网络出版时间:2026-04-08 DOI:10.13207/j.jnwafu.2026.10.008

深松耕作对土壤理化性质及棉花根系形态特征和产量的影响

尼陆排尔·于苏甫江[1,2,3],胡芳[3],王静[3],王亮[2],郭仁松[2],汤秋香[1]

(1 新疆农业大学 农学院/棉花教育部工程研究中心/丝绸之路经济带棉花优质高效协同创新中心,新疆 乌鲁木齐 830052;
2 新疆维吾尔自治区农业科学院 棉花研究所/国家棉花工程技术研究中心,新疆 乌鲁木齐 830091;
3 新疆维吾尔自治区农业技术推广总站,新疆 乌鲁木齐 830000)

[摘 要] 【目的】探究深松耕作对土壤理化性质、棉花根系形态特征及产量的影响,筛选适宜的深松深度,为新疆膜下滴灌棉田深松耕作技术的优化提供理论依据。【方法】2019—2020年,在新疆阿瓦提县棉花科研示范基地开展试验,以新陆中54号为材料,设置不深松(CK)、深松30 cm(S30)、深松40 cm(S40)、深松50 cm(S50)4个处理,研究不同深松耕作处理对土壤体积质量、含水率、含盐量、养分含量及棉花根系形态指标、地上部干物质积累量以及产量的影响。【结果】2019—2020年,与CK相比,S30、S40、S50处理对土壤理化性质有明显影响,其中S40处理能明显降低0~60 cm土层的土壤体积质量和含盐量,提高土壤含水率和有机质、速效氮、速效磷和速效钾含量。2019—2020年,S40和S50处理棉花根长、根表面积和根体积较CK显著增加,其中S40处理的增幅最大。各深松耕作处理棉花的根直径均低于CK,但总体与CK差异不显著。2019—2020年,在现蕾期,各处理间棉花地上部干物质积累量无显著差异;在花铃期和吐絮期,S40处理棉花地上部干物质积累量明显高于其他处理。2019和2020年,S40处理棉花有效铃数、衣分、籽棉产量均明显高于其他处理,分别较CK增加了9.5%,10.5%,16.2%和8.1%,8.8%,13.5%。【结论】不同深松耕作对土壤理化性质、棉花根系形态特征及产量有明显影响,最佳深松深度以40 cm为宜。

[关键词] 深松耕作;土壤理化性质;棉花;根系形态;棉花产量
[中图分类号] S562.052 [文献标志码] A [文章编号] 1671-9387(2026)10-0069-09

Effects of subsoiling tillage on soil physicochemical properties, cotton root morphology, and yield

YUSUFUJIANG Nilupaier[1,2,3], HU Fang[3], WANG Jing[3], WANG Liang[2], GUO Rensong[2], TANG Qiuxiang[1]

(1 *Silk Road Economic Belt Cotton High-quality and Efficient Collaborative Innovation Centre, Engineering Research Centre of Cotton, Ministry of Education/College of Agriculture, Xinjiang Agricultural University, Urumqi, Xinjiang* 830052, *China*; 2 *Cotton Research Institute, Xinjiang Academy of Agricultural Sciences/National Engineering Research Center for Cotton, Urumqi, Xinjiang* 830091, *China*; 3 *Xinjiang Uygur Autonomous Region Agricultural Technology Extension Station, Urumqi, Xinjiang* 830000, *China*)

Abstract: 【Objective】 This study aimed to investigate the effects of subsoiling tillage on soil physicochemical properties, cotton root morphology and yield, and identify the optimal subsoiling depth, to provide a theoreti-

[收稿日期] 2025-09-06 [修回日期] 2025-12-08
[基金项目] 国家重点研发计划项目(2022YFD1900105);国家棉花产业技术体系项目(CARS-15-12);国家自然科学基金项目(31860358)
[作者简介] 尼陆排尔·于苏甫江(1998—),女,新疆伊犁人,硕士,主要从事棉花高产理论与栽培技术研究。E-mail:2048794160@qq.com
[通信作者] 郭仁松(1982—),男,山东德州人,研究员,主要从事棉花高产栽培与耕作研究。E-mail:songgr08@163.com
汤秋香(1980—),女,河南开封人,教授,主要从事农田生态环境、作物高产栽培及高效生理机制和耕作制度研究。E-mail:790058828@qq.com

cal basis for optimizing subsoiling practices in cotton fields under mulched drip irrigation in Xinjiang.【Method】A field experiment was conducted from 2019 to 2020 at the Cotton Research and Demonstration Base in Awati County, Xinjiang, using cotton cultivar 'Xinluzhong 54'. Four treatments were applied: no subsoiling (CK), and subsoiling to depths of 30 cm (S30), 40 cm (S40), and 50 cm (S50). The study examined the effects of different subsoiling treatments on soil bulk density, moisture content, salt content, nutrient content, as well as cotton root morphological indicators, aboveground dry matter accumulation, and yield.【Result】From 2019 to 2020, compared with CK, the S30, S40, and S50 treatments significantly influenced soil physicochemical properties. The S40 treatment notably reduced soil bulk density and salt content in the 0—60 cm layer, while increasing soil moisture content and the contents of organic matter, available nitrogen, available phosphorus, and available potassium. During 2019—2020, the S40 and S50 treatments significantly increased cotton root length, root surface area, and root volume compared with CK, with the S40 treatment showing the greatest increase. Root diameter under all subsoiling treatments was lower than that under CK, but the differences were generally not significant. At the squaring stage in both years, there was no significant difference in aboveground dry matter accumulation among treatments. In contrast, at the flowering-boll and boll-opening stages, the S40 treatment exhibited significantly higher aboveground dry matter accumulation than other treatments. In 2019 and 2020, the S40 treatment also produced significantly higher numbers of effective bolls, lint percentage, and seed cotton yield compared with other treatments, with increases of 9.5%, 10.5%, 16.2% in 2019 and 8.1%, 8.8%, 13.5% in 2020 over CK, respectively.【Conclusion】Different subsoiling depths have significant effects on soil physicochemical properties, cotton root morphology, and yield. A subsoiling depth of 40 cm is recommended as the optimal practice.

