

土壤紧实胁迫对玉米苗期生长与钙吸收的影响*

徐海 王益权 王永健 徐爽 李鹏

(西北农林科技大学资源环境学院, 陕西杨凌 712100)

【摘要】 为揭示玉米对不同土壤紧实胁迫的响应程度与机理,以钙素为依据,设置土壤容重分别为 1.1、1.2、1.3、1.4 和 1.5 g/cm³ 等 5 个水平玉米盆栽试验,以探讨土壤紧实度对玉米苗期生长及对钙素吸收的影响。试验结果表明:玉米从播种到生长 15 d 期间,其生长对土壤紧实并不敏感,而 15 d 之后,地上部分生长速度随土壤容重增加而受到抑制;而根系生长也由于土壤的紧实胁迫而受阻,根系干物质质量下降,根系活力减小,影响钙素养分的吸收;玉米苗中全钙含量最高值(1.67%)出现在容重 1.2 g/cm³ 处理中,土壤紧实的增加会导致根系活性减小,从而使作物根系对钙素的吸收减少、作物抗性下降,导致作物提前衰老。因此,土壤容重影响土壤中养分的有效性,土壤过松或过紧均不利于作物的生长。

关键词: 玉米 土壤紧实度 土壤容重 钙素

中图分类号: S152.4 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2011)11-0055-05

Effect of Soil Compaction Stress on the Growth of Corn and Calcium Absorption at the Seedling Stage

Xu Hai Wang Yiquan Wang Yongjian Xu Shuang Li Peng

(College of Resources and Environment, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract

With the aim to evaluate the influence of soil hardness to corn growth and calcium absorption, five levels of soil hardness (soil bulk density: 1.1, 1.2, 1.3, 1.4 and 1.5 g/cm³) were established in the pot experiment. There was no significant influence of soil hardness to corn growth in the first 15 d after seeding, however, it inhibited aboveground corn growth in the following days. Root dry mass and activity both decreased because of the high soil hardness which had a negative effect on calcium absorption. The highest calcium content (1.67%) occurred in the treatment with 1.2 g/cm³ soil hardness. The increase of soil hardness caused root activity decrease which led to the decrease of calcium absorption, thus, lower crop resistance to disease and cause in senescence in advance. It was concluded that too high or too low density of soil bulk was disadvantage to the crop growth.

Key words Corn, Soil compaction, Soil bulk density, Calcium

引言

土壤紧实化的危害是多方面的,表现为:土壤容重增大,土壤渗透率减小,水土流失的风险增大;土壤结构变劣,机械阻力增大,影响作物对养分的吸收,影响作物出苗、株高、叶面积以及产量等^[1]。

土壤紧实与肥力变化对水稻、小麦、棉花作物生长发育的影响已有不少研究^[2~15],这些研究多数集中在对大量元素的影响方面,而土壤紧实化对土壤中微量元素的有效性影响研究鲜见报道。钙是植物生长必需营养元素,普遍认为,一般情况下土壤中含钙量能满足植物需要,大田作物缺钙

收稿日期: 2011-05-13 修回日期: 2011-06-23

* 陕西省科研推广项目(413020211203533)

作者简介: 徐海,博士生,主要从事土壤物理、土壤养分与植物生长研究,E-mail: xuhai_0_2001@163.com

通讯作者: 王益权,教授,博士生导师,主要从事土壤物理与改良研究,E-mail: soilphysics@163.com

现象并不多见^[16]。土壤缺钙问题只可能发生在强淋溶土壤上,生产中可利用深根性植物将淋溶到土壤深层的钙素转运到土壤上层,以满足浅根性植物的需求。石灰性土壤中富含钙元素,作物一般很少出现缺钙问题。然而,因土壤表层逐年使用氮肥,脱钙作用明显,表层土壤钙离子饱和度下降;多年耕作又不可能将覆盖到较深土层的钙复转到上层,伴随着土壤亚表层的紧实化问题日趋严重,作物根系延伸受到抑制,浅根性植物缺钙,作物抗性下降的现象已经频现,给作物生产带来了一定的损失。

