

土壤容重和含水量对耕作阻力的影响^{*}

李汝莘 高焕文 苏元升

(中国农业大学)

摘要 土壤容重和含水量是影响机具耕作阻力和能量消耗的主要因素。为了研究它们之间的数量关系,在田间将土壤容重和含水量分别在 $1.1 \sim 1.7 \text{ g/cm}^3$ 和 $11\% \sim 19\%$ 的范围内取三个水平,进行靴式开沟器耕作阻力的正交试验。用改进的五轮仪测试开沟器的工作阻力和开沟深度,土壤容重和含水量,采用容重环法实行定点测试。试验数据用改进的Marquardt法,通过TSP统计软件进行回归分析,得到了土壤耕作阻力-容重-含水量数学模型,并具有较高的拟合精度,可以用于分析评价不同土壤容重和含水量条件下拖拉机的牵引效率和能量消耗。

关键词 土壤耕作 数值模型 牵引阻力

由于农业机械化的不断发展,机具承担的田间作业越来越多,土壤压实越来越严重,机具已更多地在压实后的土壤上进行作业。因此,如何在这种新形势下提高机具的作业效果和减少能量投入,已成为人们普遍关心的问题。耕作是最普通的,同时也是耗能比较多的作业。对于耕作作业节能的研究,通常多注重于提高拖拉机附着性能和改进耕作部件设计两个方面,而对土壤状况的研究不多,一般以某一土壤含水量的土壤比阻作为综合评价指标。

50年代以来,国外对大型农业机械田间作业引起的土壤压实进行了深入的研究,提出了一些描述土壤被压实后的物理参数变化模型。例如Bailey等1986年提出的土壤压实应力与容重关系模型^[1],该模型与室内试验结果有较好的拟和^[2],但并不适用于对土壤反作用力的描述。澳大利亚的J. N. Tullberg着重分析研究固定道和传统耕作方式对拖拉机附着性能、滚动阻力以及机具耕作阻力的影响^[3]。有关土壤物理参数影响牵引阻力的定量研究未见报道。

以往的定性研究指出,田间土壤的容重和含水量是影响机具耕作阻力的主要因素。因此,为了更准确地估计不同的土壤容重及含水量所需的耕作能量投入,有必要通过田间试验,建立土壤容重和含水量与拖拉机牵引阻力之间的关系模型。

1 试验设备及方法

试验地为学校农场,土壤质地为轻壤土,最大颗粒直径 $0.25 \sim 1.00 \text{ mm}$,约占 1.4% ,最小颗粒直径 0.001 mm ,约占 15.44% ,有机质含量 1% 左右,土质比较均匀。前茬作物为春小麦。在小麦收获后用铁牛—55拖拉机深耕一遍,耕深为 $25 \sim 27 \text{ cm}$,之后用圆盘耙耙地。

收稿日期:1997-11-20 1998-02-13 修订

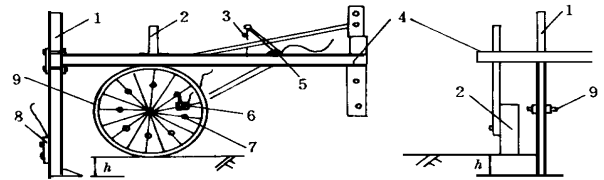
^{*} 农业部中澳合作课题(ACIAR96143)资助项目。

李汝莘,博士,北京市清华东路 中国农业大学(东校区)214信箱,100083

耕地,使地表平整、无明显坷垃。

采用泰山系列 11 kW 小四轮拖拉机,牵引单行靴式开沟器,开沟深度设定为 10 cm,作业速度 5.9 km/h。

测试设备(图 1)是将五轮仪改制成专用的牵引阻力、开沟深度、行走速度综合测试仪。上面装有拉力传感器 8、角位移传感器 5、微动开关 6。所有信号经澳大利亚产的 DataTaker 100 F 可编程田间试验数据采集器自动存储。该采集器的主要特点是:测试过程由程序控制,测试的时间间隔可以通过内部时钟任意设定或者由某一数字信号控制;各种信号都能按需要整理成数据文件,以便由计算机分析试验结果。



1 靴式开沟器 2 地轮 3 加力弹簧 4 牵引架
5 角位移传感器 6 微动开关 7 触点 8 拉力传感器 9 轮子

图 1 耕深与牵引力测试仪示意图

Fig 1 Schematic diagram of the instrument for tillage depth and traction

为了提高开沟深度的测量精度,将地轮和五轮仪平行安装在贴近开沟器的位置,五轮仪和开沟器在同一纵向平面内。采用角位移传感器 5 测定五轮仪相对机架的摆动角度,通过计算可以求得开沟深度。