Key words: subsoiling tillage; soil physicochemical properties; cotton; root morphology; yield of cotton

棉花是新疆农业经济的支柱产业,其产量的稳定与提升对区域发展至关重要[1]。根系作为棉花吸收水分和养分的主要器官,其形态与分布直接决定了棉花对土壤资源的利用效率,进而影响植株生长发育及最终产量形成[2-3]。在新疆棉区,虽然膜下滴灌技术的大面积推广能节水增效,但也因长期集约化耕作与连作,导致土壤出现了犁底层加厚、体积质量增加、通透性恶化等一系列物理结构性问题[4-5]。同时,连作消耗与浅层耕作模式也导致耕层养分库容衰减,限制了根系对养分的高效吸收,最终造成棉花根系下扎困难、分布浅层化,难以充分利用深层土壤水肥资源[6-7]。深松耕作作为一项打破犁底层、改善土壤物理结构的有效农艺措施,其增产增效潜力已得到广泛证实[8-9]。前人研究表明,深松耕作可显著降低土壤体积质量,提高土壤蓄水保墒能力[10-11];同时,深松耕作也能改善土壤通气状况,并激活微生物活性,促进有机质分解与养分形态转化,从而优化根系的生长环境[12-13]。在新疆棉区,相关研究也初步揭示了深松耕作的积极效应。例如,马君等[7]报道深松耕作后土壤速效钾呈现"先耗竭后补偿"的动态特征;崔建平等[9]证实深松耕作结合滴灌有助于抑制耕层盐分表聚。然而,现有研究多集中于深松耕作对土壤某一属性或棉花地上部产量的影响,而关于不同深松深度如何通过协同改良土壤物理结构与化学环境,进而驱动棉花根系形态建成,并最终影响产量形成的系统研究尚显不足。特别是针对新疆膜下滴灌棉田,明确一个能兼顾土壤改良、棉花根系优化与产量提升的适宜深松深度,是当前棉花生产中亟待解决的关键问题。因此,本研究以新疆典型膜下滴灌棉田为对象,通过设置不同深松深度处理,系统研究深松耕作对土壤理化性质和棉花根系形态、干物质积累及产量的影响,旨在阐明深松深度通过土壤物理与化学性质的协同改善来调控棉花根系生长及产量形成的机制,明确适宜的深松深度,以期为新疆棉田土壤耕作的优化和高产高效栽培提供理论依据与技术支撑。

1 材料与方法

1.1 材 料

试验于2019—2020年在阿瓦提县新疆农业科学院棉花科研示范基地(40°27′ N,80°21′ E,海拔1 025 m)进行。该基地位于天山南麓、塔克拉玛干沙漠北缘,属暖温带大陆性干旱气候,是典型的绿洲灌溉区。该区域降雨稀少,年均降雨量仅46.7

mm，年均蒸发量高达 1 890.7 mm，光热资源丰富，年平均气温 10.4 ℃，无霜期 211 d。该试验田为壤土，前茬作物为棉花，供试棉花品种为新陆中 54 号。试验点 2019－2020 年棉花生育期间的降水量和气温分布见图 1。

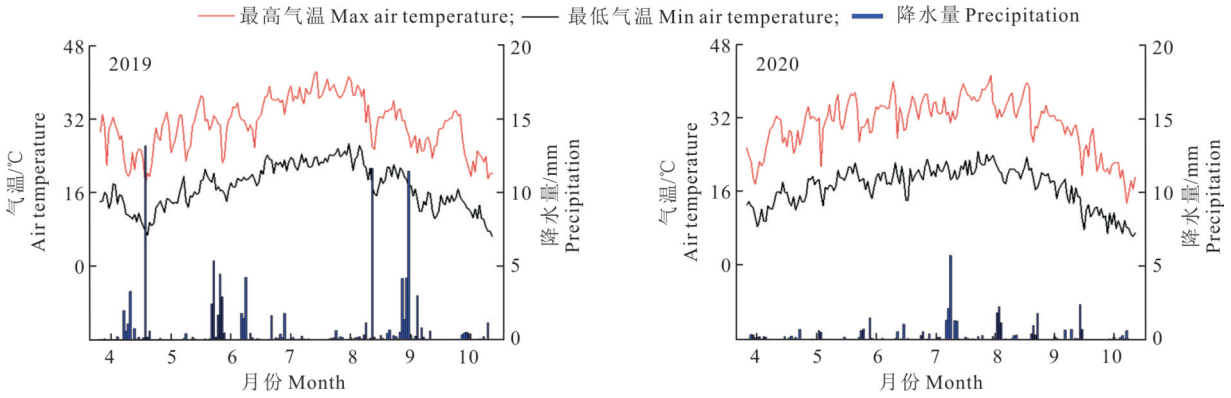


图 1　试验点 2019－2020 年棉花生育期间的降水量和气温分布

Fig. 1　Distribution of precipitation and temperature at the experimental site during cotton growing season from 2019 to 2020

1.2　试验设计

本试验采用土柱栽培与田间小区试验相结合的设计方案，共设 4 个处理：不深松（CK）、深松 30 cm（S30）、深松 40 cm（S40）和深松 50 cm（S50），每个处理 3 次重复。试验开始时（2019 年播种前）采集各处理耕层（0～60 cm）混合土壤样品测定基础养分含量，结果（表 1）显示，各处理试验田块的初始肥力状况均匀，无系统性差异。每个处理下，每个重复均包含一个由“土柱系统-田间小区”配对的观测单元。土柱系统：专用于破坏性取样。每个土柱定苗 1 株棉花。为满足不同生育期（现蕾期、花铃期、吐絮期）的取样需求，每个重复在各生育期分别破坏一个独立的土柱（即 1 株棉花），用于测定该时期的土壤理化性质、棉花根系形态及地上部干物质积累量。田间小区：专用于非破坏性调查。仅用于棉花收获期产量及其构成因素的测定，所有调查均不破坏植株，以保证最终产量数据的准确性与完整性。因此，本试验共设置用于破坏性取样的土柱植株总数为 36 株（4 处理×3 重复×3 个生育期）以及用于最终产量测定的田间小区 12 个（4 处理×3 重复）。

