

开垦对黑土表层土壤压缩—回弹行为的影响^{*}

韩少杰 王恩姮 陈祥伟[†] 罗 松

(东北林业大学林学院, 哈尔滨 150040)

摘 要 为探讨开垦对典型黑土表层土壤压缩与回弹行为的影响, 以未经开垦天然次生林和开垦年限为 17 a、30 a、40 a 耕地的表层 (0~10 cm) 土壤为研究对象, 采用快速固结试验方法, 研究了土壤压缩与回弹过程中土壤孔隙比 (e)、压缩指数 (C_c)、压缩系数 (a) 和回弹指数 (C_s) 的变化。结果表明: 土壤孔隙比 (e)、压缩指数 (C_c)、压缩系数 (a) 和回弹指数 (C_s) 随着开垦年限的增加而降低, C_c 、 a 、 C_s 变化范围分别为 0.252~0.426、0.002 04~0.003 70 kPa⁻¹、0.041~0.070; 未经开垦天然次生林地土壤 C_c 、 C_s 显著高于耕地土壤 ($p < 0.05$); C_c 、 a 、 C_s 与容重均呈极显著负相关 ($p < 0.01$), 与有机质含量呈极显著正相关 ($p < 0.01$)。土壤压缩性与回弹能力随着开垦年限的增加逐渐降低, 容重、有机质含量对其影响最大。

关键词 开垦; 黑土; 孔隙比; 压缩指数; 回弹指数

中图分类号 S152.9 **文献标识码** A

土壤压实所引起土壤结构和物理性质的退化^[1-3] (如孔隙度减小, 根系生长阻力增加, 土壤水分渗透率、持水能力减弱等^[4-6]) 已成为世界范围内导致土壤退化的主要因素之一。近年来, 国外一些学者^[7-10] 开始从土壤力学的角度对农业土壤的压实行为与压缩性进行定量化研究, 了解土壤的压实行为有助于分析农田土壤的压实机制以及预测机械压实过程中土壤被压缩程度的大小。早期 Thomas 等^[11] 与 Díaz-Zorita 和 Grosso^[12] 普遍采用普式击 (Proctor test) 对土壤的最大干密度和最优含水率进行测定, 以击实曲线上升阶段的斜率做为评价土壤压实敏感性的指标。随后由于固结试验在研究农业土壤应力应变上的广泛应用, 农业土壤压实行为的研究逐渐系统化。由固结试验得到的土壤压缩曲线已被广泛地用来理解和表达土壤的压实行为及压缩性, 描述土壤孔隙比 (e) 和压强 (p) 之间的关系。通过压缩曲线得到的土壤压缩指数 (C_c) 和先

期固结压力已被广泛地用来评价农田土壤的压实敏感性和压实风险^[5]。

黑土区主要位于东北松辽流域, 是世界上仅有的三大黑土带之一^[13-14]。作为我国重要的商品粮生产基地^[15], 东北黑土区广泛采用大规模机械化耕作, 而由此带来的土壤压实已成为农田管理不可回避的问题^[16]。迄今, 黑土区关于机械压实研究主要集中在压实对作物产量和土壤结构的影响等方面^[17], 而有关黑土压缩与回弹行为及开垦对其影响的研究文献较少。为此, 本研究以典型黑土表层土壤为研究对象, 采用土力学快速固结试验方法, 对比分析了不同开垦年限土壤孔隙比 (e) 在相同外界压力下降低程度的差异性以及土壤压缩指数 (C_c)、压缩系数 (a)、回弹指数 (C_s) 的变化, 探讨了开垦年限对黑土表层土壤压缩—回弹行为及压缩性大小的影响, 以期研究典型黑土的压实机制及开垦过程中黑土力学性质的演变规律奠定基础。

^{*} 国家自然科学基金项目 (41271293, 41302222) 资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (Nos. 41271293, 41302222)

[†] 通讯作者 Corresponding author: 陈祥伟 (1966—), 男, 黑龙江哈尔滨人, 博士, 教授, 主要从事水土保持与流域治理方面的研究。E-mail: chenxwnefu@163.com

