doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.01.007

水稻土深松阻力与土壤扰动效果研究

丁启朔　葛双洋　任　骏　李毅念　何瑞银
(南京农业大学工学院, 南京 210031)

摘要: 为探讨机械深松过程的水稻土扰动、土壤结构及能量的效应,利用原位土壤耕作综合测试平台进行精准控制条件的深松试验,采用凿形铲,设置 5 种耕作深度(10、15、20、25、30 cm),从耕作阻力及比阻、土壤宏观扰动轮廓、土壤破碎体尺度分布指标综合评价水稻土深松作业的效果。结果表明,深松耕作阻力与耕作深度符合二阶函数拟合的递增关系。耕深 20 cm 时,深松铲对土壤扰动程度最大,地表隆起、开裂和纵向起伏程度最强,此时土壤隆起高度、隆起宽度、横剖面扰动面积、平均土块径均达到最大值,分别为 16.3 cm、42.2 cm、0.030 5 m^2、28.77 cm,耕作比阻则相对较低,为 62 kN/m^2;然而在耕深超过 20 cm 之后,深松铲的土壤扰动效果显著降低,地表隆起、开裂和纵向起伏程度减弱,土壤隆起高度、隆起宽度、横剖面扰动面积、平均土块径数值均明显减小,耕深 30 cm 时分别降至 10.3 cm、31.2 cm、0.026 8 m^2、19.12 cm,相比耕深 20 cm 降幅分别为 36.8%、26.1%、12.1% 和 33.54%,而此时耕作比阻急剧增大至 195 kN/m^2,相比耕深 20 cm 增幅高达 214.5%。因此,在水稻土条件下,耕作深度 20 cm 时能够获得最佳的土壤扰动、土壤结构及耕作能量的综合效应。

关键词: 水稻土; 深松; 土壤扰动; 耕作阻力
中图分类号: S222　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2017)01-0047-10

Characteristics of Subsoiler Traction and Soil Disturbance in Paddy Soil

DING Qishuo　GE Shuangyang　REN Jun　LI Yinian　HE Ruiyin
(*College of Engineering*, *Nanjing Agricultural University*, *Nanjing* 210031, *China*)

Abstract: Optimization of tillage system for paddy soil requires a precise quantification of soil disturbance, soil structure and tillage energy efficiency. An in-situ tillage test plateform was applied for precise control on the working parameters of a subsoiler, which was a chisel design and was evaluated in five depths (i.e., 10 cm, 15 cm, 20 cm, 25 cm and 30 cm). Traction, specific resistance, disturbed soil profile and soil fragment distribution were measured to evaluate the performance of the subsoiler. Results showed an increased traction with respect to the engaging depth, which satisfied a second-order equation. In the 20 cm tilling depth the degree of soil disturbance, soil surface humping, soil cracking and longitudinal humping were found the maximum. The bumping height, width, disturbed area of soil profile, mean weight diameter were 16.3 cm, 42.2 cm, 0.030 5 m^2 and 28.77 cm, respectively. Specific resistance in this depth was the minimum, i.e. 62 kN/m^2. When surpassing 20 cm depth, the bumping height, width, disturbed soil profile area, mean weight diameter were significantly decreased, which were 10.3 cm, 31.2 cm, 0.026 8 m^2 and 19.12 cm, respectively, for the 30 cm depth. Compared with the 20 cm depth, these parameters were decreased by 36.8%, 26.1%, 12.1% and 33.54%, respectively. Meanwhile, the specific resistance was 195 kN/m^2 for the 30 cm depth which was increased by 214.5% compared with 20 cm depth. In considerating the overall effect of tillage-induced soil struction, soil tilth quality and energy use efficiency, tilling the paddy soil into 20 cm provided the best results.
Key words: paddy soil; subsoiler; soil disturbance; tillage traction

引言

合理的耕作系统能够改善耕层土壤结构、调节土壤三相比例、协调土壤的水肥气热关系并为作物生长发育创造良好的环境和条件[1-7]。机械耕作引起的土壤物理状态变化及其效应的定量是耕作系统

收稿日期: 2016-06-01　修回日期: 2016-06-25
基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0300900)和江苏省农机基金项目(201-051028)
作者简介: 丁启朔(1968—),男,教授,博士生导师,主要从事土壤耕作力学研究,E-mail: qsding@njau.edu.cn

机理研究的重要内容[8],也是优化耕作部件设计、选择最佳耕作方式、指导田间耕作管理的重要理论依据[9-10]。

机械化深松是目前广泛应用的保护性耕作方式,该耕作系统利用深松铲疏松土壤、加深耕层而不翻转土壤、降低土壤容重、提高蓄水能力,促进作物的根系生长并提高作物产量[11-12]。深松铲与土壤的作用机理属于窄齿类触土部件的力学范畴,近年来围绕深松铲的几何设计、仿生设计研究形成了大量的成果[13-18]。在深松作业的机理研究方面多使用 2 类评价指标:深松部件的阻力特性和耕后土壤结构(包括宏观松土结构和土壤松碎状况)[19-21],分别涉及深松作业的不同方面,如土壤的宏观扰动轮廓和阻力的关系[22]、铲宽及作业参数(速度、耕深等)对耕作阻力的影响[23]、基于土壤扰动质量的深松机具评价指标(土壤硬度变化系数、土壤体积膨松系数、单位松土带宽度耕作阻力系数和土壤相互扰动系数等)[24]、振动型深松机的扰动剖面特征[15]、以土壤隆起及开裂等指标进行的不同铲型深松机碎土质量评价[20]等。

然而,不同的土壤条件引起的深松铲受力及耕后土壤扰动状态完全不同[21,25],进而决定了某一个土壤条件的研究成果并不能普遍应用于其他土壤条件。另外,多数研究工作是在室内土槽的重塑土条件下完成的[22-24],测试过程无法体现田间真实土壤的结构性及特有的约束条件。因此,针对具体的土壤类型及轮作制度的深松研究是完善保护性农业理论和实践的一个重要方面。

稻麦轮作制是广泛分布于长江中下游的高产种植制度,覆盖面积高达 1 300 万 hm^2[26],周年理论产量高达 21 t/hm^2[27]。然而该轮作制的周年干湿交替、水旱轮替耕作、稻麦根系的低效穿插及不良水肥运筹等导致水稻土特殊的结构状态和耕作力学属性。研究发现长期以旋耕代替深耕造成水稻土耕层变浅、土壤硬化严重、孔隙率低、机械阻力增大等问题[7,28-33],虽然水稻土的机械深松能够有效提升土壤物理质量,但湿粘型水稻土的深松作业十分困难[34],这也是南方水田制度难于开展深松推广的根本原因之一。

目前针对水稻土的机械化深松研究已开始探讨水稻土的机械深松作业的适应性等问题[35]。然而水稻土的机械化深松过程的土壤结构变化、耕层构造及扰动剖面响应状况、深松的能效、适宜深松深度、最佳深松作业参数等指标都缺乏相应的理论依据。因此,本文拟利用最新研发的土壤耕作原位综合测试平台[36]对水稻土的机械化深松进行精准控制试验,探讨水稻土在机械深松过程的土壤扰动、土壤结构及能效特征,为水稻土条件的合理深松机械设计及耕作技术提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

田间试验于 2015 年 12 月水稻收获后进行,试验地点位于南京市六合区八百桥试验田(118°59′E,31°98′N),地势平坦,土壤类型为壤质粘土,该地区常年稻麦轮作。土壤 pH 值 7.6,土壤砂粒、壤粒、黏粒、有机物质量分数分别为 24.06%、40.39%、35.55% 和 2.27%,液限 41.94%,塑限 25.18%。0 ~ 50 cm 土层土壤容重、含水率、总孔隙度见表 1。试验前进行人工地表清茬。

