

基于气压劈裂原理的气压深松效果试验

左胜甲,孔德刚*,刘立意,董 欣,赵永超

(东北农业大学工程学院,哈尔滨 150030)

摘 要:针对传统深松方式存在深松影响范围小、程度不均匀、能耗大的问题,该文基于气压劈裂原理与技术,提出了一种新的旱作耕地深松方式—气压深松,即向耕地土壤中注入高压气体,利用气压劈裂原理与技术使土壤内形成裂隙从而实现土壤深松的新方式。并以土壤孔隙度、土壤孔隙度提升率和土面抬升量为评价指标,通过模拟试验,研究分析气压深松方式的效果得出:气压深松使土壤中空气的比例增大、土壤体积膨胀、土面抬升,高压气体在土壤内部形成裂隙,土壤孔隙度大面积变大。表明气压深松可有效打破犁底层,具有良好的深松效果。另外,气压深松与传统的铲式深松相比,具有深松影响范围大、深松程度高、深松均匀等特点。

关键词:土壤;农业工程;优化;气压深松;深松效果;土壤孔隙度;犁底层

doi:10.11975/j.issn.1002-6819.2016.01.007

中图分类号:S222.1+9

文献标志码:A

文章编号:1002-6819(2016)-01-0054-08

左胜甲,孔德刚,刘立意,董 欣,赵永超.基于气压劈裂原理的气压深松效果试验[J].农业工程学报,2016,32(01):54-61. doi:10.11975/j.issn.1002-6819.2016.01.007 http://www.tcsae.org

Zuo Shengjia, Kong Degang, Liu Liyi, Dong Xin, Zhao Yongchao. Experiment on effect of air-pressure subsoiling based on air-pressure cracking theory[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2016, 32(01): 54-61. (in Chinese with English abstract) doi:10.11975/j.issn.1002-6819.2016.01.007 http://www.tcsae.org

0 引 言

深松是保护性耕作方式的重要环节,对耕地进行深松作业,能打破耕地犁底层,防止地表径流引起的水土流失^[1]。可以增加土壤中的空隙,提高雨水的渗入速度和土壤的蓄水能力,在土壤中形成“土壤水库”,可以有效提高降水利用率,增加土壤对农作物的供水量^[2-4]。目前,土壤深松作业主要以机械深松方式为主,如铲式深松机、振动深松机等,但普遍存在着深松效果差、程度不均匀、能耗大等问题^[5-7]。

本文基于气压劈裂原理与技术提出一种新的深松方式—气压深松,即对耕地土壤内部注入高压气体,使土壤在高压气体作用下产生裂隙,从而打破犁底层,实现对耕地的深松。气压劈裂技术是采用高压气体使得岩土产生裂隙并扩展的一种技术^[8-9],在爆破领域和增加土体的渗透性方面国内外已有广泛应用,美、英、法、俄、波兰、挪威等国先后进行了气压爆破试验,效果良好。夏红兵等利用气压劈裂技术对煤岩进行爆破^[10]。有研究利用气压劈裂技术增加土体的渗透性来加固软土地基^[11-13]。但利用气压劈裂技术对耕地进1行深松,国内外尚未发现相关研究。

为了研究气压深松的效果,本文建立了土壤电阻率

模型,通过电测探法,测量气压深松前后土壤各层的电阻率,根据土壤电阻率模型公式计算出气压深松前后的土壤孔隙度。同时利用自制的土面抬升测试装置,测得气压深松后土面抬升量,通过分析土壤孔隙度变化和土面抬升量,来分析评价气压深松的效果,以此为气压深松这一新的深松方式的研究和应用提供理论依据。

1 土壤电阻率试验与模型建立

1.1 试验材料与方法

1.1.1 试验用土壤

试验用土壤取自东北农业大学香坊农场,是典型的东北旱作耕地中具有丰富腐殖质的寒地黑土,所用土壤物理特性如表1所示^[14-15]。因为深松作业通常在春季或秋季进行,作业时土壤的含水率为15%~22%、犁底层容重1.4~1.8 g/cm³、耕作层容重1.17 g/cm³^[16-17],所以需将试验用土壤,调制成与实际深松作业时的土壤状态(含水率、饱和度和孔隙度)一致,使土壤电阻率模型与实际相符。

表1 试验用土壤的基本物理特性

Table 1 Soil test physical properties

各直径颗粒分布百分比 Percentage of each diameter of the particles/%				比重 Proportion GS	密度 Density ρ / (g·cm ⁻³)	干密度 Dry density ρ_d / (g·cm ⁻³)	内聚力 Cohesion C/(kN·m ⁻²)
2~0.5 mm	0.5~ 0.075 mm	0.075~ 0.01 mm	<0.01 mm				
4.1	2.66	1.39	1.17	2.66	1.39	1.17	25

1.1.2 试验装置

土壤电阻率试验装置通常采用有 Miller Soil Box 测试装置^[18-19],本试验采用改进的 Miller Soil Box 作为电阻率试

收稿日期:2015-09-14 修订日期:2015-11-19

基金项目:国家科技支撑计划课题(2014BAD06B04)

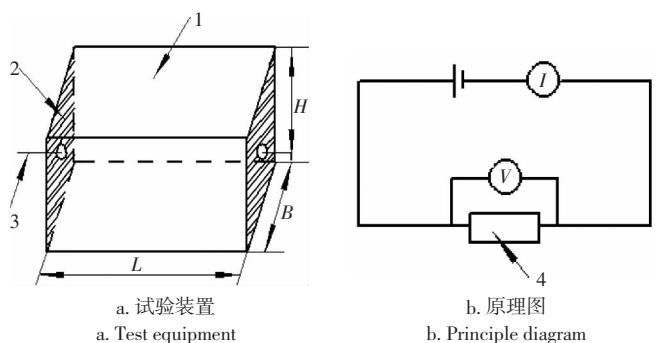
作者简介:左胜甲(1984-),男,吉林通化人,博士生,从事农业机械化工程研究。哈尔滨 东北农业大学工程学院,150030。

Email:zuoshengjia1984@163.com

※通信作者:孔德刚(1956-),男,吉林省白山市人,教授,博士生导师,主要从事农业机械化工程研究。哈尔滨 东北农业大学工程学院,150030。

Email:kong-degang@hotmail.com

验装置^[20],如图 1 所示。在盒子长度方向的 2 个相对面上嵌入铝片,2 个铝片盒子的内边尺寸为 $L \times B \times H/\text{m} \times \text{m} \times \text{m}$ 。为了减小试验误差,每组试验条件下使用 3 种不同长、宽、高的盒子。



1. 有机玻璃盒子 2. 铝片 3. 导线 4. Miller Soil Box
1. Organic glass box 2. Aluminum sheet 3. Wire 4. Miller Soil Box

