土壤容重对玉米光合特性的影响及调控研究*

郑存德[1,2]　依艳丽[1†]

(1 沈阳农业大学土地与环境学院,东北地区土壤肥料资源高效利用国家工程中心,沈阳　110866)

(2 辽东学院城市建设学院,辽宁丹东　118003)

摘　要　以耕地棕壤为试验材料,采用盆栽方法,研究不同土壤容重对玉米光合指标(光合速率、气孔导度、胞间二氧化碳浓度)及叶绿素(a、b)的影响,并进一步研究了施用不同有机肥量及模拟不同耕作深度对玉米光合指标的调控效果。结果表明:不同容重处理之间对玉米叶绿素含量的影响拔节期前差异不显著,拔节期后达极显著差异($p<0.01$),叶绿素含量在研究的生育期内始终增长。光合速率与容重、胞间二氧化碳浓度呈负相关,与气孔导度呈正相关。高容重土壤有机质调节至 40 ~ 50 g kg^{-1} 即可以获得比较理想的效果;低容重的土壤有机质在研究含量范围内效果始终显著增长,有机质含量在 15 g kg^{-1} 左右制约玉米生长,有机质含量应至少调节至 3% 以上。耕层厚度增加能提高所测定生理指标,但耕层厚度处理对叶绿素、光合指标影响不显著,当耕层厚度调节至 30 ~ 40 cm 时,各项指标增加基本达到限值,再增加耕层厚度作用不再明显。

关键词　容重;玉米;光合指标;调控;耕层厚度

中图分类号　S513.01　　**文献标识码**　A

多数植物 95% 以上的干物质是由光合作用形成的,其中 80% ~ 90% 来自花后光合产物[1-2],所以光合作用是产量形成的前提条件。对玉米而言,维持其吐丝后的叶绿素含量,降低其叶片衰老速率对光合产物的积累就比较重要[3-7]。影响植物光合特性的因素主要有施肥[8-11]、光照、温度、水分[12-13]等。植物的光合特性除了受以上因素影响外,还间接受到土壤物理性质的影响[14],土壤容重是土壤重要的物理性质之一,它很大程度上决定着土壤含水量、通气性以及矿质元素的运移[15-19],进而影响植物的生长发育和生理功能。

我们前期研究表明,许多土壤通过旋耕、翻耕只能短期改变土壤容重,在作物生育初期很快又变得沉实。主要原因是土壤有机质普遍较低,土壤结构性差[20]。此外,长期免耕或长期使用小型机具耕种也逐渐导致耕层变浅容重增加。所以,有必要研究容重变化对作物光合特性的影响及消除或降低其不利影响的方法。为此,本文采用盆栽的方法,选择 4 个容重水平,对玉米关键生育期的光合效率和叶绿素变化进行了测定,试图通过对这些参数的分析,研究土壤容重对玉米不同生育期光合特性的影响。此外,因为适宜粒级微团聚体的组成比例能改善土壤的自动调节能力[20-23],而土壤中无机胶体变化较小,所以调节有机胶体的种类与数量就是必然选择。本研究通过添加腐熟鸡粪有机肥与增加耕层厚度来调节容重,探讨两种方法对玉米光合特性的影响,从而为提高玉米光合效率,防止玉米生长后期早衰而进行科学的田间耕作与管理提供依据。

1　材料与方法

1.1　供试材料

供试土壤:土壤为发育在黄土母质上的壤质棕壤,2010 年 3 月采自沈阳农业大学试验站耕作土壤(41°50′N,123°34′E)。土壤基本理化指标见表 1。

1.2　试验设计

1.2.1　容重对玉米根系生长影响的试验设计

根据大田耕作前后的调查结果,选择 1.1、1.2、1.3、1.4 g cm^{-3} 四个容重水平,见表 2。

* 国家自然科学基金项目(41171192)和高等学校博士学科点专项科研基金项目(20101045011213)资助

† 通讯作者,E-mail:yiyanli@126.com

作者简介:郑存德(1975—),男,黑龙江人,博士研究生,讲师,主要从事水、土环境保护研究。E-mail:ddhmtldxy@sina.com

收稿日期:2011-09-05;收到修改稿日期:2012-01-15

表 1　土壤基本指标

Table 1　Basic properties of tested soil

测定时间 (YYYY-MM)	pH	有机质 OM ($g\ kg^{-1}$)	全氮 TN ($g\ kg^{-1}$)	全磷 TP ($g\ kg^{-1}$)	碱解氮 Alkali N ($mg\ kg^{-1}$)	有效磷 Avail P ($mg\ kg^{-1}$)	速效钾 Avail K ($mg\ kg^{-1}$)
2010-03	5.21	13.79	1.07	1.38	68.21	31.20	138.1

注：供试玉米品种：郑单 958。

表 2　容重与土层厚度设计组合

Table 2　Combinations of bulk density with soil thickness designed for the experiment

土层 Soil layer(cm)	处理编号及容重 Treatments code and soil bulk density($g\ cm^{-3}$)			
	BD11	BD12	BD13	BD14
0～45	1.1	1.2	1.3	1.4

1.2.2　容重调控研究的试验设计　　有机质调控研究选取 1.2、1.4 $g\ cm^{-3}$ 两个容重水平，有机质设 CK(13.79 $g\ kg^{-1}$)、30、40、50 $g\ kg^{-1}$ 四个水平，见表 3。根据大田调查数据耕层厚度调控研究选择 1.2 $g\ m^{-3}$ 为耕层容重，1.4 $g\ cm^{-3}$ 为犁底层容重，耕层厚度设 10、20、30、40、50 cm 五个水平，分别用 P1、P2、P3、P4、P5 表示。P1 表示容器从上至下 0～10 cm 容重为 1.2 $g\ m^{-3}$，10～50 cm 容重为 1.4 $g\ m^{-3}$；P2 表示容器从上至下 0～20 cm 容重为 1.2 $g\ m^{-3}$，20～50 cm容重为 1.4 $g\ m^{-3}$，其他依此类推。

