

棕壤与褐土击实容重对含水量的响应^①

邱德勋^{1,2}，张含玉^{1,2}，姜自龙³，刘前进^{1,2*}，陈锦鸿^{1,2}，韩曜蔚^{1,2}

(1 临沂大学山东省水土保持与环境保育重点实验室，山东临沂 276005；2 临沂大学资源环境学院，山东临沂 276005；3 临沂市兰山区住房和城乡建设局，山东临沂 276000)

摘要：土壤在农业机械或者夯实压力下，容重会发生变化，其变化的程度受到土壤含水量的影响。为揭示棕壤与褐土受力后容重变化对含水量的响应特征，对土壤在不同的含水量下进行击实试验。结果表明：随着击实能量的增大，棕壤容重迅速增大后趋于稳定，而褐土容重达到稳定状态较慢。两种土壤容重随含水量的变化，因击实次数不同而具有差异性。棕壤容重随含水量增加，总体呈先增大后小幅度减小趋势，但在较低击实次数下，含水量为 88.3 g/kg 时容重略微减小；褐土容重在击实次数较低时，随土壤含水量增加呈先减小后增大趋势，而在击实次数较高时，呈先减小后增大而后又减小趋势，在含水量 136.5 g/kg 时出现最大值。含水量与击实能量对土壤击实容重的影响存在差异。在耕作条件(容重 1.6 g/cm³)和工程条件(容重>1.6 g/cm³)下，影响棕壤击实容重的最主要因素分别为含水量和击实次数，而影响褐土击实容重的最主要因素均为击实次数。在耕作条件下，棕壤击实容重在较低含水量(<50 g/kg)下数值较低，且随击实次数增多，容重变化较小；褐土的较小容重出现在较低击实能量范围内(<90 kJ/m³)，且受含水量的影响较小。在工程条件下，当棕壤与褐土的含水量为 150 g/kg 左右时，获得较大容重所需的击实能量最低。

关键词：容重；含水量；击实；棕壤；褐土

中图分类号：S152 文献标识码：A

土壤压实是普遍存在的现象，通常是指受外力作用导致表层土壤下沉、容重增加，土壤透水透气性降低^[1]。在农业生产中，几乎所有类型的农业机械在行驶过程中都会明显增加土壤紧实度，造成土壤压实^[2-4]。土壤压实可使土壤对水分的调节能力下降^[5]，降低土壤的水分储存能力，减少土壤中水分入渗^[6]，增大径流和水土流失风险^[7]。土壤压实成为导致土壤环境破坏与退化的主要因素之一^[8-9]。土壤容重增大还会使耕作阻力增大，造成能源损耗和工作效率降低，增加土地管理成本^[10]。因此，减轻农机对于土壤的压实程度已成为农业生产中需要解决的重要问题。在工程建设中，如水坝、挡土墙、公路和机场，需要将土壤夯实，使土壤处于高容重的状态，其目的是为了改善土壤的工程性质，提高其抗剪强度，降低其压缩性及渗透性^[11]。在土壤侵蚀试验研究中，经常采用夯实法按照一定的容重^[11-13]或者一定的击实力^[14-15]填充土壤。因此，研究土壤击实容重对实际生产和科学

研究具有指导意义。

目前，对于土壤压实所引起的容重变化研究，主要集中在工程建设和农业耕作两方面。土木工程中的击实试验研究表明，影响土壤击实容重的因素包括土壤含水量、质地等^[16-17]。土壤在一定的击实能量下达到最大容重时对应的含水量称为最优含水量。处于最优含水量的土壤击实效果最好，含水量过低与过高均不利于击实质量。土壤中的粉粒和黏粒含量越高，土壤的塑性指数越大，土壤的最优含水量也就越大，但所对应的最大容重越小。砂性土的最优含水量小于黏性土，但最大容重大于黏性土^[18]。通过击实试验得到最优含水量和最大容重，以及达到最大容重需要的击实能量，可指导施工过程中选择合理的击实方案，提高击实效果和击实效率^[19]。在耕作条件下土壤受到压力后容重变化的研究较少^[20]，主要研究表明土壤压实直接造成土壤容重增大，孔隙度降低^[1]。Munkholm 和 Schjønning^[21]提出在一定载荷作用下，

