

DOI:10.13870/j.cnki.stbxb.2025.03.029

CSTR:32310.14.stbxb.2025.03.029

杨宏泽,付强,李天霄,等.耕作模式对东北黑土地大豆土壤理化特性及根系生长发育的影响[J].水土保持学报,2025,39(3):288-302.

YANG Hongze, FU Qiang, LI Tianxiao, et al. Effects of tillage practices on soil physicochemical properties and root growth of soybean in black soil region of northeast China[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2025, 39(3): 288-302.

耕作模式对东北黑土地大豆土壤理化特性及 根系生长发育的影响

杨宏泽^{1,2,3,4}, 付强^{1,2,3,4}, 李天霄^{1,2,3,4}, 侯仁杰^{1,2,3,4},
李茉^{1,2,3,4}, 周照强^{1,2,3,4}

(1.东北农业大学水利与土木工程学院,哈尔滨 150030; 2.教育部寒地黑土生境健康国际合作
联合实验室,哈尔滨 150030; 3.农业部农业水资源提高利用重点实验室,哈尔滨 150030;
4.黑龙江省寒区水资源与水利工程重点实验室,哈尔滨 150030)

摘要: [目的] 为研究不同耕作模式对松嫩平原黑土区大豆根系生长发育和根系分泌物分泌速率的影响,明确不同耕作模式通过改变土壤理化性质和根系性状影响作物产量的差异性传递过程。[方法] 以东北黑土区大豆品种为试验材料,设置免耕秸秆覆盖(no-tillage straw mulch, NTS)、免耕(no-tillage, NT)、深耕(seep tillage, DT)和常规耕作(conventional tillage, CK)4种耕作模式,研究其对土壤理化性质、大豆根系形态及作物产量的影响。[结果] 1)NTS和DT处理通过外源秸秆添加提高土壤氮、磷养分水平,与CK处理相比,NTS处理无机氮和有效磷分别提高35.8%和42.1%,DT处理无机氮和有效磷分别提高26.3%和33.7%。2)土壤养分水平和土壤紧实度共同决定大豆植株根系形态特征指标,土壤紧实度对根系形态的直接影响(路径系数为0.89)大于土壤养分对根系形态的直接影响(路径系数为0.86)。与CK处理相比,NTS处理在高土壤养分高土壤紧实度情况下对大豆根系生长发育起到促进作用;NT处理在低土壤养分高土壤紧实度的情况下对大豆根系生长发育起到抑制作用;DT处理在高土壤养分低土壤紧实度情况下对大豆根系生长发育起到促进作用。3)在不施加肥料的条件下,根系分泌物的分泌速率与根系长度、根表面积呈显著正相关,与土壤养分浓度呈显著负相关。4)耕作模式对大豆品质特征的解释作用为81%,与CK处理相比,NTS、NT、DT处理产量分别提高24.7%、14.8%、36.2%。[结论] NTS处理在保证产量的同时,减少耕作,提高土壤抗性,促进土壤有效养分的恢复与固存。

关键词: 耕作模式; 土壤理化性质; 大豆根系形态; 根系分泌物; 产量

中图分类号:S153.6 文献标识码:A 文章编号:1009-2242(2025)03-0288-15

Effects of Tillage Practices on Soil Physicochemical Properties and Root Growth of Soybean in Black Soil Region of Northeast China

YANG Hongze^{1,2,3,4}, FU Qiang^{1,2,3,4}, LI Tianxiao^{1,2,3,4}, HOU Renjie^{1,2,3,4}, LI Mo^{1,2,3,4}, ZHOU Zhaoqiang^{1,2,3,4}

(1.School of Water Conservancy and Civil Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China;
2.International Collaborative Laboratory for Cold Region Black Soil Habitat Health, Ministry of Education,
Harbin 150030, China; 3.Key Laboratory of Effective Utilization of Agricultural Water Resources of
Ministry of Agriculture, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China; 4.Heilongjiang
Provincial Key Laboratory of Water Resources and Water Conservancy Engineering in Cold Region,
Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

Abstract: [Objective] This study aimed to study the effects of different tillage practices on the growth and development of soybean root system, the rate of root secretion, and soil physicochemical properties in the black

收稿日期:2024-12-10 修回日期:2025-02-09 录用日期:2025-02-19 网络首发日期(www.cnki.net):2025-04-11

资助项目:国家自然科学基金项目(U20A20318,51825901,52179033,52279035);黑龙江省杰出青年科学基金项目(YQ2022E007)

第一作者:杨宏泽(2000—),男,硕士,主要从事农业水土资源高效利用研究。E-mail:1821425568@qq.com

通信作者:付强(1973—),男,博士,教授,主要从事农业水土资源高效利用研究。E-mail:fuqiang0629@126.cn

http://stbxb.alljournal.com.cn

soil region of Songnen Plain, and to clarify the differential transmission processes by which tillage practices influence crop yield through changing soil physicochemical properties and root characteristics. [Methods] A soybean variety from the northeast black soil region was used as the test materials. Four tillage treatments, including no-tillage straw mulch (NTS), no-tillage (NT), deep tillage (DT) and conventional tillage (CK), were set. Their effects on soil physicochemical properties, soybean root morphology, and crop yield were studied. [Results] 1) NTS and DT increased soil nitrogen and phosphorus levels by exogenous straw incorporation. Compared with CK, inorganic nitrogen and available phosphorus were increased by 35.8% and 26.3% under NTS, and by 42.1% and 33.7% under DT, respectively. 2) Soil nutrient level and compactness jointly determined soybean root morphological characteristics. The direct influence of soil compactness on root morphology (path coefficient was 0.89) was greater than that of soil nutrient (path coefficient was 0.86). Compared with CK, NTS promoted the growth and development of soybean roots under high nutrient availability and high soil compactness, NT inhibited the growth and development of soybean roots under low nutrient availability and high soil compactness, while DT promoted the growth and development of soybean roots under high nutrient availability and low soil compactness. 3) Without fertilizer application, the rate of root secretion was significantly positively correlated with root length and surface area, but significantly negatively correlated with soil nutrient concentration. 4) The explanation effect of tillage practice on soybean quality was 81%. Compared with CK, the yields under NTS, NT and DT increased by 24.7%, 14.8% and 36.2%, respectively. [Conclusion] NTS can ensure yield while reducing tillage, improving soil resistance, and promoting the recovery and retention of soil available nutrients.

Keywords: tillage practice; soil physicochemical properties; soybean root morphology; root exudate; yield

Received: 2024-12-10

Revised: 2025-02-09

Accepted: 2025-02-19

Online(www.cnki.net): 2025-04-11

黑土是以腐殖质为优势物质组成的土地,富含丰富的有机质,适宜农业耕作,是世界公认的少数高肥力土壤之一^[1]。东北黑土区是世界四大黑土集中分布区之一,耕地总面积 109 km²,粮食产量和调出量分别占全国总量的 1/4 和 1/3,是我国最大的粮食生产基地和商品粮输出基地^[2]。随着科学技术的不断进步,东北黑土区已经成为生产集约化程度最高的区域,传统耕作方式及高强度的开发利用导致黑土土体结构遭到破坏,土壤有机质下降和土壤压实加重,严重威胁国家粮食安全和生态安全。面对土壤“变薄、变瘦、变硬”的三重压力,如何科学采取保护性耕作模式提高黑土质量、缓解土壤压实、保持黑土层厚度对于保障我国粮食安全和农业可持续发展具有重要作用。

近年来,免耕及免耕秸秆覆盖为代表的保护性耕作模式作为增加土壤养分及提高土壤抗性的耕作方式开始受到越来越多的关注。长期免耕对土壤体积质量的影响存在一定的复杂性。有研究^[3]表明,由于机械碾压而不疏松土壤,可能使土壤体积质量增大;也有研究^[4]指出,免耕可以降低土壤表层体积质量,并且随着免耕年限的增加,0~15 cm 土层土壤体积质量呈降低趋势,并在免耕 7~8 a 后趋于稳定;也

有研究^[5]表明,长期免耕减少对土壤扰动,有利于土壤团聚体形成和稳定,从而增加土壤中的孔隙数量和大小,进而增加土壤总孔隙。免耕仅对土壤结构有轻微扰动,在防止土壤侵蚀的同时对于上层土壤水热具有积极作用^[6]。秸秆覆盖增加土壤阳离子交换能力和微生物多样性,可以显著提高有机质、有机碳、营养元素和其他土壤化学物质质量分数^[7]。覆盖地表后,雨水对土壤的侵蚀减弱,地表径流减少,缓解土壤压实及水土流失^[8]。LÜ 等^[9]研究表明,免耕显著提高表层土壤 TC、AN、Ca²⁺ 和 MG²⁺, 秸秆覆盖显著增加表层土壤的 TC、OC、AN、AP。总体来看,免耕及免耕秸秆覆盖增强土壤养分,改善土壤化学环境。深耕作为土壤耕作中最普遍、对土壤性质影响最大、范围最广的耕作方式,与免耕及免耕秸秆覆盖从产量到土壤性质之间的比较也越来越多^[10]。XIONG 等^[11]研究表明,与传统耕作相比,东北黑土区整体保护性耕作增产不明显(1.21%),而深耕增产显著(12.3%)。深耕良好的通气增加微生物的呼吸速率,加快有机质的分解转化,为土壤提供更充足的养分,提高耕地土壤养分的有效性;深耕打破犁地层减轻土壤压实,短期对作物产量起到促进作用。但长期深耕显著降低土壤体积质量,使土壤颗粒之间

