

模拟犁底层对春玉米物质积累及 转运与分配的影响

曹庆军^{1,2}, 李刚¹, 杨粉团¹, 宋凤斌², 姜晓莉¹, 陈喜凤¹

(1. 吉林省农业科学院/农业部东北作物生理生态与耕作重点实验室, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院东北地理与农业生态研究所, 吉林 长春 130102)

摘要: 采用 PVC 管栽的方法, 研究了模拟犁底层和深松处理对春玉米物质积累、转运与分配的影响。结果表明: 采用 Richards 方程可较好地模拟(拟合度 $r = 0.9987 \sim 0.9991$) 玉米出苗后不同天数干物质积累量动态, 犁底层处理下玉米最大生长速率以及活跃生长持续期均低于深松处理, 表明犁底层限制了玉米的发育进程, 同时也影响了地上干物质积累及其在器官中的分配。犁底层处理成熟期干物质在各器官的分配量显著低于深松处理, 但茎的物质分配比例显著高于深松, 说明犁底层的存在降低了茎器官向籽粒的转移量和转移率, 并最终导致玉米的单株籽粒产量下降。因此, 采取深松处理, 打破犁底层是当前条件下东北春玉米实现再高产的重要措施。

关键词: 春玉米; 犁底层; 深松; 物质积累; 物质分配

中图分类号: S344 **文献标志码:** A

Effects of simulated plow pan on accumulation, transportation and distribution of dry matter in spring maize

CAO Qing-jun^{1,2}, LI Gang¹, YANG Fen-tuan¹, SONG Feng-bin², JIANG Xiao-li¹, CHEN Xi-feng¹

(1. Jilin Academy of Agriculture Science/Key Laboratory of Northeast Crop Physiological Ecology and Cultivation, Ministry of Agriculture in People's Republic of China, Changchun, Jilin 130033, China;

2. Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Science, Changchun, Jilin 130102, China)

Abstract: A pot experiment with PVC tube was conducted to investigate the effects of simulation plow pan and subsoiling on the accumulation, transportation and distribution of dry matter in spring maize. The results indicated that the dynamic change of dry matter accumulation in different days after emergence could be well fitted by the model of Richard's equation ($r = 0.9987 \sim 0.9991$). The maximum growth rate and active growth duration days under plow pan were significantly lower than those under subsoiling, showing that plow pan limited the development of maize, and also inhibited the dry matter accumulation in above-ground parts and its distribution to different organs. The total amount of dry matter distributed to different organs at maturity under plow pan was significantly lower than that under subsoiling. On the contrary, the ratio of dry matter distributed to stem under plow pan was significantly higher than that under subsoiling, which demonstrated that the amount and rate of dry matter transfer from stem to kernels were reduced by the existence of plow pan, resulting in the reduce of grain yield per plant consequently. In conclusion, breaking plow pan by deep subsoiling is an important measure to achieve high yield of spring maize in Northeast China at present.

Keywords: spring maize; plow pan; subsoiling; dry matter accumulation; dry matter distribution

吉林省位于世界著名的三大“黄金玉米带”之一, 也是我国重要的商品粮基地^[1]。但随着玉米连作种植年限的增长以及传统耕作方式的影响, 土地

很少或者几乎不翻耕, 造成耕作层变浅、犁底层加厚, 使土壤的物理结构遭到破坏, 理化性状恶化, 表现为土壤紧实、容重增加, 增加了根系下扎阻

收稿日期: 2016-01-25

基金项目: “948”项目(2011-G19); 吉林省科技发展计划项目(2015JGLS003NY); 国家自然科学基金面上项目((31071370)