表 1　试验前各处理耕层（0～60 cm）土壤基础养分含量

Table 1　Initial soil nutrient content in the plow layer (0－60 cm) under different treatments before the experiment

处理 Treatment	有机质/(g·kg^{-1}) Organic matter	速效氮/(mg·kg^{-1}) Available nitrogen	速效磷/(mg·kg^{-1}) Available phosphorus	速效钾/(mg·kg^{-1}) Available potassium
CK	10.46	59.79	14.93	79.86
S30	11.65	70.66	13.38	63.08
S40	9.51	61.48	13.69	62.26
S50	10.42	66.17	15.54	69.28

注：CK 为不深松，S30 为深松 30 cm，S40 为深松 40 cm，S50 为深松 50 cm。下同。

Note: CK is no subsoiling, S30 is subsoiling to 30 cm, S40 is subsoiling to 40 cm, and S50 is subsoiling to 50 cm. The same below.

土柱试验方法如下：采用直径 30 cm、高 60 cm 的 PVC 管作为土柱。在填充土柱前，预先对相应处理的土壤进行人工模拟深松：CK 的土壤不进行深松；S30、S40、S50 处理的土壤则分别使用专用工具模拟深松至 30，40 和 50 cm 深度，以打破原状土并创造疏松的深层结构。随后，将经过不同深度处理的土壤，按照田间测定的设计体积质量，分层回填至对应的 PVC 土柱中。此方法确保了每个土柱内 0～60 cm 土层的土壤结构与其设计的深松深度严格对应，且各处理间土层互不干扰。深松处理仅在土柱埋设时一次性实施。棉花播种期分别为 2019 年 4 月 14 日和 2020 年 4 月 15 日，在土柱上布滴灌带、铺膜，膜上点播，每个根柱中定苗 1 株。滴水量用水表和球阀控制，其他田间管理措施同大田膜下滴灌棉花。

1.3　测定项目及方法

1.3.1　土壤理化指标　于棉花现蕾期（6 月 23 日）、花铃期（7 月 28 日）、吐絮期（9 月 8 日），用土钻采集 0～60 cm 土层土样，每 20 cm 为一层。采用环刀法测定土壤体积质量；用烘干法测定土壤含水率；用电导率法测定土壤电导率（EC），以表征土壤含盐量。

土壤有机质含量采用重铬酸钾外加热法测定,速效氮含量采用碱解扩散法测定,速效磷含量采用0.5 mol/L $NaHCO_3$浸提-钼锑抗比色法测定,速效钾含量采用1 mol/L NH_4OAc浸提-火焰光度法测定[14]。

1.3.2 棉花根系形态 于棉花吐絮期(9月8日),取土柱试验中各处理棉花植株根系,洗净后利用LA-S系列植物根系分析系统测定根系的长度、投影面积、表面积、体积、直径等指标。

1.3.3 棉花地上部干物质积累量 于棉花现蕾期(6月23日)、花铃期(7月28日)和吐絮期(9月8日),分别采集各处理、各重复在各生育期预留的独立土柱的植株地上部进行破坏性取样,将所有样品于105 ℃杀青30 min后,于80 ℃烘干至质量恒定,用电子天平称质量。

1.3.4 棉花产量及其构成因素 于棉花收获期(9月26日),从每个田间小区中随机选取10株棉花,每株选取代表性棉铃5个,共50铃进行室内考种,测定有效铃数、单铃质量、衣分,并计算籽棉产量。

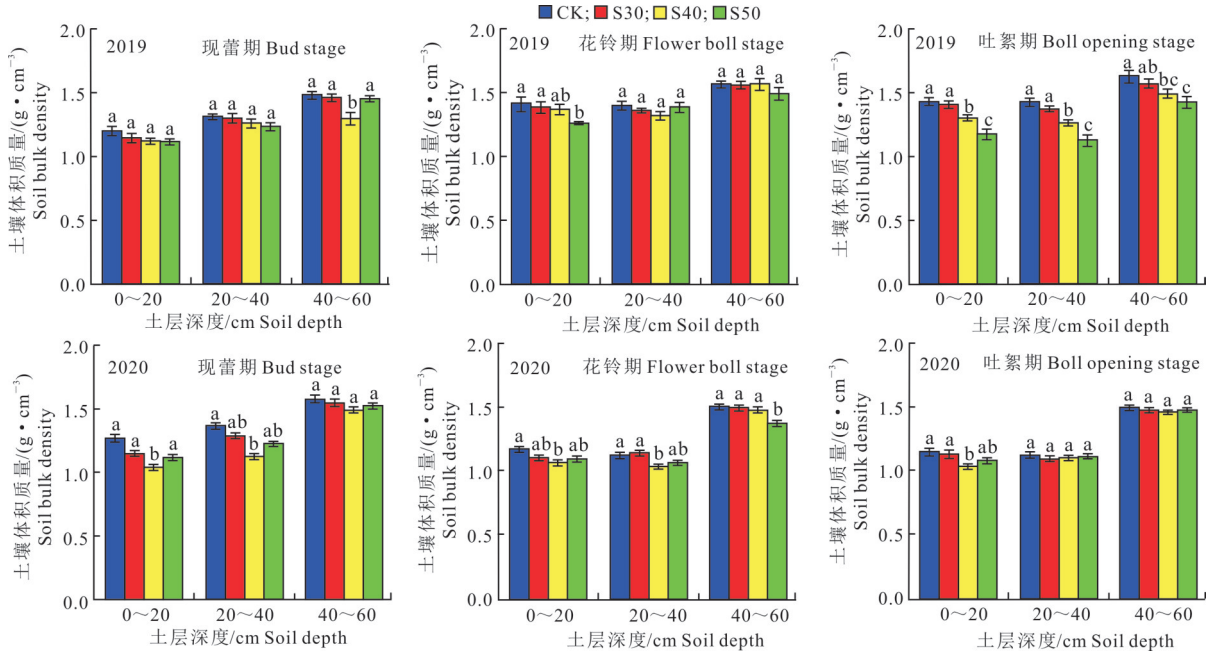
1.4 数据分析

利用Microsoft Excel 2010整理数据,采用SPSS 27.0进行单因素方差分析,并用Duncan's法进行多重比较。采用OriginPro 2024b绘图。