基金项目：国家自然科学基金项目(41571261；41701311)、山东省自然科学基金项目(ZR2017JL019；ZR2017PD003)、山东省大学生创新创业训练计划项目(201710452021)资助。

* 通讯作者(liuqianjin@lyu.edu.cn)

作者简介：邱德勋(1997—)，男，山东临沂人，本科，主要从事土壤侵蚀过程研究。E-mail: 1165516158@qq.com

土壤压实程度随着含水量增加而增大。Liu 等^[15]研究表明, 粉壤土与粉黏土在耕作条件(容重<1.6 g/cm³)下, 容重随着含水量增加呈先减小后增大趋势, 而在工程条件(容重>1.6 g/cm³)下则呈先增大后减小趋势。但是, 含水量与击实次数对容重的影响并未定量化, 且其他质地土壤的击实容重随着含水量的变化趋势仍不清楚。

棕壤与褐土是分布于我国暖温带湿润与半湿润地区的地带性土壤。两种土壤都是我国北方地区的主要农业土壤^[22], 农业历史悠久。本试验选取棕壤与褐土为研究对象, 定量研究击实能量与含水量对击实

容重的影响, 可为深入理解耕作土壤的击实特征, 以及确定工程施工中土壤击实的最优含水量和最大容重提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验所用棕壤与褐土为耕作层土壤, 基本物理特性见表 1。土壤采回实验室后进行风干处理, 并过 2 mm 筛。土壤颗粒组成采用 Mastersizer2000 型激光粒度分析仪(英国马尔文公司)测定, 按美国土壤质地标准(USDA)进行分类。

表 1 供试土壤的颗粒组成(%)
Table 1 Particle compositions of tested soils

土壤类型	黏粒(<0.002 mm)	粉粒(0.05 ~ 0.002 mm)	砂(2 ~ 0.05 mm)	土壤质地
棕壤	5.83	31.12	63.05	砂壤土
褐土	10.60	39.17	50.23	壤土

1.2 研究方法

试验于 2017 年 7—9 月在山东省水土保持与环境保育重点实验室进行。击实试验常规方法是将土壤在模具中进行击实^[14,23-24]。土壤的击实过程是土壤颗粒在不排水条件下的重组过程, 因此, 试验土壤含水量一般低于土壤塑限。采用搓滚法^[25]得到棕壤和褐土的塑限分别在 231 g/kg 和 205 g/kg。采用烘干称重法测定棕壤与褐土的风干土含水量分别为 12.4 g/kg 和 25.5 g/kg。本试验将含水量设置在风干土含水量与塑限之间, 即棕壤含水量为 8 个处理(20、40、60、90、120、150、180 和 200 g/kg), 褐土含水量为 6 个处理(30、60、90、120、150 和 180 g/kg), 每个处理重复 3 次, 共 42 个样品。利用公式(1)计算不同处理土样的加水量:

$$m_1 = \frac{m_2}{1000 + w_0} \times (w - w_0) \quad (1)$$

式中: m_1 为配置一定含水量土样所需加水量, g; m_2 为风干土质量, g; w_0 为风干土含水量, g/kg; w 为预定含水量, g/kg。

采用搅拌法制备不同含水量的土壤样品。将 4 000.00 g 风干土置于搅拌机中(38 r/min), 在搅拌的过程中, 用喷雾器将水以雾状的形式均匀喷洒在土壤上(300 ml/min), 使土壤与水充分混合, 达到规定加水量后, 关闭搅拌机。用刮刀将附着在搅拌机转筒内壁上的土壤刮下, 之后启动搅拌机再转动 1 min 左右, 使其全部混合。将搅拌后的土壤放置在加盖小桶中, 密封保存 24 h, 使水分再分配和土壤颗粒水化。在击实试验前, 利用烘干法测定不同处理的土壤实际含水量。

