b	0.80 a
		CK	0.91 c	0.73 d	0.46 d	0.96 d	0.85 c	0.50 d
	9.75	TGCW	1.18 b	0.77 cd	0.57 c	1.13 c	0.77 d	0.56 cd
		CK	0.75 d	0.52 e	0.35 e	0.88 d	0.63 e	0.37 e
	<i>F</i> 值	密度 Density (D)	13.03*	55.24*	62.32**	39.12**	47.15**	31.43*
	<i>F</i> -value	种植方式 Planting patterns (T)	116.25**	112.83**	195.80**	80.05**	14.66*	64.17**
		密度×种植方式 D×T	1.15	0.68	0.02	0.47	4.52	3.78
40–60	6.75	TGCW	0.75 a	0.73 a	0.48 a	0.72 a	0.76 a	0.56 a
		CK	0.58 b	0.61 b	0.35 b	0.53 c	0.64 b	0.44 b
	8.25	TGCW	0.53 bc	0.46 c	0.31 b	0.61 bc	0.52 c	0.36 c
		CK	0.38 d	0.38 d	0.23 c	0.44 de	0.34 e	0.25 d
	9.75	TGCW	0.47 c	0.43 c	0.26 c	0.51 cd	0.42 d	0.32 d
		CK	0.31 d	0.26 e	0.18 d	0.39 e	0.31 e	0.23 e
	<i>F</i> 值	密度 Density (D)	322.43**	45.07**	207.30**	56.75**	241.38**	280.65**
	<i>F</i> -value	种植方式 Planting patterns (T)	318.15**	19.00*	141.69**	134.36**	106.93**	160.60*
		密度×种植方式 D×T	1.43	4.21	4.62	1.80	2.87	0.52

标以不同小写字母的值在同一年份不同处理间在 0.05 水平差异显著; *和**分别表示同年份不同处理 $P < 0.05$ 和 $P < 0.01$ 。处理同表 1。
In the same year, values within a column followed by different small letters can significantly different among treatments at the 0.05 probability level. * and ** indicate significance among treatments in the same year at $P < 0.05$ and $P < 0.01$, respectively. Treatments correspond to those given in Table 1.

2.6 根冠比及单位根重获得的籽粒产量

由图 3 可知, 两种模式根冠比和单位根重获得的籽粒产量吐丝期密度间差异较小, 完熟期随密度增加而减小。同密度下不同种植模式比较, 吐丝期根冠比高密度下 TGCW 低于对照, 完熟期高于对照; 单位根重获得的籽粒产量吐丝期 TGCW 高于 CK, 完熟期 TGCW 低于 CK。这可能由吐丝后 TGCW 干

物质积累量高于 CK, TGCW 深层根系占比高, 后期衰老缓慢, 保持较高根系生物量所导致。

2.7 根-冠指标与产量的相关性

由图 4 可知, 吐丝前 TGCW 处理干物质积累量与产量显著相关, 吐丝后 TGCW 和 CK 干物质积累量与产量均极显著相关, 说明 TGCW 花前大量茎叶干物质积累是产量形成的基础, 花后较强的干物质

表 6 不同种植模式下不同土层深度春玉米根分布比例
Table 6 Roots distribution of spring maize in different soil layers under different planting patterns (%)

