doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.10.005

基于田间摄像的多参数水稻土深松扰动行为与效应研究

丁启朔[1,2]　李　杨[1,2]　BELAL Eisa Adam[3]　梁　磊[1,2]　何瑞银[1,2]　汪小昂[1,2]

(1. 南京农业大学工学院, 南京 210031; 2. 江苏省智能化农业装备重点实验室, 南京 210031;
3. 扎林盖大学农业工程系, 扎林盖 06)

摘要: 耕作机具的土壤扰动行为密切联系土壤失效机理与耕作效应,是优化耕作系统的重要依据。本研究通过土壤耕作原位综合测试平台开展单铲深松试验,从 5 个方位录制深松视频,同时配合使用微地貌测试、耕作阻力测试、EDEM 仿真、深松扰动剖面土壤紧实度测试和深松机理论检验,探究深松铲入土角 α 和耕深 D 对水稻土深松扰动过程、土壤失效机理及深松效应的影响。结果表明,摄像法提取的纵向碎土距离 R、扰动宽度 W 及抬土高度 H 与 α 和 D 显著相关,可用于水稻土深松扰动行为的定量表述。摄像法显示水稻土难以脆性断裂,铲两侧发生非对称性土壤剪切失效。土壤沿曲柄攀升,抬土高度 H 随 α 增大,随 D 减小,表明深松铲的设计参数和作业参数同时影响抬土能力。R 随对应耕深范围内铲的纵向水平长度 L 线性增加,W 随 α 线性增加。地表平整度 S 和扰动宽度 W 均在耕深 20 cm 时最大。深松土壤扰动行为的 EDEM 仿真从微观层面再现了摄像法记录的非对称性失效、侧向挤压失效和深松新月形失效现象,表明该离散元模型用于解析水稻土深松力学的科学性。EDEM 仿真进一步显示出应力集中区沿铲尖与铲柄破土刃周期性上下移动,同时也对铲下方底层土造成挤压。深松扰动剖面土壤紧实度等值线图验证了仿真过程中铲尖下方形成的土壤压实带,并直观展示出耕深 30 cm 时,犁底层土壤因侧向挤压流变形成的沟槽状紧实壁面。本文结合田间原位摄像法的多参数测试研究可为深松铲和耕作系统的优化提供依据。

关键词: 水稻土; 深松过程; 摄像法; 耕后效应

中图分类号: S222　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2019)10-0044-12

Subsoiler-induced Paddy Soil Disturbance and Effects Based on Video-assisted Multi-index Quantification

DING Qishuo[1,2]　LI Yang[1,2]　BELAL Eisa Adam[3]　LIANG Lei[1,2]　HE Ruiyin[1,2]　WANG Xiaochan[1,2]

(1. *College of Engineering*, *Nanjing Agricultural University*, *Nanjing* 210031, *China*
2. *Key Laboratory of Intelligent Agricultural Equipment in Jiangsu Province*, *Nanjing* 210031, *China*
3. *Department of Agricultural Engineering*, *Zalingei University*, *Zalingei* 06, *Sudan*)

Abstract: The pattern of soil disturbance by tillage tools is intimately linked with soil failure mechanisms and tilth quality, being a basis of tillage system optimization. In-situ video-assisted multi-index measurement is a pathway for the illustration on soil disturbance by tillage tools. The in-situ composite tillage test rig was applied for measuring subsoiler performance in paddy soil. Videos from five viewports were taken, and meanwhile, soil microrelief, traction, EDEM simulation, CI of disturbed soil profile and theoretical analysis were also measured to investigate how the chisel blade angle α and tillage depth D affected the pattern of soil disturbance, soil failure and tilth quality. Results showed that three indices can be derived from video-records, i. e., forward soil failure distance R, soil disturbance width W and lifting height H. All the three indices were significantly correlated with both α and D, and H was increased with α, while decreased with D, indicating that both design parameters and the working parameters of subsoiler can have its influence on soil lifting. R was linearly correlated with forward protruding length of the bent leg beneath soil surface, while W was increased with α. Both soil microrelief and soil disturbance width W reached the peak values at 20 cm tillage depth. EDEM simulation provided microscopic illustration on the soil disturbance by the subsoiler, reaffirming the video-recorded evidence

收稿日期: 2019-03-11　修回日期: 2019-04-29

基金项目: 江苏省农业科技自主创新基金项目(CX(17)1002)、国家重点研发计划项目(2016YFD0300908)和江苏省苏北科技专项(SZ-LYG2017008)

作者简介: 丁启朔(1968—),男,教授,主要从事土壤-植物-机器系统科学研究,E-mail: qsding@njau.edu.cn

of non-balanced soil failure, lateral compression failure and crescent failure patterns. Correspondence between EDEM simulation and video-recording also approved the scientific validness of the discrete models. EDEM simulation also revealed that stress-concentration region periodically shifted up and down along the bent leg. Downward compression effect also appeared beneath the chisel. The CI contour map of subsoiling trench profile not only affirmed the simulated compressing region, but also revealed the sideway rheological soil displacement and the resulted compact side walls at 30 cm tillage depth. The results proved that video-assisted multi-index measurement was an important means for optimized subsoiler design for paddy soil.

Key words: paddy soil; subsoiling; video recording; tillage effects

0　引言

土壤深松已成为保护性农业的一项重要耕作技术[1],通过加深耕作层、改善土壤孔隙、提高土壤透水和透气性实现作物增产[2-6]。在生产实践中,土壤深松与秸秆还田[7-9]、深松与轮耕系统设计[10-12]、深松保障作物增产等研究内容不断拓展[13-15],兼顾各种复合效益的深松机具设计也在不断完善[16-19]。在深松理论上,有限元[20-21]和离散元[22-25]等仿真模型的应用也深化了人们对深松等土壤耕作力学机理的认识。尽管如此,不同田间条件下深松机具在作业过程中的一些扰动行为及其效应仍有待揭示,例如,深松机具在作业过程中的碎土和土壤抬升等行为需要准确描述,碎土与抬土行为造成的微地貌及土层紧实度变化更需要直观表达,只有如此才能定量表述基于触土部件结构设计和作业参数的土壤深松扰动行为,进而优化耕作系统。

深松过程的碎土与土垡抬升所造成的微地貌及土壤紧实度变化也进一步决定着是否需要配合二次整地等后续作业,因此关系到保护性耕作系统的设计。可见,揭示土壤耕作的过程行为也是当前的一个技术难题,涉及能否简化耕作流程、实现复式作业,甚至整合深松、播种施肥及秸秆还田的技术可行性,更关系到能否解决好保护性农业需要最大程度疏松土层,但同时要求节约能耗的问题,以及需要加深耕层、但同时要求不扰乱土层和减少微地貌破坏的现实性矛盾。

基于对有效松土和节能降阻的认识,TAMÁS等[22]和刘俊安等[26]测试了不同深松参数对土壤孔隙度或紧实度的影响;基于对深松和最小化微地貌破坏的认识,黄玉祥等[27]利用离散元和高速摄影技术探讨了土壤深松的宏观及微观扰动;杭程光等[28]使用高速摄影技术捕捉了不同铲尖对土壤的扰动。由于深松作业受土壤质地、含水率、结构状态、生物质等多重因素影响[4],且现有研究成果多出自室内重塑土试验,造成学术界对田间深松过程中土壤扰动行为及其导致的土壤微地貌和紧实度变化规律的认识存在差异。因此在进行保护性耕作系统设计时,应当系统开展结合田间原位摄像的多维参数研究,以解析土壤深松扰动行为及效应。

本研究采用土壤耕作原位综合测试平台进行单铲深松试验,从 5 个方位协同录制深松作业视频,以获取关键的水稻土深松扰动行为指标,结合深松前后的土壤微地貌和紧实度变化、耕作阻力测试与EDEM 仿真模拟,定量表达不同入土角和耕深条件下的水稻土深松扰动行为及效应。