2 结果与分析

2.1 深松耕作对新疆膜下滴灌土壤体积质量的影响

由图2可知,与CK相比,深松耕作处理明显降低了0~60 cm土层土壤体积质量,且两年的试验结果一致。2019年,在现蕾期,除了S40处理40~60 cm土层土壤体积质量显著低于CK外,其他处理间无显著差异;在花铃期,除了S50处理0~20 cm土层土壤体积质量显著低于CK外,其他处理间无显著差异;在吐絮期,除了S40和S50处理0~20和20~40 cm土层土壤体积质量显著低于CK外,其他处理间均无显著差异。2020年,在现蕾期,除了S40处理0~20和20~40 cm土层土壤体积质量显著低于CK外,其他处理间的土壤体积质量无显著差异;在花铃期,除了S40处理0~20和20~40 cm土层以及S50处理40~60 cm土层土壤体积质量显著低于CK外,其他处理间无显著差异;在吐絮期,除了S40处理0~20 cm土层土壤体积质量显著低于CK外,其他处理0~60 cm土层的土壤体积质量无显著差异。综上,S40和S50处理能有效降低0~60 cm土层的土壤体积质量,且效果优于S30,其中S40处理的改善效果较为稳定。



图柱上标不同字母表示不同处理间差异显著($P<0.05$)。下图同。

Different letters above the bars indicate significant differences among treatments ($P<0.05$). The same below.

图2 不同深松耕作处理对新疆膜下滴灌土壤体积质量的影响

Fig. 2 Effects of different subsoiling treatments on soil bulk density under mulched drip irrigation in Xinjiang

2.2 深松耕作对新疆膜下滴灌土壤含水率的影响

由图3可知,与CK相比,各深松耕作处理均在一定程度上提高了0~60 cm土层土壤含水率,且两年的试验结果趋势一致。2019年,在现蕾期,S40和

S50处理0～20 cm土层土壤含水率显著高于CK，增加幅度分别为12.3%和9.8%；3个深松耕作处理20～40 cm土层土壤含水率显著高于CK；各处理40～60 cm土层的土壤含水率无显著差异。在花铃期和吐絮期，S40处理0～60 cm土层土壤含水率明显高于其他处理。2020年，在现蕾期，S40处理0～60 cm土层土壤含水率总体显著高于其他处理；在花铃期和吐絮期，S40处理土层的土壤含水率也明显较高，但总体与S30和S50处理差异不显著。综上，S40处理在提高土壤含水率方面效果最优且稳定。

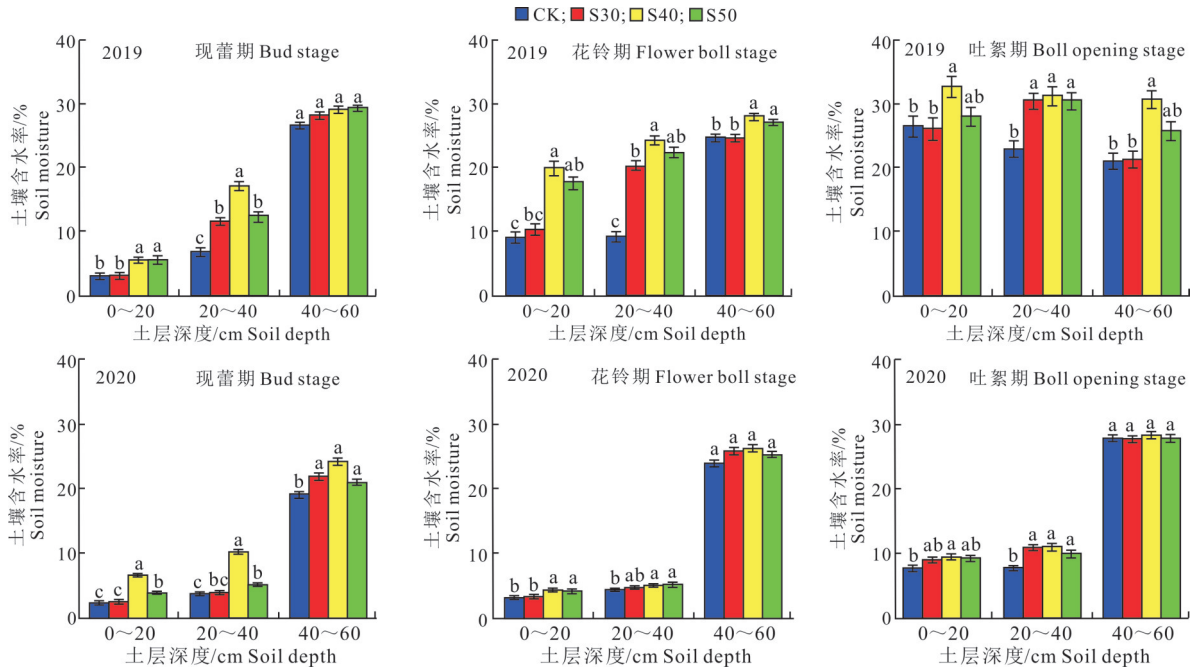


图3　不同深松耕作处理对新疆膜下滴灌土壤含水率的影响

Fig. 3　Effects of different subsoiling treatments on soil moisture content under mulched drip irrigation in Xinjiang