作者简介: 曹庆军(1986—), 男, 助理研究员, 博士研究生, 研究方向玉米栽培生理生态研究。E-mail: qingjunfool@163.com。

通信作者: 李刚(1963—), 男, 研究员, 博士, 主要从事农产品安全生产研究。E-mail: ligang6@yeah.net。

宋凤斌(1963—), 男, 研究员, 博士, 主要从事作物生理生态研究。E-mail: songfb@neigae.ac.cn。

力^[2-3],蓄水能力和通透性变差,并导致玉米叶片早衰、籽粒败育^[4]等严重问题,犁底层问题已经成为当前制约春玉米生产的主要障碍。

土壤是作物生长的基础^[5],良好的水、肥、气、热等环境条件是促进作物生长发育的必要条件^[3]。犁底层存在延缓了作物前期的生长发育进程,并降低开花期绿叶面积及开花后相对绿叶面积^[6],另外,它限制了根系生长,影响了其在深层土壤中的分布量^[7],还有研究表明,犁底层能加速玉米生育后期衰老过程中穗位叶叶绿体的分解^[8],是引发春玉米早衰发生的重要原因^[6,8]。而物质生产是玉米经济产量形成的基础^[9]。玉米 90%~95%的干物质来自绿色叶片的光合产物,产量形成具体表现为干物质的积累及其在各器官的分配^[2]。要获得高产,不仅源、库要协调,还要考虑到运转的协调。大量研究表明,物质的积累与分配除了受品种^[10-12]、栽培措施^[9,13-14]影响外,受耕作措施^[15-17]、土壤状况^[18-19]、气候条件等环境因子的影响较大。但目前对于犁底层条件下春玉米物质积累与转运方面的研究,鲜有报道。

因此,本研究探讨犁底层条件下,春玉米物质积累与转移规律研究,对于进一步揭示深松增产机理以及促进玉米生产的可持续发展具有十分重要的意义。

1 材料与方法

1.1 试验地点与材料

试验于 2012—2013 年在吉林省农业科学院长春院区试验地进行,材料为玉米杂交种郑单 958,试验土壤基础肥力为有机质 $16.43 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,全氮 $1.2 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,有效氮 $127.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、速效磷 $19.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、速效钾 $101.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

1.2 试验设计

采用 PVC 管栽的方法,PVC 管直径为 25 cm,管长度为 75 cm。试验共设深松(Simulated subsoil,记作 SS)和模拟犁底层(Simulated plow pan,记作 SP)2 个处理,具体参照曹庆军^[20],试验装置所用 PVC 管由三层构成(如图 1 所示),自上至下管的长度为 20-15-40 cm,各段之间连接处采用不粘胶和专业胶水密封。深松处理管内土壤紧实度均匀一致,容重为 $1.2 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ (根据管的体积和土壤水分含量计算出土壤重量),模拟犁底层处理中部管容重为 $1.5 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ (根据区域田间调查结果),人工进行砸实,上部和下部与深松处理容重相同;种植密度按 $5 \text{ 500 株} \cdot \text{hm}^{-2}$ 的密度设置,行距 60 cm,株距 33 cm,每处

理种植 25 管,管栽周围种植 4 行保护区;2012 年 5 月 10 日播种,9 月 27 日收获,2013 年 5 月 7 日播种,9 月 25 号收获,按照大田种植方式底肥一次性施入,每管施用 NPK 比例为 23-10-12 的复合肥 10.6 g ,深度为 15 cm,其他管理按照一般高产田进行。

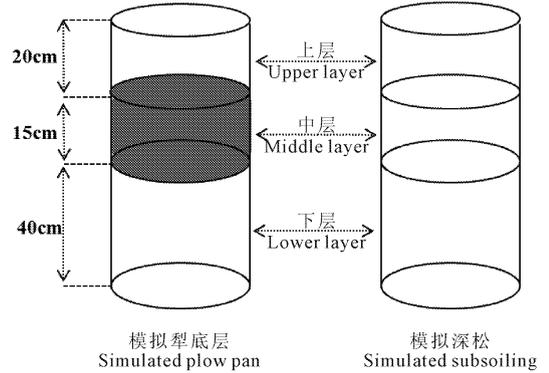


图 1 模拟犁底层和深松处理管栽示意图

Fig. 1 Schematic diagram of test equipment with PVC tube

1.3 测定指标与方法

分别在玉米出苗后 30、50、70、80、90、100、110 d 进行取样,每处理每次取 3 株,105℃杀青 30 min,然后 80℃烘干至恒重,称重;在开花期和完熟期取样时将玉米植株按茎、叶、鞘、籽粒、穗轴等分别标记装于牛皮纸袋,烘干称重用于计算干物质在各器官的分配(Dry matter distribution, DMD)及转移(Dry matter translocation, DMT)等,计算公式为:

物质转运率 = $[(\text{该器官最大干重} - \text{该器官成熟时干重}) / \text{该器官最大干重}] \times 100\%$;

对籽粒贡献率 = $[(\text{该器官最大干重} - \text{该器官成熟时干重}) / \text{籽粒干重}] \times 100\%$ 。

玉米干物质积累(Dry matter accumulation, DMA)动态具体参照刘克礼^[21]、王永军^[22-23]等方法进行,采用 Richards 方程进行模拟: $W = A(1 + Be^{-Ct})^{-1/D}$,其中 A 为终极生长量, B 为初值参数, C 为生长速率参数, D 为形状参数;

物质积累速率最大时日期: $T_{\max} = (\ln B - \ln D) / C$;

最大积累速率: $G_{\max} = (CW_{\max} / D)[1 - (W_{\max} / A)D]$ 。

1.4 数据来源与处理

文中除籽粒产量数据外均来自于 2012 和 2013 两年混合数据,差异显著性分析采用 SPSS 17.0 软件中 Independent - Sample T - test 模块进行,利用 Curve expert 1.3 进行生物量积累动态模拟, Sigma plot 12.0 作图。

2 结果与分析

2.1 模拟犁底层对春玉米单株籽粒产量及穗部性状的影响

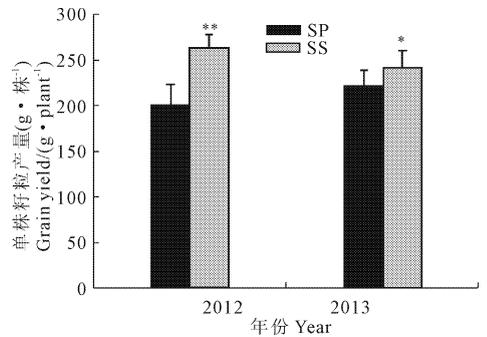
如图 2 所示,2012 年和 2013 年模拟犁底层处理下单株籽粒产量分别极显著($P < 0.01$)和显著($P < 0.05$)低于模拟深松处理,与深松相比玉米单株籽粒产量分别降低 31.72% 和 8.71%。

进一步从玉米穗部性状上分析,模拟犁底层处理下单株穗粒数和百粒重均极显著或显著低于模拟深松处理(见表 1),是籽粒产量降低的主要原因。

2.2 模拟犁底层对玉米生育期 DMA 的影响

从图 3 中可以看出,在整个生育时期干物质积累动态呈 S 型曲线,模拟犁底层和模拟深松处理在开花前差异较小,花后差异较大,从图 3 可以看出从出苗后 50 d 至成熟期干物质积累量差异逐渐明显,

相同时期均表现为模拟犁底层处理极显著的低于深松处理。



注:平均值±标准差, $n = 4$; * 和 ** 分别表示在 0.05 和 0.01 水平上差异显著,下同。

Note: Mean \pm SD, $n = 4$; * and ** indicate significant difference at 0.05 and 0.01 level, respectively, the same below.