在前人研究中, 国际上采用的击实方法主要依据美国标准 ASTM D698, 如图 1A 所示。每层土壤至少需要击打 9 次, 且击实力较大, 主要模拟压路机对路基的压实作用, 但是农业土壤的压实程度与之相比偏小^[15]。因此, 本试验参考标准 ASTM D698, 自制击实模具, 见图 1B。击实模具主要由击实锤和击实筒两部分组成。击实锤由一根长为 100 mm 的实心铁棒、套在铁棒上可上下滑动的圆柱形铁块(质量为 1.21 kg)和固定在铁棒底端直径为 49 mm、厚度为 10 mm 的塑料板组成, 击实筒是光滑的无盖塑料圆筒。填土之前, 首先在击实筒的上部边缘等距标记 A、B、C 和 D 四个固定测量点。预试验表明, 580.00 g 烘干土可以填满击实筒。因此, 选定 580.00 g 烘干土作为基准, 根据设置的含水量得到各处理所需的土壤烘干重量(精确到 0.01 g)。将土壤置于击实筒中, 用土铲刮平。由于含水量不同, 不同处理所需土样的体积有所差别, 当土样体积大于击实筒体积时, 在击实筒上部加装套筒, 保证在击打过程中土壤始终处在击实筒中。击实锤从距离塑料板 304.8 mm 处自由下落, 击打土壤表面。在前 10 次击打的过程中, 每击打一次, 用游标卡尺分别测量 A、B、C 和 D 四个固定测量点至土壤表面的距离, 取平均值 \bar{h} 。随着击打次数的增加, 土壤高度的变化幅度减小, 适当增加测量间隔。当击实筒内土壤高度基本恒定后停止击打。

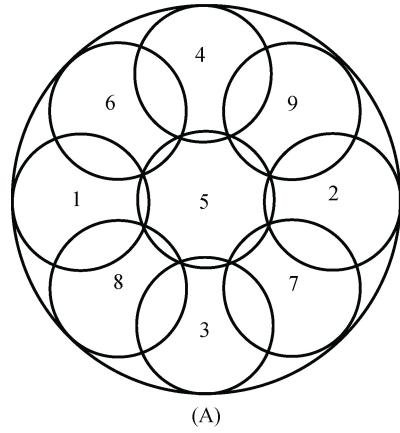
已知击实筒高度为 h_1 , 根据固定测量点至土壤表面的距离 \bar{h} , 可计算击实筒内土壤高度 $h = h_1 - \bar{h}$ 。根据公式(2)和(3)分别计算土壤击实后的体积(V)和

击实容重(D)。

$$V = \pi \left(\frac{d}{2} \right)^2 \times h \quad (2)$$

$$D = m / V \quad (3)$$

式中： V 为土壤体积， cm^3 ； d 为击实筒的内直径， cm ； D 为容重， g/cm^3 。



(A)

根据普氏击实试验标准，由公式(4)计算击实能量。

$$E = \frac{W \times H \times NB \times NL}{V_0} \quad (4)$$

式中： E 为击实能量， kJ/m^3 ； W 为击实锤的重量， N ； H 为击实锤下落的高度， m ； NB 为每层击打的次数； NL 为击实土层的数量； V_0 为土壤体积， m^3 。



(B)

图 1 ASTM D698 击实模式图(A)与试验装置(B)

Fig.1 Compaction pattern used in ASTM D698 (A) and experimental device (B)

2 结果与分析

2.1 击实能量对容重的影响

图 2 表明，击实能量随击实次数增加呈线性增大，但是增大的幅度在不同处理间具有差异性。棕壤含水量在 118.9 g/kg 时，击实能量增速最大，而在 22.7 g/kg 时，击实能量增速最小；褐土含水量在 136.5 g/kg 时，击实能量增速最大，在 79.5 g/kg 和 57.7 g/kg 时增速最小。其原因是在不同含水量下，土壤体积受力变化的幅度不同^[26]。

图 3 是棕壤和褐土不同含水量处理下击实能量与容重的关系。随着击实能量的增大，两种土壤的击实容重均呈先增大后趋于稳定的趋势。相对于棕壤，

褐土在不同含水量下的变化曲线出现交叉现象较多，表明变化趋势更为复杂。棕壤在含水量大于 151.7 g/kg 时，击实容重达到基本稳定时所需能量较小，容重稳定在 2.0 ~ 2.2 g/cm^3 ；随着含水量减小，稳定容重呈减小趋势。总体上，褐土的击实容重比棕壤小，稳定后最大值范围(1.8 ~ 1.9 g/cm^3)出现在含水量为 136.5 g/kg 的处理，稳定容重的最小值出现在 57.7 g/kg 和 79.5 g/kg 含水量处理。试验结果与以往研究结果一致，即土壤击实程度随着农机行驶次数的增加而增大，多次进地会产生持久性破坏，造成严重土壤压实^[27]。但是，本试验进一步表明，在相同的压力下，土壤容重随着含水量的不同具有较大差异。