表 1 0 ~ 50 cm 土层基础物理参数

Tab.1 Basic physical properties in 0 ~ 50 cm soil layer

土层深度/cm	容重/($g \cdot cm^{-3}$)	含水率/%	总孔隙度/%
0 ~ 5	1.25	35.69	52.66
5 ~ 10	1.26	34.85	52.41
10 ~ 15	1.32	33.40	50.11
15 ~ 20	1.53	25.43	42.34
20 ~ 25	1.56	23.68	41.11
25 ~ 30	1.56	24.89	41.24
30 ~ 35	1.56	24.45	41.07
35 ~ 40	1.56	24.13	41.00
40 ~ 45	1.59	24.04	40.11
45 ~ 50	1.64	23.31	38.16

1.2 试验方法

所用深松铲类型为凿形深松铲,采用单因素试验方法,设置 5 种耕作深度:10、15、20、25、30 cm,牵引速度均控制在 0.1 m/s,使用单铲进行耕作试验。

为保证田间试验的可靠性,在最新设计的土壤耕作原位综合测试平台[36](图 1)上进行深松耕作试验。试验台架基本参数为:长度 8 m,宽度 1.8 m。

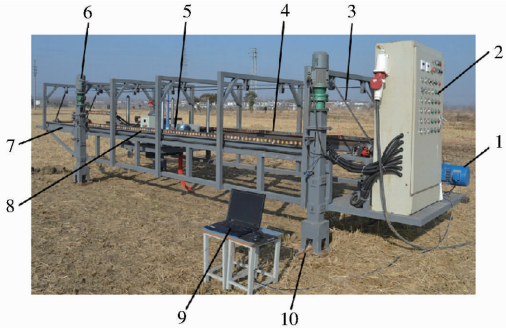


图 1 土壤耕作原位综合测试平台结构图

Fig.1 Schematic of in-situ experimental platform

1. 牵引电动机 2. 控制柜 3. 链条 4. 信号拖链 5. 台车机构 6. 升降电动机 7. 台车导轨 8. 电源拖链 9. 信号终端计算机 10. 移动导轨

耕作时由功率为 4 kW 牵引电动机提供动力，牵引测试台车（图 2）整体向前、向后移动。控制柜可调节牵引电动机转速和转向，从而调节台车移动速度和移动方向。深松铲悬挂于台车下方的升降悬架上，升降悬架与升降丝杆连接，由升降电动机带动丝杆上下移动，从而达到精准调节耕深的目的。台车前、后各装 2 个拉压力传感器，工作时，数据采集卡采集传感器信号，通过信号线传输至终端计算机内，可实时动态监测并记录耕作阻力数据。台架 4 个柱脚下方铺设导轨，4 个 0.75 kW 的升降电动机控制柱脚内部万向轮伸出或收起，从而实现台架在田间横向和纵向移动。

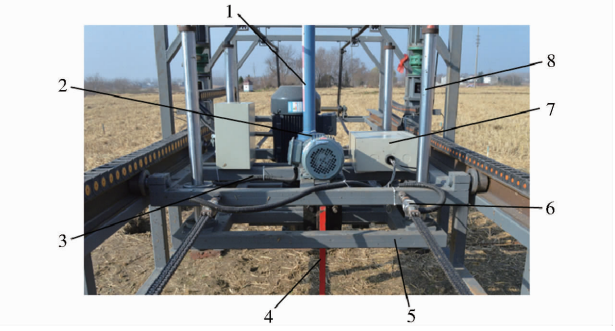


图 2　台车结构图

Fig. 2　Schematic of moving car

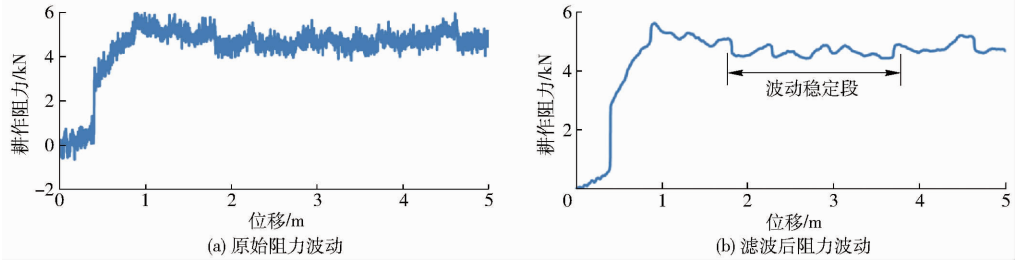
1. 升降丝杆　2. 升降电动机　3. 移动悬架　4. 深松铲　5. 升降悬架　6. 拉力传感器　7. 信号采集柜　8. 导向柱

每次测试的有效深松行程为 5 m，去除前后各 1 m 的非稳定工作区，取中间 3 m 为试验数据采集和土壤扰动质量测试区。每次深松后试验台横向移动 2 m 再进行下一次深松作业，以防止扰动区域相交或试验台不良扰动对下一次测试的破坏。

1.3　测定项目与方法

1.3.1　耕作阻力及比阻

试验台内部台车前、后各安装 2 个 LKL－101/1T 型拉压力传感器，分别编号：前 1（f1）、前 2（f2）、后 1（r1）、后 2（r2），耕作阻力 $F = F_{f1} + F_{f2} - (F_{r1} + F_{r2})$，利用 Excel 2010 软件进行信号处理，得出原始耕作阻力波动曲线（图 3a），对原始数据进行滤波处理后（图 3b），截取波动稳定段并求其平均值，作为相应耕作深度下的耕作阻力，并由此计算耕作比阻（耕作阻力与扰动截面积比值）[37]。



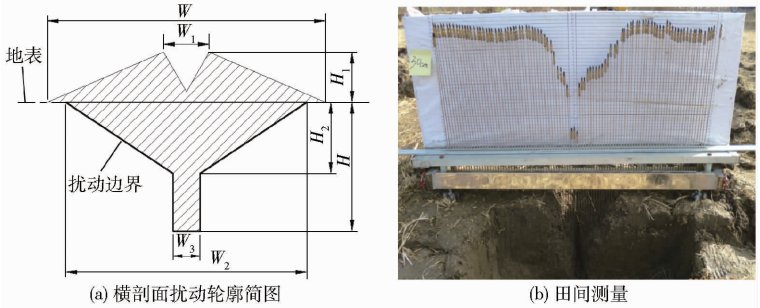
(a) 原始阻力波动　(b) 滤波后阻力波动

图 3　耕作阻力波动曲线

Fig. 3　Wave curves of tillage iraction

1.3.2　土壤宏观扰动轮廓

根据田间试验观测到的具体情况，并参考前人研究方法[20,22－23,38]，将深松后土壤宏观扰动轮廓分为：横剖面、俯视平面、纵向地表起伏，绘制简易轮廓图（图 4a、图 5），并规定适当的几何参数，以此来反映不同耕作深度下的土壤宏观扰动轮廓变化规律。

