

气压深松参数对耕地渗透性影响规律试验研究

左胜甲¹, 杜明昊¹, 孔德刚^{2*}, 丁旭旭¹

(1.通化师范学院 物理学院, 吉林 通化 134001; 2.东北农业大学 工程学院, 哈尔滨 150030)

摘要:【目的】探寻气压深松参数对耕地渗透性及灌溉蓄水能力的影响。【方法】建立了室内模拟耕层结构, 通过对气压深松机理的分析, 选取喷气压力、犁底密度、深松位置、喷气方向为试验因素(采用四因素三水平两两交互作用正交试验), 以深松后犁底孔隙变化度为评价指标, 进行了气压深松模拟试验。【结果】深松位置对犁底孔隙变化度即对渗透性的影响最大, 犁底密度影响最小; 各因素的交互作用对评价指标影响明显, 二因素的交互作用下, 评价指标最大的因素数值组合为: 喷气方向为 75° 与喷气压力 2.2 MPa 及其与犁底密度 1.8 g/cm³、深松位置 0.35 m 时两两组合; 深松位置 0.25 m 与喷气压力 2.2 MPa 和犁底密度 1.8 g/cm³ 的两两组合; 喷气压力 1.4 MPa 和犁底密度 1.8 g/cm³ 的组合。【结论】气压深松可以增加耕地渗透性, 增强灌溉蓄水性; 试验条件下 75° 的喷气方向为较适宜的喷气方向; 距土面 0.35 m 处为较适宜的深松深度; 气压深松可提升高密度犁底层渗透性, 为解决高密度犁底层不易被打破而导致水土保持效果不好的问题提供了新的思路。

关键词: 气压深松; 深松参数; 渗透性; 影响规律; 灌溉蓄水

中图分类号: S22.1+9

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2022667

OSID:



左胜甲, 杜明昊, 孔德刚, 等. 气压深松参数对耕地渗透性影响规律试验研究[J]. 灌溉排水学报, 2023, 42(10): 98-104.

ZUO Shengjia, DU Minghao, KONG Degang, et al. Impact of Air Pressure in Subsoiling on Soil Permeability[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2023, 42(10): 98-104.

0 引言

【研究意义】由于耕地犁底层的存在, 使空气和水分难进入到作物的根部, 影响根系的生长发育, 深松作业可以打破耕地犁底层, 是保护性耕作的重要方式, 且易于在土体内形成水库, 减少土表水土流失^[1], 另外实施深松作业可调节土壤三相, 增加土壤的孔隙度, 有利于创造更好的作物生长环境, 增强耕地灌溉蓄水性、增产效果明显^[2-3]。气压深松是不同于机械式深松的一种新型方式^[4]。其原理是通过对耕地犁底层内部注入高压气体, 利用气压劈裂原理使其打破, 实现对耕地的深松。【研究进展】气压深松概念最早由东北农业大学左胜甲等于 2014 年提出^[5], 并进行了可行性及深松特性试验, 证明气压深松的最大作用半径为传统机械式深松的 2 倍, 并且作用范围内的土体被疏松的程度差异性较小^[6-7], 说明其均匀性较好。另外, 试验证明气压深松相对于传统深松更容易加深深松的深度。【切入点】关于气爆松土裂隙迹线方程, 奚小波等^[8]进行了试验研究。刘明财等^[9]利用高压气

体对传统深松进行减阻, 对其减阻机理进行了分析, 并设计了气劈式深松铲。但国内外针对于耕地气压深松机理的研究, 以及气压深松关键技术参数对耕地渗透性的影响研究则相对较少。【拟解决的关键问题】本文通过对气压深松机理的分析, 选取影响深松裂隙扩展的主要参数。利用气压深松室内模拟装置进行了试验, 以所选取的深松参数作为试验因素, 并以犁底层内深松前后的犁底孔隙度增加率作为分析指标, 研究气压深松参数对耕地渗透性的影响规律。

1 材料与方法

1.1 试验材料

采用东北典型黑土作为试验土壤, 土壤以有机质含量高、土壤肥沃、土质疏松、最适宜耕作而闻名于世。试验土壤的基本物理特性如表 1 所示。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%、犁底层密度为(体积质量)1.4~1.8 g/cm³、耕作层密度(体积质量)为 1.17 g/cm³, 所以需将试验土壤调制成与实际深松作业时的土壤状态一致。

气压深松试验装置主要由高压气体生成部分、气压调节部分、气体注入部分及支撑架 3 和土槽 7 组成, 高压气体由高压气泵 1 生成、由调压阀 2 进行气体调压、气体通过导气管 4、气枪开关 5、气枪 6 注入到土体中, 从而模拟气压深松作业。其测试原理如图 1 所示。