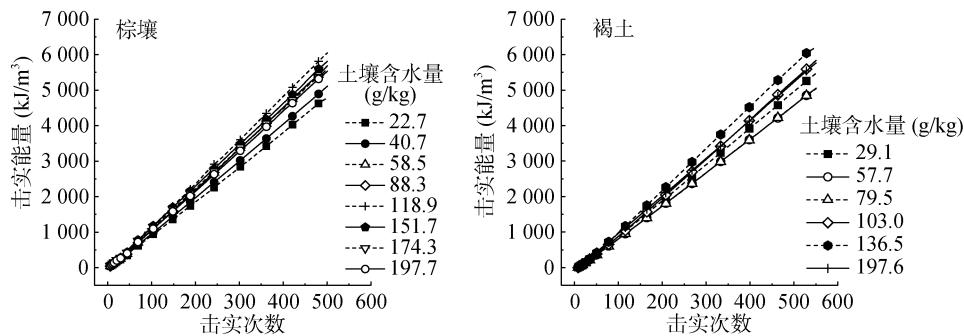


图 2 棕壤和褐土不同含水量处理下击实次数与击实能量关系

Fig. 2 Relationship between compaction times and energy under different moistures of brown soil and cinnamon soil

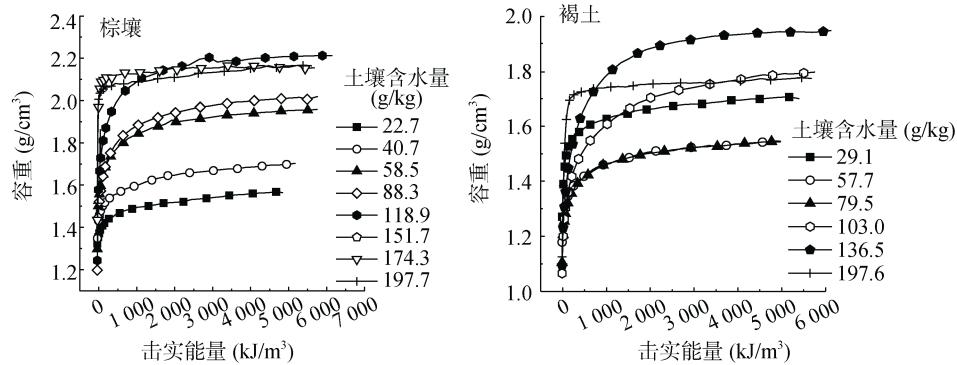


图 3 棕壤和褐土不同含水量处理下击实能量与容重关系

Fig. 3 Relationship between compaction energy and bulk densities under different moistures of brown soil and cinnamon soil

2.2 含水量对容重的影响

土壤含水量是影响土壤击实过程的重要因素^[28-29]。在一定能量下,由试验确定的击实土壤容重与含水量的关系称为击实曲线,如图4所示。棕壤击实曲线总体呈先升高后小幅度降低趋势,容重最小值出现在最低含水量22.7 g/kg处。在较低击实次数下(<55次),含水量为88.3 g/kg时容重呈略微减小趋势。棕壤最优含水量随击实次数的增加而减小,由197.7 g/kg逐

渐减小至118.9 g/kg,对应最大容重为2.23 g/cm³。

褐土在击实次数<40次时,击实容重随土壤含水量增加呈先减小后增大趋势,容重最大值出现在最高含水量197.6 g/kg处,含水量在79.5~103.0 g/kg范围内获得容重最小值。随着击实次数增加,击实曲线呈先降低后升高,而后又降低的趋势,击实容重在含水量136.5 g/kg时出现最大值,在含水量57.7 g/kg~79.5 g/kg范围内出现最小值。