1　材料与方法

1.1　试验地概况

试验地位于南京市六合区八百桥(118°59′E,31°98′N),该地区常年稻麦轮作,土壤类型为壤质粘土,0 ~ 30 cm 土层土壤物理参数见表 1,试验前清除地表留茬。

表 1　0 ~ 30 cm 土层基础物理参数

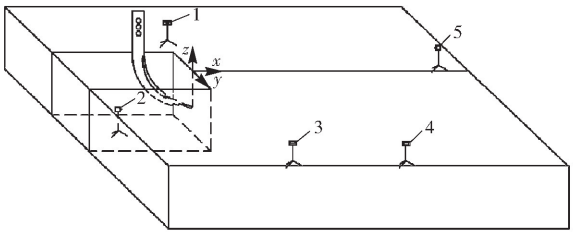
Tab. 1　Basic physical properties in 0 ~ 30 cm soil layer

土层深度/cm	容重/(g·cm^{-3})	含水率/%	孔隙度/%
0 ~ 5	1. 24	36. 32	53. 21
5 ~ 10	1. 27	34. 47	52. 08
10 ~ 15	1. 34	32. 82	49. 43
15 ~ 20	1. 55	25. 43	41. 51
20 ~ 25	1. 56	24. 97	41. 13
25 ~ 30	1. 58	23. 86	40. 38

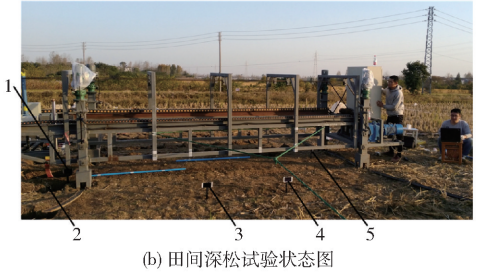
1.2　原位深松摄像试验设计

田间试验使用土壤耕作原位综合测试平台[29],挂接单铲,牵引速度为 0. 1 m/s(图 1b)。试验前沿深松铲行进方向(x 轴)建立坐标系(图 1a),5 台摄像机按表 2 所示空间坐标布局。

鉴于深松铲入土角 α 及耕深 D 对作业性能的显著影响[24,30-34],参照文献[35],确定 α 为 15°、22. 5°、30°;深松或锄耕(Chiseling,多见于西方保护性耕作机具)的耕深范围在 10 ~ 30 cm[36-39]。另外生产中通常考虑到稻作制条件大于 30 cm 的深松泥脚过深,影响机具作业且破坏阻渗层,故确定 D 为 10、20、30 cm,本试验双因素共9种处理(见表3),



(a) 机位空间坐标示意图



(b) 田间深松试验状态图

图 1 水稻土原位深松试验机位布置图

Fig. 1 Camera positions of subsoiling experiment

表 2 摄像机位空间坐标

Tab. 2 Camera space coordinates cm

机位号	x	y	z
1	0	-75	30
2	-45	0	-30
3	175	175	30
4	325	175	30
5	500	0	30

表 3 深松过程参数

Tab. 3 On-site parameters of subsoiling

入土角/(°)	耕深/cm	纵向碎土距离/cm	抬土高度/cm	扰动宽度/cm	地表平整度/mm	耕作阻力/kN
15.0	10	33.09^{cA}	20.10^{aC}	23.06^{aA}	20.13^{aA}	0.54^{aA}
	20	48.54^{cB}	11.92^{aB}	35.07^{aC}	28.46^{aB}	1.90^{aB}
	30	52.18^{cC}	4.92^{aA}	26.35^{aB}	21.99^{aA}	4.53^{aC}
22.5	10	26.62^{bA}	23.55^{aC}	26.67^{bA}	23.43^{aA}	0.67^{bA}
	20	41.86^{bB}	13.75^{aB}	40.15^{bC}	36.23^{aB}	2.21^{bB}
	30	46.28^{bC}	5.01^{aA}	32.78^{bB}	17.85^{aA}	5.17^{bC}
30.0	10	21.63^{aA}	27.72^{bC}	30.73^{cA}	22.41^{aA}	0.84^{cA}
	20	39.10^{aB}	16.63^{bB}	43.18^{cC}	34.06^{aB}	2.63^{cB}
	30	40.59^{aC}	8.11^{bA}	34.48^{cB}	24.15^{aA}	5.64^{cC}

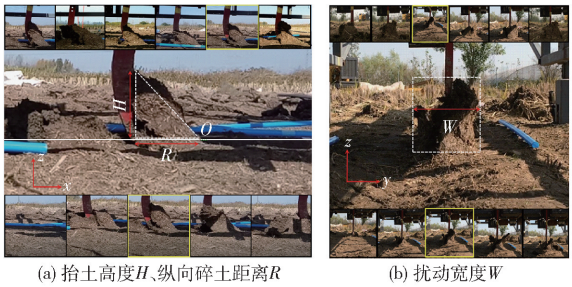
注：同列相同字母上标表示不同处理之间差异不显著($P > 0.05$)；小写字母表示入土角的显著性，大写字母表示耕深的显著性。

参照标准 JB/T 9788—1999《深松铲和深松铲柄》仿制一组深松铲用于试验。

1.3 试验操作和测试方法

1.3.1 深松过程的摄像法测试

深松过程的土壤扰动行为由 5 个机位协同拍摄。鉴于深松铲的抬土过程是周期性发生，仅以摄像中的抬土最高点静态图像提取深松过程行为指标，具体包括 x、y、z 方向上的纵向碎土距离 R、扰动宽度 W 和抬土高度 H。其中，H 和 R 从机位 3、4 的视频中提取(图 2a)，W 从机位 5 的视频中提取(图 2b)，视频处理使用 Digimizer 软件。每个处理重复 6 次，采用 Excel 2010 和 SPSS 19.0 软件对试验数据进行统计分析。图 2 上部组图为 6 次重复样本，下部组图为一次完整深松过程的动态展示，其中黄色边框为标注大图。



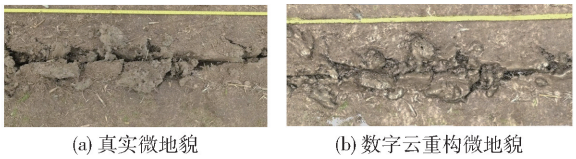
(a) 抬土高度H、纵向碎土距离R (b) 扰动宽度W

图 2 土壤动态扰动参数示意图

Fig. 2 Soil dynamic disturbance parameters

1.3.2 深松前、后微地貌测试

本文使用小蚁 4K + 运动摄像机(900 万像素，视频帧率 30 f/s)以 0.1 m/s 的速度分别对深松前、后土壤微地貌进行 3 次不同角度和高度的拍摄，利用 Adobe-Premiere 软件提取高精度视频帧(图 3a)用于 Agisoft-Photoscan 软件三维重建，结合地面控制点坐标后获取数字化微地貌模型，利用 Geomagic-Studio 软件的网格修补模块对微地貌三维点云模型进行修复(图 3b)，使用曲线模块提取土壤表面模型的样线作为地表线[40]，并在深松后地表线上过最高点做一条水平直线为基准线，在整个深松铲深松宽度范围内以固定值(30 mm)等分标记测点，在深松作业前、后根据比例采样获取各测点至水平基准线的垂直距离，计算出平均值和标准差，并以标准差表示地表平整度，上述试验分别测量 5 次取平均值[25]。摄像法测试完成后，采用刘俊安等[26]的方法测得深松扰动剖面的土壤紧实度等值线图。耕作阻力由土壤耕作原位综合测试平台测试记录[29,36]。



(a) 真实微地貌 (b) 数字云重构微地貌

图 3 耕后土壤微地貌

Fig. 3 Disturbed microrelief

垂直距离与平整度计算式为

$$\begin{cases} a_k = \dfrac{\sum\limits_{j=1}^{n_k} a_{kj}}{n_k} \\ S_k = \sqrt{\dfrac{\sum\limits_{j=1}^{n_k} (a_{kj} - a_k)^2}{n_k - 1}} \end{cases} \tag{1}$$