关中地区多年实行的轮作制度为小麦-玉米一年两熟制,受生育期制约,每年在小麦收获后施行玉米硬茬播种,紧实的土壤影响着玉米根系对养分的吸收。因此,本文以陕西塬土为研究对象,以玉米为指示作物,模拟不同容重土壤对作物苗期的生长以及对土壤钙吸收的影响,揭示作物苗期对不同容重土壤紧实胁迫的响应机理,旨在揭示人为管理(大型农机旋耕、施肥、收获等)生产活动对土壤质量演变和作物生长过程的影响。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试土壤样品采自陕西省杨凌区头道塬的农田,土壤母质黄土,土壤类型为塬土。采集了该土壤0~20 cm表层样品,土壤有机质含量15.74 g/kg,碱解氮、速效磷、速效钾含量分别为86.51、12.98、141.52 mg/kg,阳离子交换量、交换性钙含量分别为21.82、15.67 cmol/kg。

1.2 试验方法

本研究于2010年6月在陕西省杨凌区二道塬进行,在可控温玻璃温室中采用恒温(25℃)室内盆栽模拟试验,具体方法如下:在高度9 cm、内径14 cm的圆形盆中分别填装过5 mm筛孔的土样1.52、1.66、1.80、1.94、2.08 kg,使盆中土壤容重分别达到1.1、1.2、1.3、1.4、1.5 g/cm³,每千克土混施尿素0.5 g、过磷酸钙(含P₂O₅质量分数16%)0.67 g;每盆浇灌200 mL水后,播入陕单958玉米种籽1粒,玉米生长过程中未追肥,各处理均重复10次;每3~5 d依据作物长势浇灌水200 mL/盆左右;从玉米播种到出苗后第15天起,每5 d测定一次玉米苗株高,30 d后将盆中玉米苗取出,测定玉米苗生长状况,并测定茎叶中钙素含量。

玉米茎叶钙素含量用EDTA滴定法测定。
结果与分析所得各试验处理的数据求均值后采用EXCEL软件处理分析。

2 结果与分析

2.1 土壤紧实胁迫对玉米苗期生长的影响

2.1.1 玉米苗地上部分

在不同土壤容重下,玉米苗期株高的变异是对土壤紧实胁迫最宏观的反应与表现,如图1所示,图中R1.1~R1.5分别表示土壤容重1.1、1.2、1.3、1.4、1.5 g/cm³。

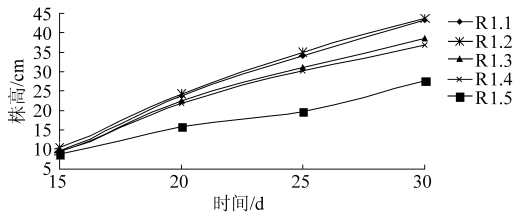


图1 紧实胁迫对玉米苗株高的影响
Fig.1 Effect of soil compaction stress on height of corn plant

株高是指从土表到心叶的高度,播种后0~15 d内,不同容重处理间玉米苗株高差异不明显,玉米苗地上部分对土壤紧实胁迫并不敏感。故从播种后第15天起,测定玉米苗株高变化情况。由图1可知,在第15天以后,各处理间玉米苗株高差异较为明显,不同土壤容重下株高从大到小依次为R1.2、R1.1、R1.3、R1.4、R1.5,且容重为1.5 g/cm³处理的玉米株高极显著小于1.1、1.2、1.3与1.4 g/cm³,其玉米生长30 d的株高分别是其他容重处理的3/5~3/4。同时也表明,玉米苗期生长最适土壤容重为1.2 g/cm³。其中,玉米苗期株高出现R1.2大于R1.1的反常现象,主要原因在于土壤容重过小,种子与土壤接触面减小,不利于其对水肥的吸收利用;而随着土壤紧实增加,玉米苗地上部分的生长受抑制,这种抑制作用在紧实较大(R1.5)时表现十分明显。由上述试验可知,土壤容重过小或过大均不利于玉米苗期地上部分的生长。