的排列更加松散,较低的土壤压实、松散的土壤表面增加土壤颗粒在近地表面运动的可能性,极大地加剧风蚀和养分淋溶等问题^[12]。

免耕对于土壤的改良效应具有显著作用,但对于植株根系生长发育和根系对于土壤养分吸收的认识并不统一。根系作为植物的三大营养器官之一,在固定和支撑作物、养分吸收、光合呼吸、作物产量中起着重要作用,同时又是多种有机酸、激素、氨基酸等根系分泌物合成的重要场所,是土壤养分的充分利用者^[13]。陈学文等^[14]研究表明,长期免耕增加土壤体积质量和紧实度,但不利于养分向下输送,影响作物根系生长发育和土壤养分的吸收;XIONG等^[15]研究表明,当土壤紧实度增强时,根倾向于向生物孔隙方向生长,伸长得更快,深度也更深。生物孔隙的养分通常高于散装土壤,根系与孔隙的接触有利于作物对养分的吸收。李瑞平等^[16]研究发现,秸秆覆盖降低表层土壤温度,延迟植物的生长发育,同时造成其根系发育不良现象;YANG等^[17]研究发现,秸秆覆盖有利于土壤水分、有效氮、速效磷的积累,使根系提高捕获能力,更好地吸收土壤水分和养分。植物根系生长发育直接影响根系分泌物的分泌速率,根系分泌物能够保护根系,促进水分养分的吸收,活化土壤矿质养分,钝化重金属毒害,影响根际微生物,是植物适应土壤环境、改善土壤环境的重要表现^[18]。根系分泌物对大豆的生长发育尤为显著。异黄酮是豆科作物体内最重要的次生代谢物之一,可以被分泌到土壤中对根瘤菌中结瘤因子有诱导识别作用,在根瘤菌侵染过程中又促进结瘤因子的生物合成,异黄酮对根瘤的发育和固氮有重要作用^[19]。有机酸是重要的活化磷物质,通过酸溶解反应、络合作用和竞争吸附等机制对土壤磷进行活化,显著提高土壤中有效磷质量分数^[20]。耕作方式的改变直接影响植物的根群构型、根系分泌物的种类及质量分数,间接影响植株地上部分的生长发育和作物产量。虽然耕作方式的应用对土壤养分、植株生长和作物产量的研究已足够多,但针对不同耕作模式对大豆植株的根系型态影响、根系型态对根系分泌物分泌速率的影响、土壤理化性质、大豆根系性状和大豆性状的相关关系研究较少。

基于上述问题,通过野外大田试验,以松嫩平原黑土农田为研究对象,选用4种不同耕作模式,将土壤与大豆根系界面进行联系,拟探究的科学问题有:1)探究不同耕作模式下大豆根群构型的变化特征;2)分析土壤物理特性、土壤有效氮磷、根群构型和根系分泌物之间的作用机制,探究不同耕作模式导致

产量差异的传递过程。研究成果可为黑土区保护性耕作与深耕推广、农业水土资源高效利用提供理论依据和技术支撑。

1 材料与方 法

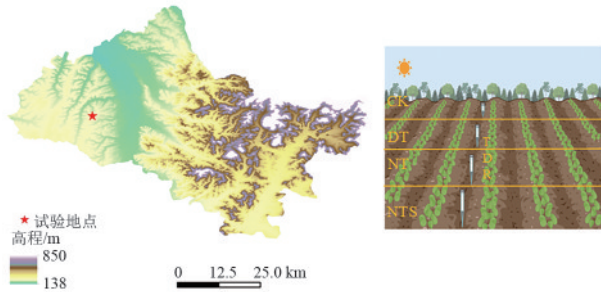
1.1 研究区概况

试验地点设在中国松嫩平原东部的黑龙江省哈尔滨市阿城区东北农业大学阿城基地(45°31'12"N, 127°02'24"E)。该地区四季分明,属中温带大陆性季风气候,夏季相对湿润,冬季干燥寒冷。年平均降水量 553.2 mm,无霜期 162 d。降雨主要分布在夏季和早秋。每年 6—9 月的降水量约占年降水量的 60%。生长季主要种植玉米、大豆。作物水热生长期 156~171 d,作物生育期 110~150 d。试验区土壤以黑土为主,田块耕作层为 0~24 cm,犁底层厚度为 6~8 cm,土壤砂粒、粉粒和黏粒的质量分数分别为 48.76%、36.90% 和 14.34%,土壤干体积质量 1.41 g/cm³,自然含水率 23%,田间持水量 33%。

1.2 试验设计

试验采用 4 种耕作模式(图 1):1)常规耕作(conventional tillage, CK)。上季作物收获脱粒后将秸秆移除小区,不保留残茬,并翻地 15 cm,第 2 年春天进行耙磨、播种。2)深耕(deep tillage, DT):上季作物收获脱粒后将秸秆粉碎为 3~5 cm,并翻地 30 cm,第 2 年春天进行耙磨、播种。3)免耕秸秆覆盖(no-tillage straw mulch, NTS):全年不耕作,播种使用免耕播种机完成,上季作物收获脱粒后将所有秸秆粉碎为 3~5 cm,均匀覆盖于原小区。4)免耕(no-tillage, NT):全年不耕作,播种采用免耕播种机完成,上季作物收获脱粒后将所有秸秆移除小区并保留残茬。试验田设置为 8 个 20 m×15 m 的矩形地块,各处理设 2 组重复地块。试验大豆品种为“东农 69 号”,生育期 130~140 d。于 2023 年 5 月 16 日播种大豆,2023 年 9 月 17 日收获。作物行距设 55 cm,株距为 13 cm,种植深度设 5 cm,每穴种植 3 株。各试验田均不施肥,其他措施与当地种植习惯保持一致。本次试验分为土壤取样和作物取样 2 部分。作物取样过程中,在苗期(seedling stage, SS, 15 d)后的 4 个生育时期进行取样试验,分别为花芽分化期(bud flower stage, BS, 45 d)、开花结荚期(flowering and fruiting stage, FS, 70 d)、灌浆期(filling period, PS, 95 d)和成熟期(mature stage, MS, 120 d)。在各试验样地选 3 株大豆植株进行取样。为保证大豆根系的完整,用铲子挖深 50 cm,然后将整个大豆植株取出。每次土壤取样在各试验样地距离植株 5 cm 位置用土钻分别取 R1 层(0~20 cm)、R2 层(20~40

cm)土样,每个处理取3组土样,取样时间与大豆取样时间一致,且在大豆苗期(SS、15 d)多取1次。



注:该图基于国家标准地图服务网站下载的审图号GS(2023)2627号标准地图绘制,底图界限无修改。

图1 研究区域及耕作模式示意

Fig. 1 Schematic diagram of the study area and tillage practices

1.3 相关指标测定

1.3.1 土壤理化性质指标 土壤理化性质指标主要有土壤硝态氮(NO_3^- -N)、铵态氮(NH_4^+ -N)、土壤有效磷(AP)、土壤水分体积分数、土壤温度和土壤紧实度。土壤无机氮、有效磷采用流动注射分析仪测定。在每个试验地块埋1个土壤水分温度传感器,用于实时检测研究区土壤水分体积分数和温度,时间间隔为1 h/次,检测深度为0、10、20、30、40 cm;采用土壤紧实度仪(SC-900, Spectrum Inc Co., Ltd, America)在每个小区随机选取3个点,测量土壤紧实度。

1.3.2 根系分泌物分泌速率与酶活性 植株样品带回实验室后,采用自来水反复多次清洗植株根系,再用蒸馏水清洗根系。将清洗好的植株放入装有100 mL 0.005 mol/L CaCl_2 溶液的收集袋中,通气收集根系分泌物24 h,置于 -20°C 冰箱中保存。根系分泌物指标主要包括异黄酮分、有机酸分、酸性磷酸酶(ACP)和固氮酶(NITS)。采用液相色谱仪(ACQUITYUPLC, Waters Corporation Co., Ltd., America)以时间定性、以峰高定量测量异黄酮、有机酸浓度,而后根据浓度与收集时间的比值换算分泌速率;酸性磷酸酶(acid phosphatase, ACP)活性采用微量法和全波长酶标分析仪测定;固氮酶(NITS)活性采用双抗夹心法和全波长酶标分析仪测定。

1.3.3 大豆根系形态指标 主要包括根总长度(RL)、根表面积(RS)、根体积(RV)和平均根茎(RT),采用扫描仪和WinRhizo根测量软件对RL、RS、RV、RT进行测定。

1.4 数据分析

采用SPSS 26.0和Origin 9.1软件进行数据处理、统计分析和图形绘制。不同耕作模式间的差异采用单因素方差分析(ANOVA)。采用Pearson相关

分析研究土壤理化性质与大豆根系性状之间的相关性。利用偏最小二乘路径模型(PLS-PM)分析不同耕作模式下土壤养分(AP、AN)和土壤紧实度、根系形态(RL、RS、RV)、根系分泌物(有机酸分泌速率、异黄酮分泌速率、固氮酶活性、酸性磷酸酶活性)和大豆农艺性状(株高、茎粗、有效豆荚、单株粒数、产量)之间的关系。路径系数和 R^2 用于显示潜在变量之间的强度和方向,并评估解释方差的比例。使用拟合优度(GOF)统计量对不同结构的模型进行评估,GOF是总体预测能力的度量, $\text{GOF} > 0.7$ 是PLS-PM的可接受值^[21]。

2 结果与分析

2.1 不同耕作模式土壤理化性质变化特征

2.1.1 土壤水热特征 由图2可知,0~50 d各处理水分体积分数持续下降,在R1层NTS下降15.9%,NT下降23.9%,DT下降31.2%,CK下降30.9%;在R2层NTS下降8.6%,NT下降22.9%,DT下降8.6%,CK下降2.6%。在R1层,与CK相比,NTS处理在5个生育期土壤水分体积分数增加10.5%~50.3%;DT处理在5个生育期土壤水分体积分数增加3.7%~30.5%,NT与CK差距不明显。在R2层,NTS处理在5个生育期土壤水分体积分数降低10.5%~12.5%;NT处理在5个生育期土壤水分体积分数降低13.5%~15.5%,DT与CK差距不明显。总体来看,R1层土壤水分体积分数表现为 $\text{NTS} > \text{DT} > \text{CK} > \text{NT}$;R2土壤水分体积分数表现为 $\text{DT} > \text{CK} > \text{NTS} > \text{NT}$,不同耕作模式总体变化一致,均表现为先下降再缓慢回升,最后趋于稳定。0~50 d土壤水分体积分数下降一方面是因为降雨量少,没有充足的水源补充;另一方面是大豆萌发生长需要消耗一部分水分。夏季雨量增多,植株生长需要大量水分,同时白天太阳辐射强度大,加速水分蒸发,所以50~100 d水分呈现伏式上升。100~130 d作物生长发育成熟用水量下降,但由于降雨减少,土壤水分体积分数总体呈下降趋势。在R1层NTS土壤水分体积分数最高,是因为秸秆覆盖可以有效减少土壤表面水分蒸发,并且秸秆还能起到吸水缓释的作用,将水分缓慢地释放到土壤中,持续提高土壤表层水分体积分数。在R2层土壤DT水分体积分数最高,是因为DT打破犁底层,改善土壤孔隙联通性,增加土壤入渗能力;另外,DT处理根系发育较快,在R1层吸收较多水分,降低土壤水分体积分数。NTS在R2层土壤水分体积分数降低,一方面是秸秆的吸水效应使得一部分水分滞留在秸秆中;另一方面,NTS土壤压实产生上层土壤的阻滞效应,使得大部分土壤水保留在R1层。

