

白浆土心土培肥技术开发应用与发展趋势

王秋菊^{1,2}, 张海滨¹, 邹佳何¹, 李婧阳¹, 孟庆英¹, 刘鑫¹,
陈爱慧¹, 刘杰¹, 刘峰¹

(1. 黑龙江省农业科学院, 哈尔滨 150086; 2. 黑龙江省土壤环境与植物营养重点实验室, 哈尔滨 150086)

摘要: 白浆土黑土层薄, 存在坚硬土层障碍, 白浆层养分含量低, 有效耕层浅, 这导致农田质量下降、作物产量低、耕地产能提升受限, 心土培肥技术是解决这些问题的一大有效措施。为系统梳理心土培肥技术研究现状以及发展趋势, 该研究对白浆土心土培肥技术的形成、技术特点、实施方法、应用效果等进行了综述, 结果表明: 1) 该技术能够改善白浆层不良物理特性、打破障碍土层、降低土壤硬度及固相比率; 调节土壤化学指标、提升白浆层土壤肥力、调节土壤 pH 值; 创造适合作物生长发育的土体环境, 增加作物根系数量及深层根系分布比率, 提高作物产量并有持续 5 年以上后效; 2) 该技术在应用过程中根据黑土层厚度、心土层理化特征因地制宜实施, 在应用过程中不断进行技术的完善和应用场景的延伸, 在黑土层薄的瘠薄土壤上应用效果明显。基于综述分析, 对发展趋势进行展望: 1) 注重心土培肥技术应用的灵活性, 根据腐殖质层厚度及障碍土层位置确定作业参数; 2) 加强心土培肥技术应用的广适性, 培肥物料选择要基于不同土壤心土层特性确定种类及用量; 3) 提升心土培肥机械高效稳定性, 心土培肥机械要向精准、智能、多功能集约和绿色方向发展; 4) 建立以心土培肥技术为核心的综合技术体系, 形成复合效应。心土培肥技术可为黑土区低产土壤改良、障碍消减和耕地地力提升提供技术支撑。

关键词: 白浆土; 心土培肥; 技术开发; 效果; 发展趋势

doi: [10.11975/j.issn.1002-6819.202410132](https://doi.org/10.11975/j.issn.1002-6819.202410132)

中图分类号: S156.99

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2025)-21-0085-08

王秋菊, 张海滨, 邹佳何, 等. 白浆土心土培肥技术开发应用与发展趋势[J]. 农业工程学报, 2025, 41(21): 85-92. doi:

[10.11975/j.issn.1002-6819.202410132](https://doi.org/10.11975/j.issn.1002-6819.202410132) <http://www.tcsae.org>

WANG Qiujie, ZHANG Haibin, ZOU Jiahe, et al. Development and application of albic soil subsoil cultivation technology and future trends[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2025, 41(21): 85-92. (in Chinese with English abstract) doi: [10.11975/j.issn.1002-6819.202410132](https://doi.org/10.11975/j.issn.1002-6819.202410132) <http://www.tcsae.org>

0 引言

黑土是宝贵的耕地资源, 因其肥沃而被誉为“耕地中的大熊猫”。虽然黑土区土壤肥力相对较高, 但也分布着面积很大的瘠薄土壤^[1], 制约粮食单产提升。瘠薄土壤形成原因主要包括: 1) 长期高强度的开发利用, 加上风蚀、水蚀等侵害, 导致黑土层厚度和有机质含量逐年下降, 如分布在丘陵漫岗区的薄层黑土、暗棕壤等^[2-4]; 2) 自然成土过程中形成的土壤, 如白浆土黑土层薄, 一般 20 cm 左右, 黑土层下面有坚硬的障碍土层, 耕层厚度薄、单位面积养分库容低^[5-6]; 3) 不合理的耕作方式使原本黑土层深厚的土壤耕层变得越来越薄, 犁底层越来越硬, 越来越厚^[7-8], 制约着耕地潜能发挥。

针对白浆土耕层培肥研究较多, 这些研究表明秸秆、功能肥料等耕层培肥可以提高土壤肥力水平、改善生态环境^[9-10], 但无法消除障碍土层、增加耕作层厚度。心土培肥技术是以白浆土为目标土壤, 针对黑土层薄、心土层坚硬、养分贫瘠的问题而诞生的技术, 主要目标是

改良心土(在白浆土中指白浆层)。心土指心土层土壤, 是由物质的淋溶、迁移、淀积或就地富集在土壤表层之下而形成的具有诊断意义的土层。心土层又称亚表层, 介于表土层和底土层之间, 由承受表土淋溶下来的物质而形成, 通常是指表土层以下至 50 cm 深度的土层, 包括发生层中的 B 层(如黏化层)和 E 层(漂白层)。在土壤遭受剥蚀的情况下, 可以暴露于地表。因为物质会发生移动和淀积, 所以表土层和心土层最能反映出土壤形成过程的特点^[11]。早耕土壤心土层一般保持着开垦种植前自然土壤淀积层的形态和性状, 耕种引起的变化小。心土层也是作物根系分布的空间环境, 心土层环境及状态对作物根系生长以及植物的生长发育有着直接的影响。

鉴于心土层在土壤形成过程中的重要地位以及对作物生长影响, 本文基于团队多年来研究成果以及发表的文献资料, 对心土改良培肥技术进行归纳梳理, 明确心土培肥技术的研究、应用现状及未来发展趋势, 以期在黑土地保护利用、耕地地力提升、粮食单产提高提供科技支撑和广泛的借鉴作用。

1 心土培肥技术的形成与发展

心土培肥技术是基于白浆土障碍消减研究过程中逐渐形成的改土技术, 是在白浆土心土混层改土技术的基础上进一步发展形成的, 是一种集改良白浆层物理性质

收稿日期: 2024-10-18 修订日期: 2025-06-18

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFD1500800)

作者简介: 王秋菊, 博士, 研究员, 研究方向为土壤改良与障碍消减。

Email: bqjwang@126.com

和化学性质于一体的综合改土技术。白浆土是中国黑土区典型低产障碍土壤,其土壤剖面层次自上而下分别为黑土层、白浆层、淀积层和母质层 4 层。图 1 显示上面 3 层,白浆土黑土层厚度一般 18~25 cm,不足典型黑土的 1/2;其下为贫瘠的白浆层,是影响作物根系生长的障碍土层,厚度 20~40 cm,有机质含量一般不足 1%,白浆层硬度为 25~50 kg/cm²,容重超过 1.50 g/cm³,作物根系无法下扎,影响作物生长;通气透水性差,基本不透气不透水,土壤易涝易旱;0~50 cm 土壤总养分储量为黑土的 1/2~1/3,正常年份作物产量比邻近黑土低 10%~20%,旱涝年份减产更明显,甚至绝产^[12]。白浆土是黑土区主要耕地土壤,分布在黑龙江和吉林两省,总面积为 527.2×10⁴ hm²^[5],耕地面积超过 266.67×10⁴ hm²。