在五轮仪滚动(无滑动)过程中,每个触点 7 触动微动开关 6 的瞬间,采集器即采集各路传感器信号;同时,根据采集器内部时钟在某一时间间隔的采集次数,便可计算机组的实际行驶速度。

试验采用正交设计,土壤容重和含水量为两个因素,各取三个水平。土壤容重的三个水平是:1.1~1.3 g/cm³(耕后地表),1.3~1.5 g/cm³(采用小四轮拖拉机在耕后地表上压两遍),1.5~1.7 g/cm³(采用大型联合收割机在耕后地表上压一遍);土壤含水量的三个水平是:11%~13%,14%~16%,17%~19%,运用 L₉(3⁴) 正交表设计试验。

根据土壤含水量的三个水平,分别进行三次试验。每次试验的土壤容重和含水量,采用容重环法实行定点测试,三个土壤容重水平共取 15 个测点。在每个测点两侧 2 m 的范围内测定 15 组耕作阻力及耕深数据。

2 试验结果及分析

由于农田土壤含有团聚体、有机质和土壤孔隙,在耕作部件作用于土壤的过程中,土壤产生的应力与应变极其复杂,实行定量测定目前还有许多困难^[4]。但是,耕作的牵引阻力主要决定于土壤的反作用力,土壤反作用力取决于土壤强度,与土壤内聚力一致(通常用土壤硬度计或土壤穿透计测定,单位分别为 kg/cm³ 和 kPa/cm²)。土壤强度的影响因素主要有茬口、有机质、土壤紧实程度和含水量。因此,在茬口和有机质相同的情况下,影响耕作阻力的主要因素是土壤容重和含水量。

2.1 土壤容重对耕作阻力的影响

通过实测数据的散点图看出,在某一土壤含水量水平下,耕作阻力是随土壤容重的增加

呈曲线增加的。因此, 选用一些双曲线函数、指数函数和多项式, 采用 TSP 统计软件, 用改进的 Marquardt 法, 分别对不同土壤含水量水平下的 90 组耕作阻力和土壤容重实测值进行曲线回归分析计算, 通过对若干曲线模型的试算、比较和筛选, 最终选取以下双曲线增长模型

$$P = A (\rho / (B + C \rho)) \quad (1)$$

式中 P ——耕作阻力, kg;
 ρ ——土壤容重 g/cm^3 ;
 $A、B、C$ ——常数。

表 1 模型(1)回归结果

Tab 1 Regression result of Model (1)

含水量水平	A	B	C	F 检验	R^2	误差平方和
1	11.653	1.010	-0.537	***	0.877	18066.98
2	11.972	0.998	-0.513	***	0.891	8930.916
3	12.765	1.002	-0.520	***	0.718	35818.09

回归分析结果如表 1, 表中分别以 1、2、3 代表低、中、高三个土壤含水量水平。从表 1

看出, 模型能较好地与试验值拟合, 精度较高。图 2 为含水量处在中间水平时的部分实测值及其拟合曲线。

在土壤含水量处于中间水平时, 耕作阻力的实测值比较均匀, 拟合情况最好。而在较干或较湿的情况下, 耕作阻力波动较大。这在一定程度上反映了耕作质量, 即在土壤水分适宜的条件下, 耕作质量较好。

2.2 土壤含水量对耕作阻力的影响

土壤随着含水量的变化, 其内聚力和塑性也产生不同的变化。在土壤比较干的情况下, 内聚力大而塑性小; 随着土壤含水量的增加, 土壤的内聚力增加而塑性减小^[4]。处于适中的含水量期间则称之为土壤的适耕期。因此, 耕作阻力与土壤含水量之间的关系接近抛物线, 可以用二次多项式 $P-S$ 模形描述

$$P = C_1 + C_2S + C_3S^2 \quad (2)$$

式中 P ——耕作阻力, kg; S ——土壤含水量, %; $C_1、C_2、C_3$ ——常数。

回归分析结果如表 2, 表中分别以 1、2、3 代表低、中、高三个土壤容重水平。

结果表明土壤容重较小时, 对含水量的反映不十分明显, 而在容重较大时, 则有相反的表现。或者说疏松的土壤适耕范围大, 而密实的土壤则适耕范围小。

2.3 建立 $P-\rho-S$ 关系模型

表 2 模型(2)回归结果

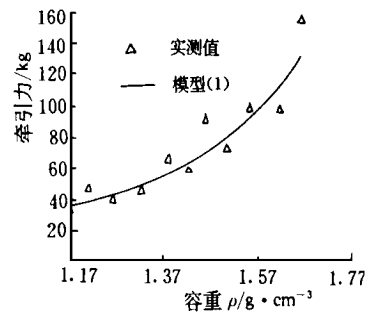
Tab 2 Regression result of Model (2)