2.3　深松耕作对新疆膜下滴灌土壤含盐量的影响

不同深松耕作对新疆膜下滴灌土壤含盐量的影响见图4。

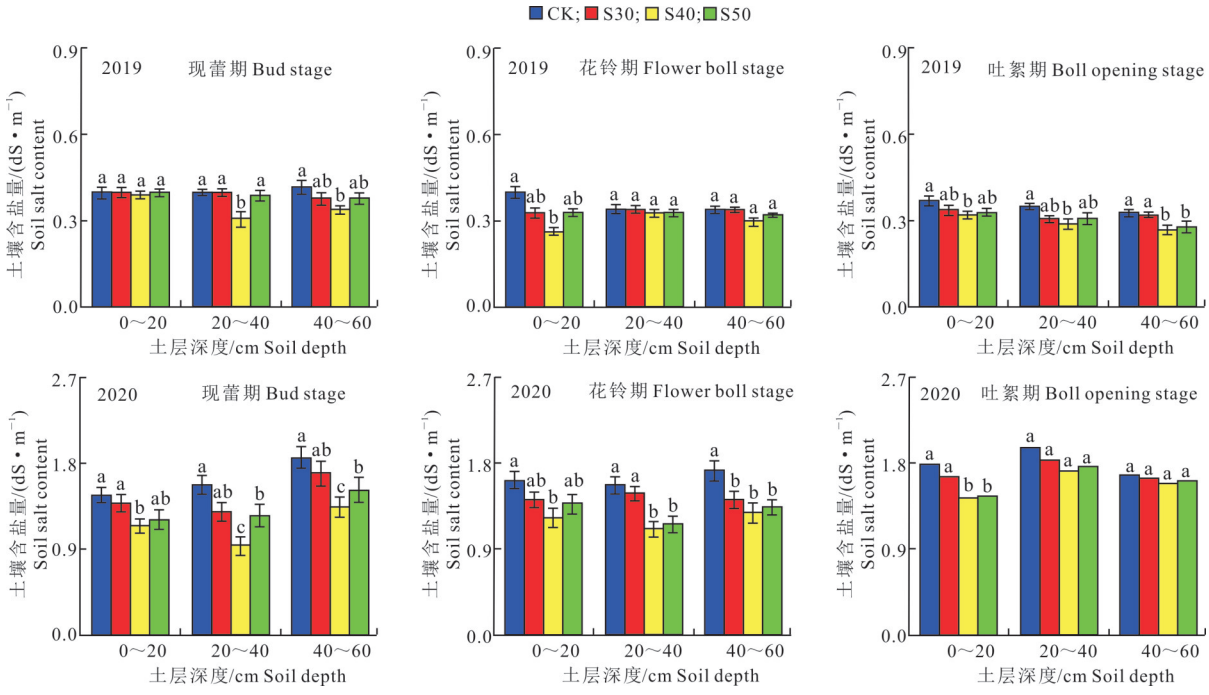


图4　不同深松耕作对新疆膜下滴灌土壤含盐量的影响

Fig. 4　Effects of different subsoiling treatments on soil salt content under mulched drip irrigation in Xinjiang

由图 4 可知,与 CK 相比,深松耕作处理总体降低了 0～60 cm 土层土壤含盐量。2019 年,在现蕾期,除了 S40 处理 20～40 和 40～60 cm 土层土壤含盐量显著低于 CK 外,其他处理 0～60 cm 土层土壤含盐量无显著变化;在花铃期,除了 S40 处理 0～20 cm 土层土壤含盐量较 CK 显著降低外,其他处理间无显著差异;在吐絮期,S40 处理 0～60 cm 土层土壤含盐量均显著低于 CK。2020 年,在现蕾期和花铃期,S40 和 S50 处理 0～60 cm 土层土壤含盐量总体较 CK 显著降低;在吐絮期,S40 和 S50 处理 0～20 cm 土层土壤含盐量均显著低于 CK,S30、S40 和 S50 处理 20～40 和 40～60 cm 土层土壤含盐量与 CK 无显著差异。综上,S40 处理在降低土壤含盐量方面效果最为显著。