收稿日期: 2022-11-25 修回日期: 2023-06-20 网络出版日期: 2023-09-14

基金项目: 吉林省教育厅“十三五”科学技术研究项目(20191096KJ); 通化师范学院学生创新与技能训练项目(CS2023134)

作者简介: 左胜甲(1984-), 男, 吉林通化人。副教授, 博士, 主要从事农业机械化工程研究。E-mail: zuoshengjia@163.com

通信作者: 孔德刚(1956-), 男, 吉林白山人。教授, 博士生导师, 主要从事农业机械化工程研究。E-mail: 509152836@qq.com

©《灌溉排水学报》编辑部, 开放获取 CC BY-NC-ND 协议

表 1 试验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/%				体积质量/(g cm ⁻³)	干体积质量/(g cm ⁻³)
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	1.39	1.17

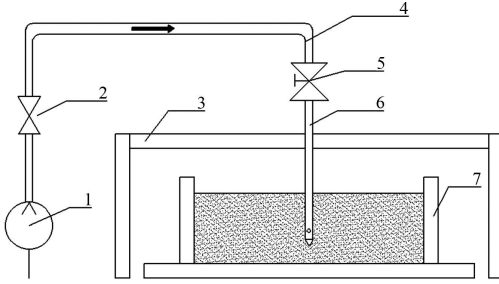


图 1 试验设备

Fig.1 Test equipment

1.2 试验方法

1) 试验因素选取

本试验通过对气压深松机理分析,选取气压深松作业关键技术参数作为试验因素。当高压气体注入到犁底层后,由于气压的存在,高压气体会在犁底层内快速形成裂隙并扩散。由于高压气体的扩散导致其压力衰减,从而影响裂隙扩展发育。因此,气压深松裂隙的扩展模型应考虑通过气体压力分布模式、气体泄漏特征、裂隙发育扩展 3 个方面进行构建及表述。

①模型假设

气压深松时土体内裂隙的产生及扩展是气体和土体耦合作用过程^[10-11],为了便于对气压深松裂隙扩展模型的研究,做如下假设:

Murdoch 等^[12]统计的现场气压劈裂裂隙形态和 Alfaro 等^[13]的室内模型试验均表明,土体内劈裂裂隙在起劈点一定范围内均为水平状,且近似为圆形。因此可以假设气压深松裂隙在喷气起劈点一定范围内,一直保持椭圆形状态,其裂隙扩展模型如图 2 所示。

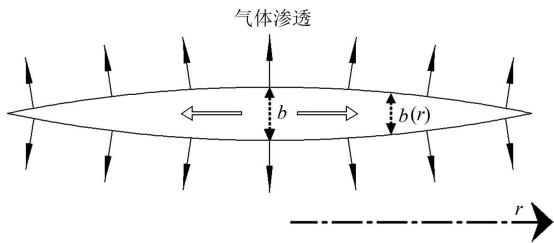


图 2 气压深松裂隙扩展模型

Fig.2 Model of propagation fracture of air-pressure subsoiling

②气体压力分布方程

气压深松时气压分布模型构建应考虑高压气体扩展过程中土体与高压气体间的摩擦力,导致其衰减,通过 Nautiyal^[14]提出的考虑裂流体与隙壁摩擦影响,基于 2 个无限平板模型的压力分布模式解析式,建立距喷气点不同距离下气压深松土体内压力分布方程,

如式 (1) 所示:

$$\frac{dp}{dx} = \frac{\mu_{\text{gas}}}{g\rho_{\text{max}}} \frac{d}{dy} \left(\frac{du}{dy} \right), \quad (1)$$

式中: p 为高压气体压力 (MPa); μ_{gas} 为高压气体黏滞系数; g 为重力加速度 (N/kg); ρ_{max} 为气体的密度 (kg/m³); u 为高压气体径向流速 (m/s)。

考虑到气体的可压缩性,求解式 (1) 得到:

$$P_{n+1} = \left[P_n^2 - 12P_n Q \mu_{\text{gas}} \ln(r_{n+1}/r_n) / (\pi g \rho_{\text{gas}} b^3) \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (2)$$

式中: P_{n+1} 为注气点 r_{n+1} 处的高压气体压力 (MPa); P_n 为注气点 r_n 处的高压气体压力 (MPa); Q 为注气点 r_{n+1} 与 r_n 之间的流量 (m³/s); b 为深松裂隙宽度 (mm)。

