

基于南方红壤耕地气压深松铲的设计与深松仿真分析

刘明财 苏继龙*

(福建农林大学 机电工程学院,福州 350000)

摘要 针对现有深松机在红壤耕地犁底层土壤深松阻力大、幅宽小、效率低等问题,设计一种基于气压劈裂的气压深松铲。采用 CFD 软件建立南方耕地红壤犁底层土壤的模型进行深松气压范围标定,并针对相同气压 2 MPa 下不同容重犁底层土壤的扩散特性进行研究。结果表明:红壤犁底层容重 1.8 g/cm^3 土壤的有效起劈气压范围为 $1.6 \sim 2.4 \text{ MPa}$;容重 1.6 g/cm^3 、 1.8 g/cm^3 的犁底层土壤裂隙主要沿水平方向扩散,容重 1.4 g/cm^3 的犁底层土壤裂隙则同时沿垂直方向与水平方向扩散;容重越大的犁底层土壤,深松效果越好。

关键词 深松铲; 气压深松; 犁底层; 气压劈裂

中图分类号 S222.29

文章编号 1007-4333(2019)04-0119-05

文献标志码 A

Design of pneumatic deep shovel and gas pressure deep loose simulation analysis in red soil of the southern farmland

LIU Mingcai, SU Jilong*

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350000, China)

Abstract In view of the problems of deep substituting resistance, small width and low efficiency of the existing deep shovel in the red soil plough, a pneumatic deep shovel based on air pressure splitting was designed. CFD software was used to establish the model of the red soil plow bottom of the southern cultivated land to carry out the calibration of the deep gas pressure range, and the diffusion characteristics of the bottom layer of different volumetric plows under the same pressure of 2 MPa were studied. The results showed that the effective enthalpy pressure of the bottom layer of 1.8 g/cm^3 red soil was $1.6 \sim 2.4 \text{ MPa}$; The crack of the bottom layer of the plough was mainly diffused horizontally, while the crack of the bottom of the plough with smaller bulk density is also vertical. In conclusion, by using the pneumatic deep shovel designed in this study, the direction and the horizontal direction were diffused, the bottom of the plow was larger, and the deeper pine effect was better.

Keywords deep shovel; pneumatic deep loose; plow bottom; air pressure split

耕地土壤深松是耕作保护技术的主要措施,利用深松铲破坏坚硬的犁底层,可增大土壤的孔隙度,提高蓄水能力,避免出现径流和水土流失^[1-2]。目前,国内外主要对挤压式和振动式深松铲的结构进行了深入研究^[3-4]与优化:1)在深松铲面引入流体介质进行减阻研究^[3-4],或者在深松铲表面添加氧化铅涂,都能够增长深松机具的使用寿命^[5-6];2)对圆弧形深松铲的结构进行了优化设计^[7],基于动物爪趾

模型,设计了仿生深松铲^[8-10]。然而,我国南北耕地土壤差异较大,南方耕地以红壤为主,其特点是黏性较大。已有对南北方土壤的水分特征研究表明^[11],南方耕地红壤受耕作影响具有较强的压实作用,犁底层的硬度较大,导致深松作业仍存在深松阻力大,幅宽小,效率低等问题^[12-14]。针对以上深松铲存在的不足,又有研究提出了气压深松方式^[15],即通过高压气体劈裂技术来提高土壤的孔隙度,并通过试

收稿日期:2018-06-20

基金项目:福建省自然科学基金项目(2016J01001);福建农林大学科技发展基金项目(KF2015026、KF2015027)

第一作者:刘明财,硕士研究生,E-mail:719561077@qq.com

通讯作者:苏继龙,教授,主要从事机械振动、材料强度与微结构关系的研究,E-mail:fjsu@163.com

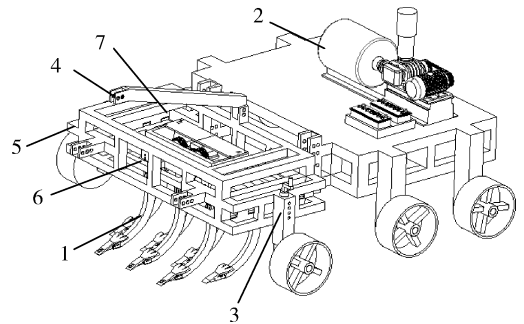
验分析验证了其可行性,但对于气压深松机的研制目前尚未成熟,在深根系作物耕地如玉米、正甜菜、小麦等,由于根系在土壤中的缠绕,土体抬升受阻,气压劈裂破碎程度不高,气压深松效果不明显^[16]。本研究拟采用气压深松方式,基于南方红壤耕地,对关键部件深松铲进行设计,采用气压深松仿真试验,对南方红壤深松的起劈气压以及气流在红壤犁底层的扩散特性进行研究,以为土壤气压深松机械的研制提供理论参考。

