

DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2024.02.003

罗雪娇, 王志春, 杨帆. 苏打盐碱土壤黏粒分散特征研究进展. 土壤, 2024, 56(2): 255–263.

苏打盐碱土壤黏粒分散特征研究进展^①

罗雪娇^{1,2}, 王志春¹, 杨帆^{1*}

(1 中国科学院东北地理与农业生态研究所, 长春 130102; 2 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 本文系统总结了黏粒分散特征表征方法, 归纳可用于表征黏粒分散程度的主要指标; 概述了黏粒分散对土壤物理性质的影响; 重点阐述影响黏粒分散的因素, 包括: 土壤酸碱性、离子浓度、土壤有机质、农业管理措施、外源物质施用等; 提出了黏粒分散控制方法。根据 Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 不同分散和絮凝能力得出, 离子性指数、电荷稀疏性、净分散量、土壤结构稳定性的阳离子比和阳离子交换量等是表征黏粒分散特征的常用指标; 电动电位势和浊度与黏粒分散存在密切联系, 有待进一步应用于苏打盐碱土壤黏粒分散研究。黏粒分散破坏土壤结构, 导致土壤水力传导率下降, 严重阻碍土壤正常功能。黏粒分散机理: 不同阳离子价态不同和不同土壤溶液浓度不同导致黏粒表面正电荷层厚度不同, 引起黏粒之间范德华吸引力和静电排斥力作用效果差异, 正电荷层较厚导致黏粒分散。通过明晰黏粒分散机理, 有助于掌握影响黏粒分散的主要因素, 抑制苏打盐碱土壤黏粒分散, 改善土壤结构, 以期对苏打盐碱土治理提供理论参考和技术指导。

关键词: 黏粒分散; 指标表征; 苏打盐碱土; 盐碱地改良; 土壤结构

中图分类号: S156.4 **文献标志码:** A

Research Progress on Clay Dispersion Characteristics of Saline-sodic Soil

LUO Xuejiao^{1,2}, WANG Zhichun¹, YANG Fan^{1*}

(1 *Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130102, China*; 2 *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

Abstract: This paper systematically summarized characterization methods for clay dispersion and outlines the main indicators used to measure the degree of dispersion. It also described the effects of clay dispersion on soil physical properties and discussed the factors that influence clay dispersion, including soil acidity, ion concentration, soil organic matter, agricultural management practices, and the application of exogenous substances. Finally, this paper proposed control methods for clay dispersion. Analysis showed that commonly used indicators for characterizing clay dispersion are ion exchangeability, charge sparsity, net dispersion amount, cation ratios, and cation exchange capacity, based on the different dispersion and agglomeration capabilities of Na^+ , K^+ , Ca^{2+} and Mg^{2+} . Meanwhile, the electrical potential and turbidity are closely related to clay dispersion and warrant further investigation in the study of clay dispersion in saline-sodic soil. Clay dispersion destroys soil structure, reducing soil hydraulic conductivity soil and severely hindering its normal function. The mechanism of clay dispersion is influenced by the differences in the valence states of cations and different concentrations of soil solution, which affect the thickness of the positive layer on clay surfaces and the Van der Waals attraction and electrostatic repulsion between clay particles. Further understanding the mechanism of clay dispersion can help to identify the main factors affecting it, suppress clay dispersion in saline-sodic soil, improve soil structure, and provide theoretical and technical guidance for the remediation of saline-sodic land.

Key words: Clay dispersion; Characterization indicators; Saline-sodic soil; The amelioration of saline-sodic soil; Soil structure

土壤黏粒分散指的是黏土颗粒遇水相互分离的行为。土壤质地越黏, 土粒越分散。黏粒分散对土壤结构的危害巨大, 能够引起土壤团聚体的崩解, 造成土壤孔隙堵塞, 通气透水性变差, 根系伸展困难, 导致土壤结

①基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFD1500501)、国家自然科学基金项目(41971066)和吉林省与中国科学院科技合作高技术产业化专项资金项目(2022SYHZ0018)资助。

* 通讯作者(yangfan@iga.ac.cn)

作者简介: 罗雪娇(2001—), 女, 重庆酉阳人, 硕士研究生, 主要从事苏打盐碱地黏粒分散机理研究。E-mail: luoxuejiao21@mailsucas.ac.cn

构稳定性下降^[1], 耕作阻力加大, 更容易发生土壤侵蚀现象。钠质土壤通常具有高浓度的可交换钠离子, 黏粒表面大部分负电荷被钠离子中和, 扩散双电层厚度增大, 阻碍黏粒絮凝行为的发生^[2], 引起黏粒分散。苏打盐碱土黏粒含量高, 可交换性钠浓度高, 使得黏粒几乎完全分散, 地表湿时膨胀泥泞, 干时收缩板结坚硬^[3], 土壤结构性极差, 通透性极低, 物理性质恶劣。东北松嫩平原是世界苏打盐碱地集中分布区之一^[4], 盐碱地土壤多数属于内陆苏打盐碱型。根据土壤盐化和碱化程度, 苏打盐碱土可分为草甸盐土、草甸碱土和盐碱化土壤^[5]。在全球范围内, 土壤盐碱化是威胁干旱半干旱地区农业生产、粮食安全和可持续性的最重要问题之一, 加深对苏打盐碱土壤黏粒分散特征的研究很有必要。

阐明苏打盐碱土黏粒分散机理, 可为抑制土壤黏粒分散、增加土壤凝絮、改善土壤结构提供理论指导; 有利于提高苏打盐碱土壤生产力, 提高农业生产经济效益。目前关于黏粒分散的研究主要集中在环境化学领域^[6-8], 对于农业领域土壤黏粒分散机理的研究还不够深入。本文通过系统总结土壤黏粒分散特征表征方式、黏粒分散行为产生的物理影响、土壤黏粒分散主要影响因素以及土壤黏粒分散抑制 4 方面内容, 从微观和宏观两个角度表述苏打盐碱土壤黏粒分散的主要特征, 以期明晰土壤黏粒分散机理并加以应用, 为苏打盐碱土壤黏粒分散障碍提供解决思路, 提高土壤质量和土地生产力。