表 3　容重与有机质设计组合

Table 3　Combination of soil bulk density and organic matter designed for the experiment

容重 Bulkdensity ($g\ cm^{-3}$)	有机质 Organic matter ($g\ kg^{-1}$)			
	CK	30	40	50
1.2	BD2	OM23	OM24	OM25
1.4	BD4	OM43	OM44	OM45

将取来的土壤风干至含水率为 10%，过 0.5 cm 筛。按上述设计将土分别装入 30 cm × 50 cm 的 PVC 材质容器中(2010-04-22)，灌水至 70% 田间持水量，置于室外，草席覆盖至 2010-06-01 播种(每桶调水至 80% 田间持水量)，每个处理重复 9 次(分 3 个时期，每个时期取 3 次重复)。每盆种经挑选均匀一致浸泡约 24 h 的种子 3 颗，播深约 3 cm(预先用略大于种子的钝器钻出)，种子均匀分布容器中心周围 3 cm 处，小心覆土，轻轻压实，出苗 10 d 后定苗。

“田间”管理：播种后不定期经常除草，尽量在草较小时除去，降低对设计容重的影响。当水分低于 60% 田间持水量时通过重量法补充水分(取表层土测定含水量)。于大喇叭口期施尿素(相当于每盆追纯 N 1.7 g)，将尿素用水溶解后均匀浇在根系附近。

1.3　测定与数据处理

分别于苗期(2010-06-25)、拔节期(2010-07-24)、灌浆期(2010-08-27)用 LI-6400 便携式光合测定系统测定光合指标，同时采用丙酮提取分光光度法测定叶绿素含量。

文中图、表均采用 Microsoft Excel 2003 制作。用 DPS 7.05 进行单因素方差分析，SSR 法进行多重比较。

2　结果与分析

2.1　容重对玉米光合特性的影响

2.1.1　对叶绿素的影响　　由表 4 可以看出，从苗期至灌浆期玉米叶绿素 a、b 均保持增长，即灌浆期 > 拔节期 > 苗期。叶绿素 a 的含量在对应生育期均较叶绿素 b 高，但从苗期至拔节期叶绿素含量的增长率明显高于从拔节期至灌浆期叶绿素含量的增长，叶绿素 a 含量的平均增长率分别为：39.4%、21.95%；叶绿素 b 含量的平均增长率分别为：43.8%、28.6%，说明从生殖生长逐渐转至营养生长。不同容重处理在苗期对叶绿素 a、b 没有明显影响，除灌浆期容重对叶绿素 b 的影响达显著水平($p < 0.05$)外，至拔节与灌浆期容重对叶绿素 a、b 的影响均达到极显著水平($p < 0.01$)。在三个生育期，叶绿素含量均随容重的增加而呈下降趋势。

表 4 容重对叶绿素的影响

Table 4 Effect of soil bulk density on chlorophyll

生育期 Growth stage	叶绿素 a Chlorophyll a		叶绿素 b Chlorophyll b	
	平均值 ± 标准差 Mean ± SD(mg g^{-1})	概率值 *p* value	平均值 ± 标准差 Mean ± SD(mg g^{-1})	概率值 *p* value
苗期 Seedling stage	0.952 ± 0.038 a A	0.355 3	0.518 ± 0.010 a A	0.206 8
	0.893 ± 0.062 a A		0.501 ± 0.025 a A	
	0.907 ± 0.048 a A		0.486 ± 0.016 a A	
	0.885 ± 0.032 a A		0.496 ± 0.008 a A	
拔节期 Jointing stage	1.376 ± 0.038 a A	0.002 1	0.746 ± 0.011 a A	0.003 1
	1.320 ± 0.061 a AB		0.735 ± 0.016 a AB	
	1.202 ± 0.047 b BC		0.695 ± 0.015 b BC	
	1.175 ± 0.032 b C		0.701 ± 0.006 b C	
灌浆期 Filling stage	1.656 ± 0.040 a A	0.004 8	0.953 ± 0.012 a A	0.011 4
	1.587 ± 0.072 a AB		0.937 ± 0.018 ab AB	
	1.482 ± 0.050 b B		0.913 ± 0.004 bc AB	
	1.455 ± 0.036 b B		0.898 ± 0.022 c B	

注:同列数据后不同小、大写字母分别表示各个处理在 0.05、0.01 水平上差异显著情况。下同 Note: Different letters following the data in the same column indicate significant difference at the level of 5% (lowercase) and 1% (uppercase). The same below

2.1.2 对光合速率的影响 BD11 处理从苗期至灌浆期光合速率保持基本不变,并略有上升,可能因为容重低,根系衰老慢,根系活力始终处于较高水平;BD12 与 BD13 处理变化规律一致,从苗期至拔节期光合速率上升然后下降至苗期的水平,BD12 下降的幅度较 BD13 大些;BD14 处理与 BD11 相反,光合速率从苗期至灌浆期逐渐下降,这可能与其容重大,使玉米出现早衰有关。不同容重处理间比较发现,苗期光合速率无显著差异。BD11、BD12、BD13 在 3 个生育期均无显著差异,灌浆期均极显著高于 BD14,BD12 与 BD13 处理光合速率较高,见图 1。

2.1.3 对气孔导度的影响 图 2 表明,不同容重处理气孔导度在 3 个生育期内变化规律不一致。BD11 气孔导度在 3 个生育期内始终上升。BD12、BD13、BD14 气孔导度由苗期至拔节期是上升的;从拔节期至灌浆期略有下降。不同处理气孔导度上升速率最快的时期均发生在由苗期至拔节期时段。不同处理间比较发现,各个处理苗期气孔导度差异不显著,BD12 与 BD13 处理气孔导度在拔节期极显著高于另外两个处理,在灌浆期显著高于 BD11 与 BD14 处理;BD11 至生育后期气孔导度极显著($p < 0.01$)高于 BD14 处理,这就是 BD11 光合速率高于 BD14 的原因。