土层深度 Soil depth (cm)	种植密度 Plant density ($\times 10^4$ plants hm^{-2})	种植模式 Planting pattern	2017			2018		
			吐丝期 Silking	乳熟期 Milking	完熟期 Maturity	吐丝期 Silking	乳熟期 Milking	完熟期 Maturity
0–20	6.75	TGCW	91.89	91.87	93.59	91.87	91.60	93.13
		CK	93.68	93.48	94.77	93.26	92.10	94.29
	8.25	TGCW	91.58	92.62	93.74	91.46	91.94	93.03
		CK	93.82	93.84	95.17	93.37	93.48	94.94
	9.75	TGCW	91.27	92.96	93.40	91.62	93.05	93.30
		CK	94.31	95.03	95.12	93.26	93.94	94.83
20–40	6.75	TGCW	5.16	4.94	3.97	5.42	5.08	4.20
		CK	4.01	3.72	3.22	4.66	4.98	3.36
	8.25	TGCW	5.91	5.01	4.30	5.80	5.41	4.80
		CK	4.36	4.05	3.22	4.55	4.66	3.38
	9.75	TGCW	6.25	4.52	4.53	5.78	4.50	4.27
		CK	4.02	3.31	3.22	4.67	4.06	3.19
40–60	6.75	TGCW	2.95	3.19	2.44	2.71	3.33	2.67
		CK	2.30	2.80	2.01	2.08	2.92	2.35
	8.25	TGCW	2.51	2.37	1.96	2.74	2.65	2.16
		CK	1.82	2.11	1.61	2.08	1.86	1.69
	9.75	TGCW	2.49	2.52	2.07	2.61	2.45	2.44
		CK	1.66	1.66	1.66	2.07	2.00	1.98

处理同表 1。Treatments correspond to those given in Table 1.

图 3 不同种植模式下春玉米根冠比及单位根重获得的籽粒产量
Fig. 3 Ratio of root/shoot and grain weight per unit of root weight under different planting patterns

图 4 不同种植方式下根冠生物量与籽粒产量的相关性

Fig. 4 Correlation analysis between dry matter accumulation, root dry weight and grain yield under different planting patterns
a、c 为吐丝前, b、d 为吐丝后。a、c for before silking; b、d for after silking. $^*P < 0.05$; $^{**}P < 0.01$.

积累能力是产量增加的主要原因。吐丝期 TGCW 单位面积根干重与产量达极显著 ($R^2=0.8747$), CK 相关不显著, 乳熟期 TGCW 和 CK 均呈显著相关, 说明 TGCW 花前发达的根系是产量形成的前提, 花后延缓根系早衰是保证高产的又一重要因素。

3 讨论

玉米生产过程是一个群体生产过程, 产量提高是单株效应和群体效应相协调的结果, 生育后期叶片衰老, 叶绿素含量、冠层光合能力下降, 会明显降低籽粒产量, 而高密度会加剧个体间资源竞争^[19-22]。李少昆等^[23]认为, 种植密度增加, 改善株型、减缓叶片早衰, 延长光合、提高吐丝后物质高效生产与转移, 是增产的有效途径。但密度增大使 0~20 cm 土层根系拥挤、空间受限而导致单株根系干重与根系长度均显著降低^[24-25], 高密度下促进根系向下层土壤的生长, 增加群体根系容纳量, 减弱 0~20 cm 土层根系的拥挤现象, 增加 20 cm 土层中的单株根系干重与根长^[26], 提高灌浆期的光合能力及高值持续期是玉米高产的潜力所在。刘朝巍等^[27]研究表明, 根系垂直分布中, 宽窄行比均匀垄处理显著增加了根系在深层土壤所占的比例, 本研究表明, 条带耕

作错位种植模式由于将原来的一个播种带一个单行直线播种, 改为一个播种带 15 cm 宽度的小双行交错种植, 播种带的植株呈对角状折线分布, 加之条耕作用, 减弱 0~20 cm 土层根系的拥挤现象, 高密度下吐丝期 20 cm 以下土层根干重、乳熟期和完熟期各土层根干重显著提高, 20~40 cm 和 40~60 cm 土层深度根系分布比例 TGCW>CK。刘朝巍等^[27]也指出, 宽窄行底部透光率高于均匀垄处理, 差异达显著水平, 梁熠等^[28]研究表明, 宽窄行栽培有效改善了玉米的群体结构, 增加了中部冠层的透光率。本研究中, 条带耕作错位种植模式高密度条件下叶面积指数吐丝期差异不显著, 但穗位上和穗位层透光率及光合势各密度下均显著高于等行距常规种植, 冠层结构更加合理。

根系的主要功能是从土壤中吸收水分、养分, 冠层则在地上合成碳水化合物, 根、冠之间频繁进行着物质和能量交换^[29], 根、冠生长是通过冠合成的碳水化合物和根系吸收的水分和养分的分配调节的, 碳水化合物合成减少, 根系生长则受到抑制, 根对矿质养分的吸收减少^[4]。随着根系扩展深度的增加, 根系生长空间、可利用土壤养分空间增加, 根生育后期根系活力高, 深层土壤根系比率的增加,