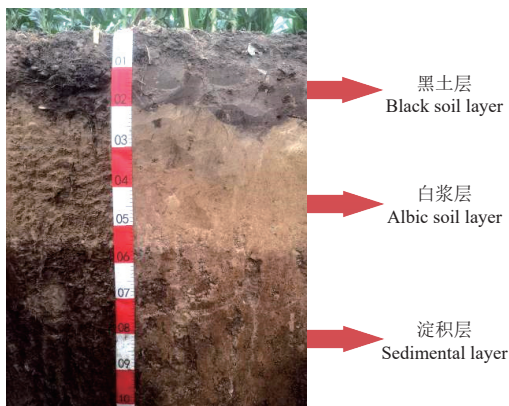


图 1 白浆土剖面
Fig.1 Profile of albic soil

中国早在半个世纪之前就开展了绿肥改良白浆土试验,张之一等^[13]认为多年生牧草根系残留量大,特别是豆科牧草根系穿透性强,改土效果明显。20 世纪 70 年代,中国科学家相继开展深松、深翻改良白浆土研究,结果表明深松后效短,需连年作业,增产效果不明显,深翻导致白浆层混入表层,当年减产 10%~20%^[14-15]。赵德林等^[16-17]在发现土体构型与土壤改良治理存在密切关系后,根据白浆土机械组成“二层性”特点,提出改造白浆土土体构型的改土思路,并采用大型深犁犁打破白浆层,第一年增产 14%~16%、第二年增产 8%~14%,后效 2 年以上;刘峰等^[18]在进一步明确混层改土效果基础上,研制出三段式心土混层犁,由于白浆层和淀积层混层率增加到 70%,增产效果提高到 10%~28%,改土后效增加到 4 年以上,并定名为心土混层技术,并逐渐完善^[19-20]。

鉴于心土混层仅仅是改良了心土层不良的物理性质,并未给土壤增加任何新的营养物质,为进一步提高改土效果,刘峰等^[18]通过研究心土培肥的增产效果,初步明确心土培肥比心土混层增产 7.3%~10.3%,MENG 等^[21-22]研究表明心土混层添加秸秆可以提高心土层有机碳,说明心土层添加物料对土壤化学特性有影响,由此奠定了心土培肥技术的研究基础。之后匡恩俊等^[23-24]通过系列研究明确了心土培肥的改土增产机理及应用效果,至此逐步形成了白浆土心土培肥的理论和应用技术;GONG 等^[25]明确了心土层培肥对土壤生物特性的影响,验证了

心土培肥技术效果。王秋菊等^[26-27]根据心土培肥改土机理研发出心土培肥专用改土样机,为实施大面积机械化改良白浆土提供可靠的技术载体,在“十四五”期间对心土培肥机械进行全面改造升级,形成了可以批量化生产的定型产品,实现了农机农艺的高度融合,有力地推动了心土培肥技术的大面积推广,为彻底改造白浆土、消除白浆土障碍开辟了一条途径。目前,此技术逐渐延伸到黑土区其他类型的瘠薄黑土,在薄层黑土、黑钙土、暗棕壤等土壤应用过程中也取得很好效果。

2 心土培肥机械及应用技术

心土培肥机械是在心土培肥技术的引领下研发的专用机械,是集耕作改土、深层改良培肥于一体的土壤障碍消减机械,属于改土机械范畴。机械结构如图 2 所示,主要由牵引点、犁架、地轮、施肥箱表土犁、心土犁组和排肥装置等部件组成^[27]。机械作业时一次性实现翻耕黑土层、破碎心土层,以及将改土物料投放到心土层等多种功能,实现消除心土层物理障碍和化学障碍多重目标。

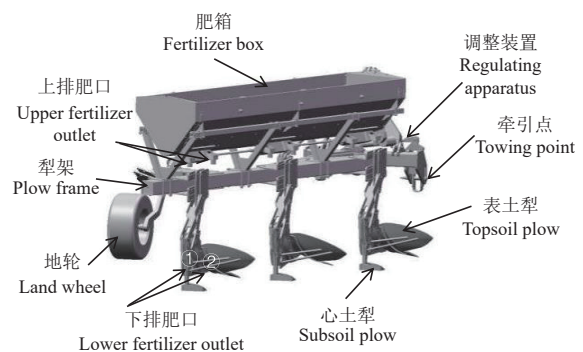


图 2 心土培肥机械
Fig.2 Subsoil fertilizer machine

心土培肥机械单犁幅宽 45 cm,总作业幅宽 135 cm,总耕深为 40~50 cm;作业阻力 5.5~6.0 t,需要动力为 180~200 马力(功率 132~147 kW)的轮式拖拉机;作业速度 5~7 km/h、作业效率 0.6~1.0 hm²/h;最大施肥量 2 000 kg/hm²,双层施肥,深度达到 30~35 cm。改土作业时,表土犁翻耕地表 0~25 cm 黑土层土壤,露出下面的白浆层,其后面的心土犁再向下耕作 15~20 cm,起到破碎白浆层的作用;同时,施肥箱中的改土物料通过链接上、下排肥口的排肥管从上下 2 个下排肥口排到表土犁下 10~15 cm 土层内,起到培肥心土的作用^[28]。改土作业前,首先要根据障碍层位置调整地轮,确保白浆层不被翻到地表,其次根据需要调整培肥物料的用量,第三要调整心土犁深度,确保心土犁作业深度能够破碎白浆层的作业要求。

图 3 是普通铧式犁和心土培肥机械作业后地表状态。从图 3a 中看出,铧式犁翻耕深度为 28~30 cm,翻耕后犁沟内露出白浆层,在机械摩擦下白浆层变得光亮、紧实、平滑,形成不透水层,还有部分白浆层被翻耕到地表,导致表层土壤理化性质进一步劣化。心土培肥机械表土犁作业深度为 0~25 cm,心土犁作业深度为 25~45 cm,作业后耕层内未见白浆层混入,犁沟内白浆层被

