

东北黑土区主要土壤障碍层的研究进展与展望^①

于秀春¹, 孙仲秀^{1*}, 姜荧荧², 段斯译¹, 杨顺华³, 王秋兵¹

(1 沈阳农业大学土地与环境学院, 沈阳 110866; 2 沈阳工学院生命工程学院, 沈阳 113122; 3 土壤与农业可持续发展全国重点实验室(中国科学院南京土壤研究所), 南京 211135)

摘要: 东北黑土区是中国重要的商品粮生产基地, 但土壤障碍层严重影响粮食产能和农业可持续发展, 对整个区域的农业生产利用构成潜在威胁。本文系统分析了区域内土壤障碍层类型、特征、形成过程及其带来的农业利用问题, 总结了现阶段土壤障碍层的改良措施, 最后展望了未来研究的重点, 主要包括: 深化对土壤障碍层发育机理、形成和演变过程的理解和理论总结, 为完善中国土壤系统分类提供科学依据, 这在土壤发生学、分类学领域具有深远意义; 结合区域特性, 构建黑土区土壤的定量分类与分区体系, 并提出针对性的改良与分区利用策略, 为建立和完善东北黑土区土壤障碍层的改良措施提供科学依据。

关键词: 东北黑土区; 土壤障碍层; 形成过程; 改良措施

中图分类号: S155.3 文献标志码: A

Research Progress and Prospects on Major Soil Constraint Horizons in Northeast Black Soil Region of China

YU Xiuchun¹, SUN Zhongxiu^{1*}, JIANG Yingying², DUAN Siyi¹, YANG Shunhua³, WANG Qiubing¹

(1 College of Land and Environment, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, China; 2 College of Life Engineering, Shenyang Institute of Technology, Shenyang 113122, China; 3 State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 211135, China)

Abstract: The Northeast black soil region of China is a vital commodity grain production base, yet soil horizons with constraints pose significant challenges to grain productivity and sustainable agricultural development, constituting a potential threat to the entire region's agricultural utilization. We systematically analyzed the types, characteristics, formation processes of soil constraint horizons, and the agricultural utilization issues they posed. Furthermore, we summarized current improvement measures for these soil horizons. Lastly, we outlined future research priorities, which primarily including: deepening the understanding and theoretical summarization of the developmental mechanisms, formation, and evolution processes of soil constraint horizons to provide a scientific basis for improving China's soil system classification, which holds profound significance in the fields of soil genesis and taxonomy; and establishing a quantitative classification and zoning system for soils in the black soil region based on regional characteristics, proposing targeted improvements and zoned utilization strategies to provide a scientific foundation for developing and refining improvement measures for soil constraint horizons in the Northeast black soil region.

Key words: Northeast black soil region; Soil constraint horizons; Formation process; Improvement measures

土壤是农业生产的基础、人类生存不可或缺的自然资源和生物圈的重要构成部分, 对保证人类可持续发展至关重要。中国土壤资源类型丰富, 其中黑土尤为珍贵, 黑土最早是由农民从颜色和地力来辨别的, 现一般是指有黑色或暗黑色腐殖质表土层的土壤。黑

土形成于温带湿润或半湿润气候和草甸植被下, 具有深厚腐殖质层和淀积层, 其 pH 适中, 非常适合农作物种植^[1]。黑土在美国土壤系统分类中, 被称为软土 (Mollisol); 在中国土壤系统分类中, 被归为均腐土 (Isohumosols)^[1-2]。然而, 黑土资源全球稀缺, 主要集

①基金项目: 国家重点研发计划项目(2023YFD1500101), 国家自然科学基金面上项目(42277285)和辽宁省“兴辽英才计划”青年拔尖人才项目(XLYC2203085) 资助。

* 通信作者(zhongxiusun@syau.edu.cn)

作者简介: 于秀春(1999—), 女, 辽宁大连人, 硕士, 主要从事土壤发生与分类研究。E-mail: yxc19991022@163.com

中分布在乌克兰、中国东北等地^[3]。其中,中国东北黑土区被誉为“北大仓”,覆盖面积为 $1.09 \times 10^6 \text{ km}^2$,包括黑龙江、吉林全省以及辽宁北部和内蒙古东部^[4]。黑土区分为广义和狭义(或典型)黑土区^[5]。广义黑土区是指地表覆盖有黑色土层的地域,主要包含黑土、黑钙土、草甸土、白浆土、暗棕壤以及棕壤等^[5-6]。典型黑土区的范围,存在两种观点:一种限定于中国土壤发生学分类中的黑土类,面积约 $6.04 \times 10^4 \text{ km}^2$ ^[7];另一种包括黑土和黑钙土,面积约 $1.53 \times 10^5 \text{ km}^2$ ^[6-8]。

东北黑土区具有温带、寒温带大陆性季风气候,年均降水量300~950 mm,主要集中在夏季,年均气温 $-5 \sim 4^\circ\text{C}$,季节变化明显^[2]。地形以三面环山、中间平地的盆地轮廓为主,地势低平,海拔高差约700 m,中部为我国最大的东北平原,是优质黑土集中分布区^[9]。水系发达,河流湖泊众多,地表水平均径流量达 $1.70 \times 10^{11} \text{ m}^3$ ^[10]。植被广泛,包括草原、混交林、落叶松林和油松-柞树林,主要农作物为大豆、春小麦和玉米^[11]。成土母质多样,包括黄土、红土和冲积物等,导致土壤性质呈现差异^[3,12-13]。地质构造上,中部为稳定台地,南北分别属于东北和华北台块,东西两侧为地槽^[14]。

中国东北黑土区作为我国关键的商品粮生产基地,该区域的玉米、大豆和粮食产量分别占全国总产量的30%、56%和25%,商品粮供给量占供应总量的1/3,对粮食安全具有重要保障作用^[15]。在自然和人为因素影响下,黑土资源退化严重,其表现主要包括有机质锐减、耕作层变薄、犁底层不断增厚以及土壤物理性质日益恶化等方面^[16],甚至部分土壤出现障碍层次及长期高强度利用导致障碍作用加剧,威胁了粮食产能的稳定与提升以及农业的可持续发展^[17]。因此,研究东北黑土区土壤障碍层的分布、形成演变机制、性状及诊断特征,对土壤改良、地力提升、土地资源管理以及可持续利用具有至关重要的意义。

土壤障碍层指土体中存在的理化性质不良、妨碍植物生长的土层^[18],其影响取决于层位和物质成分^[19]。在我国黑土区内已发现多种土壤障碍层,如冻土层、黏化层和白浆层等,这些障碍层导致土壤理化性质不良,限制水分运动和植物根系穿透,降低土壤质量,成为土地利用和管理的障碍因素^[16,20-23]。前人对这些障碍层的形成机制、障碍程度及其改良途径开展了一些研究^[20-23],但目前仍缺乏系统梳理。为此,本文对东北黑土区主要土壤障碍层进行了初步界定,系统梳理了现阶段对其性状、分布、形成过程及诊断特征的认识,总结了相关改良措施,并展望了未来研

究重点。本文中若不进行特殊定义则所提及的黑土区均为广义黑土区。

1 土壤障碍层类型

根据《黑土区农田土壤障碍层消减与培肥技术规程》^[24]中对障碍层的界定标准,本文调研了《中国土系志》^[20-23]等历史土壤调查资料,初步界定了东北黑土区内主要存在犁底层、白浆层、黏化层和潜育层等障碍层。

1.1 犁底层

犁底层是由农具长期耕犁压实,在耕作层下形成的紧实亚表层^[25]。适当厚度的犁底层对耕作土壤有益,能保持养分和水分,促进作物生长;但过厚会阻碍植物根系生长和水肥气热的流通,对作物生长及物质、能量的传递不利。水稻土的犁底层特点为孔隙小、孔隙度低、紧实和黏重,有助于储水和保水阻渗。在水稻生长期,需补充灌溉水量200~250 mm,犁底层能阻滞水气贯通,结合东北降雨特征,有利于水稻生长^[26-27]。此层主要分布于松嫩平原、三江平原、辽河平原、大小兴安岭山麓和长白山低山丘陵区,面积约为 $2.99 \times 10^7 \text{ hm}^2$ ^[28]。

