

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2022.S2.007

深松方式对山地烟根系形态与烤烟性状的影响

朱惠斌 赵浩然 左玉坤 白丽珍 马世骛 张旭

(昆明理工大学现代农业工程学院, 昆明 650500)

摘要: 为探讨不同深松方式对山地烟根系形态及烤烟性状的影响,寻求培育山地烟的优良措施,通过设置改进深松(NS)、传统深松(TS)、不深松(CK)3个处理,开展了田间试验。结果表明:自主设计的深松铲与传统凿式深松铲相比,土壤扰动系数提高了14.79个百分点、耕后土壤地下30 cm处的土壤紧实度减小了53.95%、土壤容重变化率提高了5.84%;改进深松处理后土壤与传统深松相比,栽植的烟株在成熟初期的总根长、根表面积、根体积、株高、茎围、叶面积指数、最大叶长、最大叶宽、地下部干物质质量、地上部干物质质量、产量、上等烟比例分别增加了33.80%、30.41%、45.67%、18.36%、10.72%、16.53%、4.02%、2.15%、28.26%、18.28%、6.43%、4.11%,有效叶片数均增加了一片叶,均价和产值分别增加了4.83%和11.63%,而与未进行深松作业的对照组相比,上述各项指标均大幅提升。研究表明:深松措施能有效地改善云南省山地烟烟田的耕层结构,从而促进山地烟的根系生长,使根系吸收更多的水分、养分以供给地上部发育,提高烟叶干物质质量,使经济性性状的表现更佳。自主设计的深松铲及其配套搭载机具,在云南滇中烟区进行深松作业的效果更为显著。

关键词: 山地烟; 土壤性状; 根系形态; 烤烟性状; 深松处理

中图分类号: S222 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2022)S2-0060-09

Effects of Subsoiling Methods on Root Morphology and Flue-cured Tobacco Traits of Mountain Tobacco

ZHU Huibin ZHAO Haoran ZUO Yukun BAI Lizhen MA Shiao ZHANG Xu

(Faculty of Modern Agricultural Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China)

Abstract: In order to discuss the influence of different subsoiling methods on root morphology and tobacco-curing characteristics of mountain tobacco, verify the actual effect of the new-type subsoiling shovel independently designed, and seek excellent measures for cultivating mountain tobacco, field tests were carried out by setting three treatments: improved subsoiling (NS), traditional subsoiling (TS) and no subsoiling (CK). The results showed that compared with traditional chisel-type subsoiling shovel, the soil disturbance coefficient was increased by 14.79 percentage points, the soil compactness was decreased by 53.95% and the change rate of soil bulk density was increased by 5.84% at 30 cm underground after tillage. Compared with traditional subsoiling, the total root length, root surface area, root volume, plant height, stem circumference, leaf area index, maximum leaf length, maximum leaf width, underground dry matter weight, aboveground dry matter weight, yield and upper leaves of planted tobacco were increased by 33.80%, 30.41%, 45.67%, 18.36%, 10.72%, 16.53%, 4.02%, 2.15%, 28.26%, 18.28%, 6.43% and 4.11%, respectively at the early stage of maturity, the number of effective leaves increased by one leaf, the average price and output value was increased by 4.83% and 11.63%, respectively, while the above indexes were significantly improved compared with the control group without subsoiling operation. It was found that subsoiling can effectively improve the tillage structure of mountain tobacco fields in Yunnan Province, thus promoting the root growth of mountain tobacco, enabling the root to absorb more water and nutrients for the above-ground development, improving the dry matter weight of tobacco leaves and the economic performance. Independently designed type subsoiling spade and its supporting carrying machine had more remarkable effect on subsoiling operation in middle Yunnan Province.

Key words: mountain tobacco; soil properties; root morphology; tobacco traits; subsoiling treatment

收稿日期: 2022-06-12 修回日期: 2022-07-30
基金项目: 国家自然科学基金项目(51865022)
作者简介: 朱惠斌(1974—),男,教授,博士,主要从事丘陵山区保护性耕作技术研究,E-mail: hbzhu113@163.com
通信作者: 白丽珍(1975—),女,高级实验师,主要从事智能农业装备测控技术研究,E-mail: lzhbai@qq.com

0 引言

烟草是云南省重要的经济作物,山地烟移栽面积占烤烟移栽面积的1/2以上^[1]。烤烟根系属于圆锥根系,生长极其旺盛,一级侧根发达,烟根伸长范围极宽,分布在距茎周40 cm范围,且会在土壤内下扎到40 cm以下的位置^[2-4]。深松是保护性耕作的重要耕作方式,多项研究表明,深松作业能够增加土壤扰动度,增加土壤孔隙度,促进植物根系生长发育^[5-8],稳定烟叶产量和提升烟叶品质,提高烟草行业经济效益^[9-11]。

近些年来,国内外许多研究者对深松技术开展了众多相关的研究。THERIAULT等^[12]通过对深根作物进行深松和轮作的试验,测定了土壤穿透阻力、饱和导水率、地下水位和基质势随时间的变化,发现深松在某些情况下改善了土壤穿透阻力、饱和导水率,但未观察到地下水位和土壤基质势的变化,表明饱和导水率的短期增加并未改善深层排水。MÜLLER等^[13]对大豆进行不同深度的深松处理,以探究土壤的化学、物理和生物变化对根系生长和作物表现的响应,发现深松有利于提高作物产量。WANG等^[14]通过田间试验研究深松对土壤性质和冬小麦产量的综合影响,发现深松耕作处理获得了更高的粮食产量。郑侃等^[15]通过Meta分析研究了深松对小麦玉米产量的影响,发现采用深松免耕有利于作物的增产。还有多位学者通过改变深松作业速度和深度,研究了深松对作物生长的影响^[16-19]。刘俊安等^[20]通过对3种不同铲形的深松铲进行作业的过程研究,发现铲形对土壤容重、孔隙度、紧实度和土壤扰动量的变化有显著的影响。因此,许多研究者对深松铲进行了多样设计^[21-25]。但他们的研究主要集中于小麦、大豆、玉米等粮食作物方面,对烟草等经济作物的研究较少。