打破，达到蓬松的状态，改土物料散布到蓬松的白浆层中，这样即确保了耕层土壤肥沃，又能破碎白浆层并培肥白浆层，消除坚硬土层，增加耕层厚度及肥沃度，创造适合作物根系生长的空间环境。



图 3 机械作业及作业后土壤效果
Fig.3 Mechanical operation and its effect on soil after operation

3 心土培肥技术对土壤理化性质及作物生长的影响

3.1 心土培肥技术改善土壤物理性质效果明显

3.1.1 心土培肥可以降低土壤硬度

白浆土改土前 25~50 cm 土层土壤硬度为 35~42.5 kg/cm²，远超过作物根系正常伸展的硬度指标；改土后硬度降低到 6.5~20 kg/cm²（表 1），其中 25~45 cm 土层降低到 10 kg/cm² 以下 [12,23]。由于心土培肥改土技术是在心土混层基础上发展而来的，因此在改良土壤硬度效果方面有共同之处，但是与深松改土等技术有本质区别，心土培肥可以降低土壤硬度，彻底消除白浆层的硬度障碍，深松因破碎面小，且存在间隔，未能达到全面消除土壤硬度障碍的效果（图 4） [12,23]。

表 1 心土培肥技术的应用对土壤物理性质的影响 Table 1 Effects of subsoil fertilization technology application on soil physical properties			
土层 Soil layer/cm	物理指标 Physical index	应用前 Before application	技术应用后 After application
25~50	土壤硬度/(kg·cm ⁻²)	35~42.5	6.5~20
20~40	土壤固相/%	62.33~62.50	56.19~58.23
20~40	土壤孔隙度/%	37.50~37.67	41.77~43.80
25~50	土层容重/(g·cm ⁻³)	1.49~1.55	1.32~1.37
25~50	土壤通气系数/(10 ⁻⁵ cm·s ⁻¹)	0.16~0.87	1.43~8.98
25~50	土层透水系数/(10 ⁻⁵ cm·s ⁻¹)	0.05~0.74	2.21~6.56

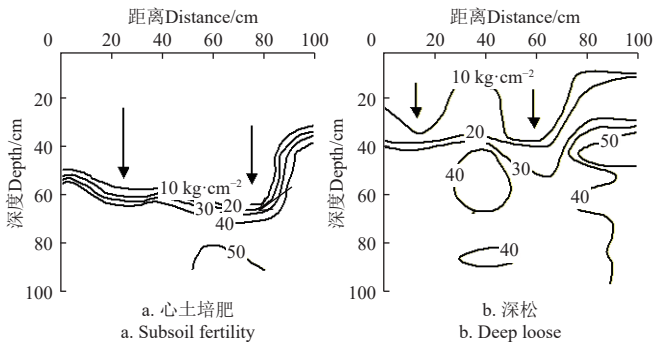


图 4 土壤硬度等值线
Fig.4 Soil hardness contour map

3.1.2 心土培肥可以改善土壤孔隙组成

心土培肥可以降低土壤固相比例、增加土壤液相和气相率，土壤液相和气相代表土壤孔隙。土壤固相率的大小反映了土壤的紧实程度，影响土壤的透水性能 [29]，

对于多数旱作土壤来说，适宜的三相比为：土壤固相率 40%~50%、土壤液相率 25%~30%、土壤气相率为 15%~25%。气相率低于 8% 会妨碍土壤通气而抑制植物根系生长和好气微生物的活动 [30]。白浆土实施心土培肥技术后 20~30 cm 土层固相率比常规翻耕作业降低 5.31%，液相率增加 0.76%，气相率增加 4.54%；30~40 cm 层次固相率心土培肥比常规翻耕作业降低 2.10%，液相率降低 0.58%，气相率提高 2.69%，液相率变化小（图 5）。在瘠薄黑土上心土培肥技术可使土壤总孔隙度和有效孔隙度提高，直径 0.05~0.000 2 mm 的土壤有效孔隙增加比率达到 5.4%~82.0% [31]。

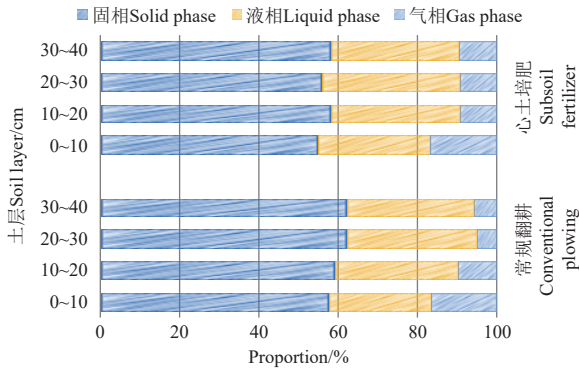


图 5 土壤三相比例
Fig.5 Three phase proportion of soil

3.1.3 心土培肥可以降低土壤容重和土壤抗剪强度

心土培肥可以使白浆层容重降低 0.16~0.17 g/cm³，随着心土培肥技术的逐渐完善，该技术被引入到各类瘠薄土壤上开展研究，在碳酸盐黑钙土上土壤容重可降低 0.08~0.13 g/cm³，在瘠薄黑土上可降低容重 0.05~0.09 g/cm³ [32]；但深松效果不如心土培肥效果好。碳酸盐草甸黑钙土 > 10~30 cm 土层土壤抗剪强度比常规翻耕降低 6.65~12.16 kPa；黑土比常规翻耕降低 8.20~11.31 kPa [32]。

3.1.4 心土培肥提高土壤通透性效果明显

与常规翻耕相比，心土培肥技术在白浆土上可使 20~50 cm 土层土壤通气系数提高 8.93~10.32 倍，饱和导水率提高 8.86~44.2 倍。在碳酸盐黑钙土和薄层黑土上均提高了 10~30 cm 土层土壤通气系数和饱和导水率，

在碳酸盐黑钙土上第 1 年和第 2 年 10~30 cm 土层通气系数平均比常规翻耕提高 2.22 和 4.17 倍, 饱和导水率第 1 年和第 2 年分别比常规翻耕提高 7.93 和 11.62 倍。在薄层黑土上土壤通气性是常规翻耕的 14.28 倍和 2.78 倍; 饱和导水率是常规翻耕的 6.86 和 2.38 倍^[32]。