2.1.2 玉米苗根系生长

土壤紧实化趋势加大,将严重影响水分入渗及土壤水库接纳降水,很大程度上限制了作物根系的延伸,降低了作物的抗旱性。表1清楚地显示,伴随着土壤紧实化,容重加大,玉米苗根系在生长发育的过程中受到十分明显的抑制,根系质量减少显著,根冠比(地下部干重与地上部干重的比值)下降,随着土壤容重由1.2 g/cm³增加到1.5 g/cm³,根冠比由最高0.44下降到0.29,降幅为34.09%,而容重从1.1 g/cm³增加到1.2 g/cm³,作物根冠比相对增加,可见玉米根系生长的最适容重应当在1.2 g/cm³左右。同样地,玉米苗地上部分鲜重与干重均与根系质量变异趋势相同,在土壤容重由1.2 g/cm³增大到1.5 g/cm³时也呈逐

渐下降趋势,其中地上部分鲜重下降趋势明显,降幅达 65.41%;此外,玉米苗的叶片数在该容重范围内减少,且容重越大黄叶数越多,植株显示出提前衰老的症状。以上结果表明:土壤过于疏松,根系表面与土壤接触较少,养分水分吸收不易,而土

壤紧实、通透性降低,作物根系呼吸受影响,从而使得玉米苗地上部分和地下部分的生长都受到了抑制,因此,土壤过于疏松和紧实均严重影响着玉米对土壤中元素的吸收,直接影响作物的产量与品质。

表 1 玉米苗期对紧实胁迫的反应
Tab.1 Responses of maize seedling to soil compaction

容重/g·cm ⁻³	地上部			根系干重/g	根冠比	根长/cm	总叶数
	鲜重/g	干重/g	干重/鲜重比				
1.1	6.49	1.01	0.15	0.35	0.34	18.6	6
1.2	7.16	1.41	0.20	0.61	0.44	34.9	8
1.3	4.15	0.66	0.16	0.29	0.43	12.3	6
1.4	3.87	0.59	0.15	0.18	0.32	8.9	5
1.5	2.46	0.43	0.17	0.14	0.29	8.7	4

2.2 土壤紧实胁迫对玉米苗期钙吸收的影响

土壤紧实,导致了土壤透气性能降低,随着作物根系呼吸增强,土壤中 CO₂浓度势必增加,碳酸根离子与土壤中碳酸钙反应生成易溶解、易移动的重碳酸钙,加速了土壤脱钙过程,导致土壤中钙供给水平下降,抑制了植物对土壤中钙素的吸收,导致作物苗期发育不健康。

图 2 为不同容重处理下玉米苗茎叶中钙含量变异情况,图中不同大写字母表示 1% 水平极显著差异,不同小写字母表示 5% 水平显著差异。通过显著水平检验分析,土壤容重 1.2、1.3 g/cm³极显著高于 1.1 g/cm³,土壤容重 1.4、1.5 g/cm³显著高于 1.1 g/cm³。由图 2 可知,不同紧实度土壤中玉米苗对钙素的吸收以 R1.2 处理为最高,其茎叶中钙含量为 1.67%,与 R1.1、R1.3、R1.4、R1.5 各处理相比,玉米植株中钙含量增幅分别为 29.32%、16.77%、22.96%、24.20%,与株高变异趋势是相一致的。R1.1 为土壤容重最小的处理,所测定的植物钙含量也是最低的,茎叶钙含量仅为 1.18%,出现该情况原因仍然是土壤容重过小,根系与土壤接触面较小,影响了玉米苗对土壤中钙素的吸收与利用,这与土壤紧实胁迫时玉米苗期地上部分株高与根系质量的影响类似。

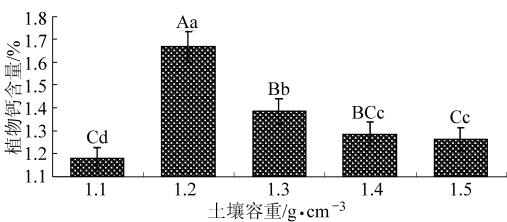


图 2 不同土壤容重下玉米苗全钙含量
Fig.2 Content of total calcium with different soil bulk density treatment