式中　a_k——第 k 次测量的深松前、后地表至水平基准线的垂直距离

a_{kj}——第 k 次测量中第 j 个等分点的深松前、后地表至水平基准线的垂直距离

n_k——第 k 次测量中的测试点数

S_k——第 k 次测量的地表平整度

2　结果与讨论

2.1　摄像法所得深松过程参数与效应

2.1.1　摄像法所得深松过程参数

表 3 表明，入土角 α 和耕深 D 对纵向碎土距离 R、抬土高度 H 和扰动宽度 W 均影响显著，表 4 汇总了水稻土深松的扰动行为指标与 α 和 D 间的拟合关系，表明 H 随 α 呈线性增加，而 LI 等[24]和张锐等[41]研究成果表明随着 α 增大，机具推土能力增强，而抬土能力减弱。视频的回放进一步表明水稻土的深松过程不以脆性断裂为主，而是绕着 O 点（图 2a），沿着曲柄段向上攀升，至直柄段被剪切回落。

表 3、4 所示 α 和 D 对 R 的影响规律与 TONG 等[42]和 GODWIN 等[43]的研究结果一致，R 随对应耕深范围内铲的纵向水平长度 L[44]线性增加。不仅如此，α 和 D 对扰动宽度 W 也有显著影响。W 随 α 线性增加，因为铲前方土壤位移场变大，扰动程度增强，新月形失效面宽度[43]随 α 增加，这与张锐等[41]和 TONG 等[42]的研究结果一致。

表 4　水稻土深松作业性能指标与深松铲入土角、耕深的关系

Tab. 4　Regressional analysis on subsoiler performance parameters with respect to subsoiling parameters

性能指标	拟合方程	决定系数 R^2
抬土高度	$H_{10}=0.508\alpha+12.356$	0.997
	$H_{20}=0.314\alpha+7.025$	0.984
	$H_{30}=0.213\alpha+1.231$	0.770
	$H_{15}=-0.759D+27.483$	0.998
	$H_{22.5}=-0.927D+32.649$	0.999
	$H_{30}=-0.980D+37.091$	0.994
纵向碎土距离	$R=1.810L-8.006$	0.978
扰动宽度	$W_{10}=0.511\alpha+15.321$	0.999
	$W_{20}=0.541\alpha+27.300$	0.979
	$W_{30}=0.542\alpha+19.015$	0.899
耕作阻力	$F_{10}=0.020\alpha+0.233$	0.994
	$F_{20}=0.049\alpha+1.152$	0.993
	$F_{30}=0.074\alpha+3.448$	0.992
	$F_{15}=0.199e^{0.106D}$	0.989
	$F_{22.5}=0.255e^{0.102D}$	0.991
	$F_{30}=0.345e^{0.095D}$	0.987

注：H_{10}、H_{20}、H_{30}表示耕深 D 为 10、20、30 cm 的抬土高度，H_{15}、$H_{22.5}$、H_{30}表示入土角 α 为 15°、22.5°、30°的抬土高度。其余类似。

2.1.2　水稻土深松的微地貌特征

通过摄像法获得重构数字云微地貌，并从中提取地表平整度参数与针板法测量结果的平均相对误差为 8.6%（表 5），表明数字云重构三维土壤模型能够高效、准确地提供微地貌信息。

表 5　摄像法与针板法测试微地貌误差分析

Tab. 5　Error analysis on video measurement and pin-board measurement

入土角 α/(°)	耕深 D/cm	摄像法地表平整度/mm	针板法地表平整度/mm	地表平整度相对误差/%
试验前		3.99	4.83	17.39
15.0	10	20.13	22.93	12.21
	20	28.46	30.79	7.57
	30	21.99	24.31	9.54
22.5	10	23.43	20.53	14.13
	20	36.23	34.98	3.57
	30	17.85	17.73	0.68
30.0	10	22.41	19.69	13.81
	20	34.06	35.07	2.88
	30	24.15	25.10	3.78

地表平整度 S 是评价耕作质量的重要指标[25,28,45]，表 3、5 表明 D 对 S 有显著影响，且 S 随 D 先增大后减小，这一变化规律与以往研究所得结论一致[36]。

摄像法所得抬土高度 H 随 D 显著减小，但地表平整度变化趋势与此不同。视频显示在 10 cm 耕深时土壤发生新月形失效，碎土充分，土块间的粘接呈完全断裂破坏，土垡回落轨迹为从铲两侧翻落至地表，回落距离最大；随着耕深增加，耕作土层越加深厚致密，土壤失效模式转变为新月形失效和侧向挤压失效[43]，土壤剪切破碎不充分，土垡与两侧土壤粘连，土垡回落距离显著减小，这也进一步支撑了针对土层状态来设计深松铲的理论假说[46]。

2.1.3　摄像法所得土壤剖面扰动过程

从机位 1、2 的视频按时间序列提取土壤扰动过程（图 4），其中 2 s 时铲尖入土，3.7 s 时铲尖“挤”进土层且底层土沿水平方向产生扩展裂纹，同时铲尖上方的土壤开始向上运动，铲尖下方的土壤则因为深松铲的挤压向下运动。4.6 s 时，剪切失效的土体沿深松铲曲柄段抬升，被抬升的土体向前和向上运动，同时土壤剖面的裂纹继续向侧斜上方延伸，摄像显示的土壤剖面失效过程与已有的研究成果一致[21,23,27,47-49]；铲尖和曲柄附近的底层土受到挤压剪切形成沟槽。5.3 s 时被抬升的土体受深松铲直柄和曲柄段剪切产生土垡和裂纹，但摄像显示仅有铲右侧的土垡被继续剪切抬起，土体失效过程呈现出非对称性，前人研究成果表明凿形铲等窄齿耕作



(a) 机位1



(b) 机位2

图 4 土壤剖面扰动过程

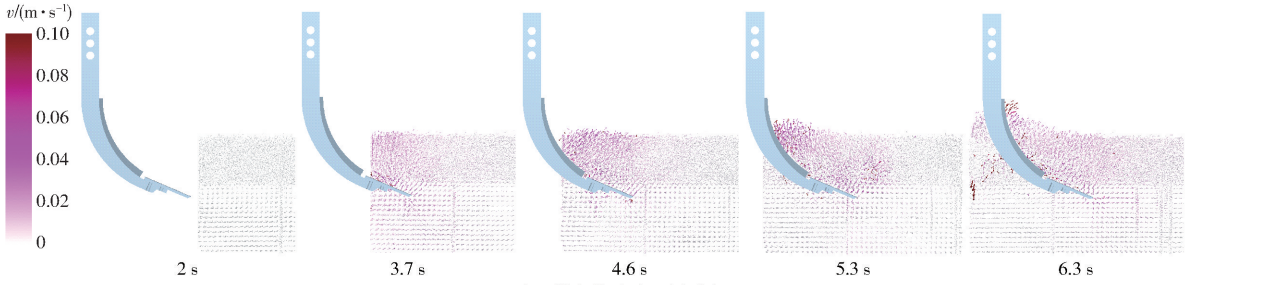
Fig. 4 Soil disturbance process recorded at stations 1 and 2

部件作业形成的地表裂纹呈左右交替性分布[30,36]，这与本文研究结果一致。6.3 s 时深松铲已经穿越了抬升的土体，大部分土垡完成回落，仅有少量土垡黏附在深松铲上继续前移。可见，摄像法直观展示了水稻土深松过程中，深松铲结构与土壤扰动行为的紧密联系，可为今后深松铲的设计和优化提供决策依据。