③高压气体泄漏方程

气压深松裂隙的扩展是一个复杂的过程,为了研究问题的方便,依据土力学理论中关于流体与土体渗流作用的一维固结理论分析中的假设前提^[15],假设土体是弹性体、均质、各向同性的,气体在土体中的渗透速率相等。在气体扩散产生裂隙,由于增大了土体内的孔隙度导致气体泄漏,可以将漏气裂隙通道划分为以喷气点为中心的若干个同心圆环,计算出单个同心圆环渗漏量。便可累计得到总的渗漏量,其计算式为:

$$Q_{\text{leak}} = \sum_{r_0=r_w}^{r_n=R} K_{\text{gax}} \left(\frac{P}{h} \right)_n \pi (r_n^2 - r_{n-1}^2), \quad (3)$$

式中: Q_{leak} 为气体泄漏的总量 (m³); K_{leak} 为气体在土体中的渗透系数; r_n 为第 n 个圆环距深松注气点的距离 (m); r_{n-1} 为第 $n-1$ 个圆环距深松注气点的距离 (m); P 为每个圆环的平均气体压力 (MPa); h 为渗透的距离 (m)。

④土体位移方程

关于高压流体对土体劈裂机理,主要有剪切机理和抬升张拉机理。韩文君等^[16]认为气压劈裂过程中土体位移模型是指土体对裂隙扩展的响应,裂隙宽度是裂隙内压力引起的土体变形。对于浅层土体的气压劈裂其根据 Murdoch 等^[12]的统计结果,假定上覆土体的竖向位移等于裂隙宽度,获取浅层土裂隙宽度公式:

$$b = \frac{3pR^4}{8Z^3E} \left[1 - \left(\frac{r}{R} \right)^2 \right]^2, \quad (4)$$

式中: b 为 r 处的裂隙宽度 (mm); Z 为上腹土层厚度 (m); E 为土体的压缩模量 (MPa); p 为喷气

压力 (MPa); R 为裂隙半径 (mm)。

通过对气压深松裂隙扩展模型分析可知, 气压、土体的压缩模量、上腹土层厚度为影响气压深松裂隙扩展的关键参数, 犁底层土体的压缩模量与犁底密度高度相关。同时, 深松位置与上腹土层厚度高度相关, 另外考虑到裂隙的扩展受喷气方向的影响。因此试验设计中将“喷气方向、喷气压力、犁底密度和深松位置”作为试验因素分析在其交互作用对耕地渗透性影响规律。

2) 试验评价指标

犁底层的孔隙度是耕地渗透性的重要表征。为了深入分析气压深松对提升耕地渗透性的效果和影响规律, 本试验将犁底孔隙变化度 (深松前、后的犁底层内土壤孔隙度的差值与深松前土壤孔隙度之比) 作为评价指标。

本研究利用阿尔奇建立的土壤电阻率模型, 经由试验用土的电阻率与土壤孔隙度关系式标定试验^[17], 获取试验土壤在含水率为18% (通常深松作业时土壤含水率) 时土壤电阻率与土壤孔隙度的关系式如式 (5) 所示:

$$\rho_0 = 0.102\phi^{-5.006} [0.477 \frac{(1-\phi)}{\phi}]^{-3.768}, \quad (5)$$

式中: ρ_0 为土壤电阻率 ($\Omega \text{ m}$); ϕ 为土壤孔隙度。

利用温纳法^[18-19]测得“犁底层”试验前后的土壤电阻率, 代入式(5), 通过数学求解软件 1stopt v1.5, 进行编程求解, 可以得出试验前后“犁底层”土壤孔隙度值, 进而得到犁底孔隙变化度。

1.3 试验设计

旱作耕地结构从下至上大体为 0.2~0.25 m 的犁底层及厚度约为 0.2 m 的耕作层 (松土)^[20-21], 为了模拟实际深松作业时的土层状态, 本试验构建了旱作

耕地模型, 预先铺设了约 0.25 m 的“犁底层”, 使其密度达到试验所需密度。然后在犁底层上面铺设约 0.2 m 厚的试验土壤作为“耕作层” (密度约为 1.17 g/cm^3), 土壤含水率调至 18%。

本试验的因素水平如表 2 所示。试验的 4 个因素为: 喷气方向 A 如图 3 所示, 通过气枪喷气孔的角度不同获得不同的喷气方向、喷气压力 B、犁底密度 C 和深松位置 D (距地面深度), 犁底孔隙变化度用 y 表示。本试验采用四因素三水平两两交互作用正交试验。

表 2 试验因素水平

Table 2 Test factor level

水平	因素			
	喷气方向 A/(°)	喷气压力 B/MPa	犁底密度 C/(g cm^{-3})	深松位置 D/m
1	60	1.4	1.4	0.25
2	75	1.8	1.6	0.35
3	90	2.2	1.8	0.45