作者简介: 韩少杰 (1989—), 男, 河南安阳人, 硕士研究生, 主要从事土壤侵蚀与生产力恢复的研究。E-mail: 837736250@qq.com

收稿日期: 2015-11-16; 收到修改稿日期: 2015-12-21

1 材料与方法

1.1 样品采集与分析

土壤样品取自黑龙江省克山农场26连,采集时间为2014年9月份,采用时空替代法选择耕作措施、地形和环境条件等基本一致,开垦年限分别为17 a、30 a、40 a的玉米耕地和未经开垦的天然次生林(0 a)。分别设置3块样地,每块样地设3个取样点。用土工试验专用环刀($\phi=6.18$ cm,

$h=2.00$ cm)采集表层土壤(0~10 cm)4~6 cm深度处的原状土样,作为固结试验试样。同时在环刀附近用铝盒采集土壤样品用于测定土壤含水量,并结合固结试验计算土壤容重;用布袋采集土壤样品,经自然风干后,一部分碾碎过2 mm孔径土壤筛用移液管法测定土壤颗粒组成(按国际制),一部分碾碎过0.5 mm孔径土壤筛用液塑限联合测定法测定土壤液限和塑限,一部分研磨过0.149 mm孔径土壤筛用重铬酸钾外加热法测定土壤有机质含量^[18]。所有试验均重复3次。

表1 不同开垦年限黑土理化性质

Table 1 Physicochemical properties of the black soils different in reclamation history

开垦年限 Reclamation history (a)	土壤含水量 Moisture content (%)	容重 Bulk density (g cm ⁻³)	黏粒 Clay (%)	有机质 Organic matter (g kg ⁻¹)	液限 Liquid limit (%)	塑限 Plastic limit (%)
0	34.71 ± 1.77a	1.07 ± 0.05a	23.82 ± 12.65a	89.50 ± 7.19a	57.9	30.5
17	33.28 ± 0.47ab	1.11 ± 0.04a	35.56 ± 1.31ab	79.97 ± 5.01a	55.6	32.8
30	34.79 ± 0.45a	1.30 ± 0.04b	31.28 ± 3.39a	58.62 ± 6.79b	57.2	32.9
40	32.11 ± 0.77b	1.28 ± 0.06b	46.91 ± 2.86b	59.75 ± 9.88b	57.1	32.9

注:不同字母代表在 $p < 0.05$ 水平下差异显著。下同 Note: Different letters mean significant difference at $p < 0.05$. The same below

1.2 指标的测定与计算

固结试验采用GZQ-1型全自动气压固结仪参照公路土工试验规程(JTG E40—2007)中的快速固结试验法^[18]进行。按12.5、25、50、100、200、400、800、1 600 kPa荷载次序对试样进行压缩测试;压缩测试过程中选取200 kPa为卸荷点,通过卸荷、再加荷的方式按200、100、50、25、12.5、25、50、100、200 kPa次序对试样进行回弹与再压缩测试。试验中除1 600 kPa外,其他各级荷载下固结时间均为1 h,1 600 kPa荷载下固结时间则以固结稳定为准,即最后1 h变形量不超过0.01 mm。记录各级荷载下试样固结1 h读数、1 600 kPa荷载下达到稳定标准的读数及各级荷载下仪器变形量。将各级荷载下试样固结1 h读数和1 600 kPa荷载下达到稳定标准的读数分别减去相应荷载下仪器变形量后得到各级荷载下试样固结1 h总变形量($(h_i)_t$)和1 600 kPa荷载下达到稳定标准后总变形量($(h_n)_T$)。在此基础上,通过式(1)计算得到各级荷载下试样的校正总变形量($\Sigma \Delta h_i$),之后按如下公式计算各级荷载下土壤孔隙比