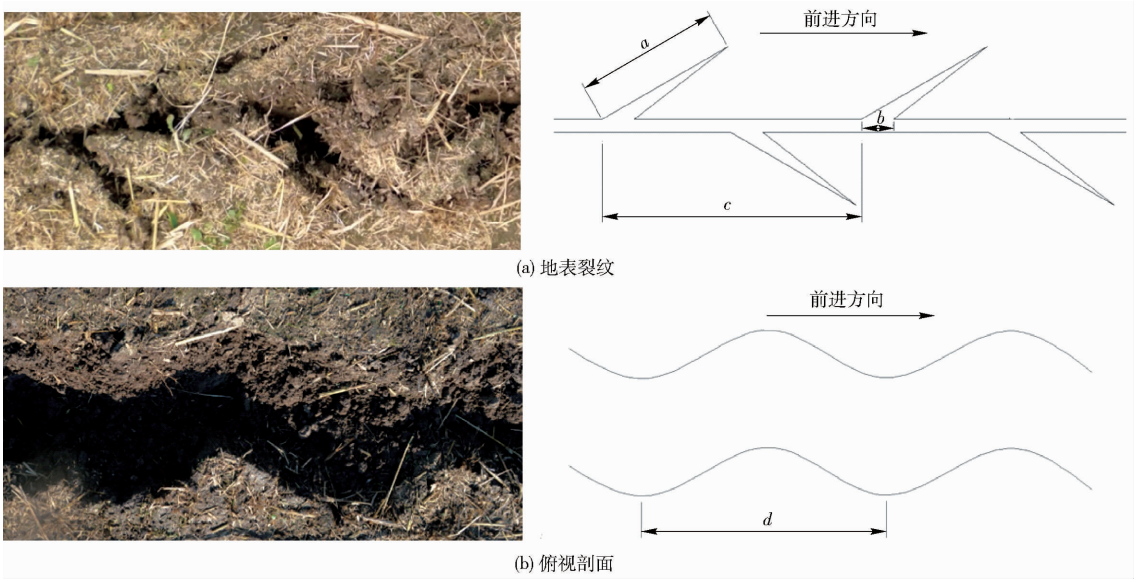


(a) 横剖面扰动轮廓简图　(b) 田间测量

图 4　横剖面扰动轮廓

Fig. 4　Disturbed profile of cross-section

利用卷尺和自制的土壤轮廓测量仪（图 6）测量土壤宏观扰动轮廓。土壤轮廓测量仪主要参数为：长 3 m，宽 1.2 m，钢钎间隔 10 mm，钢钎总数 100 个，测量高度范围为 －450 ~ 400 mm。深松耕作后，土壤轮廓测量仪钢钎沿深松沟横向放置（图 4b），测量土壤隆起轮廓和对应的扰动边界轮廓，两者合并组成土壤剖面扰动轮廓；利用卷尺手工测量俯视平面的地表裂纹以及扰动土垡取出后的俯视剖面轮廓参数，每项参数取 5 次重复；土壤轮廓测量仪钢钎纵向放置（图 7），测量纵向地表起伏情况，为防止钢钎全



(a) 地表裂纹

(b) 俯视剖面

图 5 俯视平面扰动轮廓

Fig. 5 Disturbed profile from plan view

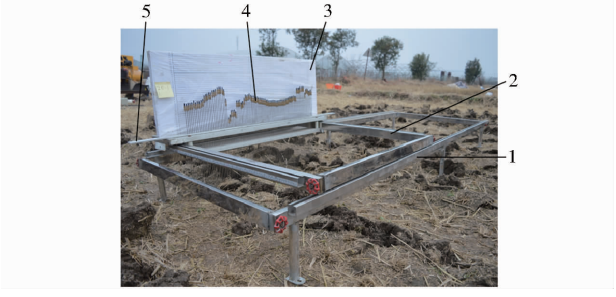


图 6 土壤轮廓测量仪结构图

Fig. 6 Schematic of soil profile meter

1. 底架 2. 水平移动架 3. 读数面板 4. 测量钢纤 5. 抬针栅条

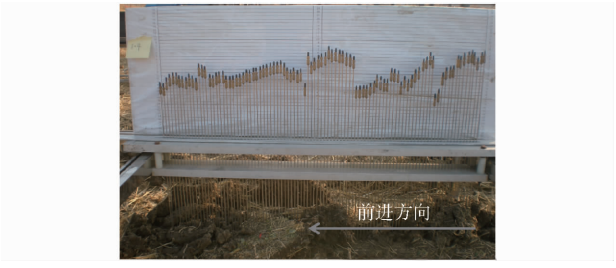


图 7 纵向地表起伏测量

Fig. 7 Test of earth's surface smooth in lengthways direction

部落入隆起裂缝中,钢钎排列向深松沟两侧偏离 5 ~ 10 cm,总测量长度 2 m。

1.3.3 土壤破碎体尺度分布

每次 5 m 深松行程完成后,取数据测量区域内的 2 m 进行土壤取样。沿着裂纹方向用双手缓慢取出大尺度土垡,平放于海绵垫上,利用卷尺测量土垡直径。然后收集深松沟内的小尺度土壤破碎体,进行筛分,筛孔直径分别为 64、32、16、8 mm。对留在 64 mm 孔筛内的土块再次手工测量土块直径,其他孔筛内土壤以孔筛分级区间上、下限的算术平均值作为其土块直径[39],依次为 48、24、12 mm,0 ~ 8 mm 土壤粒径默认为 4 mm。所有土块自然风干 3 d 后称量,计算平均土块径[40]和质量分形维数[41],公式为

$$D = \frac{\sum (m_i d_i)}{\sum m_i} \tag{1}$$

式中 D——平均土块径

d_i——土块粒径

m_i——对应粒径的土块质量

$$\frac{M(\delta < d_j)}{M_0} = \left(\frac{d_j}{d_{\max}}\right)^{3-D_m} \tag{2}$$

式中 d_j——筛分孔径

$d_{\max}$——最大土块粒径

$M(\delta < d_j)$——粒径 δ 小于 d_j 的颗粒累积质量

M_0——各粒级颗粒质量之和

D_m——土壤破碎体的质量分形维数

2 结果与分析

2.1 耕作阻力及比阻

耕作阻力在一定程度上反映了实际耕作中的拖拉机功率消耗情况[42]。图 8a 展示了耕作阻力与耕作深度的拟合关系曲线,回归函数与试验数据拟合的决定系数 $R^2 = 0.991\,8$,拟合可靠。耕作阻力 y 与耕作深度 x 满足二阶函数拟合关系:$y = 0.009\,4x^2 - 0.16x + 1.503\,9$。从图中可以看出,耕作阻力随着耕作深度增大而增大,并且耕作深度越大,增长速度越快,这与 IBRAHMI 等[43]、齐关宇等[44]的研究结果相一致。以上结果与水稻土土层性质变化有关(表 1),即随着耕作深度的增加,土壤容重逐渐增大,孔隙度逐渐减小,土壤愈加紧实,且土壤扰动量增加,从而工作阻力迅速增大[44-45]。

对于耕作系统的优化来说，仅知道耕作阻力是一方面，更重要的是耕作比阻信息（耕作阻力与扰动面积比值）[37]，耕作比阻能更全面地反映机具耕作效率[9]。图 8b 展示了耕作比阻随着耕作深度的变化趋势。从图中可以看出，耕作比阻随着耕作深度变化缺乏规律性，当耕深为 10、15、20 cm 时，耕作比阻呈平缓的线性增长趋势，比阻在 50 kN/m^2 水平。然而当耕深增大到 25、30 cm 时，耕作比阻急剧增大，分别达 192、195 kN/m^2，相比耕深 20 cm 增幅依次为 209.7% 和 214.5%。水稻土条件下深松耕作比阻呈现这一变化特征的原因是，当耕深不超过 20 cm 时，土壤容重较低、孔隙度较大、土壤较为松散、易于松动，耕作阻力随耕深增长的同时土壤扰动面积 S 也成比例增长（表 2），因此耕作比阻稳定在相对较低水平；但当耕深超过 20 cm 后，土壤容重增大、孔隙度减小、土壤变得紧实、不易于松动，耕作阻力随耕深大幅增长，但土壤扰动面积 S 却没有相应比例地增长，甚至会出现下降现象，因此造成耕作比阻急剧增大，耕作能效显著降低，无法保证深松作业的经济性。因此，在只考虑能量投入和土壤扰动程度的情况下，本文水稻土条件下的深松耕作深度应该控制在 20 cm 左右。

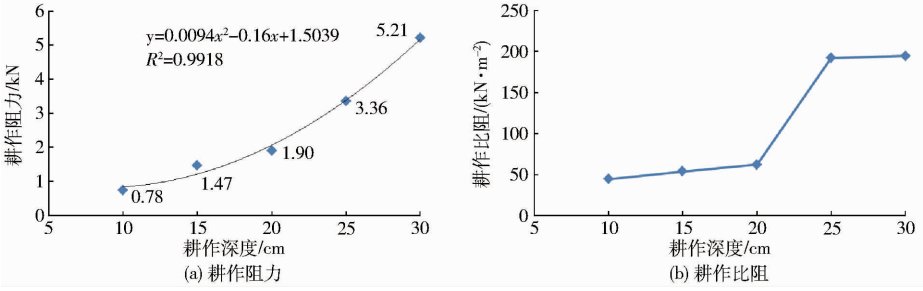


图 8　不同耕深下耕作阻力和耕作比阻的变化曲线

Fig. 8　Changing curves of tillage traction and specific traction at different tillage depths