1.1.1 犁底层的理化性状 ①物理性质:犁底层位于地表以下约20 cm,厚度7~11 cm,但因小农机具连年浅旋耕作,其上界会上移至约12 cm;土壤容重约 1.5 g/cm^3 ,坚硬度约为耕层土壤的3倍^[29]。土壤颗粒紧密排列,多为片状、大块状或层状结构,容重大,总孔隙度小,多毛细管孔隙,通气性差,具有低饱和导水率^[30]。水稻土的犁底层具有板状结构,孔隙小、孔隙度低、紧实和黏重,容重比耕作层高至少10%,有黄褐色、棕色或红棕色的铁锰斑点,且随耕作时间增加而增厚^[25-26,30-31]。②化学性质:犁底层可延长尿素在土壤中的停留时间,导致其质量回收率较低,对深层土壤的氮浸出较少^[32]。③生物性质:犁底层微生物群落以变形菌门为主,其次为绿弯菌门、放线菌门和酸杆菌门^[33-35]。对于坡耕地来说,犁底层的形成不利于地表径流入渗,增加土壤侵蚀和水土流失,不利于农作物根系生长^[36]。

1.1.2 犁底层的形成过程 犁底层是位于土壤耕作层以下较为紧实的土层^[29]。研究表明,因长期农业耕作方式不完善、农业机械的长期压实作用以及有机肥施用量的减少,土壤容重增大,同时耕层厚度逐渐减小,形成了这一紧实的土壤层次,且该层次的厚度还在逐年递增^[16,37-38](图1)。此外,长期以旋代耕、以耙代耕会造成耕层变浅,连续多年旋耕中的犁刀

挤压作用会导致耕作层与心土层之间形成一层坚硬、封闭的犁底层^[39-40]。犁底层的形成不仅与长期耕作土壤受到犁的挤压有关,还可能与长期大水漫灌及降水造成的黏粒沉降集聚作用有关,导致土壤

耕层结构发生变化^[41-42]。机械旋耕和农业机械的挤压作用导致犁底层的形成已得到公认,但长期大水漫灌及降水造成的黏粒沉降是否可形成犁底层尚需进一步研究验证。

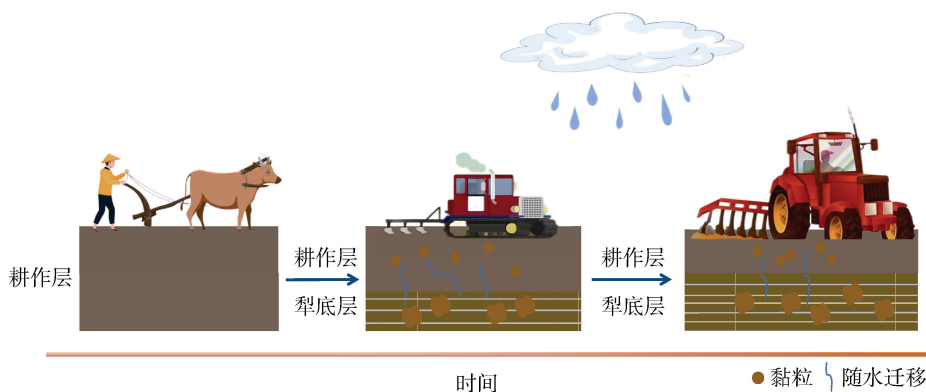


图 1 犁底层形成过程示意图

Fig. 1 Schematic diagram of formation process of plow pan

1.1.3 犁底层的障碍发生机制 ①影响土壤水分运移:犁底层改变土壤物理结构,降低土壤持水和导水能力,易聚集降水而产生侧向壤中流,阻碍水分有效输送至深层土壤,增加耕作层水土流失风险^[43-44];②抑制根系下扎:犁底层影响土壤透水透气性,使根系集中分布于浅层,生长空间受限,加剧对上层水分、养分的竞争,限制对中下层水分和养分的吸收利用^[45];③阻碍作物生长:犁底层限制土壤养分有效性和作物根系穿插,阻碍根系增殖和分布,减少根系从底土中吸收养分和水分,从而影响作物生长^[45];④阻碍土壤肥力传输:犁底层破坏土壤结构,阻碍土层内水肥气热的传输,延长水分的入渗时间,增加水分的无效耗散,降低作物对水分的利用效率^[46];⑤阻水滞盐:犁底层抑制土壤水分下渗,使浅层土壤体积含水率大于深层,具有明显的阻水滞盐效应,同时影响土壤水分、盐分和温度的垂直传输,进一步影响蒸发过程中土壤水盐热运移^[47-48]。然而,适当厚度的犁底层能够减少耕作层土壤水分入渗,起到保水持墒的作用,尤其对于水田农作物可有效提高作物产量^[49]。

1.2 白浆层

白浆层(漂白层)是因季节性还原淋溶作用,在腐殖质层(或耕层)之下形成的黏粒含量低、铁锰贫乏的淡色淋溶层,全球有 30 多个国家的土壤中存在此层或漂白物质。白浆层增厚会导致土壤紧实黏重,孔隙量减少^[50]。它主要分布在黑龙江省三江平原和吉林省东北部,面积约为 $1.69 \times 10^7 \text{ hm}^2$ ^[12,51-52]。

1.2.1 白浆层的理化性状 ①物理性质方面,一般来说,白浆层位于黑土层下 18~22 cm,多呈片状结

构,平均厚度 20.32 cm,最厚可达 40 cm;主要由粉砂粒和黏粒组成,结构紧实,硬度为 20~25 kg/cm²,是耕层的 4 倍~5 倍;部分白浆层中存在铁锰结核和硅粉等新生体^[53-55]。②化学性质方面,白浆层的腐殖质等养分含量极低,酸度增强,活性铝显著增多达 1% 左右, pH 为 5.0~5.4^[12]。其有机质含量最为匮乏,一般为 4~8 g/kg^[56]。由于白浆层中根系较少,其归还的有机物质也相对匮乏,这导致白浆层养分呈贫瘠状态,养分含量显著低于耕层。其碱解氮和 CEC 含量远远低于耕作层,尽管全磷含量相对较高,但易利用的形态却不足 20%^[57]。此外,白浆层中铁锰结核的含量较高,而在成土过程中,铁锰结核的淀积和富集可能进一步导致 As、Co、Mn 和 Sb 等元素的同时富集^[58]。同时,白浆层的磁化率小于耕层和沉积层的磁化率,且硅铁铝率较高。③生物性质方面,由于土壤结构紧实和养分贫瘠,微生物的生长繁殖受到抑制,导致白浆层细菌和真菌等微生物的数量远低于耕层,这种状况减弱了对矿物养分的活化能力以及对大气中元素的固定作用^[59]。白浆层中代表土壤生物总活性的呼吸活性仅为黑土层的 6%,接触酶、转化酶和脲酶等土壤酶活性降低^[60]。

1.2.2 白浆层的形成过程 白浆层对应《中国土壤系统分类检索》(第三版)^[61]中的漂白层,被描述为:由黏粒和/或游离氧化铁的淋失作用形成,有时伴有氧化铁的就地分凝,土层颜色主要由砂粒和粉粒构成的漂白物质所决定,其形成与生物气候或发育时间密切相关。

白浆层的形成过程主要包括以下几个阶段:①由于部分土壤中存在通透性较差的黏化层,导致上覆土

层容易积水, 进而形成还原条件^[62]; ②亚表层中的高价铁被还原为低价铁, 一部分随土壤水溶液侧向迁出土体^[50,63], 另一部分则随土壤水溶液或与有机质络合向下淋溶并淀积^[62,64]; ③淀积层中的低价铁被氧化为高价铁^[65-66], 导致土体中原本均匀分布的铁锰等

有色矿物进行重新分配^[67], 最终形成白浆层(图 2)。此外, 东北地区的冻融交替现象也促使亚表层一部分被还原的铁在原地重新氧化并析出^[63]。黄土或黄土状母质发育土壤由于含铁量较少, 经历短期的表面潜育过程即可形成白浆层^[68]。