1 土壤黏粒分散特征表征方法

土壤黏粒分散是指黏土颗粒在遇水条件下相互分离的行为, 本质上是一种电荷失衡引起的现象。DLVO 理论常用于解释胶体稳定性, 范德华吸引力和双电层排斥力相互作用的相对强度决定了胶体系统是否稳定^[9]。黏粒可视为一种胶体, 黏粒表面电荷与土壤黏粒分散行为息息相关, 黏土颗粒表面双电层厚

度增加, 导致颗粒间静电排斥力远大于范德华引力, 引起黏粒分散(图 1)。土壤溶液中电解质的 pH、种类和浓度通过改变黏土颗粒的净表面电荷引起双电层厚度的改变来影响土壤黏粒分散, 而弥漫性双层的压缩通过增加离子强度对黏粒的絮凝过程产生决定性影响^[10]。目前土壤黏粒分散特征存在多种表征方式。离子性指数可用来表征黏粒表面电荷与黏粒行为之间的关系。黏土阳离子键中阳离子的离子性指数与悬浮液浊度、动电电位势存在显著相关性, 表明这些键中的离子性指数决定着水与黏土颗粒的相互作用, 使得黏土颗粒表面双电层厚度增加, 从而引起黏粒团聚体的崩解^[11]。电荷稀疏性指数指的是阳离子水合离子半径和价态之比, 可用来量化阳离子对土壤黏粒分散的影响。通过对比研究发现, 在 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 行为相似的情况下, 电荷稀疏性指数较离子性指数更能准确预测黏粒分散度^[12]。 Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 具有不同的分散和絮凝能力, 基于此, 提出一种描述分散性土壤的新概念: 根据已分散溶液中的阳离子浓度和它们的絮凝能力, 定义净分散量为分散量和絮凝量之间的差值; 净分散量为正时双电层厚度增加, 黏粒趋于分散; 净分散量为零或负值时双电层厚度减小, 黏粒不分散。该概念解决了以往文献中关于有机质、黏土矿物学、可交换性离子组分和电解质浓度对黏粒分散影响的争议^[13]。土壤结构稳定性的阳离子比结合了 Na^+ 和 K^+ 的不同分散能力以及 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 的不同絮凝效果, 因而也被用于分散性土壤的研究^[14]。对于一种具体的土壤类型, 如砂质壤土, 其上层以 Na-Ca 系统为主, 黏粒较容易发生分散和移动, 这时可通过评估阳离子交换量的降低程度和渗滤液中黏粒的含量变化来衡量土壤黏粒分散情况^[15]。此外, 透光率百分比亦可作为黏粒絮凝分散行为的量度。土壤溶液中溶解的有机物质可增强土壤黏粒的分散程度^[16], 表现为较小的透光率百分比。

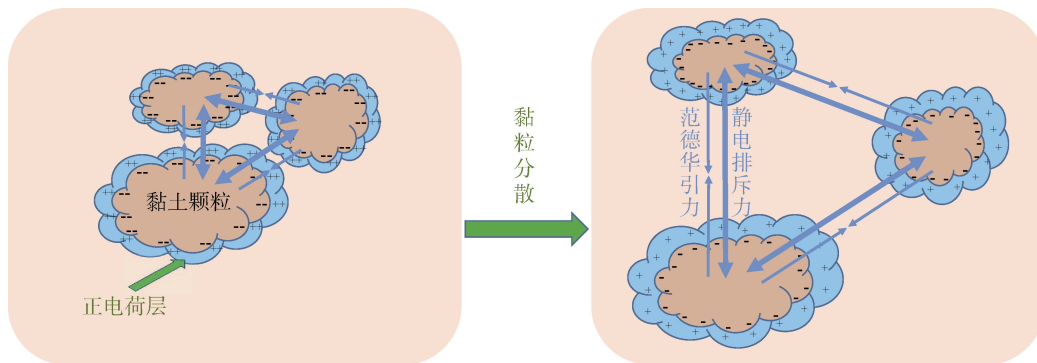


图 1 黏粒分散示意图

Fig. 1 Schematic diagram of clay dispersion

以往大量研究表明, 表征土壤黏粒分散特征的指标多是与电荷有关, 微观上表现为 Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 这 4 种主要阳离子不同的分散和絮凝能力引起黏粒双电层厚度的变化, 宏观上表现为土壤黏粒的分散和絮凝行为。通过归纳总结, 离子性指数、电荷稀疏性、净分散量、土壤结构稳定性的阳离子比和阳离子交换量等指标, 能较好表征土壤黏粒分散特征(表 1)。其中离子性指数与悬浮液浊度和 zeta 电位之间存在的显著相关性表明, 浊度和 zeta 电位亦可直接用于表征土壤黏粒分散特征。进一步的试验研究发现有机质与土壤黏粒分散之间存在某种关系, 而有机质在土壤中的含量能用透光率百分比进行良好表征。因此透光率百分比有时也被用于表征土壤黏粒分散特征。除了上述表征指标和方法, 更多方法有待于引入, 以对土壤黏粒分散特征进行表征。

表 1 土壤黏粒分散特征表征方法
Table 1 Characterization methods of soil clay dispersion characteristics

表征指标	特点
离子性指数	与悬浮液浊度和 zeta 存在显著相关性
电荷稀疏性	较离子性指数更能准确预测黏粒分散度
净分散量	根据 Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 不同分散和絮凝能力计算, 解决以往文献争议, 简洁易懂
土壤结构稳定性的阳离子比	与净分散量原理类似, 结合 Na^+ 、 K^+ 分散能力和 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 絮凝效果
阳离子交换量	对于具体土壤适用, 可根据阳离子交换量评估黏粒分散情况

2 黏粒分散对土壤物理性质的影响

2.1 土体结构

黏粒分散严重影响土壤物理性质, 主要表现为通过影响土体结构, 继而对土壤水力特性造成不利影响。黏粒的膨胀和分散是在交换性钠存在条件下引起苏打盐碱土壤水力特性退化的主要过程。黏粒膨胀现象随着黏粒百分比、可交换性钠离子百分比和总电解质浓度的降低而加强^[17]。高黏粒含量的蒙脱石和伊利石呈现层状结构, 具有较强的吸水能力, 黏粒吸水膨胀不仅会让地表径流更易形成, 还会使地表径流的渗透深度降低^[18]。水分散性黏粒在遇到季节性洪水时会大量分散在水中, 引起土壤团聚体的崩解, 待到水退去后, 土壤就会板结变硬。水分散性黏粒含量与总黏粒含量呈正相关, 影响着黏粒的分散率和絮凝速率^[19]。对以色列不同黏粒含量土壤的研究表明, 受