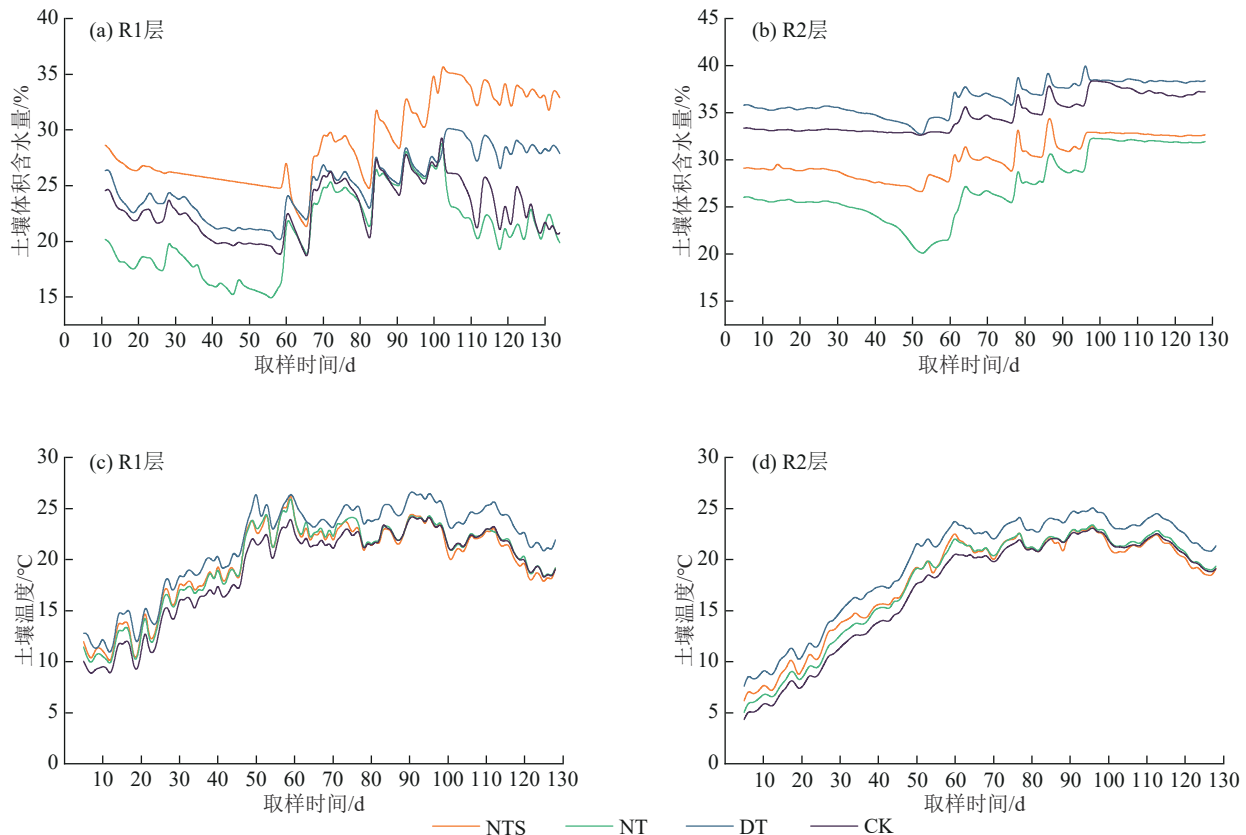


图 2 大豆生长期土壤水分体积分数和温度动态变化特征

Fig. 2 Dynamic changes of soil water content and temperature during soybean growth period

不同耕作模式土壤温度变化趋势相同。0~60 d 是生长发育期,土壤温度逐渐积累,并在短时间内大幅上升。在 R1 层,各处理上升约 14.3~16.7 °C;在 R2 层,各处理温度升高约为 14.1~14.6 °C,R2 层较 R1 层具有较好的温度稳定性。90~120 d,土壤温度随时间逐渐下降,豆荚开始膨胀并逐渐成熟,植株主要表现为营养物质积累。在 R1 层,各处理温度下降约 1.7~3.7 °C;在 R2 层,各处理温度下降约 1.4~2.8 °C。在 R1 层,与 CK 相比,NTS 处理在 5 个生育期土壤积温增加 3.7%;NT 处理在 5 个生育期土壤水分体积分数增加 4.1%,DT 处理在 5 个生育期土壤水分体积分数增加 11.7%。在 R2 层,与 CK 相比,NTS 处理在 5 个生育期土壤积温增加 4.7%;NT 处理在 5 个生育期土壤水分体积分数增加 3.8%,DT 处理在 5 个生育期土壤水分体积分数增加 15.4%。在 SS 期土壤温度表现为 DT>NTS>NT>CK;在 MS 期土壤温度表现为 DT>CK>NT>NTS,各土层温度变化保持一致,不同耕作模式总体变化一致,均表现为先上升再缓慢下降。R1 层土壤温度波动性高于 R2 层,是因为 R1 层作为表层土壤与空气直接接触,更直接与空气进行热交换,且在白天直接接受太阳辐射,温度迅速升高,晚上失去太阳辐射,温度迅速下降,造成较大的温度波动。而 R2 层土壤与 R1 层土壤相连,不存

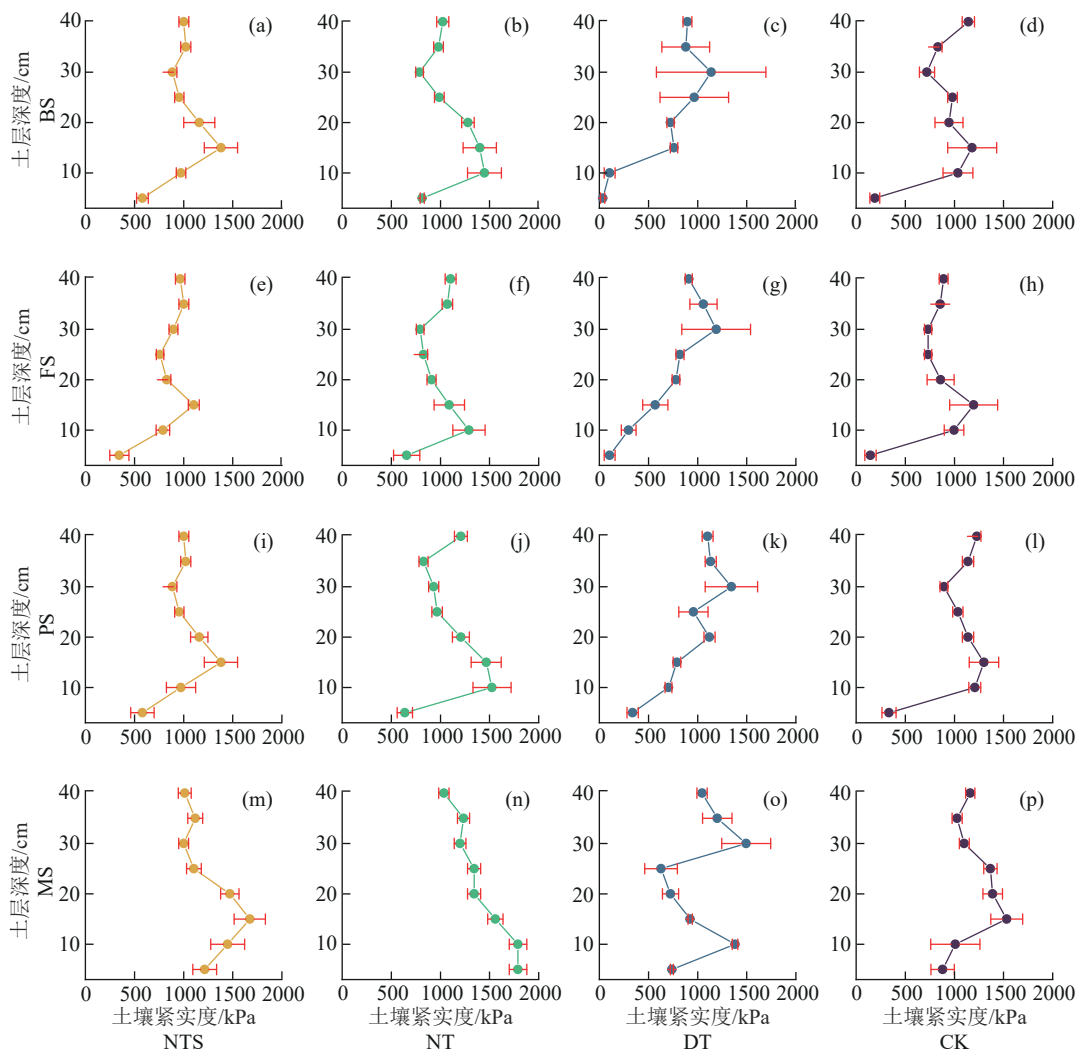
在太阳辐射现象,且仅与少量孔隙中的空气进行接触,土壤总和比热容大于空气,所以 R2 层土壤温度波动性更小。从各处理来看,DT 在 R1、R2 层土壤温度均最高。R1 层温度较高可能是因为良好的土壤孔隙结构加快春季融雪水入渗速率,使得土壤表面更早地接受太阳光照,提高土壤积温。R2 层温度高是因为良好的孔隙结构增加土壤连通性,进而提高土壤微生物活性,增加土壤代谢能力,促进呼吸,提高土壤温度。NTS 在 R1 层表现为前期温度较高后期温度最低,归因于秸秆的保温效应。在前期环境温度较低,秸秆能更好地保存土壤温度,防止逸散到空气中;在中后期环境温度高,秸秆起到隔绝温度的作用,阻断土壤与空气的直接接触和太阳辐射,进而在中后期温度较低。

2.1.2 土壤紧实度 由图 3 可知,在同一生育阶段不同耕作模式土壤紧实度的峰值不同,NTS、NT、DT、CK 处理峰值分别出现在 15、10、30、15 cm 土层处,各处理峰值表现为 NT>NTS>CK>DT,且在峰值各处理误差条较大,并表现为 DT>CK>NT>NTS。土壤紧实度峰值也受大豆生育阶段的影响,各处理土壤紧实度峰值均表现为 BS 期到 FS 期土壤紧实度下降;FS 期到 PS 期土壤紧实度缓慢上升;PS 期到 MS 期土壤紧实度迅速升高。对比 BS 期和 MS 期土