1 整机结构与工作原理

1.1 整机结构设计

气压深松机由牵引车架、牵引悬挂、铲柄架、激振装置、气压劈裂式深松铲、空气压缩装置和深松深度调节装置等结构组成(图1),气压深松机主要技术

参数见表1。



1. 气压劈裂式深松铲;2. 空气压缩装置;3. 限深调节器;4. 牵引悬挂;5. 牵引车架;6. 铲柄架;7. 激振装置

1. Air pressure split type deep loosening shovel; 2. Air compression device; 3. Depth limit adjuster; 4. Traction suspension; 5. Traction frame; 6. Shovel handle frame; 7. Vibration device

图1 气压深松机的结构图

Fig. 1 Structure of air pressure deep loosening machine

表1 气压深松机主要技术参数

Table 1 Main technical parameters of air pressure deep loosening machine

参数 Parameter	数值 Numerical value	参数 Parameter	数值 Numerical value
外形尺寸(长×宽×高)/cm Subsoil size	240.6×200×110	深松气压可调范围/MPa Deep loose air pressure adjustable range	1.4~2.2
整机质量/kg Machine quality	580	工作幅宽/mm Working width	1 800
作业行数 Number of job lines	6	配套动力/kW Supporting power	≥32
深松铲间隔/mm Deep loose shovel interval	400	松土深度可调范围/mm Loose soil depth adjustable range	200~450
深松铲的振幅/mm The amplitude of the deep shovel	10	深松机的行进速度/(m/s) Speed of the subsoiler	0.8

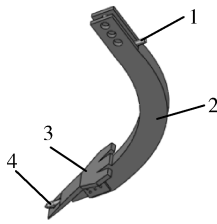
1.2 工作原理

在作业过程中,深松机根据实际耕地需求通过限深轮调整深松深度,在拖拉机的牵引下,深松铲进入犁底层底部,利用空气压缩装置将高压气体由管道通过深松铲铲头部位的气枪口输入土壤,使气枪口周围土壤产生裂隙,气流进而抬升犁底层直至破坏产生裂纹。同时,本设计中增加了辅助振动装置,劈裂后的犁底层经铲柄架上的激振箱产生的简谐激振力进一步破碎,从而降低牵引阻力,提高土壤破碎效果,以改良土壤耕层结构。

2 气压劈裂式深松铲的结构设计

气压劈裂式深松铲是气压深松机的核心部件,由铲头、铲柄、气枪3部分组成(图2)。铲头入土的

前半部分采用凿形铲的形态,后半部分采用箭形铲的双翼形态,根据已有研究对深松铲头的结构参数分析^[17],本设计取铲头长度 $L=350$ mm、后铲翼宽度 $B=180$ mm、铲头厚度 $t=20$ mm、前铲头宽度 $Z=80$ mm、入土角 $\alpha=23^\circ$ 、翼张角 $r=75^\circ$ 、刃口角 $\theta=20^\circ$ 、隙角 $\epsilon=8^\circ$,这样入土阻力小,幅宽较大,碎土率高,工作效率高。由于弧形铲柄在深松作业过程的抗剪抗弯性能比较突出^[18],因此本设计的铲柄选用弧形铲柄的造型,铲柄选用Q345钢材料,规格:高840 mm,铲柄厚度60 mm,与铲头连接部位厚度较小,有助于减小阻力。气枪整体结构采用16Mn钢材料制造,气枪外径为35 mm,气枪头壁厚为10 mm,气枪伸出长度为40,倾角为 85° ,具有很高的耐磨性。



