

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.08.010

犁体结构参数与工作参数优化设计*

翟力欣¹ 姬长英² 丁启朔² 郁隐梅²

(1. 金陵科技学院机电工程学院, 南京 211169; 2. 南京农业大学工学院, 南京 210031)

摘要: 流变态土壤的特有力学性质决定着流变态土壤环境下的犁具、旋耕刀具等农业机械应与北方旱作条件下的有所不同。为在流变态土壤条件下,优化犁体的结构参数和工作参数,以达到改善其性能和提供一个降低能耗的途径,应用3种犁体,以耕作能耗最小为目标,对犁体的工作参数进行了四因素三水平正交试验,同时应用ANSYS软件进行了相应的数值分析。试验结果表明,耕深对能耗的性能指标影响显著。通过试验结果分析确定最佳优化方案为:耕速0.8 m/s,耕深20 cm,同时验证了模拟的可行性。进而应用数值分析的方法对犁体结构参数推土角、起土角、覆土角和犁体高度进行优化。通过数值分析结果确定犁体推土角为90°、起土角为35°及犁体高度为200 mm时,其耕作比阻优化结果为0.69 N/cm²。

关键词: 犁体 参数 优化设计 正交试验

中图分类号: S233.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2013)08-0057-06

Optimized Design of Plough Body Structural and Working Parameters

Zhai Lixin¹ Ji Changying² Ding Qishuo² Yu Yinmei²

(1. Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Jinling Institute of Technology, Nanjing 211169, China

2. College of Engineering, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210031, China)

Abstract: Plowing in rheological soil is a unique tillage practice in humid or water logged agricultural production regions in China. System optimization of moldboard plough for rheological soil condition is necessary for improving its performance and providing a reduced draft and minimized energy consumption. An orthogonal test using four factors with three levels was conducted to optimize plough body structural and working parameters. Significant influence of tillage depth on the plough's performance was observed in the experiment. The optimum working condition occurred at a forwarding speed of 0.8 m/s and a tillage depth of 20 cm. This result was further evaluated and optimized with computer simulation, from which the structural parameters such as pushing angle, cutting angle, covering angle and height of plow were optimized. The simulation results proved that tilling rheological soil with a plow having a cutting angle of 35°, pushing angle of 90° and plow height of 200 mm provided the minimum specific draft of tillage, which was 0.69 N/cm².

Key words: Plough body Parameter Optimization design Orthogonal test

引言

我国南方水田分布范围十分广泛,主要的农业生产活动都在高含水率的土壤条件下进行,包括稻麦收获、土壤耕作、及车辆的田间行进等^[1]。因此,

流变态土壤的特有力学性质决定着在进行农业机械的设计与运用时必须重视南方土壤条件的特有约束和限制,流变态土壤环境下的犁具、旋耕刀具等农业机械应与北方旱作条件下的有所不同。我国在流变态土壤力学研究领域作了大量研究^[2~19]。不仅建

收稿日期: 2012-07-27 修回日期: 2012-09-16
* 国家自然科学基金资助项目(50675107)和金陵科技学院科研基金资助项目(JIT-B-201220)
作者简介: 翟力欣,讲师,主要从事机电一体化研究,E-mail: lxzhai@jit.edu.cn
通讯作者: 姬长英,教授,主要从事土壤-机器系统研究,E-mail: chyji@njau.edu.cn

立了水田土壤的流变模型,研制了水田流变仪,导出了土壤在准静载条件下随时间变化的位移关系式,而且探讨了流变态土壤剪切变形机理,提出了土壤的应力-应变-时间图。基于此,在流变性土壤条件下,进行室内模拟耕作试验来探索人们认识十分不够的耕作阻力的表现,从而为流变态土壤的农业机械设计提供基本的依据。

本文采用南京农业大学工学院的室内土槽,以数据采集与处理分析软件系统为辅助工具,对犁体在流变态土壤条件下所受的耕作阻力进行测试研究。通过多因素多水平试验得出牵引阻力最小的工作参数的最佳组合,并利用 ANSYS 软件进行相应的数值分析,以对犁体结构参数进行优化,为犁体的优化设计提供参考依据。