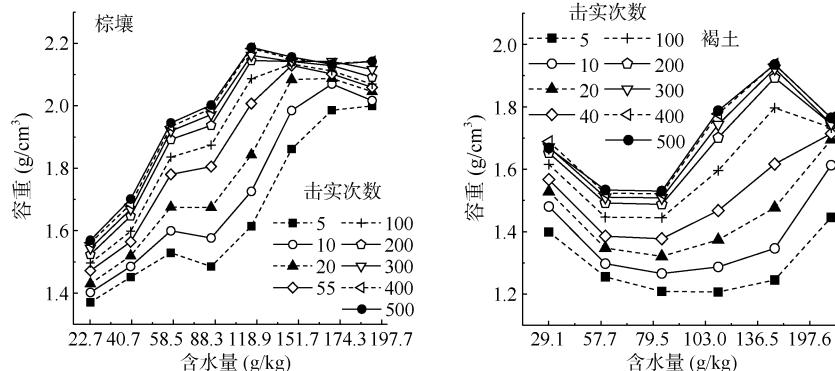


图 4 棕壤和褐土不同击实次数下含水量与容重关系

Fig. 4 Relationship between moistures and bulk densities under different compaction times of brown soil and cinnamon soil

已有研究表明,土壤中的粉粒和黏粒含量越高,其最优含水量越大,对应的最大容重越小,而砂性土的最优含水量小于黏性土,但最大容重大于黏性土^[18]。本试验中,在击实次数>200次时,与已有研究结果相同。但是在较低击实次数时,砂壤土(棕壤)的最优含水量高于粉壤土(褐土)。表明土壤最优含水量不仅与土壤质地有关,且受击实能量的影响。

棕壤与褐土击实曲线的变化趋势可能受土壤质地和土壤结构的影响^[30]。土壤容重随含水量增加呈先增大后减小趋势,其原因可能是^[31]:在土壤含水量较低时,增加含水量,会使土壤颗粒周围形成水膜,具有润滑作用,使土壤颗粒易移动和重新分布,形成更致密的结构,容重随之增大;当土壤含水量超过一

定限度时,含水量的增加只能增大土壤颗粒间的空隙,由于空隙中所填充水的质量小于同体积土壤的质量,因此容重减小。凹形击实曲线可以归因于土壤结构受击实作用的破碎程度和土壤水对土壤颗粒运动的润滑作用:当含水量较低(<30 g/kg)时,褐土中团聚体很小,基本呈粉末状,结构较差;随着土壤含水量的增加,团聚体变大,从絮状结构(含水量50~80 g/kg)变为块状结构(含水量>80 g/kg)。受到击实力后,当含水量较低(<80 g/kg)时,絮状土样结构未被全部破坏,其空隙大于粉末状土样,从而具有较小容重;当土壤含水量较高(>80 g/kg)时,土壤水的润滑作用对土壤颗粒运动的影响比中等含水量(50~80 g/kg)大,因此容重较大。击实曲线的变化趋势反映了棕壤

与褐土在低击实能量(农业耕作)和高击实能量(工程建设)下容重对含水量的响应机制。

2.3 含水量与击实能量对容重的综合影响

含水量和击实次数(能量)是影响土壤击实容重的主要因素。为使结果对耕作活动和工程夯实具有实际指导意义,将击实处理根据当地常见耕作容重($<1.6 \text{ g/cm}^3$)划分为耕作和工程条件两类。通过一般线性模型分析,得到含水量和击实次数及其交互作用的显著性和贡献率。棕壤在耕作与工程条件下的击实容

重均受含水量与击实次数的极显著影响($P<0.01$)(表2)。其中,耕作条件(容重 1.6 g/cm^3)下,含水量对容重的影响最大,贡献率为50.1%;工程条件(容重 $>1.6 \text{ g/cm}^3$)下,击实次数对容重的影响最大,贡献率为65.4%;总体来看,击实次数的影响比含水量影响大,贡献率达73.3%。耕地条件下,含水量与击实次数之间交互作用不显著($P>0.05$),但在工程条件和总体上,两者的交互作用达到极显著水平($P<0.01$),但贡献率较低,分别为8.4%和5.9%。

表2 含水量与击实次数对棕壤和褐土击实容重的影响和贡献

Table 2 Influence and contribution of moisture and compaction times on bulk density of brown soil and cinnamon soil