1. 气管; 2. 铲柄; 3. 铲头; 4. 气枪

1. Trachea; 2. Shovel handle; 3. Shovel head; 4. Air gun

图 2 气压劈裂式深松铲结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of air pressure splitting deep loose shovel

3 气压深松仿真试验

根据相关文献和实际深松作业的现场试验及测试资料可知^[15-16],犁底层厚度约为 10~15 cm,距耕地表面约 25~35 cm。本研究所设计的气压劈裂式深松铲的喷气点位于犁底层土壤底部,因此对于深松深度选取 0.4 m 进行仿真。左胜甲等^[15]所做的气枪深松试验表明,裂隙扩展范围为以气枪喷气点为中心,沿径向扩展,可视犁底层土壤的裂隙扩展是以深松铲为轴线的对称图形(图 3)。因此,本研究以喷气孔一侧的犁底层为研究对象建立 2D 的犁底层厚度方向的剖面模型(图 4),选用南方红壤耕地犁底层土壤(表 2)^[19]。

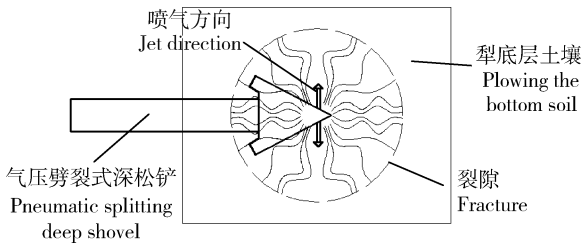


图 3 气压深松裂隙扩散原理示意图

Fig. 3 Schematic diagram of air pressure deep loose crack diffusion

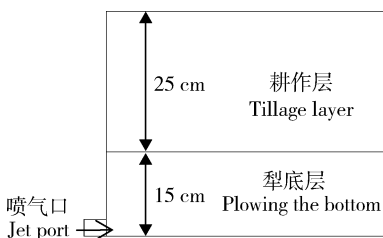


图 4 犁底层 2D 剖面模型

Fig. 4 Plow bottom layer 2D model

表 2 犁底层土壤质地成分

Table 2 Plowing the ground texture of the soil composition

粒级 Granular name	粒径/mm Particle size	质量分数/% Fractional percentage
极粗砂粒 Very coarse sand	2~1	16.67
粗砂粒 Coarse sand	1.0~0.5	23.30
中砂粒 Medium sand	0.50~0.25	18.42
细砂粒 Fine sand	0.25~0.10	10.50
极细砂粒 Very fine sand	0.10~0.05	7.65
粉粒 Powder	0.002~0.050	21.28

3.1 起劈气压范围的确定

为通过仿真试验法确定深松起劈气压,考虑到南方耕地土壤的黏性比北方的大,因此在初始气压的选择上大于左胜甲^[15]针对黑龙江耕地所得到深松气压值 0.9 MPa。若在 0.9 MPa 气压下,土壤孔隙度变化明显则再降低深松气压。相反,逐渐增大深松气压直至犁底层土壤的孔隙度发生明显的变化,最终获得土壤起劈临界气压值。犁底层土壤容重越大所需起劈气压越大,为确保深松起劈气压能够适用于各种容重的犁底层,应按容重较大的犁底层来模拟。本研究选用 1.8 g/cm³ 容重土壤进行试验模拟。起始气压 0.9 MPa,步长 0.1 MPa,依次增加直至气体在犁底层土壤的分布发生明显变化为止。结果发现,气压在 0.9~1.5 MPa 范围内逐步增大时未见气体分布有明显变化(图 5(a));而当气压增加到 1.6 MPa 时,气体在犁底层土壤的扩散在一定区域范围内明显增大(图 5(b))。

比较在 0.9~1.5 MPa 和 1.6 MPa 下的气体扩散度(图 5(a)、(b)),表明增大起始气压达 1.6 MPa 后气体距喷气口的扩散半径在 0~0.44 m 的范围内明显的增加,而气体的密度分布直观的反映出了犁底层土壤的孔隙度的变化。因此,容重 1.8 g/cm³ 犁底层土壤在 1.6 MPa 的气压下其气体扩散主要发生在喷气点附近区域(水平方向约 0~0.44 m),且可实现土壤有效起劈。由于容重 1.8 g/cm³ 的犁底层土壤间的凝集力比较大,气体的水平扩散范围大于其竖直方向扩散的范围(图(b)),说明气体不易向竖直方向扩散,而主要向水平方向扩展。