壤紧实度,NTS 上升 21.2%,NT 上升 23.5%,DT 上升 31.3%,CK 上升 29.8%。

在全生育期,NTS、NT、CK 均表现为随着土层深度增加,土壤紧实度持续增加到峰值,随后土壤紧实度开始下降,在 30~40 cm 缓慢升高到 1 000 kPa;DT 表现为 0~30 cm 土壤紧实度随着土层深度的增加而增加,30~40 cm 土壤紧实度随着土层深度的增加而减少,并维持在 1 000 kPa 左右。NTS、NT 在 R1 层表现出较高的紧实度,是因为未进行机械翻耕,导致土壤紧实程度较高;在 R2 层表现出较低的土壤紧实程度,是因为表层的压实增加土壤抗性,对 R2 层土壤起到保护作用;DT 与之相反,R1 层表现出低水平

的土壤紧实度,而在 30 cm 处土壤紧实度骤然上升,是由于前期的机械耕作对土壤进行翻耕,增大土壤孔隙,降低土壤紧实程度,本次 DT 深度设置为 30 cm,所以在 30 cm 处产生犁底层,增大机械压实,使 30 cm 附近土壤紧实度骤升。NTS、NT 在各生育期表现为先下降后上升趋势,FS 期下降可能是作物生长导致,由于作物根系的生长发育,不断突破土壤压力限制,增大土壤孔隙的连通性,进而降低土壤紧实;DT、CK 在 FS 期末像 NTS、NT 一样降低,是因为前期的土壤翻耕增大土壤连通和土壤孔隙,根系生长不需要突破压力限制而是顺势生长,导致根系生长对土壤紧实影响不大。



注:同一列为相同处理不同生育期;同一行为相同生育期不同处理。

图 3 不同耕作模式下土壤紧实度变化特征

Fig. 3 Variation characteristics of soil compactness under different tillage practices

2.1.3 土壤无机氮与有效磷 由图 4 可知,SS~BS 期各处理无机氮、有效磷质量分数上升,在 R1 层 NTS 与 DT 上升较为明显,分别上升 14.9、5.2 mg/kg 和 15.9、6.4 mg/kg。在 R2 层 DT 上升最为明显,分别上升 6.7、2.6 mg/kg。BS~PS 期,由于大豆生长发育吸

收大量养分,导致土壤无机氮和有效磷质量分数下降。在 R1 层 NTS 与 DT 下降最为显著,分别下降 26.7、10.9 mg/kg 和 27.9、20.2 mg/kg。在 R2 层 DT 下降最为显著,分别下降 15.1、9.0 mg/kg。从 PS 到 MS 期大豆器官发育完全,果实积累对养分需求较少,土

壤有机质矿化速率大于根系养分吸收速率,进而出现养分的缓慢回升。对比检测开始(SS期)和结束时(MS期)土壤无机氮、有效磷质量分数,NTS、NT、DT、CK处理平均降低35.2%和12.6%、32.0%和14.1%、43.3%和18.6%、55.2%和27.2%。

总体来看,各处理均表现为先升高后降低又缓慢回升,其中在BS期无机氮、有效磷质量分数最高,在PS期无机氮、有效磷质量分数最低。土壤养分质

量分数总体呈先上升再下降然后缓慢回升趋势,从SS到BS上升,是因为随着温度逐渐回升,加速硝化细菌的活性,进而促进土壤的硝化反应,提高土壤养分。在BS到PS期,植物生长发育的关键时期需要吸收大量养分,导致土壤养分下降。在PS到MS期随着大豆器官发育完全,果实积累对养分需求较少,土壤有机质矿化速率大于根系养分吸收速率,出现养分的缓慢回升。

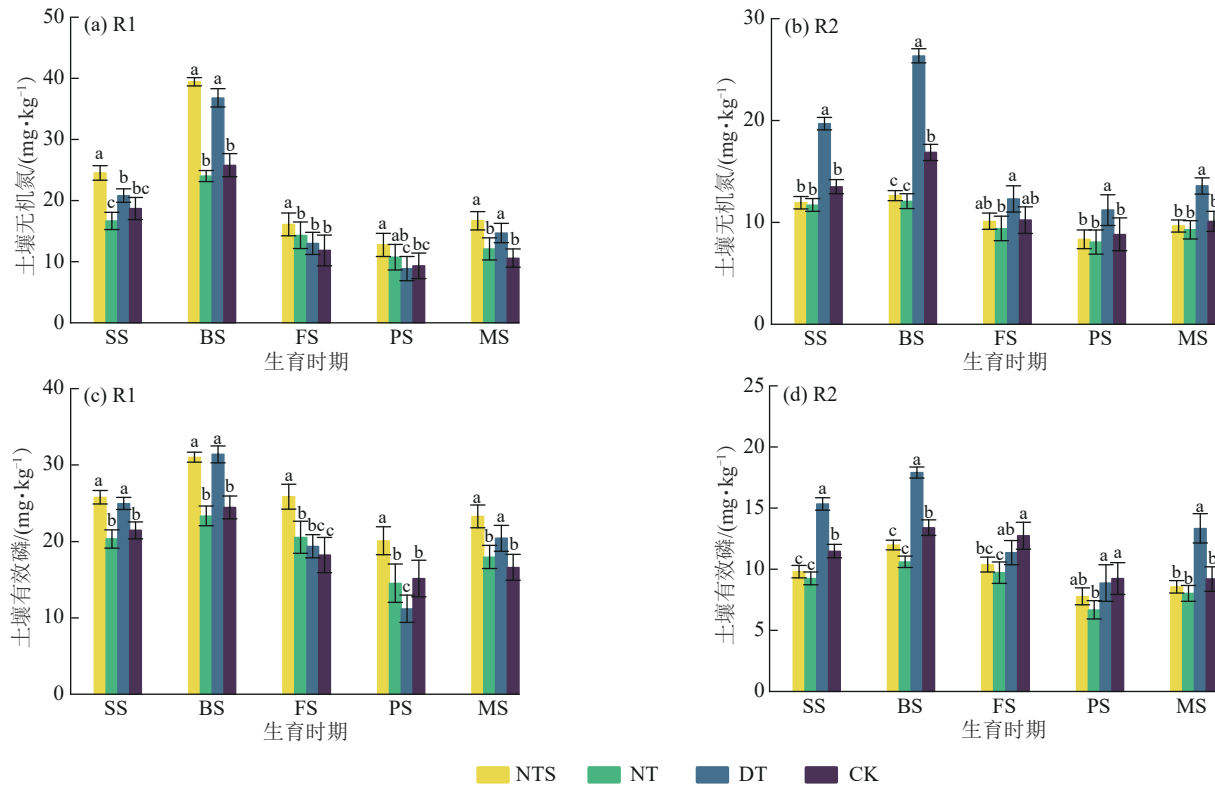


图4 不同耕作模式土壤养分的变化特征

Fig. 4 Variation characteristics of soil nutrients in different tillage practices

2.2 不同耕作模式大豆根系形态变化特征

2.2.1 大豆根系总长度 根系总长度是植物生存和生长的重要指标,对植物在土壤中获取水分、养分及根系分泌物与土壤和微生物的互动等方面均具有重要作用。由图5可知,随着作物生长从BS期进入FS期,根系长度迅速增加。NTS和DT处理增长最快,分别增长676.2、760.8 cm。在PS期,除NTS处理外,其余处理的根长均比前一个生育期缩短1.5%~7.4%,且各处理误差在FS、PS期最大。随着植株的成熟,根系吸收养分的能力下降,根毛逐渐脱离,导致各处理的总根长明显变小。总体来看,BS期各处理根长减小为DT>CK>NT>NTS。FS、PS、MS期各处理根长减小顺序一致,表现为DT>NTS>NT>CK。不同耕作模式下大豆根系总长度均呈现先增大后变小趋势,但大豆根系总长度峰值在不同耕作模式下略有偏差,其中NTS处理在PS期到达顶

峰,NT、DT、CK处理在FS期到达顶峰。NTS与其他处理不同,其他处理在FS期总根长达到顶峰而NTS在PS时期达到顶峰,是由于NTS前期秸秆覆盖造成的。秸秆延缓土壤升温速度,推迟种子萌发时间,导致NTS处理生长发育慢于其他处理。在BS期,DT、CK总根长较大表明,在根系生长发育前期,松散的土壤结构更加有利于根系的生长。

2.2.2 大豆根系总表面积 由图5可知,大豆植株总根表面积的变化趋势与根长变化趋势相似。NTS处理作物生长从BS期进入PS期,根系总表面积持续增长。而NT、DT、CK处理作物从BS期进入FS期迅速增长,从FS期进入PS期又缓慢下降。所有处理从PS期到MS期下降到较低水平,下降约13.1%~20.7%。在BS期各处理根表面积减小顺序为DT>CK>NT>NTS,与CK处理相比,只有DT处理差异达到显著水平。FS期根表面积差异最为明显,最大值约为

最小值的 1.7 倍,各处理根表面积减小顺序为 DT>NTS>NT>CK,与 CK 处理相比,NTS 和 DT 处理差异达到显著水平。PS 和 MS 期,各处理根表面积减小顺序为 DT>NTS>NT>CK。与 CK 处理相比,DT 处理在全生育期有显著差异;NTS 处理除 BS 期外也显著差异;NT 处理与 CK 处理无显著差异。与其他处理相比,DT 在全生育期总根系表面积最大,说明良好的翻耕有利于根系的生长发育,更大的根系表面积增加与土壤接触面积,提高植株吸收养分的能力。

2.2.3 大豆根系总体积 由图 5 可知,与大豆总根长和总根表面积不同,NTS、NT、CK 处理大豆总根体积从 BS 期到 PS 期呈增加趋势,增长约 5~9 倍。从 PS 期到 MS 期才呈现减小趋势,下降约 32.8%~37.2%。DT 处理仍在 FS 期达到峰值,FS 期到 MS 期持续下降。在 BS 期各处理根系总体积减小顺序为 DT>CK>NT>NTS,与 CK 处理相比,只有 DT 处理差异达到显著水平。FS 期根系总体积差异最为

明显,最大值约为最小值的 1.6 倍,各处理根系总体积减小顺序为 DT>NTS>NT>CK,与 CK 处理相比,NTS 和 DT 处理差异达到显著水平。PS 期,各处理根表面积减小顺序为 DT>NTS>CK>NT。MS 期,各处理根表面积减小顺序为 DT>NTS>NT>CK。与 CK 处理相比,DT 处理在全生育期具有显著差异;NTS 处理除 BS 期外也具有显著差异;NT 处理与 CK 处理无显著差异。

2.2.4 大豆平均根径 由图 5 可知,随着大豆植株的逐渐成熟,不同耕作模式下大豆根系的平均直径逐渐增大。在 BS 期,大豆平均根径表现为 DT>CK>NT>NTS;从 FS 期开始,大豆平均根径表现为 NTS>NT>DT>CK。对比 BS 期到 MS 期,NTS、NT、DT、CK 处理分别增加 1.01、0.88、0.75、0.77 cm³。除 BS 期外,与 CK 处理相比,NTS 处理大豆根系平均直径存在显著差异($p<0.05$)。NT 在 FS 期与 CK 处理存在显著差异。