表 2　横剖面扰动轮廓参数

Tab. 2　Properties of profile cross-sections

耕作深度 H/cm	垄起宽度 W/cm	裂缝宽度 W_1/cm	扰动宽度 W_2/cm	沟槽宽度 W_3/cm	垄起高度 H_1/cm	临界深度 H_2/cm	扰动面积 S/m^2
10	26.4	9.0	26.3		11.7		0.016 8
15	35.0	13.2	32.7		15.3		0.027 2
20	42.2	21.9	29.1	2.6	16.3	15.2	0.030 5
25	37.4	10.1	22.9	2.5	11.3	14.8	0.017 5
30	31.2	13.7	24.1	2.5	10.3	14.8	0.026 8

2.2　土壤宏观扰动轮廓

2.2.1　横剖面扰动轮廓

以往研究表明，深松铲耕作时存在扰动临界深度[46]，当耕深小于临界深度时，土壤向前、向上、向两侧移动，形成新月形破坏区；当耕深超过临界深度时，临界深度下方土壤只向前、向两侧移动，由新月形破坏区转变为侧向破坏区，此深度下方发生更多的是铲具对土壤的挤压，而不是有效松土（图 9）[45, 47-49]。本文研究也同样发现这一规律，由图 10 所示的不同耕作深度下的土壤横剖面扰动轮廓可知，耕深为 20、25、30 cm 时，横剖面扰动轮廓存在扰动临界深度，大致位于 15 cm 深度处。深松铲耕作过程中，临界深度以上土壤被扰动且向两侧抬起，中间形成裂缝，地表以上呈“山峰状”的隆起形态，扰动边界呈“上宽下窄”的扇形；而临界深度下方土壤则受深松铲侧向挤压作用，形成宽度与铲宽大致相等的矩形沟槽。因此当耕深小于或接近临界深度时，扰动边界轮廓整体呈“扇形”状；当耕深大于临界深度时，扰动边界轮廓则整体呈“漏斗”状。

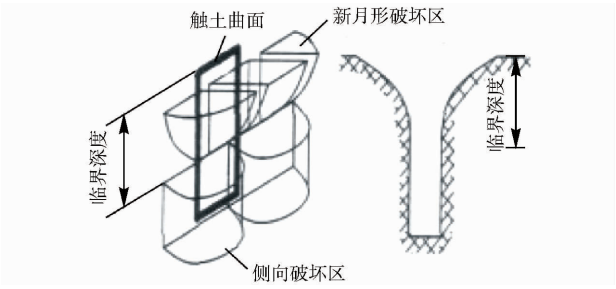


图 9　深松土壤扰动示意图

Fig. 9　Schematic of soil failure produced by subsoiler tines

深松铲入土深度的变化造成了整体剖面轮廓形态的变化，同时也造成了隆起参数和扰动边界参数的变化。表 2 展示了深松后横剖面扰动轮廓各项参数情况，从表中数据可以看出，地表以上的垄起高度 H_1、垄起宽度 W、裂缝宽度 W_1 均随着耕深的增大整

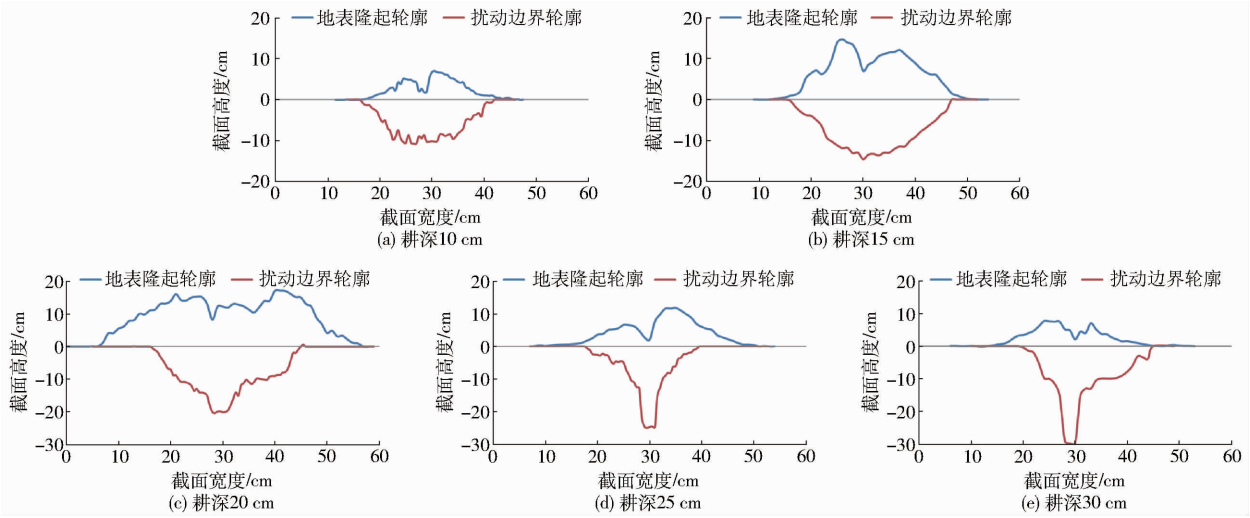


图 10 不同耕深下土壤横剖面扰动轮廓

Fig. 10 Profiles cross-sections of soil at different tillage depths

体呈“先增大后减小”的趋势,均在耕深 20 cm 时达最大值;地表处的扰动宽度 W_2 于耕深 15 cm 时最大,耕深 20 cm 次之,但差别不大;地表下方的土壤扰动面积 S 随着耕深增大同样呈现“先增大后减小”的趋势,于耕深 20 cm 时达最大值 0.030 5 m^2,耕深 25 cm 时扰动截面积相比耕深 20 cm 不升反降,只有 0.017 5 m^2。

以上分析表明,水稻土条件下深松耕作深度对深松铲的松土、抬土能力有着较大影响。当耕深超过临界深度(15 cm 左右)时,土壤破坏失效模式发生改变,由临界深度上方的新月形破坏失效转变成临界深度下方的侧向破坏失效。这一临界深度位置可能与水稻土犁底层的位置有关。由表 1 数据可知,犁底层同样处于 15 cm 左右深度处,此深度附近土壤物理性质发生剧烈变化,15 ~ 20 cm 土层相比 10 ~ 15 cm 土层容重增加 15.9%、孔隙度降低 15.5%、含水率降低 23.9%,犁底层下方土壤相比上方耕层土壤更加紧实,难以被松动、抬升,只能受到深松铲的侧向挤压破坏。总体上,深松铲的整体土壤扰动能力在耕深 20 cm 时达到最大,此时地表隆起程度和土壤扰动量均达到最大值。但耕深超过 20 cm 后,深松铲更多部分处于临界深度下方,形成对土壤侧向挤压而不是有效松土,整体土壤扰动能力减弱,地表隆起程度下降,土壤扰动量减少。因此在本文水稻土条件下,为获得最大土壤扰动效果,深松铲耕作深度应在 20 cm 左右。

2.2.2 俯视平面裂纹及剖面扰动轮廓

深松耕作后,地表形成裂纹,沿前进方向左右交替分布(图 5a),这与 GODWIN 等[50]研究结果相一致。将扰动土垡取出后,俯视剖面两侧的扰动边界呈平行的曲线波动形态(图 5b)。而在 LISOWSKI 等[51]的土槽试验中,扰动土壤取出后深松铲两侧的扰动边界呈平行的直线形态。因此,在高含水率的水稻土条件下,土壤团粒间粘性较大,深松铲对两侧的土壤难以进行同步的扰动破坏,而是沿前进方向左右交替依次进行,沿前进方向形成独特的曲线波动的扰动边界形态。