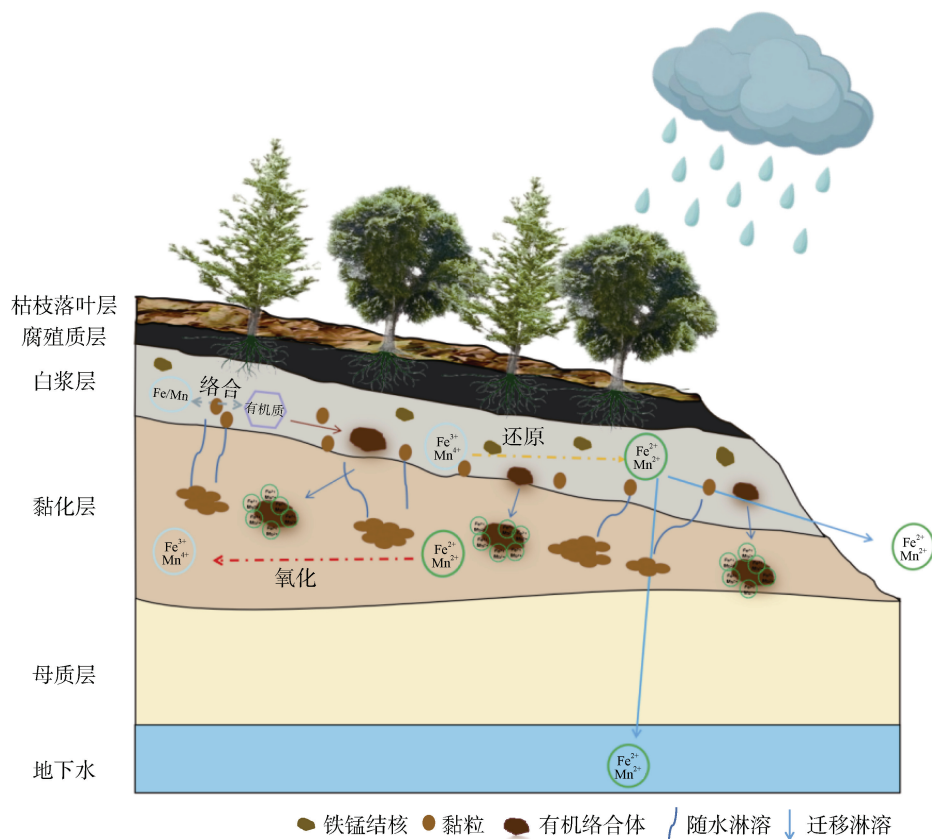


图 2 白浆层形成过程示意图

Fig. 2 Schematic diagram of formation process of albic horizon

综上所述, 白浆层的形成主要受表面潜育、黏粒悬浮迁移、亚铁化合物随水迁移以及金属离子的氧化淀积或侧渗等因素影响。铁锰氧化物可通过还原溶解后随水淋洗、随黏粒淋溶或与有机质络合淋溶等途径迁移。尽管学者在白浆层的形成与黏粒下行等观点上已达成一致^[62,67-68], 但在其形成过程的认知上仍存在争议: 一是不同铁锰氧化物迁移途径对白浆层形成的相对贡献尚不明确; 二是不同途径下铁锰氧化物的迁移通量未知; 三是复合存在的白浆层和黏化层的形成顺序尚待探究。

1.2.3 白浆层中的新生体 土壤新生体作为成土过程的产物, 其出现与含量均反映成土的条件与过程。白浆层中的新生体主要包括铁锰结核和硅粉等新生体。1) 铁锰结核的形成过程。铁锰结核的形成主要有 3 种途径^[69]。①微生物氧化: 细菌和放线菌在生长过程中将亚铁和亚锰氧化成高价态, 并使其沉积

下来, 这一过程逐渐累积形成了结核; ②机械过程: 土壤干燥时, 水分从孔隙中收缩, Fe^{2+} 、 Mn^{2+} 富集, 水分蒸发后被氧化成结核; ③核吸附: 土壤干燥时, 亚铁和亚锰的碳酸盐在矿物颗粒表面沉积并氧化形成核, 核吸附周围环境中的 Fe^{2+} 、 Mn^{2+} 并将其氧化固定, 逐渐积累成结核。

2) 硅粉的形成过程。白浆土中另一种较为常见的新生体是硅粉, 主要由 SiO_2 组成。其形成机制存在以下几种学说: ①地下水起源学说, 其认为当土壤—地下水由山前流向低地和阶地时, 随着矿化度的增加, 碳酸盐的含量上升, 导致 SiO_2 从溶液中淀积析出, 积聚于水成土中^[70]。②硅酸溶解学说, 其指出季节冻层、黏化层、硅质障碍层(硅粉富集并产生障碍的层次)等导致表层滞水, 草甸植被等生物代谢产生大量 CO_2 , 引起硅酸盐的破坏和水解^[71], 形成可溶性硅, 这些可溶性硅在迁移后蒸发, 析出 SiO_2 粉末^[67,72]。

③黏土矿物水解学说,其提出土壤潜育淋溶和离铁过程使黏粒蚀变脱硅,以硅酸或 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Fe}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-H}_2\text{O}$ 无机复合胶体的形式进入土壤溶液而迁移,水分蒸发后,可溶性硅淀积形成 SiO_2 粉末;在溶铁过程中, H^+ 置换交换性 Fe^{2+} , 并腐蚀黏粒矿物八面体晶格边缘,进一步扩散使 Al 、 Mg 等离子脱离八面体晶格,随着阳离子的淋失,黏土矿物被破坏^[73],从而促进 SiO_2 粉末新生体的形成。④生物富集学说,其认为植物根系吸收硅酸溶液后构成有机体,待植物死亡后,随有机体矿化,硅归还土壤。在某些地区,如辽宁省浑河以东地区的黄土母质发育土壤,土层深厚且受地下水影响较小,由于黏粒矿物仅微弱破坏,土壤经历季节性干湿交替,未出现长期土壤表层滞水,然而,该区树木生长繁茂,随季节更替大量植物残体残留在土体内矿化,这一过程补偿了土壤矿质成分的淋溶损失并累积,其中,植物残体矿化产生的可溶性硅在干湿交替和氧化还原过程中淋溶淀积,形成 SiO_2 粉末新生体。

1.2.4 白浆层的诊断特征 白浆层是白浆土的特有亚表层,其诊断特征包括:厚度至少 1 cm,位于 A 层之下但处于灰化淀积层、黏化层、碱积层或其他具有一定坡降的缓透土层之上,其形态可能呈现为波状或舌状过渡到下层,其中舌状延伸的深度 <5 cm。此外,它至少由 85%(按体积计算)的漂白物质所构成,包括铁锰凝团、结核、斑块等^[61]。尽管白浆层的诊断特征已基本明确,但目前对其产生障碍时的诊断标准,如影响作物生长的硬度、孔隙度、出现深度和厚度阈值等,尚不清晰。

1.2.5 白浆层的障碍发生机制 ①抑制根系下扎:白浆层由粉砂和黏粒组成,具有紧实的结构和高硬度,这使得作物根系难以向下生长,因此绝大部分根系被局限在了耕作层之内^[53,67];②阻碍水分下渗:白浆层的紧实结构导致水分上下运行受阻,表层易产生滞水还原条件,进而抑制植物的正常生长^[53,67];③限制微生物活性:白浆层多为片状结构,孔隙度低且以无效孔隙为主,各级孔隙分配失衡,这种结构抑制了微生物的生长与繁殖,导致矿物的养分活化微弱,进而使白浆层养分贫瘠^[73]。

1.3 黏化层

黏化层是指位于土壤表层之下、黏粒含量相较于其上覆土层有显著提高的土层。其黏粒含量通常超过 30%^[61]。这一土层主要分布于吉林东部、内蒙古东部、辽东以及辽西地区,分布面积广泛,约为 $4.10 \times 10^7 \text{ hm}^2$ ^[12,52,74]。

1.3.1 黏化层的理化性状 黏化层的形成主要是由于表层附近淋溶层中的黏粒发生淋溶淀积作用,这一过程导致土壤水分发生横向入渗^[76]。其主要特征包括:出现深度通常距地表 50 cm 或更深,平均厚度约为 28 cm;黏粒含量至少是淋溶层的 1.2 倍;矿物组成以高岭石、蛭石、云母、石英和蒙脱石为主,且常伴有黏粒胶膜等新生体;部分沼泽土的黏化层孔隙中含有黄铁矿碎屑;强烈的生物活动可能导致全新世黄土中的黏化层不连续或缺失;部分黏化层以含孔洞的非团聚结构为主,显示出黏土部分的沉积堆积特征;黏化层具有黏土质地和角块状结构;不同母质的黏化层在游离铁含量和游离度上存在差异,黏粒含量与氧化铁含量呈正相关,并与土壤颜色有相关性^[58,76-77]。