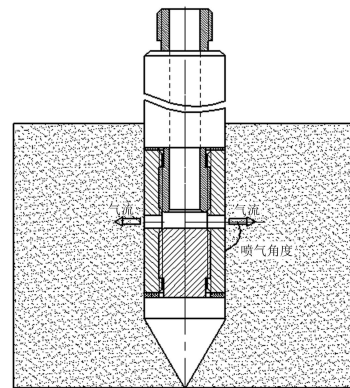


图 3 气枪注气示意图

Fig.3 Schematic diagram of gas rush injection

采用 $L_{27}(3^3)$ 正交试验表, 其表头设计如表 3 所示。试验方案及结果如表 4 所示。

表 3 试验表头设计

Table 3 Test header design

列号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
因素	A	B	(C×D)	A×B	C	(B×D) ₁	A×C	(B×C) ₁	D	A×D	(B×C) ₂	(B×D) ₂	(C×D) ₂

2 结果与分析

表 4 为试验方案及结果, 由表 4 可知, 气压深松前后犁底层孔隙变化度均为正值。证明犁底被疏松孔隙变大, 达到了增加渗透性的效果, 分析比较各个列的极差值可直观得出, 各因素对犁底孔隙变化度影响最大的为: 深松位置 D (第九列), 其次是喷气方向 A (第一列), 然后是喷气压力 B (第二列), 犁底密度 C (第 5 列) 的极差值相对较小, 对指标的影响程度相对较低。

本试验分别从喷气方向与喷气压力的交互作用、

喷气方向与犁底密度的交互作用、喷气方向与深松位置的交互作用, 犁底密度与深松位置交互作用、喷气压力与犁底密度的交互作用、喷气压力与深松位置的交互作用, 6 个方面对犁底孔隙变化度的影响进行分析。4 (a)、图 4 (b)、图 4 (c) 分别为深松位置与犁底密度为 (0.35 m、 1.6 g/cm^3) 中间水平、喷气压力与深松位置为 (1.8 MPa、0.35 m) 中间水平、喷气压力与犁底密度为中间水平 (1.8 MPa、0.35 m) 时, 喷气方向分别与喷气压力、犁底密度和深松位置两因素交互作用对评价指标犁底孔隙变化度影响的曲面图。

由图 4 (a)、图 4 (b)、图 4 (c) 可知, 在交

互作用下,犁底孔隙变化度随着喷气方向角度(与水平方向的夹角)的增加呈先增大后减小的趋势;在任一喷气方向,随着喷气压力的增加,犁底孔隙变化度逐渐增大,当喷气方向为 75° 、喷气压力为 2.2 MPa 时,犁底孔隙变化度最大。在任一喷气方向,犁底孔

隙变化度随着犁底密度的增加而增大,当喷气方向为 75° 、犁底密度为 1.8 g/cm^3 时,犁底孔隙变化度较大;在任一喷气方向,犁底孔隙变化度随着深松位置的加深,呈小幅波动减小的趋势,喷气方向为 75° 时,深松位置在 0.35 m 时,犁底孔隙变化度较大。