表 3 展示了俯视平面裂纹及剖面扰动轮廓参数。裂纹长度 a 和裂纹宽度 b 反映了深松铲前进过程中的表层土壤破裂程度,裂纹间隔 c 和波峰间隔 d 反映了深松铲完成一次左右交替扰动的间隔长度。从表中数据可以看出,深松铲入土深度对地表破裂程度和扰动间隔均存在影响。随着耕作深度的增大,裂纹长度 a 和裂纹宽度 b 均呈现“先增大后减小”的趋势,均于耕深 20 cm 时达到最大值,耕深 15 cm 次之,耕深超过 20 cm 后均大幅下降;裂纹间隔 c 和波峰间隔 d 均在耕深 15 cm 时达最大值,耕深 20 cm 次之,且耕深超过 20 cm 后同样出现大幅下降现象。

表 3 俯视平面裂纹及剖面轮廓参数

Tab. 3 Properties of cracks and profiles from plan view

cm

耕作深度 H	裂纹长度 a	裂纹宽度 b	裂纹间隔 c	波峰间隔 d
10	14.5	2.8	30.0	40.0
15	26.0	10.3	44.4	48.2
20	27.9	12.1	36.2	43.3
25	14.2	4.9	22.0	35.5
30	15.7	4.1	21.1	36.5

以上分析表明,当耕深不超过 20 cm 时,深松铲对土壤的扰动能力随入土深度增大而逐渐增大,左右交替扰动间隔长,地表破裂程度大,扰动充分。然而,当耕深超过 20 cm 后,深松铲对土壤的扰动能力

大幅下降，左右交替扰动间隔缩短，地表破裂程度下降，扰动不充分。

2.2.3　纵向地表起伏

由前文得知，深松后地表土壤隆起，且在前进方向上深松铲对土壤的扰动是左右交替依次进行，因此纵向的土垡垄起排列呈现一定的起伏波动状态（图 11）。从图中可以看出，耕深 15、20 cm 时，地表高低起伏剧烈，波动间隔大。但耕深达到 25、30 cm 时，地表高低起伏程度急剧减弱，波动间隔有所减小。总体上，随着耕作深度的增加，地表起伏剧烈性也大致呈“先增大后减小”趋势，耕深 20 cm 时达最大程度，耕深超过 20 cm 后则急剧下降。

以上结果与横剖面扰动轮廓、俯视平面裂纹及剖面扰动轮廓的研究结果相吻合。在土层 20 cm 深度内，土壤容重相对较低，孔隙度较大，含水率较高，土壤松散且易于松动、抬升，深松铲入土深度的增加导致土壤扰动量的增加，地表破裂程度加剧，土壤隆起增高，深松铲对土壤扰动能力增强，从而导致纵向地表起伏剧烈性增大。然而，当耕作深度超过 20 cm 后，深松铲更多部分处于临界深度下方紧实且不易于松动、抬升的土壤中，深松铲对土壤扰动能力有所减弱，土壤扰动量减少，地表破裂程度减弱，土壤隆起降低，从而导致纵向地表起伏程度较小。

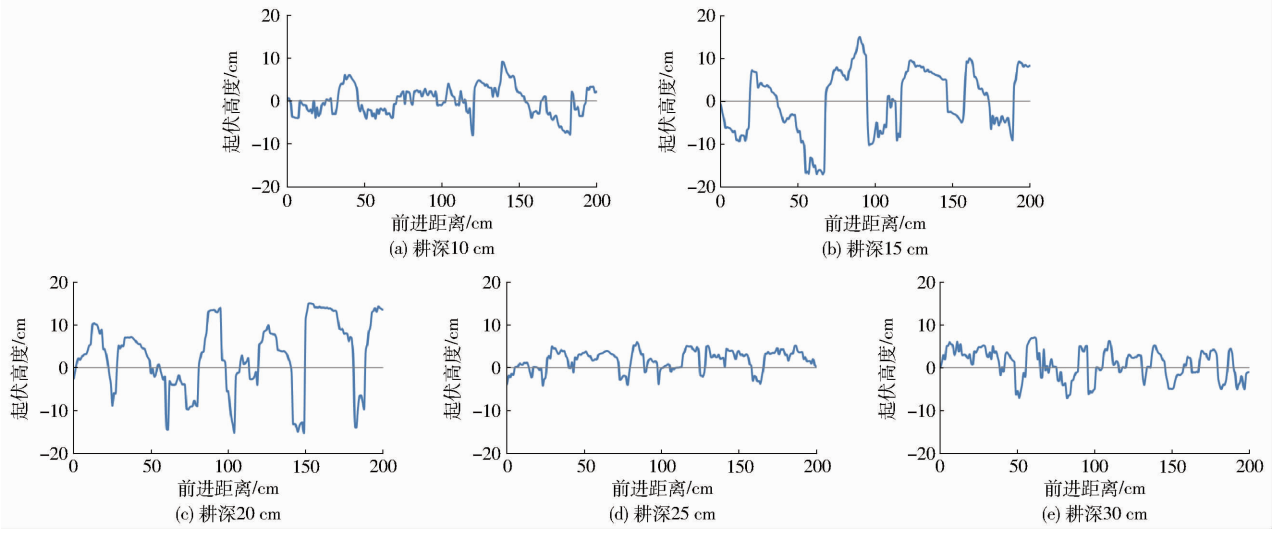


图 11　不同耕深下纵向地表起伏情况

Fig. 11　Earth's surface smooth of different tillage depth in lengthways direction

2.3　土壤破碎体尺度分布

对土壤破碎体（或土块）进行尺度分析，是土壤宏观力学结构研究的基本内容之一[52]。平均土块径从整体上反映了耕作后的土块大小[40]，质量分形维数则是对土壤破碎体的定量描述[53]。机械耕作后，质量分形维数越大，土壤破碎程度就越高，平均土块径越小；质量分形维数越小，土壤破碎程度就越低，平均土块径越大[54]。本文水稻土深松耕作后，土壤破碎体粒径主要分布在 10 ~ 40 cm 区间（质量分数大于 50%）（图 12）。随着耕作深度的增加，粒径大于 20 cm 的土壤破碎体质量分数先增大后减小，耕深 20 cm 时达最大值 78.37%，耕深 30 cm 时最小，为 38.80%；平均土块径先增大后减小（表 4），耕深 20 cm 时达最大值 28.77 cm，耕深 30 cm 时达最小值 19.12 cm，降低 33.54%；质量分形维数于耕深 20 cm 时达最小值 1.75，耕深 10 cm 时达最大值 1.97。

以上结果表明，在土层 20 cm 深度内，随着耕作深度的增加，深松扰动后大尺度土壤破碎体比例上升，平均土块径增大，质量分形维数降低，整体破碎程度下降；但耕深超过 20 cm 后，大尺度土壤破碎体比例下降，平均土块径减小，质量分形维数增大，整

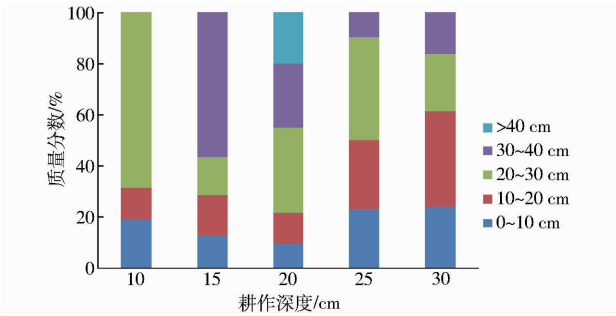


图 12　土壤破碎体径级分布

Fig. 12　Relative size distribution of soil clods by weight

表 4　不同耕深下的平均土块径和分形维数

Tab. 4　Mean diameters of soil D and mass fractal dimension D_m

耕作深度 H/cm	10	15	20	25	30
平均土块径 D/cm	20.95	28.22	28.77	19.32	19.12
质量分形维数 D_m	1.97	1.84	1.75	1.91	1.79