(e_i)、压缩系数(a)、压缩指数(C_c)和回弹指数(C_s)^[18]:

$$\Sigma \Delta h_i = (h_i)_t \frac{(h_n)_T}{(h_n)_t} \quad (1)$$

$$e_0 = \frac{\rho_s(1 + 0.01w_0)}{\rho_0} - 1 \quad (2)$$

$$e_i = e_0 - \frac{(1 + e_0)\Sigma \Delta h_i}{h_0} \quad (3)$$

$$a = \frac{e_i - e_{i+j}}{p_{i+j} - p_i} \quad (4)$$

$$C_c(\text{或 } C_s) = \frac{e_i - e_{i+j}}{\lg p_{i+j} - \lg p_i} \quad (5)$$

式中, $\Sigma \Delta h_i$ 为某级荷载下试样的校正总变形量(mm); $(h_i)_t$ 为某级荷载下试样固结1 h的总变形量(mm); $(h_n)_t$ 为1 600 kPa荷载下试样固结1 h的总变形量(mm); $(h_n)_T$ 为1 600 kPa荷载下试样达到稳定标准后的总变形量(mm); e_0 为试样初始孔隙比; ρ_s 为试样土粒密度(g cm⁻³); w_0 为试样初始含水量(%); ρ_0 为试样初始密度

(g cm^{-3})； h_0 为试样初始高度(mm)； p_i 、 p_{i+j} 分别为 e_i 、 e_{i+j} 对应荷载(kPa)。

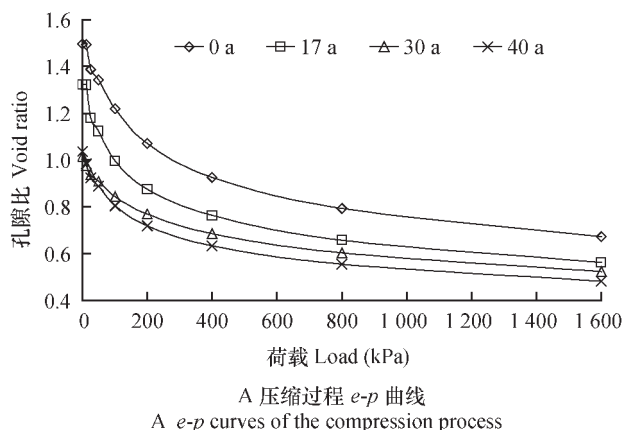
1.3 数据处理

应用SPSS 18.0和Excel 2003对数据进行处理,采用单因素方差分析(One-way ANOVA)对样本进行差异性检验,采用Pearson相关性对各变量进行相关分析。

2 结果

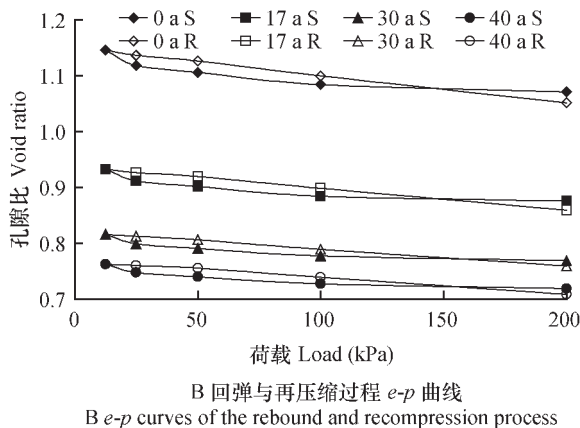
2.1 压缩过程土壤孔隙比的变化

孔隙比(e)指土壤孔隙体积与固体颗粒体积之比,不仅反映土壤的紧实程度,而且会对土壤的物理、力学指标产生重要影响^[19]。测定结果表明,各处理试样土壤孔隙比均表现出随着垂直荷载的增加而不断下降的一致性规律,但不同试样在压缩过程的不同阶段土壤孔隙比的下降幅度有所不



同(图1A)。可能受供试土壤初始孔隙比的差异所致,对耕地土壤来说,当垂直荷载超过25 kPa时开垦17 a和30 a的土壤孔隙比出现显著降低($p < 0.05$),当垂直荷载超过50 kPa时开垦40 a土壤孔隙比出现显著降低($p < 0.05$);而对未经开垦的天然次生林土壤而言,土壤孔隙比出现显著降低($p < 0.05$)时的垂直荷载可达到100 kPa以上。