1.3.2 黏化层的形成过程 黏化层的发育需要满足长期稳定的地形条件以及相对温暖、潮湿且稳定的气候环境。经过长时间的残积黏化过程或淋溶淀积黏化作用,才能逐渐形成黏化层^[78-79]。其形成机制包括淋溶淀积黏化和残积黏化作用。淋溶淀积黏化是在干湿交替的水分条件下,由于黏粒的长期淋溶和淀积,在土壤剖面的一定深度土层中黏粒含量明显积累,从而形成淀积黏化层;而残积黏化则是在温带地区特定水热条件下,土壤剖面内一定深度的土层中原生矿物转变为 2:1 或 2:1:1 型黏土矿物,长期聚积形成残积黏化层^[80](图 3)。湿润的气候条件有利于黏化层的形成,例如,王天豪^[81]和李军等^[82]发现长期、连续的沉积以及温暖潮湿的气候条件有利于土壤黏粒的增加和黏化层的发育。在这些条件下,表层硅酸盐黏粒会分散并随水向下迁移并淀积,从而在土壤中发育出黏化层。

气候和地形是黏化层形成的两大关键因素,其中气候起主导作用。然而,目前对黏化层的认知仍存在以下科学问题:一是不同黏化作用主导下形成的黏化层在形态特征上存在差异^[80],但对这些黏化作用对黏化层形成的相对贡献以及如何判断黏化层的主导黏化作用类型尚不清楚;二是关于黏化层是在现代气候条件还是过去气候条件下形成的,学界存在争议。

1.3.3 黏化层的诊断特征 黏化层作为淋溶土的标志性诊断层,其诊断特征可归纳如下:①黏粒含量比率。当淋溶层与黏化层间无岩性不连续且成土母质均一时,黏化层在 30 cm 范围内,其总黏粒和细黏粒含量需满足特定条件,若上覆淋溶层黏粒含量为 150~400 g/kg,黏化层应高 1.2 倍;若上覆淋溶层黏粒含量 <150 g/kg,则以黏化层黏粒含量比上覆层高 3%(绝对量)为指标;若上覆淋溶层黏粒含量 >400 g/kg,

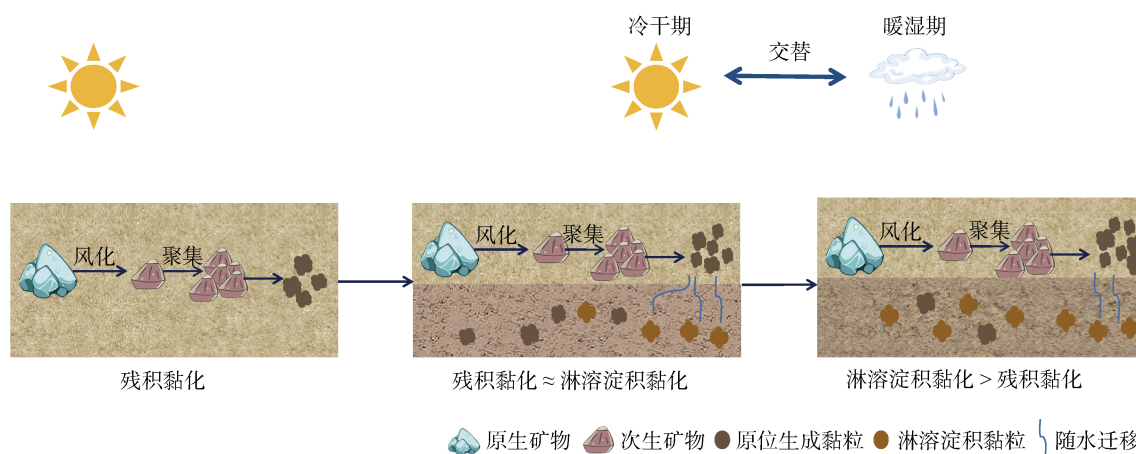


图3 黏化层形成过程示意图

Fig. 3 Schematic diagram of formation process of argic horizon

则以黏化层黏粒含量比上覆层高 8%(绝对量)为指标^[61]。

②黏化层厚度。至少为上覆土层总厚度的 1/10, 具体厚度依上覆土层质地而定, 壤质或黏质 ≥ 7.5 cm、砂质或壤砂质 ≥ 15 cm; 次生黏化层厚度则依水分状况而异, 半干润土壤 ≥ 10 cm、干旱土 ≥ 5 cm^[61]。

③黏粒胶膜鉴别。对于成土物质不均匀或有岩相不连续性的土壤, 需观察淀积层中土壤结构面或孔隙壁上是否有明显的黏粒胶膜以鉴别黏化层^[61]。

对于次生黏化层的鉴别, 需结合其他形态特征和化学特性, 具体指标包括: ①相较于上覆或下伏土层, 该层彩度更高、色调更红, 并且较紧实。②在干旱地区, 如果下伏土层砾石表面全为碳酸盐包膜, 则此层砾石应部分无碳酸盐包膜; 若下伏土层砾石仅底面有碳酸盐结皮, 则此层砾石应完全无碳酸盐包膜。③黏粒含量应高于上覆和下伏土层, 但土体和黏粒部分的硅铝率或硅铁铝率与上覆和下伏土层相近。④微形态上, 淀积黏粒胶膜、淀积黏粒薄膜和黏粒桥接物等应至少占薄片面积的 1%^[61]。

综上所述, 黏化层的诊断特征已较为明确, 但关于其对作物生长产生影响的深度、厚度和黏粒含量的具体阈值尚待进一步研究明确。

1.3.4 黏化层的障碍发生机制 目前, 学界对黏化层的作用存在不同看法。一部分学者持肯定态度, 认为黏化层能够发挥多重积极作用。首先, 它能有效抑制土壤水分蒸发, 展现出良好的蓄水性和保水性^[83]; 其次, 黏化层能吸附如磷素等营养物质, 从而提升土壤养分含量^[84]; 再者, 它还能吸附有机污染物质, 防止污染物进入食物链并减少其向地下水的渗透。然而, 另一部分学者则持相反观点, 他们认为: 首先, 黏化层因其质地黏重, 使得土壤的耕作性能不佳; 其次, 黏化层的透水性能非常差, 在雨季时容易导致土

体上层积水, 这不仅会阻碍植物根系的正常生长发育, 还会对植物造成渍害, 在严重的情况下, 甚至可能引发树木的腐烂和枯死; 再者, 由于黏化层本身抗蚀性脆弱, 会加剧黑土区的侵蚀现象, 导致黑土资源减少^[25]; 最后, 黏化层黏粒含量高、质地黏重、透气性差、持水性高但导水能力低等特点, 会增加可溶性总氮的淋溶量, 进而加剧地下水污染程度^[84]。

1.4 潜育层

潜育层是指在长期处于水分饱和状态且存在有机质的条件下, 经过铁锰还原、分离或聚积作用所形成的具有强还原特性的土层^[85]。这一土层主要分布于大小兴安岭、长白山山间谷地、吉林省的东部山间盆地、三江平原以及松辽平原, 其分布面积达到了 7.04×10^6 hm²^[28,86]。

1.4.1 潜育层的理化性状 潜育层的主要特征包括: ①常见于沼泽土和还原性水稻土, 呈腐臭糊状, 无结构, 氧化还原电位低, 富含还原性物质^[87]; ②颜色因 FeS、有机质、磷酸亚铁和 Fe²⁺ 的含量而异^[88]; ③受地下水影响, 质地黏重紧实, 保水透气性差, 根系难以穿透, 地温低, 导致有机碳含量和微生物数量较低^[89]; ④泥炭渍水状态形成的还原环境增强了 Fe、Mn 等元素的活性, 导致这些元素在潜育层急剧积累^[90]。

1.4.2 潜育层的形成过程 土壤潜育化通常发生在水分充足、厌氧微生物活跃、有机质含量丰富的区域。多项研究表明^[91-92], 潜育化通常发生在地形低洼处, 由于土壤长期渍水(或滞水), 处于静水状态, 导致土壤通气性变差且缺乏氧化条件, 造成有毒有害还原物质累积。与此同时, 专性和兼性厌氧微生物的代谢活动使氧化还原电位下降, 高价铁、锰化合物转化为低价状态, 土壤呈现蓝灰色或青灰色(图 4)。此外,