1 水田土壤力学模型

大量试验验证用 Burgers 模型来描述水田土壤的流变特性是十分有效的,因此选择 Burgers 模型来描述水田土壤的流变特性,如图 1 所示。

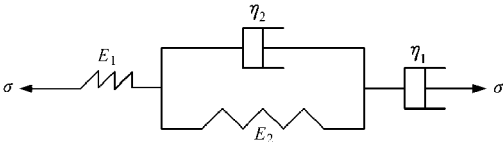


图 1 水田土壤的 Burgers 模型
Fig.1 Burgers model of paddy soil

本构方程即应力-应变关系为

$$\ddot{\varepsilon} + \frac{E_2}{\eta_2} \dot{\varepsilon} = \frac{1}{E_1} \left(\ddot{\sigma} + \frac{\eta_1 E_1 + \eta_2 E_1 + \eta_1 E_2}{\eta_1 \eta_2} \dot{\sigma} + \frac{E_1 E_2}{\eta_1 \eta_2} \sigma \right) \quad (1)$$

式中 E_1 、 E_2 、 η_1 、 η_2 ——流变参数

经分析,得到 Burgers 的一维蠕变方程为

$$\varepsilon(t) = \sigma_0 \left[\frac{1}{E_1} + \frac{t}{\eta_1} + \frac{1}{E_2} \left(1 - e^{-\frac{E_2 t}{\eta_2}} \right) \right] \quad (2)$$

式中 σ_0 —— $t=0$ 时的应力

2 犁体工作阻力与工作参数关系数学模型

为了研究犁体在不同流变态土壤参数下的耕作速度和耕作深度对犁体牵引阻力的影响,同时为了验证数值模拟的可行性,在室内土槽中进行了犁体耕作阻力的测试试验。以耕作的牵引阻力为性能指标,测试并分析各试验因素对试验指标的影响。

2.1 试验方法

在试验区内,犁体安装在土槽支撑架上,传感器通过连接装置与犁体相连并采集信号至虚拟仪器测试系统。调速装置控制犁体的行走速度并随时读取其数值。犁体的耕作速度稳定后,虚拟仪器测试系统开始采集牵引阻力信号。在数据处理时去掉奇异点,求取每组的平均值作为测得的犁体牵引阻力。压力信号采集系统的设计基于研华数据采集卡 PCI1710 及虚拟仪器开发软件 LabView。

2.2 试验设计与测试结果

利用试验室内现有的 3 种犁体在 3 种不同流变态土壤条件下进行试验。试验土壤为南方水田,选择 Burgers 模型来描述水田土壤的流变特性。土壤的机械性能参数如表 1 所示。以犁体耕作的牵引阻力为指标,以犁体类型、耕深、耕速以及土壤的流变参数为试验因素,每个因素的水平选取 3 个,根据试验因素水平选取 $L_9(3^4)$ 正交表作为试验方案表,因素水平如表 2 所示。同时将 3 种犁体均进行 Pro/E 建模并导入 ANSYS 中进行与土槽试验相对应的数值分析,并将得到的数值分析结果与试验结果进行误差计算,以验证数值分析的可行性。试验与数值分析的结果如表 3 所示。犁体在土体中的耕作,其物理模型可以简化成 Burgers 本构下的有限元模型即数值模型,如图 2 所示。

表 1 土壤机械性能参数

Tab.1 Mechanical parameters of soil

含水率/%	体积密度/ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	硬度/ kPa	内摩擦角/ $^\circ$	粘聚力	土壤流变参数			
					$E_1/\text{N}\cdot\text{cm}^{-2}$	$\eta_1/\text{N}\cdot\text{s}\cdot\text{cm}^{-2}$	$E_2/\text{N}\cdot\text{cm}^{-2}$	$\eta_2/\text{N}\cdot\text{s}\cdot\text{cm}^{-2}$
30	1 032	10. 32	10. 08	29. 325	29. 96	5 405. 0	50. 640	306. 80
32	987	9. 27	9. 54	27. 421	26. 96	4 111. 0	26. 010	25. 24
34	954	8. 31	9. 22	28. 927	16. 85	156. 7	2. 496	19. 99