图 1 电阻率试验装置及原理图

Fig.1 Electrical resistivity testing apparatus and principle diagram

1.1.3 试验方法

1) 将试验用土壤放入容器内拌制均匀,通过 Miller Soil Box 的体积和土壤含水率可算出对应的孔隙度、饱和度土壤质量^[21],再把计算好的土壤质量放入相应的 Miller Soil Box 中,用导线相连成电路如图 1 所示,土壤的电阻率为:

$$\rho_0 = \frac{U \cdot B \cdot H}{I \cdot L} \quad (1)$$

式中 ρ_0 为土壤的电阻率, $\Omega \cdot \text{m}$; U 为 Miller Soil Box 两端电压, V ; I 为流过土壤的电流, A ; L, B, H 为 Miller Soil Box 的长、宽、高, m 。

2) 选取 3 因素、3 水平进行全因素试验。试验因素水平如表 2 所示,试验测试不同因素、水平组合下的土壤电阻率,每项组合重复 3 次。

表 2 试验因素水平表

Table 2 Test factor level table

水平 Horizontal	因素 Factor		
	含水率 Moisture content/%	孔隙度 Porosity	饱和度 Saturation/%
1	14	0.2	20
2	18	0.4	50
3	22	0.6	80

1.2 建立土壤电阻率模型

利用阿尔奇建立的土壤电阻率模型^[22-23]:

$$\rho_0 = K \phi^{-m} S_r^n \quad (2)$$

式中 ρ_0 为土壤电阻率, $\Omega \cdot \text{m}$; ϕ 为土壤孔隙度; S_r 为土壤的饱和度, %; K 为与土壤特性有关的系数。

对试验所得土壤电阻率按模型(2)进行回归分析,可得土壤电阻率模型的系数和,其回归公式为:

$$\rho_0 = 0.102 \phi^{-5.006} S_r^{-3.768} \quad (3)$$

相关系数 R^2 为 0.96。

为了便于计算且能更直观的反应土壤电阻率与孔隙度之间数学关系,对模型做进一步处理。孔隙率、饱和度和含水率的关系式为^[24]:

$$S_r = W e_s \frac{(1-\phi)}{\phi} \quad (4)$$

式中 W 为土壤含水率, %; ϕ 为土壤孔隙度; e_s 为土粒密度,通常取常取 2.65 g/cm^3 。

把公式(4)代入到公式(3)可得到本试验用土壤的电阻率与土壤孔隙度的关系式为:

$$\rho_0 = 0.102 \phi^{-5.006} \left[2.65 W \frac{(1-\phi)}{\phi} \right]^{-3.768} \quad (5)$$

公式(5)即为本试验用土壤的电阻率计算模型。当土壤的含水率一定,电阻率 ρ_0 由试验测得,则土壤孔隙度 ϕ 即可由公式(5)计算得到。

2 气压深松模拟试验

2.1 试验设备

气压深松试验设备主要包括土槽、高压气生成与控制系统、土面抬升量测试装置和测量仪器,如图 2 所示。

土槽内部有效尺寸为 $1.8 \text{ m} \times 1.9 \text{ m} \times 0.5 \text{ m}$,土槽四周和底部铺设塑料膜,以防土壤含水率变化。

高压气生成与控制系统包括高压气泵、压力控制阀、高压导管、气枪、及其控制开关等。



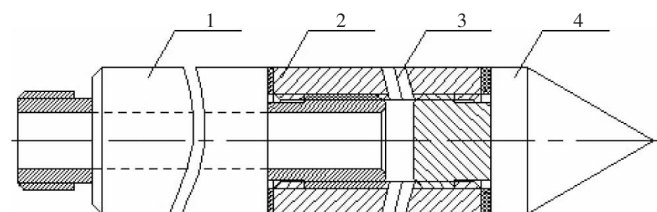
1. 高压气泵 2. 压力控制阀 3. 气枪支撑架 4. 高压导管 5. 气枪控制开关 6. 气枪 7. 土槽

1. High pressure pump 2. Pressure control valve 3. Air gun racks 4. High pressure vessel 5. Air gun control switch 6. Air gun 7. Soil bin

图 2 试验设备

Fig.2 Test equipment

气枪的结构如图 3 所示。由导气管 1、喷气管 2、气枪头 4 组成,喷气管上沿圆周均布 4 个 $\phi 5$ 喷气孔 3。

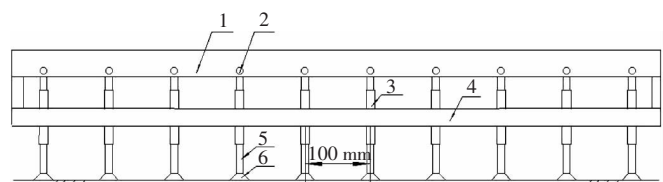


1. 导气管 2. 喷气管 3. 喷气孔 4. 气枪头
1. Airway 2. Jet tube 3. Jet hole 4. Air gun head

图 3 气枪结构简图

Fig.3 Gun structure diagram

土面抬升量测试装置结构简图如图 4 所示,主要由光点显示屏 1、红外线发射灯 2、导向管 3、支撑架 4、抬升管 5 和底座 6 组成。导向管等间隔固定在支撑架上,抬升管安装在导向管中可自由滑动,抬升管的底部装有平底底座,顶部装有红外线发射灯,红外线发射灯的光点投射在光点显示屏上,显示屏固定在支撑架上。



1.光点显示屏 2.红外线发射灯 3.导向管 4.支撑架 5.抬升管 6.底座
1.Light spot display 2. Infrared emitting light 3. Guide tube 4.Supporting frame 5. Lifting pipe 6.Base

图4 土面抬升量测试装置

Fig.4 Soil surface uplift test device

测量仪器主要有土壤电阻率测试仪、硬度计、环刀、天平、摄像机和计算机等。

2.2 试验方法

1) 试验设计 根据实际深松作业时耕地土层状态,设计气压深松试验,本试验选取犁底层容重和深松气压作为试验因素,进行3组试验,每组试验重复3次,各组试验的土壤容重和深松气压分别设定为 1.4 g/cm^3 和 1.4 MPa 、 1.6 g/cm^3 和 1.8 MPa 及 1.8 g/cm^3 和 2.2 MPa 。

2) 实际耕地土层状态设置 旱作耕地从地表向下主要分为耕作层和犁底层,耕作层厚度一般为 $0.10 \sim 0.2 \text{ m}$ 犁底层厚度一般为 $0.15 \sim 0.2 \text{ m}$ ^[25-26]。为此,试验前将部分含水率为 18% ^[27]的试验用土壤放入土槽中,搅拌均匀后铺平、用石辊碾压,使其容重达到犁底层的试验设计要求,厚度为 0.2 m 。设置完成后,上面覆盖约 0.2 m 厚的试验用土壤作为耕作层,其表面用木板压平。