土壤容重水平	C_1	C_2	C_3	F 检验	R^2	误差平方和
1	120.34	-11.10	0.386	***	0.987	1602.98
2	184.06	-16.27	0.523	***	0.993	793.16
3	491.37	-52.65	1.776	***	0.896	3258.02

(1) 仅设定其中的系数 A 为土壤含水量 S 的多项式。即

$$P = A (\rho / (1 - B \rho)) = (C_1 + C_2S + C_3S^2) (\rho / (1 - B \rho)) \quad (3)$$

经 TSP 软件计算的结果列于表 3。



2 部分实测值与拟合模型(1)比较
Fig 2 Fitting result of model (1) and measured values

从模型的回归结果可以发现, F 检验极显著, R^2 较大而误差平方和较小, 所以模型精度高。土壤含水量二次项的系数很小, 一次项的系数为负值, 说明在试验所选定的含水量范围内, 土壤湿度对耕作阻力的影响较小。

为了进一步比较, 同时采用二次回归正交设计方法, 运用三水平正交表 $L_9(3^4)$ 进行计算。土壤含水量的上水平(1)、零水平(0)和下水平(-1)分别取为 11%、15% 和 19%; 土壤容重

表 3 $P-\rho-S$ 模型回归结果Tab 3 Regression result of $P-\rho-S$ model

	C_1	C_2	C_3	B	F 检验	R^2	误差平方和
表 3	44 207	- 4 55	0 154	0 528	***	0 829	61924 57

的上水平(1)、零水平(0)和下水平(-1)分别取为 1.1 g/cm^3 、 1.4 g/cm^3 和 1.7 g/cm^3 。耕作阻力的试验结果为 10 次重复的平均值, 得到的回归方程

$$P = 502.6 - 16.72S - 568.83\rho + 2.153S\rho + 0.481S^2 + 228.31\rho^2 \quad (4)$$

方差分析结果得: $F_{0.95}(5, 3) = 9.91 <$ 表中值, 说明回归方程在 $\alpha = 0.05$ 水平上显著。

在方差检验显著的基础上, 进行了 t 检验。结果为

$$|t| = 0.177 < t_{0.99}(3) = 4.54$$

说明二次回归方程在被研究区域内拟合较好。但比较模型(4)和模型(3)可以看出, 模型(3)具有更高的拟合精度。

3 讨 论

1) 试验结果表明田间土壤的耕作阻力与土壤容重呈双曲线函数关系, 可以用模型(1)描述, 其中的系数由具体的土壤状况来确定。

2) 在土壤容重较小的情况下, 含水量对耕作阻力的影响不大; 而土壤容重越大, 耕作阻力对含水量就越敏感。

3) 由模型(4)的回归系数可以看出, 土壤容重的平方项对耕作阻力的影响显著, 容重和含水量的交互作用则不明显。因此, 在土壤比较紧实或被机组碾压的情况下, 将会引起耕作阻力的急剧增加, 应该予以重视。

4) 模型(3)比较简单, 并且具有较高的拟合精度, 可以作为 $P-\rho-S$ 关系模型。在类似的土壤条件下对于估计田间机器作业的能量投入以及牵引效率有实际意义。

参 考 文 献

- 1 Bailey A C, Johnson C E, Schafer R L. A model for agricultural soil compaction. *J Agri Engng Res*, 1986(33): 257~ 262
- 2 McBrid R A. Estimation of density-moisture-stress functions from uniaxial compression of unsaturated structured soil. *Soil & Tillage Res*, 1989, 13: 383~ 397
- 3 Tullberg J N. Controlled traffic in rained grain production. *Agri Engng*, 1994. 601~ 605
- 4 沈昌蒲. 机械化土壤耕作. 北京: 中国农业出版社, 1995. 15~ 18

Effect of Soil Bulk Density and Moisture Content on the Draft Resistance

Li Ruxin Gao Huanwen Su Yuansheng

(China Agricultural University, Beijing)

Abstract The soil bulk density and moisture content are main factors influencing the draft resistance and power consumption of tractors. In order to study the quantitative relationship among them, three soil bulk density levels and three moisture content levels were determined within the limits of $1.1 \sim 1.7 \text{ g/cm}^3$ and $11\% \sim 19\%$ in the field respectively. The perpendicular tests of the resistance of shoe opener were designed. The tillage resistance and depth of shoe opener were measured by using the improved fifth-wheel gauge and the DT 100f Datataker, and the soil bulk density and moisture content were measured by the bulk ring at the same time in the field. The test data were analysed through the Marquardt non-linear curve-fitting technique and a model representing the relationship among draft resistance, soil bulk density and moisture content was proposed. It has higher fitting precision and can be used to estimate the energy consumption and the draft efficiency under different soil conditions.

Key words soil tillage, numerical model, draft resistance