表 2 试验因素水平

Tab.2 Levels and factors in experiment

水平	犁体 A	耕深 B/cm	耕速 C/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	土壤流变参数 D			
				$E_1/\text{N}\cdot\text{cm}^{-2}$	$\eta_1/\text{N}\cdot\text{s}\cdot\text{cm}^{-2}$	$E_2/\text{N}\cdot\text{cm}^{-2}$	$\eta_2/\text{N}\cdot\text{s}\cdot\text{cm}^{-2}$
1	大犁	10	0. 67	29. 96	5 405. 0	50. 640	306. 80
2	平板	15	0. 8	26. 96	4 111. 0	26. 010	25. 24
3	小犁	20	1	16. 85	156. 7	2. 496	19. 99

表 3 试验设计与测试结果

Tab. 3 Designing and testing results of tillage draft							
试验 编号	A	B	C	D	耕作 阻力/N	数值模拟 结果/N	误差 /%
1	1	1	1	1	558	512	8.98
2	1	2	2	2	759	727	4.4
3	1	3	3	3	869	826	5.21
4	2	1	2	3	624	586	6.48
5	2	2	3	1	877	829	5.79
6	2	3	1	2	914	853	7.15
7	3	1	3	2	512	467	9.64
8	3	2	1	3	697	635	9.76
9	3	3	2	1	747	703	5.83

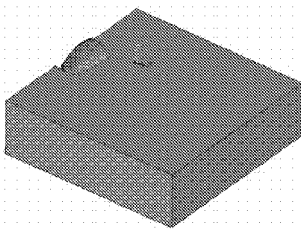


图 2 土体-犁体几何模型
Fig. 2 Geometry model of soil-plough

在生产实践中,常用比阻 K 来作为犁的阻力指标。比阻 K 是土壤条件、犁体参数和耕速等因素的综合反映,其定义为

$$K=\frac{p_x}{a_cB_c}$$

(3)

式中 p_x ——由拉力试验测得的平均牵引阻力,N
 a_c ——平均耕深,cm
 B_c ——犁的总幅宽,cm

将表 3 中的耕作阻力试验值转换为比阻值并进行方差分析,结果如表 4 所示。

2.3 试验结果分析

由表 4 可知,因素主次顺序为 $B、A、C、D$,优化组合为 $A_1B_3C_2D_3$,即 1 号犁体作用在 3 号土壤上,其耕速为 0.8 m/s,耕深为 20 cm 时耕作比阻为最小。在置信度为 90% 时,耕作深度对犁体耕作比阻的影响最显著。

3 犁体工作阻力与结构参数关系数学模型

犁体在作业过程中,耕深和耕作速度在实际耕作中可以加以控制,而对于犁体的形状的设计在耕作部件的加工中显得尤其重要,因此可以对犁体进行优化设计,以取得减小耕作阻力,节省能耗效果。

3.1 数值模拟分析

由表 3 还可以得出,数值分析结果和试验结果的误差均在 10% 以内,此误差完全可以接受,说明数值分析的可行性。因此,可以采用数值模拟分析对犁体的结构参数进行优化。采用表 4 分析所得的优水平结果,即在犁体的耕速为 0.8 m/s,耕深为 20 cm 时,以 3 号犁体为 Pro/E 模板,以耕作的牵引阻力为指标,以推土角、起土角、覆土角以及犁体高度为试验因素,分析不同结构参数的犁体的耕作阻力。每个因素的水平选取 3 个,根据试验因素水平选取 $L_9(3^4)$ 正交表作为模拟试验方案表。因素水平如表 5 所示,数值分析结果如表 6 所示。

表 4 试验结果分析
Tab. 4 Results analysis of experiment

试验编号	A	B	C	D	比阻/ $N\cdot cm^{-2}$		误差/%
					试验结果	模拟结果	
1	1	1	1	1	3.10	2.84	8.98
2	1	2	2	2	2.20	2.11	4.40
3	1	3	3	3	1.09	1.03	5.21
4	2	1	2	3	2.71	2.55	6.48
5	2	2	3	1	2.54	2.40	5.79
6	2	3	1	2	1.99	1.85	7.15
7	3	1	3	2	4.27	3.89	9.64
8	3	2	1	3	3.10	2.82	9.76
9	3	3	2	1	1.62	1.53	6.26
K_1	6.39	10.08	8.18	7.27			
K_2	7.24	7.84	6.54	8.45			
K_3	8.99	4.70	7.89	6.90			
k_1	2.13	3.36	2.73	2.42			
k_2	2.41	2.61	2.18	2.82			
k_3	3.00	1.57	2.63	2.30			
极差 R	0.87	1.79	0.55	0.52			
因素主次顺序				$B、A、C、D$			
优水平	A_1	B_3	C_2	D_3			
优组合				$A_1B_3C_2D_3$			
列差平方和 S_j	1.17	4.87	0.516	0.441			
自由度 f_i	2	2	2	2			
均方值	0.59	2.44	0.26	0.22			
F_j 比	2.66	11.05	1.17				
临界值				$F_{0.1}(2,2)=9$			