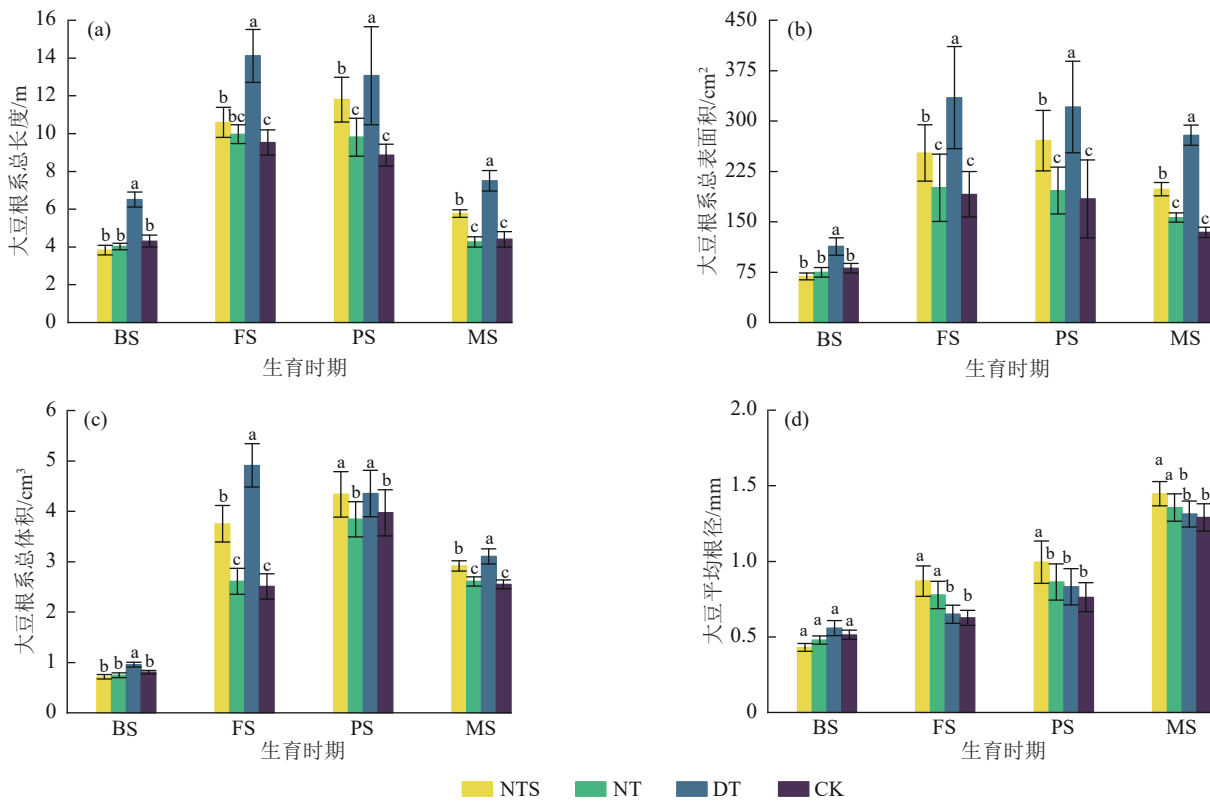


图 5 不同耕作模式大豆根系形态的变化特征

Fig. 5 Variation characteristics of soybean root morphology in different tillage practices

2.3 不同耕作模式大豆根系分泌物分泌速率及酶活性变化特征

2.3.1 异黄酮与有机酸 由表 1 可知,不同耕作模式异黄酮总量分泌速率呈先增加后减少趋势,各处理异黄酮分泌速率均在 FS 期到达峰值。从 BS 期到 FS 期 NTS、NT、DT、CK 异黄酮分泌速率增长约 1.9~11.8 倍。从 FS 期到 MS 期逐渐下降,其中 FS 期

到 PS 期下降较为迅速,NTS、NT、DT、CK 下降约 38.6%~59.4%。与 CK 处理相比,FS 期 NTS、NT、DT 异黄酮分泌速率增加 18.2%、4.6%、26.5%;PS 期 NTS、NT、DT 异黄酮分泌速率增加 55.5%、9.2%、10.5%。

总体来看,6 种异黄酮分泌速率均在 FS 期和 PS 期较高,在 BS 期和 MS 期分泌速率迟缓。NTS、DT

异黄酮分泌速率高于其他 2 种耕作模式,NTS 处理异黄酮分泌速率在 4 个时期均显著高于 CK 处理 ($p < 0.05$);DT 在 FS 期和 MS 期显著高于 CK 处理;NT 在 BS 期显著高于 CK 处理。大豆苷与染料木素是大豆分泌异黄酮的主要化学成分,分别占各处理各时期异黄酮分泌总速率的 11.7%~61.7% 和 26.7%~80.3%。大豆苷元、黄豆黄苷、黄豆黄素、染料木苷在全生育期仅检测出少量分泌。由图 6 可知,不同耕作模式有机酸总量分泌速率呈先增加后减少趋势,各处理有机酸分泌速率均在 FS 期到达峰值,大

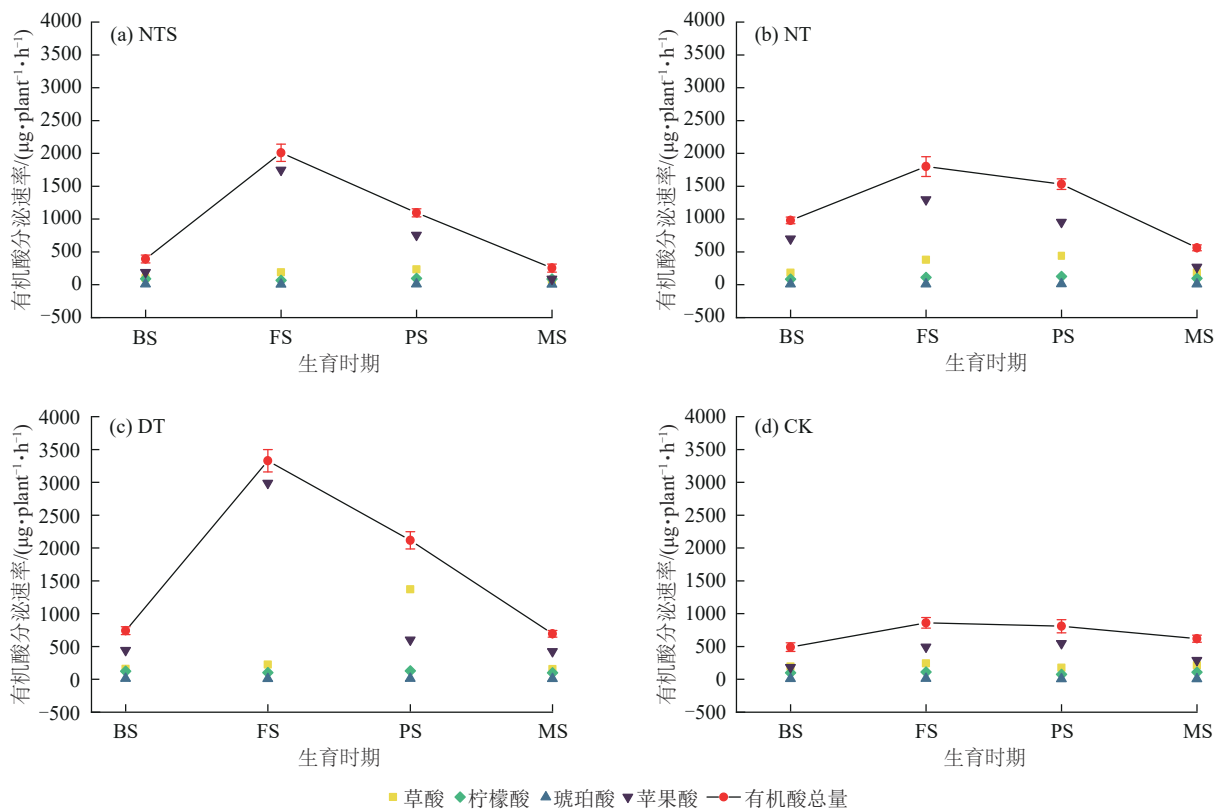
豆根系有机酸分泌速率表现为 DT>NTS>NT>CK。与 CK 处理相比,FS 期 NTS、NT、DT 有机酸分泌速率分别增加 133.5%、109.2%、286.8%;PS 期 NTS、NT、DT 有机酸分泌速率分别增加 35.4%、89.4%、161.8%。总体来看,与 CK 相比,其他 3 种处理有机酸分泌速率均显著提高。在 4 种有机酸(草酸、柠檬酸、琥珀酸、苹果酸)中,草酸、苹果酸占主导地位,分别占有有机酸总量的 6.7%~64.2% 和 28.9%~89.4%,琥珀酸分泌量较少,仅为有机酸总量的 0.3%~3.2%。

表 1 不同耕作模式大豆异黄酮分泌速率变化特征

Table 1 Variation characteristics of soybean isoflavone secretion rate in different tillage practices $\mu\text{g}/(\text{plant}\cdot\text{h})$