3.1.5 心土培肥可以提高下层土水分消耗比例

前人研究表明, 心土培肥地块深层土壤蓄水能力要高于常规的深松耕作。在作物生育期间, 心土培肥与深松作业土壤整体耗水量差异不大, 但不同机械作业方式, 不同土层间耗水量差异较大, 心土培肥机械作业后 0~30 cm 土层土壤耗水量降低, 表层水分损失降低 (表 2), 30~60 cm 土层土壤水分消耗较多, 充分发挥了深层土壤供水能力; 心土培肥增加了 0~30、30~60 cm 全土层土壤储水量 (表 3)^[31-34], 提升了土壤蓄水保墒能力, 尤其土壤速效水总量增加, 可供植物吸收利用的水分增多, 能够满足植物在生长过程中对水分的需求, 有利于减缓土壤旱涝问题给作物生长带来的威胁。

表 2 不同处理土壤耗水量			
Table 2 Soil water consumption of different treat mm			
作业方式 Operation method	土层 Soil layer/cm		
	0~30	>30~60	0~60
常规翻耕 Conventioanal plowing	38.65	11.23	49.88
心土培肥 Subsoil fertilizer	29.89	18.69	48.58
参考文献 References	[31-34]	[31-34]	[31-34]

表 3 不同处理土壤储水量				
Table 3 Soil water storage of different treat mm				
作业方式 Operation method		土层 Soil layer/cm		
		0~30	>30~60	0~60
常规翻耕 Conventioanal plowing	速效水	18.54±1.34	12.63±1.02	31.17±2.12
	迟效水	3.26±0.23	1.78±0.17	5.04±0.34
	总计	21.8±1.57	14.41±1.19	36.21±2.46
心土培肥 Subsoil fertilizer	速效水	26.56±1.76	20.35±1.54	46.91±3.23
	迟效水	2.67±0.33	4.89±0.45	7.56±0.88
	总计	29.23±2.09	25.24±1.99	54.47±4.11
参考文献 References		[31-34]	[31-34]	[31-34]

3.2 心土培肥技术可以改善土壤化学性质

心土培肥技术是在改良心土层物理性质的同时, 向心土层投入相应的改土物料, 可以改善土壤的化学性质 (表 4)。目前白浆土心土培肥物料主要包括磷肥、碳酸钙、以及白浆层专用改良剂等, 施用不同的培肥物料, 对土壤的化学性质影响不同。

白浆土施用碳酸钙主要目的是调节土壤 pH 值, 降低 Ca/Mg 比值; 而施用磷肥是提高白浆土的心土肥力。在白浆土上开展心土培肥, 施用 4 800 kg/hm² 碳酸钙, 交换性钙增加 1.3 倍, 电导率增加 1 倍, 土壤 pH 值增加 0.7; 钙肥和磷肥同时施用, 土壤有效磷含量低于单独施用磷肥的土壤, 是因为土壤中过量的钙增加了土壤吸附磷的能力, 从而在一定程度上降低磷有效性, 土壤质地越黏重, 对磷的吸附能力越强^[21,29]。在纯磷量一致条件下, 含磷量高的磷酸一铵和重过磷酸钙效果好于磷矿

粉, 可能原因是磷酸一铵和重过磷酸钙中含有有利于作物吸收的易溶性磷含量高, 心土培肥技术的效果受改土物料的影响^[34]。

表 4 心土培肥技术的应用对土壤化学性质的影响
Table 4 Effects of subsoil fertilization technology application on soil chemical properties

化学指标 Chemical index	应用前 Before application	技术应用后 Aefore application	参考文献 References
全磷 Total phosphorus/(g·kg ⁻¹)	1.0	1.0	[24]
有效磷 Available phosphorus/(mg·kg ⁻¹)	10	110	[24]
电导率 Electrical conductivity /(mS·cm ⁻¹)	49.1	91.7	[24]
pH 值 pH value	6.1	6.8	[24]
交换性钙 Exchangeable calcium /(g·kg ⁻¹)	2.56	3.34	[24]

3.3 心土培肥技术显著促进作物生长发育

白浆土上实施心土培肥作业后, 可以打破坚硬土层, 消除白浆层障碍, 有利于作物根系下扎。刘峰等^[21]采用宽 40 cm×深 40 cm×厚 5 cm 的原状土采样器采取植株下原状土, 调查大豆、玉米的根系分布表明, 心土培肥后大豆主根可以下扎到白浆层中, 而对照仅在 20 cm 黑土层内; 玉米根系调查结果显示, 实施心土培肥技术的玉米根系分布在植株 40 cm 左右、土深 30 cm 以下空间内, 在土深 30 cm 土层下仍有大量根系分布; 而常规作业玉米根系分布空间小, 根系集中分布在植株两侧 10 cm、深 15 cm 土层内, 在 30 cm 土层中无根系, 说明心土培肥技术促进根系向纵向伸长。姚春雨^[31]研究得出, 心土培肥技术对黑土上作物生长有显著影响, 与常规耕作相比, 大豆叶绿素含量可以提高 3.7%, 植物干质量提高 28.6%, 蛋白质含量提高 3.5%。

3.4 心土培肥技术对作物产量的影响

心土培肥技术能够改善作物产量, 如表 5 所示。心土层肥力差异对作物产量有不同影响, 心土层肥力提高可以增加作物产量^[35]。心土培肥技术不仅可以在当年增加作物产量, 而且具有多年的持续后效。在不同土壤和作物上, 增产效果也存在一定差异。白浆土一次性心土培肥作业, 连续 4a 均有增产效果, 在正常的大田轮作模式下, 第 1 年高粱增产 18.3%, 第 2 年和第 3 年大豆分别增产 26.4% 和 21.6%, 第 4 年玉米增产 17.4%^[18]。在嫩江地区瘠薄黑土上 2 a 平均大豆产量比常规翻耕增产 29.5%, 依安地区的瘠薄土壤上大豆增产 18.44%, 玉米增产 9.13%^[31]。心土培肥技术在大豆上的增产幅度要高于玉米和高粱^[18,31]。心土培肥技术在不同土壤上增产效果有差异, 土壤越贫瘠, 增产幅度越大, 土壤越肥沃持续增产效果越好^[32]。在白浆土上增产幅度 17.4%~26.4%, 碳酸盐黑钙土上增产幅度为 6.82%~18.01%, 黑土增产幅度为 6.45%~11.18%。

3.5 心土培肥注意事项

第一, 心土培肥适合黑土层薄、心土层肥力低且坚硬的土壤。心土层肥力越低, 心土培肥效果越好, 但心土培肥并不是培肥量越多越好, 是有一定的阈值^[36]。以

供磷强度为参考指标，通过心土层不同肥力研究得出，心土层供磷强度与作物产量关系符合非线性函数 Boltzmann 拟合的模型（图 6），随土壤供磷强度增加作物产量呈显著增加趋势，但只在一定的区间范围，即有效磷素含量不超过土壤总磷素总量 20%，即心土层土壤供磷强度不超过 20%，才能发挥心土层效果，超过这一阈值，作物产量不再增加，施用过多的磷对作物产量没有提高，产投比失衡，此研究可为心土培肥量与土壤肥力间建立联系提供科学依据。