学者们发现^[93], 青藏高原高寒草甸的非水成土虽然不受地下水浸没影响, 但受季节性冻融影响, 季节性的冻结和融化使表层土浸没在冰水中, 阻碍了土壤与大气之间的气体交换, 为潜育化提供了天然的还原条件。在东北地区, 长期滞水和季节性冻融是导致土壤潜育化的两个主要原因, 但二者对潜育层形成的相对贡献尚不明确。

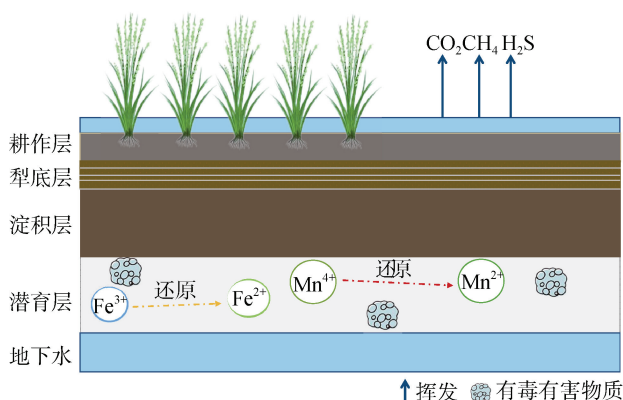


图 4 潜育层形成过程示意图

Fig. 4 Schematic diagram of formation process of Gleyic horizon

2 土壤障碍层的改良措施

2.1 犁底层、白浆层和黏化层的改良措施

犁底层、白浆层和黏化层, 尽管它们的形成过程各不相同, 但均属于紧实土层, 表现出物理性质较差、孔隙小、孔隙度低以及有机质含量低的特点。针对这些特点, 本文梳理了常采用的改良措施。

2.1.1 添加有机物料 1) 秸秆还田。秸秆还田能改善土壤理化性质, 提升孔隙度和促进团聚体形成, 进而增强土壤肥力。具体作用如下: ①提高有效磷和有机碳含量, 增加水溶性物质, 提高土壤的胡敏酸与富里酸的比值和土壤有机质的腐质化程度, 丰富土壤有机质, 有效减少土壤侵蚀, 并增强土壤的抗旱保墒能力^[94]; ②促进大团聚体形成, 提高土壤团聚体稳定性, 但对微团聚体分布影响不大^[95]; ③增加毛细管孔隙率、有效磷和速效钾含量, 降低土壤容重和固相率, 效果可持续, 但对 pH 改善有限^[95-96]。Li 等^[35]发现, 蚯蚓与秸秆配施能提高底物利用率, 促进土壤微生物代谢, 进一步改善土壤质量。

2) 生物质炭添加。生物质炭因其具备高孔隙度、大比表面积、强抗氧化性和不易被生物分解的特性, 能够有效改善土壤结构及土壤理化性质和生物学活性, 为解决土壤障碍层问题提供了科学的方案^[97], 生物质炭改良土壤障碍层的益处主要体现在: ①降低土壤容重, 提高土壤有机质含量和团聚体稳定性, 从而

改善土壤质地, 为植物根系创造更好的生存环境, 并增加土体的排水、通气和渗透能力。然而, 部分研究得出了相反的结论, 认为生物质炭的掺入降低了土体的渗透特性^[98]。因此, 后续研究可进一步探讨生物质炭对土体渗透特性的具体影响^[95,99-100]。②添加适量的生物质炭能提高土壤养分含量, 促进微生物多样性和活性, 并降低过氧化氢酶活性^[95,100]。但需注意, 为改变微生物群落结构, 需配合施用氮磷钾肥^[100]。

2.1.2 深松 对于紧实的土壤障碍层, 可采用深松方法进行改良。若仅依赖地上部分来提升作物产量, 其增产潜力将受限。因此, 改革耕作方式, 重视地下部分, 挖掘其增产潜力, 成为提高作物产量的重要途径。Håkansson 和 Reeder^[101]研究发现, 免耕能减少障碍层形成, 进而提高作物产量。但免耕仅限于抑制障碍层的形成, 因此, 急需深松措施来打破障碍层, 为作物根系生长和产量形成创造更适宜的环境和资源条件。相关研究表明^[41,102], 深松措施可以大幅度降低土壤紧实度, 提高土壤的蓄水保水能力, 改善根系生长发育的生态条件, 进而促进根系生长。破除障碍层次后, 作物的根系能够扎入更深的土中, 增强作物生长后期根系的活力, 并提高其对外界环境的抗逆性, 从而提升作物产量。

深松耕作对土壤物理性状有显著影响, 主要体现在降低土壤容重和增加孔隙度。研究表明, 深松能有效改善障碍层土壤结构, 增大孔隙度, 降低容重, 并提高饱和导水率。不同耕作方式下土壤容重存在显著差异, 其中深松处理的土壤容重低于旋耕处理^[102-103]。深松耕作能打破障碍层, 促进水分入渗, 增强土壤蓄水保墒能力, 并提高作物水分利用率。例如, 郭志军等^[104]的研究表明, 深松耕作后的耕层土壤呈现上虚下实、左右虚实相间的结构。松散的结构, 既便于蓄水、脱盐碱和通气, 又可以增强热交换, 有利于营养物质的转化与利用。而实部土壤通过其细微的孔隙结构, 发挥着“土壤水库”的作用, 引导地下水上升, 滋养作物根系, 为作物提供稳定的水分来源。此外, 打破紧实的障碍层能够有效降低土壤的紧实度, 提高土壤水分的利用效率, 并减少水土流失及地表径流现象, 进而实现保水保肥的效果^[105]。

2.1.3 心土混合耕和心土培肥 针对白浆层的改良, 主要有心土混合耕和心土培肥两种方法。①心土混合耕: 此方法通过混合白浆层与淀积层, 降低土壤硬度, 提高水分渗透性, 并扩展作物根系深度^[106]。近 30 年来, 其改良效果逐步提升。刘峰等^[106]研发的三段式心土混层犁, 虽有效打破了白浆土的不良物理

性状, 但存在效率低和心土过虚等问题。2020年, 朱宝国^[107]在此基础上创新, 研制出心土间隔混拌犁, 既保持了黑土层的稳定, 又促进了土壤的水分保持、通气性和柔软度, 显著提升了作物产量, 推动了改土技术的发展。②心土培肥: 此方法在混层基础上添加改土物料, 如石灰、磷肥等, 以提高土壤养分^[106]。试验证明, 施用不同的无机物料和改土物料能显著提升土壤肥力和作物产量, 增加土壤中的氮、磷含量, 同时, 还可以根据土壤的具体问题添加不同的无机物料进行改良^[108]。

黏化层的改良措施^[109-110]包括: ①草炭土改良, 用草炭土能够增强或恢复土壤的保水保肥和通气能力, 改善土壤的黏性, 以此实现土壤改良的目标; ②拌合草炭土、砂子和发酵过的锯末改良, 将草炭土、砂子、发酵过的锯末和土壤按一定比例与土壤混合搅拌是最佳的改良方法; ③施用缓控释肥, 采用缓控释肥料进行条播深施, 可以优化氮的分布, 提高作物产量并减少氮的损失; ④掺合沙土, 使用沙土作为掺合土可以中和黏土的黏性, 改善作物生长条件。

改良紧实的障碍层是一项系统工程, 需综合运用多种方法, 不可仅依靠单一技术。合理安排耕作深度、方式和添加有机物料等, 均能有效改善土壤障碍层问题。

2.2 潜育层的改良措施

潜育层主要存在于水稻土, 潜育化土壤面临渍、冷、烂、闭(气)、毒及缺素等问题, 长期渍水是主要诱因。因此, 减少稻田积水、降低地下水位和增强土壤通气性是改良的关键^[111]。具体措施如下:

1) 工程排水措施。①开沟排水, 能有效消除潜育性稻田的渍害问题, 改善土壤理化性质, 改善通气条件, 降低有毒物质对作物的危害, 增加土壤中的速效养分含量, 增强根系活力, 水稻增产效果显著^[112]; ②暗管排水, 一般埋深约 0.7 m, 可以降低地下水位 0.2~0.4 m, 从而实现耕层土壤的降渍, 还能提高水温和土温, 改善土壤理化性状, 增加水稻有效分蘖数^[113]。