进一步增加深松气压,犁底层的孔隙度随着气压的增加而增大,当深松气压增加到 2.4 MPa 后,继续增加气压犁底层的孔隙度呈稳定状态(图(c))。

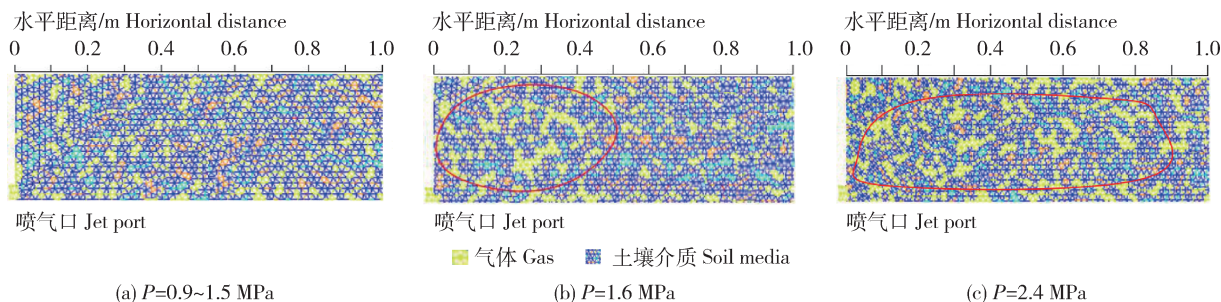


图5 不同气压(P)下犁底层土壤气体扩散分布

Fig. 5 Distribution of soil gas diffusivity at the bottom of different plows

当气压增加到 2.4 MPa 后,犁底层土壤受气体的影响可达到远侧影响域(水平方向约 0~0.72 m),进一步增加气压后气体扩散变化不明显,说明水平扩散达到了极限范围;主要原因是气体在远侧影响域(水平方向约 0.4~0.92 m)扩散时,部分高压气体通过裂隙泄漏出土壤表面,气压降低,导致增大的孔隙会回缩一部分;远侧的气压随气体的扩散半径递减,在 0.92 m 处气压泄露与气压扩散达到动态平衡,在大于 2.4 MPa 气压后,增加步长不再发生水平扩散。通过以上对容重 1.8 g/cm³ 犁底层的气压深松模拟可知,南方红壤耕地的大致起劈气压范围为 1.6~2.4 MPa。为气压深松机作业气压的选取和空气压缩机的选型提供参数依据。

3.2 不同容重的犁底层对气体扩散的影响

在 2 MPa 的气压下,本研究对容重 1.4 g/cm³ (孔隙度 0.3)、1.6 g/cm³ (孔隙度 0.4) 及 1.8 g/cm³ (孔隙度 0.5) 的犁底层土壤进行试验,结果见图 6: 容重 1.4 g/cm³ 犁底层土壤的近侧影响区域(水平方向约 0~0.31 m)的气体分布较多(图 6(a)),容重

1.6 g/cm³ 犁底层土壤的气流主要分布在近侧影响域与中部影响域(水平方向约 0~0.73 m)(图 6(b)),而容重 1.8 g/cm³ 犁底层土壤从近侧影响域到远侧影响域(水平方向约 0~0.89 m)均有气体分布(图 6(c))。可见,容重 1.4 g/cm³ 犁底层土壤由于容重较低,土壤的凝聚力相对较小,气流在竖直方向与水平方向的扩散能力较强,竖直方向的扩散路径比水平方向的路径短,当气流从土壤表面泄漏后,存在气压损失,导致气流无法向水平路径继续扩散;所以远侧区域影响小,基本不发生变化。容重 1.6 g/cm³ 犁底层土壤之间的凝聚力相对较大,在竖直方向,气流不易扩散,而沿水平方向扩展;当扩展到中部影响域一定程度后,土体抬升直至破坏泄漏出犁底层表面。容重 1.8 g/cm³ 犁底层土壤由于容重很大,土壤凝聚力较强,气体沿竖直方向路径很难扩散,致使沿水平方向扩散的气压损失比较少,增大了深松范围。