污水灌溉的土壤在形成密封层和预防侵蚀过程中的适用机制与土壤黏粒含量密切相关^[20], 表明不同黏粒含量对土体结构的影响程度存在一定差异。

黏粒分散影响土体结构主要是通过其自身的遇水膨胀特性实现的。水分散性黏粒含量的高低与黏粒分散程度呈正相关, 表现为土体中较高的水分散性黏粒含量引起水流的快速流动和低速下渗以及土壤的板结变硬, 导致土体结构恶化, 不利于土壤的长久利用。

2.2 土壤饱和导水率

黏粒分散对土壤物理性质的影响除了表现在宏观的土体结构上, 还进一步表现为土壤水分传导性能的变化。通过土柱淋洗试验研究黏粒膨胀、分散和迁移对土壤饱和导水率(K_s)的影响发现, 渗滤液中黏粒的分散程度不一定对应 K_s 的减少程度, 低密度土柱中的 K_s 较高密度土柱高, 高孔隙度和大孔径有利于黏粒在土柱中的迁移^[21]。其原理可解释为黏粒水膜在 Na^+ 的诱导下遇水变厚, 加上黏粒自身和它对粉砂粒胶结强度的降低, 从而使得土壤变得分散^[22]。因此土壤中黏粒含量高将促进土壤团聚体的崩解, 黏粒的膨胀和分散会导致土壤 K_s 的滞后^[23]。

试验表明黏粒的膨胀和分散过程使得土壤中大孔隙减少, 引起 K_s 刚开始时的快速下降。当电解质浓度低于临界凝絮浓度时, 黏粒分散行为及其导致的孔隙堵塞现象就变得尤为重要^[24]。土壤表层的黏粒分散通过降低淋溶土表结壳的导水率来增加导水的阻力^[25]。因此当土壤中黏粒含量较高时会导致水传输孔被密封, 水入渗量减少^[26], 从而使得土壤的总入渗量降低。

黏粒分散对土壤饱和导水率的影响包括时间和空间两方面。时间上直观表现为刚开始时 K_s 的快速下降, 而后出现 K_s 滞后的情况; 空间上表现为增加土壤表层水下渗的阻力, 使得土壤的总入渗量显著降低。出现这种情况的原因主要是黏粒分散、膨胀和迁移过程中堵塞土壤孔隙, 导致土壤孔隙度显著降低, 孔径显著减小, 地表水下渗受阻, 从而表现出饱和导水率下降或滞后的状态。

3 黏粒分散影响因素

3.1 土壤酸碱性

pH 为溶液中 H^+ 浓度的负对数, 碱度是指水中能与强酸发生中和作用的物质的总量, 工程上多用总碱度表示, 二者均可用于衡量溶液酸碱性。大量文献表明土壤酸碱性显著影响土壤黏粒分散状况, 而 pH

和总碱度常用于表示土壤的酸碱度。

黏粒分散受单一或复合因素的影响很大, pH、石英含量、土壤质地和钠吸附率均能对土壤黏粒分散构成影响^[27]。土壤溶液和灌溉水的 pH 显著影响着黏粒的分散行为^[28]。研究表明, 随着 pH 的升高, 黏粒趋于分散, 临界凝絮浓度呈指数增长^[29]。Gupta 等人^[30]的研究表明总碱度的增加会增加土壤黏粒的分散度。黏粒分散率随着总碱度的增加而增加, 且增加的程度因土壤类型而异。土壤质地较细, 黏粒分散率较高。相较于氯化物土壤, 硫酸盐土壤对总碱度的敏感度更高, 表现为同样的总碱度变化, 硫酸盐土壤黏粒分散率的变化程度更大^[31]。

土壤酸碱性显著影响土壤黏粒分散。多种研究表明, pH 和总碱度与黏粒分散之间存在显著正相关关系, 黏粒分散程度随着 pH 的升高而增加, 随着总碱度增大而增加。但大多时候土壤黏粒分散并不受单一 pH 或总碱度的影响, pH 和离子浓度、总碱度和土壤类型的多重作用会对土壤黏粒分散造成复合影响, 因此在研究的时候要注意控制变量, 在一定前提条件下探究土壤黏粒分散的机理。

3.2 离子浓度

离子浓度对苏打盐碱土壤黏粒分散的影响较大, 可表征为单离子化合物浓度的影响, 亦可表示为多离子化合物浓度的叠加效应。土壤中交换性钠离子百分比的增加会使得黏粒的分散性趋于增加, 土壤团聚体的稳定性趋于降低^[32]。Gupta 等人^[30]的研究发现钠吸附比的增加会增加黏粒的分散度。土壤溶液和灌溉水的离子浓度显著影响着黏粒的分散行为, 其中阳离子的种类对黏粒絮凝能力的影响不同, 表现为 $Al^{3+} > Ca^{2+} > Mg^{2+} > K^+ > Na^+$ ^[28]。这是因为土壤中较高的 Ca^{2+} 浓度能够使得黏粒胶体和带负电荷的有机材料之间相互吸引, 胶体在静电力的作用下发生凝絮形成稳定的凝聚体^[33]。 K^+ 可以降低黏粒分散度并提高土壤团聚体的稳定性, 诱导与土壤结构特性相关的黏粒发生絮凝或分散行为。因此钾吸附率和交换性钾百分比可作为评价钾对土壤结构稳定性影响的重要指标^[34]。通过测定用高钾废水灌溉的土壤的水力传导率、浊度、zeta 电位、孔隙度和孔隙连通性, 结果表明土壤中高浓度的 K^+ 会引起土壤结构的分散, 但其影响程度较 Na^+ 小^[35]。 K^+ 水化半径较 Na^+ 大, 且土壤对 K^+ 的选择性较 Na^+ 强, 使得土壤分散电荷随着 K^+ 浓度的增加而增加, 黏粒分散性增强^[36]。对 4 个热带土壤的研究也得出了类似的离子化合物种类影响黏粒分散程度结论, 不同的是所配置溶液使用的化合物