2) 农业管理措施。半干旱式栽培措施、少免耕栽培措施、轮作、覆盖地膜、合理灌溉和冬耕晒垡等也是调控稻田水分、改善土壤通气性和物理结构的重要措施^[113]。①半干旱式栽培措施, 改善了土壤通透性, 提高了土壤温度和土壤中微生物的活性, 这些有利条件共同作用下能很好地提高水稻单产^[112]; ②少免耕栽培技术, 加速了土壤与外界物质交换, 改变了水分运动形式, 可协调水气矛盾, 促进土壤内的微生物活性, 从而提高土壤肥力和水稻产量^[112]; ③轮作,

通过调整作物布局, 水旱轮作, 改善了土壤结构, 消除了有毒物质危害和水涝渍害, 从而增加作物产量^[114]; ④覆盖地膜, 增强了土壤的保肥和保水能力, 可大幅度提高水稻单产^[115]; ⑤合理灌溉, 改善了土壤内部的水分和空气状况, 提高了水温和土温, 有利于秧苗的成活及返青, 提高了土壤内部微生物的活性, 有利于水稻高产丰产^[116]; ⑥冬耕晒垡, 改善了土壤通透性, 促使还原物质氧化, 减轻其毒性, 促进了土壤有机质的分解和养分转化。

3) 合理施用肥料和土壤改良剂。合理施用肥料和土壤改良剂可显著改良潜育化土壤的性质, 进而有效提升水稻的产量。增施磷肥、锌肥和钾肥, 能够促使秧苗提早生长并迅速发育, 同时, 对秧苗采取浅湿管理措施, 可以提升土壤温度并改善通气条件, 改善土壤的理化性状^[116]; 增施暖性农家肥可以为土壤提供氮、磷、钾、钙、硅等植物生长所必需的营养元素, 改善土壤的生物化学条件, 营造水稻生长的适宜环境; 土壤改良剂能有效改善土壤理化性状和养分状况, 进而为农作物创造一个更加适宜的生长环境, 最终实现增产的目标^[117]。

4) 气流爆喷式土壤改良方式。该措施改变了传统的耕作方式, 在解决土壤潜育化等问题时, 在不翻耕土壤的情况下, 通过物理深松方式, 注入高压气流, 能改善土壤结构, 使土壤疏松通气, 增强雨水入渗速度和数量, 提高土壤蓄水能力, 利于保墒, 减少侵蚀及水土流失^[118]。

3 结论与展望

在过去几十年间, 东北黑土区改良土壤障碍层研究取得了一定进展, 为该区改良土壤障碍层提供了强有力的理论支持。但当前研究仍存在诸多挑战: 土壤障碍层形成机制不明确, 演化规律及诊断特征有待进一步探索, 与作物产量及质量的定量关系需厘清, 且改良措施的针对性差, 未科学地进行分类分区并改良。因此, 未来研究应重点关注以下方面:

1) 目前, 土壤科学领域对不同类型的土壤障碍层已有较明确的定义和分类, 但土壤障碍层的形成机制及障碍标准尚无统一界定。未来研究应致力于明确这些方面, 以更全面地理解土壤障碍层的形成机制和影响因素。

2) 土壤障碍层的形成机制与其所处的地理、气候条件及人为活动密切相关。目前对其形成机制有一定了解, 但其具体演化过程和长期变化规律尚不完全清晰。未来研究应从多个角度、不同尺度和层面全面

了解东北黑土区土壤障碍层的形成过程,特别是强化复合过程的研究,以阐明其形成机制。

3) 土壤障碍层的上界、厚度和硬度等关键指标与作物生长直接相关,但不同障碍层对不同作物的影响程度尚不完全明确。为更深入理解土壤障碍层与作物生长的关系,需开展更多针对性研究,重点探讨不同类型和性质的土壤障碍层对各种主要作物生长的影响,确定障碍标准,为后续制定更精准的农业管理策略提供依据。

4) 现有的土壤障碍层改良技术,如深松、秸秆还田、有机肥施用、生物质炭改良和改良剂掺入等,虽已广泛应用并取得一定成效,但存在成本高、劳动强度大、可能破坏土壤结构等问题。因此,需开发更环保、成本效益更高的技术,同时丰富土壤微生物的多样性,未来改良措施可考虑微生物肥料、纳米材料改良剂及智能农业设备的使用,以实现土壤改良的高效和持续进行。

综上,未来对土壤障碍层的研究应加强其诊断标准的量化,深入探究其形成机制与演化规律,进行系统地分类分区,精准配置改良技术,并注重改良技术的环保性和可持续性,以实现对土壤障碍层更科学、有效的管理,促进农业生产的可持续发展。

参考文献:

- [1] 龚子同, 张之一, 张甘霖. 草原土壤: 分布、分类与演化[J]. 土壤, 2009, 41(4): 505–511.
- [2] 刘宝元, 张甘霖, 谢云, 等. 东北黑土区和东北典型黑土区的范围与划界[J]. 科学通报, 2021, 66(1): 96–106.
- [3] 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.
- [4] Sorokin A, Owens P, Láng V, et al. “Black soils” in the Russian soil classification system, the US soil taxonomy and the WRB: Quantitative correlation and implications for pedodiversity assessment[J]. Catena, 2021, 196: 104824.
- [5] 刘兴土, 阎百兴. 东北黑土区水土流失与粮食安全[J]. 中国水土保持, 2009(1): 17–19.
- [6] 王岩松, 王玉玺, 李洪兴. 黑土区范围界定及水土保持防治策略[J]. 中国水土保持, 2007(12): 11–13, 68.
- [7] 赵玉明, 程立平, 李加加, 等. 东北典型黑土区的土类界定依据分析[J]. 中国水土保持科学, 2020, 18(4): 123–129.
- [8] 刘宝元, 阎百兴, 沈波, 等. 东北黑土区农地水土流失现状与综合治理对策[J]. 中国水土保持科学, 2008, 6(1): 1–8.
- [9] 陈光. 东北黑土区水土流失综合防治技术体系[J]. 水土保持应用技术, 2008(1): 33–34.
- [10] 戴长雷, 王思聪, 李治军, 等. 黑龙江流域水文地理研究综述[J]. 地理学报, 2015, 70(11): 1823–1834.
- [11] 魏丹, 杨谦, 迟凤琴. 东北黑土区土壤资源现状与存在问题[J]. 黑龙江农业科学, 2006(6): 69–72.
- [12] 吉林省土壤肥料总站. 吉林土壤[M]. 北京: 中国农业出版社, 1998.
- [13] 魏丹, 孟凯. 中国东北黑土[M]. 北京: 中国农业出版社, 2017.
- [14] 翟富荣, 梁帅, 戴慧敏. 东北黑土地地球化学调查研究进展与展望[J]. 地质与资源, 2020, 29(6): 503–509, 532.
- [15] 张光辉, 杨扬, 刘瑛娜, 等. 东北黑土区土壤侵蚀研究进展与展望[J]. 水土保持学报, 2022, 36(2): 1–12.
- [16] Liu X B, Zhang X Y, Wang Y X, et al. Soil degradation: A problem threatening the sustainable development of agriculture in Northeast China[J]. Plant, Soil and Environment, 2010, 56(2): 87–97.
- [17] 韩晓增, 邹文秀. 我国东北黑土地保护与肥力提升的成效与建议[J]. 中国科学院院刊, 2018, 33(2): 206–212.
- [18] 农业大词典编辑委员会. 农业大词典[M]. 北京: 中国农业出版社, 01-Sep-1998.
- [19] Bockheim J G, Hartemink A E. Salic horizons in soils of the USA[J]. Pedosphere, 2013, 23(5): 600–608.
- [20] 张甘霖, 隋跃宇, 焦晓光, 等. 中国土系志. 吉林卷[M]. 北京: 科学出版社, 2019.
- [21] 翟瑞常, 辛刚, 张之一. 中国土系志·黑龙江卷[M]. 北京: 科学出版社, 2020.
- [22] 张甘霖, 王秋兵, 韩春兰, 等. 中国土系志·辽宁卷[M]. 北京: 科学出版社, 2020.
- [23] 王秋兵, 韩春兰, 孙福军, 等. 中国土系志·内蒙古卷[M]. 北京: 科学出版社, 2020.
- [24] 黑龙江省市场监督管理局. 黑土区农田土壤障碍层消减与培肥技术规程: DB23/T 3159—2022[S]. 北京: 标准出版社, 2022.
- [25] 周健民, 沈仁芳. 土壤学大辞典[M]. 北京: 科学出版社, 2013.
- [26] Jeřábek J, Zúmr D, Dostál T. Identifying the plough pan position on cultivated soils by measurements of electrical resistivity and penetration resistance[J]. Soil and Tillage Research, 2017, 174: 231–240.
- [27] 欧锦琼, 卢瑛, 胡丹心, 等. 广西岩溶地区水稻土发生特性及其在中国土壤系统分类中的归属[J]. 土壤, 2023, 55(6): 1336–1346.
- [28] 2019 年全国耕地质量等级情况公报[J]. 中国农业综合开发, 2020(6): 6–12.
- [29] 邓西民, 陈端生, 王坚, 等. 冻融作用对犁底层土壤物理性状的影响[J]. 科学通报, 1998, 43(23): 2538–2541.
- [30] Patil M D, Das B S, Bhadoria P B S. A simple bund plugging technique for improving water productivity in wetland rice[J]. Soil and Tillage Research, 2011, 112(1): 66–75.
- [31] 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.
- [32] Patil M D, Das B S. Assessing the effect of puddling on preferential flow processes through under bund area of lowland rice field[J]. Soil and Tillage Research, 2013, 134: 61–71.