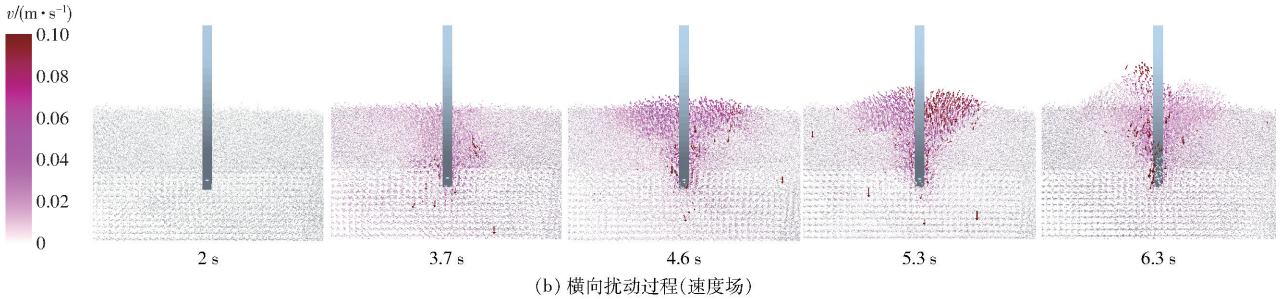
2.2 水稻土深松的 EDEM 触土过程分析

近年来大量的离散元(Discrete element method，DEM)模型被用于解析土壤深松的发生机理[23-25,27,41]，本文沿用经过试验标定和检验的湿粘水稻土 EDEM 模型仿真方法[49]，获取水稻土深松触土过程时间序列图(图 5)，分别从纵向和横向剖面 2 个视窗同步解析摄像法记录的结果。

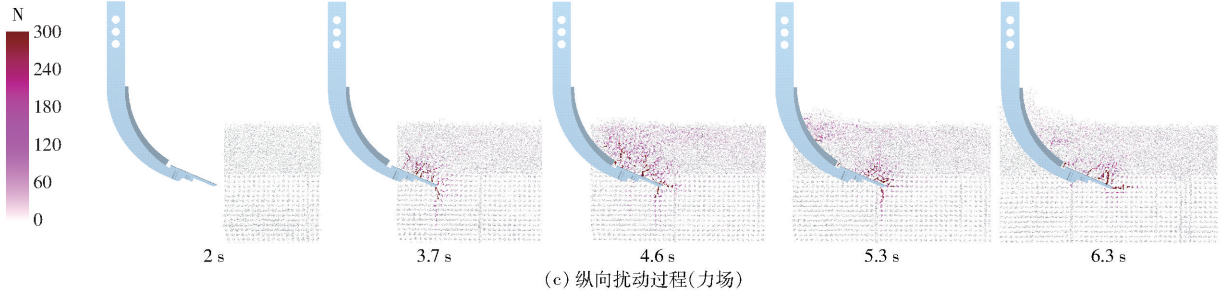
前人的研究成果证明离散元仿真能够准确预测耕作阻力[23-25]，本文耕作阻力 F 的仿真值变化趋势与试验值一致，平均相对误差为 6.6%，EDEM 仿真所得耕作阻力符合实测结果(表 6)。但更关键的



(a) 纵向扰动过程(速度场)



(b) 横向扰动过程(速度场)



(c) 纵向扰动过程(力场)

图 5 土壤扰动过程分析

Fig. 5 Simulation of soil disturbance processes

是 DEM 便于从微观颗粒层面解析耕作时土壤的运动与受力[41]。由图 5 可知，3.7 s 时铲尖附近的底层土壤因为被挤压获得速度，耕作层部分土壤随底层土抬升获得速度，铲尖上方的土壤向上运动，铲尖下方的土壤则向下运动，抬升区和压实区开始形成，应力集中区主要存在于铲尖周围。

表 6　深松阻力 EDEM 仿真与实测对比

Tab. 6　Comparison of subsoiling draft of EDEM simulated and measured results

入土角 α/(°)	耕深 D/cm	耕作阻力 试验值/kN	耕作阻力 仿真值/kN	耕作阻力 相对误差/%
15.0	10	0.54	0.59	9.26
	20	1.90	2.13	12.10
	30	4.53	4.74	4.64
22.5	10	0.67	0.68	1.49
	20	2.21	2.43	9.95
	30	5.17	5.30	2.51
30.0	10	0.84	0.88	4.76
	20	2.63	2.88	9.51
	30	5.64	5.93	5.14

4.6 s 时主要为曲柄作用阶段，临界深度(15 cm)以上疏松耕作层发生新月形失效，以下的致密底层土发生侧向挤压失效[30,36,43,50-51]。红色土壤颗粒所呈现的扰动边界轮廓线与摄像法实测相符。铲周边土壤速度最大，等速度土壤颗粒分布曲线与铲柄的弧线基本吻合，这与黄玉祥等[27]的研究结果一致。其中，新月形失效区的土壤速度方向主要为向上、向前和向两侧，侧向失效区的土壤速度方向主要为向前和向两侧。应力集中区从铲尖附近沿着曲柄破土刃[52]向上延伸，因为此时曲柄正剪切抬升土层。

5.3 s 时铲右侧的失效土壤继续向上运动且获得了更大的速度，而左侧土壤的运动速度与 4.6 s 无差异(图 5b)。横向扰动过程显示的土壤非对称性失效进一步表明离散元模型用于解析土壤耕作力学的科学性。另外此时应力集中区并没有继续上移，反而下移至铲尖周围的土壤，这是因为待剪切破碎的土体经过曲柄的抬升已较为松散，剪切力较小，而铲尖此时仍在挤压底部的致密土体。

6.3 s 时深松铲已经完成了对土壤的局部扰动，剪切形成的土垡大部分回落至地表和深松沟，少量黏附在深松铲上，铲尖此时已进入到下一周期的“挤压入土”阶段，形成摄像法观测到的循环往复抬土和碎土现象。

EDEM 仿真显示在一个完整的深松作业周期内，土壤的应力集中区首先发生在铲尖附近，随后上移至曲柄附近，之后又回到铲尖附近。从“动态设计”的角度上看，触土曲面前方应力集中区的周期性波动对于土壤的深松效果和耕作部件的力学性能的提升是有利的[51]，这同样为振动深松实现节能降阻提供一定的理论支撑[18,53-54]。

2.3　实测深松扰动剖面土壤紧实度

上述摄像法、EDEM 仿真及力学测试在用于解析水稻土深松过程行为和土壤失效机理时各有技术优势，但尚无法反映出深松扰动剖面的土壤紧实度分布状况(图 6)，表明今后针对田间原位土壤深松研究需要综合运用多种测试方法。

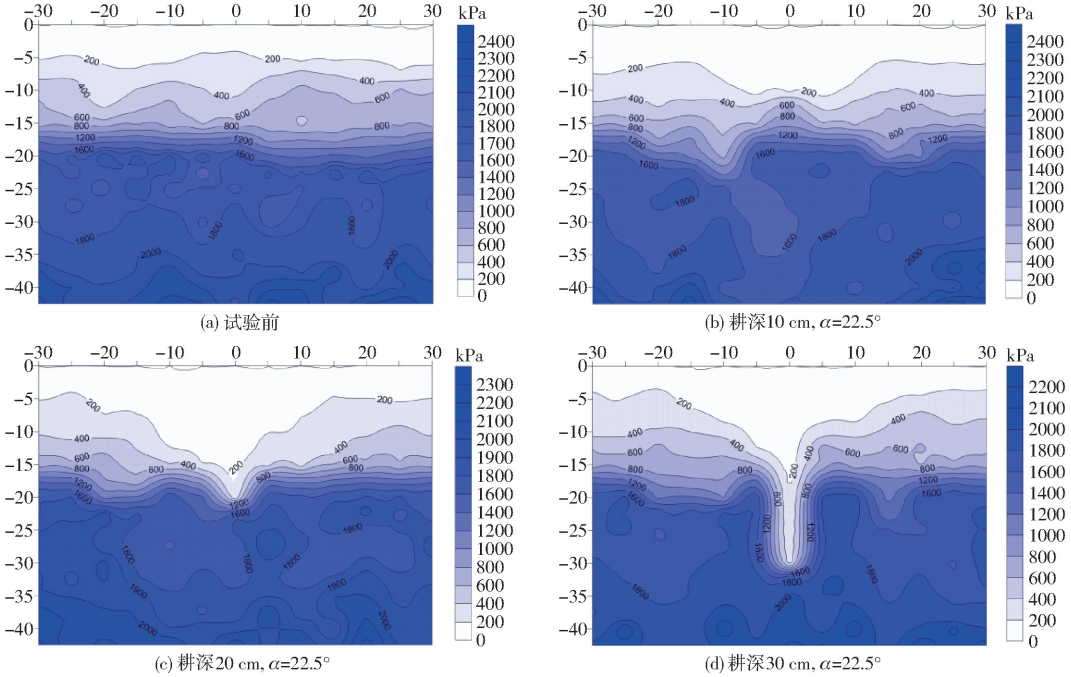


图 6　深松扰动剖面紧实度等值线图

Fig. 6　Contours of soil cone index of subsoiling trench profile

前人研究成果表明深松铲的设计参数和作业参数对土壤孔隙度和紧实度的影响并不一致[21,24,26,55-56]。颜色较浅的区域为深松扰动区,与实测深松沟型相符。图 6 表明,α 对深松扰动剖面紧实度分布无显著影响,这与 LI 等[24]和刘俊安等[26]的研究成果一致;D 对其影响显著,这与 LI 等[24]和 RAHMAN 等[31]的研究成果一致。