本文通过应用自主设计深松铲进行田间试验,探讨特定的深松方式是否能有效改善烟田耕层构造,研究深松对山地烟草根系形态及烤烟性状的影响,为烤烟根系的发育创造适宜的生长环境,进而促进烟株地上部分的生长,提升烤烟的经济效益,为培育山地中棵烟提供技术参考。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于2019年4—9月在云南省玉溪市红塔区高仓镇(24°15'18"N,102°32'41"E)展开,海拔1 676 m,年均降雨量为779.5~989.7 mm,年平均气温16.2~24.4℃,年无霜期244~365 d,年平均日照时

数2 115~2 285.4 h。该块试验田长46 m、宽24 m,南北走向。试验田所属烟区为云南滇中烟区,土壤类型为红壤,灌溉方式为穴灌,前茬作物为小麦,耕地坡度为3°~5°,属于平耕地。试验地点方位图如图1所示。

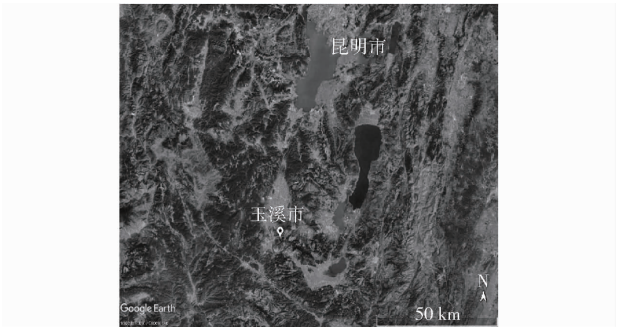


图1 试验地点方位图

Fig. 1 Azimuth map of test site

1.2 试验设计

为探究不同深松方式对山地中棵烟根系形态及烤烟性状的影响,并测试本文深松铲在云南滇中烟区进行深松作业的实际效果(本文深松铲为铲翼长度190 mm、铲翼张角120°、铲翼宽度115 mm、铲翼倾角28°的圆脊形铲头尖端的带翼凿式深松铲),设置3个试验组:改进深松(NS),将自主设计的深松铲搭载在已加工完成的烟田深松有机培肥机上(此设备由昆明理工大学保护性耕作实验室提供),由雷沃欧豹M904型拖拉机带动,在相应的栽植区域进行深松施肥工序;传统深松(TS),将自行研制的深松铲更换为传统凿式深松铲,在相应的栽植区域进行深松施肥工序;不深松(CK),在相应的栽植区域不进行深松作业,施肥方式为人工施肥。

将烟田分为6块栽植区域,每块栽植区域可供烟田深松有机培肥机进行3次作业。整个烟田的6块栽植区域间由3条行走道间隔,纵向的两条行走道宽1.2 m,横向的一条行走道宽1 m,如图2所示。

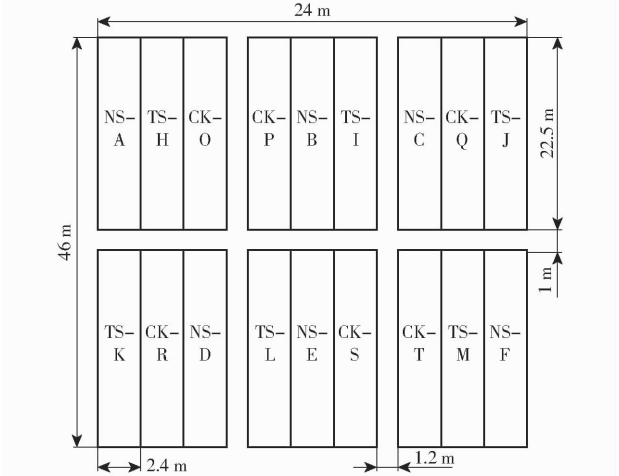


图2 田间试验布置示意图

Fig. 2 Field test arrangement

图中 A ~ T 为烟田编号。此次试验依据处理间设重复、局部控制、随机排列的原则进行设计。

根据山地中棵烟的农艺要求,该试验田的垄距为 1.2 m,株距为 0.5 m,3 种处理各移栽 540 棵烟苗,改进深松的烟株顺序编号为 NS - A1 ~ NS - F90,传统深松的烟株顺序编号为 TS - H1 ~ TS - M90,不深松的烟株顺序编号为 CK - O1 ~ CK - T90。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 土壤性状

土壤性状的检测均根据相关的国家标准进行^[26-28]。

1.3.1.1 土壤扰动系数和蓬松度

在深松前后及将因深松作业松散的土挖出后,将支架水平放置在 NS 与 TS 区域各自选定的随机位置,水平支架上有 9 个记号点位,各点位间距 10 cm,将激光测距仪抵靠在支架的 1 号点位,进行激光测距,依次右移将 9 个点位全部测完并记录,重复测定 3 次,通过 Excel 绘制两区域耕前地表线。

1.3.1.2 土壤紧实度

深松前及深松后,采用“五点法”,分别测得各区域原始土壤及耕后土壤的紧实度。将 SC900 型土壤紧实度仪匀速插入土壤内,深度为距离地面 30 cm,通过 FieldScout 软件将数据导出,取算术平均值即为各类土壤的紧实度^[19]。

1.3.1.3 土壤容重

深松前后在 NS、TS 区域应用环刀法取土,取土深度为地下 40 cm,并重复 3 次,即得到原始土壤及耕后土壤的环刀土样。团棵期、旺长初期、成熟期用上述方法得到相应时期环刀土样。采样当日称量环刀土样湿质量,干燥冷却后称量环刀土样干质量,求土样含水率,并计算出土壤容重。

1.3.2 烤烟根系形态性状

在 NS、TS、CK 3 个区域,分别随机选定烟株进行整株采样,各处理均重复 3 次,团棵期、旺长初期、成熟初期均进行一次该样本的采集。24 h 内将根与其他部分分离,将根洗净、剪碎,保证每一根小根块均低于玻璃方盘的高度,将这些小根块布局松散地放置在干净的玻璃方盘中,扫描、分析并存储数据及图像。

1.3.3 烤烟农艺性状

在 NS、TS、CK 3 个区域,分别随机选定烟株进行采样,各处理均重复 3 次,团棵期、旺长初期、成熟初期均进行一次该样本的采集。采样后需在 24 h 内将茎、叶、根分离,将泥垢冲刷、洗净。测量叶片的最大叶长和最大叶宽。