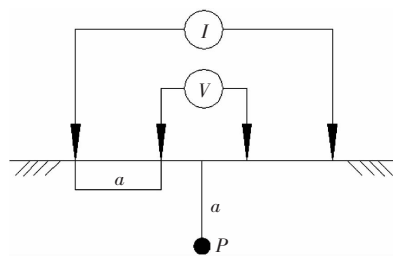
3) 气枪设置 在土面中心处插入气枪,使气枪喷气孔位于距土表面深 0.35 m 的犁底层中。

4) 试验前土壤电阻率的测试 采用温纳法^[28],利用土壤电阻率测试仪对测试点的土壤电阻率进行测试。温纳法也称等距法,其电极布置示意图如图5所示,四电极排于一条直线,等间距插于地面,该法所测得的电阻率为P点周围土壤的电阻率。测试点位置如图6所示(x 、 y 为水平距离(m), z 为深度(m), O 为土面中心)。

5) 记录显示屏上光点的初始位置 设置土面抬升量测试装置,设置时注意抬升管的底部要与土壤表面紧密接触,以保证试验中抬升管随土表平稳、灵敏抬升,光点准确映射在显示屏上,同时安装调试摄影机记录光点的初始位置。

6) 气压调节与喷气 调整高压气生成与控制系统的压力控制阀,在得到试验设计中设定的压力值时,开启气枪控制开关,喷气 2 s 后关闭。

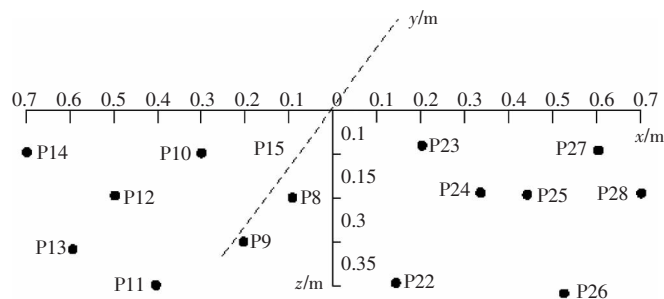
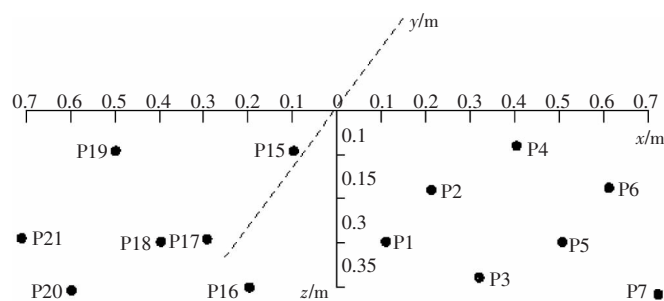
7) 试验后土壤电阻率测试 用与试验前相同的方法,测试气压深松试验后测试点的土壤电阻率。



a. 极距 p. 测试点
a. Polar distance p. Test points

图5 温纳法电极布置示意图

Fig.5 Schematic diagram of wenner electrode layout method



x 、 y . 水平距离 z . 深度 O . 土面中心 P . 测试点
 x 、 y . Horizontal distance z . Depth O . Soil surface center P . Test points

图6 测试点的位置

Fig.6 Diagram of test points

8) 土面抬升量测试 把光点抬升影像导入到计算机中,通过图像处理软件测试出光点的上升量,得到土面抬升量。

2.3 对比试验的方法

柴民杰等^[29]针对传统深松铲深松效果,分别利用箭形铲、凿形铲和三角形深松铲在深度为 0.35 m 处,对犁底层土壤容重为 1.4 g/cm^3 ,含水率为 18% 的东北旱作耕地进行了深松试验,并利用环刀法测量了深松前、后深松铲尖移动轨迹左右 0.08 、 0.16 和 0.24 m ,地表和深度分别为 $0.10 \sim 0.20 \text{ m}$ 、 $0.20 \sim 0.30 \text{ m}$ 和 $0.30 \sim 0.40 \text{ m}$ 处的土壤容重。该试验的深松深度、土壤的基本物理性质及测点位置与本文试验一致。因此可利用土壤容重与土壤孔隙度的计算公式^[14]:

$$\phi = 1 - e_b / e_s \quad (6)$$

式中 ϕ 为土壤孔隙度; e_b 为土壤容重, g/cm^3 ; e_s 为土粒密度,通常取 2.65 g/cm^3 。

计算得到传统深松铲深松前后不同水平距离各深度的土壤孔隙度。在后述结果分析中选取对比试验与本文试验条件一致的数据进行比较分析,以研究气压深松与传统深松效果的差异。

3 试验结果分析

3.1 土壤内孔隙度变化

深松效果优劣,可由土壤孔隙度进行分析与评价。将试验得到的土壤电阻率,代入公式(5)计算得到土壤孔隙度后,利用 Origin 软件绘出深松前、后的土壤孔隙度等值线图,对气压深松的效果进行分析。

图7中的 a 和 b , c 和 d , e 和 f 分别为犁底层容重为 1.4 、 1.6 和 1.8 g/cm^3 ,深松气压 1.4 、 1.8 和 2.2 MPa ,喷气点距土表面深 0.35 m 条件下,深松前、后的不同水平距离各深度的土壤孔隙度等值线图,如图7所示,各试验条件下,

深松后犁底层(测试深度 0.2~0.35 m, 以下不再注明)、耕作层(测试深度 0.1~0.2 m, 以下不再注明)中的孔隙度等值线图的颜色比深松前的明显变浅, 例如, 深松前的深蓝色(图 7 中 a,c,e 的左上部及左下部)深松后变为浅蓝色(图 7 中 b,d,f 的左上部及左下部);同一位置浅色面积均有不同程度的增大, 例如, 在水平距离 0.4 m, 深度 0.3 m

处, 深松前的浅颜色(图 7 中 a,c,e)面积深松后增大或变为深色(图 7 中 b,d,f), 且随着水平距离的增加, 变化幅度逐渐减小。这说明, 气压深松后, 高压气体在土壤内部产生了裂隙, 使犁底层和耕作层的孔隙度均有不同程度的增大即产生了良好的深松效果, 并且其效果随水平距离的增加缓慢变小。