试验前多次测得 0 ~ 15 cm 耕作土层的紧实度平均值在 400 kPa 附近,故选取深松后紧实度等值线图中小于 400 kPa 的区域为有效深松区。分土层分析得知,对于 0 ~ 10 cm 土层,3 种耕深的紧实度等值线分布基本一致,这是因为熟土层无法显现出深松的作用[56],因此尽可能降低深松铲在该土层的扰动是保护性深松系统设计的关键;对于 10 ~ 20 cm土层,当耕深为 20 cm 时,15°、22.5°、30°入土角所对应的有效深松区面积依次为 15 146.08、16 373.98、16 997.62 mm^2,当耕深为 30 cm 时,3 种入土角所对应的有效深松区面积依次为 7 488.43、8 223.22、8 874.58 mm^2,可见耕深为 20 cm 时,深松铲提供了关键土层(犁底层)的最大扰动;对于 20 ~ 30 cm 土层,当耕深为 30 cm 时,3 种入土角所对应的有效深松区面积依次为 1 480.59、1 488.52、1 947.38 mm^2,土壤扰动效果显著下降,这是因为该处土层位于临界深度以下,发生侧向挤压失效,紧实度等值线图呈现出狭窄的沟槽形态(图 6d),这不仅表明铲对此处土层的扰动能力急剧减弱,而且反映出水稻土深松的耕作力学特点。

所有处理的铲尖下方都出现土壤紧实度等值线密集分布的现象,说明此处土壤紧实度变化剧烈,产生土壤压实,这与前人研究成果一致[44,57-58],且这一现象在 EDEM 仿真和机位 2 的视频回放中得到验证。

2.4 结合深松理论的对比检验

2.4.1 土壤扰动过程理论检验

结合深松铲功能结构和土壤条件的扰动过程分析是对摄像法、耕作阻力测试、EDEM 仿真、扰动剖面土壤紧实度测试的必要检验,可对上述试验结果提供宏观的土壤耕作力学解析。以深松铲为参考系对曲柄圆弧进行微元分析得到抬土高度 H(图 7a)为

$$H = L'\tan\varepsilon \tag{2}$$

式中 L'——扰动土体攀升过程中,任一时刻沿水平方向的运动距离

ε——曲柄圆弧切线与水平线所夹锐角

因本文所用结构参数 $\alpha_1 < \alpha_2 < \alpha_3$,即 $\varepsilon_1 < \varepsilon_2 < \varepsilon_3$,故抬土高度 $H_1 < H_2 < H_3$。

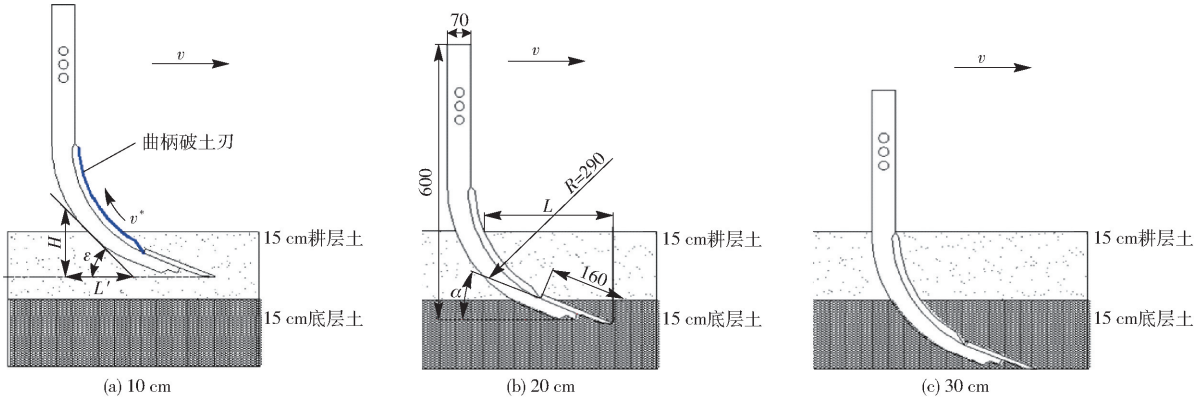


图 7 不同耕深作业情况

Fig. 7 Performances of different subsoiling depths

稻作区的浅薄耕层源自长期浅旋耕作、反复的机械压实及稻季淹水沉浆过程,大范围的区域调查表明水稻土的有效耕层仅为 11 ~ 17 cm[59],基于本试验地的土壤剖面分析也发现稻季土壤排干后的有效耕层在 15 cm 左右[49]。当耕深为 10 cm 时,剪切的土层整体容重和剪切模量较小,土体的自由移动和动力条件优越[60],易剪切抬升,另外地表以上的曲柄圆弧较长,扰动土体有足够的行程沿曲柄破土刃攀升(图 7a);当耕深增大时,剪切的土层整体容重和剪切模量增大,地表以上曲柄弧长减小,土层抬升难度增大的同时又减小了其攀升行程,抬升的土层很快到达直柄处被剪切回落,因此如摄像所示,抬土高度 H 随耕深 D 减小。

基于深松铲-土壤系统相互作用的探讨也能够解释 W 的变化规律,随着耕深增加到 20 cm,深松铲的扰动土体量增加,深松铲的触土范围也随之从铲尖和曲柄下部演变成铲尖和全部的曲柄,铲的扰动能力得以充分发挥。当耕深增大至 30 cm 时,相当部分的深松铲功能区淹没在致密紧实的底层土(图 7c),耕作阻力急剧增大,铲的扰动能力被大大削弱[49],W 减小。

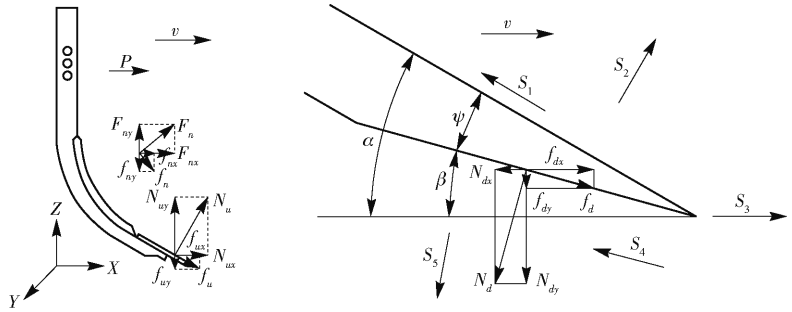
增大抬土高度有利于充分利用耕作能量疏松

土层，但是过大的抬土高度往往会增大耕后地表平整度，也不利于后续播种工作[45]，甚至导致芯土层翻落至地表，这违背了松动土层而非搅浑土层的农艺要求[61]。另外，表 3、4 也表明 α 和 D 的组合影响到纵向碎土距离 R 的大小，已有研究为深松铲的纵向碎土距离 R 提供了理论参考[42-43]，其中最易于结合本文的理论分析是郭志军等[44]提出的耕深范围内铲的纵向水平长度 L（图 7b）。虽然增加 L 可以有效提升铲对前方土壤的扰动能力，但是这又必然对深松铲的刚度和强度提出更高的要求，因此结合土层物理特点及农艺要求，合理确定深松铲设计参数 α 和作业参数 D 是深松铲改善耕作质量的关键，为此仍需要大量的田间原位试验研究。