2.4 深松耕作对新疆膜下滴灌土壤养分含量的影响

不同深松耕作对新疆膜下滴灌土壤养分含量的影响见图 5。

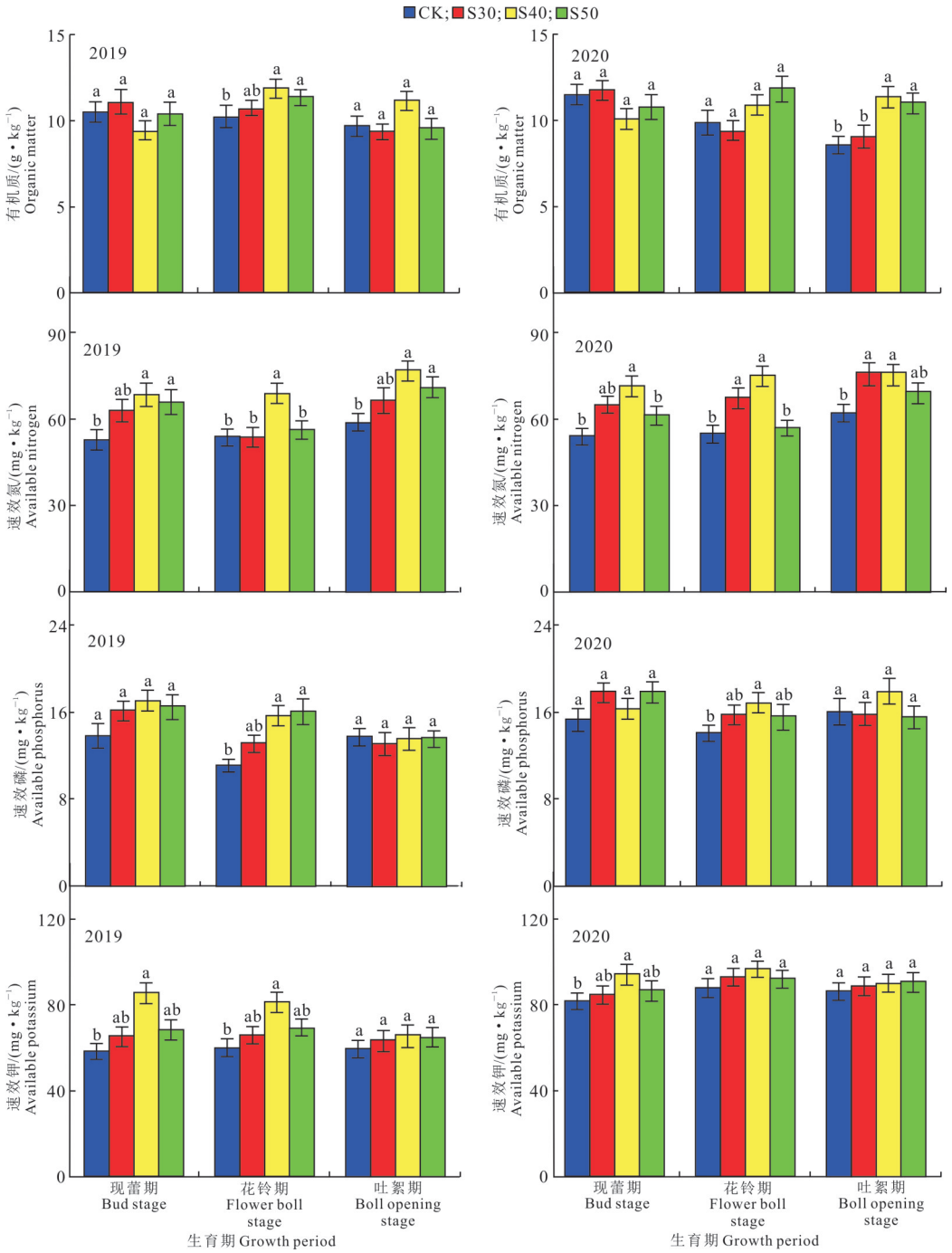


图 5 不同深松耕作对新疆膜下滴灌土壤养分含量的影响

Fig. 5 Effects of different subsoiling treatments on soil nutrient content under mulched drip irrigation in Xinjiang

由图 5 可知，与 CK 相比，深松耕作处理显著影响了 0～60 cm 土层的土壤养分含量，且两年的试验结果趋势一致。2019 年，在现蕾期，各处理间的土壤有机质和速效磷含量均无显著差异；在花铃期，除了 S40 处理的土壤有机质、速效氮、速效磷和速效钾含量较 CK 显著提高外，其他处理与 CK 无显著差异；在吐絮期，除了 S40 和 S50 处理的土壤速效氮含量显著高于 CK 外，其他处理土壤养分含量与 CK 差异不显著。2020 年，在现蕾期，各处理间的土壤有机质、速效磷含量均无显著差异，但 S40 处理的速效氮和速效钾含量显著高于 CK；在花铃期，除了 S40 处理的土壤速效氮和速效磷含量较 CK 显著增加外，其他处理与 CK 土壤养分含量总体无显著差异；在吐絮期，S40 和 S50 处理的土壤有机质含量显著高于 CK，S30 和 S40 处理的土壤速效氮含量显著高于 CK，各处理的土壤速效磷和速效钾含量无显著差异。综上，深松 40 cm（S40）处理提升土壤养分含量效果较为显著，深松过浅（S30）或过深（S50）的处理对土壤养分含量的提升效果均不及 S40 处理。

2.5　深松耕作对新疆膜下滴灌棉花根系形态的影响

由表 2 可知，与 CK 相比，各深松处理均促进了根系的生长，其中 S40 和 S50 处理效果尤为突出。2019 和 2020 年，S40 和 S50 处理棉花的根长、根表面积和根体积较 CK 显著增加，但 S40 和 S50 处理间无显著差异。各深松处理的根直径低于 CK，但总体与 CK 差异不显著。综上，S40 和 S50 处理在优化棉花根系形态方面效果较为均衡，既促进了根系生长，又保持了合理的根径分布。

表 2　不同深松耕作处理对新疆膜下滴灌棉花根系形态的影响

Table 2　Effects of different subsoiling treatments on cotton root morphology under mulched drip irrigation in Xinjiang

年份 Year	处理 Treatment	根长/cm Root length	根投影面积/cm² Root projected area	根表面积/cm² Root surface area	根体积/cm³ Root volume	根直径/mm Root diameter
2019	CK	511.82 c	34.70 c	109.00 b	2.96 c	0.67 a
	S30	623.57 b	43.68 b	137.22 ab	3.62 b	0.64 a
	S40	694.42 a	46.70 a	146.71 a	3.65 ab	0.63 a
	S50	750.96 a	47.40 a	148.90 a	3.86 a	0.62 a
2020	CK	354.40 b	20.84 b	65.46 c	2.00 c	0.71 a
	S30	360.29 bc	21.57 b	67.77 bc	2.32 b	0.66 a
	S40	373.94 ab	22.44 a	70.51 ab	2.36 ab	0.65 a
	S50	397.16 a	22.62 a	71.08 a	2.58 a	0.60 b

注：同列数据后标不同字母表示处理间在 $P<0.05$ 水平差异显著。下表同。

Note: Different lowercase letters within a column indicate significant differences among treatments at $P<0.05$ level. The same below.