有利于玉米吸收深层土壤的水分和养分, 提高玉米抗逆性, 对延缓生育后期根系衰老、保持根系对地上部营养和水分供应是有益的^[15]。所以, 地上部光合与地下部根群共同组成了一个完整的光合生产系统, 生育后期维持较高水平可促进产量的增加。本研究中条带耕作错位种植在 8.25 万株 hm^{-2} 密度下增幅显著, 2017 年和 2018 年分别高 13.1% 和 13.8%。生育后期衰老缓慢, 冠根比和单位根重获得的籽粒产量明显提高。该模式能够促进根系向深层土壤的伸长生长, 吐丝前发达的根系, 吐丝后维持较高根系生物量, 促进地上部的生长与发育和冠层结构更加合理、地上地下协调。相关分析表明, 条带耕作错位种植产量与吐丝前干物质积累量和乳熟期单位面积根干重呈显著相关, 与吐丝后干物质积累量 ($R^2=0.8693$) 和吐丝期单位面积根干重 ($R^2=0.8747$) 呈极显著相关, 等行距常规种植产量与吐丝后干物质积累和乳熟期单位面积根干重显著相关, 与吐丝前干物质积累量和吐丝期单位面积根干重相关不显著; 说明条带耕作错位种植花前发达的根系是产量形成的前提, 花后延缓根系早衰, 维持较强的干物质积累能力实现群体冠根的有效协调是产量增加的主要原因。

玉米增密仍然是西辽河平原灌区玉米增产的有效途径, 且增密空间较大, 但西辽河平原灌区多为传统等行距 (60 cm) 种植方式, 加之多年浅旋耕作方式导致犁底层加厚土壤容重增加^[30], 根系下扎相对困难, 增密后早衰倒伏现象在生产中较为突出^[31]。苗带耕作错位种植模式, 有效缓解 0~20 cm 土层根系的拥挤现象, 且深层根系比例较高, 冠根协调有效延缓生育后期叶片衰老, 同时条带旋耕错位种植模式配套农机具一次性作业可同时完成条带旋耕、深层施肥和小双行错位播种等环节, 可实现大面积机械化播种等, 同时节约了机械投入的成本。另外该模式种植采用 (15+45) cm 小双行错位播种, 在 45 cm 宽行铺带, 可与通辽市大面积推广的浅埋滴灌相结合, 达到节水减肥增效, 在西辽河平原灌区具有明显推广应用价值。

4 结论

条带耕作错位种植模式显著提高了玉米籽粒产量, 8.25 万株 hm^{-2} 密度下两年平均提高 13.45%。该模式增产的原因, 一是玉米吐丝后干物质积累量及积累率具有明显优势, 延缓了生育后期叶片衰老程度。二是穗位上和穗位透光率显著提高, 生育后期

叶面积指数、净光合速率均明显提高。三是吐丝前具有发达的根系, 吐丝后维持较高根系生物量, 高密度下 20~60 cm 根系占比明显提高, 根冠比和吐丝期单位根重获得籽粒产量均具有明显优势。该模式在西辽河平原灌区与大面积推广的浅埋滴灌相结合, 节水减肥增效, 具有显著的推广应用价值。