由图1A还可以看出,土壤孔隙比始终表现出随着开垦年限的增加而降低的规律。其中,未经开垦的天然次生林(0 a)土壤孔隙比始终显著高于耕地($p < 0.05$),开垦17 a耕地土壤孔隙比亦显著高于开垦30 a和40 a耕地土壤($p < 0.05$),仅发现开垦30 a和开垦40 a耕地之间土壤孔隙比的差异未达显著水平。这一方面说明,与对照相比开垦显著降低了土壤对外界压力的抵抗能力;另一方面表明随着开垦年限的增加,土壤紧实程度会显著增加。



注: S, R分别表示回弹,再压缩 Note: S and R stands for rebound and recompression, respectively

图1 不同开垦年限黑土 e - p 关系曲线

Fig.1 e - p curves of the black soil relative to reclamation history

2.2 回弹与再压缩过程孔隙比的变化

由图1B可知,在回弹与再压缩过程中,不同处理试样土壤孔隙比均表现出随着垂直荷载的逐渐降低而增大,之后随着垂直荷载重新增加而逐渐减小的一致性规律。回弹过程中各试样土壤孔隙比均表现出增加的趋势,但与回弹初始点(200 kPa)相比均未达显著水平,其中,垂直荷载200~25 kPa阶段土壤孔隙比的变化幅度相对较小,垂直荷载25~12.5 kPa阶段土壤孔隙比的变化幅度较大;回弹至12.5 kPa时土壤孔隙比显著低于初次压缩至12.5 kPa时的土壤孔隙比($p < 0.05$),说明绝大部分压缩变形在短期内无法恢复。与回弹过程中土

壤孔隙比的变化明显不同,再压缩过程中垂直荷载12.5~100 kPa阶段土壤孔隙比高于回弹过程,表明土壤经初次压缩后,土壤颗粒发生重新排列,进而使土壤本身对外界压力的抵抗能力有所增强;而垂直荷载200 kPa时土壤孔隙比则低于回弹过程。

从图1B还可以看出,各试样土壤孔隙比在整个回弹与再压缩过程中均表现出随着开垦年限的增加而降低的规律,未经开垦天然次生林地土壤显著高于开垦17 a耕地土壤($p < 0.05$),开垦17 a耕地土壤显著高于开垦30 a和40 a的耕地土壤($p < 0.05$),而开垦30 a和40 a耕地土壤之间差异不显著,差异性规律与压缩过程中土壤孔隙比的变

化相吻合。

2.3 压缩与回弹指标的变化

压缩指数 (C_c) 反映了在外界压力下土壤压缩程度的大小, 常用来作为评价土壤压实敏感性的指标^[20]。本次研究发现, 各试样土壤压缩指数的大小介于0.250~0.430之间; 与未经开垦天然次生林地土壤相比, 所有耕地土壤压缩指数均显著低于林地土壤 ($p < 0.05$), 说明开垦显著降低了土壤压实敏感性; 随着开垦年限的增加, 各耕地土壤压缩指数呈现逐渐降低的趋势, 其中开垦17 a耕地土壤压缩指数显著高于开垦30 a和40 a的耕地 ($p < 0.05$), 但开垦30 a与40 a耕地土壤之间的差异未达显著水平, 这与土壤孔隙比随开垦年限的变

化规律一致 (表2)。

与压缩指数反映土壤整体压缩变形不同, 压缩系数 (a) 反映的则是在特定压力范围内土壤的压缩性大小。本次研究针对黑土区耕作过程中作业机械的实际压力, 测定在12.5~100 kPa荷载下土壤压缩系数的变化范围为0.001 51~0.003 70 kPa⁻¹, 虽然同样呈现出随开垦年限的增加土壤压缩系数逐渐降低的趋势, 但仅表现在未经开垦天然次生林地土壤和开垦17 a耕地土壤与开垦30 a和40 a耕地土壤之间压缩系数的差异达显著水平 ($p < 0.05$), 这不仅说明特定压力范围内土壤的压缩性低于土壤整体压缩性, 而且在一定程度反映出开垦对土壤压缩系数影响的滞后性。

表2 不同开垦年限黑土压缩与回弹指标

Table 2 Compression and rebound indices of the black soil relative to reclamation history