2.6　深松耕作对新疆膜下滴灌棉花干物质积累量的影响

不同深松耕作对新疆膜下滴灌棉花地上部干物质积累量的影响见图 6。由图 6 可知，与 CK 相比，深松处理总体提高了棉花地上部干物质积累量，且两年的试验结果基本一致。

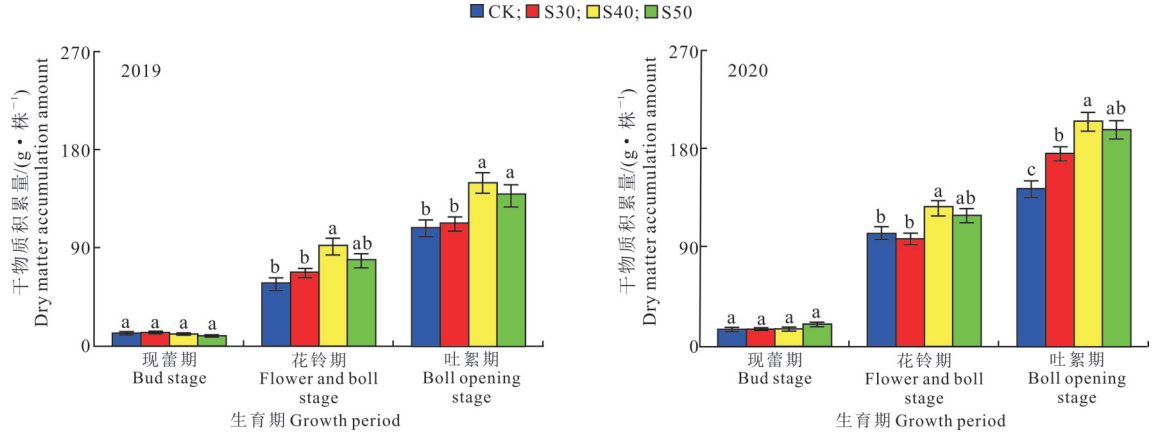


图 6　不同深松耕作对新疆膜下滴灌棉花地上部干物质积累量的影响

Fig. 6　Effects of different subsoiling treatments on aboveground dry matter accumulation of cotton under mulched drip irrigation in Xinjiang

图6显示,2019年,在现蕾期,各处理间棉花地上部干物质积累量无显著差异;在花铃期,除了S40处理地上部干物质积累量较CK显著增加28.3%外,其他处理间无显著差异;在吐絮期,S40和S50处理棉花地上部干物质积累量较CK显著增加,其中S40处理增加幅度最大,为35.6%。2020年,在现蕾期,各处理间棉花地上部干物质积累量无显著差异;在花铃期,S40和S50处理棉花地上部干物质积累量较CK显著增加,S30处理与CK间无显著差异;在吐絮期,深松耕作处理的棉花地上部干物质积累量显著高于CK,其中S40处理较CK增加幅度较大,为42.9%。此外,S40处理在生殖生长后期(花铃期至吐絮期)地上部干物质积累量增幅较大,表明深松耕作对棉花后期生长发育具有重要促进作用。综上,S40处理在提高棉花干物质积累量方面效果最优,尤其在生殖生长阶段表现突出。

2.7 深松耕作对新疆膜下滴灌棉花产量及其构成因素的影响

由表3可知,深松耕作处理影响棉花产量及其构成因素。2019和2020年,S40处理有效铃数、衣分、籽棉产量均明显高于其他处理,分别较CK增加9.5%,10.5%,16.2%和8.1%,8.8%,13.5%;各处理间单铃质量无显著差异。表明深松耕作主要通过增加有效铃数和提高衣分来实现增产。此外,2020年各处理籽棉产量均高于2019年,表明深松耕作对土壤的改良存在累积效应。综上,S40处理在提高棉花产量方面效果最优,主要通过增加有效铃数和提高衣分实现籽棉产量的显著提升。

表3 不同深松耕作对新疆膜下滴灌棉花产量及其构成因素的影响

Table 3 Effects of different subsoiling treatments on cotton yield and its components under muched drip irrigation in Xinjiang

年份 Year	处理 Treatment	有效铃数/(个·株$^{-1}$) Effective bolls per plant	单铃质量/g Single boll weight	衣分/% Lint percentage	籽棉产量/(g·株$^{-1}$) Seed cotton yield
2019	CK	5.05 c	4.90 a	41.01 c	24.75 c
	S30	5.10 bc	4.82 a	44.52 b	24.58 b
	S40	5.53 a	5.20 a	45.31 a	28.76 a
	S50	5.15 b	4.93 a	44.84 b	25.49 b
2020	CK	5.18 c	5.05 a	42.15 c	26.16 c
	S30	5.23 bc	5.00 a	45.28 b	26.15 b
	S40	5.60 a	5.30 a	45.86 a	29.68 a
	S50	5.30 b	5.02 a	45.00 b	26.61 b

3 讨 论

棉花根系在营养生长期快速扩展,对土壤结构、水分与盐分变化十分敏感[13]。前人研究表明,深松耕作可破除土壤犁底层,改善土壤通气性,促进作物根系向深层生长,从而提升作物对水肥资源的利用效率[15-18]。深松耕作可调节土壤水分与盐分状况,这对棉花根系发育尤为关键。肖继兵等[15]研究表明,深松耕作能显著改善半干旱地区土壤的蓄水保墒能力,从而提升作物产量与水分利用效率。本研究中,S40处理总体降低了犁底层(20~40 cm)土壤体积质量,改善了水分入渗与储存条件,从而在棉花生育期土壤保持较高的含水率;而S50处理因扰动过深破坏了毛管结构,导致浅层土壤保水能力下降,故土壤含水率偏低,这与前人的研究结论[11]一致。与其他处理相比,S40处理总体降低了土壤含盐量,有利于缓解棉花生殖后期盐害风险,这与崔建平等[9]的研究结果相符。

深松耕作通过改善土壤结构,增强通气性和促进微生物活动,可提高氮素矿化强度和有机质含量[13,15]。张瑞富等[12]研究表明,深松耕作促进了春玉米根系分布,并提高了氮素吸收利用能力,本研究结果与之相似,S40处理总体显著提高了土壤有机质与速效氮含量,表明适宜的深松耕作有利于提高土壤养分有效性。S40处理土壤速效钾含量在花铃期和吐絮期下降,表明在生殖前期棉花吸钾量较小,后期深松耕作改善了土壤结构,故土壤钾素补给能力增强;与CK相比,S30、S40、S50处理土壤速效磷含量总体变化不显著,说明短期内深松耕作对磷素有效性的影响有限。

