

东北黑土区不同容重和质地土壤微形态样品的浸渍固化方法^①

于小森¹, 孙仲秀^{1*}, 姜荧荧², 段斯译¹, 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)

摘要: 本研究以东北黑土区不同容重和质地的土壤为对象, 通过比较使用树脂容量 0%、70%、80%、90% 的丙酮稀释不饱和聚酯树脂浸渍固化的土壤样品在体视显微镜(放大 10 倍)和偏光显微镜(放大 100 倍)下的观察效果, 提出了浸渍效果的评价标准, 制备了土壤薄片, 并明确了不同容重和质地土壤样品的最优浸渍方案。结果表明, 浸渍效果合格的微形态样品在体视显微镜下应具有良好的切割完整性、表面抗损性和孔隙填充性。容重 $>1.70\text{ g/cm}^3$ 和介于 $1.40\sim 1.50\text{ g/cm}^3$ 的土壤样品, 应选择 90% 丙酮稀释 191[#]不饱和聚酯树脂配制浸渍剂; 容重介于 $1.50\sim 1.70$ 、 $1.30\sim 1.40$ 和 $<1.20\text{ g/cm}^3$ 的样品, 应选择 80% 丙酮稀释 191[#]不饱和聚酯树脂配制浸渍剂; 容重介于 $1.20\sim 1.30\text{ g/cm}^3$ 的样品, 应直接使用 191[#]不饱和聚酯树脂配制浸渍剂。对于粉土样品, 应选择 90% 丙酮稀释 196[#]不饱和聚酯树脂配制浸渍剂; 粉砂壤土、壤土样品, 应选择 80% 丙酮稀释 191[#]不饱和聚酯树脂配制浸渍剂; 砂质壤土样品, 可直接使用 191[#]不饱和聚酯树脂配制浸渍剂。采用上述浸渍方案, 显著提高了土壤微形态薄片的制片效率和质量, 有助于从微形态上更为准确地揭示东北黑土区紧实层演化机制。

关键词: 东北黑土区; 土壤微形态; 浸渍固化方法; 土壤薄片

中图分类号: S151.9+5 文献标志码: A

Impregnation Solidification Methods for Soil Micromorphology Samples with Different Bulk Densities and Textures in Northeast Black Soil Region

YU Xiaomiao¹, SUN Zhongxiu^{1*}, JIANG Yingying², DUAN Siyi¹, 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)

Abstract: In this study, soils with different bulk densities and textures from the black soil region of Northeast China were investigated. Soil samples impregnated with acetone-diluted unsaturated polyester resin (UPR) at dilution ratios of 0%, 70%, 80%, and 90% were compared through observation under a stereo microscope (10× magnification) and a polarizing microscope (100× magnification). Based on the observations, evaluation criteria for impregnation effectiveness were established, and optimal impregnation protocols for soils with different bulk densities and textures were determined. The results demonstrated that qualified micro-morphological samples should exhibit good cutting integrity, surface damage resistance, and pore-filling completeness when observed under a stereo microscope. For optimized soil impregnation protocols, bulk density-specific selection dictated that soils with bulk density $>1.70\text{ g/cm}^3$ or within $1.40\sim 1.50\text{ g/cm}^3$ should utilize 191[#] UPR diluted with 90% acetone, while those with bulk density <1.20 , $1.30\sim 1.40$, or $1.50\sim 1.70\text{ g/cm}^3$ required 80% acetone-diluted 191[#] UPR, and soils in the $1.20\sim 1.30\text{ g/cm}^3$ range should employ neat 191[#] UPR. Texture-dependent optimization specified that silt-textured soils need 196[#] UPR diluted with 90% acetone, silty loam and loam-textured soils necessitate 80% acetone-diluted 191[#] UPR, and sandy loam-textured soils should use undiluted 191[#] UPR. In conclusion, these methods can enhance sample preparation efficiency and improve section quality score, thus can provide methodology for high-quality soil micro-morphology analysis, critically advancing mechanistic understanding of impediment layer development in Mollisols in northeast China.

Key words: Northeast black soil region; Soil micromorphology; Impregnation solidification method; Soil thin sections

①基金项目: 国家自然科学基金面上项目(42277285)、国家重点研发计划项目(2023YFD1500101)、辽宁省“兴辽英才计划”青年拔尖人才项目(XLYC2203085)、辽宁省教育厅基本科研项目(一般项目)(JYTYB2024007)和辽宁省科学技术计划项目(2022JH2/101300167)资助。

* 通信作者(zhongxiusun@syau.edu.cn)

作者简介: 于小森(2000—), 女, 辽宁鞍山人, 硕士研究生, 主要研究方向为土壤发生与分类。E-mail: yuxiaomiao1119@163.com

作为我国重要的商品粮生产基地,东北黑土区因其土壤质地疏松、肥力高和保肥保水能力强^[1],在玉米、大豆和粮食生产中占据举足轻重的地位,其产量分别占全国总产量的 30%、56% 和 25%,商品粮供给量占全国供应总量的 1/3,是保障我国粮食安全的重要基石^[2-3]。然而,受自然和人为因素的双重影响,黑土退化问题日益严峻,主要表现为一些区域有机质减少、耕作层变薄、犁底层增厚及物理性质恶化等^[4-5]。此外,近年调查还发现土壤中普遍存在硅粉富集层(即硅质障碍层),该层次土体紧实,植物根系难以穿透,水分和养分运移受阻已成为障碍层^[6-9]。这些紧实层严重制约了东北黑土区农业的可持续发展 and 粮食产能的稳定提升,对国家粮食安全构成了潜在威胁^[10-11]。

土壤微形态研究在微观-超微观尺度上解析土壤结构、物质迁移与赋存特征,是揭示土壤形成过程中物质变化的一种有效手段^[12-15]。土壤微形态研究可用于深入揭示黑土区硅质障碍层微形态特征和演化机制。然而,在制备硅质障碍层微形态土壤薄片的过程中发现,传统的不饱和聚酯树脂固结法^[16]难以充分浸渍土壤样品,导致后续操作受到严重影响,制片成功率低且样片质量差,无法在偏光显微镜下清晰展示土壤的微观结构和组分特征。虽然近年来仍有土壤微形态的研究报道^[17-20],但均未关注土壤微形态薄片的制备技术。土壤质地和容重是影响土壤紧实程度和树脂浸渍效果的两个重要因素。鉴于此,本文利用东北黑土区具有硅质障碍层的不同质地和容重的土壤样品,参考传统的黏质致密土壤薄片的制备方法^[21],比较不饱和聚酯树脂类型和丙酮浸渍液稀释比例的浸渍固化效果,并提出浸渍效果的评价标准,明确不同质地和容重的土壤样品的最适浸渍方案,旨在为从微形态上更为精准地深入揭示东北黑土区硅质障碍层的微观形态特征和形成演变机制奠定基础。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