大豆根系分泌物	处理	BS	FS	PS	MS
大豆苷	NTS	6.79±0.34a	8.76±0.36a	5.80±0.21b	0.96±0.03a
	NT	3.91±0.20b	4.90±0.22b	3.27±0.17c	0.53±0.03a
	DT	1.77±0.09c	5.49±0.28b	2.08±0.10c	0.79±0.04a
	CK	2.06±0.10c	7.55±0.38ab	9.95±0.50a	0.68±0.03a
大豆苷元	NTS	0.21±0.02a	0.32±0.01a	0.44±0.02b	0.11±0.01a
	NT	0.09±0.01b	0.22±0.01b	0.31±0.03b	0.07±0.01a
	DT	0.12±0.02b	0.06±0.01c	0.73±0.03a	0.06±0.01a
	CK	0.07±0.01b	0.23±0.01b	0.14±0.01c	0.09±0.01a
黄豆黄苷	NTS	0.06±0.01a	0.65±0.03c	0.37±0.02b	0.08±0.02a
	NT	0.04±0.01a	1.44±0.07b	0.83±0.04a	0.09±0.03a
	DT	0.07±0.02a	2.24±0.11a	0.22±0.01b	0.10±0.02a
	CK	0.07±0.01a	1.31±0.07b	0.69±0.03a	0.05±0.02a
黄豆黄素	NTS	0.12±0.03a	0.42±0.02a	1.23±0.05a	0.10±0.03a
	NT	0.07±0.02b	0.41±0.02a	0.03±0.01c	0.06±0.01b
	DT	0.15±0.03a	0.45±0.02a	1.30±0.06a	0.08±0.02ab
	CK	0.06±0.02b	0.14±0.01b	0.69±0.03b	0.09±0.03a
染料木苷	NTS	0.11±0.03b	0.68±0.03a	0.41±0.02b	0.09±0.02a
	NT	0.14±0.02a	0.52±0.03a	0.66±0.03a	0.08±0.01a
	DT	0.16±0.02a	0.34±0.02b	0.15±0.01c	0.10±0.03a
	CK	0.05±0.01b	0.37±0.02b	0.33±0.02b	0.07±0.02a
染料木素	NTS	4.61±0.23b	30.02±1.52b	16.81±0.84a	2.47±0.12a
	NT	8.18±0.55a	28.65±0.98d	12.50±0.02b	1.36±0.09b
	DT	1.14±0.06c	35.11±1.27a	13.25±0.06b	3.24±0.26a
	CK	5.42±0.27b	24.95±1.29c	4.31±0.22c	1.21±0.11b
异黄酮总量	NTS	11.90±0.58a	40.85±2.23a	25.06±1.39a	3.96±0.03a
	NT	12.43±0.64a	36.14±1.31b	17.60±0.31b	2.19±0.03b
	DT	3.41±0.15c	43.69±1.69a	17.73±0.27b	4.37±0.04a
	CK	7.73±0.41b	34.55±1.96b	16.11±0.82b	2.19±0.03b

注:表中数据为平均值±标准差;同列不同字母表示不同处理间差异显著($p < 0.05$)。下同。



注:总有机酸为草酸、柠檬酸、琥珀酸、苹果酸之和。

图 6 不同耕作模式下大豆有机酸分泌速率变化特征

Fig. 6 Variation characteristics of soybean organic acid secretion rate under different tillage practices

2.3.2 酸性磷酸酶与根瘤固氮酶 酸性磷酸酶 (ACP)通过催化有机磷酸酯的水解反应将土壤中有机磷矿化为无机磷,是植物能够吸收土壤有机磷的重要物质。由图 7可知,不同耕作模式 ACP 活性均呈先升高再下降趋势,各处理 ACP 活性均在 FS 期达到顶峰,大豆根系分泌 ACP 的活性表现为 DT>NTS>NT>CK。从 BS 期到 FS 期 NTS、NT、DT、CK 酸性磷酸酶活性增长约 33.3%~79.6%。从 FS 期到 MS 期呈现断崖式下降,NTS、NT、DT、CK 酸性磷酸酶活性增长约 22.7%~41.4%。不同耕作模式下 ACP 活性在 FS 期和 PS 期差异较大,与 CK 处理相比,FS 期 NTS、NT、DT 酸性磷酸酶活性分别增加 65.4%、18.4%、62.3%;PS 期 NTS、NT、DT 异黄酮分泌速率分别增加 31.0%、10.8%、69.7%。固氮酶 (NITS)使得根瘤中的根瘤菌能够将大气中的氮气转化为大豆氨或其他有机氮化合物,是大豆获得氮源、提高土壤肥力的重要物质。与 ACP 活性不同,NITS 活性从 BS 期一直增长到 PS 期,增长约 54.8%~76.6%,从 PS 期到 MS 期呈下降趋势,下降约 5.4%~12.9%,大豆根瘤 NITS 的活性表现为 DT>NTS>CK>NT。不同耕作模式下 NITS 活性在 FS 期和 PS 期差异较大,与 CK 处理相比,FS 期 NTS、DT 固

氮酶活性分别增加 16.7%、46.1%,NT 下降 11.6%;PS 期 NTS、DT 固氮酶活性分别增加 5.4%、20.7%,NT 下降 8.1%。

2.4 不同耕作模式大豆农艺性状变化特征

由表 2可知,与 CK 处理相比,NTS、DT 处理的大豆产量均有显著影响 ($p < 0.05$),而 NT 处理大豆产量变化不显著。NTS、NT、DT 处理大豆产量分别提高 24.7%、14.8%、36.2%。不同耕作模式均增加大豆植株的株高和茎粗,深耕对大豆植株生长发育的影响更为显著。就大豆产量构成而言,与 CK 相比,NTS、DT 均显著提高单株有效荚果数和籽粒数。NTS、NT、DT 处理显著提高 KWEI(百粒重)11.5%、7.0%、16.8%。

2.5 土壤理化性质、大豆根系性状和大豆农艺性状 PLM-PS 模型分析

PLM-PS 结果显示,大豆品质特征的 81% 归因于不同耕作模式(图 8)。耕作方式分别解释土壤养分、土壤紧实度、根系形态、根系分泌物的 66%、79%、86%、64%。耕作方式对于土壤养分、紧实度的直接影响(路径系数分别为 -0.84 和 -0.90)大于对大豆品质特征的直接影响(路径系数为 -0.44);土壤养分对大豆根系分泌物的影响最为强烈(路径系数为 0.92);土壤紧实度对根系形态的直接影响

(路径系数为 0.89)大于土壤养分对根系形态的直接影
响(路径系数为 0.86);根系形态对大豆品质特

征的直接影响(路径系数为 0.88)大于土壤养分对
大豆品质特征的直接影响。

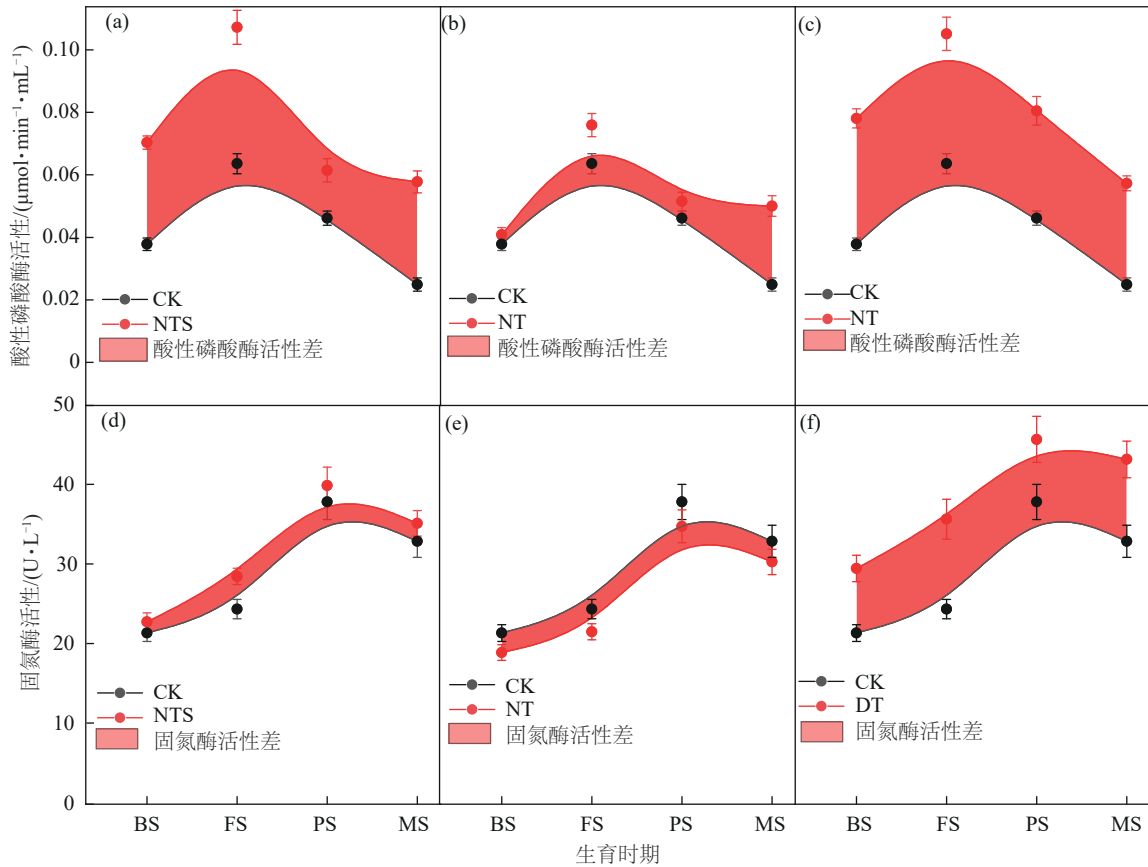


图 7 不同耕作模式大豆根系分泌物中酸性磷酸酶活性及根瘤固氮酶活性变化特征

Fig. 7 Variation characteristics of acid phosphatase activity and nodule nitrogenase activity in soybean root exudates in different tillage practices

表 2 不同耕作模式对大豆产量的影响

Table 2 Effects of different tillage practices on soybean yield

处理	株高/cm	阀杆直径/cm	有效豆荚数	百粒重/g	单株粒数	产量/(kg·hm ⁻²)
NTS	87.90±2.24a	0.89±0.03a	38.67±1.43a	23.89±2.43b	93.33±4.21ab	2 521.42±94.27b
NT	83.42±2.14b	0.79±0.02a	36.02±1.62b	23.06±2.39b	91.26±4.23b	2 321.88±105.26c
DT	90.22±1.67a	0.97±0.04a	37.54±1.57ab	25.02±2.17a	95.03±5.67a	2 754.79±130.33a
CK	80.25±3.55b	0.64±0.06b	31.25±1.36c	21.42±1.45c	85.00±5.23c	2 022.21±121.89c

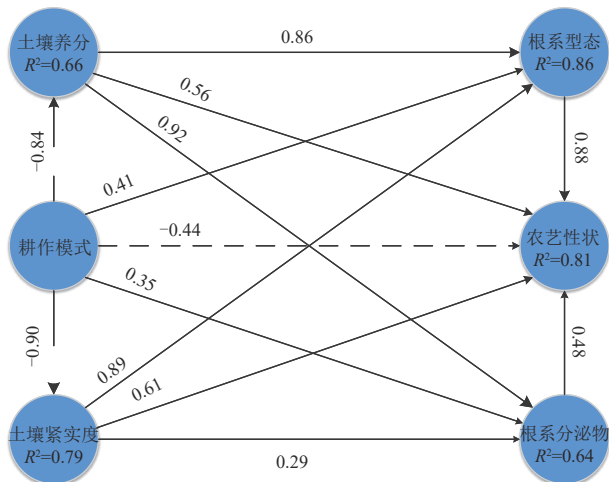
3 讨论

3.1 不同耕作模式对大豆根系形态的影响

土壤压实通过改变养分、水热和气体在根与土壤之间的可及性及抑制根系渗透,对根系施加多重压力。YANG 等^[17]研究表明,单独免耕不利于根系伸长,而 NTS 处理增加 0~20 cm 土层的根系总长度和表面积。CAI 等^[22]研究发现,深层耕作至 30、50 cm 显著增加根系长度和根表面积。本研究表明,与 CK 处理相比,NTS 处理在后 3 个时期增加根系总长度、根表面积和根体积,DT 处理在全生育期增加根系总长度、根表面积和根体积。是由于 NTS 处理主要影响 R1 层的水分、无机氮和有效磷质量分数。