References

- [1] 王崇桃, 李少昆, 韩伯棠. 玉米高产之路与产量潜力挖掘. 科技导报, 2006, 24(4): 8-11.
Wang C T, Li S K, Han B T. Approaches to high-yielding and yield potential exploration in corn. *Sci Technol Rev*, 2006, 24(4): 8-11 (in Chinese with English abstract).
- [2] 靳立斌, 张吉旺, 李波, 崔海岩, 董树亭, 刘鹏, 赵斌. 高产高效夏玉米的冠层结构及其光合特性. 中国农业科学, 2013, 46: 2430-2439.
Jin L B, Zhang J W, Li B, Cui H Y, Dong S T, Liu P, Zhao B. Canopy structure and photosynthetic characteristics of high yield and high nitrogen efficiency summer maize. *Sci Agric Sin*, 2013, 46: 2430-2439 (in Chinese with English abstract).
- [3] 杨丽雯, 张永清. 4 种旱作谷类作物根系发育规律的研究. 中国农业科学, 2011, 44: 2244-2251.
Yang L W, Zhang Y Q. Developing patterns of root systems of four cereal crops planted in dryland areas. *Sci Agric Sin*, 2011, 44: 2244-2251 (in Chinese with English abstract).
- [4] 陈晓远, 高志红, 罗远培. 植物根冠关系. 植物生理学通讯, 2005, 41: 555-562.
Chen X Y, Gao Z H, Luo Y P. Relationship between root and shoot of plants. *Plant Physiol Commun*, 2005, 41: 555-562 (in Chinese with English abstract).
- [5] 张玉芹, 杨恒山, 高聚林, 张瑞富, 王志刚, 徐寿军, 范秀艳, 杨升辉. 超高产春玉米冠层结构及其生理特性. 中国农业科学, 2011, 44: 4367-4376.
Zhang Y Q, Yang H S, Gao J L, Zhang R F, Wang Z G, Xu S J, Fan X Y, Yang S H. Study on canopy structure and physiological characteristics of super-high yield spring maize. *Sci Agric Sin*, 2011, 44: 4367-4376 (in Chinese with English abstract).
- [6] 郭家萌, 刘振朝, 高强, 薛吉全, 高聚林, 翟广谦, 柳家友, 孙海昆, 郭新平, 边少锋, 王俊河, 王延波, 张东兴, 陈新平. 深松对玉米产量和养分吸收的影响. 水土保持学报, 2016, 30(2): 249-254.
Guo J M, Liu Z C, Gao Q, Xue J Q, Gao J L, Zhai G Q, Liu J Y, Sun H K, Guo X P, Bian S F, Wang J H, Wang Y B, Zhang D X, Chen X P. Effects of subsoiling on yield and nutrient uptake of maize. *J Soil & Water Conserv*, 2016, 30(2): 249-254 (in Chinese with English abstract).
- [7] 王新兵, 侯海鹏, 周宝元, 孙雪芳, 马玮, 赵明. 条带深松对不同密度玉米群体根系空间分布的调节效应. 作物学报, 2014, 40: 2136-2148.
Wang X B, Hou H P, Zhou B Y, Sun X F, Ma W, Zhao M. Effect of strip subsoiling on population root spatial distribution of maize under different planting densities. *Acta Agron Sin*, 2014, 40: 2136-2148 (in Chinese with English abstract).
- [8] 王洪君, 王楠, 胡宇, 栾天宇, 孙孟琪, 梁烜赫, 赵鑫, 栾天浩,