是碱性氢氧化物。试验表明随着氢氧化物溶液浓度的增加, 黏粒趋于分散, 土壤团聚体的稳定性和饱和导水率降低, 且 NaOH 对土壤结构的负面影响较 KOH 强^[37]。 K^+ 和 Na^+ 的比例也很重要, 钾钠比例的增加影响土壤结构并引起黏粒分散, 分散的黏粒向土壤大孔隙迁移, 使得土壤孔径分布向中孔和微孔变化, 形成较差的土壤结构^[38]。此外, 土壤中的铁氧化物也对土壤黏粒的分散和聚合存在影响^[39]。对越南红河三角洲稻田的相关研究表明, 即使高阴离子浓度能够通过提高黏粒表面电荷的负值来促进反凝絮过程, Fe^{3+} 和 Ca^{2+} 依旧是影响黏粒絮凝的主要因素^[40]。

黏粒分散存在于多种类型土壤中, 其中苏打盐碱土中的黏粒分散性较强, 研究价值较高。通过对印度卡纳塔克南部受盐影响的黑土中碱性对黏粒分散影响的研究发现, 交换性 Na^+ 含量与黏粒分散度呈现显著正相关关系, 而交换性 Ca^{2+} 含量与黏粒分散度呈现显著负相关关系, 研究还表明交换性 Na^+ 含量和土壤有效水对黏粒分散的预测效果较好^[41]。对英国东部盐渍土稳定性的研究也表明交换性 Na^+ 百分比是影响土壤稳定性的最大因素, 且试验得出了表土和底土的交换性 Na^+ 百分比阈值分别为 5% 和 10%, 超过此阈值可能会出现黏粒分散问题^[42]。

影响土壤黏粒分散的离子主要是 Na^+ 、 Ca^{2+} 和 K^+ , 一些铁氧化物也影响着土壤黏粒分散。多数研究表明, Na^+ 较 K^+ 对土壤黏粒分散的影响程度更深, 可以预测在 Na^+ 、 K^+ 浓度相同的情况下, 含 Na^+ 的土壤黏粒分散程度更高。

3.3 土壤有机质

土壤有机质在高温作用下会发生矿化, 分解成简单无机化合物, 其分子量降低, 分子结构发生改变, 使得土壤胶体稳定性下降, 从而导致土壤黏粒分散^[39]。通过研究影响干旱地区土壤黏粒分散和团聚体稳定性的因素, 结果发现有机质对土壤结构起着重要作用^[43], 有机质对苏打盐碱土壤黏粒分散的影响大部分是以离子浓度为前提条件的。土壤中的有机质组分如胡敏酸对 Na^+ 饱和的土壤和矿物黏粒具有较强的分散作用, 矿物类型对分散作用强度也存在一定影响^[44]。相关研究还表明土壤有机质对黏粒的分散作用与黏粒悬浮液中 Na^+ 和 Ca^{2+} 的浓度有关, 当这两种离子浓度较低时, 土壤有机质能有效促进高纯矿物和土壤中黏粒的分散; 当这两种离子浓度较高时, 有机质将大大降低对土壤黏粒分散的影响。其中有机质含量高的土壤较有机质含量低的土壤临界凝絮浓度下降程度大, 且与 Ca^{2+} 相比, Na^+ 作用下胡敏酸

对黏土矿物分散度的影响更大^[45]。李小刚等^[32]发现有机质的加入能改善由于土壤中含盐量和交换性 Na^+ 百分比增加引起的土壤黏粒分散, 使得土壤团聚体稳定性增强。对越南红河三角洲稻田的相关研究表明, 腐殖酸能够通过提高黏粒表面电荷的负值来促进黏粒分散过程^[40]。对尼日利亚北部风成土的研究表明, 土壤有机碳和水分散性黏土含量呈显著正相关^[46]。在不作前处理的情况下, 黏粒分散量随着土壤有机碳的减少而急速增加; 在模拟耕作和含水量高于塑性限度的情况下, 黏粒分散量随着土壤有机碳含量的减少而增加^[47]。

有机质对土壤黏粒分散的影响虽然没有离子浓度显著, 但也是不可忽视的因素之一。胡敏酸能够促进黏粒的分散过程, 但其促进程度受离子浓度影响较大; 腐殖酸能够促进黏粒的反凝絮过程; 土壤有机碳在一定程度上影响黏粒分散量。因此在探究有机质对苏打盐碱土壤黏粒分散的影响时, 可对有机质组分进行提取分别分析。

3.4 农业管理措施

生产实践中, 农业管理措施是不可缺少的环节之一。不科学的管理措施会引起土壤黏粒分散, 造成土壤质量下降, 作物降质减产。在模拟耕作和含水量高于塑性限度的情况下, 黏粒分散量随着机械破坏程度的增加而增加; 当含水量低于塑性限度时, 土壤对机械破坏较不敏感^[47]。通过评估 24 年后不同土壤管理系统和作物系统对赤红壤黏粒分散程度的影响, 结果表明土壤黏粒分散的程度只受到土壤管理系统的影响而不受作物系统的影响, 且对土壤扰动程度较低的土壤管理系统——免耕能够引起较高的黏粒分散程度, 进而导致土壤电化学的失衡^[48]。不同的是, 对 5 个地点的 5 种不同土壤进行耕作与不耕作黏粒分散状况监测, 结果却发现耕作能够提高水分散性黏粒比例和分散率^[49]。诸如拖拉机犁地和灌溉等农业措施有助于增加变性土土壤中的黏粒分散程度以及后期的降解程度^[50]。与原始森林土壤相比, 种植甘蔗的土壤黏粒分散度和总黏粒含量增加, 这表明甘蔗管理系统能够增加土壤中的微小孔隙体积, 减少土壤中的大孔隙体积^[51]。大量工业含盐废水的使用也会导致土壤盐渍化, 引起黏粒分散, 进一步引起土壤化学和物理性质的变化^[52]。

多数研究显示采取农业管理措施如实施耕作制度、犁地、灌溉措施、种植甘蔗等会加剧土壤黏粒分散状况, 免耕造成的土壤黏粒分散程度更深; 而作物系统几乎不对土壤黏粒分散造成影响。农业管理措施