表 5 心土培肥技术的应用对作物产量的影响

Table 5 Effect of subsoil fertilization technology application on crop yield kg/ hm²

作物 Crop	应用前 Before application	应用后 After application	参考文献 References
高粱 Sorghum	6 425.0	7 600.8	[18,31]
大豆 Soybean	2 126.0~2 305.0	2 585.2~2 913.5	[18,31]
玉米 Corn	6 113.0~11 056.5	7 176.7~12 652.5	[18,31]

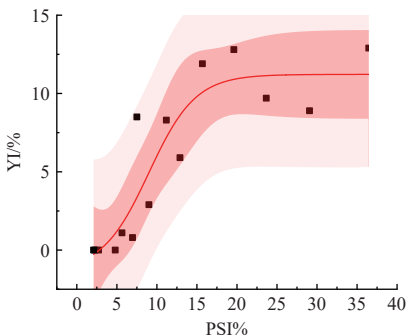


图 6 土壤供磷强度与作物增产关系

Fig.6 Relationship between soil phosphorus supply intensity (PSI) and crop yield (YI)

第二，心土培肥改土物料施用深度适合施在距离地表 20~40 cm 土层之间。通过设置不同黑土层厚度模拟试验研究得出，大豆产量随着土层厚度的增加而增加，符合回归方程 $y=18.863\ln(x)+73.609$ ，相关性极显著 ($R^2=0.992$)，采用内插法将土层按每 10 cm 为单位划分，计算各土层对大豆产量的贡献率，发现心土层对大豆产量的贡献率随着土层位置降低而降低，当土层位置

在 20~40 cm 时，贡献率达到 10% 以上，当土层位置在 40~50 cm 时，贡献率接近 5%，当土层位置在 50 cm 以下时，贡献率为 1%，心土深度在 40 cm 以内时增产效果明显，深度超过 40 cm 大豆增产不明显^[37]。通过研究确定土壤肥沃土层控制在 40 cm 左右，能够满足作物生长，证明在此范围内，肥料的利用率最高，也是改土物料最佳施用位置。

第三，心土培肥技术实施一次，有效周期 4~5 a。心土培肥技术是一项土壤改良技术，也属于土壤障碍消减工程，具有改土工程的特点，一次作业可以持续后效几年，受不同土壤质地及田间扰动等多方面因素影响，在白浆土上，心土培肥作业一次，之后每年正常耕作的情况下，后效可以持续 4 年以上。按照相对产量拟合模型，符合线性关系，心土培肥周期到 4 年后产量与对照持平（图 7）。由此可以确定心土培肥技术实施一般 4~5 a 为一个周期，每 4~5 a 后要再次实施该技术以保证土壤继续得到改善和作物产量的提升。

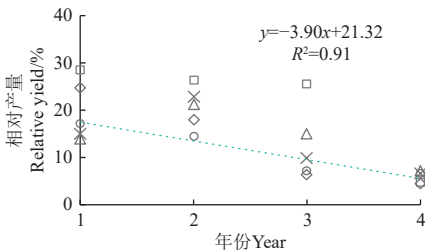


图 7 心土培肥实施后 1~4 a 作物相对产量

Fig.7 Crop relative yield after 1-4 a of subsoil fertility

3.6 心土培肥技术投入产出分析

心土培肥技术与常规耕作不同，它是一种土壤改良工程，一次性改土投入大，但效果可观，并持续增效。表 6 展示了不同农场大面积示范地块实施心土培肥技术的产投比，从表中可以看出，实施心土培肥作业一次性投入机械作业及改土物料费为 2 325~2 550 元/hm²，按 5 a 分摊平均为 465~510 元/a，根据增加的作物产量计算，可增加经济效益 2 025~3 015 元/hm²，投入产出比为 1:3~1:5，每年会根据相关费用的变化发生变化。

表 6 心土培肥技术投入产出

Table 6 Input and output of subsoil fertilizer technology

地点 Location	技术 Technology	增加投入 Increased input/ (元·hm ⁻²)	折合年均费用 Converted to annual average cost/元	产量 Yield/ (kg·hm ⁻²)	收入 Input/ (元·hm ⁻²)	增收 Increased input/ (元·hm ⁻²)	净收益 Net profit/ (元·hm ⁻²)	投入产出比 Input-output ratio	后效时间 After effect/a
曙光农场 Shuguang farm	心土培肥	2 325	465	2 587.5 (大豆)	15 525	2 025	1 560	1:3	5
	常规翻耕	—	—	2 250.0 (大豆)	13 500	—	—	—	—
850 农场 850 farm	心土培肥	2 550	510	12 652.5 (玉米)	21 509	2 713.2	2 203	1:4	5
	常规翻耕	—	—	11 056.5 (玉米)	1 8 796	—	—	—	—
852 农场 852 farm	心土培肥	2 400	480	2 514 (大豆)	15 084	3 015	2 535	1:5	5
	常规翻耕	—	—	2 011.5 (大豆)	12 069	—	—	—	—

注：大豆单价按照 6 元·kg⁻¹，玉米单价按照 1.7 元·kg⁻¹ 计算。
Note: The unit price of soybean is calculated at 6 Yuan·kg⁻¹, and the unit price of corn is calculated at 1.7 Yuan·kg⁻¹.