根系结构直接关系到棉花吸水吸肥和抗逆能力。本研究中,S40处理棉花根长、根表面积、根体积均明显高于其他处理,有利于促进棉花吸收深层水分和养分,提高对逆境的适应性,与GUO等[2]的研究结论一致。S50处理虽增加了棉花根体积,但平均根直径降低,说明深松过深可能不利于棉花根系生长。本研究中,深松耕作促进了棉花地上部干物质积累,其中S40处理在花铃期至吐絮期的干物质积累量增幅最大,表明适宜深松深度有利于提高光合产物供应与运输效率,这与张宸等[19]的研究结

果一致。此外，各深松耕作处理籽棉产量及其构成的因素差异明显，其中S40处理籽棉产量显著高于其他处理，说明适宜深松耕作改善了花铃期水肥供应，减少了蕾铃脱落，提高生殖器官物质分配效率，从而实现了增产。结合前人关于深松耕作提高作物产量和资源利用效率的研究结果[17-19]，可知在新疆膜下滴灌条件下，提高棉花产量需综合考虑耕层结构优化、根层资源供应与各生育阶段需求的匹配。

4　结　论

与CK相比，深松耕作处理对膜下滴灌棉田土壤理化性质以及棉花根系生长与产量有明显的影响，其中40 cm（S40）为适宜深松耕作深度，该处理改善了土壤物理结构（降低土壤体积质量、提高土壤含水率）与化学环境（降低土壤含盐量、提升土壤有机质和速效氮的有效性），从而有效促进了棉花根系生长及其地上部干物质积累，并最终通过增加有效铃数和提高衣分实现籽棉产量的显著提升。深松30 cm（S30）和50 cm（S50）处理虽能影响土壤理化性质，但增产效果不及S40处理。综上，在新疆膜下滴灌棉田推广实施40 cm深松耕作，是改善土壤理化性质与提高棉花产量的关键技术。

[参考文献]

[1] WAN Y N, LI W J, WANG J C, et al. Effects of different drip irrigation rates on root distribution characteristics and yield of cotton under mulch-free cultivation in southern Xinjiang[J]. Water, 2024, 16(8): 1148.

[2] GUO R S, ZHANG N, WANG L, et al. Subsoiling depth affects the morphological and physiological traits of roots in film-mulched and drip-irrigated cotton[J]. Soil and Tillage Research, 2023, 234: 105826.

[3] 罗宇. 氮肥用量对膜下滴灌棉花根系形态和氮肥吸收效率的影响[D]. 乌鲁木齐：新疆农业大学，2024.
LUO Y. Effects of nitrogen fertilizer application rate on root morphology and nitrogen uptake efficiency of cotton under drip irrigation under mulch[D]. Urumqi: Xinjiang Agricultural University, 2024.

[4] LIU D Y, WANG B H, LI J, et al. Effects of biochar on root morphology and root exudates of cotton seedlings under moderate and severe salt stress[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2025, 44(1): 50-58.

[5] 战秀梅，彭靖，李秀龙，等. 深耕及秸秆还田对土壤养分有效性及玉米根系生长的后续效应[J]. 植物营养与肥料学报，2020，26(4)：661-671.
ZHAN X M, PENG J, LI X L, et al. After-effects of deep tillage and straw returning on soil nutrient availability and maize root growth[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2020, 26(4): 661-671.

[6] 张龙，李简，赵富贵，等. 免耕或深松结合秸秆覆盖提升土壤碳氮水含量和马铃薯产量的协同效应[J]. 植物营养与肥料学报，2023，29(1)：45-56.
ZHANG L, LI J, ZHAO F G, et al. Synergistic effects of no-tillage or subsoiling combined with straw mulching on soil carbon, nitrogen, water content and potato yield[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2023, 29(1): 45-56.

[7] 马君，崔建平，金亮，等. 新疆滴灌棉田深松后土壤理化性质及产量的变化特征[J]. 中国农学通报，2020，36(32)：82-87.
MA J, CUI J P, JIN L, et al. Variation characteristics of soil physical and chemical properties and yield after subsoiling in drip irrigated cotton fields in Xinjiang[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2020, 36(32): 82-87.

[8] 程思贤，赵亚丽，李潮海，等. 深松深度对砂姜黑土耕层特性、作物产量和水分利用效率的影响[J]. 中国生态农业学报，2019，26(9)：1355-1365.
CHENG S X, ZHAO Y L, LI C H, et al. Effects of subsoiling depth on plow layer properties, crop yield and water use efficiency in Shajiang black soil[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2019, 26(9): 1355-1365.

[9] 崔建平，程强，陈平，等. 深松条件下滴灌频次对土壤理化指标及棉花产量的调节效应[J]. 水土保持学报，2019，33(1)：263-269.
CUI J P, CHENG Q, CHEN P, et al. Regulatory effects of drip irrigation frequency on soil physical and chemical indices and cotton yield under subsoiling conditions[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2019, 33(1): 263-269.

[10] 郭仁松，陈平，程强，等. 深松条件下灌溉频次对棉花水分利用效率及产量的影响[J]. 灌溉排水学报，2019，38(7)：17-22.
GUO R S, CHEN P, CHENG Q, et al. Effects of irrigation frequency on water use efficiency and yield of cotton under subsoiling condition[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2019, 38(7): 17-22.

[11] 白伟，孙占祥，郑家明，等. 耕层土壤虚实结构优化春玉米根系形态提高水分利用效率[J]. 农业工程学报，2019，35(21)：88-97.
BAI W, SUN Z X, ZHENG J M, et al. Optimizing the solid-porous structure of topsoil improves spring maize root morphology and water use efficiency[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(21): 88-97.

[12] 张瑞富，杨恒山，张玉芹，等. 深松对春玉米根系分布及氮素积累与利用的影响[J]. 干旱地区农业研究，2020，38(5)：176-181.
ZHANG R F, YANG H S, ZHANG Y Q, et al. Effects of subsoiling on root distribution and nitrogen accumulation and utilization of spring maize[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2020, 38(5): 176-181.

（下转第 112 页）