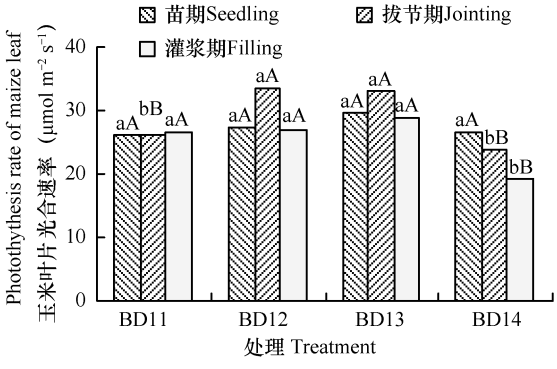

图 1 容重对光合速率的影响

Fig. 1 Effect of soil bulk density on photothythesis rate of maize leaf

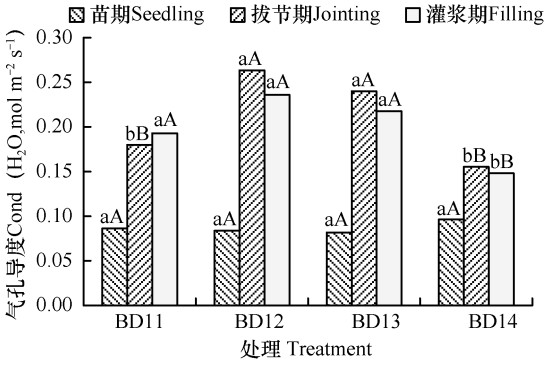

图 2 容重对气孔导度的影响

Fig. 2 Effect of soil bulk density on stomatal conductance of maize

2.1.4　对胞间二氧化碳浓度的影响　　由图 3 可见，不同容重处理胞间二氧化碳浓度变化规律一致，即，由苗期至拔节期胞间二氧化碳浓度下降，由拔节期至灌浆期胞间二氧化碳浓度又有上升，但略低于苗期。BD13 与 BD14 这种变化幅度较大，这可能与容重较大有关。苗期 BD14 胞间二氧化碳浓度最高，容重大于 1.2 g cm^{-3}的处理显著高于 BD11；拔节期胞间二氧化碳浓度，BD11 ~ BD13 显著高于 BD14；灌浆期不同处理间差异不显著。

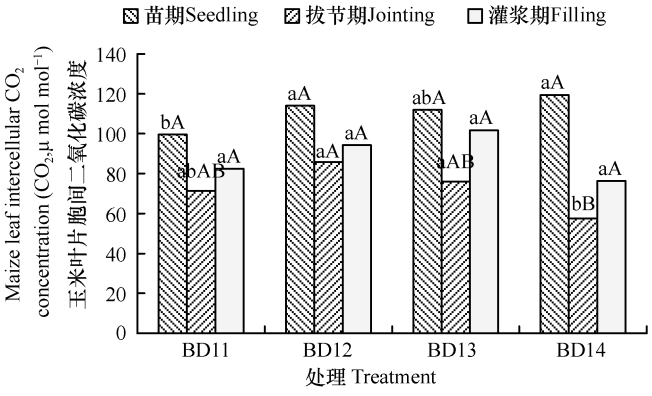

图 3　容重对胞间二氧化碳浓度的影响

Fig. 3　Effect of soil bulk density on intercellular CO_2 concentration in maize leaves

2.2　土壤容重的调控研究

2.2.1　有机质调控对光合指标的影响　　玉米叶片中叶绿素 a、叶绿素 b 含量在所测定的玉米生育期内始终增长，由苗期至拔节期增长幅度较大，由拔节期至灌浆期有小幅增长。有机质处理的叶绿素含量均极显著高于对照（$p < 0.01$），随有机质含量上升叶绿素含量也增加。叶绿素含量与光合速率变化不完全一致，光合速率最大值发生在拔节期然后下降，有机质含量增加，光合速率也增加，在拔节期前除苗期高容重处理外，不同处理间差异显著（$p < 0.05$），灌浆期差异不显著。气孔导度变化规律与光合速率基本一致，所不同的是除灌浆期外，处理间差异均显著（$p < 0.05$）。与光合速率、气孔导度不同，胞间二氧化碳浓度由苗期至拔节期下降。从拔节期至灌浆期上升。由表 5 还可以看出，有机质对低容重处理的胞间二氧化碳浓度影响不显著，对高容重处理影响较显著。

表 5　有机质对玉米光合指标的影响

Table 5　Effect of organic matter on photosynthesis of maize

生理指标 Physiological indicators	处理 Treatment	苗期 Seedling stage		拔节期 Jointing stage		灌浆期 Filling stage	
		均值 ± 标准差 Mean ± SD	概率值 *p* value	均值 ± 标准差 Mean ± SD	概率值 *p* value	均值 ± 标准差 Mean ± SD	概率值 *p* value
叶绿素 a Chlorophyll a (mg g^{-1})	BD2	0.89 ± 0.06cC	0.000	1.32 ± 0.06cC	0.000	1.59 ± 0.07cC	0.000
	OM23	1.18 ± 0.06bB		1.91 ± 0.06bB		2.30 ± 0.06bB	
	OM24	1.27 ± 0.01aAB		2.00 ± 0.01aAB		2.39 ± 0.01aAB	
	OM25	1.33 ± 0.02aA		2.05 ± 0.02aA		2.45 ± 0.02aA	
	BD4	0.89 ± 0.03cC	0.000	1.18 ± 0.03cC	0.000	1.46 ± 0.04cC	0.000
	OM43	1.09 ± 0.08bB		1.81 ± 0.08bB		2.21 ± 0.08bB	
	OM44	1.16 ± 0.03bAB		1.89 ± 0.03bAB		2.28 ± 0.03bAB	
	OM45	1.27 ± 0.02aA		2.00 ± 0.02aA		2.39 ± 0.02aA	
叶绿素 b Chlorophyll b (mg g^{-1})	BD2	0.50 ± 0.02cC	0.000	0.74 ± 0.02cB	0.000	0.94 ± 0.02cB	0.000
	OM23	0.65 ± 0.014B		1.04 ± 0.06bA		1.18 ± 0.06bA	
	OM24	0.67 ± 0.01bB		1.12 ± 0.05abA		1.25 ± 0.046abA	
	OM25	0.75 ± 0.02aA		1.13 ± 0.00aA		1.27 ± 0.00aA	
	BD4	0.50 ± 0.01dD	0.000	0.70 ± 0.01dD	0.000	0.90 ± 0.03cB	0.000
	OM43	0.52 ± 0.01cC		0.91 ± 0.01cC		1.08 ± 0.06bA	
	OM44	0.61 ± 0.00bB		0.98 ± 0.00bB		1.12 ± 0.00abA	
	OM45	0.64 ± 0.01aA		1.01 ± 0.00aA		1.16 ± 0.01aA	