每株测量完毕后,计算叶面积指数,计算式为

$$LAI = 0.75\rho \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (L_{ij}B_{ij})}{m}$$

(1)

式中 LAI——叶面积指数
 ρ ——种植密度,株/hm²
 m ——测定株数,株
 n ——第 j 株的总叶片数,片
 L_{ij} ——最大叶长,cm
 B_{ij} ——最大叶宽,cm

1.3.4 烤烟干物质量

在 NS、TS、CK 3 个区域,分别对随机选定的整个烟株进行采样,各处理均重复 3 次,团棵期、旺长初期、成熟初期均进行一次该样本的采集。24 h 内将根、茎、叶分离,分别用电子秤称量湿质量后放入标记好的牛皮纸袋中,然后放入干燥箱中,温度设置为 110℃,时间为 8 h,干燥后冷却 20 min,立即在电子秤上进行称量,之后进行 3 h 干燥,冷却后称量,重复进行直至与上次称量结果相差 3 mg 以内,最后结果即为干物质量。

1.3.5 烤烟经济性状

将烤烟分组收获、堆放、烘烤、贮藏,请烟站的专家进行评级,得到上等烟比例、均价。将烟叶置于盛放器皿上,用电子秤进行称量,计算产量,结合均价求得产值。

1.4 样本随机性选择与数据处理

通过编程软件的 randperm 函数实现样本随机性选择,将每个处理的 540 棵有各自编号的烟株的顺序随机重新排列,在烟株整个生育期内,按照该顺序进行采样,如若遇到死株,便依照顺序后延,取编号处于采样顺序中下一位的烟株。

采用 DPS 数据处理系统统计分析数据和检验显著性(显著水平为 $P < 0.05$),采用 Excel 软件制图。

2 结果与分析

2.1 不同深松方式对土壤性状的影响

2.1.1 不同深松方式对土壤扰动系数和蓬松度的影响

在试验田中,本文深松铲的土壤蓬松度比传统凿式深松铲的土壤蓬松度高 0.4 个百分点、土壤扰动系数高 14.79 个百分点。红壤土质黏重,在土壤扰动系数大于 50% 时,传统凿式深松铲深入地下 30 cm 进行深松作业难以达到农艺要求,说明传统凿式深松铲并不适用于所有地域的土壤。上述情况体现了设计适用于当地烟田条件的深松铲的必要

性,因地制宜地改进深松铲可有效增大土壤扰动系数,加强深松效果,并为山地中棵烟的根系发育创造充足的空间。两类深松铲的对比见表 1。

表 1 土壤扰动效果对比

Tab.1 Soil disturbance effect comparison

铲型	A_q/cm^2	A_h/cm^2	A_s/cm^2	土壤蓬松度/%	土壤扰动系数/%
本文深松铲	$2\,462.0 \pm 30.55$	$2\,713.4 \pm 28.12$	$1\,510.0 \pm 25.51$	10.22	61.33
传统耨式深松铲	$2\,443.4 \pm 33.25$	$2\,683.3 \pm 21.61$	$1\,137.1 \pm 16.39$	9.82	46.54

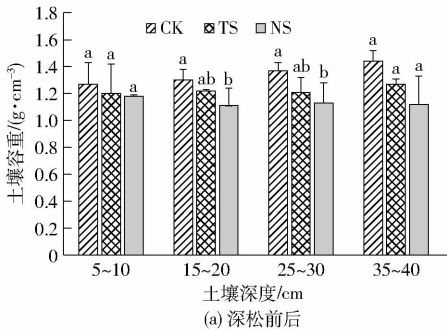
注: A_q 为耕前地表线到理论沟底线的剖面面积; A_h 为耕后地表线到理论沟底线的剖面面积; A_s 为耕前地表线到实际沟底线的剖面面积。

2.1.2 不同深松方式对土壤紧实度的影响

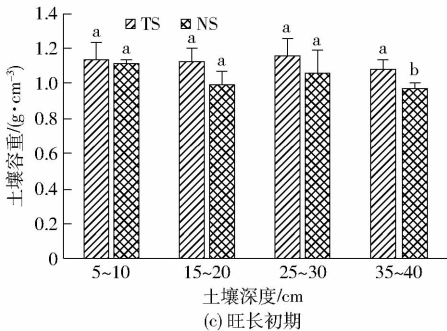
分别对地下 10、20 cm 处的土壤紧实度进行测定,发现 NS 区域比 CK 区域分别小 68.62%、88.29%,TS 区域比 CK 区域小 36.19%、73.14%,NS 区域比 TS 区域小 50.82%、56.40% (图 3)。这体现出“深松”打破犁底层的良好效果,两种深松都使得该深度的土壤的紧实度大幅降低,但是本文深松铲使得土壤的紧实度降幅更大。地下 30 cm 处的土壤紧实度,NS 区域比 TS 区域小 53.95%。由地下各深度层的整体情况可看出,使用自主设计的深松铲进行深松作业,可有效降低土壤紧实度,其效果优于传统耨式深松铲,更有助于烤烟根系在土壤内延伸、生长。

2.1.3 不同深松方式对土壤容重的影响

深松使各深度层的土壤容重均发生了明显的变



(a) 深松前后



(c) 旺长初期

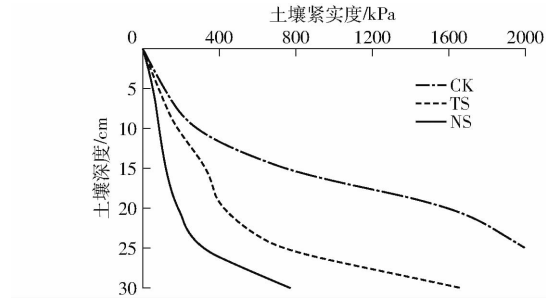
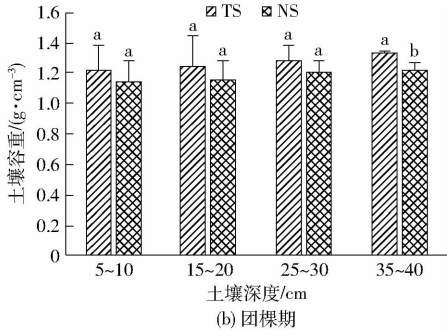