体破碎程度升高。这是因为,在水稻土土层 20 cm 深度内,耕作深度的增加导致了土壤扰动量的增加,更多土壤被松动、抬升,但由于水稻土的湿粘性,被扰动土壤不易破碎,仍能保持较大的土垡结构,因此深松后的土壤破碎体尺度逐渐增大,整体破碎程度下降;当耕深超过 20 cm 后,深松铲更多部分处于临界深度(15 cm 左右)下方,形成对土壤侧向挤压而不是有效松土,土壤扰动量减少,被松动、抬升起的土壤也相应减少,土垡结构尺度下降,因此深松后形成的土壤破碎体尺度较小,整体破碎程度较高。

3 结论

使用土壤耕作原位综合测试平台针对南方稻麦轮作制开展机械深松的定量化研究表明,水稻土条件的深松作业对土壤扰动、土壤结构及耕作用能的影响特征如下:

(1)深松耕作阻力随耕作深度的增大而增大,且两者呈二阶函数拟合关系:$y = 0.009\ 4x^2 - 0.16x + 1.503\ 9$,决定系数 $R^2 = 0.991\ 8$,拟合关系可靠。

(2)深松铲对土壤的扰动程度随着耕作深度的变化而变化,整体呈“先增大后减小”的趋势。在土层深度 20 cm 内,随着耕作深度的增加,土壤扰动量逐渐增加,破碎体尺度增大,地表隆起、开裂以及纵向起伏程度加剧,整体扰动程度增大;当耕深超过 20 cm 后,深松铲更多部分处于临界深度(15 cm 左右深度处)下方,土壤扰动量变少,破碎体尺度减小,地表隆起、开裂以及纵向起伏程度减弱,整体扰动程度下降。

(3)耕深 20 cm 时,土壤扰动量最大,耕作比阻处于相对较低水平。但当耕深超过 20 cm 后,土壤扰动量减少,但耕作阻力仍大幅增长,耕作比阻急剧增大,能效大大降低。因此,在仅考虑耕作能效和土壤扰动程度的前提下,水稻土条件下深松最佳耕作深度在 20 cm 左右,但此时土壤结构尺度大,破碎程度低,地表平整性较差,因此后期应配合旋耕或耙地等整地措施,以便于后期作物播种。

参 考 文 献

1 张银平,杜瑞成,刁培松,等. 机械化生态沃土耕作模式提高土壤质量及作物产量[J]. 农业工程学报, 2015,31(7): 33 - 38.
ZHANG Yinping, DU Ruicheng, DIAO Peisong, et al. Mechanical and ecological tillage pattern improving soil quality and crop yields[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(7): 33 - 38. (in Chinese)

2 聂良鹏,郭利伟,牛海燕,等. 轮耕对小麦-玉米两熟农田耕层构造及作物产量与品质的影响[J]. 作物学报, 2015,41(3): 468 - 478. http://zwxb.chinacrops.org/CN/article/searchArticleResult. DOI: 10.3724/SP.J.1006.2015.00468.
NIE Liangpeng, GUO Liwei, NIU Haiyan, et al. Effects of rotational tillage on tilth soil structure and crop yield and quality in maize-wheat cropping system[J]. Acta Agronomica Sinica, 2015, 41(3): 468 - 478. (in Chinese)

3 王玉玲,李军,柏炜霞. 轮耕体系对黄土台塬麦玉轮作土壤生产性能的影响[J/OL]. 农业工程学报, 2015,31(1): 107 - 116. http://www.tcsae.org/nygcxb/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20150116&journal_id=nygcxb. DOI:10.3969/j.issn.1002-6819.2015.01.016.
WANG Yuling, LI Jun, BAI Weixia. Effects of rotational tillage systems on soil production performance in wheat-maize rotation field in Loess Platform region of China[J/OL]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(1): 107 - 116. (in Chinese)

4 郑洪兵,郑金玉,罗洋,等. 农田不同耕层构造对玉米生长发育及产量的影响[J/OL]. 干旱地区农业研究, 2015,33(5): 41 - 45. http://ghdqnyyj.ijournal.cn/ghdqnyyj/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20150508&journal_id=ghdqnyyj. DOI: 10.7606/j.issn.1000-7601.2015.05.08.
ZHENG Hongbing, ZHENG Jinyu, LUO Yang, et al. Effects of different tillage layer structures on growth and yield of maize in cropland zone in Northeast of China[J/OL]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2015, 33(5): 41 - 45. (in Chinese)

5 张玉娇,李军,郭正,等. 渭北旱塬麦田保护性轮耕方式的产量和土壤水分效应长周期模拟研究[J/OL]. 中国农业科学, 2015,48(14): 2730 - 2746. http://www.chinaagrisci.com/CN/article/searchArticleResultByKeyword. DOI:10.3864/j.issn.0578-1752.2015.14.005.
ZHANG Yujiao, LI Jun, GUO Zheng, et al. Long-term simulation of winter wheat yield and soil water response to conservation tillage rotation in Weibei Highland[J/OL]. Scientia Agricultura Sinica, 2015, 48(14): 2730 - 2746. (in Chinese)

6 郑洪兵,郑金玉,罗洋,等. 长期不同耕作方式下的土壤硬度变化特征[J/OL]. 农业工程学报, 2015,31(9): 63 - 70. http://www.tcsae.org/nygcxb/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20150911&journal_id=nygcxb. DOI: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.09.011.
ZHENG Hongbing, ZHENG Jinyu, LUO Yang, et al. Change characteristic of soil compaction of long-term different tillage methods in cropland[J/OL]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(9): 63 - 70. (in Chinese)

7 何进,李洪文,高焕文. 中国北方保护性耕作条件下深松效应与经济效益研究[J]. 农业工程学报, 2006,22(10): 62 - 67.
HE Jin, LI Hongwen, GAO Huanwen. Subsoiling effect and economic benefit under conservation tillage mode in Northern China [J]. Transactions of the CSAE, 2006, 22(10): 62 - 67. (in Chinese)

8 丁启朔,丁为民. 现代土壤机械耕作研究的综述[J]. 土壤通报, 2006,37(1): 149 - 153.
DING Qishuo, DING Weimin. Modern soil tillage research: a review[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2016, 37(1): 149 -