表层有利的土壤水分、无机氮和有效磷使根系在生长过程中更有效地觅食水、氮、磷。在 DT 作用下,良好的土壤孔隙连通、土壤水热及丰富的氮、磷为根系渗透和生长发育提供优越的环境。大豆根系生长主要与土壤热时间呈正相关^[23],NTS 处理在生育早期土壤温度低,导致根系发育迟缓,在 FS 期逐渐与 CK 处理相同,在 PS 期反超 CK 处理。本研究中,与 CK 处理相比,NT 处理并未限制根系伸长。可能归因于 NT 中连续孔隙系统的发展(如生物孔)可以促进根的垂直渗透,抵消压实的负面影响。当土壤强度到一定阈值时,根倾向于向生物孔方向生长,生长得更快、更深。生物孔壁的养分高于散装土壤,根系与生

物孔隙壁接触有利于养分的吸收^[24]。通过相关性分析,大豆根系总长度、根表面积与R1层土壤无机氮、有效磷呈显著负相关(图9)。鹰嘴豆^[25]和甘蓝型油菜^[26]也有类似发现,其中养分吸收与根长和根表面积有关,丰富的氮、磷促进根系生长,根长、根表面积的增加提高根系捕获土壤养分的能力。



注:实线箭头和点线箭头分别表示正相关关系和负相关关系;路径系数的强度与箭头的宽度成正比;方差解释比例用R²。

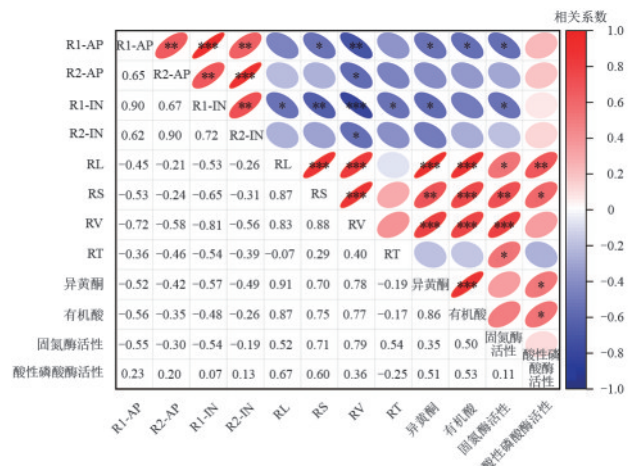
图 8 PLS-PM 路径模型分析

Fig. 8 PLS-PM path model analysis

3.2 不同耕作模式对大豆根系分泌物分泌速率的影响

植物通过从根部向根系分泌多种化合物来调节土壤生态系统的能力。有研究^[27]表明,氮施加量可以调节植物根系异黄酮的分泌;LI等^[28]研究发现,水稻等根系分泌有机酸应对磷胁迫。与其研究结果相一致,本研究结果表明,根系异黄酮分泌与土壤无机氮呈显著负相关,有机酸分泌与土壤有效磷呈显著负相关(图9)。由表1和图6可知,不同耕作模式根系分泌异黄酮、有机酸速率均先上升,在FS期达到峰值后缓慢下降,根系通过加速分泌异黄酮促进大豆结瘤固氮,加速有机酸分泌活化土壤无机磷,解释土壤养分从BS期到FS期显著提高的原因。根系在促进结瘤固氮同时,也提高固氮酶活性,进而提高大豆根瘤固定氮气的能力,固氮酶活性前期增加缓慢,是因为大豆前期侧重根系的生长发育,根瘤生长发育尚未成熟,导致固氮酶活性偏低;FS期到PS期迅速升高,这时根瘤大豆根系生长发育基本完成,根瘤数量持续增多,大豆生长发育不满足于土壤中的氮元素,进而固氮酶活性增加,提高大豆对于氮气利用率。根系在溶解磷酸盐的同时也提高ACP活性(图7),催化有机磷酸酯的水解反应将土壤中有机磷矿化为无机磷,从而增加土壤磷的有效性^[29]。更重要

的是,试验结果表明,根系长度、根表面积与大豆根系分泌物分泌速率呈显著正相关(图9),是因为在本试验中没有添加任何化肥,养分未达到限制阈值,不同处理都处于养分“饥渴”状态,“激发”大豆根系快速分泌异黄酮、有机酸等化合物,促进根系养分吸收,此时根系的长度、表面积决定根系分泌物的分泌速率,越长的根系,越大的表面积,分泌速率越快。BASALIRWA等^[30]研究中未检测到大豆根系中含有染料木素,而在本研究中根系分泌异黄酮以大豆苷和染料木素为主。WANG等^[31]研究中,柠檬根系有机酸主要以草酸和柠檬酸为优势酸,在本研究中有有机酸以草酸和苹果酸为主。因此,不同植物种类、同种植物不同水土环境对根系分泌物种类影响还需进一步研究。



注:R1-AP为R1层土壤有效磷;R2-AP为R2层土壤有效磷;R1-IN为R1层土壤无机氮;R2-IN为R2层土壤无机氮;RL为根总长度;RS为根表面积;RV为根体积;RT为平均根径;*表示p<0.05;**表示p<0.01;***表示p<0.001。

图 9 土壤养分、根系形态和根系分泌物之间关系的 Pearson 相关性分析

Fig. 9 Pearson correlation analysis of the relationships between soil nutrients, root morphology, and root exudates

3.3 不同耕作模式对农艺性状的影响

耕作模式对黑土地保护及作物生长发育至关重要,耕作模式通过改变农田土壤环境影响根系生长发育及根系分泌物分泌速率,从而影响农作物性状,使作物产量产生差异。土壤中的氮磷等养分对根系生长至关重要,养分充足可以促进根系的生长和发育^[32]。有研究^[33]表明,秸秆覆盖增加土壤有机质质量分数,改善土壤团聚体结构,降低土壤密度,从而有利于根系生长。根系发达是植株地上部分生长发育的基础,有利于植株果实的积累。根系结构的差异导致根系分泌物的组成和分泌速率不同。相关性分析表明,越长的根系,越大的表面积,分泌速率越

快,更能有助于植物更好地适应不利环境,提高土壤养分有效性,促进根系养分吸收,提高作物产量。蒋发辉等^[11]研究发现,东北黑土地区保护性耕作增产不明显(1.21%),而深耕增产显著(12.3%)。本研究中,与CK处理相比,NTS、NT、DT分别提高大豆产量24.7%、14.8%、36.2%,NTS与DT较高的产量也表明,农田土壤环境是影响作物产量的直接因素,良好的土壤环境使得NTS与DT根系发育更加完全,根系分泌速率更快,作物产量更高。PLS-PM结果表明,耕作模式通过对植物和土壤属性的间接相互作用提高作物产量,表现为改善水土环境和大豆根系形态,提高根系分泌速率、大豆株高和单株荚果数。除当年产量外,大豆收获后的土壤理化性质也影响后一年作物产量。由图3可知,在大豆生育末期DT及CK处理土壤紧实度上升显著,是因为生育期和作物收获时,土壤表面的农业机械活动造成土壤压实,而NTS和NT处理具有“自然预压实结构”,提高土壤在运输后对压实的抵抗力^[34]。由图4可知,NTS和DT在PS期和MS期不同土层养分回升幅度远大于NT和CK处理,是因为2种处理秸秆持续分解释放养分,植株本身发育成熟对养分需求降低,土壤养分回升显著;也因为NTS和DT处理根系发达,分泌更多的根系分泌物促进土壤有效养分的释放。NTS和DT处理不仅提高作物产量,也减缓土壤压实进程,提高生育末期土壤有效养分的恢复与固存,为作物生长发育提供良好的水土环境。

4 结论

1) NTS、NT处理显著提高土壤紧实程度,DT、CK处理有效缓解土壤压实;添加秸秆对土壤水分、温度、养分有显著影响;NTS和DT处理提高养分水平,与CK处理相比,NTS、DT无机氮和有效磷分别提高35.8%、26.3%和42.1%、33.7%。

2) NTS和DT处理提高大豆根系长度、表面积和体积,加快作物发育过程中根系分泌物的分泌,促进土壤有效养分的矿化与固存。

3) 与CK处理相比,NTS和DT增加大豆株高和有效豆荚数,而NT对大豆产量影响不显著。DT显著提高大豆产量(36.2%),对土壤有效养分的恢复有明显效果。NTS不仅减少农民劳动及机械耕作,还提高大豆产量(24.7%),并且提高土壤抗性,促进土壤有效养分的恢复与固存。

参考文献:

[1] 张慧,马鑫鹏,苏航,等.松嫩平原黑龙江省南部土壤重金属背景值及污染程度分析[J].干旱地区农业研究,

2018,36(6):230-236.

ZHANG H, MA X P, SU H, et al. Soil heavy metal background values and pollution degree in southern Songnen Plain of Heilongjiang Province [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2018, 36(6):230-236.

[2] 梁爱珍,张晓平,杨学明,等.东北黑土有机碳的分布及其损失量研究[J].土壤通报,2008,39(3):533-538.

LIANG A Z, ZHANG X P, YANG X M, et al. Distribution of soil organic carbon and its loss in black soils in northeast China [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2008, 39(3):533-538.

[3] 吕秋爽,周斌,王朋.免耕对玉米根系属性和产量以及土壤物理性质的影响:整合分析[J].生态学杂志,2020,39(10):3492-3499.

LÜ Q S, ZHOU B, WANG P. Effects of no-tillage on root traits and yield of maize and soil physical properties: A meta-analysis [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2020, 39(10):3492-3499.

[4] 张锡洲,李廷轩,余海英,等.水旱轮作条件下长期自然免耕对土壤理化性质的影响[J].水土保持学报,2006,20(6):145-147.

ZHANG X Z, LI T X, YU H Y, et al. Effects of long-term natural no-tillage on soil physiochemical properties in rice / wheat rotation systems [J]. *Journal of soil and water conservation*, 2006, 20(6):145-147.

[5] 刘敏,赵财,范虹,等.长期间作及免耕对土壤物理性状及作物产量的影响[J].中国农业通报,2023,39(2):28-35.