图 3 土壤紧实度变化曲线

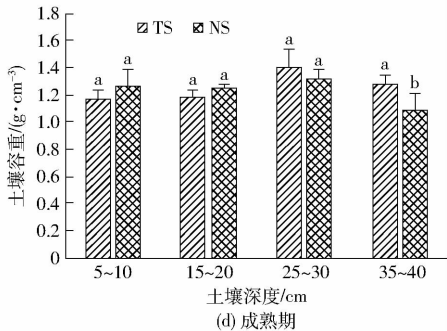
Fig.3 Change curves of soil compactness

化,5 ~ 10 cm、15 ~ 20 cm、25 ~ 30 cm、35 ~ 40 cm 4 个深度层的土壤容重如图 4a(图中不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$),下同)所示。NS 区域和 TS 区域各自的土壤容重相较于 CK 区域均有所降低,经由本文深松铲耕整后的土壤容重降低幅度比传统耨式深松铲耕整后的土壤容重降低幅度大 5.84%。

如图 4b、4c 所示,团棵期和旺长初期的各深度层的土壤容重均呈现出 NS 区域低于 TS 区域的状态,但是在 5 ~ 10 cm、15 ~ 20 cm 和 25 ~ 30 cm 区段内两者的差异都不存在显著性,而在 35 ~ 40 cm 区段内,NS 区域的容重比 TS 区域的容重低,且差异显著。团棵期和旺长初期时烟株的根系已经在土壤内不断生长,容重的变化不再具有规律性,而在深松时期经本文深松铲耕作过的土壤比传统深松铲耕作的土壤结构更适宜根系生长,土壤容重降幅更大,所以烟株移栽后不同深松方式的作业效果差异显著。但是两个时期存在着区别,旺长期的容重各深度层都比往常要低,这是因为 2019 年 6 月云南省处于严



(b) 团棵期



(d) 成熟期

图 4 土壤容重对比

Fig.4 Contrast diagram of soil bulk density

重干旱时期^[20],烟农需全天灌溉,所以土壤中积水较多,使得容重较小。

如图 4d 所示,成熟期的容重对比情况与团棵期、旺长初期相比出现了明显变化,在深度层 5~10 cm 和 15~20 cm 出现了 TS 区域比 NS 区域容重更低的情况,而深度层 25~30 cm 的 NS 区域的容重低于 TS 区域,深度层 35~40 cm 则延续了之前的状态。

在深松时期,土壤中没有根系,当烟苗被移栽到土壤中后,随着根系逐渐伸长、增粗,使土壤趋于松散,根系的长势反作用于土壤容重。本文深松铲的土壤扰动宽度比另外两种方式大,使得根系长势更

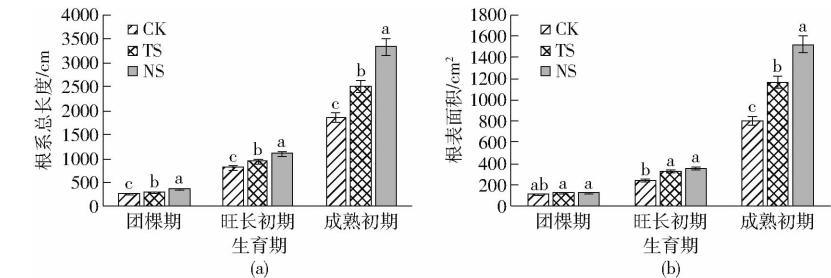


图 5 不同深松方式对烤烟根系形态的影响

Fig. 5 Effects of different subsoiling methods on root morphology of flue-cured tobacco

2.2.2 不同深松方式对烤烟根表面积的影响

如图 5b 所示,NS、TS 和 CK 处理后的土壤中的根表面积在团棵期并没有呈现出差异的显著性,这是因为影响根表面积的因素如根长、根的内容物含量等在团棵期尚未增加。在旺长初期和成熟初期的差异较为显著,在成熟初期,与 TS 区域相比, NS 区域烟草植株的根表面积增加 30.41%。

2.2.3 不同深松方式对烤烟根体积的影响

如图 5c 所示,在团棵期,3 种深松方式之间的差异没有显著性,表现出了与根表面积类似的情况,原因大致相同。旺长初期和成熟初期的根体积差异较为显著,由此可看出,相较于传统凿式深松铲,使用本文深松铲进行深松,可使得栽植在该土壤内的山地烟根系在旺盛生长的时期吸收到更多的养分,从而更好地供给整株烟的发育。在成熟初期,与 TS 区域相比, NS 区域烟草植株的根体积增加 45.67%。

以上 3 种指标在经过改进深松、传统深松和不深松处理后的差异性表现,说明深松对于烟株在土壤内的根系的生长发育具有促进作用,耕层扩增有助于根系在土壤内吸收充足的养分(图 6 为根系各生长期的扫描图)。深松方式的选择对于山地烟是否能长出发达的根系起到了重要的影响,而自主设计的深松铲可为栽植在云南滇中烟区的地烟创造良好的根系发育环境,减弱土壤对根系生长的阻碍,有利于山地烟移栽后根系对土壤养分的吸收,为培

好,因此,在其耕深下方 10 cm 内的土壤出现了容重显著降低的现象。

2.2 不同深松方式对烤烟根系形态性状的影响

2.2.1 不同深松方式对烤烟根系总长度的影响

如图 5a 所示,3 种不同的深松方式在团棵期已表现出了各差异间的显著性,其后在旺长初期和成熟初期各差异依然保持着显著性,说明深松对烤烟根系的伸长起到了至关重要的作用,其中应用 NS 方式耕整过的土壤内的根系比 TS 和 CK 更为发达。在成熟初期,与 TS 区域相比, NS 区域烟草植株的总根长增加 33.80%。

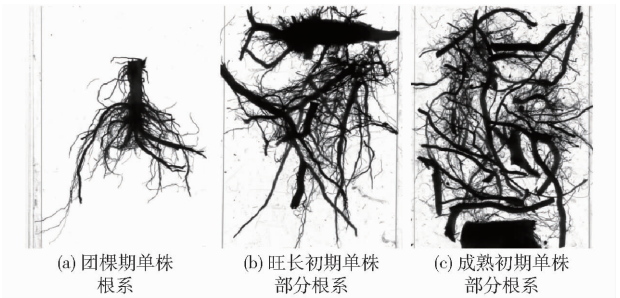
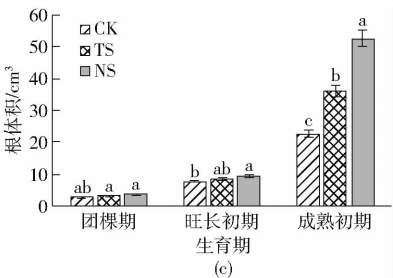