- [33] Bengough A G, McKenzie B M, Hallett P D, et al. Root elongation, water stress, and mechanical impedance: A review of limiting stresses and beneficial root tip traits[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2011, 62(1): 59–68.
- [34] Gao W, Hodgkinson L, Jin K, et al. Deep roots and soil structure[J]. *Plant Cell Environment*, 2016, 39(8): 1662–1668.
- [35] Li X D, Mao N, Jiang H, et al. Synergistic effects of straw and earthworm addition on microbial diversity and microbial nutrient limitation in a subtropical conservation farming system[J]. *Soil and Tillage Research*, 2022, 224: 105500.
- [36] 宋鸽. 土壤侵蚀对紫色土坡耕地耕层质量影响及诊断研究[D]. 重庆: 西南大学, 2020.
- [37] Šíp V, Vavera R, Chrpová J, et al. Winter wheat yield and quality related to tillage practice, input level and environmental conditions[J]. *Soil and Tillage Research*, 2013, 132: 77–85.
- [38] Sang X G, Wang D, Lin X. Effects of tillage practices on water consumption characteristics and grain yield of winter wheat under different soil moisture conditions[J]. *Soil and Tillage Research*, 2016, 163: 185–194.
- [39] Håkansson I, Voorhees W B, Riley H. Vehicle and wheel factors influencing soil compaction and crop response in different traffic regimes[J]. *Soil and Tillage Research*, 1988, 11(3/4): 239–282.
- [40] 杨雪, 逢焕成, 李铁冰, 等. 深旋松耕作法对华北缺水区域壤质黏潮土物理性状及作物生长的影响[J]. *中国农业科学*, 2013, 46(16): 3401–3412.
- [41] Mosaddeghi M R, Mahboubi A A, Safadoust A. Short-term effects of tillage and manure on some soil physical properties and maize root growth in a sandy loam soil in western Iran[J]. *Soil and Tillage Research*, 2009, 104(1): 173–179.
- [42] Ji B, Zhao Y, Mu X, et al. Effects of tillage on soil physical properties and root growth of maize in loam and clay in Central China[J]. *Plant, Soil and Environment*, 2013, 59(7): 295–302.
- [43] Tao Y, Zou Z Q, Guo L, et al. Linking soil macropores, subsurface flow and its hydrodynamic characteristics to the development of Benggang erosion[J]. *Journal of Hydrology*, 2020, 586: 124829.
- [44] 黄怡婷, 陈俊熹, 高钰淇, 等. 长期耕作对典型黑土水力性质的影响[J]. *土壤学报*, 2024, 61(4): 998–1008.
- [45] 李春俭, 彭云峰, 牛君仿, 等. 土壤中的玉米根系生长及其研究应注意的问题[J]. *植物营养与肥料学报*, 2010, 16(1): 225–231.
- [46] 刘爽, 张兴义. 不同耕作方式对黑土农田土壤水分及利用效率的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2012, 30(1): 126–131.
- [47] Xu C L, Tao H B, Tian B J, et al. Limited-irrigation improves water use efficiency and soil reservoir capacity through regulating root and canopy growth of winter wheat[J]. *Field Crops Research*, 2016, 196: 268–275.
- [48] Ali S, Xu Y Y, Ahmad I, et al. Tillage and deficit irrigation strategies to improve winter wheat production through regulating root development under simulated rainfall conditions[J]. *Agricultural Water Management*, 2018, 209: 44–54.
- [49] 林景亮. 水田土壤犁底层特性与水稻产量的关系[J]. *土壤通报*, 1965(4): 49–51.
- [50] 徐琪. 关于灰化土与白浆土的研究进展[J]. *土壤学进展*, 1979, 7(1): 21–39.
- [51] 贾文锦. 辽宁土壤[M]. 沈阳: 辽宁科学技术出版社, 1992.
- [52] 黑龙江省土地利用管理局, 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.
- [53] 贾会彬, 刘峰, 赵德林, 等. 白浆土某些理化特性与改良的研究[J]. *土壤学报*, 1997, 34(2): 130–137.
- [54] Wang J, Wang W D, Gu J D. Community structure and abundance of ammonia-oxidizing Archaea and bacteria after conversion from soybean to rice paddy in albic soils of Northeast China[J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2014, 98(6): 2765–2778.
- [55] Bockheim J G. Classification and distribution of soils with albic horizons in the USA: A preliminary analysis[J]. *Geoderma*, 2016, 262: 85–93.
- [56] 中国大百科全书总编辑委员会, 中国大百科全书编辑部. 中国大百科全书[M]. 北京: 中国大百科全书出版社, 2003.
- [57] 王安秀, 韩晓增, 张承喆. 吉林省白浆土磷素形态吸附与释放的研究[J]. *土壤通报*, 1986, 17(6): 261–264, 274.
- [58] 邢宝山, M.J.Dudas, 张之一, 等. 三江平原白浆土微量元素和稀土元素的地球化学特征[J]. *土壤学报*, 1993, 30(2): 158–172.
- [59] Zheng H J, Liu D Y, Liao X, et al. Field-aged biochar enhances soil organic carbon by increasing recalcitrant organic carbon fractions and making microbial communities more conducive to carbon sequestration[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2022, 340: 108177.
- [60] 汤树德. 白浆土微生物学特性和生物学活性的研究[J]. *土壤学报*, 1987, 24(3): 239–247.
- [61] 中国科学院南京土壤研究所土壤系统分类课题组, 中国土壤系统分类课题研究协作组. 中国土壤系统分类检索[M]. 3版. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2001.
- [62] 张之一, 张元福. 黑龙江省白浆土形成机理及改良途径的研究报告[J]. *黑龙江八一农垦大学学报*, 1987(2): 13–23.
- [63] 黄瑞采. 江苏淮北地区的白浆土[J]. *土壤*, 1960(3): 1–4.
- [64] 律兆松, 徐琪. 中国白浆土研究 II. 无定形铁、锰、铝氧化物特性及其元素地球化学分异[J]. *土壤学报*, 1995, 32(1): 32–40.
- [65] Brinkman R. Ferrollysis, a hydromorphic soil forming process[J]. *Geoderma*, 1970, 3(3): 199–206.
- [66] 律兆松, 徐琪. 关于土壤白浆化过程研究的若干问题[J]. *土壤学进展*, 1991, 19(6): 11–16, 43.
- [67] 曾昭顺, 庄季屏, 李美平. 论白浆土的形成和分类问题[J]. *土壤学报*, 1963(2): 3–21.
- [68] 傅桦, 丁瑞兴. 我国北亚热带白浆化土壤的发生特性及