开垦年限 Reclamation history (a)	C_c	a (kPa ⁻¹)	C_s
0	0.426 ± 0.041a	0.003 14 ± 0.000 43a	0.070 ± 0.013a
17	0.342 ± 0.009b	0.003 70 ± 0.000 69a	0.055 ± 0.005b
30	0.284 ± 0.012c	0.001 51 ± 0.000 26b	0.045 ± 0.004bc
40	0.252 ± 0.035c	0.002 04 ± 0.000 24b	0.041 ± 0.002c

注: C_c 、 a 、 C_s 分别表示压缩指数、压缩系数、回弹指数。下同 Note: C_c , a , C_s stands for compression index, compression coefficient and rebound index, respectively. The same below

回弹指数 (C_s) 表示土壤孔隙比在回弹阶段的变化程度, 回弹指数越大, 表明土壤被压缩后膨胀回弹的能力越大。从表2还可以看出, 所测定的土壤回弹指数变化范围为0.041~0.070, 亦表现出随着开垦年限的增加, 土壤回弹指数逐渐下降、土壤压实后回弹能力逐渐降低的趋势。其中, 未经开垦天然次生林地土壤回弹指数显著高于耕地土壤 ($p < 0.05$), 开垦17 a耕地土壤回弹指数仅与开垦40 a耕地土壤之间差异显著 ($p < 0.05$)。

3 讨 论

土壤压缩性与回弹能力除受到土壤含水量等环境因素外, 主要受土壤质地、有机质含量、容重等内在因素的影响^[5, 21]。土壤有机质因具有较强的亲水性, 使土壤黏粒间的结合水膜加厚, 增大了土壤孔隙比, 进而导致土壤压缩性的增加^[22]; Pereira等^[23]研究发现, 土壤压缩指数和回弹指数

与有机质含量之间均表现出显著正相关关系; 李磊等^[24], 冯源等^[25]也发现高有机质含量土壤的压缩性较高; 此外, Imhoff等^[7]认为容重与压缩指数之间具有显著负相关关系。本研究发现, 土壤压缩指数、压缩系数、回弹指数与有机质含量之间均表现出极显著正相关关系 ($p < 0.01$), 与容重之间均表现出极显著负相关关系 ($p < 0.01$) (表3), 这与前人研究结论相吻合。结合表1, 土壤有机质含量随着开垦年限的增加显著减少 ($p < 0.05$), 而容重随着开垦年限的增加显著增大 ($p < 0.05$), 故可以认为, 有机质含量的减少和容重的增大是开垦导致黑土表层土壤压缩与回弹能力降低的重要原因。

本研究发现, 黑土黏粒含量与土壤压缩性指标之间未表现出显著的相关关系 (表3)。虽然有研究^[26]表明土壤黏粒具有巨大的表面能, 对土壤物理—力学性质有重要的影响, 但也有研究^[7]认为当土壤黏粒含量低于30%时土壤压缩指数 (C_c) 与

表3 黑土压缩指标、回弹指标与理化性质指标间的相关系数

Table 3 Correlation coefficients of compression indices and rebound index with physicochemical properties of the black soil						
	容重 Bulk density	有机质 Organic matter	黏粒 Clay	C_c	a	C_s
C_c	-0.884**	0.893**	-0.534	1		
a	-0.904**	0.733**	-0.133	0.656*	1	
C_s	-0.840**	0.803**	-0.400	0.948**	0.628*	1

注：*、**分别表示在 $p < 0.05$ 和 $p < 0.01$ 水平上显著 Note: * and ** represents significant level at $p < 0.05$ and $p < 0.01$, respectively

黏粒含量之间呈正相关关系，当黏粒含量高于30%后， C_c 则不再受其影响。本试验中耕地土壤黏粒含量均高于30%（表1），这可能是导致黏粒含量与土壤压缩指数之间关系不显著的重要原因，回弹指数和压缩系数可能也因此受到影响。

本研究结果中不同开垦年限黑土土壤回弹指数介于0.040~0.070之间，而Pereira等^[23]研究的饱和始成土（Eutric Cambisol）土壤回弹指数却仅为0.010~0.015。产生上述差异的原因在于，在外力作用下黏性土壤的弹性较大，而砂土则较小；相比Pereira等^[23]研究中土壤黏粒含量介于20.81%~25.85%之间，本研究黑土耕地土壤黏粒含量介于31.28%~46.91%之间，因此造成黑土耕地土壤回弹指数维持相对较高水平。