土壤类型	因素	耕作条件		工程条件		总体	
		Sig.	VC(%)	Sig.	VC(%)	Sig.	VC(%)
棕壤	含水量	0	50.1	0	23.7	0	19.7
	击实次数	0	34.9	0	65.4	0	73.3
	含水量×击实次数	0.71	0.4	0	8.4	0	5.9
	误差		14.6		2.5		1.1
	主效应		85.0		89.1		92.0
褐土	含水量	0	37.8	0	31.1	0	59.0
	击实次数	0	44.3	0	55	0	26.6
	含水量×击实次数	0	5.4	0	9.5	0	11.3
	误差		13.4		4.1		2.7
	主效应		82.1		86.1		85.6

注:×表示交互作用;Sig.为显著性;VC为方差贡献率。

褐土在耕作与工程条件下的击实容重均受含水量、击实次数及其交互作用的极显著影响($P<0.01$)(表2)。在耕地和工程两种条件下,击实次数均比含水量的贡献大;但是总体来看,含水量的影响比击实次数影响大。由此表明,含水量与击实次数对击实容重的影响不但受到土壤质地的影响,且在不同容重范围内影响程度具有差异性。图5为棕壤与褐土击实容重随含水量和击实能量变化的等值线图。在耕作条件(容重 1.6 g/cm^3)下,棕壤击实容重对含水量变化较敏感,但在较低含水量($<50 \text{ g/kg}$)下容重总体较低,且随着击实次数增加,容重变化幅度较小。表明在棕壤耕地中进行农业耕作时,农业机械需在含水量较低条件下作业才能减小对土壤的压实,当机械载重加大时,土壤容重增大幅度较小。褐土较小容重出现在较小击实能量范围($<90 \text{ kJ/m}^3$)内,且在此范围内受含水量的影响较小,表明轻型农业机械在褐土耕地进行农业耕作,特别是土壤处于微湿润状态(含水量约 80 g/kg)时,对土壤的压实作用较小。

在工程条件(容重 $>1.6 \text{ g/cm}^3$)下,棕壤的较大击实容重范围大于褐土。棕壤在含水量 $120 \sim 200 \text{ g/kg}$

时,褐土在含水量 $130 \sim 170 \text{ g/kg}$ 时,可获得较大容重。另外,在不同的含水量下,为获得较大容重需要选取相应的击实能量。当棕壤与褐土的含水量在 150 g/kg 时,获得较大容重所需的击实能量最低,分别为 1100 、 1400 kJ/m^3 。

3 结论

1)土壤容重与击实能量(次数)密切相关,随着击实能量的增加,两种土壤的击实容重均呈现先增大后趋于稳定的趋势。但是,棕壤容重迅速增大后趋于稳定,而褐土容重达到稳定状态较慢,且变化趋势更为复杂。总体上,褐土的击实容重比棕壤小。在相同的压力下,土壤容重随着含水量的不同具有较大差异。

2)含水量对土壤容重影响显著,相同击实次数下,棕壤容重随含水量增加,总体呈现先增大后小幅度减小趋势,但在较低击实次数下,含水量为 88.3 g/kg 时容重略微减小;击实次数较低时,褐土容重随土壤含水量增加呈先减小后增大趋势,击实次数较高时,趋势变为先减小后增大再减小,在含水量 136.5 g/kg 时达到最大值。

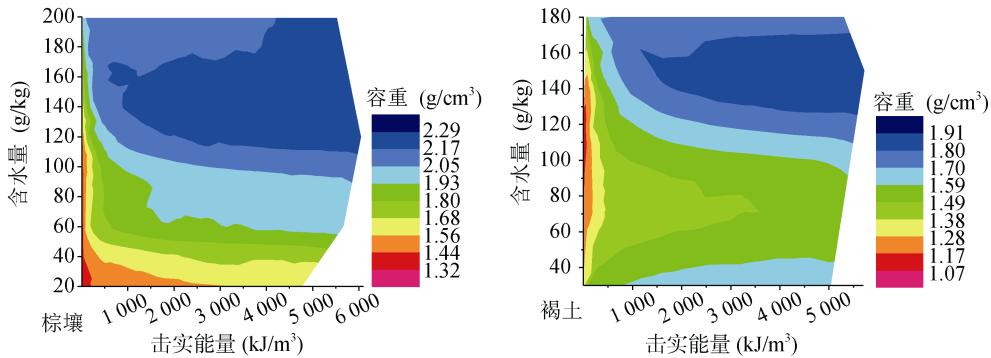


图 5 含水量和击实能量控制的土壤容重等值线图

Fig. 5 Contour map of bulk density controlled by moisture and compaction energy

3)在耕作条件和工程条件下,影响棕壤击实容重最主要的因素分别为含水量和击实次数,而影响褐土击实容重的最主要因素均为击实次数。含水量与击实次数对击实容重的影响不仅受土壤质地的影响,且在不同的容重范围内影响程度具有差异性。