153. (in Chinese)
9 GODWIN R J. A review of the effect of implement geometry on soil failure and implement forces[J]. Soil and Tillage Research, 2007, 97(2): 331 - 340.
10 曾德超. 机械土壤动力学[M]. 北京：北京科学技术出版社, 1995.
11 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 for Agricultural Machinery, 2000, 31(6): 42 - 45. (in Chinese)
12 丁昆仑,HANN M J. 深松耕作对土壤水分物理特性及作物生长的影响[J]. 中国农村水利水电, 1997(11): 13 - 16.
DING Kunlun, HANN M J. Effect of deep loosen cultivation to soil moisture physical characteristics and crop growing[J]. China Rural Water and Hydropower, 1997(11): 13 - 16. (in Chinese)
13 张金波,佟金,马云海. 仿生减阻深松铲设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2014,45(4): 141 - 145. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no=20140422&flag=1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2014.04.022.
ZHANG Jinbo, TONG Jin, MA Yunhai. Design and experiment of bionic anti-drag subsoiler[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(4): 141 - 145. (in Chinese)
14 张强,张璐,于海业,等. 复合形态深松铲耕作阻力有限元分析与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2012,43(8): 61 - 65. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no=20120812&flag=1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2012.08.012.
ZHANG Qiang, ZHANG Lu, YU Haiye, et al. Finite element analysis and experiment of soil resistance of multiplex-modality subsoiler[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(8): 61 - 65. (in Chinese)
15 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试验[J]. 农业工程学报, 2012,28(1): 32 - 36. http://www.tcsae.org/nygcxb/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20120107&journal_id=nygcxb. DOI: 10.3969/j.issn.1002-6819.2012.01.007.
LI Xia, FU Junfeng, ZHANG Dongxing, et al. Study on traction resistance based on the experiment analysis of a vibration ripper [J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(1): 32 - 36. (in Chinese)
16 辛丽丽,李传琦,梁继辉,等. 考虑分段土壤作用力的振动减阻分析[J/OL]. 农业机械学报, 2014,45(2): 136 - 140. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no=20140223&flag=1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2014.02.023.
XIN Lili, LI Chuanqi, LIANG Jihui, et al. Vibrating drag reduction considering acting force of piecewise soil [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(2): 136 - 140. (in Chinese)
17 李霞,张东兴,王维新,等. 受迫振动深松机性能参数优化与试验[J/OL]. 农业工程学报, 2015,31(21): 17 - 24. http://www.tcsae.org/nygcxb/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20152103&journal_id=nygcxb. DOI:10.11975/j.issn.1002-6819.2015.21.003.
LI Xia, ZHANG Dongxing, WANG Weixin, et al. Performance parameter optimization and experiment of forced-vibration subsoiler[J/OL]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(21): 17 - 24. (in Chinese)
18 郭志军,周志立,张毅,等. 土壤耕作部件仿生优化设计研究[J]. 中国科学 E 辑:技术科学, 2009,39(4): 720 - 728.
GUO Zhijun, ZHOU Zhili, ZHANG Yi, et al. Bionic optimization research of soil cultivating component design[J]. Science in China Series E: Technological Sciences, 2009, 39(4): 720 - 728. (in Chinese)
19 CONTE O, LEVIEN R, DEBIASI H, et al. Soil disturbance index as an indicator of seed drill efficiency in no-tillage agrosystems [J]. Soil and Tillage Research, 2011, 114(1): 37 - 42.
20 丁永凯,丁健伟. 深松部件的工作性能分析及其应用[J]. 农机化研究, 1990(2): 41 - 47.
21 郭志军,佟金,周志立,等. 深松技术研究现状与展望[J]. 农业工程学报, 2001,17(6): 169 - 174.
GUO Zhijun, TONG Jin, ZHOU Zhili, et al. Review of subsoiling techniques and their applications[J]. Transactions of the CSAE, 2001, 17(6): 169 - 174. (in Chinese)
22 郭志军,周志立,张毅,等. 深松耕作土壤宏观扰动轮廓分析[J]. 拖拉机与农用运输车, 2003(3): 27 - 30.
GUO Zhijun, ZHOU Zhili, ZHANG Yi, et al. The analysis of the macroscopical disturbing profile of soil after subsoiling[J]. Tractor & Farm Transporter, 2003(3): 27 - 30. (in Chinese)
23 MANUWA S I. Performance evaluation of tillage tines operating under different depths in a sandy clay loam soil[J]. Soil and Tillage Research, 2009, 103(2): 399 - 405.
24 黄玉祥,杭程光,李伟,等. 深松作业效果试验及评价方法研究[J]. 西北农林科技大学学报:自然科学版, 2015,43(11): 228 - 234.
HUANG Yuxiang, HANG Chengguang, LI Wei, et al. Subsoiling test and evaluation methodology study of tillage quality[J]. Journal of Northwest A&F University: Natural Science Edition, 2015, 43(11): 228 - 234. (in Chinese)
25 王燕. 基于离散元法的深松铲结构与松土效果研究[D]. 长春:吉林农业大学, 2014.
WANG Yan. Simulation analysis of structure and effect of the subsoiler based on DEM[D]. Changchun: Jilin Agricultural University, 2014. (in Chinese)
26 吴成龙. 稻—麦轮作系统有机无机肥配施协同土壤氮素转化的机制研究[D]. 南京:南京农业大学, 2010.
WU Chenglong. Mechanisms on soil nitrogen transformation as affected by integrated use of inorganic and organic fertilizer in a

rice-wheat cropping system[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2010. (in Chinese)

27 杨建昌,杜永,刘辉. 长江下游稻麦周年超高产栽培途径与技术[J]. 中国农业科学, 2008,41(6): 1611 - 1621.
YANG Jianchang, DU Yong, LIU Hui. Cultivation approaches and techniques for annual super-high-yielding of rice and wheat in the lower reaches of Yangtze River[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2008, 41(6): 1611 - 1621. (in Chinese)

28 TAYLOR J H. Reduction of traffic-induced soil compaction[J]. Soil & Tillage Research, 1992, 24(4): 301 - 302.

29 金轲,蔡典雄,吕军杰,等. 耕作对坡耕地水土流失和冬小麦产量的影响[J]. 水土保持学报, 2006,20(4): 1 - 5.
JIN Ke, CAI Dianxiong, LÜ Junjie, et al. Effects of tillage practices on erosion and winter wheat yield on sloping dryland[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2006, 20(4): 1 - 5. (in Chinese)

30 雷友,曹国鑫,牛新胜,等. 土壤深耕对冬小麦根系在土壤剖面分布的影响[J]. 现代农业科技, 2011(8): 272 - 273.
LEI You, CAO Guoxin, NIU Xinsheng, et al. Influence of deep tillage on distribution of wheat root system in soil profile[J]. Modern Agricultural Sciences and Technology, 2011(8): 272 - 273. (in Chinese)

31 孙忠英,李宝筏. 农业机器行走装置对土壤压实作用的研究[J]. 农业机械学报, 1998,29(3): 173 - 174.
SUN Zhongying, LI Baofa. Research on the effect of soil compaction caused by the device of running agricultural machinery[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 1998, 29(3): 173 - 174. (in Chinese)

32 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[J]. 应用生态学报, 2008,19(2): 351 - 356.
WANG Enheng, CHAI Yafan, CHEN Xiangwei. Effects of heavy machinery operation the structural characters of cultivated soils in black soil region of Northeast China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2008, 19(2): 351 - 356. (in Chinese)

33 王恩姮,陈祥伟. 大机械作业对黑土区耕地土壤三相比与速效养分的影响[J]. 水土保持学报, 2007,21(4): 98 - 102.
WANG Enheng, CHEN Xiangwei. Effect of heavy machinery operation on soil three phases and available nutrient in phaeozem region[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2007, 21(4): 98 - 102. (in Chinese)

34 张军,丁启朔,丁为民,等. 分层旋耕对水稻土耕层物理性状的影响[J/OL]. 南京农业大学学报, 2015,38(6): 1016 - 1022. http://nauxb.njau.edu.cn/oa/DArticle.aspx?type=view&id=201506022. DOI: 10.7685/j.issn.1000-2030.2015.06.022.
ZHANG Jun, DING Qishuo, DING Weimin, et al. Effect of stratified rotary tillage on paddy soil physical properties[J/OL]. Journal of Nanjing Agricultural University, 2015, 38(6): 1016 - 1022. (in Chinese)

35 孙少华,张文斌. 机械化深松技术及苏州地区适应性研究[J]. 安徽农业科学, 2012,40(20): 10701 - 10702.
SUN Shaohua, ZHANG Wenbin. Research of subsoiling techniques and their adaptability in Suzhou[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2012, 40(20): 10701 - 10702. (in Chinese)

36 杨艳山,丁启朔,丁为民,等. 田间原位综合耕作试验台设计与应用[J/OL]. 农业机械学报, 2016,47(1): 68 - 74. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no=20160110&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.01.010.
YANG Yanshan, DING Qishuo, DING Weimin, et al. Design and application of multi-purpose in-situ tillage tool testing platform[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(1): 68 - 74. (in Chinese)

37 ARVIDSSON J, KELLER T, GUSTAFSSON K. Specific draught for mouldboard plough, chisel plough and disc harrow at different water contents[J]. Soil and Tillage Research, 2004, 79(2): 221 - 231.

38 ŠAR EC P, ŠAR EC O. Employment characteristics of tine cultivators at deeper soil loosening[J]. Research in Agricultural Engineering, 2015, 203(2): 317 - 335.