表 5 试验因素的水平
Tab. 5 Levels of four factors

水平	因素			
	推土角 $e/(^{\circ})$	起土角 $f/(^{\circ})$	覆土角 $g/(^{\circ})$	犁体高度 h/mm
1	90.0	35.0	75.0	240
2	82.5	32.5	65.0	220
3	75.0	30.0	55.0	200

表 6 数值模拟试验及其结果分析表
Tab. 6 Numerical simulation and results analysis

试验号	E	F	G	H	耕作比阻 $/\text{N}\cdot\text{cm}^{-2}$
1	1	1	1	1	0.91
2	1	2	2	2	0.85
3	1	3	3	3	0.81
4	2	1	2	3	0.74
5	2	2	3	1	0.93
6	2	3	1	2	0.88
7	3	1	3	2	0.86
8	3	2	1	3	0.77
9	3	3	2	1	0.94
K_1	2.57	2.51	2.57	2.79	
K_2	2.85	2.55	2.53	2.59	
K_3	2.88	2.64	2.60	2.32	
k_1	0.86	0.84	0.86	0.93	
k_2	0.95	0.85	0.84	0.86	
k_3	0.96	0.88	0.87	0.77	
极差 R_j	0.11	0.041	0.025	0.16	
因素主次顺序			$H、E、F、G$		
优水平	E_1	F_1	G_2	H_3	
优组合	$H_3E_1F_1G_2$				

为考查各因素对试验指标的影响,通过改变犁体自变量的值,获得不同的犁曲面模型,并在 ANSYS 中进行数值分析,进而得到犁耕牵引阻力的大小,最终将牵引阻力的数值转化为耕作比阻。首先将在 Pro/E 中建立的不同犁曲面模型保存为 .igs 格式,然后将保存的模型导入 ANSYS 中进行数值分析,其中速度载荷由位移的梯形变化方式来实现,最终得到犁耕牵引阻力的大小。重复上述试验过程,得到表 6 中的 9 次耕作比阻数值模拟及分析结果。

3.2 模拟结果分析

通过表 6 可以看出,犁体覆土角对耕作比阻的影响最小,为了简化分析过程,可将此因素忽略。故分析耕作比阻和犁体起土角 F 、推土角 E 、犁体高度 H 三因素间的关系。由于犁体的耕作比阻和犁体的推土角、犁体高度呈线性关系,与起土角为二次函数关系,使用 Origin 软件建立犁体耕作比阻的回归方程,则关于因变量耕作比阻的二次响应曲面回归方

程为

$$k = 1.437\,04 + 0.083\,32F + 0.000\,07E^2 - 0.001\,13FE + 0.000\,49EH + 0.013\,91E + 0.003\,44H \tag{4}$$

在 Origin 输出的计算结果中,回归方程显著性水平为 95%,说明回归方程是显著的。

3.3 犁体结构参数优化的数学模型

在优化过程中,建立数学模型是最关键的环节。数学模型的质量直接关系到结果的准确性。根据犁体在特定工况下比阻最低为目标,以起土角 x_1 、推土角 x_2 、犁体高度 x_3 为设计变量,并根据模拟结果的回归方程,得出犁体参数优化时的数学模型如式(5)所示。