通过影响土壤物理性质对土壤黏粒分散状况造成影响, 在选址播种、施肥灌溉、犁地耙地等过程中要做好区域背景调查, 充分考虑到地方土体特性, 采用科学的农业管理措施, 助力粮食稳产高产。

3.5 外源物质的施用

石灰和有机肥料的施用会引起土壤理化性质的变化, 进一步对土壤黏粒分散产生影响。通过 12 个月的控制试验发现, 施用石灰后, 黏粒的分散性随着土壤 pH 和时间的增加而增加; 未施用石灰组黏粒的浓度不发生显著变化^[53]。相较于在土壤中层和土壤底层施加石灰, 在土壤表层施加石灰能更大程度影响黏粒的分散行为, 更好地提高土壤水的有效性^[54], 类似试验表明相较于添加石膏, 添加石灰对土壤黏粒分散的促进效果更明显^[55]。

酒糟与猪粪等是良好的有机肥料。酒糟富含钾元素, 在土壤中施加酒糟能够改变土壤的 pH、 Mg^{2+} 和 K^+ 含量, 有效促进沙质土壤的絮凝过程, 但对黏质土壤的絮凝过程无显著影响^[56]。与施加酒糟相比, 猪粪的施加能够引起可分散黏粒含量和聚合过程的速度和动态修正, 表现为施加大于 $33 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ 的猪粪后不久, 土壤可分散黏粒含量和 $<0.25 \text{ mm}$ 的团聚体质量增加, 施用猪粪 15 d 时土壤分散程度达到最大。施加猪粪较施加禽粪土壤平衡负荷随时间的变化更为剧烈^[57], 有利于对土壤结构进行及时有效调整。

就外源物质的添加来看, 石灰和石膏常被用于苏打盐碱土的治理。研究结果显示石灰显著影响土壤黏粒分散程度, 且在土壤表层比在土壤中层和底层施用石灰抑制黏粒分散效果更好; 在其他条件相同的前提下, 石膏对于黏粒分散土壤的改良效果较石灰更好。有机肥料对黏质土壤的改善效果不一, 酒糟的施加对于土壤中的黏粒分散行为无显著影响; 猪粪的施加可有效控制可分散黏粒的含量。因此在综合考虑经济效益和环境效益的情况下, 可按需选择外源物质进行添加, 改善苏打盐碱土壤黏粒分散状况, 促进苏打盐碱土地转化为可利用耕地。

3.6 其他因素

值得一提的是, 臭氧、表面活性剂、土壤溶液比和土壤结构也会影响土壤的黏粒分散。在交换性 Na^+ 含量大于 15% 时, 臭氧可减弱土壤中的黏粒分散行为, 提高土壤的饱和导水率^[58]。表面活性剂对土壤黏粒的分散作用显著, 其中非离子表面活性剂的影响较阴离子表面活性剂影响大^[59]。随着土壤溶液比的增加, 任意时间段内土壤黏粒的比例同样增加, 这是由于悬浮液中团聚体的增加会加强团聚体之间的破

碎和磨损行为^[60]。研究表明,土壤在水平和垂直方向上的变形程度会影响黏粒的分散和移动,土壤容重和易分散黏粒含量之间存在正相关关系^[61]。土壤深处结构的改善能够通过土壤淋洗和降低土壤溶液中的离子强度来提高土壤的储水能力,促进黏粒的分散,从而降低土壤结构的稳定性^[62]。

除了影响土壤黏粒分散的主要因素,如土壤酸碱性、离子浓度、有机质、农业管理措施、肥料的施用,臭氧、表面活性剂、土壤溶液比和土壤结构也通过一定的机理作用于土壤黏粒。在进行苏打盐碱土壤黏粒分散特征研究时,需抓住主要因素,探究区域土壤黏粒分散的机理,必要时可考虑次要因素以更全面地解释土壤中黏粒分散的行为。

4 黏粒分散控制

东北西部苏打盐碱土以碱性强、碱化度高、透水性差为主要特点,黏粒含量高,黏粒分散性强,为世界上最难治理的一类障碍性土壤。黏粒分散对土壤的结构稳定性影响较大,为了发挥土壤的生产效益和生态效益,需要对黏粒分散进行有效控制。

以 Na^+ 为主的土壤由于黏粒分散和孔隙堵塞导致饱和和导水率降低,在土壤中施加石膏能够缓解这种状况。不同土壤对应的石膏需求量有所差异,75% 的石膏能显著增加黏壤土的饱和和导水率并去除其中的钠和盐类物质^[63]。受 Na^+ 影响的水田较为常见,这类土壤具有较高的钠交换性百分比,使得黏粒分散成为这类土壤遇到洪水时的主要风险之一,而铁的还原性溶解可以防止水淹水稻种植过程中碱土的黏粒分散^[52]。Gupta 等人^[30]的研究发现碳酸钙和高电解质浓度溶液对抵抗土壤黏粒分散十分有效。对于硫酸冰川衍化生成土壤,当其钠吸附比低于 5 且电解质浓度低于 0.3 S/m 时,采用可持续灌溉的方式可较大程度上避免土壤黏粒分散^[31]。对以色列不同黏粒含量土壤的研究表明,受污水灌溉的土壤在形成密封层和预防侵蚀过程中的适用方法与土壤黏粒含量密切相关,以 40% 的黏粒含量为界,低于此含量适合施用磷石膏控制土壤黏粒分散;高于此含量则适合控制土壤的湿润速率以防止团聚体崩解^[20]。研究发现,对于不同黏粒含量土壤的治理侧重点有所不同,低于特定黏粒含量适合施加改良剂,高于此黏粒含量适合控制土壤湿润速率。不同地区、不同时节应因地制宜控制黏粒分散对土壤结构的影响。

对于分散性土壤,应确定分散的范围是否在整个土壤剖面。若是苏打盐碱土,则需要测定土壤可交换

性盐和可溶性盐溶液的浓度,以便计算用石膏处理土壤的可行性和成本效益。增加土壤有机质含量能够提高土壤的结构稳定性,增强土壤在遇水情况下抵抗分散的能力。地表植被对于减少由于机械干扰对土壤的破坏引起的黏粒分散现象具有一定的保护作用。高钠吸附比和低总电解质浓度易导致黏粒分散,因此通过降低钠吸附比或者增加土壤溶液的总电解质浓度能减少黏粒分散量,钠吸附比的降低可通过施用含钙化合物来实现^[64]。