续表

生理指标 Physiological indicators	处理 Treatment	苗期 Seedling stage		拔节期 Jointing stage		灌浆期 Filling stage	
		均值 ± 标准差 Mean ± SD	概率值 *p* value	均值 ± 标准差 Mean ± SD	概率值 *p* value	均值 ± 标准差 Mean ± SD	概率值 *p* value
光合速率 *Pn* ($\mu mol\ m^{-2} s^{-1}$)	BD2	26.37 ± 1.25bA	0.032	31.25 ± 3.44bB	0.009	25.42 ± 3.12aA	0.360
	OM23	25.70 ± 0.78bA		31.53 ± 3.03bB		27.11 ± 1.79aA	
	OM24	29.60 ± 1.64aA		34.11 ± 1.45bAB		27.46 ± 4.34aA	
	OM25	30.23 ± 3.18aA		40.47 ± 1.55aA		33.04 ± 8.34aA	
	BD4	25.60 ± 1.72aA	0.175	28.18 ± 6.65bA	0.044	19.23 ± 2.40bA	0.151
	OM43	26.50 ± 1.97aA		32.07 ± 1.90bA		23.24 ± 3.51abA	
	OM44	28.57 ± 0.85aA		39.21 ± 2.55abA		25.33 ± 3.09abA	
	OM45	28.70 ± 1.25aA		40.35 ± 3.52aA		28.36 ± 6.46aA	
气孔导度 Cond ($mol\ m^{-2}\ s^{-1}$)	BD2	0.08 ± 0.01bB	0.024	0.26 ± 0.02abAB	0.010	0.21 ± 0.02bA	0.130
	OM23	0.08 ± 0.00bAB		0.25 ± 0.01bB		0.17 ± 0.06abA	
	OM24	0.09 ± 0.00abAB		0.26 ± 0.02bAB		0.22 ± 0.04 abA	
	OM25	0.10 ± 0.00aA		0.34 ± 0.06aA		0.30 ± 0.06aA	
	BD4	0.10 ± 0.00aA	0.016	0.16 ± 0.03bA	0.047	0.15 ± 0.02aA	0.162
	OM43	0.09 ± 0.01abAB		0.18 ± 0.05bA		0.18 ± 0.01aA	
	OM44	0.08 ± 0.01bcAB		0.23 ± 0.03abA		0.21 ± 0.05aA	
	OM45	0.07 ± 0.01cB		0.29 ± 0.08aA		0.20 ± 0.02aA	
胞间二氧化碳浓度 *Ci* ($\mu mol\ mol^{-1}$)	BD2	112 ± 11aA	0.738	58 ± 13bA	0.087	82 ± 18aA	0.589
	OM23	119 ± 11aA		87 ± 16aA		103 ± 17aA	
	OM24	117 ± 9aA		63 ± 11abA		90 ± 23aA	
	OM25	112 ± 2aA		61 ± 12bA		77 ± 33aA	
	BD4	119 ± 4aA	0.058	86 ± 2abA	0.008	102 ± 21aA	0.014
	OM43	115 ± 4abA		87 ± 4aA		96 ± 4aA	
	OM44	112 ± 6abA		71 ± 11bcAB		87 ± 3aAB	
	OM45	108 ± 3bA		60 ± 10cB		65 ± 3bB	

2.2.2 耕层厚度调控对光合指标的影响 表6列举了苗期至灌浆期不同处理叶绿素含量及部分光合指标。可见,叶绿素 a 在测定生育期含量始终增长,但不同处理间差异不显著;叶绿素 b 含量也表现为在测定期增长,在苗期不同处理间差异不显著,但拔节期与灌浆期差异极显著($p < 0.01$)。不同处理光合速率、胞间二氧化碳浓度在拔节期差异显著($p < 0.05$),在其他生长阶段差异不显著,可见,叶绿素含量并不是制约光合速率的主要因素;气孔导度在测定时段内差异不显著,但与光合速率变化趋势一致;胞间二氧化碳浓度与光合速率变化规律相反,原因是胞间二氧化碳浓度因光合速率下降而积累。