- 代永刚, 陈宝玉. 半干旱区玉米行距调整增密对群体冠层结构及产量的影响. 玉米科学, 2018, 26(6): 75–78.
- Wang H J, Wang N, Hu Y, Luan T Y, Sun M Q, Liang X H, Zhao X, Luan T H, Dai Y G, Chen B Y. Effects of row spacing on canopy structure and yield of maize in semi-arid area. *J Maize Sci*, 2018, 26(6): 75–78 (in Chinese with English abstract).
- [9] 何冬冬, 杨恒山, 张玉芹. 扩行距、缩株距对春玉米冠层结构及产量的影响. 中国生态农业学报, 2018, 26: 397–408.
- He D D, Yang H S, Zhang Y Q. Effects of line-spacing expansion and row-spacing shrinkage on canopy structure and yield of spring corn. *Chin J Eco-Agric*, 2018, 26: 397–408 (in Chinese with English abstract).
- [10] Liu T D, Song F B. Maize photosynthesis and microclimate within the canopies at grain-filling stage in response to narrow-wide row planting patterns. *Photosynthetica*, 2012, 50: 215–222.
- [11] 魏珊珊, 王祥宇, 董树亭. 株行距配置对高产夏玉米冠层结构及籽粒灌浆特性的影响. 应用生态学报, 2014, 25: 441–450.
- Wei S S, Wang X Y, Dong S T. Effects of row spacing on canopy structure and grain-filling characteristics of high-yield summer maize. *Chin J Appl Ecol*, 2014, 25: 441–450 (in Chinese with English abstract).
- [12] Ren B Z, Li X, Dong S T, Liu P, Zhao B, Zhang J W. Soil physical properties and maize root growth under different tillage systems in the North China Plain. *Crop J*, 2018, 6: 669–676.
- [13] Shao H, Shi D F, Shi W J, Ban X B, Chen Y C, Ren W, Chen F J, Mi G H. Genotypic difference in the plasticity of root system architecture of field-grown maize in response to plant density. *Plant Soil*, 2019, 439: 201–217.
- [14] 宋日, 刘利, 吴春胜, 马丽艳. 根系生长空间对玉米生长和养分吸收的影响. 西北农林科技大学学报, 2009, 37(6): 58–64.
- Song R, Liu L, Wu C S, Ma L Y. The effect of root growth space on maize growth and nutrient absorption. *J Northwest A&F Univ*, 2009, 37(6): 58–64 (in Chinese with English abstract).
- [15] 张玉芹, 杨恒山, 高聚林, 张瑞富, 王志刚, 徐寿军, 范秀艳, 毕文波. 超高产春玉米的根系特征. 作物学报, 2011, 37: 735–743.
- Zhang Y Q, Yang H S, Gao J L, Zhang R F, Wang Z G, Xu S J, Fan X Y, Bi W B. Root characteristics of super high-yield spring maize. *Acta Agron Sin*, 2011, 37: 735–743 (in Chinese with English abstract).
- [16] Duvick D N. The contribution of breeding to yield advances in maize (*Zea mays* L.). *Adv Agron*, 2005, 86: 83–145.
- [17] 杨哲. 栽培措施对春玉米产量差和效率差的贡献及其调控机制. 内蒙古农业大学硕士学位论文, 内蒙古通辽, 2018.
- Yang Z. Contribution of Management Factors to the Gaps of Yield and Resource Use Efficiency of Spring Maize and Regulating Pathway. MS Thesis of Inner Mongolia Agricultural University, Tongliao, Inner Mongolia, China, 2018 (in Chinese with English abstract).
- [18] 赵明, 马玮, 周宝元, 孙雪芳. 实施玉米推垄清垄精播技术实现高产高效与环境友好生产. 作物杂志, 2016, (3): 1–5.
- Zhao M, Ma W, Zhou B Y, Sun X F. Using integrated technology of stubble-shoving, ridge-cleaning and precise sowing to achieve the high yield, high efficiency and environment-friendly in maize production. *Crops*, 2016, (3): 1–5 (in Chinese with English abstract).
- abstract).
- [19] 魏建军, 罗赓彤, 张力, 潘文远. 超高产大豆主要群体生理参数与经济产量关系的研究. 中国油料作物学报, 2007, 29: 272–276.
- Wei J J, Luo G T, Zhang L, Pan W Y. A study of relation between canopy physiological parameter and seed yield in super high-yield soybean. *Chin J Oil Crop Sci*, 2007, 29: 272–276 (in Chinese with English abstract).
- [20] 李潮海, 刘奎. 不同产量水平玉米杂交种生育后期光合效率比较分析. 作物学报, 2002, 28: 379–383.
- Li C H, Liu K. Analysis of photosynthesis efficiency of maize hybrids with different yield in the later growth stage. *Acta Agron Sin*, 2002, 28: 379–383 (in Chinese with English abstract).
- [21] Maddonni G A, Otegui M E, Cirilo A G. Plant population density, rows pacing and hybrid effects on maize canopy architecture and light attenuation. *Field Crops Res*, 2001, 71: 183–193.
- [22] 苒建峰, 张海红, 李鸿萍, 董鹏飞, 李潮海. 不同行距配置方式对夏玉米冠层结构和群体抗性的影响. 作物学报, 2016, 42: 104–112.
- Chang J F, Zhang H H, Li H P, Dong P F, Li C H. Effects of different row spaces on canopy structure and resistance of summer maize. *Acta Agron Sin*, 2016, 42: 104–112 (in Chinese with English abstract).
- [23] 李少昆, 王崇桃. 中国玉米生产技术的演变与发展. 中国农业科学, 2009, 42: 1941–1951.
- Li S K, Wang C T. Evolution and development of maize production techniques in China. *Sci Agric Sin*, 2009, 42: 1941–1951 (in Chinese with English abstract).
- [24] 杨罗锦, 陶洪斌, 王璞. 种植密度对不同株型玉米生长及根系形态特征的影响. 应用与环境生物学报, 2012, 18: 1009–1013.
- Yang L J, Tao H B, Wang P. Effect of planting density on plant growth and root morphology of maize. *Chin J Appl Environ Biol*, 2012, 18: 1009–1013 (in Chinese with English abstract).
- [25] 李宗新, 陈源泉, 王庆成, 刘开昌, 高旺盛, 隋鹏. 高产栽培条件下种植密度对不同玉米品种根系时空分布动态的影响. 作物学报, 2012, 38: 1286–1294.
- Li Z X, Chen Y Q, Wang Q C, Liu K C, Gao W S, Sui P. Influence of planting density on root spatio-temporal distribution of different types of maize under high-yielding cultivation conditions. *Acta Agron Sin*, 2012, 38: 1286–1294 (in Chinese with English abstract).
- [26] 张瑞富, 杨恒山, 高聚林, 张玉芹, 王志刚, 范秀艳, 毕文波. 深松对春玉米根系形态特征和生理特性的影响. 农业工程学报, 2015, 31(5): 78–84.
- Zhang R F, Yang H S, Gao J L, Zhang Y Q, Wang Z G, Fan X Y, Bi W B. Effect of subsoiling on root morphological and physiological characteristics of spring maize. *Trans CSAE*, 2015, 31(5): 78–84 (in Chinese with English abstract).
- [27] 刘朝巍, 张恩和, 谢瑞芝, 刘武仁, 李少昆. 玉米宽窄行交替休闲保护性耕作的根系和光分布特征研究. 中国生态农业学报, 2012, 20: 203–209.
- Liu C W, Zang E H, Xie R Z, Liu W R, Li S K. Effect of conservation tillage of wide/narrow row planting on maize root and transmittance distribution. *Chin J Eco-Agric*, 2012, 20: 203–209 (in Chinese with English abstract).
- [28] 梁熠, 何文寿, 代晓华, 马琨, 侯贤清. 株行配置对春玉米根