东北黑土区涵盖黑龙江省、吉林省、辽宁省,以及内蒙古自治区的赤峰市、通辽市、呼伦贝尔市和兴安盟。该区属中温带大陆性半湿润气候区,年均气温介于 $-7\sim 11\text{ }^{\circ}\text{C}$,年均降水量为 $350\sim 1\ 000\text{ mm}$,主要农作物包括玉米、水稻和大豆,熟制为一年一熟。该区域三面环山,中部为广阔平原,全区平均海拔约为 350 m 。主要土壤类型多样,包括黑土、黑钙土、暗棕壤、棕壤、白浆土和草甸土等。

1.2 典型土壤剖面设置与土样采集测定

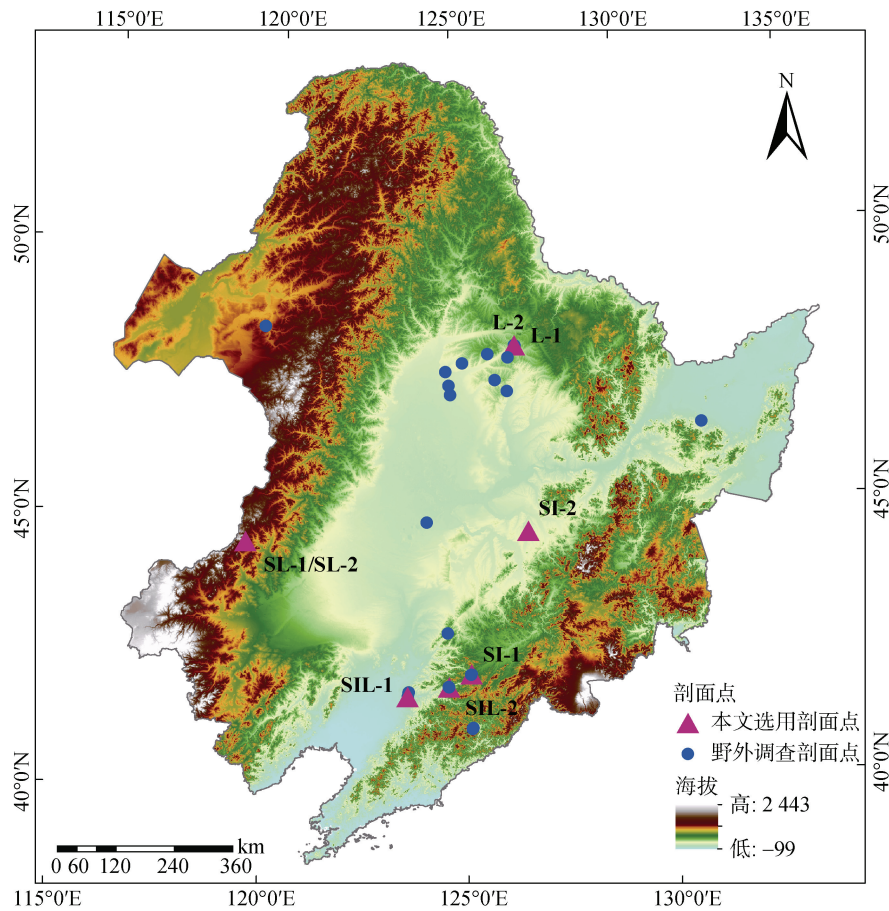
结合第二次全国土壤普查资料(《中国土种志》等)和中国土系调查资料(《中国土系志》等),对东北黑土区发育有硅质障碍层的土壤剖面资料进行整理,在东北黑土区内共采集了 30 个剖面,野外剖面描述共 232 个发生层,每个发生层采集测量粒度样品、测量容重样品以及微形态原状土块样品(图 1)。环刀法测量容重,剔除样品中的草根、小砾石等。用激光粒度仪法^[22](Mastersizer 3000)测定每个土样的粒度^[23],土壤粒径分级和质地分类依据美国农业部制^[24]。对 232 个样品进行初步分析发现,黑土区内主要以粉砂壤土、粉土、壤土、砂质壤土 4 类质地样品为主,容重介于 $0.69\sim 1.72\text{ g/cm}^3$,其中容重 $>1.50\text{ g/cm}^3$ 的原状土样品风干后土体紧实似水泥,难以掰断。为深入研究,选取 4 种主要质地土壤样品,并在粉砂壤土、粉土、壤土质地样品中分别选取了容重 $>1.50\text{ g/cm}^3$ 和 $<1.50\text{ g/cm}^3$ 的样品各 1 个;砂质壤土质地样品容重介于 $1.14\sim 1.23\text{ g/cm}^3$,因此分别选取了容重 $>1.20\text{ g/cm}^3$ 和 $<1.20\text{ g/cm}^3$ 的样品各 1 个。采样点信息见表 1,样品基本状况详见表 2。

1.3 微形态土壤样品浸渍与固化方法

参考土壤微形态制备黏质致密土壤薄片方法的原理^[21],采用丙酮稀释不饱和聚酯树脂的方法,降低树脂的黏稠度,使浸渍剂能够深入样品的细微孔隙内。在丙酮挥发过程中,不饱和聚酯树脂会逐渐取代孔隙中的丙酮成分,从而实现土壤样品的充分浸渍。但为了探究东北黑土区内不同质地、不同容重土壤样品的最适宜制备方法,设计了多种处理方案进行对比研究。

1.3.1 样品干燥 将野外采集的新鲜原状土样品放置于通风处自然风干,随后将其放入烘箱中进行烘干处理。烘干温度设置为 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$,持续 5 h,然后升温至 $80\text{ }^{\circ}\text{C}$,持续 3 h,以确保样品完全干燥。

1.3.2 浸渍剂配制 为探究不同质地土壤样品适用的浸渍方法,选取了 196[#]不饱和聚酯树脂(鑫双利(惠州)树脂有限公司, $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时黏度为 $1\ 000\sim 1\ 200\text{ mPa}\cdot\text{s}$)和 191[#]不饱和聚酯树脂(鑫双利(惠州)树脂有限公司, $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时黏度为 $500\sim 600\text{ mPa}\cdot\text{s}$)两种树脂作为浸渍剂。将不饱和聚酯树脂置于容器内,加入树脂容量 0.5% 的催化剂,顺时针搅拌至树脂与催化剂完全混合,树脂颜色恢复均一透明后,缓缓沿容器壁倒入丙酮进行稀释。丙酮的用量分别设置为树脂容量的 0%、70%、80% 和 90%,以探究不同稀释比例对浸渍效果的影响。



(该图基于中华人民共和国自然资源部标准地图服务网站下载的审图号为 GS(2024)0650 号的标准地图制作，底图无修改)

图 1 土壤采样点位置
Fig. 1 Soil sampling sites

表 1 采样点基本信息

Table 1 Basic information of soil sampling sites

采样点编号	经纬度	海拔(m)	坐落单位名称	土壤类型	土地利用类型
21-N001	41°50'19" N, 123°34'49" E	96.2	辽宁省沈阳市沈河区	棕壤	耕地
21-N011	42°00'25" N, 124°36'29" E	216.2	辽宁省抚顺市清原满族自治县	暗棕壤	耕地
21-N015	42°14'09" N, 125°10'52" E	401.7	辽宁省抚顺市清原满族自治县	暗棕壤	耕地
22-N001	44°50'43" N, 126°44'57" E	199.5	吉林省长春市榆树市城发乡	白浆土	耕地
23-N008	48°17'22" N, 126°35'41" E	280.8	黑龙江省黑河市北安市	黑土	耕地
23-N012	48°17'27" N, 126°35'38" E	265.7	黑龙江省黑河市北安市	黑土	耕地
15-N002	44°40'10" N, 119°24'31" E	828.0	内蒙古自治区赤峰市巴林左旗	栗钙土	牧草地