4 心土培肥技术的完善与发展趋势

1) 注重心土培肥技术应用的灵活性

在不同区域随着开垦年限的增加，不同的种植管理方式使同类土壤向着不同问题方向演变，如在农垦系统，

由于机械化程度高，通过大马力机械作业，耕层厚度由原来的 20~22 cm 增加到现在的 27~30 cm^[38]，在白浆土上白浆层会混到耕层，耕层厚度增加但耕层土壤肥力降低会导致作物减产，需要培肥耕作层，增加耕层土壤肥沃度^[39]，而地方村屯多年来一直采用小机械作业，耕

整地深度一般不足 20 cm, 黑土层薄, 为了保障技术的最大效应, 要适当调整表层犁和心土犁的作业深度, 既要消除障碍, 又能避免瘠薄白浆层混入到耕层, 保证作物产量提高。

2) 加强心土培肥技术应用的广适性

心土培肥技术适合瘠薄型的土壤, 2023 年和 2024 年心土培肥技术被农业农村部列为农业主推技术, 该技术在黑土区得到应用, 但随着技术的推广, 还有很多方面需要不断的完善。如在不同区域, 心土培肥物料的施用种类及用量要基于心土层土壤特性, 要考虑土壤的紧实、酸化、碱化、有机质低、缺素等问题, 还要考虑心土培肥技术培肥物料选择、用量、培肥后效的长短等, CHEN 等^[40]开展了肥料、秸秆、生物炭不同物料在白浆土上心土培肥对土壤耕性研究, 使心土培肥技术不断得到延伸和扩展, 应用范围越来越广泛。

3) 提升心土培肥机械高效稳定性

心土培肥机械自样机研发到目前大面积应用, 已历经十几年的不断换代升级, 目前虽然效果稳定, 但作业效率还有待进一步提升, 才能进一步节约成本, 例如将犁铧设计成翻转式, 实现其心土培肥的功能; 寻求适当方法使排肥部件更符合作业要求^[41], 还需考虑不同土壤改良材料与机械匹配的问题、土壤剖面与水文特征等。闫景凤等^[42]在机械改良白浆土效能上分析了心土培肥机械的特点及未来向精准、智能、多功能集约和绿色方向发展, 指出这些方向还需要科研工作者不断的探索与实践。

4) 建立以心土培肥技术为核心的综合技术体系

以往在各类土壤改良、地力提升的研究过程中, 专家学者们针对某一领域都取得了一些单项的技术突破, 对改良土壤、提高作物产量起到了一定的效果, 但土壤的问题很多是综合性的, 心土培肥技术应用重心也要由单项技术走向综合技术体系, 不仅要注重技术本身的农机-农技-产品的结合与调整, 也要注重与其他单项技术的结合, 如白浆土不仅有白浆层障碍, 且易涝易旱, 有机质含量低, 可以建立黑土层培肥+心土改良+蓄水排涝相结合的技术体系, 解决土壤的综合问题, 形成综合改土培肥效应, 针对丘陵漫岗区易发生水土流失、有机质含量降低出现破皮黄现象, 可以建立心土培肥技术+暗渠截流+有机培肥技术体系。

5 结 论

本研究对白浆土心土培肥技术发展进程和现状进行综述, 结论如下:

1) 白浆土心土培肥技术是一项机械改土工程, 是土层障碍综合消减技术, 能够同时改善土壤不良物理和化学性质。

2) 改土持续后效长, 一次性改土持续后效在 4~5 a 以上, 年均增产幅度在 15% 以上, 豆科植物增产幅度高于禾本科植物。

3) 心土培肥技术实施专用配套机械符合生产需求, 保证技术的大面积推广与应用, 技术实施成本 150 元左右, 5 a 增效, 投入产出比约为 1:4。

4) 心土培肥技术具有广适性, 适合所有的腐殖质层薄、有坚硬土层障碍的土壤, 以及比较贫瘠的土壤, 可以与其他单项技术结合成集成技术体系, 产生叠加效应。

[参 考 文 献]

- [1] 杜国明, 梁常安, 张树文, 等. 黑土地保护的对象特性、面临形势与应对策略[J]. 资源科学, 2023, 45(5): 887-899. DU Guoming, LIANG Changan, ZHANG Shuwen, et al. The object characteristics, facing situations and countermeasures of black soil protection[J]. Resources Science, 2023, 45(5): 887-899. (in Chinese with English abstract)
- [2] 田芷源, 卢慧中, 马瑞, 等. 东北黑土区耕地侵蚀退化空间分异特征[J/OL]. 土壤学报, 2025, [2025-07-01] <https://link.cnki.net/urlid/32.1119.P.20241022.1655.002>. TIAN Zhiyuan, LU Huizhong, MA Rui, et al. Spatial differentiation characteristics of soil erosion and degradation in black soil cropland of Northeast China[J/OL]. Acta Pedologica Sinica, 2025, [2025-07-01] <https://link.cnki.net/urlid/32.1119.P.20241022.1655.002>. (in Chinese with English abstract)
- [3] 邓小明, 张佳宝, 张辉, 等. 中国黑土地保护与利用科技创新战略研究[M]. 北京: 科学出版社, 2024.
- [4] 张兴义, 胡伟, 李建业, 等. 水土流失防控是黑土地保护的重点[J]. 科学通报, 2024, 69(11): 1401-1405. ZHANG Xingyi, HU Wei, LI Jianye, et al. Control of soil and water losses is the critical issue for black earth conservation[J]. Chinese Science Bulletin, 2024, 69(11): 1401-1405. (in Chinese with English abstract)
- [5] 中国科学院林业土壤研究所. 中国东北土壤[M]. 北京: 科学出版社, 1980.
- [6] 黑龙江省土地管理局, 黑龙江省土壤普查办公室. 黑龙江土壤[M]. 北京: 农业出版社, 1992.
- [7] 汪景宽, 徐香茹, 裴久渤, 等. 东北黑土地地区耕地质量现状与面临的机遇和挑战[J]. 土壤通报, 2021, 52(3): 695-701. WANG Jingkuan, XU Xiangru, PEI Jiubo, et al. Current situations of black soil quality and facing opportunities and challenges in Northeast China[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2021, 52(3): 695-701. (in Chinese with English abstract)
- [8] 韩晓增, 李娜. 中国东北黑土地研究进展与展望[J]. 地理科学, 2018, 38(7): 1032-1041. HAN Xiaozeng, LI Na. Research progress of black soil in Northeast China[J]. Scientia Geographica Sinica, 2018, 38(7): 1032-1041. (in Chinese with English abstract)
- [9] MA X Z, ZHAO Y, ZHENG Y, et al. Effect of different fertilization on soil fertility, biological activity, and maize yield in the albic soil area of China[J]. Plants, 2025, 14(5): 810.
- [10] PAN X, YU H J, ZHANG B, et al. Effects of organic fertilizer replacement on the microbial community structure in the rhizosphere soil of soybeans in albic soil[J]. Scientific Reports, 2025, 15(1): 12271.
- [11] 周健民, 沈仁芳. 土壤学大辞典[M]. 北京: 科学出版社, 2015: 35.
- [12] 刘峰. 心土混层改良白浆土研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2000. LIU Feng. Study on subsoil mixing for the improvement of albic soil [D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2000. (in Chinese with English abstract)
- [13] 张之一, CAMERON D. 利用牧草改良白浆土[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1996: 129-137.
- [14] 霍云鹏, 刘兴久, 张宏. 白浆土的水分物理性质与白浆土的改良[J]. 东北农学院学报, 1983(3): 69-75.