实践证明,盐碱土的改良存在多种方式:①施加改良剂,主要包括施加脱硫石膏、褐煤、腐殖酸、生物质炭、秸秆等有机无机物料^[65];②结合农业实践措施,如提高种稻年限、等距开槽^[66]、绿肥深翻等;③种植耐盐碱作物,如羊草、碱茅、碱蓬、芦苇等^[67];④多种方式的结合,在施加改良剂的同时加强农业管理,加以耕作方式配合^[68],此种方式改良效果较好,可有效改善土壤盐碱状况,控制土壤黏粒分散。

5 结论与展望

土壤盐碱化危害巨大,物理方面会导致土壤板结,土壤孔隙度减小,透水性降低;化学方面会引起酸碱值的升高,电导率和可交换性钠比率提高,碳、氮矿化度下降。盐碱土一方面是我国农业生产过程中建设高产稳产田的障碍和重大区域环境威胁,另一方面又是我国农业生产和国民经济可持续发展的后备土地资源。加强对盐碱地的修复有助于实现“藏粮于地、藏粮于技”的国家发展战略,确保“中国人饭碗牢牢端在自己手中”目标的实现。解决好苏打盐碱土壤黏粒分散问题不仅有利于盐碱地资源利用,促进乡村振兴,更有助于发挥土地生产潜力,保障国家粮食安全。本文通过列举土壤黏粒分散特征表征方法、黏粒分散对土壤物理性质影响方面的研究进展,阐明土壤黏粒分散这一现象。通过探究土壤酸碱性、离子浓度、有机质、农业管理措施、肥料的施用等影响黏粒分散的因素,寻求控制土壤黏粒分散的主要方法。目前对于国内苏打盐碱土壤黏粒分散特征的研究尚存在空白。总体而言,黏粒分散的具体机理研究主要集中在环境化学胶体领域,农业土壤中黏粒分散的研究还存在大量空白,对于如何表征苏打盐碱土壤黏粒分散程度、如何有效控制苏打盐碱土壤黏粒分散还存在很多未知。针对上述问题,未来可从以下几个方面开展研究。

1) 微观尺度黏粒分散机制研究。目前针对黏粒的研究主要集中在环境化学胶体领域,多是利用黏粒

细小颗粒特性制造新型材料,提高材料稳定性和牢固性。对于农业领域,特别是苏打盐碱土黏粒分散特征的研究还存在较多空白。黏粒分散的表现为使土壤结构性差,限制农作生产,严重阻碍作物产量的提高和品质的提升。利用 Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 不同的分散和絮凝能力,进行控制试验,结合先进Zetasizer系列仪器测定黏粒zeta电位,得出黏粒分散和絮凝之间的临界电位,从而达到从微观角度解释黏粒分散机制的目的。

2) 苏打盐碱土壤黏粒分散特征。苏打盐碱土黏粒分散强烈,雨过之后土水混为一体经久不沉淀,土壤性质异常恶劣。可通过测定土壤黏粒的zeta电位和黏粒悬浮液的浊度,结合黏粒含量以及土壤理化指标,利用随机森林分析方法得到各个指标对黏粒分散的重要性排序,再利用结构方程模型构建黏粒分散与指标间的关系公式,从而以更直观的方式表示苏打盐碱土壤黏粒分散特征。目前关于黏粒分散特征的表征方法还尚未有统一规定,通过比较不同方法之间的优劣,结合实际效果可选择更符合实验目的的方法。指标测定的方法大多也尚无定论,通过对前人方法进行试验验证,结合新时代科学标准,创造出更加完善、简便、精确的黏粒分散指标测定方法。这对于苏打盐碱土黏粒分散研究来说将是一个重大突破。

3) 苏打盐碱土壤黏粒分散控制。东北松嫩平原是世界苏打盐碱地集中分布区之一,盐碱地面积大。通过控制黏粒分散改良苏打盐碱土,可较大程度提高粮食产量,减少粮食进口依赖度。目前控制黏粒分散的方法主要是施加脱硫石膏、腐殖酸、磷酸脲等改良剂,用法用量多是经验数据。从黏粒分散角度改善苏打盐碱土壤性质,有助于精准施肥,提高施肥效率,降低施肥成本。通过探索控制苏打盐碱土壤黏粒分散新方法、新理论,结合大田试验检验方法正确性;不断开发新型高效改良剂产品,并切实应用于生产实践,将盐碱地资源转化为生产资源,这将为我国可利用耕地的增加提供新的途径。

参考文献:

- [1] Dixon J B, 朱永官. 土壤中粘粒的作用[J]. 土壤学进展, 1992, 20(3): 33-35.
- [2] Sumner M E. Sodic soils-New perspectives[J]. Soil Research, 1993, 31(6): 683.
- [3] Nelson P N, Baldock J A, Oades J M. Changes in dispersible clay content, organic carbon content, and electrolyte composition following incubation of sodic soil[J]. Soil Research, 1998, 36(6): 883.
- [4] 李秀军, 李取生, 王志春, 等. 松嫩平原西部盐碱地特点及合理利用研究[J]. 农业现代化研究, 2002, 23(5): 361-364.
- [5] 王遵亲. 中国盐渍土[M]. 北京: 科学出版社, 1993.
- [6] Mai N T, Nguyen A M, Pham N T T, et al. Colloidal interactions of micro-sized biochar and a kaolinitic soil clay[J]. Science of the Total Environment, 2020, 738: 139844.
- [7] Nelson P N, Baldock A, Oades J M, et al. Dispersed clay and organic matter in soil: Their nature and associations[J]. Soil Research, 1999, 37(2): 289.
- [8] Li C Q, Zhu N Y, Yang S S, et al. A review of clay based photocatalysts: Role of phyllosilicate mineral in interfacial assembly, microstructure control and performance regulation[J]. Chemosphere, 2021, 273: 129723.
- [9] Agmo Hernández V. An overview of surface forces and the DLVO theory[J]. ChemTexts, 2023, 9(4): 10.
- [10] Nguetnkam J P, Dultz S. Clay dispersion in typical soils of North Cameroon as a function of pH and electrolyte concentration[J]. Land Degradation & Development, 2014, 25(2): 153-162.
- [11] Marchuk A, Rengasamy P. Clay behaviour in suspension is related to the ionicity of clay-cation bonds[J]. Applied Clay Science, 2011, 53(4): 754-759.
- [12] de Melo T R, Machado W, Tavares Filho J. Charge sparsity: An index to quantify cation effects on clay dispersion in soils[J]. Scientia Agricola, 2020, 77(1): 1-6.
- [13] Rengasamy P, Tavakkoli E, McDonald G K. Exchangeable cations and clay dispersion: Net dispersive charge, a new concept for dispersive soil[J]. European Journal of Soil Science, 2016, 67(5): 659-665.
- [14] Rengasamy P, Marchuk A. Cation ratio of soil structural stability (CROSS)[J]. Soil Research, 2011, 49(3): 280.
- [15] Marwan M M, Rowell D L. Cation exchange, hydrolysis and clay movement during the displacement of saline solutions from soils by water[J]. Irrigation Science, 1995, 16(2): 81-87.
- [16] Goldberg S, Kapoor B S, Rhoades J D. Effect of aluminum and iron oxides and organic matter on flocculation and dispersion of arid zone soils[J]. Soil Science, 1990, 150(3): 588-593.
- [17] Skene T M, Oades J M. The effects of sodium adsorption ratio and electrolyte concentration on water quality[J]. Soil Science, 1995, 159(1): 65-73.
- [18] Yair A, Goldshleger N, Kasanin-Grubin M. Clay dispersion: An important factor in channel runoff generation in a semi-arid, loess-covered area with very low rain intensities[J]. Geomorphology, 2018, 320: 179-186.
- [19] Igwe C A, Zarei M, Stahr K. Clay dispersion of hardsetting inceptisols in southeastern Nigeria as influenced by soil components[J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 2006, 37(5/6): 751-766.
- [20] Mamedov A I, Levy G J. Clay dispersivity and aggregate stability effects on seal formation and erosion in effluent-irrigated soils[J]. Soil Science, 2001, 166(9): 631-639.

- [21] Awedat A M, Zhu Y C, Bennett J M, et al. The impact of clay dispersion and migration on soil hydraulic conductivity and pore networks[J]. *Geoderma*, 2021, 404: 115297.
- [22] 韩岩. 乾安非饱和分散性土水理特性及边坡水蚀灾变过程研究[D]. 长春: 吉林大学, 2021.
- [23] Adeyemo T, Kramer I, Levy G J, et al. Salinity and sodicity can cause hysteresis in soil hydraulic conductivity[J]. *Geoderma*, 2022, 413: 115765.
- [24] Zhang X C, Norton L D. Effect of exchangeable Mg on saturated hydraulic conductivity, disaggregation and clay dispersion of disturbed soils[J]. *Journal of Hydrology*, 2002, 260(1/2/3/4): 194–205.
- [25] M. Ben—Hur, 曹建儒, 张贯生. 多糖、粘粒分散和冲击能对水分入渗的影响[J]. *土壤学进展*, 1990, 18(6): 30–33.
- [26] Miller W P, Baharuddin M K. Relationship of soil dispersibility to infiltration and erosion of southeastern soils[J]. *Soil Science*, 1986, 142(4): 235–240.
- [27] Almajmaie A, Hardie M, Doyle R, et al. Influence of soil properties on the aggregate stability of cultivated sandy clay loams[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2017, 17(3): 800–809.
- [28] Chairunnisya R A, Suryaningtyas D T, Iskandar. Clay flocculation level with multivalent cations on some paddy soils in Bogor District, West Java, Indonesia[J]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2021, 824(1): 012004.
- [29] 杨娴, 饶品华, 何明. 土壤环境中粘粒的分散——凝聚行为及其影响因素[J]. *上海交通大学学报(农业科学版)*, 2006, 24(5): 407–413.
- [30] Gupta R K, Bhumbra D K, Abrol I P. Effect of sodicity, ph, organic matter, and-calcium carbonate on the dispersion behavior of soils[J]. *Soil Science*, 1984, 137(4): 245–251.
- [31] Springer G, Wienhold B J, Richardson J L, et al. Salinity and sodicity induced changes in dispersible clay and saturated hydraulic conductivity in sulfatic soils[J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 1999, 30(15/16): 2211–2220.
- [32] 李小刚, 崔志军, 王玲英, 等. 盐化和有机质对土壤结构稳定性及阿特伯格极限的影响[J]. *土壤学报*, 2002, 39(4): 550–559.
- [33] Getahun G T, Etana A, Munkholm L J, et al. Liming with CaCO₃ or CaO affects aggregate stability and dissolved reactive phosphorus in a heavy clay subsoil[J]. *Soil and Tillage Research*, 2021, 214: 105162.
- [34] Farahani E, Emami H, Keller T, et al. Impact of monovalent cations on soil structure. Part I. Results of an Iranian soil[J]. *International Agrophysics*, 2018, 32(1): 57–67.
- [35] Marchuk S, Marchuk A. Effect of applied potassium concentration on clay dispersion, hydraulic conductivity, pore structure and mineralogy of two contrasting Australian soils[J]. *Soil and Tillage Research*, 2018, 182: 35–44.
- [36] Farahani E, Emami H, Fotovat A, et al. Effect of different K: Na ratios in soil on dispersive charge, cation exchange and zeta potential[J]. *European Journal of Soil Science*, 2019, 70(2): 311–320.
- [37] Nyamangara J, Munotengwa S, Nyamugafata P, et al. The effect of hydroxide solutions on the structural stability and saturated hydraulic conductivity of four tropical soils[J]. *South African Journal of Plant and Soil*, 2007, 24(1): 1–7.
- [38] Marchuk A, Rengasamy P. Threshold electrolyte concentration and dispersive potential in relation to CROSS in dispersive soils[J]. *Soil Research*, 2012, 50(6): 473.
- [39] Igwe C A. Erodibility in relation to water-dispersible clay for some soils of eastern Nigeria[J]. *Land Degradation & Development*, 2005, 16(1): 87–96.
- [40] Nguyen M N, Dultz S, Kasbohm J, et al. Clay dispersion and its relation to surface charge in a paddy soil of the Red River Delta, Vietnam[J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2009, 172(4): 477–486.
- [41] Rajan K, Natarajan A, Thilagam V K, et al. Clay dispersion induced by changes in some soil properties in undulating salt-affected landscapes of southern Karnataka, India[J]. *Current Science*, 2016, 110(5): 874–883.
- [42] Hodgkinson R A, Thorburn A A. Factors influencing the stability of salt affected soils in the UK—Criteria for identifying appropriate management options[J]. *Agricultural Water Management*, 1996, 29(3): 327–338.
- [43] Goldberg S, Suarez D L, Glaubig R A. Factors affecting clay dispersion and aggregate stability of arid-zone soils[J]. *Soil Science*, 1988, 146(5): 317–325.
- [44] 兰叶青, 胡琼英, 薛家骅. 胡敏酸对土壤和矿物粘粒分散的影响[J]. *土壤学报*, 1998, 35(2): 195–201.
- [45] 兰叶青, 胡琼英, 薛家骅. 交换性阳离子和胡敏酸对粘土絮凝—分散的作用[J]. *南京农业大学学报*, 1997, 20(1): 100–104.
- [46] Igwe C A. Clay dispersion of selected aeolian soils of northern Nigeria in relation to sodicity and organic carbon content[J]. *Arid Land Research and Management*, 2001, 15(2): 147–155.
- [47] Watts C W, Dexter A R. The influence of organic matter in reducing the destabilization of soil by simulated tillage[J]. *Soil and Tillage Research*, 1997, 42(4): 253–275.
- [48] Figueiredo A, de Londrina U E, de Melo T R, et al. The no-tillage, with crop rotation or succession, can increase the degree of clay dispersion in the superficial layer of highly weathered soils after 24 years[J]. *Semina: Ciências Agrárias*, 2021, 42(1): 57–70.
- [49] Igwe C A, Agbatah C. Clay and silt dispersion in relation to some physicochemical properties of derived savanna soils under two tillage management practices in southeastern Nigeria[J]. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B - Plant Soil Science*, 2008, 58(1): 17–26.
- [50] Basga S D, Tsozue D, Temga J P, et al. Land use impact on clay dispersion/flocculation in irrigated and flooded vertisols from Northern Cameroon[J]. *International Soil and Water Conservation Research*, 2018, 6(3): 237–244.