表 2 土壤样品基本物理特征

Table 2 Basic physical characteristics of soil samples

样品编号	采样点编号	容重(g/cm ³)	总砂粒(%)	总黏粒(%)	总粉粒(%)	土壤质地
SIL-1	21-N001	1.72	10.78	10.84	78.38	粉砂壤土
SIL-2	21-N011	1.47	26.43	14.37	59.20	粉砂壤土
SI-1	21-N015	1.70	7.04	11.50	81.46	粉土
SI-2	22-N001	1.46	8.06	10.94	81.01	粉土
L-1	23-N008	1.58	48.11	12.70	39.19	壤土
L-2	23-N012	1.36	46.26	9.63	44.11	壤土
SL-1	15-N002	1.23	63.03	4.32	32.64	砂质壤土
SL-2	21-N001	1.14	48.30	6.08	45.61	砂质壤土

注：砂粒，>50 μm；粉粒，50~2 μm；黏粒，<2 μm。

1.3.3 催化剂配制 将邻苯二甲酸二丁酯置于容器内,加入其质量 50% 的过氧化苯甲酰作为催化剂,顺时针搅拌至固体完全融化,溶液呈白色糊状,以备后续使用。

1.3.4 样品浸渍与固化 取体积约为 $3\text{ cm}\times 3\text{ cm}\times 4\text{ cm}$ 的干燥原状土样品置于 250 mL 纸杯内。用玻璃棒引流,沿容器壁缓缓倒入配制好的浸渍剂,避免产生大量气泡。为防止丙酮挥发后浸渍剂减少导致土样露出,应确保杯内浸渍剂至少包含 125 mL 树脂。将加入浸渍剂的样品置于通风橱内 48 h,使丙酮充分挥发。期间需用玻璃棒翻动土块 2~3 次,以排出压在土体下部的气泡。将样品置于真空浸渍机中,保持真空度处于 -90 kPa 以下持续 8 h,以排净未挥发的丙酮,之后将样品置于烘箱内进行固化处理。对于用 191[#]

不饱和聚酯树脂浸渍的样品,固化温度为 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 持续 3 h, $75\text{ }^{\circ}\text{C}$ 持续 5 h, $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ 持续 5 h; 对于用 196[#] 不饱和聚酯树脂浸渍的样品,先在 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下固化 2 h,然后在 $75\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下过夜固化,最后在 $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下固化 5 h。

1.3.5 固化效果观察 将冷却后的样品切割成 $3\text{ cm}\times 2\text{ cm}\times 1\text{ cm}$ 的规整形状,置于体视显微镜下进行仔细观察并记录固化效果。

2 结果

2.1 浸渍样品质量评价标准的提出

在样品切割试验中,未经浸渍剂充分固化的样品在刀片摩擦与压力下,与刀片接触部位易发生断裂,导致切割边缘存在缺口,且切割面凹凸不平(图 2)。

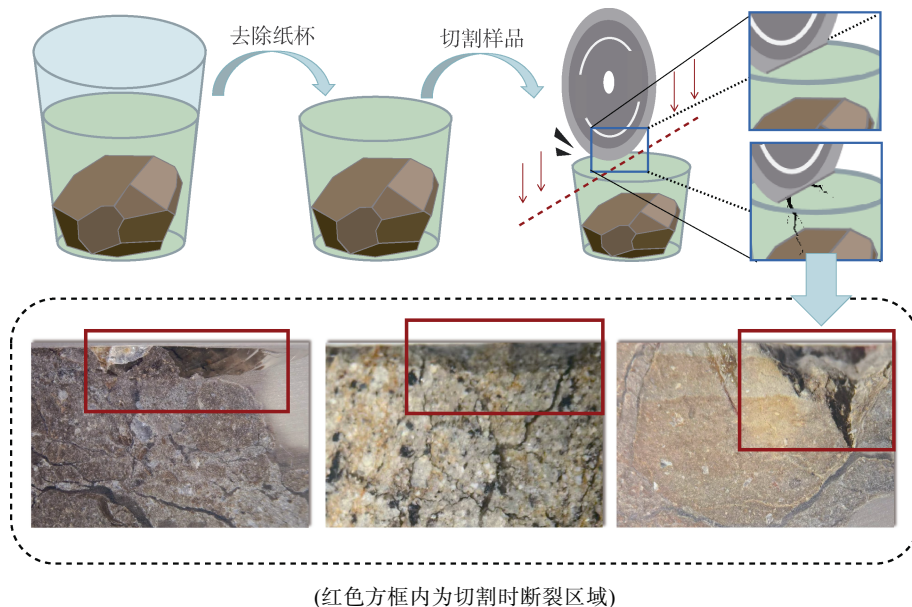


图 2 切割完整性检验流程图及不合格样品特征

Fig. 2 Flow diagram of cutting integrity test and characteristics of unqualified samples

进一步将样品切割为规则长方体时,发现浸渍不足的区域在切割面上呈现未浸透状态,颜色与周围区域明显不同,通常呈块状,经轻微刮擦即出现土屑脱落,造成表面凹凸不平(图 3)。

对于孔隙未完全填充树脂的样品,滴水于其表面后,水沿孔隙渗透,并在体视显微镜下观察到样品表面冒出细小气泡(图 4)。

基于上述 3 种直观现象,建立了基于切割完整性、表面抗损性和孔隙填充性 3 个指标的浸渍样品质量评价标准。浸渍效果优良的样品应同时满足切割不易断裂、边缘整齐、表面平整、刮蹭无土屑脱落、浸湿无气泡冒出以及孔隙完全填充树脂等标准

(图 5)。对制备的所有样品微形态土壤薄片的上述 3 个指标进行统计,结果见表 3,并对表 3 进行分类汇总:①切割完整性,评估浸渍固化后样品边缘是否切割整齐,表面是否平整;②表面抗损性,测试浸渍固化后样品表面经刮蹭后是否有土屑脱落;③孔隙填充性,检查浸渍固化后样品表面在浸湿时是否有气泡冒出。