表4 试验方案及结果

Table 4 The test program and results

试验号	列号													犁底孔隙变化度 $y/\%$
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	
1	A ₁	B ₁	1	1	C ₁	1	1	1	D ₁	1	1	1	1	2.19
2	A ₁	B ₁	1	1	C ₂	2	2	2	D ₂	2	2	2	2	2.05
3	A ₁	B ₁	1	1	C ₃	3	3	3	D ₃	3	3	3	3	1.24
4	A ₁	B ₂	2	2	C ₁	1	1	2	D ₂	2	3	3	3	1.41
5	A ₁	B ₂	2	2	C ₂	2	2	3	D ₃	3	1	1	1	1.00
6	A ₁	B ₂	2	2	C ₃	3	3	1	D ₁	1	2	2	2	4.07
7	A ₁	B ₃	3	3	C ₁	1	1	3	D ₃	3	2	2	2	1.06
8	A ₁	B ₃	3	3	C ₂	2	2	1	D ₁	1	3	3	3	4.59
9	A ₂	B ₃	3	3	C ₃	3	3	2	D ₂	2	1	1	1	1.68
10	A ₂	B ₁	1	3	C ₁	2	3	1	D ₂	3	1	2	3	3.86
11	A ₂	B ₁	2	3	C ₂	3	1	2	D ₂	1	2	3	1	1.00
12	A ₂	B ₁	3	3	C ₃	1	2	3	D ₃	2	3	1	2	4.90
13	A ₂	B ₂	1	1	C ₁	2	3	2	D ₁	1	3	1	2	1.03
14	A ₂	B ₂	2	1	C ₂	3	1	3	D ₃	2	1	2	3	7.36
15	A ₂	B ₂	3	1	C ₃	1	2	1	D ₁	3	2	3	1	4.41
16	A ₂	B ₃	1	2	C ₁	2	3	3	D ₂	2	2	3	1	8.87
17	A ₂	B ₃	2	2	C ₂	3	1	1	D ₁	3	3	1	2	3.33
18	A ₂	B ₃	3	2	C ₃	1	2	2	D ₂	1	1	2	3	4.16
19	A ₃	B ₁	3	2	C ₁	3	2	1	D ₃	2	1	3	2	1.01
20	A ₃	B ₁	3	2	C ₂	1	3	2	D ₁	3	2	1	3	3.91
21	A ₃	B ₁	3	2	C ₃	2	1	3	D ₂	1	3	2	1	1.19
22	A ₃	B ₂	1	3	C ₁	3	2	2	D ₁	3	3	2	1	4.12
23	A ₃	B ₂	1	3	C ₂	1	3	3	D ₂	1	1	3	2	2.11
24	A ₃	B ₂	1	3	C ₃	2	1	1	D ₃	2	2	1	3	1.66
25	A ₃	B ₃	2	1	C ₁	3	2	3	D ₂	1	2	1	3	4.05
26	A ₃	B ₃	2	1	C ₂	1	3	1	D ₃	2	3	2	1	1.66
27	A ₃	B ₃	2	1	C ₃	2	1	2	D ₁	3	1	3	2	4.05
k_1	2.14	2.37	3.31	3.61	3.07	2.94	3.01	3.04	5.33	2.71	3.48	2.64	2.97	-
k_2	4.337	3.02	3.39	3.22	3.06	3.58	3.37	3.03	2.68	3.47	3.45	3.35	3.05	-
k_3	3.14	4.22	2.92	2.78	3.48	3.09	3.23	3.53	1.60	3.43	2.67	3.62	3.58	-
R	2.18	1.85	0.47	0.84	0.41	0.64	0.35	0.49	3.72	0.76	0.80	0.98	0.62	-

注 R_j 为第 j 因素的极差值; k_{ji} 为试验指标之和的算数平均值。

图4(d)、图4(e)分别为喷气方向与深松位置为中间水平(75° 、 0.35 m),喷气方向与犁底密度为中间水平(75° 、 1.6 g/cm^3),喷气压力与深松位置为(1.8 MPa 、 1.6 g/cm^3)时,喷气压力与犁底密度和深松位置两因素交互作用对评价指标犁底孔隙变化度的曲面图。

由图4(d)可知,犁底密度低时,随着喷气压力的增加犁底孔隙变化度增大,犁底密度高时,犁底

孔隙变化度变化幅度相对较小;另外,任一喷气压力作用下,随着犁底密度的增加,犁底孔隙变化度增加率也随之增大。试验条件下,当喷气压力为 1.4 MPa 时,犁底密度为 1.8 g/cm^3 时犁底孔隙增加度较大。由图4(e)可知,随着喷气压力增加犁底孔隙变化度增大;随着深松位置的加深,犁底孔隙变化度减小;喷气压力 2.2 MP 时,深松位置在深度 0.25 m 时,犁底孔隙变化度较大。