因此,土壤容重越大的犁底层,气压深松效果越好。对于容重不同的犁底层可选取相对应的不同的气压进行深松,以降低空气压缩机能耗。

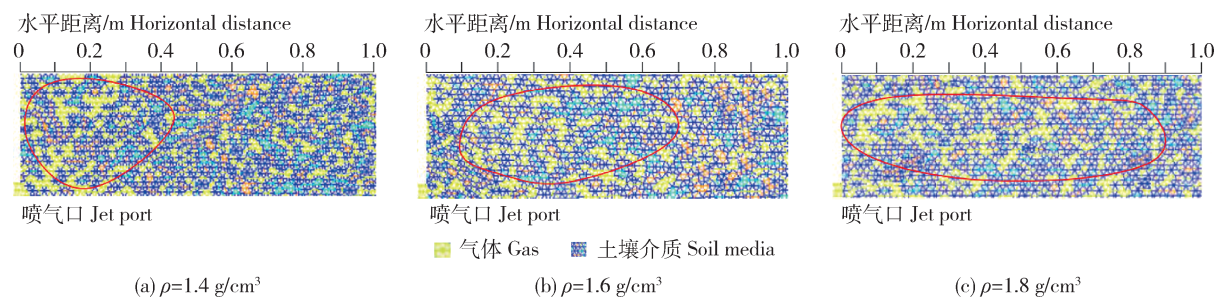


图6 各容重(ρ)犁底层土壤在 2 MPa 气压下气体扩散分布

Fig. 6 Corresponding gas diffusion distribution map of the bottom layer soil of each bulk plough at 2 MPa