图 2 模拟犁底层对春玉米单株籽粒产量的影响

Fig. 2 Effect of simulated plow pan on grain yield of maize

表 1 模拟犁底层对玉米穗部性状的影响

Table 1 Effect of simulated plow pan on ear characters of maize

处理 Treatment	2012				2013			
	行数 Row number	行粒数 Kernels per row	穗粒数 Kernels per ear	百粒重 100-grain weight	行数 Row number	行粒数 Kernels per row	穗粒数 Kernels per ear	百粒重 100-grain weight
SP	15.33 \pm 1.03 *	43.80 \pm 4.02 *	632.00 \pm 26.93 **	43.27 \pm 4.97 **	15.17 \pm 0.53	42.41 \pm 5.41 *	620.70 \pm 28.00 *	42.11 \pm 3.54 *
SS	13.00 \pm 1.10	34.67 \pm 3.78	431.20 \pm 44.94	35.92 \pm 4.40	15.00 \pm 0.71	35.01 \pm 4.11	545.22 \pm 30.07	33.47 \pm 3.78

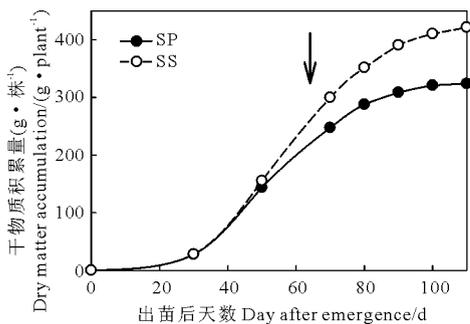


图 3 模拟犁底层处理下玉米地上干物质积累动态(箭头表示开花期)

Fig. 3 Effect of simulated plow pan on dynamic change of dry matter accumulation in above-ground parts (Arrow means the period of anthesis)

采用 Richards 方程对出苗后不同天数与对应的干物质积累量进行模拟,模型拟合度较高($r = 0.9987 \sim 0.9991$),并进一步对模型参数进行估计(见表 2),结果表明模拟犁底层处理下玉米最大生长速率时期为出苗后 54.48 d,而模拟深松处理为出苗后 58.57 d,模拟犁底层处理最大生长速率为 $6.65 \text{ g} \cdot \text{d}^{-1}$,明显低于模拟深松处理 $8.24 \text{ g} \cdot \text{d}^{-1}$,活跃生长

持续为 73.26 d 也明显小于模拟深松处理下 77.41 d。

2.3 模拟犁底层对春玉米干物质转运与分配的影响

模拟犁底层处理下物质转移量、转移率及对籽粒的贡献率见表 3,从表中可知,各器官干物质向籽粒的转移量由大到小依次是:茎 > 叶 > 鞘 > 苞叶;从各器官干物质向籽粒的转移率,由大到小依次是:苞叶 > 叶鞘 > 叶 > 茎;从各器官对籽粒的贡献率来看,由大到小依次是:茎 > 叶 > 鞘 > 苞叶。不同处理比较,模拟犁底层处理下茎、叶、鞘、苞叶等器官干物质向籽粒平均转移量分别比深松处理降低 51.93%、47.22%、42.69%、37.10%,另外,茎、叶、鞘、苞叶器官物质平均转移率和对籽粒贡献率也比深松处理下平均降低 7.60% 和 1.25%。

干物质在各器官分配量及分配比例上(图 4 和图 5),均表现为:籽粒 > 茎 > 叶鞘 > 穗轴。不同处理比较表明,模拟犁底层处理下籽粒、茎、叶、苞叶等器官干物质质量均极显著和显著低于深松处理;从物质分配比例上看,深松处理籽粒中分配的比例为 55.71%,显著高于犁底层处理,而犁底层处理下茎中干物质分配比例为 16.71% 显著高于深松处理。

表 2 玉米地上生物量与出苗后天数的回归方程及参数

Table 2 Regression equation and parameters of above-ground biomass and days after emergence

处理 Treatment	模拟方程 Simulation equation	生长速率最 大时期 T_{max} Period of largest growth rate	最大生长 速率 G_{max} Largest growth rate	活跃生长 持续期 P Active growth duration	拟合系数 r Fitting coefficient
SP	$W = 325.41 / (1 + 86.70e^{-0.0819t})$	54.48	6.65	73.26	0.9987
SS	$W = 425.40 / (1 + 93.68e^{-0.0775t})$	58.57	8.24	77.41	0.9991