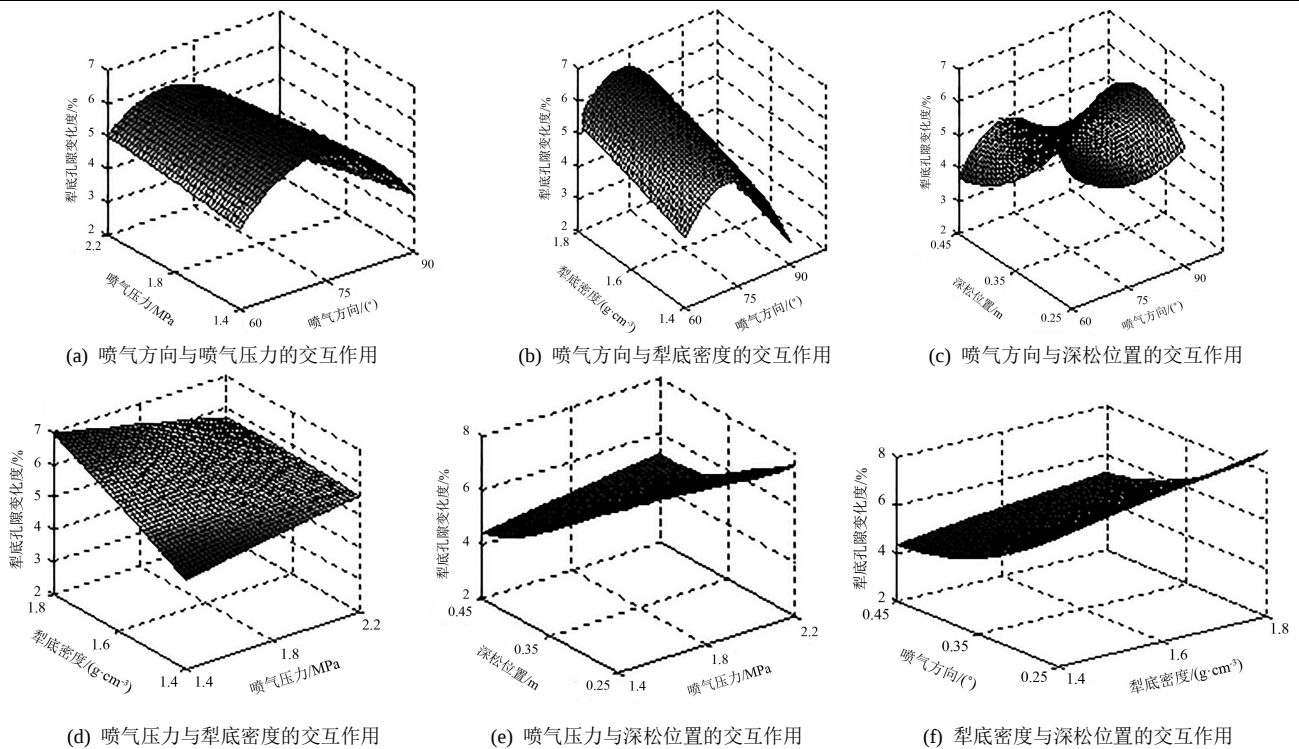


图4 各因素交互作用的影响

Fig.4 The influence of the interaction of various factors

图4(f)为喷气压力为中间水平1.8 MPa时,喷气方向75°时,犁底密度与深松位置的交互作用对评价指标影响的曲面图。由图4(f)可知,随着犁底密度的增加,犁底孔隙变化度增大;随着深松位置深度的加深,犁底孔隙变化度减小;当犁底密度为1.8 g/cm³,深松位置在深度0.25 m时,犁底孔隙变化度最大。

3 讨论

本试验过程中,在气压深松时,发现土面明显抬升,并随着距喷气点距离的增加抬升幅度逐渐减小,这与韩文君等^[16]关于高压流体对土体劈裂机理研究中,得出高压流体对土体劈裂存在剪切机理和抬升张拉机理,其中对于浅层土体更符合抬升张拉机理的表述一致。分析原因,高压气体由喷气孔喷出后,气体沿水平方向运动的同时向四周扩散且压力逐渐减小,另外高压气体以喷气点为中心向四周球面扩散形成了压力场,压力场使土体内部产生裂隙,因为土槽上方没有足够约束,所以上方压力场的合力使得上方的土面抬升,即越接近土面中心处土面抬升量就越大。另外,随着与喷气点距离的增加,高压气体的泄漏,其冲击力逐渐降低,导致土面抬升量随着距离的增加逐渐减小。

本研究中的深松高压气体的压力通过预试验选取的最小深松气压为1.4 MPa,压力区间为1.4~2.2 MPa,在高压气体的作用下,不同密度犁底层内的土壤孔隙

度均增大,实现了增加土体渗透性的目的。而冯壮壮等^[22]通过对新疆地区的灰漠土进行气压深松模拟试验的气压深松压力最小值为1.0 MPa,也同样达到了增加土体渗透性的效果,这表明土壤质地不同,土壤凝聚力不同,深松气压参数的选取也不同,说明在设计气压深松装备时注气装置应该具有压力可调功能以适应不同的土壤质地。

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,本试验的结果可以一定程度上反映裂隙的发展方向,犁底层内一定水平范围内的土壤孔隙度提升证明了裂隙的水平扩展与 Suthersan^[23]认为浅层超固结土的气压劈裂多产生水平裂隙的表述一致。可以得出土体的应力状态是控制裂隙传播的主要因素,控制浅层土的应力状态一定程度上是可以控制裂隙扩展的方向。

本研究表明,试验参数中对评价指标影响最显著的是深松位置,而土体密度对评价指标影响相对较小,这与涂杰等^[24]研究结果一致。这可能是因为试验条件下的高压气体产生的冲击力大于最大土体密度所产生的阻力,高压气体可以在瞬间打破试验条件下犁底密度的土体产生裂隙,同时高压气体向土面泄漏,导致其冲击力受泄漏路径长短即深松位置影响明显,从另一角度也可以说明,深松作业时上腹土层厚