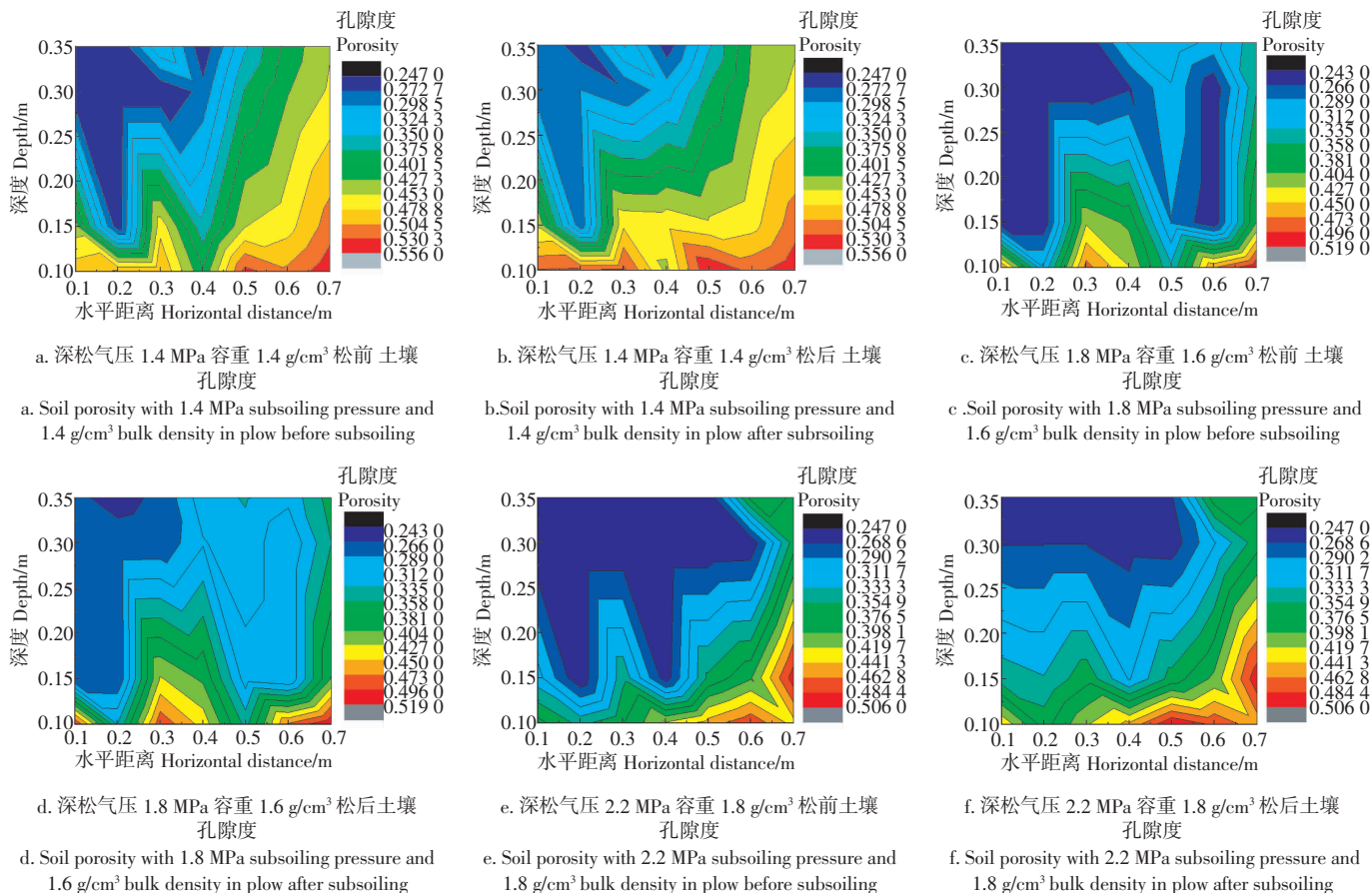


图7 不同水平距离各深度土壤孔隙度等值线图

Fig.7 Contour map of soil porosity of different horizontal distance and depth

3.2 气压深松的效果及特点

为了深入分析气压深松效果, 定义深松前、后的土壤孔隙度的差值与深松前土壤孔隙度之比为气压深松土壤孔隙度提升率。同样, 利用 Origin 软件将深松前后的不同水平距离各深度的土壤孔隙度提升率绘成等值线图如图 8 所示。

1) 图 8a 是在犁底层容重为 1.4 g/cm³, 深松气压为 1.4 MPa 时, 气压深松后的土壤孔隙度提升率的等值线图。由图 8a 可知, 犁底层的孔隙度提升率主要在 18.78%~21.47% 之间, 如图中绿色→黄绿色; 耕作层的提升率在 2.68%~32.20% 之间, 如图中蓝色→深红色, 在深度 0.125~0.2 m, 水平距离 0.375~0.45 m 的范围内的孔隙度提升率最高, 为 24.15%~32.20% (图中黄色到红色)。孔隙度提升率在水平距离 0.55 和 0.75 m 出现最小值零 (图中黑色)。这表明在此范围内, 气压深松后犁底层和耕作层的土壤均得到了深松, 其深松影响半径 (本文定义为喷气点到孔隙度提升率为零时的水平距离) 至少为 0.55 m。

2) 图 8b 是在犁底层容重为 1.6 g/cm³, 深松气压为 1.8 MPa 时, 气压深松后的土壤孔隙度提升率的等值线图。由图 8b 可知, 犁底层的孔隙度提升率在 11.67%~20%

(图中绿色→红色), 其中在水平距离 0.35~0.65 m 时, 孔隙度提升率较高, 在 13.33%~20% 之间 (图中黄绿色→红色); 耕作层的孔隙度提升率在 3.33%~13.33% 之间 (见图 8b 的浅蓝和黄绿色), 其中在水平距离 0.55~0.65 m 的孔隙度的提升率较高, 为 13.33%~16.67% (图中黄绿色和橙色)。在水平距离 0.7 m 时, 孔隙度提升率为 1.67% (图中深蓝色)。可见, 深松气压 1.8 MPa 对容重为 1.6 g/cm³ 的犁底层具有良好的深松效果, 其深松影响半径至少为 0.7 m。

3) 图 8c 是在犁底层容重为 1.8 g/cm³, 深松气压为 2.2 MPa 时, 气压深松后的土壤孔隙度提升率的等值线图。由图 8c 可知, 犁底层的孔隙度提升率主要在 5.95%~14.88% 之间 (见图中浅蓝到浅绿), 其中在水平距离 0.55~0.65 m 处的犁底层的孔隙度提升率较高, 为 14.88%~23.80% (见图中浅绿到深绿); 耕作层的孔隙度提升率主要分布在 11.90%~23.80% (见图中青色到深绿色), 其中在水平距离 0.15~0.25 m 的孔隙度的提升率较大, 为 26.78%~35.70% (见图中黄色到红色)。在水平距离 0.7 m 处的孔隙度提升