表 6　耕层厚度对玉米光合指标的影响

Table 6　Effect of plough depth on photosynthesis of maize

生理指标 Physiological indicators	处理 Treatment	苗期 Seedling stage		拔节期 Jointing stage		灌浆期 Filling stage	
		均值 ± 标准差 Mean ± SD	概率值 *p* value	均值 ± 标准差 Mean ± SD	概率值 *p* value	均值 ± 标准差 Mean ± SD	概率值 *p* value
叶绿素 a Chlorophyll a ($mg\ g^{-1}$)	P1	0.90 ± 0.04aA	0.520	1.47 ± 0.03bA	0.068	1.70 ± 0.01bA	0.063
	P2	0.90 ± 0.07aA		1.50 ± 0.03abA		1.72 ± 0.02abA	
	P3	0.94 ± 0.03aA		1.55 ± 0.07abA		1.76 ± 0.06abA	
	P4	0.96 ± 0.06aA		1.62 ± 0.06aA		1.83 ± 0.06aA	
	P5	0.98 ± 0.12aA		1.63 ± 0.12aA		1.84 ± 0.11aA	
叶绿素 b Chlorophyll b (mgg^{-1})	P1	0.53 ± 0.04bA	0.111	0.79 ± 0.04bB	0.000	1.02 ± 0.04bB	0.000
	P2	0.55 ± 0.03abA		0.81 ± 0.03bB		1.03 ± 0.03bB	
	P3	0.57 ± 0.00abA		0.91 ± 0.00aA		1.13 ± 0.00aA	
	P4	0.58 ± 0.02abA		0.92 ± 0.02aA		1.14 ± 0.02aA	
	P5	0.59 ± 0.01aA		0.93 ± 0.01aA		1.15 ± 0.01aA	
光合速率 *Pn* ($\mu mol\ m^{-2}\ s^{-1}$)	P1	19.0 ± 0.9aA	0.740	23.8 ± 1.9bB	0.003	22.3 ± 4.4aA	0.403
	P2	19.4 ± 2.9aA		26.8 ± 6.0bB		27.0 ± 1.4aA	
	P3	19.9 ± 0.6aA		27.1 ± 2.4bB		27.5 ± 1.4aA	
	P4	20.4 ± 3.1aA		31.3 ± 5.3bAB		28.0 ± 7.8aA	
	P5	21.1 ± 1.0aA		41.4 ± 3.0aA		28.6 ± 1.5aA	
气孔导度 Cond ($mol\ m^{-2}\ s^{-1}$)	P1	0.060 ± 0.011aA	0.511	0.166 ± 0.013bA	0.074	0.196 ± 0.050bA	0.137
	P2	0.060 ± 0.001aA		0.175 ± 0.012bA		0.226 ± 0.030abA	
	P3	0.062 ± 0.006aA		0.190 ± 0.045abA		0.261 ± 0.054abA	
	P4	0.065 ± 0.009aA		0.237 ± 0.069abA		0.272 ± 0.009abA	
	P5	0.069 ± 0.006aA		0.250 ± 0.011aA		0.280 ± 0.044aA	
胞间二氧化碳浓度 *Ci* ($\mu mol\ mol^{-1}$)	P1	125.7 ± 3.2aA	0.429	98.3 ± 10.5cB	0.017	143.0 ± 15.1aA	0.859
	P2	123.3 ± 3.1aA		80.7 ± 19.8bcAB		141.7 ± 31.4aA	
	P3	121.7 ± 24.4aA		77.7 ± 3.4bcAB		136.3 ± 41.9aA	
	P4	119.3 ± 8.1aA		76.1 ± 3.8abAB		130.6 ± 36.2aA	
	P5	107.7 ± 4.9aA		60.7 ± 0.2aA		119.0 ± 14.8aA	

3　讨　论

虽然有研究认为免耕、秸秆覆盖可以改善农田水、肥、气、热等生态因子，有利于作物生长发育及提高作物产量[24-28]，但本试验研究认为这只适合土壤结构好、有机质含量较高的情况，否则，土壤容重显著大于翻耕、旋耕，导致其水、气、热调节能力显著下降，而这些对作物根系发育不利。容重增加，叶面积指数下降，可以导致玉米减产[29]。并且已有研究证明土壤容重、叶面积、玉米光合速率和玉米叶绿素荧光参数间密切相关[30-32]，还指出玉米叶片的光合速率随土壤容重的增加而迅速下降，随生育期进程而变小，细胞间隙二氧化碳浓度随容重增大而增大，在玉米生长后期逐渐变大，且随容重增加细胞间隙二氧化碳利用率越低。本文研究结果与之不完全一致，在本文研究的生育期内，光合速率先上升后下降，发现苗期高容重胞间二氧化碳浓度较高，在生育后期胞间二氧化碳浓度却较低。因为玉米在吐丝期，生殖生长胜于营养生长[32]，体内养分过多的供给生殖生长，叶片内叶绿素含量稳定，而不施氮处理的叶片内叶绿素含量较低。结合本

课题其他研究结果可知,高容重处理降低了根、茎、叶中的氮素含量,而氮素又是构成叶绿素、植物激素的成分,由表4可知,高容重叶绿素含量低于低容重,其必然影响光合效率,这种作用至生育后期更为明显。此外,高容重增加了土壤的机械阻力,使根径及径向导水力增加,使根系导水率降低[33],使根系木质化,导致根系早衰,最终导致光合效率下降[34]。结合本试验认为,高容重土壤有机质调节至4%~5%即可,因为从数据看,有机质含量再增加各生理指标的增加有减少的趋势,从而降低了经济性;低容重在研究的有机质范围内玉米各项生理指标增加相对较明显,这是因为有机质蓄水保肥能力大,它的增加能增加其蓄水量,但并不是说继续增加有机质含量还可以得到明显的效果,这有待于进一步研究。

长期以来,旋耕、翻耕一直是保持作物高产、稳产的主要技术手段。这种方法可以创造较厚的疏松耕层,促进作物根系发育,延缓根系衰老,但其实质均是降低耕层容重、增大耕层厚度、提高地温[20,35],从而促进作物稳产与高产。因为植物生长所需的水分、养分主要是通过土壤的孔隙系统贮运及供向根部的,同时玉米根系的有氧呼吸非常旺盛,所以对土壤通气性要求很高,这也是玉米怕涝不怕旱的原因。此外,玉米根系活动范围较大(可达地下2 m以上)所以改变土壤孔隙度最直接、最简单的技术手段就是增加耕层厚度。试验结果表明,耕层厚度增加能促进玉米生长,但大多影响是不显著的。因为试验土壤结构差,容重极不稳定,设计耕层容重在玉米生育初期就变沉实,所以多数大田只靠旋、翻耕不一定能取得较好的增产结果。此外,结合试验结果以及玉米根系超过70%以上生长在0~40 cm的空间范围,认为耕层厚度过大对绝对产量的提高作用将不再明显。耕层厚度调节至40 cm比较适当。