压缩与回弹指标之间相关关系十分明显（表3），压缩指数和回弹指数均与压缩系数之间呈显著正相关（ $p < 0.05$ ），压缩指数与回弹指数之间呈极显著正相关（ $p < 0.01$ ）。结合表2计算结果，本研究发现典型黑土表层土壤回弹指数仅为土壤压缩指数的16%，这与已有研究^[27]指出的一般黏性土壤回弹指数是土壤压缩指数的10%~20%相吻合。

4 结 论

本研究发现开垦能够导致典型黑土表层土壤压缩与回弹过程中土壤孔隙比、压缩指数、压缩系数与回弹指数的变化，进而对土壤的压缩一回弹行为产生影响。开垦可增加黑土表层土壤紧实程度，且随着开垦年限的增加影响加大。黑土表层土壤压缩性与回弹能力随着开垦年限的增加逐渐降低。开垦导致的土壤有机质含量降低和容重升高是造成黑土表层土壤压缩性与回弹能力降低的重要原因；此

外，黑土表层土壤压缩指数和回弹指数均与压缩系数之间呈显著正相关，压缩指数与回弹指数呈极显著正相关，回弹指数为压缩指数的16%。

参 考 文 献

[1] 王恩姬, 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. 土壤学报, 2009, 46 (2) : 241—247
Wang E H, Zhao Y S, Chen X W. Effect of antecedent moisture content on aggregate size distribution and characteristics of black soil compacted mechanically (In Chinese) . Acta Pedologica Sinica, 2009, 46 (2) : 241—247

[2] Chaplain V, Défossez P, Richard G, et al. Contrasted effects of no-till on bulk density of soil and mechanical resistance. Soil and Tillage Research, 2011, 111 (2) : 105—114

[3] 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. 土壤学报, 2006, 43 (1) : 33—38
Yang J L, Zhang G L, Zhao Y G, et al. Effect of compaction on soil water characteristics—A case study of Nanjing (In Chinese) . Acta Pedologica Sinica, 2006, 43 (1) : 33—38

[4] 李春林, 丁启朔, 陈青春. 水稻土的先期固结压力测定与分析. 农业工程学报, 2010, 26 (8) : 141—144
Li C L, Ding Q S, Chen Q C. Measurement and analysis of precompression stress of soil in rice field (In Chinese) . Transactions of the CSAE, 2010, 26 (8) : 141—144

[5] Saffih-Hdadi K, Défossez P, Richard G, et al. A method for predicting soil susceptibility to the compaction of surface layers as a function of water content and bulk density. Soil and Tillage Research, 2009, 105 (1) : 96—103