度对评价指标影响显著,而上腹土层厚度与土压密切相关,将来在对气压深松机理深入研究及相关试验应将土压作为一重要影响因素。

4 结 论

1) 气压深松后,犁底层内的土壤孔隙度增大,高压气体打破了耕地犁底层,增加了耕地的渗透性,利于水土保持与灌溉。

2) 气压深松作业时,试验条件下 75° 的喷气方向为较适宜的喷气方向;距土表 0.35 m 处为较适宜深松深度;气压深松对高密度 (1.8 g/cm^3) 犁底层同样具有较好的提升渗透性的效果。

3) 气压深松后土体内犁底孔隙变化度即渗透性的提升,受深松参数的影响明显但并非正相关。

(作者声明本文无实际或潜在利益冲突)

参考文献:

- [1] 司振江,袁辅恩,陶延怀,等. 振动深松蓄水保墒机理的试验研究[J]. 灌溉排水学报, 2005, 24(5): 42-45.
SI Zhenjiang, YUAN Fuen, TAO Yanhuai, et al. Experimental study of mechanism to deeply vibrating-loosen and storage and preservation of soil moisture[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2005, 24(5): 42-45.
- [2] 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, 2015, 31(5): 78-84.
- [3] 刘战东,刘祖贵,宁东峰,等. 深松耕作对玉米水分利用和产量的影响[J]. 灌溉排水学报, 2015, 34(5): 6-12.
LIU Zhandong, LIU Zugui, NING Dongfeng, et al. Effects of subsoiling tillage on water utilization and yield of maize[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2015, 34(5): 6-12.
- [4] 孔德刚,左胜甲,李紫辉,等. 一种机械式气压深松机: CN104186040A[P]. 2014-12-10.
- [5] 左胜甲,孔德刚,刘立意,等. 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(1): 54-61.
ZUO Shengjia, KONG Degang, LIU Liyi, et al. Experiment on effect of air-pressure subsoiling based on air-pressure cracking theory[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(1): 54-61.
- [6] 牛文学,赵永来,高伟,等. 气爆辅助式深松机设计与田间性能试验[J]. 农机化研究, 2022, 44(1): 183-188.
NIU Wenxue, ZHAO Yonglai, GAO Wei, et al. Design and field performance test of gas explosion assisted subsoiler design and performance test of air explosion assisted subsoiler[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2022, 44(1): 183-188.
- [7] 左胜甲,孔德刚,陈海霞,等. 基于气压劈裂原理的气压深松机设计[J]. 中国农机化学报, 2017, 38(4): 5-10.
ZUO Shengjia, KONG Degang, CHEN Haixia, et al. Pneumatic subsoiler design based on pneumatic fracturing theory[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2017, 38(4): 5-10.
- [8] 奚小波,张瑞宏,单翔,等. 基于土体裂隙迹线方程和土体扰动模型的气爆松土参数优化[J]. 农业工程学报, 2018, 34(6): 15-24.
XI Xiaobo, ZHANG Ruihong, SHAN Xiang, et al. Optimization of gas explosion subsoiling parameters based on soil fissure trace equation and soil disturbance model[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34(6): 15-24.
- [9] 刘明财,苏继龙. 基于南方红壤耕地气压深松铲的设计与深松仿真分析[J]. 中国农业大学学报, 2019, 24(4): 119-123.
LIU Mingcai, SU Jilong. Design of pneumatic deep shovel and gas pressure deep loose simulation analysis in red soil of the Southern farmland[J]. Journal of China Agricultural University, 2019, 24(4): 119-123.
- [10] 左胜甲. 气压深松特性及技术的试验研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2016.
ZUO Shengjia. Experimental study on the characteristic and technology of air-pressure subsoiling[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2016.
- [11] 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.
- [12] MURDOCH L C, SLACK W W. Forms of hydraulic fractures in shallow fine-grained formations[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2002, 128(6): 479-487.
- [13] ALFARO M C, WONG R C. Laboratory studies on fracturing of low-permeability soils[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2001, 38(2): 303-315.
- [14] NAUTIYAL D. Fluid flow modeling for pneumatically fractured formations[D]. [Master thesis]. New Jersey Institute of Technology, 1994.
- [15] 金超奇,徐长节,江平,等. 考虑渗透系数随时间变化及固结状态影响的一维固结计算[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2022, 44(5): 157-164.
JIN Chaoqi, XU Changjie, JIANG Ping, et al. One dimensional consolidation calculation considering the change of permeability coefficient with time and the influence of consolidation state[J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2022, 44(5): 157-164.
- [16] 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): 87-93.
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): 87-93.
- [17] 左胜甲,孔德刚,刘春生,等. 气压深松土壤孔隙度测试与分析[J]. 农业工程学报, 2017, 33(1): 162-166.
ZUO Shengjia, KONG Degang, LIU Chunsheng, et al. Test and analysis of soil porosity with pneumatic subsoiling[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(1): 162-166.
- [18] 谭伟,何胜林,张海荣,等. 基于自然伽马和电阻率曲线的高温高压气层孔隙度计算方法[J]. 天然气地球科学, 2020, 31(2): 307-316.
TAN Wei, HE Shenglin, ZHANG Hairong, et al. Porosity calculation method of high temperature and high pressure gas reservoir based on natural gamma ray and resistivity curve[J]. Natural Gas Geoscience, 2020, 31(2): 307-316.
- [19] 李忠平. 基于高密度电法温纳装置的三维电阻率反演应用[J]. 地球物理学进展, 2020, 35(3): 970-975.
LI Zhongping. Application of 3-D resistivity inversion based on Winner device of high density electricity method[J]. Progress in Geophysics, 2020, 35(3): 970-975.
- [20] 杨永辉,武继承,王洪庆,等. 不同耕作与保墒措施对小麦、玉米周年水分利用效率的影响[J]. 灌溉排水学报, 2014, 33(S1): 63-66.
YANG Yonghui, WU Jicheng, WANG Hongqing, et al. Effects of different measures of tillage and soil moisture conservation on anniversary water use efficiencies of wheat and corn[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2014, 33(S1): 63-66.
- [21] 滕云,张忠学,司振江,等. 振动深松耕作对不同类型土壤水分特征