前文已述及,光合指标变化受多种因素影响。气孔导度通常是影响光合速率的初始因素[36],本文研究认为气孔导度与光合速率之间具有一致性(见图1与图2中BD11~BD13处理),即气孔导度增加光合速率一般也增大,气孔导度减小光合速率也减小,气孔因素仍然是限制光合速率提高的重要因素之一[37-38],但本研究结果与姜琳琳等研究的结果[39]——NPK均衡施肥处理能提高光合速率和气孔导度,但气孔导度的变化不显著,说明气孔因素对光合作用的影响小[40]不太一致。而夏乐等通过对钾素的研究[41]认为,钾影响光合速率的本质在于它导致气孔关闭,从而光合效率下降,气孔导度与光合正相关,这一结论支持本文研究结果。需要指出的是,以上研究的基础与本文不一致,所以可能对同一问题的结论也不一样。一般认为胞间二氧化碳浓度可以间接反映光合速率,因为胞间二氧化碳浓度对叶肉细胞羧化效率有很大的影响[42],二氧化碳如果向光合羧化位点传输能力提高,则二氧化碳同化能力提高,即光合速率增加。但含量的增加不等同于其传输能力的提高,本文研究发现一般胞间二氧化碳浓度高光合速率反而低,可能是由于光合速率低导致了二氧化碳的积累[43]。

4 结 论

1) 容重对叶绿素含量的影响从拔节期后极显著,叶绿素含量在所研究的生育期内始终增长,但其对光合指标影响并不是同步的,因为它们的变化规律不一致,光合速率则是先增加后降低。光合速率与容重、胞间二氧化碳浓度呈负相关,与气孔导度呈正相关。

2) 有机质对容重的调控作用明显。有机质处理各测定指标均极显著地($p<0.01$)高于对照,原因是有机质显著地提高了土壤的孔隙度、持水量、通气性,显著降低了容重,使土壤调节水、肥、气、热能力显著提高,促进了玉米根系的生长发育。高容重土壤有机质调节至4%~5%即可以获得比较理想的调控结果;低容重的土壤有机质调控上限还有待于进一步研究,但对于试验土壤有一点是明确的,有机质含量在1.5%左右肯定制约玉米生长,研究认为有机质含量至少调至3%以上。

3) 对于试验土壤进行的耕层厚度的调控结果并不理想。耕层厚度处理对叶绿素、光合指标等影响不显著,只是在各别时段对各别指标影响是显著的。不同耕层厚度处理间比较认为,当耕层厚度调节至30~40 cm时各项指标增加基本达到限值,再增加耕层厚度作用不再明显,经济性下降。

参 考 文 献

[1] 徐富贤,熊洪,赵甘霖,等. 杂交中稻强再生力品种的冠层特征研究. 作物学报,2002,28(3):426—430. Xu F X,Xiong H,Zhao G L,et al. A study on the canopy characters of mid-season hybrid rice in relation to their ratooning ability (In Chinese). Acta Agronomica Sinica,2002,28(3):426—430

[2] 曹娜,于海秋,王绍斌,等. 高产玉米群体的冠层结构及光合

特性分析．玉米科学,2006,14(5)：94—97. Cao N,Yu H Q,Wang S B,et al. Analysis on canopy structure and photosynthetic characteristics of high yield maize population (In Chinese). Journal of Maize Sciences,2006,14(5)：94—97

[3] Simmons S R,Jones R J. Contributions of pre-silking assimilate to grain yield on maize. Crop Sci,1985,25:1 004—1 006

[4] 郭连旺,许大全,沈允钢．田间棉花叶片光合效率中午降低的原因．植物生理学报,1994,20(4):360—366. Guo L W,Xu D Q,Shen Y G. The causes of midday decline of photosynthetic efficiency in cotton leaves under field conditions (In Chinese). Acta Phytophysiologica Sinica,1994,20(4):360—366

[5] 孙庆泉,胡昌浩,董树亭,等．我国玉米品种叶源和籽粒库等生理特性研究进展．山东农业大学学报,1999,30(4):484—488. Sun Q Q,Hu C H,Dong S T,et al. Advances of physiological characters studies about leaf source and kernel sink on cultivars in maize (In Chinese). Journal of Shangdong Agricultural University,1999,30(4):484—488

[6] 李潮海,刘奎,周苏玫,等．不同施肥条件下夏玉米光合对生理生态因子的响应．作物学报,2002,28(2):265—269. Li C H,Liu K,Zhou S M,et al. Response of photosynthesis to eco-physiological factors of summer maize on different fertilizer amounts (In Chinese). Acta Agronomica Sinica,2002,28(2):265—269

[7] 王群,李潮海,栾丽敏,等．不同质地土壤夏玉米生育后期光合特性比较研究．作物学报,2005,31(5):628—633. Wang Q,Li C H,Luan L M,et al. Photosynthetic characteristics of summer maize (*Zea mays L.*) during the late growth stage in different soil texture (In Chinese). Acta Agronomica Sinica,2005,31(5):628—633

[8] 段巍巍,赵红梅,郭程瑾,等．夏玉米光合特性对氮素用量的反应．作物学报,2007,33(6):949—954. Duan W W,Zhao H M,Guo C J,et al. Responses of photosynthesis characteristics to nitrogen application rates in summer maize (*Zea mays* L.) (In Chinese). Acta Agronomica Sinica,2007,33(6):949—954