将试验结果进行统计分析得到各处理重复之间变异情况(表 2)。根据变异系数划分等级($C_v < 10\%$ 为弱变异性; $10\% \leq C_v \leq 100\%$ 为中等变异性; $C_v > 100\%$ 为强变异性),由表 2 可知,玉米苗茎叶中全钙的含量在各不同容重处理中均为弱变异性,即不同处理下各重复之间变异较小。其中,R1.1 处理下变异相对其他处理较高,变异系数为 3.24%,这与 R1.1 处理为容重最小的处理有关,因此试验中采取滴灌补水措施以减小灌溉过程中土壤下陷对该处理土壤容重的影响。R1.2 处理变异相对其他处理较小,变异系数为 1.03%,由此可知 R1.2 处理适合多数玉米苗样品生长发育。

通过对不同容重处理下玉米苗茎叶全钙含量进行正态分布检验(图 3),其结果均服从正态分布,由此可知,数据满足统计学分析的要求。

表 2 不同容重处理下玉米苗茎叶钙素变异统计分析
Tab.2 Variation analysis of maize seedling Ca under different bulk densities

处理编号	样品数目	最大值/%	最小值/%	均值/%	标准差/%	变异系数/%
R1.1	10	1.25	1.14	1.18	0.038	3.24
R1.2	10	1.70	1.64	1.67	0.017	1.03
R1.3	10	1.44	1.34	1.39	0.027	1.98
R1.4	10	1.33	1.22	1.28	0.033	2.56
R1.5	10	1.32	1.21	1.26	0.033	2.65

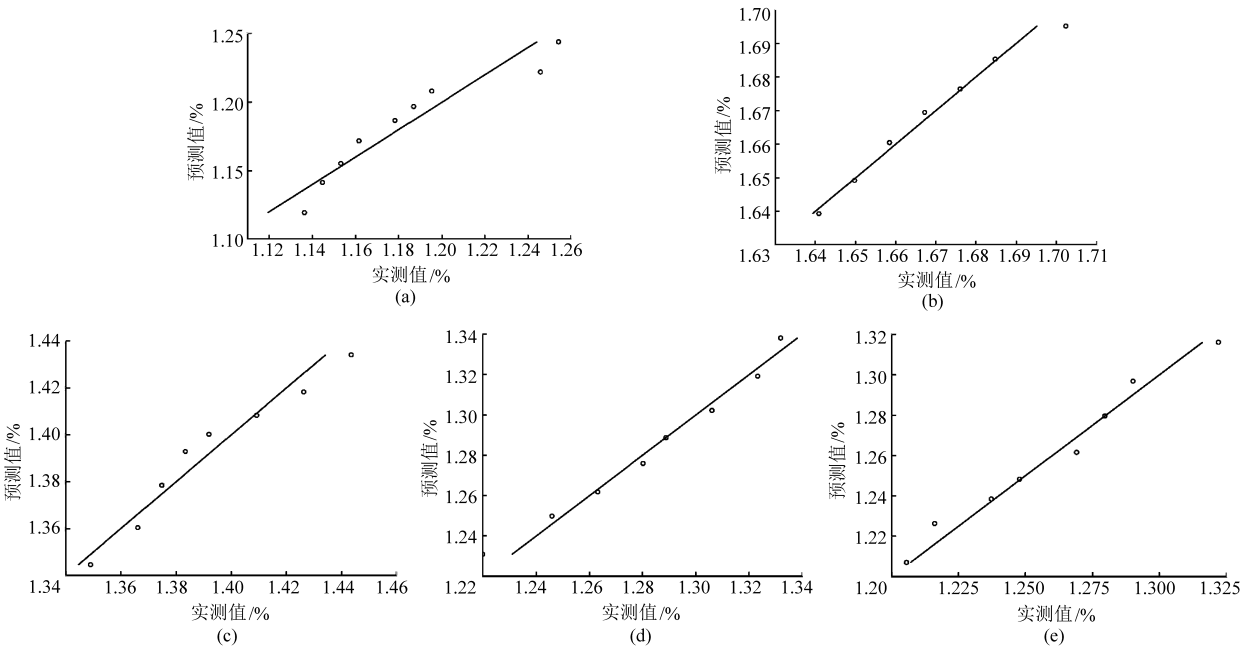


图3 玉米苗全钙含量正态分布检验($Q-Q$)
Fig.3 Normal $Q-Q$ plot of maize seedling Ca content
(a) R1.1 (b) R1.2 (c) R1.3 (d) R1.4 (e) R1.5