LIU M, ZHAO C, FAN H, et al. Effects of long-term intercropping and no-tillage on soil physical properties and crop yield [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2023, 39(2):28-35.

[6] LUO G, LI L, FRIMAN V P, et al. Organic amendments increase crop yields by improving microbe-mediated soil functioning of agroecosystems: A meta-analysis [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2018, 124:105-115.

[7] 梁尧,蔡红光,杨丽,等.玉米秸秆覆盖与深翻两种还田方式对黑土有机碳固持的影响[J].农业工程学报,2021,37(1):133-140.

LIANG Y, CAI H G, YANG L, et al. Effects of maize stovers returning by mulching or deep tillage on soil organic carbon sequestration in mollisol [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2021, 37(1):133-140.

[8] 李桂,曹文华,马建业,等.小麦秸秆覆盖量对坡面流体力学特性影响[J].农业工程学报,2023,39(1):108-116.

LI G, CAO W H, MA J Y, et al. Effect of wheat straw mulch on slope hydrodynamic characteristics [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2023, 39(1):108-116.

- [9] LÜ L G, GAO Z B, LIAO K H, et al. Impact of conservation tillage on the distribution of soil nutrients with depth[J].*Soil and Tillage Research*, 2023, 225: e105527.
- [10] 巩品祥,付强,李天霄,等.不同耕作模式和生物炭添加对黑土区土壤氮磷转化及玉米生长的调控[J].*水土保持学报*, 2024, 38(3): 356-368.
GONG P X, FU Q, LI T X, et al. Nitrogen and phosphorus transformation of soil and growth of maize in black soil area by different tillage patterns and biochar addition [J].*Journal of Soil and Water Conservation*, 2024, 38(3): 356-368.
- [11] 蒋发辉,钱泳其,郭自春,等.基于Meta分析评价东北黑土地保护性耕作与深耕的区域适宜性:以作物产量为例[J].*土壤学报*, 2022, 59(4): 935-952.
JIANG F H, QIAN Y Q, GUO Z C, et al. Evaluating the regional suitability of conservation tillage and deep tillage based on crop yield in the black soil of northeast China: A meta-analysis[J].*Acta Pedologica Sinica*, 2022, 59(4): 935-952.
- [12] DONG L, WANG J, LI J, et al. Assessing the impact of grazing management on wind erosion risk in grasslands: A case study on how grazing affects aboveground biomass and soil particle composition in Inner Mongolia[J].*Global Ecology and Conservation*, 2022, 40: e02344.
- [13] VIVES-PERIS V, DE OLLAS C, GÓMEZ-CADENAS A, et al. Root exudates: From plant to rhizosphere and beyond[J].*Plant Cell Reports*, 2020, 39(1): 3-17.
- [14] 陈学文,张晓平,梁爱珍,等.耕作方式对黑土硬度和体积质量的影响[J].*应用生态学报*, 2012, 23(2): 439-444.
CHEN X W, ZHANG X P, LIANG A Z, et al. Effects of tillage mode on black soil's penetration resistance and bulk density [J].*Chinese Journal of Applied Ecology*, 2012, 23(2): 439-444.
- [15] XIONG P, ZHANG Z B, WANG Y K, et al. Variable responses of maize roots at the seedling stage to artificial biopores in noncompacted and compacted soil[J].*Journal of Soils and Sediments*, 2022, 22(4): 1155-1164.
- [16] 李瑞平,罗洋,隋鹏祥,等.玉米秸秆不同还田方式对黑土耕层温度影响的短期效应[J].*应用生态学报*, 2023, 34(10): 2693-2702.
LI R P, LUO Y, SUI P X, et al. Short-term effect of different returning methods of maize straw on the temperature of black soil plough layer[J].*Chinese Journal of Applied Ecology*, 2023, 34(10): 2693-2702
- [17] YANG H K, LI J G, WU G, et al. Maize straw mulching with no-tillage increases fertile spike and grain yield of dry-land wheat by regulating root-soil interaction and nitrogen nutrition[J].*Soil and Tillage Research*, 2023, 228: e105652.
- [18] WANG N Q, KONG C H, WANG P, et al. Root exudate signals in plant-plant interactions[J].*Plant, Cell and Environment*, 2021, 44(4): 1044-1058.
- [19] 童长春,刘晓静,吴勇,等.内源异黄酮对紫花苜蓿结瘤固氮及氮效率的调控研究[J].*草业学报*, 2022, 31(3): 124-135.
TONG C C, LIU X J, WU Y, et al. Regulation of endogenous isoflavones on alfalfa nodulation and nitrogen fixation and nitrogen use efficiency[J].*Acta Prataculturae Sinica*, 2022, 31(3): 124-135.
- [20] 张苗苗,黄鑫星,罗沛,等.低分子量有机酸对亚热带地区典型土壤磷吸附的影响[J].*湖南农业科学*, 2024(2): 23-30.
ZHANG M M, HUANG X X, LUO P, et al. Influence of organic acids with low molecular weight on phosphorus sorption by typical soils in subtropical regions[J].*Hunan Agricultural Sciences*, 2024(2): 23-30.
- [21] LI T, LI Y Z, GAO X C, et al. Rhizobacterial communities and crop development in response to long-term tillage practices in maize and soybean fields on the Loess Plateau of China[J].*Catena*, 2021, 202: e105319.
- [22] CAI H G, MA W, ZHANG X Z, et al. Effect of subsoil tillage depth on nutrient accumulation, root distribution, and grain yield in spring maize [J].*The Crop Journal*, 2014, 2(5): 297-307.
- [23] ORDÓÑEZ R A, ARCHONTOULIS S V, MARTÍNEZ-FERIA R, et al. Root to shoot and carbon to nitrogen ratios of maize and soybean crops in the US Midwest [J].*European Journal of Agronomy*, 2020, 120: e126130.
- [24] ATHMANN M, KAUTZ T, PUDE R, et al. Root growth in biopores: Evaluation with in situ endoscopy[J].*Plant and Soil*, 2013, 371(1): 179-190.
- [25] PANG J Y, ZHAO H X, BANSAL R, et al. Leaf transpiration plays a role in phosphorus acquisition among a large set of chickpea genotypes[J].*Plant, Cell and Environment*, 2018, 41(9): 2069-2079.
- [26] REDDY V R P, ASKI M S, MISHRA G P, et al. Genetic variation for root architectural traits in response to phosphorus deficiency in mungbean at the seedling stage[J].*PLoS One*, 2020, 15(6): e0221008.
- [27] 安琦,殷博,张介驰,等.外源类黄酮对大豆根瘤菌趋化性与结瘤效果的影响[J].*大豆科学*, 2017, 36(6): 900-904.
AN Q, YIN B, ZHANG J C, et al. The chemotaxis and nodulation effect of soybean rhizobium on exogenous flavonoids[J].*Soybean Science*, 2017, 36(6): 900-904.
- [28] LI C J, KUYPER T W, VANDERWERF W, et al. Testing for complementarity in phosphorus resource use by mixtures of crop species [J].*Plant and Soil*, 2019, 439(1): 163-177.
- [29] HENINTSOA M, BECQUER T, RABEHARISOA L, et al. Geochemical and microbial controls of the effect of citrate on phosphorus availability in a ferralsol[J].*Geoderma*, 2017, 291: 33-39.

- [30] BASALIRWA D, SUDO S, WACAL C, et al. Effect of activated carbon on greenhouse gas emissions, seed yield, soil chemical properties and isoflavone content of soybean genotypes with varying nodulation capacities under sandy soil conditions [J]. *Rhizosphere*, 2020, 14: e100202.
- [31] WANG Y Y, LUO D H, XIONG Z Y, et al. Changes in rhizosphere phosphorus fractions and phosphate-mineralizing microbial populations in acid soil as influenced by organic acid exudation [J]. *Soil and Tillage Research*, 2023, 225: e105543.
- [32] 杨文飞, 杜小凤, 顾大路, 等. 长期施肥对根系及土壤微生态环境、养分和结构的影响综述[J]. *江西农业学报*, 2020, 32(12): 37-44.
- YANG W F, DU X F, GU D L, et al. Review of effects of long-term fertilization on root and soil micro-ecological environment, nutrients and structure [J]. *Acta Agriculturae Jiangxi*, 2020, 32(12): 37-44.
- [33] 王丽丽, 余海龙, 黄菊莹, 等. 不同覆盖措施的土壤生态环境效应和作物增产效应述评[J]. *江苏农业科学*, 2016, 44(7): 11-15.
- WANG L L, YU H L, HUANG J Y, et al. Review on soil eco-environmental effects and crop yield increasing effects of different mulching measures [J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2016, 44(7): 11-15.
- [34] 郭孟洁, 李建业, 李健宇, 等. 实施 16 年保护性耕作下黑土土壤结构功能变化特征[J]. *农业工程学报*, 2021, 37(22): 108-118.
- GUO M J, LI J Y, LI J Y, et al. Changes of soil structure and function after 16-year conservation tillage in black soil [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2021, 37(22): 108-118.
- (上接第 287 页)
- [25] HOWARTH R W, CHAN F, SWANEY D P, et al. Role of external inputs of nutrients to aquatic ecosystems in determining prevalence of nitrogen *vs.* phosphorus limitation of net primary productivity [J]. *Biogeochemistry*, 2021, 154: 293-306.
- [26] WICKING K, GRANDY A S, REED S C, et al. The origin of litter chemical complexity during decomposition [J]. *Ecology Letters*, 2012, 15(10): 1180-1188.
- [27] SOONG J L, FUCHSLUEGER L, MARAÑÓN-JIMENEZ S, et al. Microbial carbon limitation: The need for integrating microorganisms into our understanding of ecosystem carbon cycling [J]. *Global Change Biology*, 2020, 26(4): 1953-1961.
- [28] WANG Y, ZHANG Z M, HE K H, et al. Differed adaptive strategies to nutrient status between native and exotic mangrove species [J]. *Forests*, 2022, 13: 804.
- [29] 蔡露. 微生物驱动的河口养殖塘沉积物脱氮过程研究[D]. 泉州: 华侨大学, 2023.
- CAI L. Study on denitrification process of sediment in estuarine culture pond driven by microorganism [D]. Quanzhou: Huaqiao University, 2023.
- [30] 金宝石. 福建主要河口湿地围垦养虾塘氧化亚氮产生、溶存与释放[D]. 福州: 福建师范大学, 2018.
- JIN B S. Generation, dissolution and release of nitric oxide in shrimp ponds reclaimed from main estuary wetland in Fujian Province [D]. Fuzhou: Fujian Normal University, 2018.