表 3 模拟犁底层对春玉米物质转运的影响

Table 3 Effect of simulated plow pan on dry matter translocation of maize

处理 Treatment	转移量 Transfer amount ($g \cdot plant^{-1}$)					转移率 Transfer rate/%					贡献率 Contribution rate/%				
	茎 Stem	叶 Leaf	鞘 Sheath	苞叶 Husk	平均 Average	茎 Stem	叶 Leaf	鞘 Sheath	苞叶 Husk	平均 Average	茎 Stem	叶 Leaf	鞘 Sheath	苞叶 Husk	平均 Average
SS	13.80*	12.0*	10.27*	9.30*	11.34*	18.6*	20.00*	27.65*	30.05*	24.1*	5.88*	5.11*	4.37	3.96	4.83*
SP	6.63	6.33	5.88	5.85	6.18	10.92	13.30	20.26	21.39	16.47	3.84	3.67	3.41	3.39	3.58

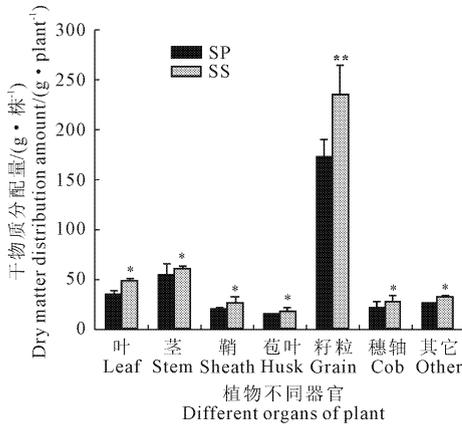


图 4 模拟犁底层处理对玉米地上生物量在各器官分配量的影响

Fig.4 Effect of simulated plow pan and subsoiling on dry matter distribution amount in different above-ground organs of maize

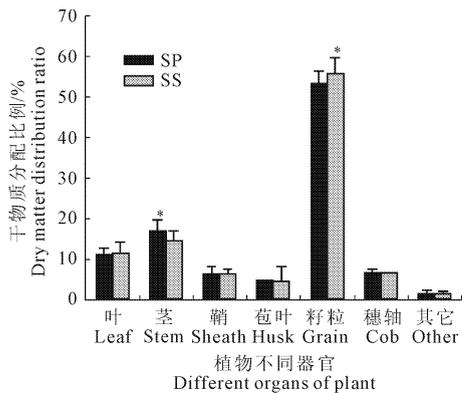


图 5 模拟犁底层处理对玉米地上生物量在各器官分配比例的影响

Fig.5 Effect of simulated plow pan on dry matter distribution ratio in different above-ground organs of maize

3 结论与讨论

土壤是作物生长的基础,作物的生长受耕作措施^[3,24]及生态环境条件^[25]的影响较大,良好的土壤和水、气、热等环境条件是作物地上部和地下协调生长,实现高产的重要条件^[23]。宋日等研究认为,土壤中坚硬的犁底层存在时,根系很难生长,使犁层上部的根量增多,下部的根量减少,而打破犁底层可明显地延长叶片的寿命,从而有利于灌浆后期植株生长^[7]。本试验结果证实,在犁底层处理下玉米最大生长速率以及活跃生长持续期均低于深松处理,成熟期干物质积累量比深松处理降低30.16%,王婷等^[11]研究表明,新疆地区青贮玉米物质积累峰值出现在出苗后 57 ~ 72 d,张玉玲^[26]等研究也表明,通过深松可以更好的协调玉米地下部根系和地上部植株的生长,从而有利于玉米生物量的形成和积累,这与本研究结果基本一致。王立春等进一步研究认为,深松打破犁底层,创造“虚实并存”的土壤结构,可更好的调节土壤水、气状况,促进玉米的生长发育^[5,27-28]。