率为 2.98%(见图中深蓝色)。可见,深松气压 2.2 MPa 对容重 1.8 g/cm^3 的犁底层具有良好的深松效果,深松影响半径至少为 0.7 m。

上述分析表明:在设定的 3 种试验条件下,气压深松后,耕作层和犁底层的孔隙度提升率较高,且具有较大的影响范围,即气压深松方式具有良好的深松效果。

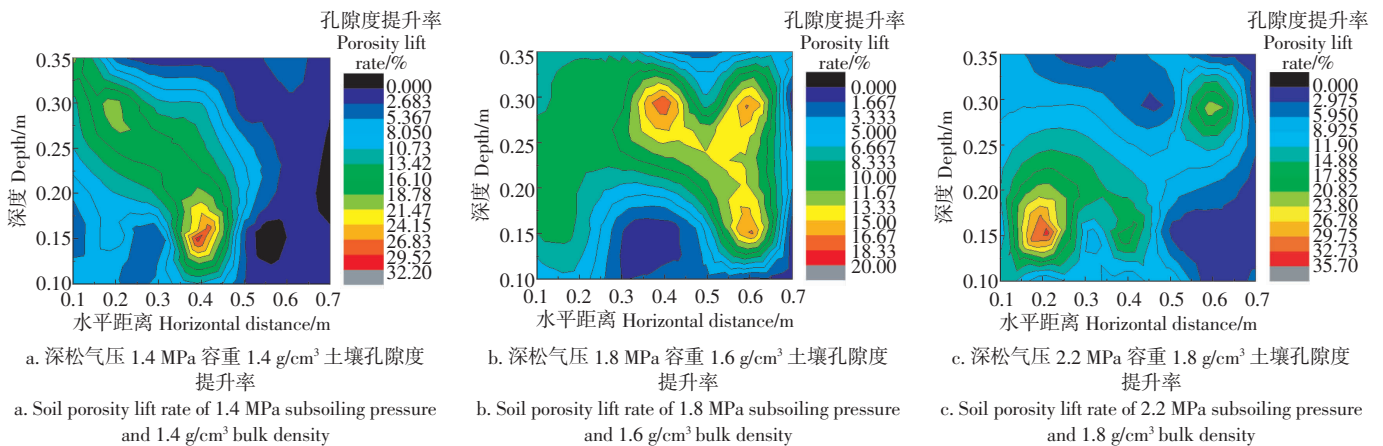


图 8 不同水平距离各深度土壤孔隙度提升率等值线图

Fig.8 Contour map of soil porosity soil lift rate of different horizontal distance and depth

3.3 土面抬升量

土壤由固、液、气 3 相组成,某一相的增加或减少都会使土壤的体积发生变化。King 等通过对岩土进行气压劈裂试验研究表明:当喷气点较浅,上覆压力较小,土体发生明显的抬升,忽略由于土体压缩引起的变形,这一抬升值可以认为是气压劈裂过程中土体产生的裂隙宽度^[30],本文的试验条件与 King 的上述研究条件相近,因此也可以用土面抬升量来分析评价气压深松效果。

在喷气点距地表面 0.35 m,不同犁底层容重和不同深松气压的试验条件下所得土面抬升量数据,利用 Origin 软件绘成不同水平距离土面抬升量的等高线图如图 9 所示。

图 9a 是犁底层容重为 1.4 g/cm^3 ,深松气压 1.4 MPa 的土面抬升量的等高线图。由图 9a 可知,土面抬升量最大值出现在土面中心,其值为 4.46 mm,随水平距离的增加抬升量逐渐减小,在水平距离 0.35 m 处时为 1.7 mm,之后随着水平距离的增加抬升量逐渐减小到零。

图 9b 是犁底层容重为 1.6 g/cm^3 ,深松气压 1.8 MPa 时得到的土面抬升量的等高线图,由图 9b 可知,土面抬升量最大值出现在土面中心,其值为 9.5 mm,随水平距离的增加抬升量逐渐减小,在水平距离 0.45 m 处为 1.44 mm,之后随着水平距离的增加抬升量逐渐减小到零。对比

图 9b 和图 9a 可知,对容重为 1.6 g/cm^3 的犁底层施加 1.8 MPa 的深松气压时产生的土面抬升量最大值和土面抬升影响半径(土面抬升量零点处到喷气点的水平距离)均大于对容重为 1.4 g/cm^3 的犁底层施加深松气压 1.4 MPa 时。

图 9c 为犁底层容重为 1.8 g/cm^3 ,深松气压 2.2 MPa 时的土面抬升量的等高线图,由图 9c 可知,土面抬升量最大值出现在土面中心,其值为 9.62 mm,随水平距离的增加抬升量逐渐减小,在水平距离 0.45 m 处为 3.2 mm,之后随着水平距离的增加抬升量逐渐减小到零。由图 9b 和图 9a 比较可知,对容重为 1.8 g/cm^3 的犁底层施加 2.2 MPa 深松气压时产生的土面抬升量最大值要大于对容重为 1.6 g/cm^3 的犁底层施加 1.8 MPa 深松气压时,其土面抬升影响半径要大于对容重为 1.4 g/cm^3 的犁底层施加 1.4 MPa 深松气压时。

上述分析表明,气压深松增加了土壤中空气的含量,使土壤体积膨胀,导致土面抬升。但随着水平距离的增加土壤中的气压逐渐减弱,土面抬升量也逐渐减小。对不同容重的犁底层施加不同的深松气压产生的土面抬升量及土面抬升影响半径不同,上述 3 种试验条件下,犁底层容重为 1.8 g/cm^3 ,深松气压 2.2 MPa 时,产生的土面抬升量

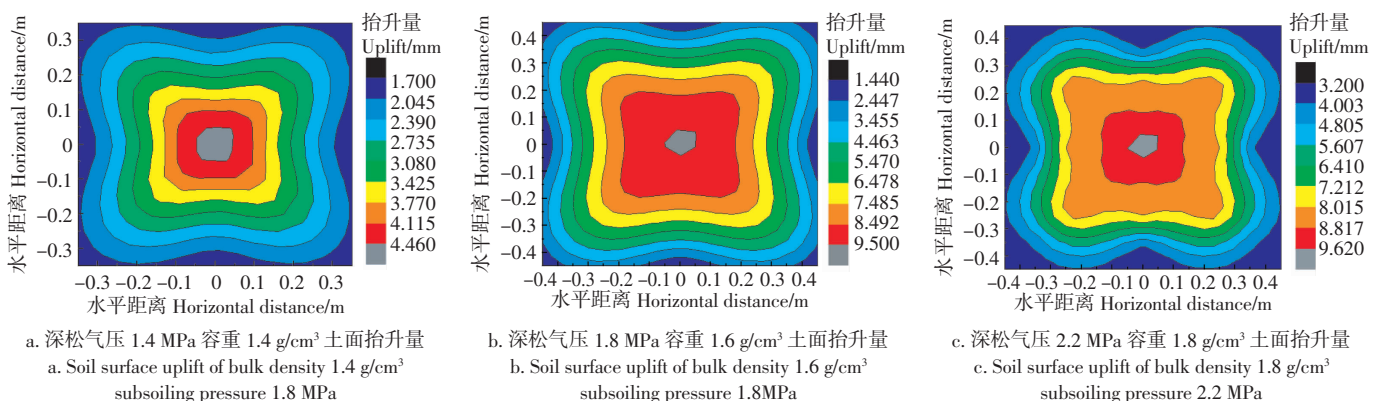


图 9 不同水平距离土面抬升量等高线图

Fig.9 Contour map of soil surface uplift of different horizontal distance

最大,土面抬升影响半径也最大。

另外,土体的应力历史、应力状态及土层成层性均会影响裂隙的扩展方向,现有的研究成果对裂隙扩展方向的认识是一致的,裂隙的扩展方向垂直于最小主应力方向,当最小主应力为水平向时,裂隙为竖向裂隙,当最小主应力为竖向时,裂隙为水平裂隙,大多数情况下,浅层土最小主应力为竖向方向,因此浅层的气压劈裂多产生水平的裂隙^[31]。