- HUO Yunpeng, LIU Xingjiu, ZHANG Hong, et al. Discussion on the problem of Baijiang soil improvement based on the study of its physical property of moisture [J]. Journal of Northeast Agricultural College, 1983(3): 69-75. (in Chinese with English abstract)
- [15] 周学谦, 杜齐鸣. 白浆土改良试验研究[J]. 土壤, 1983(3): 101-105.
- [16] 赵德林, 洪福玉. 三江平原主要土壤土体构造特点与治理途径的探讨[J]. 中国农业科学, 1983(1): 54-61.
ZHAO Delin, HONG Fuyu. Investigation on the charcters of soil constitution of the major soils in the Sanjiang plain, Heilongjiang province, and the way for soil conservation[J]. Scientia Agricultura Sinica, 1983(1): 54-61. (in Chinese with English abstract)
- [17] 赵德林, 刘丰, 洪福玉, 等. 白浆土土体构型改造的研究[J]. 中国农业科学, 1989, 22(5): 47-55.
ZHAO Delin, LIU Feng, HONG Fuyu, et al. Studies on transforming constitution of plansol solum[J]. Scientia Agricultura Sinica, 1989, 22(5): 47-55. (in Chinese with English abstract)
- [18] 刘峰, 赵德林, 贾会彬, 等. 白浆土混层改良的效果[J]. 黑龙江农业科学, 1992, (5): 7-11.
- [19] 刘峰, 张玉龙, 贾会彬, 等. 三段式心土混层犁及其改良白浆土效果的研究[J]. 农业工程学报, 2001, 17(3): 57-61.
LIU Feng, ZHANG Yulong, JIA Huibin, et al. Three-stage subsoil mixing plough and its improvement of planosol[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(Transactions of the CSAE), 2001, 17(3): 57-61. (in Chinese with English abstract)
- [20] 朱宝国, 张春峰, 贾会彬, 等. 秸秆心土混合犁改良白浆土效果[J]. 农业工程学报, 2017, 33(15): 57-63.
ZHU Baoguo, ZHANG Chunfeng, JIA Huibin, et al. Improvement effect of straw core soil mixed plow on white soil[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(Transactions of the CSAE), 2017, 33(15): 57-63. (in Chinese with English abstract)
- [21] 刘峰, 贾会彬, 赵德林, 等. 白浆土心土培肥效果的研究[J]. 黑龙江农业科学, 1997(3): 1-4.
LIU Feng, JIA Huibin, ZHAO Delin, et al. Effect of Subsoil-fertilizing of lessive soil[J]. Heilongjiang Agricultural Science, 1997(3): 1-4. (in Chinese with English abstract)
- [22] MENG Q Y, ZOU H T, ZHANG C F, et al. Soil mixing with organic matter amendment improves Albic soil physicochemical properties and crop yield in Heilongjiang province, China[J]. PloS one, 2020, 15(10): e0239788-e0239788.
- [23] 匡恩俊, 刘峰, 贾会彬, 等. 心土培肥改良白浆土的研究 I 白浆土心土培肥的效果[J]. 土壤通报, 2008, 39(5): 1106-1109.
KUANG Enjun, LIU Feng, JIA Huibin, et al. Study on subsoil amendment of Baijiang soil[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2008, 39(5): 1106-1109. (in Chinese with English abstract)
- [24] 匡恩俊, 刘峰, 高中超, 等. 心土培肥改良白浆土的研究 II 心土对作物产量的贡献及磷、钙培肥心土的效果[J]. 土壤通报, 2011, 42(4): 953-957.
KUANG Enjun, LIU Feng, GAO Zhongchao, et al. Research on subsoil fertilization of albic luvisol improvement II the contrbution of subsoil on the crop yield and effect of subsoil fertilization with P and Ca[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2011, 42(4): 953-957. (in Chinese with English abstract)
- [25] GONG X J, YU Y, LV G Y, et al. Construction and effect analysis of a mixed actinomycete flora for straw returning to albic soil in Northeast China[J]. Microorganisms, 2025, 2(13): 385.
- [26] 王秋菊, 赵慧研, 高中超, 等. 一种心土培肥耕作机械: ZL 201520589429.9[P].
- [27] 张海滨, 王秋菊, 陈爱慧, 等. 一种组合式犁地、犁地机及犁地培肥方法: ZL 202310148566.8[P].
- [28] 齐忠军, 张海滨, 王秋菊, 等. 白浆层培肥机的研制与试验研究[J]. 农机化研究, 2025, [2025-09-01] <https://link.cnki.net/urlid/23.1233.S.20250617.1025.004>
QI Zhongjun, ZHANG Haibin, WANG Qiuju, et al. Development and experimental study of white slurry layer fertilizer cultivating machine[J]. Journal of Agricultural Mechanization research, 2025,[2025-09-01] <https://link.cnki.net/urlid/23.1233.S.20250617.1025.004>(in Chinese with English abstract)
- [29] 匡恩俊. 心土培肥改良白浆土效果及机理研究[D]. 大庆: 黑龙江八一农垦大学, 2008.
KUANG Enjun. Study on the Effect and Mechanism of Subsoil Fertilization in Improving Albic Soil [D]. Daqing: Heilongjiang Bayi Agricultural University, 2008. (in Chinese with English abstract)
- [30] 黄昌勇, 徐建明. 土壤学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [31] 姚春雨. 心土培肥对土壤物理性质及大豆生育产量的影响[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2017.
YAO Chunyu. Effect of Subsoil Fertilization on Soil Physical Properties and Soybean Growth and Yield [D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2017. (in Chinese with English abstract)
- [32] 王秋菊, 高中超, 张劲松, 等. 深耕培肥改良瘠薄黑土理化性质及提高大豆产量的研究[J]. 土壤通报, 2016, 47(6): 1393-1398.
WANG Qiuju, GAO Zhongchao, ZHANG Jinsong, et al. Deep tillage and fertilization improved physichemical characteristics and soybean yield in barren black soil[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2016, 47(6): 1393-1398. (in Chinese with English abstract)
- [33] 刘婷婷, 匡恩俊, 高中超, 等. 白浆土某些物理性质的研究 II. 土壤抗剪强度及脆性[J]. 黑龙江农业科学, 2012(5): 40-43.
LIU Tingting, KUANG Enjun, GAO Zhongchao, et al. Study on physical characteristics of planosol II. soil shear -strength and brittleness[J]. Heilongjiang Agricultural Sciences, 2012(5): 40-43. (in Chinese with English abstract)
- [34] 王秋菊, 米刚, 张劲松, 等. 不同磷物料培肥心土对大豆产量和品质的影响[J]. 大豆科学, 2016, 35(6): 981-985.
WANG Qiuju, MI Gang, ZHANG Jinsong, et al. Different phosphorus fertilizer material subsoil effect on yield and quality of soybean[J]. Soybean Science, 2016, 35(6): 981-985. (in Chinese with English abstract)
- [35] 姚春雨, 王秋菊, 高中超, 等. 心土层肥力差异对大豆生长特性及产量的影响[J]. 大豆科学, 2016, 35(5): 776-781.
YAO Chunyu, WANG Qiuju, GAO Zhongchao, et al. Effects of different subsoil and phosphate fertilizing treatments on growth characteristics and yield of soybean[J]. Soybean Science, 2016, 35(5): 776-781. (in Chinese with English abstract)
- [36] 王秋菊, 刘峰, 高中超, 等. 心土培肥犁改良瘠薄土壤的效果[J]. 农业工程学报, 2016, 32(6): 27-33.
WANG Qiuju, LIU Feng, GAO Zhongchao, et al. Subsoil fertilization plow and its effect on improving barren soil[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(Transactions of the CSAE), 2016, 32(6): 27-33. (in Chinese with English abstract)