3 讨论

有研究认为,玉米株高与土壤容重呈极显著负相关关系^[17],也有研究认为,较高的土壤容重会导致玉米和葵花叶片扩展速度减小并缩小其最终叶面积^[18-19]。通过本试验可知,玉米从播种到生长15 d期间,株高对土壤紧实并不敏感,而15 d之后,生长速度因土壤容重不同而受到抑制。玉米苗期根冠比最大值与株高最大值均出现在R1.2处理,这与有关研究有部分差异,这可能与植物的种类有关^[18]。

据Passioura研究^[20]表明,土壤的机械阻力会引起根部的激素水平发生变化,影响作物根系的生长速度。伴随土壤紧实增加,机械阻力增加,根系分生细胞的分裂速度受到抑制,使得根系质量减小^[2,21]。在本试验中,玉米苗期根系生长由于土壤的紧实胁迫而受阻,根系干物质重下降,根系活力减小。Passioura研究^[20]还指出,由于土壤容重增大,根系与土壤接触更加紧密,水分与养分也因此进入根区,使其养分吸收能力有所提高。本试验结果表明,随着土壤紧实化程度增大,玉米苗期根系发育受抑制,但是,玉米苗中全钙含量最高值却并非出现在R1.1处理,而是出现在紧实程度适中的R1.2处理,过紧实(R1.5)与过疏松(R1.1)的土壤对作物根系钙素吸收都不利。

Ashraf Tubeileh等^[22]用¹⁴C标记-脉冲技术研究了玉米生长期土壤紧实胁迫对其碳素的同化与光合

产物分配的影响,研究结果表明土壤紧实会降低玉米株高、地上与地下部分的干重,主要原因是土壤紧实使碳素同化速度下降,尤其是在玉米苗期。这与本试验的研究结果相吻合。而随着土壤容重的增加,土壤紧实化加大,根系生长受阻,作物根系对钙素的吸收减少,使得作物抗性下降,呈提前衰老迹象。

4 结论

(1)玉米从播种到生长15 d期间,不同容重处理间玉米苗株高差异不明显,说明玉米苗生长对土壤紧实并不敏感;15 d之后,地上部分生长速度随土壤容重增加而受到抑制,随土壤容重变化株高从大到小依次为R1.2、R1.1、R1.3、R1.4、R1.5,其中R1.1由于土壤容重过小,种子与土壤接触面减小,不利于其对水肥的吸收利用,因此其株高反而小于R1.2;而玉米根系生长也由于土壤的紧实胁迫而受阻,根系干物质质量下降,根系活力减小,影响钙素养分的吸收。

(2)玉米苗中全钙含量最低为1.18%,最高为1.67%,其值分别出现在土壤容重1.1、1.2 g/cm³处理中,土壤容重较小,根系与土壤表面接触少,作物对养分的吸收不易,而随着土壤紧实的增加,根系活性减小,同样使作物根系对钙素的吸收减少、作物抗性下降,导致作物提前衰老。因此,土壤容重影响土壤中养分的有效性,土壤过松或过紧均不利于作物的生长。