比较上述 3 组试验(犁底层容重和深松气压分别为 1.4 g/cm³ 和 1.4 MPa、1.6 g/cm³ 和 1.8 MPa、1.8 g/cm³ 和 2.2 MPa)的土面抬升量与孔隙度提升率的变化可知,二者分别从土壤表面和内部显示了气压深松后土壤的变化量,其共同点是二者均有随水平距离的增加而下降的倾向,但所显示的影响范围不同,由上述分析结果可知,土面抬升量显示的影响半径为 0.35、0.45、0.45 m,分别小于孔隙度提升率显示的影响半径 0.55、0.75、0.75 m。在水平距离大于 0.35 或 0.45 m 以后,土面抬升量显示微小接近于零,而土壤孔隙度提升率依然显示延至 0.7 m 以后,这说明,在水平距离大于 0.35 或 0.45 m 以后,土面虽然没有明显抬升但土壤内的孔隙度提升率却仍然存在,由上述文献[31]的研究成果可知,浅层的气压劈裂多产生水平的裂隙,气压深松为浅层的气压劈裂,产生的裂隙主要为水平裂隙,该裂隙使得犁底层土壤的孔隙度增加,尽管土面在水平距离大于 0.35 或 0.45 m 以后没有明显抬升,但其内部却已得到了深松。就是说气压深松能在不翻动耕作层土壤的情况下对耕地进行深松,而这正好与深松作业所追求的打破犁底层、节省能耗的目标一致。另据气压深松试验过程观察可知,高压气体使土面抬升而没有出现裂纹的现象,这也验证了文献[31]提出的浅层气压劈裂多产生水平的裂隙这一结论。

3.4 与传统深松铲深松效果比较

绘制传统深松铲深松后不同水平距离各深度的土壤孔隙度提升率等值线图如图 10 所示。从深松后犁底层的土壤孔隙度提升率、深松均匀性及深松影响半径 3 个方面比较分析气压深松与传统深松的深松效果。

1)图 10 与 3.2 所述图 8a 的试验条件接近,对其深松后犁底层土壤孔隙度提升率进行对比,由图 8a 可知,气压深松后犁底层的孔隙度提升率为 8.05%~21.47%(图中浅蓝

色到黄绿色),其中在水平距离 0.5 m 以内的孔隙度提升率大部分在 18.78%(图中绿色)左右。再由图 10 可知,箭形铲 a、凿形铲 b 和三角形铲 c 深松后犁底层孔隙度提升率在 2.68%~24.15%,并且孔隙度提升率大部分在水平距离 0.24 m 以内。其中仅铲尖附近孔隙度提升率为 21.47%~24.15%大于 18.78%,如图 10 中深度 0.2~0.3 m,水平距离 0~0.08 m 处所示的黄绿色和黄色面积。由上可知,气压深松后犁底层的深松程度除铲尖附近外普遍要高于传统深松铲的。

2)由图 8a 可以看出气压深松后犁底层孔隙度提升率,在水平距离 0.5 m 以内随水平距离的变化,数值变化较小为 18.78%~21.47%(图中绿色和黄绿色),其数值变化差值为 2.69%。而由图 10 可以看出深松铲深松后,犁底层孔隙度提升率在水平距离 0.24 m 以内,随水平距离的变化,其变化幅度较大为 0~24.15%(图中黑色到黄色),其差值为 24.15%。可见,其在较小的水平距离内孔隙度提升率的变化幅度要远大于气压深松。表明气压深松的均匀性明显优于深松铲式深松。

3)传统深松铲深松时形成的断面是以铲尖为顶点,沿 45°角向两侧上方延伸形成的扇面,其影响宽度通常为深松深度的 1.6 倍,在深松深度为 0.35 m 时,在地表的影响宽度最大,为 0.56 m^[32],将其换算为影响半径(相当于深松铲在地表的影响宽度的二分之一)为 0.28 m。如图 10 所示,箭形铲、凿形铲、三角形铲深松后,在水平距离 0.24 m 处犁底层中土壤的孔隙度提升率为零(图 10a、10b、10c 中的黑色),表明深松铲对犁底层的深松影响半径为 0.24 m。如图 8a 所示,在水平距离 0.55 m 的耕作层、水平距离 0.7 m 处犁底层中土壤的孔隙度提升率为零(8a 所示的黑色),表明气压深松对耕地表层深松影响半径为 0.55~0.7 m,对犁底层深松影响半径至少为 0.7 m。比较可知,气压深松对耕地表层深松影响半径为传统深松铲的 2~2.5 倍,对犁底层的深松影响半径是深松铲的 3 倍。

此外,由 3.2 分析可知,气压深松对容重 1.6、1.8 g/cm³ 的犁底层同样具有较好的深松效果,深松后耕作层和犁底层的孔隙度均有大幅度提升,并且影响范围较广,可以克服传统深松铲对容重较大的犁底层难以实施深松的问题。

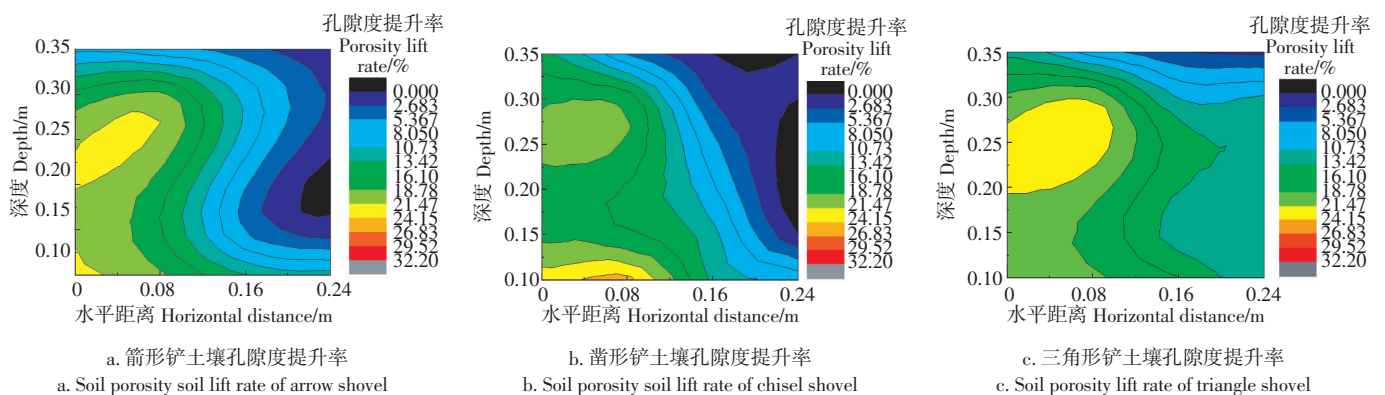


图 10 不同水平距离各深度深松铲土壤孔隙度提升率等值线图

Fig.10 Contour map of subsoiling shovel soil porosity soil lift rate the of different horizontal distance and depth