图 6 根系扫描图像

Fig. 6 Scan images of roots

育山地中棵烟提供助力。

2.3 不同深松方式对烤烟农艺性状的影响

团棵期时,改进深松处理后的土壤上栽植的烤烟比传统深松在长势方面已表现出优势,不过上述差异并没有表现出显著性,这是因为烟株及其根系在团棵期尚未得到充分的发育,土壤疏松、空间宽阔的优势还无法得到显著体现,如表 2 所示。

旺长初期,改进深松和传统深松处理后的土壤上栽植的烤烟有两个指标呈现显著性差异,即株高与茎围。其余各指标的差异虽不显著,但是可看出在旺长初期改进深松处理的烤烟样本的农艺性状整体存在着优势,如表 3 所示。

成熟初期,改进深松和传统深松处理后的土壤上栽植的烤烟茎围、有效叶片数比不进行深松处理的高,两组差异均表现出了显著性;改进深松与不深松间的株高、叶面积指数、最大叶长差异显著,而

表 2 不同深松方式对团棵期烤烟农艺性状的影响

Tab.2 Effects of different subsoiling methods on agronomic characters of flue-cured tobacco at group stage

处理	株高/cm	茎围/cm	有效叶片数	叶面积指数	最大叶长/cm	最大叶宽/cm
改进深松	(19.67 ± 1.53) ^a	(5.67 ± 0.58) ^a	(6.83 ± 0.29) ^a	(0.38 ± 0.03) ^a	(33.33 ± 1.15) ^a	(18.33 ± 0.58) ^a
传统深松	(19.33 ± 0.58) ^a	(5.17 ± 0.29) ^a	(6.67 ± 0.29) ^a	(0.38 ± 0.03) ^a	(33.00 ± 1.00) ^a	(18.33 ± 1.53) ^a
不深松	(18.00 ± 1.00) ^a	(4.33 ± 1.15) ^a	(6.33 ± 0.58) ^a	(0.30 ± 0.07) ^a	(31.00 ± 2.00) ^a	(18.00 ± 1.73) ^a

注：同列数据后不同字母表示各处理在 0.05 水平上差异显著，下同。

表 3 不同深松方式对旺长初期烤烟农艺性状的影响

Tab.3 Effects of different subsoiling methods on agronomic characters of flue-cured tobacco at early growing stage

处理	株高/cm	茎围/cm	有效叶片数	叶面积指数	最大叶长/cm	最大叶宽/cm
改进深松	(41.67 ± 1.53) ^a	(7.33 ± 0.29) ^a	(11.33 ± 0.58) ^a	(1.15 ± 0.05) ^a	(46.67 ± 2.52) ^a	(24.67 ± 1.53) ^a
传统深松	(37.33 ± 0.58) ^b	(6.33 ± 0.29) ^b	(11.00 ± 0.00) ^a	(1.04 ± 0.12) ^{ab}	(44.67 ± 1.53) ^{ab}	(23.67 ± 2.08) ^a
不深松	(33.33 ± 1.15) ^c	(5.67 ± 0.58) ^b	(9.33 ± 0.58) ^b	(0.94 ± 0.10) ^b	(42.67 ± 1.15) ^b	(23.00 ± 1.73) ^a

传统深松与不深松间的差异不显著，说明传统深松处理比不深松处理在这 3 方面的促进作用已不再明显；此外，改进深松处理后的土壤上栽植的烤烟的株高、茎围分别与传统深松的差异显著，如表 4 所示。

表 4 不同深松方式对成熟初期烤烟农艺性状的影响

Tab.4 Effects of different subsoiling methods on agronomic traits of flue-cured tobacco at early maturity stage

处理	株高/cm	茎围/cm	有效叶片数	叶面积指数	最大叶长/cm	最大叶宽/cm
改进深松	(101.00 ± 5.00) ^a	(10.33 ± 0.29) ^a	(18.67 ± 0.58) ^a	(4.16 ± 0.24) ^a	(77.67 ± 1.53) ^a	(31.33 ± 0.58) ^a
传统深松	(85.33 ± 3.79) ^b	(9.33 ± 0.29) ^b	(17.67 ± 0.58) ^a	(3.57 ± 0.03) ^{ab}	(74.67 ± 2.89) ^{ab}	(30.67 ± 0.58) ^a
不深松	(78.33 ± 3.06) ^b	(8.50 ± 0.50) ^c	(15.33 ± 0.58) ^b	(3.27 ± 0.68) ^b	(69.67 ± 4.51) ^b	(27.67 ± 3.51) ^a

因此，烤烟深松时应用深松技术且选择适用于当地土质的深松铲，将对烤烟的株型、长势带来极大的积极影响。说明深松有利于改善烟田土壤结构，为烟株根系提供宽阔的生长空间，有助于烟株根系吸收养分，提高烟株茎的饱满程度。

2.4 不同深松方式对烤烟干物质质量的影响

如图 7 所示，团棵期，NS 相比 TS 处理后的土壤上栽植的烤烟干物质质量没有显著差异，因为烤烟在团棵期的质量比较小，所含干物质较少。旺长初期，3 种深松处理方式的地下干物质质量均没有显著性差异，烤烟快速生长过程中，土壤内的养分由根系吸收进而供给整株植株，地下部表现出的差异不大。NS 在旺长初期的地上部干物质重体现出了优势，比 TS 高 16.41%，比 CK 高 20.90%，均为显著性差异，说明 NS 在旺长初期就已经比另外两种深松方式更利于促使烤烟的地上茎、叶吸收养分，干物质由地下到地上的运输更为流畅，所以依据整株的干物质而言，应用本文深松铲的山地烟在旺长初期的生物量比另外两种处理方式高，更能满足烟株内部进行的各项生理反应的需求。成熟初期，NS 的地下部干物质质量比 TS 高 28.26%，比 CK 高 36.76%，差异均显著，说明 3 种处理中应用本文深松铲进行深松的烟株根系的生长环境更为适合，更有利于根系对养分的吸收。由成熟初期的地上部干物质质量可看出，NS 比 CK 高 35.37%，TS 比 CK 高 14.4%，NS 比 TS