参 考 文 献

- 1 张兴义,隋跃宇. 土壤压实对农作物影响概述[J]. 农业机械学报, 2005, 36(10):161~163.
Zhang Xingyi, Sui Yueyu. Summarization on the effect of soil compaction on crops [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2005, 36(10):161~163. (in Chinese)
- 2 黄细喜. 土壤紧实度及层次对小麦生长的影响[J]. 土壤学报, 1988, 25(1): 59~65.
Huang Xixi. The wheat growth affected by the soil compaction and layers [J]. Acta Pedologica Sinica, 1988, 25(1): 59~65. (in Chinese)
- 3 黄细喜,刘世平. 不同耕法对土壤紧实度和小麦根系生长的影响[J]. 上海农业学报, 1989, 5(1): 61~62.
Huang Xixi, Liu Shiping. Effect of different tillage methods on soil compactness and growth of wheat root system [J]. Acta Agriculturae Shanghai, 1989, 5(1): 61~62. (in Chinese)
- 4 凌云霄. 土壤容重与磷酸根扩散的关系[J]. 土壤学进展, 1980(4): 1~8.
Ling Yunxiao. Relationship of soil bulk density and phosphate diffusion[J]. Progress in Soil Science, 1980(4): 1~8. (in Chinese)
- 5 李笃仁,高绪科,汪德水. 土壤紧实度对作物根系生长的影响[J]. 土壤通报, 1982(3): 20~22.
Li Duren, Gao Xuke, Wang Deshui. The effect of soil compaction on plant root growth [J]. Chinese Journal of Soil Science, 1982(3): 20~22. (in Chinese)
- 6 徐富安. 水田土壤结构对水稻前期磷素营养的影响[J]. 土壤学进展, 1982(1): 53~57.
Xu Fuan. The effect of paddy soil structure on phosphorus nutrition in rice prophase [J]. Progress in Soil Science, 1982(1): 53~57. (in Chinese)
- 7 赵诚斋. 太湖地区水稻土的物理特性与少免耕法的关系[J]. 土壤学报, 1989(2): 101~108.
Zhao Chengzhai. Physical properties of paddy soils in relation to minimum and zero-tillage methods in Taihu region [J]. Acta Pedologica Sinica, 1989(2): 101~108. (in Chinese)
- 8 宋育才. 少免耕对土壤理化性状的影响. 新型耕作技术及理论[M]. 东南大学出版社, 1991: 131~137.
- 9 Ghidyal B P. Effects of compaction and puddling on soil physical properties and rice growth[J]. Soil and Rice, 1978: 317~336.
- 10 黄细喜. 不同耕法对水稻根系生长的影响[J]. 江苏农业学报, 1986, 2(2):26~32.
Huang Xixi. Effects of different tillage methods on rice root system [J]. Jiangsu Journal of Agricultural Science, 1986, 2(2):26~32. (in Chinese)
- 11 陈清硕. 无结构土壤透气性的初步研究[J]. 土壤学报, 1958(2): 123~136.
Chen Qingshuo. A primary study of permeability of structureless soil to air [J]. Acta Pedologica Sinica, 1958 (2): 123~136. (in Chinese)
- 12 吴珊眉, Groffman P M. 免耕与常规耕作土壤肥力的分异[J]. 南京农业大学学报, 1987(2): 82~89.
Wu Shanmei, Groffman P M. The change in soil properties and fertility in continuous no-tillage and conventional tillage agro-ecosystems [J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 1987(2): 82~89. (in Chinese)
- 13 黄细喜. 土壤自调性与少免耕法[J]. 土壤通报, 1987, 18(3): 111~114.
Huang Xixi. Soil adaptability and minimum and zero-tillage methods [J]. Chinese Journal of Soil Science, 1987, 18 (3): 111~114. (in Chinese)
- 14 宋家祥,姜雪忠. 棉田“少耕”对棉花生育及其产量的影响[J]. 扬州大学学报:农业与生命科学版, 1986(2): 13~17.
Song Jiaxiang, Jiang Xuezhong. Effect of minimum tillage on the growth development and yield of cotton plants [J]. Journal of Yangzhou University: Agriculture and Life Science Edition, 1986 (2): 13~17. (in Chinese)
- 15 孙艳,王益权,冯嘉跃,等. 土壤紧实胁迫对黄瓜生长、产量及养分吸收的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2006, 12(4):559~564.
Sun Yan, Wang Yiquan, Feng Jiayue, et al. Effects of compaction stress in the growth, yield and nutrient uptake of cucumber [J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2006, 12(4):559~564. (in Chinese)
- 16 门中华,贾小环. 钙在植物营养中的作用[J]. 阴山学刊, 2006, 20(4): 38~40.
Men Zhonghua, Jia Xiaohuan. The function of calcium in plant nutrition [J]. Yinshan Academic Journal, 2006, 20(4): 38~40. (in Chinese)
- 17 郭俊伟. 土壤容重对玉米生长的影响[J]. 陕西农业科学, 1996(4): 25~26.
Guo Junwei. Effect of soil bulk density on maize growth [J]. Shaanxi Journal of Agricultural Science, 1996(4): 25~26. (in Chinese)