设计变量设计变量 $\mathbf{X} = [x_1 \quad x_2 \quad x_3]^T$

目标函数

$$\min f(\mathbf{X}) = k = 1.437\,04 + 0.083\,32x_1 + 0.000\,07x_2^2 - 0.001\,13x_1x_2 + 0.000\,49x_2x_3 + 0.013\,91x_2 + 0.003\,44x_3 \tag{5}$$

s. t. $g_m(\mathbf{X}) = 0 \quad (m = 1, 2, \cdots, 6)$

$$\begin{cases} g_1(\mathbf{X}) = x_1 - 35^{\circ} \leq 0 \\ g_2(\mathbf{X}) = 30^{\circ} - x_1 \leq 0 \\ g_3(\mathbf{X}) = x_2 - 90^{\circ} \leq 0 \\ g_4(\mathbf{X}) = 75^{\circ} - x_2 \leq 0 \\ g_5(\mathbf{X}) = x_3 - 240 \leq 0 \\ g_6(\mathbf{X}) = 200 - x_3 \leq 0 \end{cases}$$

3.4 基于 Matlab 的犁体耕作阻力的优化

利用 Matlab 的 fmincon 命令对目标函数进行优化,得到最优解为: $x_1 = 35.000\,0, x_2 = 90.000\,0, x_3 = 200.000\,0, K = 0.689\,4$ 。即在耕速为 0.8 m/s、耕深为 20 cm 前提下,犁体的结构参数分别取推土角 90°、起土角 35°及犁体高度 200 mm 时,其耕作比阻优化结果为 0.69 N/cm²。

将优化参数的最优解即优化阻力与表 6 的耕作比阻进行比较,其优化效果如表 7 所示,比阻最高减小 26.60%,最低也减小了 6.77%,这极大减小了耕作比阻,说明优化结果是有效可行的。

在土壤条件和特定犁体而言,其耕深确定后,犁体耕作比阻只与耕宽有关,而决定耕宽的是犁体推土角。推土角越大,犁体耕宽也就越大,从而使得犁体的耕作比阻减小,这与优化得到的犁体推土角结果是一致的。

若特定的犁体在特定工作条件下耕作时,土壤的坚实度越小则犁体的耕作比阻也随之变小,这说明了犁体在含水率较高的第 3 水平的土壤上耕作时,其耕作比阻较小的原因。

表7 优化结果与试验结果比较

Tab.7 Comparison of simulation results and optimization results

试验号	比阻 /N·cm ⁻²	优化结果 /N·cm ⁻²	比阻减小 百分数/%
1	0.91	0.69	24.18
2	0.85		18.82
3	0.81		14.81
4	0.74		6.77
5	0.93		25.81
6	0.88		21.60
7	0.86		19.77
8	0.77		10.39
9	0.94		26.60

4 结论

(1)通过正交试验,建立了犁体耕作比阻与耕

速和耕深变化关系的数学模型。经分析,耕深对耕作比阻的影响较显著,并得到犁体的最优工作参数组合为耕速 0.8 m/s,耕深 20 cm。

(2)数值模拟与相应的正交试验的结果误差在 10% 以内,通过对比分析说明数值模拟的可行性。

(3)通过数值模拟,对犁体的结构参数如推土角、起土角、覆土角和犁体高度进行了优化分析,并建立了耕作比阻和犁体 3 个结构参数变化关系的数学模型。经过优化得到推土角为 90°、起土角为 35°及犁体高度为 200 mm。

(4)结构参数优化后的犁体以最优参数工作时,所得耕作比阻较两者优化之前至少减少了 6.77%,这大大减小了耕作比阻,说明优化结果的有效可行性。

参 考 文 献

1 翟力欣,姬长英,丁启朔. 流变态土壤切削试验用室内土槽与测试系统设计[J]. 农业机械学报,2010,41(7):45~49.
Zhai Lixin, Ji Changying, Ding Qishuo. Research on indoor soil bin and test system for rheological soil tillage[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010,41(7):45~49. (in Chinese)

2 Pan Junzheng. The general rheological model of paddy soils in south China[J]. Journal of Terramechanics, 1986, 23(2):59~68.

3 Ji Changying, Pan Junzheng. Chain-paddle driving mechanism, its pull prediction[J]. Journal of Terramechanics, 1995,32(2):224~229.