在表 3 分类结果的基础上,通过样品浸渍效果网络韦恩图(图 6)挑选同时满足上述 3 项标准的样品,并视为合格样品。

表 3 的统计结果和图 6 的浸渍效果网络表明,SIL-1 与 SIL-2 样品使用 90% 树脂容量比例的丙酮稀

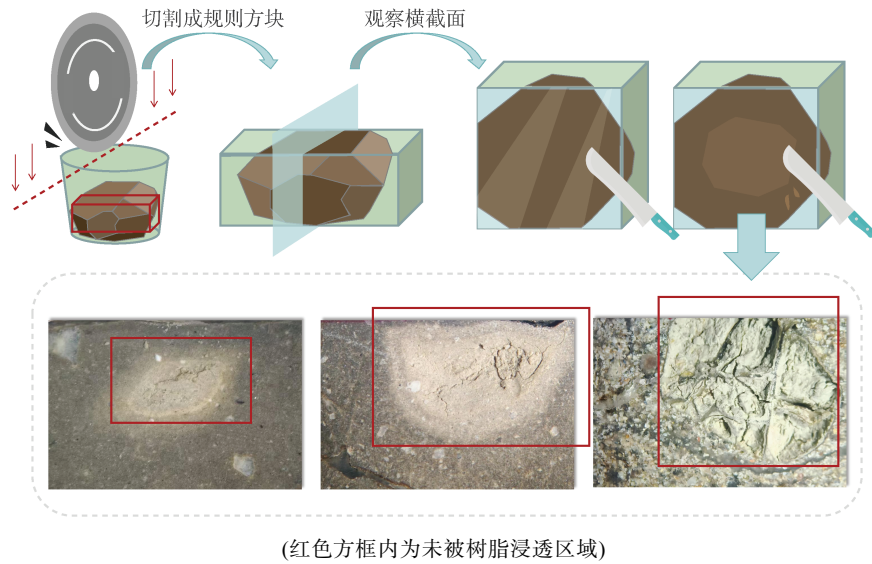


图 3 表面抗损性检验流程图及不合格样品特征

Fig. 3 Flow diagram of surface damage resistance test and characteristics of unqualified samples

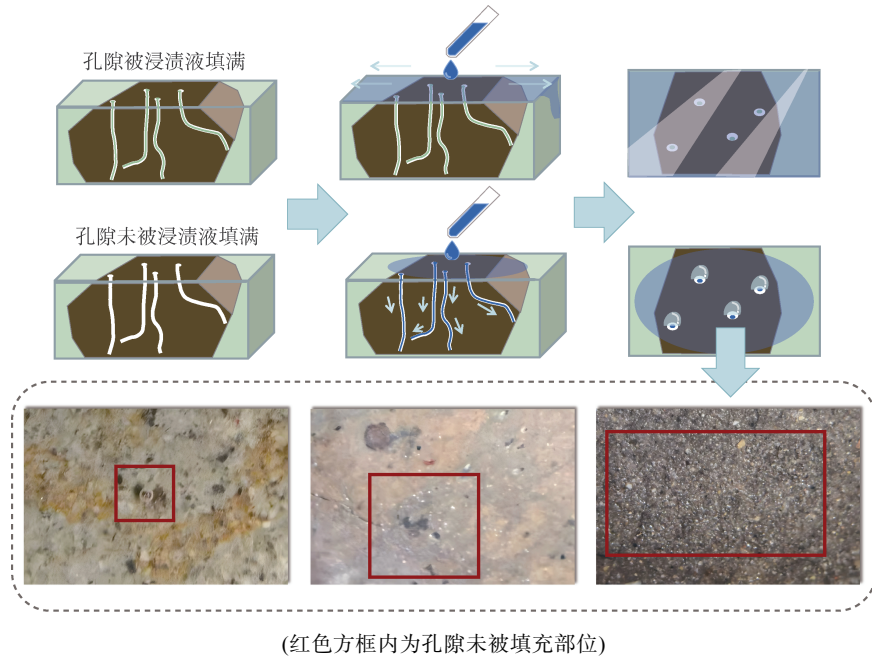


图 4 孔隙填充性检验流程图及不合格样品特征

Fig. 4 Flow diagram of pore filling test and characteristics of unqualified samples

释不饱和聚酯树脂浸渍后固化效果最佳；SI-1 样品以 70% 丙酮稀释 191# 不饱和聚酯树脂或以 90% 丙酮稀释 196# 不饱和聚酯树脂浸渍效果良好，而 SI-2 样品直接使用不饱和聚酯树脂浸渍固化效果最佳；L-1 样品在 80% 或 90% 丙酮稀释 191# 不饱和聚酯树脂，以及不稀释或 70%、80% 丙酮稀释 196# 不饱和聚酯树脂条件下浸渍固化效果均佳；L-2 样品在 70% 或 80% 丙酮稀释 191# 不饱和聚酯树脂，以及不稀释或 70%、80%、90% 丙酮稀释 196# 不饱和聚酯树脂条件下浸渍固化效果良好；SL-1 样品无论采用何种比例的丙酮稀释 191# 和 196# 不饱和聚酯树脂，浸渍固化

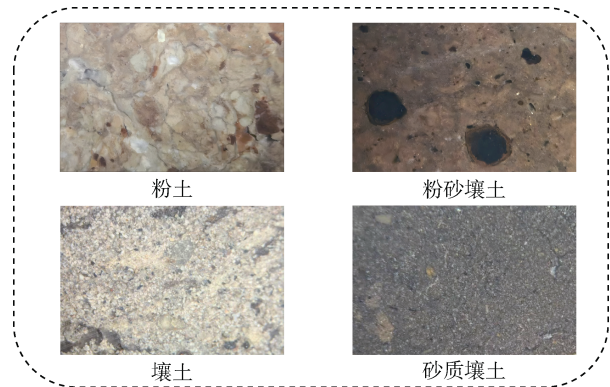


图 5 浸渍效果合格的样品特征

Fig. 5 Characteristics of qualified impregnation effect samples

表 3 样品质量评价标准观察结果
Table3 Observation results of sample quality evaluation criteria

评价指标	样品编号	土壤质地	容重 (g/cm ³)	191 [#] 不饱和聚酯树脂				196 [#] 不饱和聚酯树脂			
				0% 丙酮	70% 丙酮	80% 丙酮	90% 丙酮	0% 丙酮	70% 丙酮	80% 丙酮	90% 丙酮
样品切割完整性	SIL-1	粉砂壤土	1.72	-	-	-	+	+	+	+	+
	SIL-2	粉砂壤土	1.47	-	+	+	+	-	+	-	+
	SI-1	粉土	1.70	-	+	-	-	-	+	-	+
	SI-2	粉土	1.46	+	-	-	-	+	-	+	-
	L-1	壤土	1.58	-	-	+	+	+	+	+	-
	L-2	壤土	1.36	-	+	+	-	+	+	+	+
	SL-1	砂质壤土	1.23	+	+	+	+	+	+	+	+
	SL-2	砂质壤土	1.14	+	+	+	-	-	-	+	+
样品表面抗损性	SIL-1	粉砂壤土	1.72	-	-	-	±	-	-	-	±
	SIL-2	粉砂壤土	1.47	-	-	-	±	-	-	-	±
	SI-1	粉土	1.70	-	±	±	±	±	-	±	±
	SI-2	粉土	1.46	±	-	±	±	±	±	±	±
	L-1	壤土	1.58	-	±	±	±	±	±	±	±
	L-2	壤土	1.36	-	±	±	±	±	±	±	±
	SL-1	砂质壤土	1.23	±	±	±	±	±	±	±	±
	SL-2	砂质壤土	1.14	±	±	±	±	±	±	±	±
样品孔隙填充性	SIL-1	粉砂壤土	1.72	-	-	-	++	++	++	-	++
	SIL-2	粉砂壤土	1.47	++	++	++	++	-	++	++	++
	SI-1	粉土	1.70	-	++	++	++	-	-	-	++
	SI-2	粉土	1.46	++	++	++	++	++	++	-	++
	L-1	壤土	1.58	++	-	++	++	++	++	++	++
	L-2	壤土	1.36	++	++	++	++	++	++	++	++
	SL-1	砂质壤土	1.23	++	++	++	++	++	++	++	++
	SL-2	砂质壤土	1.14	++	++	++	-	-	++	++	-