玉米籽粒产量来源于吐丝期至成熟期形成的光合产物及叶、茎、鞘“临时性”贮藏器官向籽粒输送的光合产物^[9]。玉米成熟期干物质的积累和分配能定量说明开花后“源”的供应能力和同化产物的运输状况^[29]。大量研究表明,深松可以显著提高春玉米花后干物质的积累量及其占总生物量比例^[3,14,30]。本试验结果表明,深松处理下成熟期干物质在各器官的分配量显著高于犁底层处理,但在犁底层处理下干物质向茎的分配比例显著高于深松处理,这可能和犁底层条件下玉米生育后期功能叶片^[6,8]及地下根系^[20]发生早衰有关,从而使得茎器官向籽粒的转

移量和转移率降低,最终降低了玉米的单株籽粒产量。Hassan 研究也证实,在紧实度较高的土壤中,不利于同化物向籽粒中的转移^[31],这与本研究结果基本一致。李朝海^[32]等进一步研究认为,降低下层 20~40 cm 土壤容重,可延缓玉米衰老进程,促使玉米吸收更多的矿质营养,并使营养元素更多地向生长中心分配,是促进玉米后期干物质积累的重要原因。

穗数、穗粒数和千粒重等农艺性状是产量构成的基础^[3]。耕作措施不但影响植株的生长发育,而且影响籽粒的灌浆进程^[33]。孟庆秋^[34]等研究表明,大田深松条件下单穗穗粒数增加 15 粒,千粒重增加 17 g。本研究表明,犁底层处理下单株穗粒数和百粒重均显著降低,这可能是其籽粒产量降低的主要原因。综合分析,犁底层的存在限制了玉米地上生物量的积累同时降低了茎器官干物质在花后向籽粒的再转移量,最终表现为玉米籽粒产量的下降,因此,采取深松处理,打破犁底层更好的协调玉米地上和地下的生长发育,防止早衰发生是实现东北玉米再高产的重要措施。

参考文献:

- [1] 齐晓宁,王洋,王其存,等.吉林玉米带的地位与发展前景[J].地理科学,2002,(3):379-384.
- [2] 齐华,刘明,张卫建,等.深松方式对土壤物理性状及玉米根系分布的影响[J].华北农学报,2012,(4):191-196.
- [3] 阎晓光,李洪,王青水,等.不同深松时期对旱地春玉米水分利用状况及产量的影响[J].干旱地区农业研究,2014,32(6):165-170.
- [4] 边少锋,马虹,薛飞,等.吉林省西部半干旱区深松蓄水耕作技术研究[J].玉米科学,2000,(1):67-68.
- [5] 郑洪兵,郑金玉,罗洋,等.农田不同耕层构造对玉米生长发育及产量的影响[J].干旱地区农业研究,2015,33(5):41-45,95.
- [6] 杨粉团,李刚,陈喜凤,等.模拟犁底层条件下春玉米叶片形态发育及衰老表征[J].玉米科学,2013,(6):49-53.
- [7] 宋日,吴春胜,牟金明,等.打破犁底层对玉米根系生长发育的影响[J].耕作与栽培,2000,(5):6-7.
- [8] Li G, Yang F T, Jiang X L, et al. Effects of plow pan on SPAD value and chloroplast ultrastructure in leaves of spring maize[J]. *Phyton* (Buenos Aires), 2013,82:243-247.
- [9] 王楚楚,高亚男,张家玲,等.种植行距对春玉米干物质积累与分配的影响[J].玉米科学,2011,19(4):108-111.
- [10] 李利利,张吉旺,董树亭,等.不同株高夏玉米品种同化物积累转运与分配特性[J].作物学报,2012,(6):1080-1087.
- [11] 王婷,桑志勤,段震宇,等.不同类型玉米干物质积累及其在各器官的分配规律[J].新疆农业科学,2012,(9):1581-1586.
- [12] 童淑媛,宋凤斌,徐洪文.不同品种玉米籽粒成熟期间叶片形态衰老的差异[J].华北农学报,2009,(1):11-15.
- [13] 寇太记,郭金瑞,宋振伟,等.不同种植密度下东北春玉米根系特征及其干物质积累的差异比较[J].玉米科学,2013,(1):51-56.
- [14] 吴金芝,黄明,李友军,等.不同耕作方式对冬小麦光合作用产量和水分利用效率的影响[J].干旱地区农业研究,2008,26(5):17-21.
- [15] Bertolino A V F A, Fernandes N F, Miranda J P L, et al. Effects of plough pan development on surface hydrology and on soil physical properties in Southeastern Brazilian plateau[J]. *Journal of Hydrology*, 2010,393(1-2):94-104.
- [16] Jiang X, Liu X, Wang E, et al. Effects of tillage pan on soil water distribution in alfalfa-corn crop rotation systems using a dye tracer and geostatistical methods[J]. *Soil and Tillage Research*, 2015,150:68-77.
- [17] Reicosky D C, Archer D W. Moldboard plow tillage depth and short-term carbon dioxide release[J]. *Soil and Tillage Research*, 2007,94(1):109-121.
- [18] 修文雯,陈传晓,田晓东,等.充足灌水条件下不同年代玉米品种干物质积累与分配规律的研究[J].华北农学报,2012,(S1):176-181.
- [19] 杨国虎,李建生,罗湘宁,等.干旱条件下玉米叶面积变化及地上干物质积累与分配的研究[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2005,(5):27-32.
- [20] 曹庆军,姜晓莉,杨粉团,等.深松条件下春玉米花后衰老过程中根系生物学变化特征[J].玉米科学,2014,(5):86-91.
- [21] 刘克礼,刘景辉.春玉米干物质积累、分配与转移规律的研究[J].内蒙古农牧学院学报,1994,(1):1-10.
- [22] 王永军.超高产夏玉米群体质量与个体生理功能研究[D].泰安:山东农业大学,2008:123.
- [23] 王永宏,王克如,赵如浪,等.高产春玉米源库特征及其关系[J].中国农业科学,2013,(2):257-269.
- [24] 蔡丽君,边大红,田晓东,等.耕作方式对土壤理化性状及夏玉米生长发育和产量的影响[J].华北农学报,2014,(5):232-238.
- [25] 孙丽岚,杨恒山,张玉芹,等.春玉米干物质积累与转运对种植密度的响应[J].干旱地区农业研究,2015,33(5):46-51.
- [26] 张玉玲,张玉龙,黄毅,等.辽西半干旱地区深松中耕对土壤养分及玉米产量的影响[J].干旱地区农业研究,2009,27(4):167-170.
- [27] 王立春,马虹,郑金玉.东北春玉米耕地合理耕层构造研究[J].玉米科学,2008,(4):13-17.
- [28] 白伟,孙占祥,郑家明,等.虚实并存耕层提高春玉米产量和水分利用效率[J].农业工程学报,2014,(21):81-90.
- [29] 周均湖,李素真,王秋云,等.不同类型超级小麦地上部及籽粒干物质积累动态[J].山东农业科学,2006,(4):13-15.
- [30] 战秀梅,李秀龙,韩晓日,等.深耕及秸秆还田对春玉米产量、花后碳氮积累及根系特征的影响[J].沈阳农业大学学报,2012,(4):461-466.
- [31] Hassan F U, Ahmad M, Ahmad N, et al. Effects of subsoil compaction on yield and yield attributes of wheat in the sub-humid region of Pakistan[J]. *Soil and Tillage Research*, 2007,96(1-2):361-366.
- [32] 李潮海,梅沛沛,王群,等.下层土壤容重对玉米植株养分吸收和分配的影响[J].中国农业科学,2007,(7):1371-1378.
- [33] 陈乐梅,马林,刘建喜,等.免耕覆盖对春小麦灌浆期干物质积累特性及最终产量的影响[J].干旱地区农业研究,2006,24(6):21-24.
- [34] 孟庆秋,谢佳贵,胡会军,等.土壤深松对玉米产量及其构成因素的影响[J].吉林农业科学,2000,(2):25-28.