4)在耕作条件下,棕壤击实容重在较低含水量($<50 \text{ g/kg}$)时数值较小,且受击实次数的影响较小;褐土较小容重出现在较小击实能量范围($<90 \text{ kJ/m}^3$)内,含水量的变化对其影响较小,特别是土壤处于微湿润状态(含水量约 80 g/kg)时,轻型农业机械对土壤的压实作用最小。在工程条件下,当棕壤与褐土的含水量在 150 g/kg 左右时,获得较大容重所需的击实能量最低。

参考文献:

- 何娜, 王立海. 击实对土壤理化特性及土壤呼吸的影响研究进展[J]. 森林工程, 2010, 26(1): 7–11
- Hambleton J P, Drescher A. Modeling wheel-induced rutting in soils: Indentation[J]. Journal of Terramechanics, 2008, 45(6): 201–211
- Raper R L. Agricultural traffic impacts on soil[J]. Journal of Terramechanics, 2005, 42(3/4): 259–280
- 王丽丽, 周通, 李柱, 等. 土壤紧实度对伴矿景天生长及镉锌吸收性的影响研究[J]. 土壤, 2017, 49(5): 951–957
- 杨金玲, 张甘霖, 赵玉国, 等. 城市土壤压实对土壤水分特征的影响——以南京市为例[J]. 土壤学报, 2006, 43(1): 33–38
- 杨金玲, 张甘霖. 城市功能区、植被类型和利用年限对土壤压实的影响[J]. 土壤, 2007, 39(2): 263–269
- Trolldborga M, Aldersa I, Towers W, et al. Application of Bayesian Belief Networks to quantify and map areas at risk to soil threats: Using soil compaction as an example[J]. Soil & Tillage Research, 2013, 132(4): 56–68
- 胡泓, 刘世全, 陈庆恒, 等. 川西亚高山针叶林人工恢复过程的土壤性质变化[J]. 应用与环境生物学报, 2001, 7(4): 308–314
- 庞学勇, 胡泓, 乔永康, 等. 川西亚高山云杉人工林与天然林养分分布和生物循环比较[J]. 应用与环境生物学报, 2002, 8(1): 1–7
- 李汝莘, 高焕文, 苏元升. 土壤容重和含水量对耕作阻力的影响[J]. 农业工程学报, 1998, 14(1): 81–85
- Shi Z H, Fang N F, Wu F Z, et al. Soil erosion processes and sediment sorting associated with transport mechanisms on steep slopes[J]. Journal of Hydrology, 2012, (454/455): 123–130
- 雷廷武, 张晴雯, 赵军. 细沟水蚀动态过程的稳定性稀土元素示踪研究[J]. 水利学报, 2004(12): 84–91
- 安娟, 刘前进, 吴希媛. 横坡垄作下土壤湿润速率对褐土坡面侵蚀特征的影响[J]. 农业机械学报, 2016, 47(10): 101–107
- Hanson G J, Hunt S L. Lessons learned using laboratory JET method to measure soil erodibility of compacted soils[J]. Applied Engineering in Agriculture, 2007, 23(3): 305–312
- Liu Q J, Wells R R, Dabney S M, et al. Effect of moisture potential and void ration erodibility for agricultural soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 2017, 81(3): 622–632
- 陶秀珍. 粘性土室内击实标准探讨[J]. 岩土工程学报, 1985, 7(4): 94–101
- 陈辉, 雷胜友. 土的击实试验影响因素[J]. 建筑科学与工程学报, 2005, 22(2): 69–71
- 周莹. 控制最优含水量来达到最佳击实效果[J]. 中国勘察设计, 2003(9): 69–70
- 郭丽红. 影响击实主要因素的探讨[J]. 建筑工程技术与设计, 2014(35): 931
- Free G R, Lamb J, Carleton E A. Compaction of certain soils as related to organic matter and erosion[J]. Journal of the American Society of Agronomy, 1947, 39(12): 1068–1076
- Munkholm L J, Schjønning P. Structural vulnerability of a sandy loam exposed to intensive tillage and traffic in wet conditions[J]. Soil and Tillage Research, 2004, 79(1): 79–85
- 刘春生, 宋国菡, 史衍玺, 等. 棕壤和褐土的酸淋溶特征[J]. 水土保持学报, 2002, 16(3): 5–8