- [37] 匡恩俊, 刘峰, 高中超. 黑土层厚度及心土培肥对大豆产量的影响[J]. *大豆科学*, 2012, 31(2): 266-269.
KUANG Enjun, LIU Feng, GAO Zhongchao, et al. Effect of black soil depth and subsoil fertilizing on soybean yield[J]. *Soybean Science*, 2012, 31(2): 266-269. (in Chinese with English abstract)
- [38] 喇乐鹏. 耕作方式与秸秆还田对薄层黑土理化性质和玉米产量的影响[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2021.
LA Yuepeng. Effect of Tillage Methods And Returning Straw on Soil Physicochemical Properties of Thin Black Soil and Maize Yield[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2021. (in Chinese with English abstract)
- [39] 陆欣春, 范欣欣, 邹文秀, 等. 肥沃耕层构建对白浆土土壤肥力和玉米产量的影响[J]. *应用生态学报*, 2023, 34(4): 883-891.
LU Xinchun, FAN Xinxin, ZOU Wenxiu, et al. Effects of the construction of fertile and cultivated soil layer on soil fertility and maize yield in Albic soil[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2023, 34(4): 883-891. (in Chinese with English abstract)
- [40] CHEN A H, WANG Q J, ZHANG H B, et al. Changes in tillage characteristics of albic soil with various soil amendment materials[J]. *Soil Use and Management*, 2024, 40(4): e13152.
- [41] 李晓明, 王秋菊, 张海滨, 等. 白浆层培肥机螺旋排肥器的设计与试验探究[J]. *农机化研究*, 2025, [2025-09-01] <https://link.cnki.net/urlid/23.1233.S.20250730.1151.004>
- LI Xiaoming, WANG Qiuju, ZHANG Haibin, et al. Design and experimental study on spiral fertilizer discharger of white slurry layer fertilizer cultivating machine[J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2025, [2025-09-01] <https://link.cnki.net/urlid/23.1233.S.20250730.1151.004> .(in Chinese with English abstract)
- [42] 闫景凤, 张海滨, 陈爱慧, 等. 机械改土技术在白浆土改良中的应用与发展[J]. *农机化研究*, 2025, 47(11): 275-284.
YAN Jingfeng, ZHANG Haibin, CHEN Aihui, et al. Application and development of mechanical soil improvement technology in albic soil improvement[J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2025, 47(11): 275-284. (in Chinese with English abstract)

Development and application of albic soil subsoil cultivation technology and future trends

WANG Qiuju^{1,2}, ZHANG Haibin¹, ZOU Jiahe¹, LI Jingyang¹, MENG Qingying¹, LIU Xin¹,
CHEN Aihui¹, LIU Jie¹, LIU Feng¹

(1. Heilongjiang Academy of Agricultural Sciences, Harbin 150086, China; 2. Heilongjiang Provincial Key Laboratory of Soil Environment and Plant Nutrition, Harbin 150086, China)

Abstract: Albic soil is a typical problematic soil in the black soil region. Its main constraints include a thin black soil layer, the presence of a hardpan, low nutrient contents in the albic horizon, and a shallow effective plow layer. This leads to a decline in farmland quality, low crop yields, and limits the improvement of farmland productivity. Subsoil fertilization technology has emerged as an effective measure to overcome these limitations. This review systematically summarized the background, technical characteristics, refinement process, implementation methods, and field application outcomes of subsoil fertilization in albic soils. The analysis showed that this technology can: 1) improve the poor physical properties of the albic layer, break through the hardpan layer, reduce soil hardness and the solid phase ratio; regulate soil chemical indicators, enhance soil fertility in the albic layer, and adjust soil pH; create a soil environment suited for crop growth and development, and increase crop yields with continuous effects lasting over five years. 2) When applied, the technology is tailored based on the thickness of the black soil layer and the physical and chemical characteristics of the subsoil layer, with continuous refinement and expanding application scenarios. It proves particularly effective in barren soils with thin black soil layers. Future development trends are also discussed: 1) emphasize the flexibility of subsoil fertilization technology application, determining tillage depth and fertilization position according to the thickness of the black soil or humus layer and the location of obstacle layers; 2) strengthen the adaptability of subsoil fertilization technology, varying the types and amounts of applied materials based on the subsoil's properties in different regions, taking into full consideration issues such as soil compaction, acidification, alkalization, low organic matter, nutrient deficiencies, and combined problems, in order to select appropriate fertilization materials and determine quantities; 3) improve the efficiency and stability of subsoil fertilization machinery, optimize the design of plowshares and related components to boost performance and efficiency, and promote machinery toward precision, intelligence, multifunctional integration, and green development; 4) establish an integrated technology system with subsoil fertilization as the core. The focus of subsoil fertilization technology should shift from a single technique to building a comprehensive technology system, not only emphasizing the integration and adjustment of agricultural machinery, agronomy, and products, but also assembling with other single technologies to enhance overall effectiveness. This technology has broad applicability and promising potential, providing a technical pathway for improving low-yield albic soils, alleviating soil constraints, and enhancing farmland fertility in the black soil region.

Keywords: albic soil; subsoil fertilization; technology development; effect; development trend