4 姬长英,陈铭年,潘君拯. 按水田土壤流变特性预测水田车辆下陷量的方法和仪器的研究[J]. 农业机械学报, 1986, 17(1):21~31.
Ji Changying, Chen Mingnian, Pan Junzheng. Approach and instrumentation for predicting sinkage of wet land vehicle based on rheological characteristics of paddy soils[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 1986, 17(1):21~31. (in Chinese)

5 潘君拯. 受冲击扰动饱和和粘质水田土壤流变特性研究[J]. 农业机械学报,1990,21(4):41~45.
Pan Junzheng. Rheological characteristics of disturbed saturated cohesive paddy soils in China[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 1990, 21(4):41~45. (in Chinese)

6 鲁植雄,姬长英,潘君拯. 据机械组成和含水量预测水田土壤粘附力[J]. 南京农业大学学报,1999,22(2):114~116.
Lu Zhixiong, Ji Changying, Pan Junzheng. Prediction of paddy soil adhesion to steel based on mechanical composition and water content[J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 1999, 22(2):114~116. (in Chinese)

7 姬长英,鲁植雄,潘君拯. 中国南方水田土壤的承载能力和粘附性能预测[J]. 南京农业大学学报,1999,22(4):105~108.
Ji Changying, Lu Zhixiong, Pan Junzheng. Analysis of bearing capacity and adhesion to solid surfaces of paddy soils[J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 1999, 22(4):105~108. (in Chinese)

8 姬长英,潘君拯. 湿软土壤剪切变形机理探析[J]. 农业工程学报,1994,10(4):20~25.
Ji Changying, Pan Junzheng. Investigation on shear deformation mechanism of soil[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 1994, 10(4):20~25. (in Chinese)

9 姬长英,潘君拯. 湿软土壤的剪切应力-剪切速度-时间关系[J]. 农业工程学报,1994,10(4):26~31.
Ji Changying, Pan Junzheng. Shear stress - shear rate - time relationship of wet and soft soil[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 1994, 10(4):26~31. (in Chinese)

10 姬长英,潘君拯. 湿软土壤上履带板的推力计算[J]. 农业工程学报,1994,10(4):33~36.
Ji Changying, Pan Junzheng. Pull prediction for a single track shoe[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 1994, 10(4):33~36. (in Chinese)

11 姬长英,潘君拯. 土壤条件和载荷条件对水田土壤流变参数的影响及应力-应变-时间图[J]. 农业机械学报,1983, 14(3):35~44.
Ji Changying, Pan Junzheng. Effects of soil conditions and load conditions on rheological coefficients of paddy-field soils and stress - strain - time graph[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 1983, 14(3):35~44. (in Chinese)

12 潘君拯. 载荷条件及流变参量对水田履带式行走装置下陷量的影响[J]. 农业机械学报,1984,15(4):7~12.
Pan Junzheng. Effect of load conditions and rheological parameters on sinkage of tracked vehicles in paddy fields [J].

- Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 1984, 15(4): 7~12. (in Chinese)
- 13 姬长英,赵池航. 动载式水田土壤流变仪的研制[J]. 农业机械学报,2004,35(2): 88~91.
Ji Changying, Zhao Chihang. Development of rheometer for paddy soils under dynamic loading[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2004, 35(2): 88~91. (in Chinese)
 - 14 沈杰,余群. 湿软土壤压力-下陷-时间关系的建立[J]. 农业机械学报,1983,14(4): 15~19.
Shen Jie, Yu Qun. Pressure-sinkage-time equation for wet soil [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 1983, 14(4): 15~19. (in Chinese)
 - 15 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.
Li Ruxin, Gao Huanwen, Su Yuansheng. Effect of soil bulk density and moisture content on the draft resistance[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 1998, 14(1): 81~85. (in Chinese)
 - 16 张锐,李建桥,周长海,等. 推土板表面形态对土壤动态行为影响的离散元模拟[J]. 农业工程学报,2007,23(9):13~19.
Zhang Rui, Li Jianqiao, Zhou Changhai, et al. Simulation of dynamic behavior of soil ahead of the bulldozing plates with different surface configurations by discrete element method[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2007, 23(9): 13~19. (in Chinese)
 - 17 张锐,李建桥,许述财,等. 推土板切土角对干土壤动态行为影响的离散元模拟[J]. 吉林大学学报:工学版,2007,37(4): 822~827.
Zhang Rui, Li Jianqiao, Xu Shucui, et al. Simulation on dynamic behavior of dry soil ahead of the bulldozing plate with different cutting angles by DEM[J]. Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition, 2007, 37(4): 822~827. (in Chinese)
 - 18 罗定照. 插入水田土壤中垂直平板向前运动的流变力学研究[J]. 农业机械学报,1986,17(4): 18~25.
Luo Dingzhao. The rheological research on the performance of the vertical plate moving horizontally in paddy field soil and their application [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 1986, 17(4): 18~25. (in Chinese)
 - 19 罗大海,诸葛茜,蒋崇贤. 水田土壤流变理论研究及其应用[J]. 武汉工学院学报:信息与管理工程版,1990,12(2):1~9.
Luo Dahai, Zhu Geqian, Jiang Chongxian. Rheological properties of paddy field soil and their application[J]. Journal of Wuhan University of Technology: Information & Management Engineering, 1990, 12(2): 1~9. (in Chinese)
 - 20 高惠璇. SAS 系统 Base SAS 软件使用手册[M]. 北京:中国统计出版社,1997.
 - 21 任露泉. 试验优化设计与分析[M]. 长春:吉林科学技术出版社,2001.