39 WATTS C W, DEXTER A R. Traffic and seasonal influences on the energy required for cultivation and on the subsequent tilth[J]. Soil & Tillage Research, 1994, 31(4): 303 - 322.

40 辜松,刘立意,小松崎将一,等. 覆盖作物对土壤物理特性及旋耕作业的影响分析[J]. 农业机械学报, 2005,36(5): 41 - 45.
GU Song, LIU Liyi, KOMATSUZAKI Masakazu, et al. Effect of cover crops on soil physical properties and rotary tillage[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2005, 36(5): 41 - 45. (in Chinese)

41 杨金玲,李德成,张甘霖,等. 土壤颗粒粒径分布质量分形维数和体积分形维数的对比[J]. 土壤学报, 2008,45(3): 413 - 419.
YANG Jinling, LI Decheng, ZHANG Ganlin, et al. Comparsion of mass and volume fractal dimensions of soil particle size distributions[J]. Acta Pedologica Sinica, 2008, 45(3): 413 - 419. (in Chinese)

42 黄虎,王晓燕,李洪文,等. 固定道保护性耕作节能效果试验研究[J]. 农业工程学报, 2007,23(12): 140 - 143.
HUANG Hu, WANG Xiaoyan, LI Hongwen, et al. Experimental investigation on energy saving of controlled traffic conservation tillage[J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(12): 140 - 143. (in Chinese)

43 IBRAHMI A, BENTAHER H, HBAIEB M, et al. Study the effect of tool geometry and operational conditions on mouldboard plough forces and energy requirement: Part 1. Finite element simulation[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2015, 117: 258 - 267.

44 齐关宇,刘林,赵艳忠,等. 深松铲入土深度及铲形对耕作阻力影响[J]. 农机化研究, 2015(11): 161 - 165.
QI Guanyu, LIU Lin, ZHAO Yanzhong, et al. Effects of subsoiler's penetrating depth and spade shape on traction resistance[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2015(11): 161 - 165. (in Chinese)

(下转第 63 页)

13 陈黎卿,梁修天,曹成茂. 基于多体动力学的秸秆还田机虚拟仿真与功耗测试[J/OL]. 农业机械学报,2016,47(3):106 - 111. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20160315&journal_id=jcsam=1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.03.015.
CHEN Liqing, LIANG Xiutian, CAO Chengmao. Virtual simulation and power test of straw counters-field based on multi-body dynamics[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(3): 106 - 111. (in Chinese)

14 夏俊芳,贺小伟,余水生,等. 基于 ANSYS/LS - DYNA 的螺旋刀辊土壤切削有限元模拟[J/OL]. 农业工程学报,2013,29(10):34 - 41. http://www.tcsae.org/nygcxb/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20131005&journal_id=nygcxb=1. DOI: 10.3969/j.issn.1002-6819.2013.10.005.
XIA Junfang, HE Xiaowei, YU Shuisheng, et al. Finite element simulation of soil cutting rotary knife roller based on ANSYS/LS - DYNA software[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(10): 34 - 41. (in Chinese)

15 蒋建东,高洁,赵颖娣,等. 基于 ALE 有限元仿真的土壤切削振动减阻[J]. 农业工程学报,2012,28(增刊 1):33 - 38.
JIANG Jiandong, GAO Jie, ZHAO Yingdi, et al. Numerical simulation on resistance reduction of soil vibratory tillage using ALE equation[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(Supp. 1): 33 - 38. (in Chinese)

16 LEWIS B A. Manual for LS - DYNA soil material model 147(FHWA - HRT - 04 - 095)[R]. Department of Transportation. Federal Highway Administration, U. S. A., 2004.

17 翟立欣,姬长英,丁启朔,等. 犁体结构参数和工作参数优化设计[J/OL]. 农业机械学报,2013,44(8):57 - 62. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no=20130810&flag=1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2013.08.010.
ZHAI Lixin, JI Changying, DING Qishuo, et al. Optimized design of plough body structural and working parameters[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(8): 57 - 62. (in Chinese)

18 钟江,蒋建东,姜涛,等. 基于光滑粒子流体动力学仿真的板结土壤深旋耕技术[J/OL]. 机械工程学报,2010,46(19):63 - 69. http://www.cjmenet.com.cn/CN/abstract/abstract1505.shtml=1. DOI: 10.3901/JME.2010.19.063.
ZHONG Jiang, JIANG Jiandong, JIANG Tao, et al. Deep-tillage rotavator technology based on smoothed particle hydrodynamics simulation[J/OL]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(19): 63 - 69. (in Chinese)

19 汲文峰,贾洪雷,佟金,等. 通用刀片功率消耗影响因素分析与田间试验[J]. 农业机械学报,2010,41(2):35 - 41.
JI Wenfeng, JIA Honglei, TONG Jin, et al. Analysis of influencing factors on power consumption and field test of universal blade[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(2): 35 - 41. (in Chinese)

20 中国农业机械化科学研究院. 农业机械设计手册[M]. 北京:中国农业科学技术出版社,2007.

21 何义川,汤智辉,孟祥金,等. 2FK - 40 型果园开沟施肥机的设计与试验[J]. 农机化研究,2015(12):201 - 204.
HE Yichuan, TANG Zhihui, MENG Xiangjin, et al. Design and experiment of 2FK - 40 orchard ditching fertilizer combined machine[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2015(12): 201 - 204. (in Chinese)

(上接第 56 页)

45 郭志军,杜干,周志立,等. 土壤耕作部件宏观触土曲面减阻性能研究现状分析[J]. 农业机械学报, 2011,42(6): 47 - 52.
GUO Zhijun, DU Gan, ZHOU Zhili, et al. Actuality analysis of resistance-reducing properties on soil cultivating components with different macroscopic soil-engaging surfaces[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(6): 47 - 52. (in Chinese)

46 SPOOR G, FRY R K. Soil disturbance generated by deep-working low rake angle narrow tines[J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1983, 28(3): 217 - 234.

47 ALUKO O B, SEIG D A. An experimental investigation of the characteristics of and conditions for brittle fracture in two-dimensional soil cutting[J]. Soil and Tillage Research, 2000, 57(3): 143 - 157.

48 GODWIN R J, SPOOR G. Soil failure with narrow tines[J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1977, 22(3): 213 - 228.

49 MCKYES E, ALI O S. The cutting of soil by narrow blades[J]. Journal of Terramechanics, 1977, 14(2): 43 - 58.

50 GODWIN R J, SPOOR G, LEEDS-HARRISON P. An experimental investigation into the force mechanics and resulting soil disturbance of mole ploughs[J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1981, 26(6): 477 - 497.

51 LISOWSKI A, KLONOWSKI J, GREEN O, et al. Duckfoot tools connected with flexible and stiff tines: three components of resistances and soil disturbance[J]. Soil and Tillage Research, 2016, 158: 76 - 90.

52 丁启朔,丁为民,潘根兴,等. 土壤宏观力学结构与精准耕作[J/OL]. 中国农业科学, 2012,45(1): 26 - 33. http://www.chinaagrisci.com/CN/article/searchArticleResultByKeyword. DOI:10.3864/j.issn.0578-1752.2012.01.004.
DING Qishuo, DING Weimin, PAN Genxing, et al. Soil macro-structure and precision tillage[J/OL]. Scientia Agricultura Sinica, 2012, 45(1): 26 - 33. (in Chinese)

53 孟凤英,丁启朔,鹿飞,等. 冲击作用下粘性土壤破碎体的分形维数与影响因素[J]. 农业机械学报, 2009,40(3): 108 - 111.
MENG Fengying, DING Qishuo, LU Fei, et al. Fragmentation fractal dimensions of cohesive soil under impact and its influencing factors[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(3): 108 - 111. (in Chinese)

54 韩秋萍. 水稻土条件的旋耕机性能测试及小麦响应研究[D]. 南京:南京农业大学, 2011.
HAN Qiuping. Measurement of rotary tillor performance in paddy soil condition and wheat response research[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2011. (in Chinese)