- 冠空间分布及产量的影响. 玉米科学, 2016, 24(6): 97–102.
- Liang Y, He W S, Dai X H, Ma K, Hou X Q. Effects of planting density and row spacing on root-shoot spatial distribution and grain yield of spring maize. *J Maize Sci*, 2016, 24(6): 97–102 (in Chinese with English abstract).
- [29] Brouwer R. Functional equilibrium: sense or nonsense. *Neth J Agric Sci*, 1983, 31: 335–348.
- [30] 肖继兵, 孙占祥, 杨久廷, 张玉龙, 郑家明, 刘洋. 半干旱区中耕深松对土壤水分和作物产量的影响. 土壤通报, 2011, 42: 709–714.
- Xiao J B, Sun Z X, Yang J T, Zhang Y L, Zheng J M, Liu Y. Effect of subsoiling on soil water and crop yield in semi-arid area. *Chin J Soil Sci*, 2011, 42: 709–714 (in Chinese with English abstract).
- [31] 王新兵, 侯海鹏, 周宝元, 孙雪芳, 马玮, 赵明. 条带深松对不同密度玉米群体根系空间分布的调节效应. 作物学报, 2014, 40: 2136–2148.
- Wang X B, Hou H P, Zhou B Y, Sun X F, Ma W, Zhao M. Effect of strip subsoiling on population root spatial distribution of maize under different planting densities. *Acta Agron Sin*, 2014, 40: 2136–2148 (in Chinese with English abstract).