[6] 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. 土壤, 2007, 39 (2): 263—269
- Yang J L, Zhang G L. Effects of function zone, vegetation type and land use age on soil compaction in urban Nanjing (In Chinese). Soils, 2007, 39 (2): 263—269
- [7] Imhoff S, Da Silva A P, Fallow D. Susceptibility to compaction, load support capacity, and soil compressibility of Hapludox. Soil Science Society of America Journal, 2004, 68 (1): 17—24
- [8] Peth S, Rostek J, Zink A, et al. Soil testing of dynamic deformation processes of arable soils. Soil and Tillage Research, 2010, 106 (2): 317—328
- [9] Défossez P, Richard G, Keller T, et al. Modeling the impact of declining soil organic carbon on soil compaction: Application to a cultivated Eutric Cambisol with massive straw exportation for energy production in Northern France. Soil and Tillage Research, 2014, 141: 44—54
- [10] Baba H O, Peth S, Horn R, et al. Quantification of mechanical strength and sliding stability of an artificial water catchment (Chicken Creek). Soil and Tillage Research, 2015, 146: 66—78
- [11] Thomas G W, Haszler G R, Blevins R L. The effects of organic matter and tillage on maximum compactability of soils using the Proctor test. Soil Science, 1996, 161 (8): 502—508
- [12] Díaz-Zorita M, Grosso G A. Effect of soil texture, organic carbon and water retention on the compactability of soils from the Argentinean pampas. Soil and Tillage Research, 2000, 54 (1): 121—126
- [13] 谷思玉, 王宁娟, 陈渊, 等. 不同开垦年限农田黑土磷素形态及数量变化. 土壤, 2014, 46 (4): 662—668
- Gu S Y, Wang N J, Chen Y, et al. Changes of phosphorus contents and forms in black soils from different cultivation years (In Chinese). Soils, 2014, 46 (4): 662—668
- [14] 宋福强, 程蛟, 常伟, 等. 黑土农田施加AM菌剂对大豆根际菌群结构的影响. 土壤学报, 2015, 52 (2): 390—398
- Song F Q, Cheng J, Chang W, et al. Impact of inoculation with am fungi on microbial community structure in soybean rhizosphere in farmland of black soil (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2015, 52 (2): 390—398
- [15] 温磊磊, 郑粉莉, 沈海鸣, 等. 东北典型黑土区农耕土壤团聚体流失特征. 土壤学报, 2015, 52 (3): 489—498
- Wen L L, Zheng F L, Shen H O, et al. Characteristics of soil aggregate loss in croplands in the typical black soil region of Northeast China (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2015, 52 (3): 489—498
- [16] 王恩姮, 柴亚凡, 陈祥伟. 大机械作业对黑土区耕地土壤结构性特征的影响. 应用生态学报, 2008, 19 (2): 351—356
- Wang E H, Chai Y F, Chen X W. Effects of heavy machinery operation on the structural characters of cultivated soils in black soil region of Northeast China (In Chinese). Chinese Journal of Applied Ecology, 2008, 19 (2): 351—356
- [17] 王恩姮. 机械耕作与季节性冻融对黑土结构的影响. 哈尔滨: 东北林业大学林学院, 2011
- Wang E H. Effect of machinery tillage and seasonal freeze-thaw on soil structure in black soil region (In Chinese). Harbin: School of Forestry, Northeast Forestry University, 2011
- [18] 交通部公路科学研究院. 公路土工试验规程: JTG E40—2007. 北京: 人民交通出版社
- Highway Science Research Institute of Ministry of Communications. Test methods of soils for highway engineering: JTG E40—2007 (In Chinese). Beijing: China Communications Press
- [19] 曹卫平. 土力学. 北京: 北京大学出版社, 2011: 22—24
- Cao W P. Soil mechanics (In Chinese). Beijing: Peking University Press, 2011: 22—24
- [20] Ajayi A E, Junior M D S D, Curi N, et al. Strength attributes and compaction susceptibility of Brazilian Latosols. Soil and Tillage Research, 2009, 105 (1): 122—127
- [21] Smith C W, Johnston M A, Lorentz S. Assessing the compaction susceptibility of South African forestry soils. II. Soil properties affecting compactability and compressibility. Soil and Tillage Research, 1997, 43 (3/4): 335—354
- [22] 刘宝臣, 唐黔, 张晨富, 等. 有机质污染下红黏土物理力学特性变化规律分析. 路基工程, 2014 (3): 12—16
- Liu B C, Tang Q, Zhang C F, et al. Analysis on change law of physical and mechanical properties of red clay contaminated by organic matter (In Chinese). Subgrade Engineering, 2014 (3): 12—16
- [23] Pereira J O, Défossez P, Richard G. Soil susceptibility to compaction by wheeling as a function of some properties of a silty soil as affected by the tillage system. European Journal of Soil Science, 2007, 58 (1): 34—44
- [24] 李磊, 徐菲, 周灵君, 等. 固化污泥压缩特性研究. 岩土工程学报, 2015, 37 (1): 171—176
- Li L, Xu F, Zhou L J, et al. Compression characteristics of solidified sewage sludge (In Chinese). Chinese Journal of