注：“+”表示切割完整性好，浸渍固化后样品边缘切割整齐，表面平整；“±”表示表面抗损性好，浸渍固化后用力刮蹭表面无土屑，土壤完全被树脂浸渍固化；“++”表示孔隙填充性好，浸渍固化后用水浸湿表面无气泡，孔隙完全被树脂浸渍；“-”表示切割完整性、表面抗损性和孔隙填充性差。

效果均表现优异；SL-2 样品在不稀释或以 70%、80% 丙酮稀释 191[#]不饱和和聚酯树脂，以及 80% 丙酮稀释 196[#]不饱和和聚酯树脂条件下浸渍固化效果最佳。

2.2 不同容重样品微观形态下观察效果

在微观形态下能够观察到肉眼无法观察的细微现象，因此将通过上述标准筛选出的合格样品，经过切片、磨片和粘片后，制成厚度约 30 μm 的土壤薄片置于偏光显微镜下观察(图 7)。仍发现部分样品在偏光显微镜下放大 100 倍后呈灰色，土壤基质模糊不清，颗粒难以分辨(图 8A 和 8B)；基质中出现大量气

泡，改变了土壤自然结构，影响孔隙形态的辨别(图 8C 和 8D)。

在上述薄片制作并检验质量工作后，保证薄片质量前提下，在土壤微形态研究中，常通过偏光显微镜的不同光路系统鉴定孔隙(正交偏光下孔隙为黑色，单偏光下孔隙为白色)，孔隙面积与整幅图像面积之比即为孔隙度。