- 形成机制[J]. 土壤学进展, 1995, 23(1): 52–53.
- [69] Drosdoff M, Nikiforoff C C. Iron-manganese concretions in Dayton soils[J]. *Soil Science*, 1940, 49(5): 333–346.
- [70] (苏)柯夫达(КовдаВ.А.)著. 陈恩健等译. 中国之土壤与自然条件概论[M]. 北京: 科学出版社, 1960.
- [71] Dove P M. Kinetic and thermodynamic controls on silica reactivity in weathering environments[J]. 1995, 31(1): 235–290.
- [72] 黎积祥. 暗色草甸白浆土的发生学特性[J]. 土壤学报, 1960(1): 24–32.
- [73] 黄昌勇. 土壤学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [74] 内蒙古自治区土壤普查办公室内蒙古自治区土壤肥料工作站. 内蒙古土壤[M]. 北京: 科学出版社, 1994.
- [75] Grozav A, Rogobete G. Criteria and mathematical expressions for evaluating an illuvial accumulation of clay in luvisols[J]. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019, 471(4): 042011.
- [76] Bryk M. Macrostructure of diagnostic B horizons relative to underlying BC and C horizons in Podzols, Luvisol, Cambisol, and Arenosol evaluated by image analysis[J]. *Geoderma*, 2016, 263: 86–103.
- [77] 张蕾, 张凤荣, 靳东升, 等. 黄土高原淋溶土黏粒、氧化铁与颜色的关系及发生学解释——以山西土系调查的 31 个黏化层为例[J]. 土壤学报, 2021, 58(4): 876–886.
- [78] Schaetzl R J, Anderson S. Soils: genesis and geomorphology[M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2005.
- [79] Karlstrom E T, Oviatt C G, Ransom M D. Paleoenvironmental interpretation of multiple soil-loess sequence at Milford Reservoir, northeastern Kansas[J]. *Catena*, 2008, 72(1): 113–128.
- [80] 章明奎. 南方山地丘陵土壤的黏化作用及黏化层的鉴定问题讨论[J]. 农学学报, 2021, 11(12): 53–57.
- [81] 王天豪. 沈阳深厚黄土剖面发生学特征及其在地考古学中的应用[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2022.
- [82] 李军, 黄成敏, 杨国林, 等. 四川盆地晚中生代古淋溶土发生学特征与形成因素研究[J]. 土壤通报, 2022, 53(1): 1–11.
- [83] 李新乐, 刘雅婧, 孙非, 等. 乌兰布和沙漠白刺灌丛沙堆丘间地黏土层土壤水分时空格局及其对降雨变化的响应[J]. 水土保持通报, 2022, 42(6): 39–46.
- [84] 马琳杰, 霍晓兰, 靳东升, 等. 褐土区氮磷在土壤发生层中淋溶的差异性[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2021(1): 197–207.
- [85] 中国科学院南京土壤研究所土壤分类课题组. 中国土壤系统分类初拟[J]. 土壤, 1985, 17(6): 290–318.
- [86] 隋跃宇, 赵军, 冯学民. 关于黑土、白浆土、沼泽土的论述: 张之一文选[M]. 哈尔滨: 哈尔滨地图出版社, 2013.
- [87] 黄昌勇, 徐建明. 土壤学[M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2010.
- [88] Crompton E. Some morphological features associated with poor soil drainage[J]. *Journal of Soil Science*, 1952, 3(2): 277–289.
- [89] 张勇, 陈效民, 林洁. 太湖地区典型水稻土水力学特征及土壤库容研究[J]. 水土保持通报, 2011, 31(6): 64–67.
- [90] 于君宝, 王金达, 刘景双. 三江平原泥炭地微量元素垂直分布特征[J]. 生态环境, 2003(4): 398–400.
- [91] Coutts M P. Components of tree stability in sitka spruce on peaty gley soil[J]. *Forestry: An International Journal of Forest Research*, 1986, 59(2): 173–197.
- [92] 董元华, 徐琪. 不同脱沼泽阶段土壤中铁锰的比较研究[J]. 土壤学报, 1991, 28(4): 382–389.
- [93] Müller C, Martin M, Stevens R J, et al. Processes leading to N₂O emissions in grassland soil during freezing and thawing[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2002, 34(9): 1325–1331.
- [94] 舒业勤, 彭复细, 雷文硕, 等. 稻油复种不同措施下土壤有机碳组分积累及其稳定性特征[J]. 土壤学报, 2025, 62(02): 495–503.
- [95] Xiu L, Zhang W, Sun Y, et al. Effects of biochar and straw returning on the key cultivation limitations of Albic soil and soybean growth over 2 years[J]. *Catena*, 2019, 173: 481–493.
- [96] 李文娜, 李爽, 关皓月, 等. 耕作方式和秸秆还田对麦—豆轮作田土壤理化特性和土壤酶活性的影响[J]. 土壤, 2024, 56(6): 1274–1282.
- [97] Smebye A, Alling V, Vogt R D, et al. Biochar amendment to soil changes dissolved organic matter content and composition[J]. *Chemosphere*, 2016, 142: 100–105.
- [98] Ibrahim H M, Al-Wabel M I, Usman A R A, et al. Effect of *Conocarpus biochar* application on the hydraulic properties of a sandy loam soil[J]. *Soil Science*, 2013, 178(4): 165–173.
- [99] Glaser B, Lehmann J, Zech W. Ameliorating physical and chemical properties of highly weathered soils in the tropics with charcoal—a review[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2002, 35(4): 219–230.
- [100] Tian J, Wang J Y, Dippold M, et al. Biochar affects soil organic matter cycling and microbial functions but does not alter microbial community structure in a paddy soil[J]. *Science of The Total Environment*, 2016, 556: 89–97.
- [101] Håkansson I, Reeder R C. Subsoil compaction by vehicles with high axle load—extent, persistence and crop response[J]. *Soil and Tillage Research*, 1994, 29(2/3): 277–304.
- [102] Feng X M, Hao Y B, 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.
- [103] 陈雪, 蔡强国, 王学强. 典型黑土区坡耕地水土保持措施适宜性分析[J]. 中国水土保持科学, 2008, 6(5): 44–49.
- [104] 郭志军, 佟金, 周志立, 等. 深松技术研究现状与展望[J]. 农业工程学报, 2001, 17(6): 169–174.
- [105] 翟振, 李玉义, 张莉, 等. 短期深旋松对黄淮海沙姜黑土耕层结构及小麦生长的影响[J]. 应用生态学报, 2017, 28(4): 1211–1218.
- [106] 刘峰, 高盼, 王秋菊, 等. 心土改良的研究进展[J]. 中国土壤与肥料, 2015(1): 7–11.
- [107] 朱宝国. 心土间隔混拌犁改良白浆土技术[J]. 现代化农业, 2020(10): 16–17.

- [108] 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.
- [109] 黄耀华, 王侃, 杨剑虹. 滴灌施肥条件下土壤水分和速效氮迁移分布规律[J]. 水土保持学报, 2014, 28(5): 87-94, 301.
- [110] 侯朋福, 薛利祥, 袁文胜, 等. 缓控释肥深施对黏性土壤麦田氮素去向的影响[J]. 环境科学, 2023, 44(1): 473-481.
- [111] 赖庆旺, 刘勋, 黄庆海. 鄱阳湖地区水稻土潜育化的发生及其改良对策[J]. 中国农业科学, 1989, 22(4): 65-74.
- [112] 吴新德, 戴廷寿. 安徽池州地区冷浸田的综合改良[J]. 土壤, 1996, 28(2): 62-63.
- [113] 魏朝富, 高明, 车福才, 等. 垄作免耕下稻田土壤团聚体和水热状况变化的研究[J]. 土壤学报, 1990, 27(2): 172-178.
- [114] 周志保, 林建军, 陈江忠, 等. 凤凰县中低产田改良措施[J]. 现代农业科技, 2018(13): 192, 195.
- [115] 朱宏斌, 黄仁健, 张星才, 等. 冷浸田水稻全程地膜覆盖湿润栽培技术研究[J]. 贵州农业科学, 2002, 30(1): 42-44.
- [116] 古汉虎, 汤辛农. 低产土壤改良[M]. 长沙: 湖南科学技术出版社, 1982.
- [117] 董稳军, 徐培智, 张仁陟, 等. 土壤改良剂对冷浸田土壤特性和水稻群体质量的影响[J]. 中国生态农业学报, 2013, 21(7): 810-816.
- [118] 涂杰, 张建军, 岁立云. 气流喷爆式深耕深松技术[J]. 农业与技术, 2019, 39(8): 39-40.