[9] Pandey R K,Maraville J W,Chetima M M. Tropical wheat response to irrigation and nitrogen in a Sahelian environment Ⅱ. Biomass accumulation, nitrogen uptake and water extraction. European Journal of Agronomy,2001,15:106—118

[10] Yasemin E,Deniz T,Beycan A. Effects of cadmium on antioxidant enzyme and photosynthetic activities in leaves of two maize cultivars. Journal of Plant Physiology,2008,165:600—611

[11] 韩晓日,姜琳琳,王帅,等．不同施肥处理对春玉米穗位叶光合指标的影响．沈阳农业大学学报,2009,40(4):444—448. Han X R,Jiang L L,Wang S,et al. Effect of fertilizer application on photosynthetic traits of spring maize (In Chinese). Journal of Shenyang Agricultural University,2009,40(4):444—448

[12] 宋建民,田纪春,赵世杰,等．中午强光胁迫下高蛋白小麦旗叶的光合特性．植物生理学报,1999,25(3):209—213. Song J M,Tian J C,Zhao S J,et al. Photosynthetic characteristics in flag leaves of high protein wheat cultivars under strong irradiance stress around noon (In Chinese). Acta Phytophysiologica Sinica,1999,25(3):209—213

[13] 王春乙,郭建平,王修兰,等．CO_2浓度增加对 C3、C4 作物生理特性影响的实验研究．作物学报,2000,26(6):813—817. Wang C Y,Guo J P,Wang X L,et al. The experimental study of the effects of CO_2 concentration enrichment on physiological feature of C3 and C4 crops (In Chinese). Acta Agronomica Sinica,2000,26(6):813—817

[14] Farquhar G D,Sharkey T D. Stomatal conductance and photosynthesis. Ann Rev Plant Physiol,1982,33：317—345

[15] 陈恩凤．耕翻深度与耕层的层次发育．中国农业科学,1961(12):1—6. Chen E F. Tillage depth and development of tillage layer (In Chinese). Scientia Argricultra Sinica,1961(12):1—6

[16] 黄细喜．土壤紧实度及层次对小麦生长的影响．土壤学报,1988,25(1):59—65. Huang X X. The wheat growth affected by soil compaction and layers (In Chinese). Acta Pedologica Sinica,1988,25(1):59—65

[17] De Neve S,Hofman G. Influence of soil compaction on carbon and nitrogen mineralization of soil organic matter and crop residues. Biol Fertil Soils,2000,30:544—549

[18] 李潮海,王群,郝四平．土壤物理性质对土壤生物活性及作物生长的影响研究进展．河南农业大学学报,2002,36(1):32—36. Li C H,Wang Q,Hao S P. Advances of studies on the effect of soil physical properties on soil biological activity and crop growth (In Chinese). Journal of Henan Agricultural University,2002,36(1):32—36

[19] Xu M G,Zhang Y P,Liu W N. Diffusion of chloride ions in soils I. influences of soil moisture,bulk density and temperature. Pedosphere,1997,7(1):65—72

[20] 陈恩凤,周礼恺,武冠云,等．土壤的自动调节性能与抗逆性能．土壤学报,1991,28(2):169—175. Chen E F,Zhou L K,Wu G Y,et al. Self-regulation and resistance performances of soil (In Chinese). Acta Pedologica Sinica,1991,28(2):169—175

[21] Halstead R L. Chemical availability of native and applied phosphorous in soils and their textural fractions. Soil Sci Soc Am Proc,1967,31:414—418

[22] Burns R G. Soil enzyme. London:Academic Press,1978

[23] 陈恩凤,周礼恺,邱凤琼,等．土壤肥力实质的研究Ⅱ．棕壤．土壤学报,1985,22(2):113—119. Chen E F,Zhou L K,Qiu F Q,et al. Reseach of substance of soil fertility (In Chinese). Acta Pedologica Sinica,1985,22(2):113—119

[24] Unger P W. Straw mulch rate effects on soil water storage and sorghum yield. Soil Sci Soc Am J,1978,42:486—491

[25] 胡昌浩,潘子龙．夏玉米同化产物积累与养分吸收分配规律的研究Ⅱ．氮、磷、钾的吸收、分配与转移规律．中国农业科学,1982(2):38—47. Hu C H,Pan Z L. Studies on the rules of assimilate accumulation and nutrient absorption and distribution in the summer maize plant Ⅱ. Rules on the absorption,distribution and translocation of nitrogen,phosphorus and potassium (In Chinese). Scientia Argricultra Sinica,1982(2):38—47

[26] 沈裕琥,黄相国,王海庆．秸秆覆盖的农田效应．干旱地区农业研究,1998,16(1):45—50. Shen Y H,Huang X G,Wang H Q. Field effects of straw mulching (In Chinese). Agricultural Research in the Arid Area,1998,16(1):45—50

[27] 朱自玺,方文松,赵国强,等．麦秸和残茬覆盖对夏玉米农田

小气候的影响．干旱地区农业研究，2000，18（2）：19—24. Zhu Z X，Fang W S，Zhao G Q，et al. Effects of straw and residue mulching on microclimate of summer corn field（In Chinese）. Agricultural Research in the Arid Area，2000，18（2）：19—24

[28] 赵全仁，陈秉焱，毕江涛，等．旱地春小麦不同覆盖栽培水肥效应研究．干旱地区农业研究，2004，22（1）：76—79. Zhao Q R，Chen B Y，Bi J T，et al. Effect of different covering patterns on production of spring wheat（In Chinese）. Agricultural Research in the Arid Area，2004，22（1）：76—79

[29] 李潮海，赵霞，王群，等．下层土壤容重对玉米生育后期叶片衰老的生理效应．玉米科学，2007，15（2）：61—63. Li C H，Zhao X，Wang Q，et al. The physiological effect of different soil bulk densities on maize（*Zea mays L.*）leaf senescence during later growth stage（In Chinese）. Journal of Maize Sciences，2007，15（2）：61—63