4 结论

本研究针对南方红壤耕地黏性较大、不易深松的特点设计一种利用高压气流注入犁底层,使其劈

裂的气压劈裂式深松铲。

1)CFD 仿真试验表明,对容重为 1.8 g/cm³ 犁底层土壤的气压深松,有效起劈的气压选取范围为 1.6~2.4 MPa。

2)相同的深松气压下,容重越大的犁底层土壤的裂隙主要沿水平方向扩散,而容重较小的犁底层的裂隙则同时沿水平方向和竖直方向扩散;土壤容重越大,深松效果越好。

参考文献 References

- [1] 朱瑞祥,张军昌,薛少平,姚万生,李俊耀,邓海涛. 保护性耕作条件下的深松技术试验[J]. 农业工程学报, 2009, 25(6): 145-147
Zhu R X, Zhang J C, Xue S P, Yao W S, Li J Y, Deng H T. Experimentation about subsoiling technique for conservation tillage [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2009, 25(6): 145-147 (in Chinese)
- [2] 张瑞富,杨恒山,高聚林,张玉芹,王志刚,范秀艳,毕文波. 深松对春玉米根系形态特征和生理特性的影响[J]. 农业工程学报, 2015, 31(5): 78-84
Zhang R F, Yang H S, Gao J L, Zhang Y Q, Wang Z G, Fan X Y, Bi W B. Effect of subsoiling on root morphological and physiological characteristics of spring maize [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(5): 78-84 (in Chinese)
- [3] Zhang H, Araya K, Kudoh M, Zhang C, Jia H, Liu F, Sawai T, Yang S. An explosive subsoiler for the improvement of meadow soil, part 2: soil bin experiments [J]. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 2000, 75(2): 209-219
- [4] Araya K. Soil failure by introducing fluid under pressure [J]. *Journal of Terramechanics*, 1985, 22(3): 176-4
- [5] 易文裕, 鹿洪章, 程方平, 熊昌国, 谢祖琪. 轻筒型茶园深松耕作机驱动轮和深松铲优化配置研究 [J]. 中国农机化学报, 2016, 37(7): 19-22
Yi W Y, Tuo H Z, Cheng F P, Xiong C G, Xie Z Q. Study on optimal allocation of driving wheel and sub-soiling shovel of deep loosening tillage machine on light simple type of Tea plantation [J]. *Journal of Chinese Agricultural Mechanization*, 2016, 37(7): 19-22
- [6] 娄秀华, 张东兴, 张淑敏, 耿端阳. 1MS-II型地膜回收机起膜铲动力性能试验分析 [J]. 农业机械学报, 2004, 35(5): 67-69
Lou X H, Zhang D X, Zhang S M, Geng D Y. Experimental investigation on performance of loosening shovel of 1MS-II polythene film collector [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery*, 2004, 35(5): 67-69 (in Chinese)
- [7] 初立东, 袁军, 郑重, 袁洪印, 王景立, 黄亚杰, 尹永乐. 圆弧形深松铲的阻力测试与仿真分析 [J]. 吉林农业大学学报, 2013, 35(5): 610-614
Chu L D, Yuan J, Zheng C, Yuan H Y, Wang J L, Huang Y J, Yin Y L. Resistance measurement and simulation analysis of circular arc sub-soiling shovel [J]. *Journal of Jilin Agricultural University*, 2013, 35(5): 610-614 (in Chinese)
- [8] 陈东辉. 典型生物摩擦学结构及仿生 [D]. 长春: 吉林大学, 2007
Chen D H. Typical bio-tribological structures and their biomimetic applications [D]. Changchun: Jilin University, 2007 (in Chinese)
- [9] 龚皓晖, 王霜. 仿生深松铲结构设计与有限元分析 [J]. 农机化研究, 2013, 35(7): 53-57
Gong H H, Wang S. Bionic subsoiler structural design with the finite element analysis [J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2013, 35(7): 53-57 (in Chinese)
- [10] 张金波. 深松铲减阻耐磨仿生理论与技术 [D]. 长春: 吉林大学, 2014
Zhang J B. Bionic drag reduction and wear-resistant theory and techniques of subsoiler [D]. Changchun: Jilin University, 2014 (in Chinese)
- [11] 吕殿青, 潘云. 南北方粘质土壤的水分特征研究 [J]. 灌溉排水学报, 2009, 28(1): 20-23
Lu D Q, Pan Y. Water characteristics for clay soil in north and south regions [J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2009, 28(1): 20-23 (in Chinese)
- [12] 崔涛, 史智栋, 杨丽, 王云霞, 韩丹丹, 张东兴. 弹簧预紧力可调式振动深松机设计与试验 [J]. 农业机械学报, 2016, 47(S1): 96-102
Cui T, Shi Z D, Yang L, Wang Y X, Han D D, Zhang D X. Design and experiment of vibration subsoiler with adjustable spring pre-tightening force [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery*, 2016, 47(S1): 96-102 (in Chinese)
- [13] 邱立春, 李宝筏. 自激振动深松机减阻试验研究 [J]. 农业工程学报, 2000, 16(6): 72-76
Qiu L C, Li B F. Experimental study on the self excited vibration subsoiler for reducing draft force [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2000, 16(6): 72-76 (in Chinese)
- [14] 李霞, 付俊峰, 张东兴, 崔涛, 张瑞. 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
Li Xia, Fu J F, Zhang D X, Cui T, Zhang R. Experiment analysis on traction resistance of vibration subsoiler [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, 28(1): 32-36 (in Chinese)
- [15] 左胜甲. 气压深松特性及技术的试验研究 [D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2016
Zuo S J. Experimental study on the characteristics and technology of air-pressure subsoiling [D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2016 (in Chinese)
- [16] 左胜甲, 孔德刚, 汉语, 陈海霞, 张勇, 韩福傲. 气压深松技术研究现状和发展趋势 [J]. 中国农机化学报, 2017, 38(6): 99-103
Zuo S J, Kong D G, Han Y, Chen H X, Zhang Y, Han F A. Research status and development trend of pneumatic subsoiling technology [J]. *Journal of Chinese Agricultural Mechanization*, 2017, 38(6): 99-103 (in Chinese)
- [17] 姜平安. 深松机的设计 [J]. 农业机械, 2014(23): 108-118
Jiang P A. Design of deep-separation machine [J]. *Farm Machinery*, 2014(23): 108-118 (in Chinese)
- [18] 陈坤. 后掠式弧形深松铲柄的结构优化研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2012
Chen K. Study on Structural optimization of extroverted arc subsoiler [D]. Changchun: Jilin Agricultural University, 2012 (in Chinese)
- [19] 张健伟. 云南丘陵山区深松施肥技术及装备的研究 [D]. 昆明: 昆明理工大学, 2017
Zhang J W. Study on sub-soiling fertilizing technology and its equipment in hilly and mountainous areas [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2017 (in Chinese)