Chinese)

19 王利军, 马履一, 王爽, 等. 水盐胁迫对沙枣幼苗叶绿素荧光参数和色素含量的影响[J]. 西北农业学报, 2010, 19(12): 122 ~ 127.
Wang Lijun, Ma Lüyi, Wang Shuang, et al. Effects of water and salt stress on chlorophyll fluorescence parameters and pigment contents of *Elaeagnus angustifolia* L. seedlings[J]. Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica, 2010, 19(12): 122 ~ 127. (in Chinese)

20 沈允钢, 程建峰. 光合作用与农业生产[J]. 植物生理学通讯, 2010, 46(6): 513 ~ 516.
Shen Yungang, Cheng Jianfeng. Photosynthesis and agricultural production [J]. Plant Physiology Communications, 2010, 46(6): 513 ~ 516. (in Chinese)

21 徐俊增, 彭世彰, 丁加丽, 等. 控制灌溉的水稻气孔限制值变化规律试验研究[J]. 水利学报, 2006, 37(4): 486 ~ 491.
Xu Junzeng, Peng Shizhang, Ding Jiali, et al. Stomata limitation of rice under control irrigation[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2006, 37(4): 486 ~ 491. (in Chinese)

22 许大全. 光合作用气孔限制分析中的一些问题[J]. 植物生理学通讯, 1997, 33(4): 241 ~ 244.
Xu Daquan. Some problems in stomatal limitation analysis of photosynthesis[J]. Plant Physiology Communications, 1997, 33(4): 241 ~ 244. (in Chinese)

23 Farquhar G D, Sharkey T D. Stomatal conductance and photosynthesis[J]. Annual Review of Plant Physiology, 1982, 33: 317 ~ 345.

24 张秋英, 李发东, 高克昌, 等. 水分胁迫对冬小麦光合特性及产量的影响[J]. 西北植物学报, 2005, 25(6): 1 184 ~ 1 190.
Zhang Qiuying, Li Fadong, Gao Kechang, et al. Effect of water stress on the photosynthetic capabilities and yield of winter wheat [J]. Acta Bot Boreal-Occident Sin, 2005, 25(6): 1 184 ~ 1 190. (in Chinese)

25 Naumann J C, Young D R, Anderson J E. Leaf chlorophyll fluorescence, reflectance, and physiological response to freshwater and saltwater flooding in the evergreen shrub, *Myrica cerifera* [J]. Environmental and Experimental Botany, 2008, 63(1 ~ 3): 402 ~ 409.

26 陈亚鹏, 陈亚宁, 徐长春, 等. 塔里木河下游地下水埋深对胡杨气体交换和叶绿素荧光的影响[J]. 生态学报, 2011, 31(2): 344 ~ 353.
Chen Yapeng, Chen Yaning, Xu Changchun, et al. Effects of groundwater depth on the gas exchange and chlorophyll fluorescence of *Populus euphratica* in the lower reaches of Tarim River[J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(2): 344 ~ 353. (in Chinese)

(上接第 59 页)

18 刘晚苟, 山仑. 不同土壤水分条件下容重对玉米生长的影响[J]. 应用生态学报, 2003, 14(11): 1 906 ~ 1 910.
Liu Wan'gou, Shan Lun. Effect of soil bulk density on maize growth under different water regimes [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2003, 14 (11): 1 906 ~ 1 910. (in Chinese)

19 Andrade A, Wolf D W, Fereres E. Leaf expansion, photosynthesis, and water relations of sunflower plants growth on compacted soil [J]. Plant and Soil, 1993, 149(2): 175 ~ 184.

20 Passioura J B. Soil structure and plant growth [J]. Aust. J. Soil Res., 1991, 29(6): 717 ~ 728.

21 Bengough A G, Mullins C E. The resistance experienced by roots growing in a pressurized cell-a reappraisal [J]. Plant and Soil, 1990, 123(1): 73 ~ 82.

22 Ashraf Tubeileh, Virginie Groleau-Renaud, Sylvain Plantureux, et al. Effect of soil compaction on photosynthesis and carbon partitioning within a maize-soil system [J]. Soil and Tillage Research, 2003, 71(2): 151 ~ 161.