[30] Demmig-Adams B，Adams III W W，Baker D H，et al. Using chlorophyll fluorescence to assess the fraction of absorbed light allocated to thermal dissipation of excess excitation. Physiol Plant，1996，98：253—264

[31] Andreas H，Walter R B，Alberto S. Root morphology and photosynthetic performance of maize inbred lines at low temperature. Europ J Agronomy，2007，27：52—61

[32] 王磊，白由路．不同氮处理春玉米叶片光谱反射率与叶片全氮和叶绿素含量的相关研究．中国农业科学，2005，38（11）：2 268—2 276. Wang L，Bai Y L. Correlation between corn leaf spectral reflectance and leaf total nitrogen and chlorophyll content under different nitrogen level（In Chinese）. Scientia Agricultura Sinica，2005，38（11）：2 268—2 276

[33] 刘晚苟，山仑．土壤机械阻力对玉米根系导水率的影响．水利学报，2004（4）：114—118. Liu W G，Shan L. Effect of soil mechanical resistance on hydraulic conductivity of maize root（In Chinese）. Journal of Hydraulic Engineering，2004（4）：114—118

[34] Zhang B J，Chen Q Z，Hua C，et al. Response of gas exchange and water use efficiency to light intensity and temperature in transgenic rice expressing PEPC and PPDK genes. Agricultural Sciences in China，2009，8（11）：1 312—1 320

[35] 范玉良，奚宗耀，籍平，等．玉米大垄行栽培技术推广．玉米科学，1999，7（3）：49—50. Fan Y L，Xi Z Y，Ji P，et al. Spread of corn one big ridge two rows technology（In Chinese）. Journal of Maize Sciences，1999，7（3）：49—50

[36] Quick W P，Chaves M M，Wendler R，et al. The effect of water stress on photosynthetic carbon netabolism in four species grown under field conditions. Plant Cell Environ，1992，15：25—35

[37] 雷泽湘，艾天成．草莓叶片叶绿素含量、含氮量与 SPAD 值间的关系．湖北农学院学报，2001，21（2）：138—140. Lei Z X，Ai T C. The relationships between SPAD readings and the contents of chlorophy and nitrogen in strawberry leaves（In Chinese）. Journal of Hubei Agricultural College，2001，21（2）：138—140

[38] Tadashi H，Theodore C，Hsiao S. Some characteristics of reduced leaf photosynthesis at midday in maize growing in the field. Field Crops Research，1999，62：53—62

[39] 姜琳琳，韩晓日，杨劲峰，等．施肥对不同密度型高产玉米品种光合生理特性的影响．沈阳农业大学学报，2010，41（3）：265—269. Jiang L L，Han X R，Yang J F，et al. Effects of fertilization on photosynthetic physiological characteristics in maize of high yield variety with different planting density（In Chinese）. Journal of Shenyang Agricultural University，2010，41（3）：265—269

[40] 张建恒，李宾兴，王斌，等．不同磷效率小麦品种光合碳同化和物质生产特性研究．中国农业科学，2006，39（11）：2 200—2 207. Zhang J H，Li B X，Wang B，et al. Studies on the characteristics of photosynthesis and dry matter production in wheat varieties with different P efficiency（In Chinese）. Scientia Agricultura Sinica，2006，39（11）：2 200—2 207

[41] 夏乐，于海秋，郭焕茹，等．低钾胁迫对玉米光合特性及叶绿素荧光特性的影响．玉米科学，2008，16（6）：71—74. Xia L，Yu H Q，Guo H R，et al. Effects of potassium deficiency on photosynthetic characters and chlorophyll fluorescence characters in maize plants（In Chinese）. Journal of Maize Sciences，2008，16（6）：71—74

[42] Araya T，Noguchi K，Terashima I. Effects of carbohydrate accumulation on photosynthesis differ between sink and source leaves of *Phaseolus vulgaris* L. Plant and Cell Physiology，2006，47：644—652

[43] Bengough A G，Mullins C E. Mechanical impedance to root growth：A review of experimental techniques and root growth responses. J Soil Sci，1990，1：341—358

EFFECTS OF SOIL BULK DENSITY ON PHOTOSYNTHESIS OF MAIZE AND THEIR REGULATION

Zheng Cunde[1,2]　Yi Yanli[1†]

(1 *College of Land and Environment, Shenyang Agricultural University, National Engineering Center for Northeast Soil and Fertilizer Resources Efficient Utilization, Shenyang* 110866, *China*)

(2 *College of Urban Construction, Liaoning Eastern University, Dandong, Liaoning* 118003, *China*)

Abstract A pot experiment was carried out using brown earth collected from local farmland to study effects of soil bulk density on photosynthesis of maize (photosynthesis rate, stomatal conductance, intercellular carbon dioxide concentration) and chlorophyll(a, b), and their regulation through application of organic manure and tillage. Results show that between treatments different in bulk density little difference was observed in chlorophyll concentration in leaves of maize before its jointing stage, but much was afterwards ($p < 0.01$), continuous increase in chlorophyll concentration was found during the growth stages under study; photosynthesis rate was negatively related to soil bulk density and intercellular carbon dioxide concentration, but positively to stomatal conductance; in soils high in bulk density, application of organic manure to raise soil organic matter up to 40 ~ 50 g kg^{-1} showed an ideal regulatory effect, while in soils low in bulk density, the effect of soil organic matter in the set range of the study was always significant. Soil organic matter around 15 g kg^{-1} restricted the growth of maize, and should be raised at least to 3% or more; tillage improved physiological indices of the maize, however, depth of the tillage had little significant effect on chlorophyll and photosynthesis indexes; when the tillage reached 30 ~ 40 cm in depth, its effects on various indices peaked and any further increase in tillage depth did not improve the effectcor.

Key words Soil bulk density; Maize (*Zea mays* L.); Photosynthetic index; Regulation; Tillage depth