4 结论

1)建立了适合于深松作业时的东北黑土土壤电阻率与土壤孔隙度和含水率的数学模型。

2)对于容重分别为 1.4、1.6、1.8 g/cm³ 的犁底层,在深松气压分别为 1.4、1.8、2.2 MPa 的试验条件下,高压气体在土壤内部主要产生水平裂隙,水平裂隙的发展使犁底层的孔隙度明显增大,可有效的打破犁底层,深松后土壤中空气的含量增加,使土壤体积膨胀、土面抬升,可在不扰动或少扰动耕作层的情况下得到良好的深松效果。

3)气压深松与传统深松铲相比有深松影响范围广、深松均匀、深松程度高等特点,对耕地表层的深松影响半径是传统深松的 2~2.5 倍,对犁底层深松影响半径至少为传统深松的 3 倍。

[参 考 文 献]

- [1] 张瑞富,杨恒山,高聚林,等. 深松对春玉米根系形态特征和生理特性的影响[J]. 农业工程学报, 2015, 31(5): 78–84.
Zhang Ruifu, Yang Hengshan, Gao Julin, et al. Effect of subsoiling on root morphological and physiological characteristics of spring maize[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(5): 78–84. (in Chinese with English abstract)
- [2] 朱瑞祥,张军昌,薛少平,等. 保护性耕作条件下的深松技术试验[J]. 农业工程学报, 2009, 25(6): 145–147.
Zhu Ruixiang, Zhang Junchang, Xue Shaoping, et al. Experimentation about subsoiling technique for conservation tillage[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2009, 25(6): 145–147. (in Chinese with English abstract)
- [3] 李洪文,陈君达,李问盈. 保护性耕作条件下深松技术研究[J]. 农业机械学报, 2000, 31(6): 42–45.
Li Hongwen, Chen Junda, Li Wenying. Study on subsoiling technique for conservation tillage field[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2000, 31(6): 42–45. (in Chinese with English abstract)
- [4] 朱凤武,王景利,潘世强. 土壤深松技术研究进展[J]. 吉林农业大学学报, 2003, (4): 57–461.
Zhu Fengwu, Wang Jingli, Pan Shiqiang. Advances in researches of soil subsoiling technique[J]. Journal of Jilin Agricultural University, 2003, (4): 57–461. (in Chinese with English abstract)
- [5] 闫宝生. 机械化保护性耕作深松机具的研究现状与展望[J]. 科技情报开发与经济, 2004, (4): 115–116.
Yan Baosheng. Researching situation and prospect of deep digging tools for mechanized protective tillage[J]. Sci/tech Information Development & Economy, 2004, (4): 115–116. (in Chinese with English abstract)
- [6] 李霞,付俊峰,张东兴,等. 基于振动减阻原理的深松机牵引阻力的试验[J]. 农业工程学报, 2012, 28(1): 32–36.
Li Xia, Fu Junfeng, Zhang Dongxing, et al. Experiment analysis on traction resistance of vibration subsoiler[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(1): 32–36. (in Chinese with English abstract)
- [7] 武广伟,宋建农,李永磊,等. 草地振动式间隔松土机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2010, 41(2): 42–46.
Wu Guangwei, Song Jiannong, Li Yonglei, et al. Design and experiment on vibration spacing scarifier for meadow [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(2): 42–46. (in Chinese with English abstract)
- [8] 韩文君,刘松玉,章定文. 荷载作用下土体气压劈裂效果试验研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(7): 1951–1956.
Han Wenjun, Liu Songyu, Zhang Dingwen. Experimental study of pneumatic fracturing effect in soil under overburden load[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(7): 1951–1956. (in Chinese with English abstract)
- [9] Shen S L, Miura N, Koga H. Interaction mechanism between deep mixing column and surrounding clay during installation[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2003, 40(2): 293–307.
- [10] 夏红兵,刘松玉. 爆炸荷载作用下裂隙岩体内损伤范围的观测研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(4): 795–799.
Xia Hongbing, Xu Ying, et al. Observation study of fissure rock damage range under blasting load[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(4): 795–799. (in Chinese with English abstract)
- [11] 韩文君,刘松玉,章定文. 土体气压劈裂裂隙扩展特性及影响因素分析[J]. 土木工程学报, 2011, 44(9): 87–97.
Han Wenjun, Liu Songyu, Zhang Dingwen. Characteristics and influencing factors analysis of propagation of pneumatic fracturing in soils[J]. China Civil Engineering Journal, 2011, 44(9): 87–97. (in Chinese with English abstract)
- [12] Larsson S, Dahlstrom M, Nilsson B. Uniformity of lime-cement columns for deep mixing: a field study[J]. Ground Improvement, 2005, 9(1): 1–15.
- [13] Venkatraman S N, Schuring J R, Boland T M, et al. Application of pneumatic fracturing to enhance in situ bioremediation[J]. Journal of Soil Contamination, 1998, 7(2): 143–162.
- [14] 中国科学院南京土壤研究所土壤物理研究室. 土壤物理性质测定法[M]. 北京: 科学出版社, 1978: 10–11.
- [15] 孙一源等. 农业土壤力学[M]. 北京: 农业出版社, 1985: 8–15.
- [16] 齐华,刘明,张卫建. 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, 27(4): 191–196.
Qi Hua, Liu Ming, Zhang Weijian. Effect of deep loosening mode on soil physical characteristics and maize root distribution [J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2012, 27 (4): 191–196. (in Chinese with English abstract)
- [17] 张俊丽, Sikander K T, 温晓霞,等. 不同耕作方式下旱作玉米田土壤呼吸及其影响因素 [J]. 农业工程学报, 2012, 28(18): 192–199.
Zhang Junli, Sikander K T, Wen Xiaoxia, et al. Soil respiration and its affecting factors in dry-land maize field under different tillage systems[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(18): 192–199. (in Chinese with English abstract)
- [18] 刘盛东,吴荣新. 高密度电阻率法观测煤层上覆岩层破坏[J]. 煤炭科学技术, 2001, 29(4): 18–21.
Liu Shengdong, Wu Rongxin. High density electric resistance method applied to monitor and measure overburden failure above seam[J]. Coal Science and Technology, 2001, 29(4): 18–21. (in Chinese with English abstract)
- [19] Alain T, Michel D, Albert H, et al. Soil resistivity: a noninvasive tool to map soil structure horizonation[J]. Geoderma, 2000: 393–404.
- [20] 李瑛,龚晓南,郭彪,等. 电渗软黏土电导率特性及其导电机制研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 29 (2): 18–21. 4027–4033.
Li Ying, Gong Xiaonan, Guo Biao, et al. Research on conductivity characteristics of soft clay during electro-osmosis and its conductive mechanism[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 29(2): 18–21. 4027–4033. (in Chinese with English abstract)
- [21] 贾红晶,李顺群,尚军. 土的电导率与饱和度的关系研究[J]. 天津城建大学学报, 2014, 20(4): 87–90.
Jia Hongjing, Li Shunqun, Shang Jun. Study of relationship between electrical resistivity and saturation degree of soils[J]. Journal of Tianjin Chengjian University, 2014, 20(4): 87–90. (in Chinese with English abstract)
- [22] 刘国华,王振宇,黄建平. 土的电导率特性及其工程应用研究[J]. 岩土工程学报, 2011, 44(9): 87–97.