100 倍偏光显微镜下，容重>1.70 g/cm³的土壤样品，平均孔隙度约为 15.92%，仅可在紧实的土壤基质中观察到一些零星分布的尺寸较小、连通性差的圆

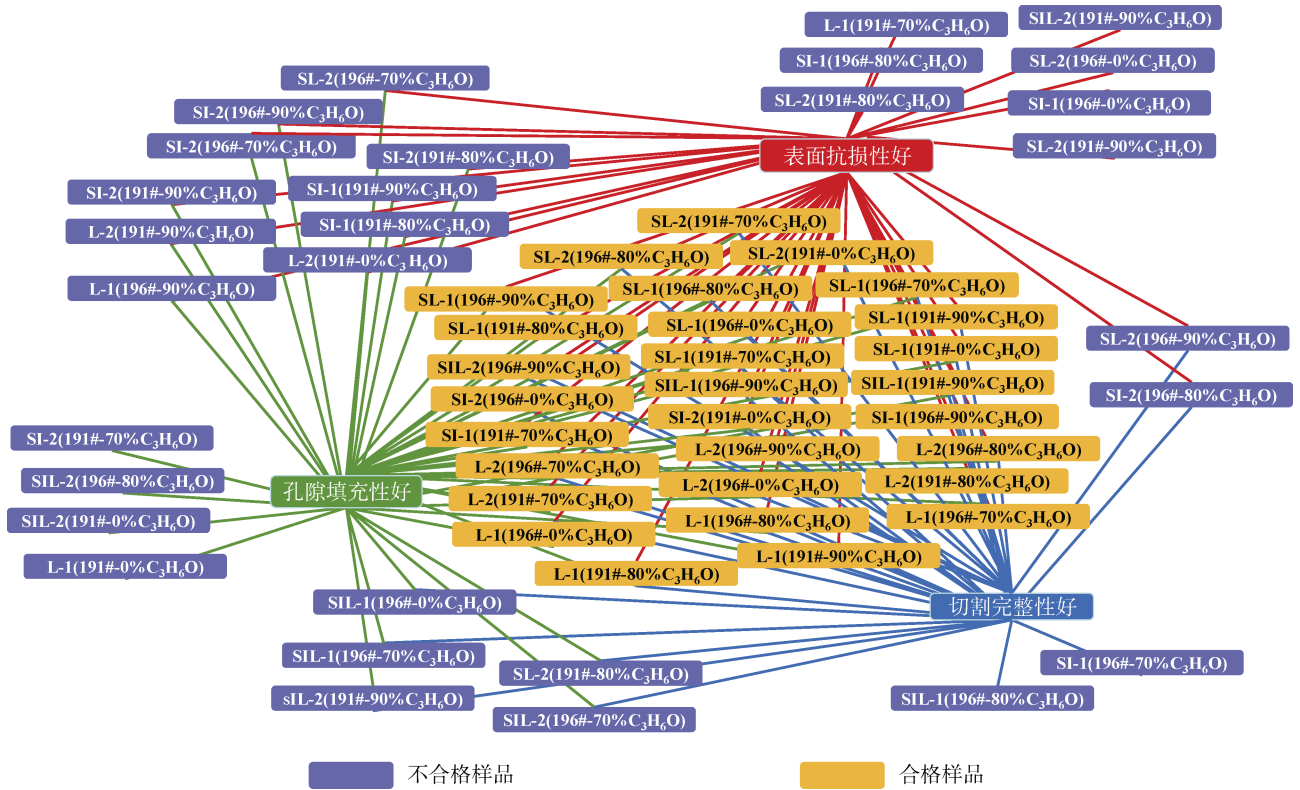


图 6 样品浸渍效果网络韦恩图
Fig. 6 Network Venn Diagrams of sample impregnation results

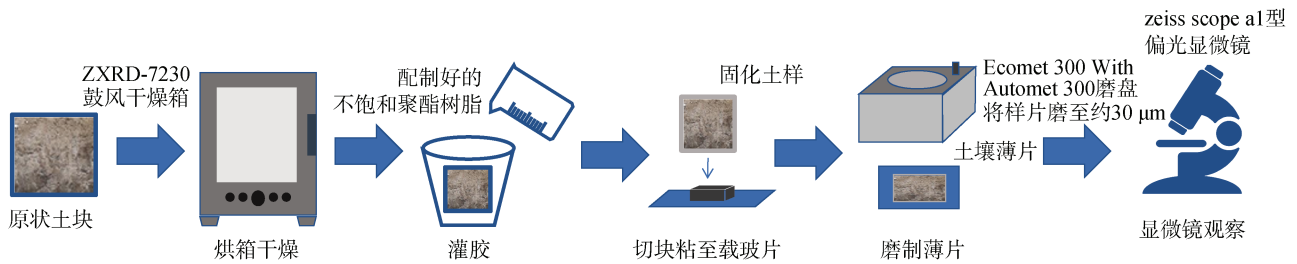


图 7 制备土壤薄片流程
Fig. 7 Flowchart of soil thin section preparation

形孔洞，这种情况下使用 90% 丙酮稀释 191[#]或 196[#] 不饱和聚酯树脂浸渍固化效果最佳(图 9A)。容重介于 1.50~1.70 g/cm³ 的土壤样品，平均孔隙度约为 31.68%，以土壤颗粒堆叠形成的复杂堆集性孔隙为主，使用 80% 丙酮稀释 191[#]不饱和聚酯树脂浸渍效果好(图 9B)。容重介于 1.40~1.50 g/cm³ 的土壤样品，平均孔隙度约为 23.95%，孔隙类型主要为复杂堆集性孔隙，使用 90% 丙酮稀释 191[#]不饱和聚酯树脂、不稀释 196[#]不饱和聚酯树脂浸渍固化效果最佳(图 9C)。容重介于 1.30~1.40 g/cm³ 的样品，平均孔隙度约为 25.56%，同样以复杂堆集性孔隙为主，使用 80% 丙酮稀释 191[#]不饱和聚酯树脂效果最佳(图 9D)。容重介于 1.20~1.30 g/cm³ 的样品，孔隙度约为 31.85%，

孔隙类型以复杂堆集性孔隙为主，少见一些形状不规则的孔洞，使用不稀释 191[#]不饱和聚酯树脂效果最佳(图 9E)。容重<1.20 g/cm³ 的样品，孔隙度为 32.42%，孔隙均为复杂堆集性孔隙，颗粒分布稀疏，孔隙通透，使用 80% 丙酮稀释 191[#]不饱和聚酯树脂效果最佳(图 9F)。

2.3 不同质地样品微观形态下观察效果

尽管 SIL-2 和 SI-2 容重相近，但各粒径比例差异显著，导致适用的浸渍比例截然不同。这表明，除容重外，土壤粒径比例也是影响浸渍效果的重要因素。显微镜下，粉土样品平均孔隙度约为 19.95%，以孔隙边缘光滑的气泡状孔洞为主，孔洞容积小，连通性较差，使用不稀释和 90% 丙酮稀释 196[#]不饱和聚酯

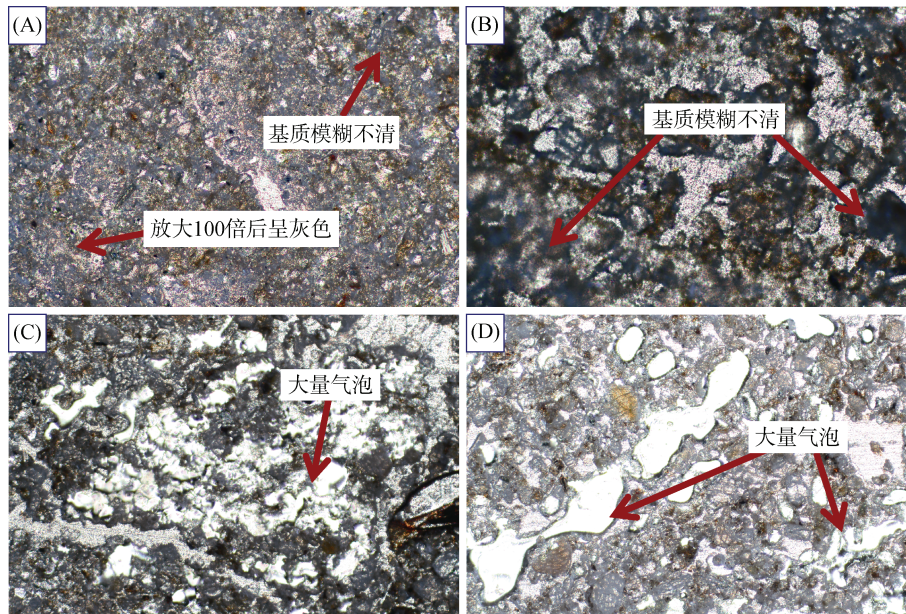
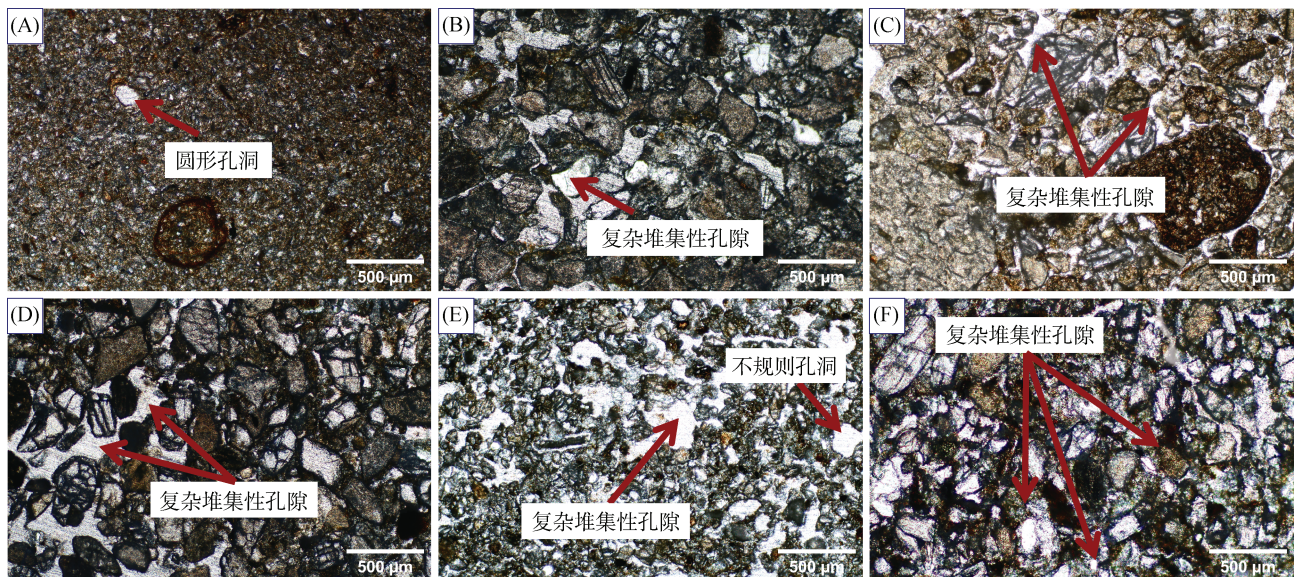


图 8 不合格微形态薄片示意图

Fig. 8 Schematic diagram of unqualified micro-morphology soil thin section



(A. 容重 $>1.70 \text{ g/cm}^3$ 的样品; B. 容重介于 $1.50\sim 1.70 \text{ g/cm}^3$ 的样品; C. 容重介于 $1.40\sim 1.50 \text{ g/cm}^3$ 的样品; D. 容重介于 $1.30\sim 1.40 \text{ g/cm}^3$ 的样品; E. 容重介于 $1.20\sim 1.30 \text{ g/cm}^3$ 的样品; F. 容重 $<1.20 \text{ g/cm}^3$ 的样品)