2.4.2　深松铲-土壤系统受力理论检验

深松铲的 3 个功能区包括铲尖、曲柄和直柄，3 个功能区的受力分析受到了普遍关注[28,62-63]。

图 8 显示扰动土体主要受铲尖上、下表面的正压力 N_u、N_d 和摩擦力 f_u、f_d 作用，各力的水平分力分别为 N_{ux}、f_{ux}、N_{dx}、f_{dx}，竖直分力分别为 N_{uy}、f_{uy}、N_{dy}、f_{dy}，曲柄处土壤主要受到垂直于深松铲刃口的切削力 F_n 和摩擦力 f_n，直柄处的土壤主要由铲的挤压力 P 剪切破碎；由图 8 受力分析可知，曲柄和铲尖上表面处土壤会沿 S_3 方向向前运动、同时沿 S_2 方向向上运动形成扰动边界，铲尖下表面土壤则沿 S_5 方向向下运动形成新的土壤压实带，此外，随着深松铲的前进，切削力 F_n 则“挤开”周围土壤形成深松沟槽，其中部分土壤由于铲和周围土体的挤压，沿 S_1 和 S_4 方向向后流动；而其中的耕作阻力 F 对于机具的优化设计和动力配套最为重要[38]。由表 3、4 可知，α 和 D 都对耕作阻力 F 影响显著，F 随 α 线性增加，这与已有的研究结果一致[41]。



(a) 铲尖上部、曲柄、直柄处土壤受力　　(b) 铲尖下部土壤受力

图 8　深松铲-土壤系统受力分析

Fig. 8　Force analysis for subsoiler-soil system

对扰动土体进行水平方向上受力分析得

$$F = P + F_{nx} + f_{nx} + N_{ux} + f_{ux} + N_{dx} + f_{dx} \tag{3}$$

其中

$$F_{nx} = F_n \sin\varepsilon$$

$$f_{nx} = f_n \cos\varepsilon = \mu F_n \cos\varepsilon$$

$$N_{ux} = N_u \sin\alpha$$

$$f_{ux} = f_u \cos\alpha = \mu N_u \cos\alpha$$

$$N_{dx} = N_d \sin\beta$$

$$f_{dx} = f_d \cos\beta = \mu N_d \cos\beta$$

$$\beta = \alpha - \psi$$

整理得

$$F = P + F_n(\sin\varepsilon + \mu\cos\varepsilon) + N_u(\sin\alpha + \mu\cos\alpha) + N_d(\sin(\alpha - \psi) + \mu\cos(\alpha - \psi)) \tag{4}$$

式中　μ——深松铲与土壤之间的动摩擦因数

ψ——深松铲铲尖刃角

β——深松铲铲尖隙角

查阅文献[49]可知，$\mu \leqslant 0.35$，故 F 随 α 增加。另外试验发现，入土角为 15°时，深松铲的入土性能较差，因此在耕作阻力可接受的范围内，建议选择入土角为 22.5°的深松铲。

另外 F 随 D 近似指数增加，这与前人研究成果一致[30,38,64]，且耕深大于 20 cm 时，耕作阻力急剧增加，考虑到不同耕深土壤有效深松区域分布，20 cm 耕深最佳[36,39]，若考虑深松后最小化微地貌破坏和利于小麦根系下扎等农艺要求[3,65-67]，30 cm 耕深最佳。

3　结论

（1）田间原位摄像法能够提供深松过程的土壤扰动行为参数，进而有利于定量深松铲设计参数和作业参数对耕后地表平整性和土壤紧实度的影响。

（2）田间原位摄像法、土壤微地貌三维重构、耕作阻力测试、EDEM 仿真、深松扰动剖面土壤紧实度测试等方法分别提供了深松过程及深松前后的多方面作业参数，今后针对土壤耕作力学的原位精准研究需要使用多种测试方法。

（3）针对稻麦轮作区水稻土耕层浅薄的问题，采用 22.5°入土角并进行 20 cm 深松作业能够在节约能耗的情况下实现最大土壤扰动。

（4）从耕后地表平整性方面考虑，30 cm 耕深最优，同时可以提供更深的沟槽孔隙增强田间灌排能力。

参 考 文 献

[1] 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)

[2] 丁昆仑, HANN M J. 耕作措施对土壤特性及作物产量的影响[J]. 农业工程学报, 2000, 16(3):28 - 31.
DING Kunlun, HANN M J. Effects of soil management on soil properties and crop yield [J]. Transactions of the CSAE, 2000, 16(3):28 - 31. (in Chinese)

[3] 梁金凤, 齐庆振, 贾小红, 等. 不同耕作方式对土壤性质与玉米生长的影响研究[J]. 生态环境学报, 2010, 19(4):945 - 950.
LIANG Jinfeng, QI Qingzhen, JIA Xiaohong, et al. Effects of different tillage managements on soil properties and corn growth [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2010, 19(4):945 - 950. (in Chinese)

[4] 罗锡文, 邵耀坚, 邱国庆, 等. 土壤深松技术在甘蔗生产中的应用[J]. 农业机械学报, 1997, 28(1):40 - 43.
LUO Xiwen, SHAO Yaojian, QIU Guoqing, et al. The application of soil deep loosening technique in sugarcane production [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 1997, 28(1):40 - 43. (in Chinese)

[5] 罗锡文, 李就好, 朱余清, 等. 耕作方式对砖红壤物理特性和含水率的影响[J]. 农业机械学报, 2006, 37(12):62 - 66.
LUO Xiwen, LI Jiuhao, ZHU Yuqing, et al. Effect of tillage methods on soil physical properties and moisture content of latosol [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006, 37(12):62 - 66. (in Chinese)

[6] 何明, 高焕文, 董培岩, 等. 一年两熟地区保护性耕作深松试验[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(7):58 - 63.
HE Ming, GAO Huanwen, DONG Peiyan, et al. Sub-soiling experiment on double cropping and conservation tillage adopted area [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(7):58 - 63. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20180707&journal_id = jcsam. DOI:10.60 41/j.issn.1000-1298.2018.07.007. (in Chinese)

[7] 田慎重, 王瑜, 张玉凤, 等. 旋耕转深松和秸秆还田增加农田土壤团聚体碳库[J]. 农业工程学报, 2017, 33(24):133 - 140.
TIAN Shenzhong, WANG Yu, ZHANG Yufeng, et al. Residue returning with subsoiling replacing rotary tillage improving aggregate and associated carbon [J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(24):133 - 140. (in Chinese)

[8] 田慎重, 郭洪海, 董晓霞, 等. 耕作方式转变和秸秆还田对土壤活性有机碳的影响[J]. 农业工程学报, 2016, 32(增刊2):39 - 45.
TIAN Shenzhong, GUO Honghai, DONG Xiaoxia, et al. Effect of tillage method change and straw return on soil labile organic carbon[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(Supp.2):39 - 45. (in Chinese)

[9] 徐永刚, 马强, 周桦, 等. 秸秆还田与深松对土壤理化性状和玉米产量的影响[J]. 土壤通报, 2015, 46(2):428 - 432.
XU Yonggang, MA Qiang, ZHOU Hua, et al. Effects of straw returning and deep loosening on soil physical and chemical properties and maize yields [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2015, 46(2):428 - 432. (in Chinese)

[10] 贺建华, 王平, 陈娟, 等. 不同轮耕方式对旱作区土壤容重、水分及春玉米产量的影响[J]. 土壤通报, 2018, 49(2):415 - 422.
HE Jianhua, WANG Ping, CHEN Juan, et al. Effects of different rotational tillage patterns on bulk density and moisture of soil and yield of spring maize (*Zea mays* L.) in arid areas [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2018, 49(2):415 - 422. (in Chinese)