- [51] da Silva A J N, Cabeda M S V, Lima J F W F. Efeito de sistemas de uso e manejo nas propriedades físico-hídricas de um argissolo amarelo de tabuleiro costeiro[J]. *Revista Brasileira De Ciência Do Solo*, 2005, 29(6): 833–842.
- [52] Fink J, Sánchez-Rodríguez A R, Frosi G, et al. Industrial saline wastewater in a corn-soybean rotation to enhance crop yield without compromising soil health in a subtropical soil[J]. *Journal of Environmental Management*, 2021, 296: 113341.
- [53] Machado W, de Melo T R, Tavares Filho J. Clay dispersion and loss in Oxisol treated with different concentrations of limestone[J]. *Semina: Ciências Agrárias*, 2017, 38(6): 3907.
- [54] Auler A C, Pires L F, Caires E F. Surface and incorporated liming effects on clay dispersion, water availability, and aeration capacity of a Dystrudept soil[J]. *Bragantia*, 2017, 76(3): 433–446.
- [55] Roth C H, Pavan M A. Effects of lime and gypsum on clay dispersion and infiltration in samples of a Brazilian Oxisol[J]. *Geoderma*, 1991, 48(3/4): 351–361.
- [56] de Melo T R, Santos Telles T, Machado W S, et al. Factors affecting clay dispersion in oxisols treated with vinasse[J]. *Semina: Ciências Agrárias*, 2016, 37(6): 3997.
- [57] de Cesare Barbosa G M, de Oliveira J F, Miyazawa M, et al. Aggregation and clay dispersion of an oxisol treated with swine and poultry manures[J]. *Soil and Tillage Research*, 2015, 146: 279–285.
- [58] Raub L, Amrhein C, Matsumoto M. The effects of ozonated irrigation water on soil physical and chemical properties[J]. *Ozone: Science & Engineering*, 2001, 23(1): 65–76.
- [59] 许中坚, 陈津瑞. 表面活性剂对土壤粘粒絮凝-分散的影响[J]. *环境科学研究*, 2003, 16(3): 62–64.
- [60] Curtin D, Steppuhn H, Selles F. Determination of clay dispersion and flocculation in sodic soil as influenced by soil: Solution ratio[J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 1995, 26(1/2): 209–221.
- [61] Lipiec J, Czyż E A, Dexter A R, et al. Effects of soil deformation on clay dispersion in loess soil[J]. *Soil and Tillage Research*, 2018, 184: 203–206.
- [62] Cocco S, Brecciaroli G, Agnelli A, et al. Soil genesis and evolution on calanchi (badland-like landform) of central Italy[J]. *Geomorphology*, 2015, 248: 33–46.
- [63] Regea M, Yano T, Shainberg I. The response of low and high swelling smectites to sodic conditions[J]. *Soil Science*, 1997, 162(4): 299–307.
- [64] Farahani E, Emami H, Fotovat A, et al. Soil available water and plant growth in relation to K: Na ratio[J]. *Geoderma*, 2020, 363: 114173.
- [65] 陈健成, 王会, 马荣辉, 等. 有机无机物料改良盐渍土研究进展[J]. *土壤通报*, 2020, 51(5): 1255–1260.
- [66] 徐璐, 王志春, 赵长巍, 等. 等距开槽结合施用石膏改良苏打盐碱土[J]. *生态学杂志*, 2012, 31(5): 1179–1185.
- [67] 杨帆, 王志春, 马红媛, 等. 东北苏打盐碱地生态治理关键技术研发与集成示范[J]. *生态学报*, 2016, 36(22): 7054–7058.
- [68] 张璐, 黄立华. 淹水在苏打盐碱土形成过程中的作用——苏打盐碱土形成原因的探讨[J]. *土壤与作物*, 2018, 7(4): 365–373.