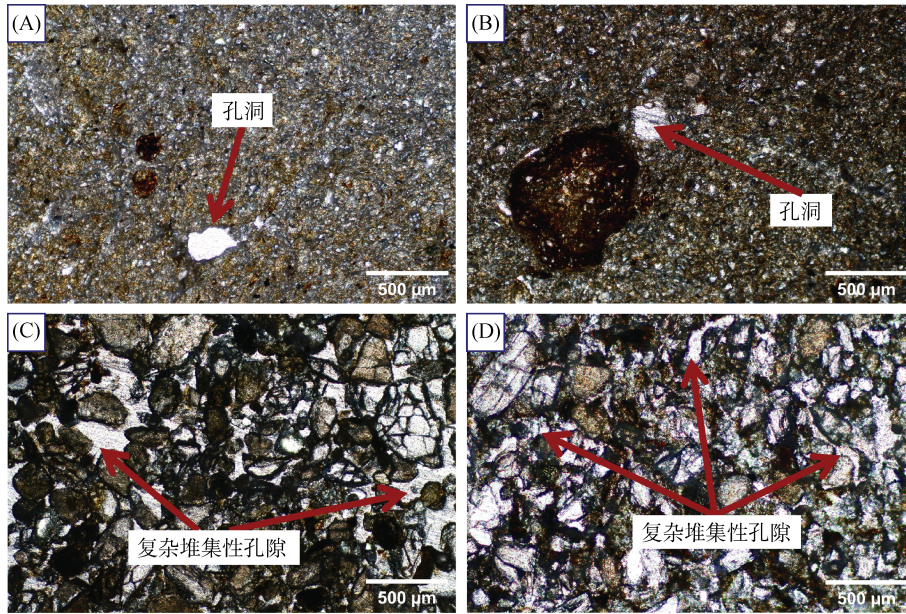
图 9 不同容重土样浸渍效果微观特征(单偏光 10×10)Fig. 9 Impregnation characteristics of soil samples with different bulk densities (plane-polarized light 10×10)

树脂效果最佳(图 10A)。粉砂壤土平均孔隙度约为 19.92%，同样以气泡状孔隙为主，使用 80% 或 90% 丙酮稀释的 191[#] 不饱和聚酯树脂的浸渍效果最佳(图 10B)。壤土样品平均孔隙度约为 28.12%，以形态不规则、边缘粗糙和连通性较好的复杂堆集性孔隙为主，使用 80% 丙酮稀释 191[#] 不饱和聚酯树脂或不稀释 196[#] 不饱和树脂最佳(图 10C)。砂质壤土平均孔隙度为 32.14%，同样以容积大、连通性较好的复杂堆集性孔隙为主，使用 80% 丙酮稀释或直接使用 191[#]

不饱和聚酯树脂的浸渍效果最佳(图 10D)。

3 讨论

土壤孔隙决定了土壤水分、空气和溶质的迁移和渗透能力。在土壤微观形态下可以观察到，孔洞类孔隙常出现于紧实土壤，由土壤细颗粒紧密胶结排布形成，以微孔隙为主，孔隙形态单一，发育差，结构简单，连续性不良；复杂堆集性孔隙大量分布于疏松土壤中，由土壤大颗粒松散分布堆集形成，以大孔隙占



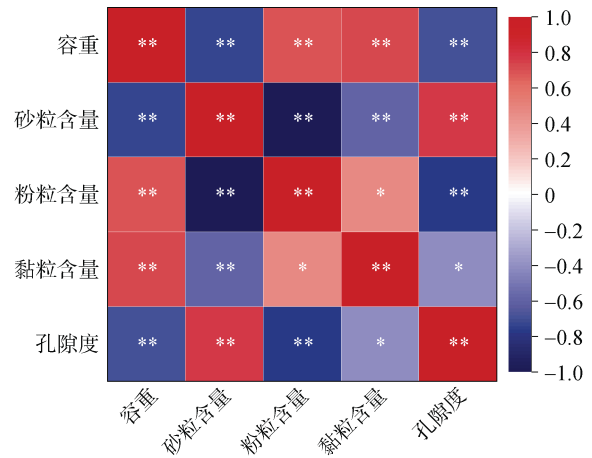
(A. 粉土样品; B. 粉砂壤土; C. 壤土; D. 砂质壤土)

图 10 不同质地土壤样品浸渍效果特征(单偏光 10×10)

Fig. 10 Impregnation characteristics of soil samples with different textures (plane-polarized light 10×10)

主体，孔隙结构复杂，连续性较好。丙酮能有效降低树脂黏度，改善其流动性，使浸渍剂更容易渗入土壤样品的细微孔隙中，且在挥发过程中，丙酮逸出时孔隙内处于负压状态，周围黏度较高的不饱和聚酯树脂会在大气压的作用下被迫流入，取代孔隙中丙酮的位置，实现充分浸渍。使用相同比例的催化剂配制浸渍剂能够保证相同型号的树脂在相同固化条件下的固化速率相同。但配制浸渍剂时使用丙酮越多，挥发时长越长；土壤孔隙组成中微孔隙比例越多，浸渍越难，浸渍时间越长。因此，浸渍方案的选择必须综合考虑浸渍剂配方与土壤孔隙特性之间的相互作用，使浸渍剂渗透速率、丙酮挥发速率和树脂固化速率之间达到平衡，才能实现高质量土壤微形态样品的制备。

本研究主要探讨了东北黑土区不同容重、不同质地土壤对微形态样品浸渍效果的影响。研究发现，土壤孔隙度与土壤容重呈显著负相关关系(图 11)，容重越大，孔隙度越小，孔隙结构越紧密，连通性差，入渗阻力增大，树脂渗透难。高容重样品需通过稀释树脂来降低黏度以提高渗透能力，确保树脂充分渗透土壤孔隙。因此，容重 $>1.70 \text{ g/cm}^3$ 的样品在丙酮稀释比例较高(90%)时，浸渍效果最佳。而低容重样品则因孔隙度较高，对树脂浓度要求较低，适用于低黏度或中等稀释比例的树脂处理。如容重介于 $1.20\sim 1.30 \text{ g/cm}^3$ 的样品，其孔隙度高且结构通透，使用未稀释或中等稀释比例的树脂即可实现有效浸渍。



(图中*、**分别表示相关性达 $P<0.05$ 和 $P<0.01$ 显著水平)

图 11 样品容重，砂粒、粉粒、黏粒含量与孔隙度之间的相关性热力图

Fig. 11 Correlations between bulk density, contents of sand, silt and clay particles, and porosity of soil samples

与前人研究相比，本研究不仅验证了土壤容重和孔隙度对浸渍效果的影响，还进一步探讨了不同质地土壤对适用浸渍比例的具体要求。研究发现，土壤孔隙度与砂粒含量呈显著正相关关系，与粉粒含量、黏粒含量呈负相关关系(图 11)。砂质土壤因大颗粒松散堆叠，形成短距离连通的大孔隙网络，树脂可快速渗透。而黏粒/粉粒含量高的土壤中，细颗粒紧密排列导致微孔隙占比高、连通距离长，需要更高比例的丙酮稀释来降低树脂黏度，以提升渗透效率。例如，粉砂壤土需要 90% 丙酮稀释才能达到较好效果，壤土