- [23] Hanson G J, Cook K R. Apparatus, Test procedures, and analytical methods to measure soil erodibility in situ[J]. *Applied Engineering in Agriculture*, 2004, 20(4): 455–462
- [24] Al-Madhhachi A T, Fox G A, Hanson G J. Mechanistic detachment rate model to predict soil erodibility due to fluvial and seepage forces[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2013, 140(5): 1608–1618
- [25] 周序源, 张剑峰. 界限含水量试验的现状及展望[J]. *岩土工程学报*, 1985, 7(3): 90–99
- [26] 李小昱, 雷廷武, 王为. 土壤抗压强度的试验研究[J]. *农业工程学报*, 2001, 17(5): 19–21
- [27] 王宪良, 王庆杰, 张祥彩, 等. 田间土壤压实研究现状[J]. *农机化研究*, 2006, 53(9): 264–268
- [28] 孙耀邦, 李志国, 杨春峰. 农田土壤紧实度的研究[J]. *河北农业大学学报*, 1991(1): 28–31
- [29] 王恩姐, 赵雨森, 陈祥伟. 前期含水量对机械压实后黑土团聚体特征的影响[J]. *土壤学报*, 2009, 46(2): 241–247
- [30] Lee P Y, Suedkamp R J. Characteristics of irregularly shaped compaction curves of soil[J]. *Highway Research Record*, 1972
- [31] Holtz R D, Kovacs W D. Compaction. In: Holtz R D and Kovacs W D, authors, *An Introduction to Geotechnical Engineering*[M]. PrenticeHall, Englewood Cliffs, NJ, 1981: 113–115

Responses of Compacted Bulk Density of Brown Soil and Cinnamon Soil to Moisture Content

QIU Dexun^{1,2}, ZHANG Hanyu^{1,2}, JIANG Zilong³, LIU Qianjin^{1,2*}, CHEN Jinhong^{1,2}, HAN Yaowei^{1,2}

(1 *Shandong Provincial Key Laboratory of Water and Soil Conservation and Environmental Protection, Linyi University, Linyi, Shandong 276005, China*; 2 *College of Resources and Environment, Linyi University, Linyi, Shandong 276005, China*;
3 *Lanshan Housing and Urban-Rural Development Bureau, Linyi, Shandong 276000, China*)

Abstract: Bulk density is the basic physical property of soil. The variation of soil bulk density is affected by soil moisture under agricultural machinery or rammed pressure. In this study, compaction experiment was conducted to evaluate the characteristics of bulk density for brown soil and cinnamon soil under different moistures. The results showed that bulk density of brown soil increased rapidly first and then tended to be stable with the increase of compaction energy, but cinnamon soil reached the stable state slowly. The change of soil bulk density with moisture was different under different compaction times, for brown soil, bulk density increased firstly and then decreased slightly, but when the moisture was 88.3 g/kg bulk density was slightly decreased under less compaction times, while bulk density of cinnamon soil decreased first and then increased with the increase of soil moisture when the compaction times was relatively low. However, when the compaction times was more, bulk density decreased firstly and then increased and finally decreased again with the maximum value appeared at moisture of 136.5 g/kg. The effects of moisture and compaction energy on soil bulk density were different under tillage condition (1.6 g/cm^3) and engineering condition ($>1.6 \text{ g/cm}^3$). The main factors influencing the compaction density of brown soil were moisture and compaction times, respectively, but for cinnamon soil only was compaction time. Under tillage condition, the compaction density of brown soil was lowest at low moisture ($<50 \text{ g/kg}$), and changed little with the increase of compaction times. While the lowest bulk density of cinnamon soil appeared at the lower compaction energy ($<90 \text{ kJ/m}^3$), and was less affected by moisture. Under engineering condition, when the moisture was about 150 g/kg the compaction energy required to obtain larger bulk density was the lowest.

Key words: Bulk density; Moisture content; Compaction; Brown soil; Cinnamon soil