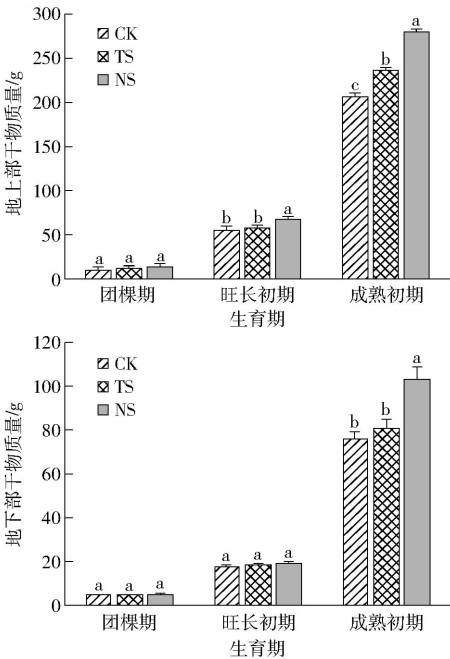


图 7 不同深松方式对生物量的影响

Fig. 7 Effects of different subsoiling methods on biomass

高 18.28%，3 组差异均为显著性差异，说明深松可以有效改善土壤耕层结构，有利于根系吸收烟株生长所需的干物质，并且应用适合当地土壤物理特性的深松铲，会使深松作业效果更为优异。

2.5 不同深松方式对烤烟经济性性状的影响

如表 5 所示，各项经济指标由大到小依次均为 NS、TS、CK，NS 和 TS 的产量分别比 CK 高 19.81%

和 12.57%, 产值分别高 30.08% 和 16.53%, 上等烟比例分别高 14.51% 和 10%, 均价分别高 8.4% 和 3.4%, 差异均显著, 说明应用深松技术可以使烤烟的经济效益得到显著提高。NS 的产量比 TS 高 6.43%, 产值高 11.63%, 上等烟比例高 4.11%, 均价高 4.83%, 均为显著差异, 说明应用本文深松铲可以提高山地中棵烟烟田产出率, 为烟农创造更高的收益。

表 5 不同深松方式对烤烟经济性状的影响

Tab.5 Effects of different subsoiling methods on output and output value

处理	产量/ (kg·hm ⁻²)	产值/ (万元·hm ⁻²)	上等烟比例/ %	均价/ (元·kg ⁻¹)
NS	(2 572.65 ± 15.7) ^a	(5.92 ± 0.01) ^a	(43.87 ± 0.63) ^a	(22.98 ± 0.13) ^a
	(2 417.15 ± 9.49) ^b	(5.30 ± 0.02) ^b	(42.14 ± 0.36) ^b	(21.92 ± 0.04) ^b
TS	(2 147.21 ± 39.38) ^c	(4.55 ± 0.08) ^c	(38.31 ± 0.66) ^c	(21.20 ± 0.04) ^c
CK				

通过田间试验的样本数据结果可以看出, 应用本文深松铲, 相较于传统凿式深松铲和不深松的耕作方式, 耕后土壤更为疏松, 土壤容重明显降低, 这使得耕后栽植的烟株根系能够具有更便于伸展的生长环境, 根系在总长度、表面积、体积方面都表现得更为发达, 根系可以在土壤内吸取更多的养分、水分以供地上部的发育, 所以山地烟的株型长势更为理想, 烟茎粗实, 烟叶饱满、繁多, 干物质含量更高, 从而产值、产量表现更优, 根据山地中棵烟的农艺需求和当地的土壤条件所改进设计的深松铲的优势得到了显著体现, 达到了适产、优质的生产目标, 这与山地中棵烟概念相符。试验证明, 本文深松铲适用于山地中棵烟烟田的实际生产。

3 讨论

3.1 不同深松方式对土壤性状的影响

土壤扰动系数和蓬松度、土壤紧实度及土壤容重是土壤性状的重要表现形式。温美娟等^[29]的研究表明, 深松对土壤紧实度、容重和入渗率均有显著影响, 与 2015 年试验前相比, 2017 年收获后土壤紧实度和容重在深松后降低较为明显, 0~40 cm 土层土壤紧实度下降了 40.3%, 0~40 cm 土层土壤容重下降了 3.4%, 犁底层达到适宜状态。本研究表明本文深松铲的土壤扰动系数比传统凿式深松铲高 14.79 个百分点, 且在极为粘实的红壤土内作业依然可以达到理想的土壤疏松效果; 耕后土壤比传统深松铲耕后土壤在地下 30 cm 处的紧实度小 53.95%, 更利于根系的生长; 耕后土壤在地下 15~

20 cm 和地下 25~30 cm 区段的土壤容重与原始土壤相比均大幅降低, 且都表现出了两者间差异的显著性, 而传统深松铲耕后土壤与原始土壤间的容重差异不显著, 说明在云南滇中烟区应用本文深松铲更有利于土壤容重的降低, 本文深松铲在改善山地中棵烟烟田土壤的物理性状方面表现突出。

3.2 不同深松方式对根系形态性状的影响

在烟田进行深松处理对烟草的根系形态产生的显著的影响。刘棋等^[30]的研究表明, 深耕、深松措施增加烤烟根系鲜质量绝对量, 促进烤烟根系纵向下扎生长, 缓解上层根系的拥挤度。本文研究表明 3 种不同处理的总根长在整个生育期均表现出了差异的显著性, 说明应用本文深松铲能对根系伸长带来积极影响; 而 3 种不同处理的根表面积在成熟初期也存在显著性差异, 本文深松铲比不深松高 89.25%, 说明对于根系发育而言, 在实际生产中应用本文深松铲有着极大的意义; 关于根体积表现出的情况与根表面积大致相同, 成熟初期差异显著。整体来看, 本文深松铲可有效促进山地中棵烟的根系生长。