需要 80% 的丙酮来稀释,而砂质壤土不需要稀释也能达到很好的浸渍效果。

本研究还注意到,相同质地土壤容重差异大,可能是因为容重受自然因素^[25-27]和人为因素(如耕作活动)^[28-29]的影响,易发生变化,为后续研究提供了新的视角。

浸渍方案的选择不仅需考虑浸渍效果,还应兼顾实验室安全和成本效益。丙酮作为稀释剂虽能提高浸渍效果,但其毒性及潜在健康风险不容忽视。196[#]不饱和聚酯树脂黏度大,常温放置时丙酮不易挥发,对于该型号树脂浸渍的样品,需调整固化温度以延长加热时间,避免残留丙酮沸腾导致样品出现气泡。

此外,本研究提出的 3 个直观判断固化样品质量的条件(边缘切割整齐、表面平整;无土屑掉落;无气泡冒出)虽具有初步参考价值,但尚需进一步探究更多质地类型土壤的最优树脂浸渍方案及其对在偏光显微镜下微形态特征定量表征效果的影响,以完善浸渍效果评价体系,并推动其在土壤学研究中的应用。

4 结论

1)本研究从土壤样品微形态薄片的切割完整性、表面抗损性和孔隙填充性 3 个方面提出了合格浸渍效果的标准。

2)针对不同容重的土壤样品应采取不同的浸渍固化方案。容重 $>1.70\text{ g/cm}^3$ 和介于 $1.40\sim 1.50\text{ g/cm}^3$ 的土壤样品,应选择 90% 丙酮稀释 191[#]不饱和聚酯树脂配制浸渍剂;容重介于 $1.50\sim 1.70$ 、 $1.30\sim 1.40$ 和 $<1.20\text{ g/cm}^3$ 的样品,应选择 80% 丙酮稀释 191[#]不饱和聚酯树脂配制浸渍剂;容重介于 $1.20\sim 1.30\text{ g/cm}^3$ 的样品,应直接使用 191[#]不饱和聚酯树脂配制浸渍剂。

3)针对不同质地土壤样品,应采取不同的浸渍固化方案。对于粉土样品,应选择 90% 丙酮稀释 196[#]不饱和聚酯树脂配制浸渍剂;粉砂壤土、壤土样品,应选择 80% 丙酮稀释 191[#]不饱和聚酯树脂配制浸渍剂;砂质壤土样品,可直接使用 191[#]不饱和聚酯树脂配制浸渍剂。

参考文献:

[1] 丁瑞兴,刘树桐.黑土开垦后肥力演变的研究[J].土壤学报,1980,17(1):20-32.
[2] 王志刚.充分发挥科技创新在保护利用黑土地中的关键支撑作用[J].中国科学院院刊,2021,36(10):1127-1132.

[3] 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.
[4] 中国科学院.东北黑土地白皮书(2020)[R/OL].(2021-07-09)[2025-03-01]https://www.cas.cn/yw/202107/t20210709_4797892.shtml.
[5] 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].2024(11):1401-1405.
[6] 隋跃宇,焦晓光,李建维.中国土系志·吉林卷[M].北京:科学出版社,2019.
[7] 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.
[8] 王秋兵,韩春兰,孙福军,等.中国土系志·辽宁卷[M].北京:科学出版社,2020.
[9] 于秀春,孙仲秀,姜荧荧,等.东北黑土区主要土壤障碍层的研究进展与展望[J].土壤,2025,57(3):498-509.
[10] 邹文秀,韩晓增,陆欣春,等.肥沃耕层构建对东北黑土区旱地土壤肥力和玉米产量的影响[J].应用生态学报,2020,31(12):4134-4146.
[11] 崔宁波,王婷,董晋.“双碳”目标下东北黑土区耕地利用生态效率时空格局与演变趋势[J].水土保持研究,2024,31(1):335-344.
[12] 张保华,陶宝先,曹建荣,等.黄河下游冲积平原潮土土壤孔隙微形态特征[J].干旱区地理,2020,43(3):687-693.
[13] 王琳怡,朱丽东,于红梅,等.加积型红土剖面成壤特征及网纹化成因的土壤微形态证据[J].土壤学报,2022,59(5):1306-1320.
[14] 唐克丽,贺秀斌.土壤微形态学及其应用[M].北京:科学出版社,2022.
[15] 毛学刚,刘秀铭,赵景波,等.黄土高原西部上新统风成红粘土的微形态特征及其古环境意义[J].第四纪研究,2023,43(5):1172-1185.
[16] 中国科学院南京土壤研究所.土壤专报-第43号——土壤微形态专辑[M].北京:科学出版社,1989.
[17] 王练,毛学刚,刘秀铭.黄土与风成红黏土土壤微形态对比研究——以西安和董湾为例[J].亚热带资源与环境学报,2025,20(1):99-108.
[18] 李春霞,张海,庄奕杰.盘龙城遗址商代灰坑的土壤微形态观察[J].江汉考古,2024(5):125-132.
[19] 查理思,吴克宁,魏洪斌,等.仰韶村遗址文化层土壤微形态研究[J].土壤,2023,55(5):1114-1121.
[20] 周声芳,刘秀铭,毛学刚,等.美国 Bryce 峡谷古新统-始新统红色层古土壤微形态特征及其指示意义[J].第四纪研究,2022,42(2):529-540.
[21] 中国科学院南京土壤研究所土壤微形态实验室.制备粘质致密土壤薄片的方法[J].土壤,1977,9(4):213-215.
[22] 张甘霖,龚子同.土壤调查实验室分析方法[M].北京:科学出版社,2012.
[23] Brady N C, Weil R R. The nature and properties of soils[M]. 14th ed. Upper Saddle River: Pearson Education, 2008.
[24] Bartoli F, Genevois-Gomendy V, Royer J J, et al. A multiscale study of silty soil structure[J]. European Journal of Soil Science, 2005, 56(2): 207-224.

- [25] 张靖, 冉义国, 马东豪, 等. 狗牙根根系生长动态特征及其对土壤孔隙演变的影响[J]. 土壤学报, 2025, 62(1): 54–68.
- [26] 王乾坤, 张歆, 杨伟, 等. 亚热带崩岗侵蚀区不同植被恢复类型对土壤团聚体孔隙特征的影响[J]. 土壤学报, 2025, 62(5): 1282–1293.
- [27] 郭志霞, 刘任涛, 冯永宏, 等. 不同降水对荒漠灌丛土壤理化性质和地表植被分布的影响[J]. 水土保持通报, 2021, 41(1): 56–65.
- [28] 祝飞华, 王益权, 石宗琳, 等. 轮耕对关中一年两熟区土壤物理性状和冬小麦根系生长的影响[J]. 生态学报, 2015, 35(22): 7454–7463.
- [29] 杜明慧, 李伯欣, 余英德, 等. 保护性耕作对南方双季稻田土壤性质及产量的影响[J]. 生态环境学报, 2025, 34(4): 521–533.

(责任编辑: 毛小芳)