[11] 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].中国农业科学, 2015, 48(14):2730 - 2746.
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]. Scientia Agricultura Sinica, 2015, 48(14):2730 - 2746. (in Chinese)

[12] 李娟, 王丽, 李军, 等. 轮耕对渭北旱塬玉米连作系统土壤水分和作物产量的影响[J]. 农业工程学报, 2015, 31(16):110 - 118.
LI Juan, WANG Li, LI Jun, et al. Effects of rotational tillage on soil water content and crop yield of spring maize system on Weibei Dryland [J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(16): 110 - 118. (in Chinese)

[13] 王慧杰, 郝建平, 冯瑞云, 等. 微孔深松耕降低土壤紧实度提高棉花产量与种籽品质[J]. 农业工程学报, 2015, 31(8):7 - 14.
WANG Huijie, HAO Jianping, FENG Ruiyun, et al. Microhole subsoiling decreasing soil compaction, and improving yield and seed quality of cotton [J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(8): 7 - 14. (in Chinese)

[14] 肖继兵, 孙占祥, 杨久廷, 等. 半干旱区中耕深松对土壤水分和作物产量的影响[J]. 土壤通报, 2011, 42(3):709 - 714.
XIAO Jibing, SUN Zhanxiang, YANG Jiuting, et al. Effect of subsoiling on soil water and crop yield in semi-arid area [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2011, 42(3):709 - 714. (in Chinese)

[15] 王育红, 蔡典雄, 姚宇卿, 等. 豫西旱坡地长期定位保护性耕作研究——Ⅰ.连年免耕和深松覆盖对冬小麦生育及产量的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2009, 27(5):47 - 51.
WANG Yuhong, CAI Dianxiong, YAO Yuqing, et al. Study on long-term site-specific conservation tillage on sloping dryland in the western part of Henan— Ⅰ. Effects of no-till and subsoiling with mulching on growth characteristics and yield of winter wheat [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2009, 27(5):47 - 51. (in Chinese)

[16] 周华，张居敏，祝英豪，等. 秸秆还田深松旋埋联合耕整机设计与试验[J]. 农业工程学报，2017，33(22)：17－26.
ZHOU Hua，ZHANG Jumin，ZHU Yinghao，et al. Design and experiment of combined tillage machine for subsoiling and rotary burying of straw incorporated into soil [J]. Transactions of the CSAE，2017，33(22)：17－26. (in Chinese)
[17] 郑侃，何进，李洪文，等. 反旋深松联合作业耕整机设计与试验[J/OL]. 农业机械学报，2017，48(8)：61－71.
ZHENG Kan，HE Jin，LI Hongwen，et al. Design and experiment of combined tillage implement of reverse-rotary and subsoiling [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2017，48(8)：61－71. http：//www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20170806&journal_id=jcsam. DOI：10.6041/j.issn.1000-1298.2017.08.006. (in Chinese)
[18] 张军昌，闫小丽，林泽坤，等. 自激式振动深松整地机设计与试验[J/OL]. 农业机械学报，2016，47(9)：44－49.
ZHANG Junchang，YAN Xiaoli，LIN Zekun，et al. Design and experiment of selfexciting vibration deeploosening and subsoiling machine [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2016，47(9)：44－49. http：//www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20160907&journal_id=jcsam. DOI：10.6041/j.issn.1000-1298.2016.09.007. (in Chinese)
[19] 赵伟，张文春，周志立，等. 深松旋耕组合作业机的研制与试验研究[J]. 农业工程学报，2007，23(1)：125－128.
ZHAO Wei，ZHANG Wenchun，ZHOU Zhili，et al. Development and experimental research of combined subsoiling and rotary tilling set [J]. Transactions of the CSAE，2007，23(1)：125－128. (in Chinese)
[20] IBRAHMI A，BENTAHER H，MAALEJ A. Soil-blade orientation effect on tillage forces determined by 3D finite element models[J]. Spanish Journal of Agricultural Research，2014，12(4)：941－951.
[21] ABO-ELNOR M，HAMILTON R，BOYLE J T. 3D dynamic analysis of soil-tool interaction using the finite element method [J]. Journal of Terramechanics，2003，40(1)：51－62.
[22] TAMÁS K，JÓRI I J，MOUAZEN A M. Modelling soil-sweep interaction with discrete element method [J]. Soil and Tillage Research，2013，134：223－231.
[23] HANG C G，HUANG Y X，ZHU R X. Analysis of the movement behavior of soil between subsoilers based on the discrete element method [J]. Journal of Terramechanics，2017，74：35－43.
[24] LI B，CHEN Y，CHEN J. Modeling of soil-claw interaction using the discrete element method (DEM) [J]. Soil and Tillage Research，2016，158：177－185.
[25] 郑侃，何进，李洪文，等. 基于离散元深松土壤模型的折线破土刃深松铲研究[J/OL]. 农业机械学报，2016，47(9)：62－72.
ZHENG Kan，HE Jin，LI Hongwen，et al. Research on polyline soil-breaking blade subsoiler based on subsoiling soil model using discrete element method [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2016，47(9)：62－72. http：//www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20160910&journal_id=jcsam. DOI：10.6041/j.issn.1000-1298.2016.09.010. (in Chinese)
[26] 刘俊安，王晓燕，李洪文，等. 基于土壤扰动与牵引阻力的深松铲结构参数优化[J/OL]. 农业机械学报，2017，48(2)：60－67.
LIU Jun'an，WANG Xiaoyan，LI Hongwen，et al. Optimization of structural parameters of subsoiler based on soil disturbance and traction resistance [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2017，48(2)：60－67. http：//www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20170208&journal_id=jcsam. DOI：10.6041/j.issn.1000-1298.2017.02.008. (in Chinese)
[27] 黄玉祥，杭程光，苑梦婵，等. 深松土壤扰动行为的离散元仿真与试验[J/OL]. 农业机械学报，2016，47(7)：80－88.
HUANG Yuxiang，HANG Chengguang，YUAN Mengchan，et al. Discrete element simulation and experiment on disturbance behavior of subsoiling [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2016，47(7)：80－88. http：//www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20160712&journal_id=jcsam. DOI：10.6041/j.issn.1000-1298.2016.07.012. (in Chinese)
[28] 杭程光，黄玉祥，高喜杰，等. 深松铲铲尖对土壤扰动过程及效果的试验与分析[J]. 干旱地区农业研究，2017，35(3)：285－291.
HANG Chengguang，HUANG Yuxiang，GAO Xijie，et al. Experiment and analysis of the subsoiler tine shape to the soil disturbance process and effect [J]. Agricultural Research in the Arid Areas，2017，35(3)：285－291. (in Chinese)
[29] 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.
YANG Yanshan，DING Qishuo，DING Weimin，et al. Design and application of multi-purpose insitu tillage tool testing platform [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2016，47(1)：68－74. http：//www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20160110&journal_id=jcsam. DOI：10.6041/j.issn.1000-1298.2016.01.010. (in Chinese)
[30] 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.
[31] RAHMAN S，CHEN Y. Laboratory investigation of cutting forces and soil disturbance resulting from different manure incorporation tools in a loamy sand soil [J]. Soil and Tillage Research，2001，58(1)：19－29.
[32] 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.
[33] MOUAZEN A M, NEMÉNYI M. Finite element analysis of subsoiler cutting in non-homogeneous sandy loam soil [J]. Soil and Tillage Research, 1999, 51(1):1 - 15.
[34] 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.
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. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20140223&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.02.023. (in Chinese)
[35] 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.
[36] 丁启朔, 葛双洋, 任骏, 等. 水稻土深松阻力与土壤扰动效果研究[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(1):47 - 56.
DING Qishuo, GE Shuangyang, REN Jun, et al. Characteristics of subsoiler traction and soil disturbance in paddy soil [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(1):47 - 56. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20170107&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.01.007. (in Chinese)
[37] 杭程光, 黄玉祥, 李伟, 等. 深松耕作阻力的影响因素分析与减阻策略[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2016, 44(11):202 - 208.
HANG Chengguang, HUANG Yuxiang, LI Wei, et al. Influencing factors and reduction strategirs of subsoiling tillage resistance [J]. Journal of Northwest A&F University (Nat. Sci. Ed.), 2016, 44(11):202 - 208. (in Chinese)
[38] 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.
[39] 薛惠岚, 杨林青, 廉登极, 等. 双翼深松铲设计参数的试验研究[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 1987, 15(1):24 - 29.
XUE Huilan, YANG Linqing, LIAN Dengji, et al. Tsets of designing parameters of double-wing subsoiler [J]. Journal of Northwest A&F University (Nat. Sci. Ed.), 1987, 15(1):24 - 29. (in Chinese)
[40] 谢天铧, 杨艳山, 霍连飞, 等. 基于数字图像三维重建的土壤粗糙度测量[J]. 土壤通报, 2018, 49(3):519 - 524.
XIE Tianhua, YANG Yanshan, HUO Lianfei, et al. Measurement of soil roughness by 3D reconstruction based on digital images [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2018, 49(3): 519 - 524. (in Chinese)
[41] 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 Shucai, 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)
[42] TONG J, MOAYAD B Z. Effects of rake angle of chisel plough on soil cutting factors and power requirements: a computer simulation [J]. Soil and Tillage Research, 2006, 88(1 - 2):55 - 64.
[43] GODWIN R J, SPOOR G. Soil failure with narrow tines [J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1977, 22(3):213 - 228.
[44] 郭志军, 周志立, 佟金, 等. 抛物线型切削面刀具切削性能二维有限元分析[J]. 洛阳工学院学报, 2002, 23(4):1 - 4.
GUO Zhijun, ZHOU Zhili, TONG Jin, et al. A 2-D finite element analysis for cutting performance of a parabolic curved cutting surface [J]. Journal of Luoyang Institute of Technology, 2002, 23(4):1 - 4. (in Chinese)
[45] 李伟, 张帅磊, 黄玉祥, 等. 深松深度对土壤扰动影响的仿真与试验研究[J]. 农机化研究, 2017, 39(11):153 - 157.
LI Wei, ZHANG Shuailei, HUANG Yuxiang, et al. Distinct element method simulation and experimental research of subsoiling depth on soil disturbance [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2017, 39(11):153 - 157. (in Chinese)
[46] 赵淑红, 王加一, 陈君执, 等. 保护性耕作拟合曲线型深松铲设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(2):82 - 92.
ZHAO Shuhong, WANG Jiayi, CHEN Junzhi, et al. Design and experiment of fitting curve subsoiler of conservation tillage [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(2):82 - 92. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20180211&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.02.011. (in Chinese)
[47] SPOOR G. Alleviation of soil compaction: requirements, equipment and techniques [J]. Soil Use and Management, 2006, 22(2):113 - 122.
[48] 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.
[49] 丁启朔, 任骏, BELAL E A, 等. 湿粘水稻土深松过程离散元分析[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(3):38 - 48.
DING Qishuo, REN Jun, BELAL E A, et al. DEM analysis of subsoiling process in wet clayey paddy soil [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(3):38 - 48. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20170305&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.03.005. (in Chinese)
[50] 尤泳, 贺长彬, 王德成, 等. 土壤耕作部件极窄刀齿与土壤作用关系研究[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(6):50 - 58.