- Liu Guohua, Wang Zhengyu, Huang Jianping. Research on electrical resistivity feature of soil and its application [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 44(9): 87–97. (in Chinese with English abstract)
- [23] Kalinski R J, Kelly W E, Bogardi I, et al. Electrical resistivity measurements to estimate travel times through unsaturated ground water protective layers [J]. Journal of Applied Geophysics, 1993, 30: 161–173.
- [24] 姚贤良, 呈云生, 等. 土壤物理学 [M]. 北京: 农业出版社, 1983: 206–207.
- [25] 中国科学院南京土壤研究所. 土壤理化分析 [M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1983: 62–126.
- [26] 吕东山. 机械化深松技术的实施要点 [J]. 农业科技与装备, 2012, 220(10): 18–21, 75–79.
- Lv Dongshan. The key points for the implementation of mechanized deep loosening Technology [J]. Agricultural Science & Technology and Equipment, 2012, 220(10): 18–21, 75–79. (in Chinese with English abstract)
- [27] 毛红玲, 李军, 贾志宽, 等. 旱作麦田保护性耕作蓄水保墒和增产增收效应 [J]. 农业工程学报, 2010, 26(8): 44–51.
- Mao Hongling, Li Jun, Jia Zhikuan, et al. Soil water conservation effect, yield and income increments of conservation tillage measures on dryland wheat field [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2010, 26(8): 44–51. (in Chinese with English abstract)
- [28] 李良福. 土壤电学 [M]. 北京: 气象出版社, 2008: 100–103.
- [29] 柴民杰. 秸秆覆盖地深松机研究 [D]. 北京: 中国农业大学, 2006.
- Chai Mingjie. Study on Subsoiler for Stubble Cover Field [D]. Beijing: China Agricultural University, 2006. (in Chinese with English abstract)
- [30] King T C. Mechanism of Pneumatic Fracturing [D]. New Jersey: New Jersey Institute of Technology, 1993.
- [31] Suthers S S. Remediation engineering: design concept [M]. Boca Raton: CRC Press LLC, 1999. 238–239.
- [32] 王瑞丽. 保护性耕作条件下行间深松机的研究 [D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2006.
- Wang Ruili. Study on Within Row Subsoiler in Conservation Tillage [D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2006. (in Chinese with English abstract)

Experiment on effect of air-pressure subsoiling based on air-pressure cracking theory

Zuo Shengjia, Kong Degang*, Liu Liyi, Dong Xin, Zhao Yongchao

(College of Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

Abstract: Developing a new subsoling method is one of the important ways to improve the subsoiling efficiency and overcome the traditional subsoling weakness, i.e. limited range and inhomogeneity. The present paper proposed a novel subsoiling method based on pneumatic split technology, namely, air pressure subsoiling. During the air pressure subsoiling, air was injected into cultivated soil to result in plenty of cracks inside the soil. In order to investigate the effect of air pressure subsoiling, a simulation experiment was carried out to observe the inner and external changes of soil before and after air pressure subsoiling with 3 indices including soil porosity, soil porosity increasing rate and soil surface uplift. Experiment was carried out from December 10, 2014 to February 10, 2015 in the Agricultural Machinery Laboratory of the Engineering Research Center of Northeast Agricultural University. Test and research methods were as follows: 1) Firstly, the Miller Soil Box test equipment was used to test soil resistivity of different moisture content, porosity and saturation of black cultivated soil in the Northeast of China. The various parameters of Archie soil resistivity model were formed based on the regression analysis of our test result. Then a regression formula was acquired to calculate soil porosity by soil resistivity and soil moisture content acquired. 2) According to the actual cultivated land status of subsoiling in the Northeast of China, the plough layer and plow pan were made. The procedure was that 0.2 m plow pan was set on the groove bottom at first, and then 0.2 m plough layer was covered, which had 1.17 g/cm³ bulk density and 18% moisture. Two factors and 3 levels (plow pan bulk density of 1.4, 1.6 and 1.8 g/cm³, and subsoiling air pressure of 1.4, 1.6 and 2.2 MPa) were set in the experiment. Our experiment used the self-made air pressure subsoiling equipment to inject air into the plow pan with different bulk density (0.35 m deep), before and after air pressure subsoiling, used the regression formula to calculate the soil porosity and its increasing rate before and after air pressure subsoiling, and at the same time measured the vertical rise of soil surface when measuring the soil resistivity. 3) Draw contour map of soil resistivity, soil resistivity increasing rate and vertical rise by the Origin software in order to analyze the distributions and changes of soil resistivity, soil resistivity increasing rate and vertical rise before and after subsoiling. Further more, we compared air pressure subsoiling with 3 traditional subsoilers (triangle shovel, arrow shovel and chisel shovel) on the effect of subsoiling by analyzing the scope of subsoiling, uneven extent and soil porosity increasing rate. Main results obtained were as follows: 1) The regression formula of subsoiling soil porosity, soil resistivity and moisture content was obtained, which was suitable for the black soil in the Northeast of China. 2) For the plow pan with bulk density of 1.4, 1.6 and 1.8 g/cm³, when subsoiling air pressure was 1.4, 1.6 and 2.2 MPa, air pressure mainly formed horizontal cracks which resulted in an obvious increase of soil porosity. These cracks could effectively break the plow pan, increase the air content in the soil after subsoiling, make the soil volume expand and the surface uplift. Excellent subsoiling could be obtained with fewer changes or effects for plough layer. 3) Compared with traditional subsoiling, air pressure subsoiling had the merits of larger scope, more uniformity and higher efficiency. For the effectively influenced radius on land surface, air pressure subsoiling was about 2~2.5 times of traditional subsoiling, and it was at least 3 times of traditional subsoiling on plow pan. The results and the data obtained in this paper can provide a reference for the further study and the design of air pressure subsoiling equipment.

Keywords: soils; agricultural engineering; optimization; air pressure subsoiling; subsoiling effect; soil porosity; plow