- 曲线影响研究[J]. 灌溉排水学报, 2017, 36(5): 52-58.
- TENG Yun, ZHANG Zhongxue, SI Zhenjiang, et al. Impact of vibration-tillage of subsoils on their water retention curves[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2017, 36(5): 52-58.
- [22] 冯壮壮, 李霞, 王维新, 等. 基于气压劈裂法的气动深松模拟试验[J]. 农机化研究, 2019, 41(11): 178-184.
- FENG Zhuangzhuang, LI Xia, WANG Weixin, et al. Based on air-pressure cracking method[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2019, 41(11): 178-184.
- [23] SUTHERSAN S S. Remediation engineering: design concepts[M]. Boca Raton: CRC Press LLC, 1999: 238-239.
- [24] 涂杰, 张建军, 岁立云. 气爆压力对深耕深松效果的影响[J]. 农业与技术, 2019, 39(12): 33-34.

Impact of Air Pressure in Subsoiling on Soil Permeability

ZUO Shengjia¹, DU Minghao¹, KONG Degang^{2*}, DING Xuxu¹

(1. School of Physics, Tonghua Normal University, Tonghua 134001, China;

2. College of Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

Abstract: 【Objective】The dense plough layer is difficult for airs and water to move into and out the root zone, hindering root penetration as a result. Deep loosening techniques, including the innovative air pressure subsoiling method, offer a solution by effectively breaking up this compacted layer. In contrast to traditional mechanical subsoiling, air-pressure subsoiling involves injecting high-pressure gas into the bottom of the plough layer. This paper studies the influence of air pressure on permeability of the loosen plough layer. 【Method】Laboratory experiments were conducted to investigate the effect of air pressure subsoiling. We analyzed the mechanism underlying this process and assessed the impact of operating factors, including air jet pressure, bulk density of the plough layer, subsoiling position, and air jet direction, on loosening the soil. 【Result】Among the factors we studied, subsoiling position had the most pronounced effect on soil permeability, and bulk density of the plough layer had the least impact. These factors collectively influenced the porosity of the loosened plough layer. Under the test conditions, when the bulk soil density was 1.8 g/cm^3 and the subsoiling depth was 0.35 m, an air jet direction of 75° combined with a jet pressure of 2.2 MPa yielded the most effective results. Similarly, with the bulk density was 1.8 g/cm^3 and subsoiling depth was 0.25 m, using a jet pressure 2.2 MPa was highly effective. 【Conclusion】Deep loosening the plough layer by air injecting can increase the permeability of the plough layer and enhance its water storage capacity. Under the test condition, 75° is an appropriate angle to inject the air; injecting the air at the depth of 0.35 m is the most suitable for plough layer loosening.

Key words: air pressure deep loosening; deepening parameters; permeability; law of influence; irrigation water storage

责任编辑: 赵宇龙