3.3 不同深松方式对烤烟农艺性状的影响

烤烟的农艺性状关乎着烤烟的生长发育, 对烟民的经济利益具有重要影响。徐天养等^[4]的研究表明, 不同耕作深度处理烟株前期生长无明显差异, 但到打顶时烟株根系发育和分布则有显著差异, 耕作深度为 40 cm 处理明显有更多的根系, 各处理烟株烟叶叶面积指数及最大叶面积和整株干物质累积量均随耕作深度增加而增大, 并且烤后烟叶产量、产值以耕作深度为 40 cm 处理最高。本文研究表明, 成熟初期, 本文深松铲耕后土壤上的烟株株高达 1 m 以上, 茎围达 10 cm 以上, 粗实的烟茎为烟叶提供充足的养分, 说明本试验中培育的叶片饱满、优质, 其余指标均大于另外两种处理, 改进深松处理在各指标均表现最优。说明本文深松铲对培育山地中棵烟株型起积极作用。

3.4 不同深松方式对烤烟干物质质量的影响

烤烟的干物质质量对烤烟产量和产值的影响至关重要。HU 等^[31]的研究表明, 耕作深度 30 cm 会促进烤烟根系向下延伸至 30~40 cm 土层, 相对传统旋耕的烤烟叶片增多、干物质质量提高、氮磷吸收量增大。这些结果有利于烤烟产量的提高。在 3 年试验期内, 烤烟产量提高了 4%~9%。本文研究发现, 在烤烟干物质质量方面, 成熟初期, 3 种不同处理在地上部和地下部均表现出了差异的显著性, 说明应用本文深松铲有效改善土壤耕层结构, 有利于根系吸收烟株生长所需的干物质以供应给整株山地烟, 助

其达到山地中棵烟的叶片质量。

3.5 不同深松方式对烤烟经济性状的影响

烤烟的经济性状关乎着烤烟的经济效益,因此具有良好经济性状的烤烟是山地烟培育的目标。童文杰等^[2]的研究表明,深松作业能够有效地改善烤烟的生长发育状况,提高烤烟的产量,进而增加烤烟的经济效益。本文的研究发现,在烤烟经济性状方面,本文深松铲对产值有显著影响,实现了增产增收的生产目标,能够使烟农的收入显著提高。

4 结论

(1)与传统的旋耕相比,深松处理能够改善土壤扰动系数和蓬松度、土壤紧实度及土壤容重等物理性质。与不深松(CK)区域相比,改进深松在地下10 cm和20 cm处的土壤紧实度分别降低68.62%、88.29%,传统深松在地下10 cm和20 cm处的土壤紧实度分别降低36.19%、73.14%。在成熟初期,改进深松与传统深松的地上部干物质量分别比不深松高35.37%、14.4%。试验表明,深松处理能够促进作物的生长发育,对作物的产量和产值的提高具有积极影响。

(2)与传统深松处理相比,改进深松处理可以

降低山地烟田土壤容重、土壤紧实度,有效增大土壤扰动系数。与传统深松(TD)区域相比,改进深松区域(NS)的土壤扰动系数增加14.79个百分点,在地下10、20、30 cm处的土壤紧实度分别降低50.82%、56.40%、53.95%,耕后土壤容重变化率增大5.84%。在成熟初期,与传统深松相比,改进深松处理后土壤栽植的烟株在成熟初期的总根长、根表面积、根体积、株高、茎围、叶面积指数、最大叶长、最大叶宽、地下部干物质量、地上部干物质量、产量、上等烟比例分别增加了33.80%、30.41%、45.67%、18.36%、10.72%、16.53%、4.02%、2.15%、28.26%、18.28%、6.43%、4.11%,有效叶片数均增加了一片叶,均价和产值分别增加了4.83%和11.63%。试验表明,本文深松铲在加强深松效果、优化植烟土壤环境、促进烤烟根系生长发育、优化根系空间分布方面有着重要作用。

(3)应用自主设计的深松铲及其配套搭载机具,在云南滇中烟区进行深松作业,能有效地改善云南省山地烟烟田的耕层结构,从而促进山地烟的根系生长,使根系吸收更多的水分、养分以供给地上部发育,提高烟叶干物质量,使经济性状的表现更佳,是培育山地中棵烟株型的优良措施。

参 考 文 献

- [1] 蒋样明,崔伟宏,董前林. 基于空间技术的烤烟种植生态环境综合评价分析[J]. 植物生态学报,2012,36(1):47-54.
JIANG Yangming, CUI Weihong, DONG Qianlin. Comprehensive evaluation and analysis of tobacco planting environment based on space technology[J]. Chinese Journal of Plant Ecology,2012,36(1):47-54. (in Chinese)
- [2] 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)
- [3] 王欢欢,任天宝,张志浩,等. 生物质炭对烤烟旺长期根系发育及光合特性的影响[J]. 水土保持学报,2017,31(2):287-292.
WANG Huanhuan, REN Tianbao, ZHANG Zhihao, et al. Effects of biochar on root development and leaf photosynthetic characteristics of flue-cured tobacco in the vigorous growing period[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2017, 31(2): 287-292. (in Chinese)
- [4] 徐天养,赵正雄,李忠环,等. 耕作深度对烤烟生长、养分吸收及产量、质量的影响[J]. 作物学报,2009,35(7):1364-1368.
XU Tianyang, ZHAO Zhengxiong, LI Zhonghuan, et al. Effect of tilling depth on growth, nutrient uptake, yield and quality of flue-cured tobacco plant[J]. Acta Agronomica Sinica, 2009,35(7):1364-1368. (in Chinese)
- [5] YIN Baozhong, HU Zhaohui, WANG Yandong, et al. Effects of optimized subsoiling tillage on field water conservation and summer maize (*Zea mays* L.) yield in the North China Plain[J]. Agricultural Water Management, 2021, 247: 106732.
- [6] 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)
- [7] FENG Xiaomin, HAO Yubo, LATIFMANESH H, et al. Effects of subsoiling tillage on soil properties, maize root distribution, and grain yield on mollisols of Northeastern China[J]. Agronomy Journal, 2018, 110(4):1607-1615.
- [8] 张瑞富,杨恒山,高聚林,等. 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 Ruifu, YANG Hengshan, GAO Julin, et al. Effect of subsoiling on root morphological and physiological characteristics of spring maize[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(5): 78-84. (in Chinese)
- [9] 张继光,郑林林,石屹,等. 不同种植模式对土壤微生物区系及烟叶产量与质量的影响[J]. 农业工程学报,2012,28(19):93-102.
ZHANG Jiguang, ZHENG Linlin, SHI Yi, et al. Effects of different planting patterns on soil microbial community, yield and quality of flue-cured tobacco leaves[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(19): 93-102. (in Chinese)
- [10] 王维,陈建军,吕永华,等. 烤烟氮素营养诊断及精准施肥模式研究[J]. 农业工程学报,2012,28(9):77-84.
WANG Wei, CHEN Jianjun, LÜ Yonghua, et al. Research on nitrogen nutrition diagnosis and precision fertilizing model for