YOU Yong, HE Changbin, WANG Decheng, et al. Interaction relationship between soil and very narrow tine during penetration process [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(6):50 - 58. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20170606&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.06.006. (in Chinese)

[51] 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 soilengaging surfaces [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(6):47 - 52. (in Chinese)

[52] 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.
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. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20140422&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.04.022. (in Chinese)

[53] 崔涛, 史智栋, 杨丽, 等. 弹簧预紧力可调式振动深松机设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(增刊):96 - 102.
CUI Tao, SHI Zhidong, YANG Li, et al. Design and experiment of vibration subsoiler with adjustable spring pre-tightening force [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(Supp.):96 - 102. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 2016s015&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.S0.015. (in Chinese)

[54] 王俊发, 魏天路, 刘孝民. 振动深松的试验研究[J]. 农业机械学报, 2001, 32(3):33 - 35.
WANG Junfa, WEI Tianlu, LIU Xiaomin. Experimental study on vibrating subsoiling [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2001, 32(3):33 - 35. (in Chinese)

[55] 杭程光, 张鹏鹏, 李伟, 等. 深松铲入土角对土壤紧实度变化影响的试验研究[J]. 中国农机化学报, 2016, 37(11):36 - 40.
HANG Chengguang, ZHANG Pengpeng, LI Wei, et al. Experiment research on influence of rake angle on soil hardness variation under sub-soiling [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2016, 37(11):36 - 40. (in Chinese)

[56] MCKYES E, MASWAURE J. Effect of design parameters of flat tillage tools on loosening of a clay soil [J]. Soil and Tillage Research, 1997, 43(3):195 - 204.

[57] FIELKE J M. Interactions of the cutting edge of tillage implements with soil [J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1996, 63(1):61 - 71.

[58] 高焕文, 李洪文, 王兴文. 旱地深松试验研究[J]. 干旱地区农业研究, 1995, 13(4):126 - 133.
GAO Huanwen, LI Hongwen, WANG Xingwen. A testing study of dryland subsoiling [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 1995, 13(4):126 - 133. (in Chinese)

[59] LENNARTZ B, HORN R, DUTTMANN R, et al. Ecological safe management of terraced rice paddy landscapes [J]. Soil and Tillage Research, 2009, 102(2):179 - 192.

[60] SWICK W C, PERUMPRAL J V. A model for predicting soil-tool interaction [J]. Journal of Terramechanics, 1988, 25(1):43 - 56.

[61] ASAE. Terminology and definitions for agricultural tillage implements: ASAE Standards, 41st Ed, ASAE S414.1[S]. St. Joseph, Michigan, USA: ASAE, 1994.

[62] 严晓丽, 汪春, 李明, 等. 红壤凿形深松铲的设计与试验[J]. 农机化研究, 2019, 41(4):135 - 142.
YAN Xiaoli, WANG Chun, LI Ming, et al. Design and experiment on the chisel-shape deep-shovel in red loam [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2019, 41(4):135 - 142. (in Chinese)

[63] 余泳昌, 刘文艺, 赵迎芳, 等. 立柱式深松铲受力数学模型及试验分析[J]. 农业工程学报, 2007, 23(6):109 - 113.
YU Yongchang, LIU Wenyi, ZHAO Yingfang, et al. Force mathematical model and examination analysis of the column subsoiler [J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(6): 109 - 113. (in Chinese)

[64] SALOKHE V M, PATHAK B K. Effect of aspect ratio on soil reactions on flat tines in dry sand [J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1993, 56(3):179 - 188.

[65] OTTO R, SILVA A P, FRANCO H C J, et al. High soil penetration resistance reduces sugarcane root system development [J]. Soil and Tillage Research, 2011, 117(6):201 - 210.

[66] 童文杰, 邓小鹏, 徐照丽, 等. 不同耕作深度对土壤物理性状及烤烟根系空间分布特征的影响[J]. 中国生态农业学报, 2016, 24(11):1464 - 1472.
TONG Wenjie, DENG Xiaopeng, XU Zhaoli, et al. Effect of plowing depth on soil physical characteristics and spatial distribution of root system of flue-cured tobacco [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2016, 24(11):1464 - 1472. (in Chinese)

[67] 张凤杰, 孙继颖, 高聚林, 等. 春玉米根系形态及土壤理化性质对深松深度的响应研究[J]. 玉米科学, 2016, 24(6):88 - 96.
ZHANG Fengjie, SUN Jiying, GAO Julin, et al. Response of spring maize root morphological characteristics and soil physicochemical properties to chiseling depth [J]. Journal of Maize Sciences, 2016, 24(6):88 - 96. (in Chinese)