- Geotechnical Engineering, 2015, 37 (1): 171—176
- [25] 冯源, 罗小勇, 林伟岸, 等. 处置库污泥工程特性测试研究. 岩土力学, 2013, 34 (1): 115—122
- Feng Y, Luo X Y, Lin W A, et al. Geotechnical properties measurement of sewage sludge at a disposal site (In Chinese). Rock and Soil Mechanics, 2013, 34 (1): 115—122
- [26] 孙一源, 高行方, 余登苑. 农业土壤力学. 北京: 农业出版社, 2012: 71—72
- Sun Y Y, Gao X F, Yu D Y. Agricultural soil mechanics (In Chinese). Beijing: Agriculture Press, 1985: 14—15
- [27] 李飞, 王贵军. 土力学与基础工程. 武汉: 武汉理工大学出版社, 2012: 71—72
- Li F, Wang G J. Soil mechanics and foundation engineering (In Chinese). Wuhan: Wuhan University of Technology Press, 2012: 71—72

Effects of Tillage on Compression and Rebound Behavior of Topsoil in Black Soil Region

HAN Shaojie WANG Enheng CHEN Xiangwei[†] LUO Song

(College of Forestry, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China)

Abstract In the black soil region of Northeast China, the issue of the soil getting more and more compact due to the extensive use of farming machines has been arousing more and more concerns among the people. Soil compaction has been considered one of the main causes of degradation of agricultural soils worldwide, because it reduces soil porosity and water infiltration, while enhancing soil intensity and soil consistence, which in turn impede root penetration into the soil and consequently reduce land productivity. Despite of this, little has been done on mechanical properties of compression and rebound of black soil typical of Northeast China. It is, therefore, essential to explore compression behavior of the soil for prediction of possible changes in soil structure under the pressure of farming machines. To explore effects of reclamation in mechanical properties of compression and rebound of the black soil, plots of black soil fields different in reclamation history, i.e. 17 (Plot 17), 30 (Plot 30) and 40 (Plot 40) years and un-reclaimed natural secondary forest land (Plot 0), were cited for soil sampling using a ring sampler, 2.00 cm high and 6.12 cm in diameter and the soil samples were analyzed for soil void ratio, compression index, compression coefficient, and rebound index with a fast oedometer. Results show that soil void ratio, compression index, compression coefficient and rebound index all went down with the cultivation going on. During the compression process, Plot 0 was obviously higher than Plots 17, 30 and 40 in soil void ratio ($p < 0.05$); Plot 17 higher than Plots 30 and 40 ($p < 0.05$); and Plot 30 did not differ much from Plot 40. And during the rebound and recompression phase, the four plots displayed a variation pattern similar to that during the compression process. Compression index, compression coefficient and rebound index of the soil varied from 0.252 to 0.426, 0.002 04 to 0.003 70 kPa⁻¹, 0.041 to 0.070, respectively. Plot 0 was significantly higher than the other three plots ($p < 0.05$), and Plot 17 higher than Plots 30 and 40 in compression index ($p < 0.05$), while no significant difference was found between Plots 30 and 40. However, the plots showed a different trend in soil compression coefficient. Plot 0 and Plot 17 was significantly higher than Plots 30 and 40, but the former two did not differ much. Plot 0 was still significantly higher than all the other three in rebound index ($p < 0.05$), but among the latter three, only Plot 17 was significantly higher than Plot 40 ($p < 0.05$). Besides, it was also found that with farming cultivation going on, soil organic matter content decreased while soil bulk density increased, and both of the indices were found somewhat related to compression index, compression coefficient and rebound index

of the soil. Organic matter content was positively related to compression index ($r=0.893$), compression coefficient ($r=0.733$) and rebound index ($r=0.803$), while bulk density was negatively related to compression index ($r=-0.884$), compression coefficient ($r=-0.904$) and rebound index ($r=-0.840$); However, soil clay content did not seem to be related to compression index, compression coefficient and rebound index of the soil. Moreover, both soil compression index and soil rebound index were in significant positive relationship with soil compression coefficient ($p<0.05$), and soil compression index was in extremely significant positive relationship with soil rebound index ($p<0.01$). In conclusion, reclamation affects soil compactness significantly, and with mechanical farming cultivation going on, soil compactness increases in degree, while compressibility and rebound capacity of the black soil decrease. Obviously, long-term mechanical farming cultivation decreases soil organic matter content and increases soil bulk density, which is believed to be the major cause leading to the decline of soil compressibility and rebound capacity.

Key words Reclamation; Black soil; Void ratio; Compression index; Rebound index

(责任编辑：檀满枝)