- flue-cured tobacco[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(9):77–84. (in Chinese)
- [11] 张生杰, 黄元炯, 任庆成, 等. 氮素对不同品种烤烟叶片衰老、光合特性及产量和品质的影响[J]. 应用生态学报, 2010, 21(3):668–674.
ZHANG Shengjie, HUANG Yuanjiong, REN Qingcheng, et al. Effects of nitrogen fertilization on leaf senescence, photosynthetic characteristics, yield, and quality of different flue-cured tobacco varieties[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2010, 21(3): 668–674. (in Chinese)
- [12] THÉRIAULT L, DESSUREAULT-ROMPRÉ J, CARON J. Short-term improvement in soil physical properties of cultivated histosols through deep-rooted crop rotation and subsoiling[J]. Agronomy Journal, 2019, 111(4): 2084–2096.
- [13] MÜLLER M, SCHNEIDER J R, KLEIN V A, et al. Root growth and crop performance of soybean under chemical, physical, and biological changes after subsoiling[J]. Agronomy Journal, 2020, 112(2): 932–947.
- [14] WANG Hanbo, BAI Wenbo, HAN Wei, et al. Effect of subsoiling on soil properties and winter wheat grain yield[J]. Soil Use and Management, 2019, 35(4): 643–652.
- [15] 郑侃, 何进, 李洪文, 等. 中国北方地区深松对小麦玉米产量影响 Meta 分析[J]. 农业工程学报, 2015, 31(22): 7–15.
ZHENG Kan, HE Jin, LI Hongwen, et al. Meta-analysis on maize and wheat yield under subsoiling in Northern China[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(22): 7–15. (in Chinese)
- [16] CROITORU S, VALENTIN V, EUGEN M, et al. Determination of subsoiler traction force influenced by different working depth and velocity[C]//15th International Scientific Conference on Engineering for Rural Development, 2016:817–825.
- [17] 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)
- [18] KUANG Naikun, MA Yuzhao, HONG Shengzhe, et al. Simulation of soil moisture dynamics, evapotranspiration, and water drainage of summer maize in response to different depths of subsoiling with RZWQM2[J]. Agricultural Water Management, 2021, 249: 10794.
- [19] 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]. 农业机械学报, 2017, 48(1):47–56, 63.
DING Qishuo, GE Shuangyang, REN Jun, et al. Characteristics of subsoiler traction and soil disturbance in paddy soil[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(1): 47–56, 63. (in Chinese)
- [20] 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]. 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]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(2): 60–67. (in Chinese)
- [21] 王学振, 岳斌, 高喜杰, 等. 深松铲不同翼铲安装高度时土壤扰动行为仿真与试验[J]. 农业机械学报, 2018, 49(10): 124–136.
WANG Xuezheng, YUE Bin, GAO Xijie, et al. Discrete element simulations and experiments of disturbance behavior as affected by mounting height of subsoiler's wing[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(10):124–136. (in Chinese)
- [22] 张凯, 刘战东, 强小嫚, 等. 深松处理对豫北农田土壤水分与作物耗水的影响[J]. 农业机械学报, 2019, 50(10):251–258.
ZHANG Kai, LIU Zhandong, QIANG Xiaoman, et al. Effects of subsoiling on soil moisture and crop water consumption in farmland of Northern Henan Province[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(10): 251–258. (in Chinese)
- [23] MOHAMMAD A, GHOLAMHOSSEIN S, YOUSEF A G. New wings on the interaction between conventional subsoiler and paraplow tines with the soil: effects on the draft and the properties of soil[J]. Archives of Agronomy and Soil Science, 2019, 65(1): 88–100.
- [24] 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]. 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]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(9): 62–72. (in Chinese)
- [25] WANG Yueming, LI Na, MA Yunhai, et al. Field experiments evaluating a biomimetic shark-inspired (BioS) subsoiler for tillage resistance reduction[J]. Soil & Tillage Research, 2020, 196: 104432.
- [26] 中华人民共和国农业部. NY/T 1121.1—2006 土壤检测 第1部分:土壤样品的采集、处理和贮存[S]. 北京:中国农业出版社, 2006.
- [27] 中华人民共和国农业部. NY/T 1121.3—2006 土壤检测 第3部分:土壤机械组成的测定[S]. 北京:中国农业出版社, 2006.
- [28] 中华人民共和国农业部. NY/T 1121.4—2006 土壤检测 第4部分:土壤容重的测定[S]. 北京:中国农业出版社, 2006.
- [29] 温美娟, 王成宝, 霍琳, 等. 深松和秸秆还田对甘肃引黄灌区土壤物理性状和玉米生产的影响[J]. 应用生态学报, 2019, 30(1):224–232.
WEN Meijuan, WANG Chengbao, HUO Lin, et al. Effects of subsoiling and straw returning on soil physical properties and maize production in Yellow River irrigation area of Gansu, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2019, 30(1): 224–232. (in Chinese)
- [30] 刘棋, 王津军, 封幸兵, 等. 耕作方式对山地烟田土壤物理性状及烤烟根系空间分布的影响[J]. 中国生态农业学报, 2019, 27(11): 1673–1681.
LIU Qi, WANG Jinjun, FENG Xingbing, et al. Effects of tillage methods on soil physical properties and spatial distribution of flue-cured tobacco (*Nicotiana tabacum*) roots in mountainous tobacco fields[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2019, 27(11): 1673–1681. (in Chinese)
- [31] HU Ruiwen, LIU Yongjun, CHEN Tao, et al. Responses of soil aggregates, organic carbon, and crop yield to short-term intermittent deep tillage in Southern China[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 298:126767.