(上接第 56 页)

- 16 李玲玲,黄高宝,张仁陟,等. 不同保护性耕作措施对旱作农田土壤水分的影响[J]. 生态学科,2005,25(9): 2326~2332.
Li Lingling, Huang Gaobao, Zhang Renzhi, et al. Effect of conservation tillage on soil water regimes in rainfed areas. [J] Acta Ecologica Sinica, 2005, 25(9): 2326~2332. (in Chinese)
- 17 陈怀亮,张雪芬. 玉米生产农业气象服务[M]. 北京:气象出版社,1999.
- 18 He Jin, Li Hongwen, Kuhn N J, et al. Soil loosening on permanent raised-beds in arid northwest China[J]. Soil & Tillage Research, 2007, 97(2): 172~183.
- 19 郑亭,樊高琼,王秀芳,等. 耕作方式、播深及覆土对机播套作小麦麦苗素质的影响[J]. 农业工程学报,2011,27(5):164~168.
Zheng Ting, Fan Gaoqiong, Wang Xiufang, et al. Effect of tillage managements, sowing depth and soil-covering on the seeding quality of mechanical sowing wheat under intercropping condition[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(5): 164~168. (in Chinese)
- 20 强小嫚,周新国,李彩霞,等. 不同水分处理下液膜覆盖对夏玉米生长及产量的影响[J]. 农业工程学报,2010,26(1): 54~60.
Qiang Xiaoman, Zhou Xinguo, Li Caixia, et al. Effect of liquid film mulching on growth and yield of summer maize under different soil moisture conditions[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(1): 54~60. (in Chinese)
- 21 王庆杰,李洪文,何进,等. 大垄宽窄行免耕种植对土壤水分和玉米产量的影响[J]. 农业工程学报,2010,26(8): 39~43.
Wang Qingjie, Li Hongwen, He Jin, et al. Effects of wide-ridge and narrow-row no-till cultivation on soil water and maize yield [J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(8): 39~43. (in Chinese)
- 22 付国占,李潮海,王俊忠,等. 残茬覆盖于耕作方式对土壤性状及夏玉米水分利用效率的影响[J]. 农业工程学报,2005, 21(1): 52~56.
Fu Guozhan, Li Chaohai, Wang Junzhong, et al. Effects of stubble mulch and tillage managements on soil physical properties and water use efficiency of summer maize[J]. Transactions of the CSAE, 2005, 21(1): 52~56. (in Chinese)
- 23 高金虎,孙占祥,冯良山,等. 秸秆与氮肥配施对玉米生长及水分利用效率的影响[J]. 东北农业大学学报,2011,42(11): 116~120.
Gao Jinhu, Sun Zhanxiang, Feng Liangshan, et al. Effect of corn straw plus nitrogen fertilizer on growth and water use efficiency of maize[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2011, 42(11): 116~120. (in Chinese)
- 24 姚克恒,刘世豪,夏拥军,等. 开沟机作业功耗的正交试验分析及其优化设计[J]. 排灌机械工程学报,2011,29(6):529~535.
Yao Keheng, Liu Shihao, Xia Yongjun, et al. Orthogonal experiment analysis and optimization design for operation power of ditcher[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2011, 29(6): 529~535. (in Chinese)