

DOI: 10.11766/trxb202308060312

谭文峰, 许运, 史志华, 蔡鹏, 黄巧云. 胶结物质驱动下的土壤团聚体形成过程与稳定机制[J]. 土壤学报, 2023, 60(5): 1297–1308.
TAN Wenfeng, XU Yun, SHI Zhihua, CAI Peng, HUANG Qiaoyun. The Formation Process and Stabilization Mechanism of Soil Aggregates Driven by Binding Materials[J]. Acta Pedologica Sinica, 2023, 60(5): 1297–1308.

胶结物质驱动下的土壤团聚体形成过程与稳定机制*

谭文峰[†], 许 运, 史志华, 蔡 鹏, 黄巧云

(国家环境保护土壤健康与绿色修复重点实验室, 华中农业大学资源与环境学院, 武汉 430070)

摘 要: 团聚体是土壤的基本组成单元, 影响着土壤水、气、热及养分的保持和运移。胶结物质在团聚体形成过程中起关键作用, 但不同类型胶结物质在土壤团聚体中所起作用与机理尚缺乏系统总结。本论文回顾了土壤团聚体相关的关键理论, 梳理了不同地理环境与人为活动下土壤团聚体中胶结物质类型、形态、转化与作用机制, 探讨了胶结物质对土壤团聚体结构与稳定性的影响, 提出了胶结物质驱动下的土壤团聚体自组织形成过程模型, 阐明了土壤团聚体的形成与转化机制。最后对土壤团聚体研究领域未来的发展进行展望, 特别是在土壤团聚体的原位分析方法、土壤团聚体形成过程的定量化描述、土壤团聚体稳定性在景观尺度上的空间结构、良好土壤结构体培育的产品与技术研发等方面还有待加强。这些工作的开展将对培育良好土壤团聚体、揭示土壤物质循环与演化过程、提高土壤质量和生产力等具有重要的科学意义和生产实践价值。

关键词: 土壤团聚体; 胶结物质; 有机无机复合体; 稳定机制; 自组织概念模型

中图分类号: S152.4 文献标志码: A

The Formation Process and Stabilization Mechanism of Soil Aggregates Driven by Binding Materials

TAN Wenfeng[†], XU Yun, SHI Zhihua, CAI Peng, HUANG Qiaoyun

(State Environmental Protection Key Laboratory of Soil Health and Green Restoration, College of Resources and Environment, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China)

Abstract: Soil aggregates are the essential building blocks of soil, which impact the retention and distribution of water, air, heat, and nutrients. Binding materials play a pivotal role in the formation of soil aggregates. However, the specific functions of different types of binding materials as well as the mechanisms of the complex interactions in the formation of these aggregates still lack a systematic summary. This article reviews the key theories related to soil aggregates and sorts out types, forms, transformations, and interaction mechanisms of binding materials in soil aggregates under different geographical contexts and human activities. It also describes the effects of binding materials (e.g., organic matter, minerals, roots, organisms and their derivatives such as Extracellular Polymeric Substances) on the structure and stability of soil aggregates. Furthermore, it introduces models illustrating the self-organization process driven by binding materials within soil aggregates and elucidates the

* 国家重点研发计划项目(2021YFD1901200)和国家自然科学基金项目(41977023, 32061123007)资助 Supported by the National Key R&D Program of China (No. 2021YFD1901200) and the National Natural Science Foundation of China (Nos. 41977023, 32061123007)

[†] 通讯作者 Corresponding author, E-mail: tanwf@mail.hzau.edu.cn

作者简介: 谭文峰(1971—), 男, 湖北巴东人, 教授, 主要研究方向为土壤界面化学与土壤健康

收稿日期: 2023-08-06; 收到修改稿日期: 2023-09-12; 网络首发日期(www.cnki.net): 2023-09-18

mechanisms of the formation and transformation of soil aggregates. Finally, the future development of soil aggregates is suggested. Specifically, future research could investigate the *in-situ* analysis of soil aggregates, quantitative description of the formation process of soil aggregates, spatial structure of soil aggregates at the landscape scale in relation to its stability, and development of product/technology in cultivating good soil aggregates for applications. This research holds significant scientific and practical value in promoting the development of healthy soil aggregates, unraveling the processes of soil elemental cycling and evolution, and enhancing overall soil quality and productivity.

Key words: Soil aggregates; Binding material; Organo-mineral associations; Stabilization mechanisms; Self-organizing conceptual model

土壤中的砂粒、粉粒和黏粒及有机物相互胶结凝聚,形成大小不等的团聚体,它们进一步在三维空间上组织排列,构成了宏观上的土壤结构^[1]。土壤结构控制着土壤中水、气、热、养分的保持和运移,直接影响植物根系的生长发育,并在土壤抗蚀性、土壤修复、全球碳汇效应等方面起着重要的作用与功能^[1-3]。受自然和人为活动影响,土壤退化问题日益严重^[4],其核心是土壤结构体的退化^[5]。因此,团聚体作为土壤结构体的基本单元,一直备受土壤学家的关注。

土壤类型多种,耕作措施多样,环境条件多变,导致土壤团聚体的形成过程与稳定机制千差万别,这给良好土壤团聚体的培育带来挑战。特别是我国地域辽阔,如南方红壤区是我国重要的粮食生产区和生态环境保护区,但土壤贫瘠化、酸化与污染日益加剧;东北黑土区是我国重要的商品粮生产基地,但土壤退化严重;西北黄土高原水土流失严重,是黄河泥沙的重要来源,也是我国典型的生态脆弱区。尽管各种土壤的物质组成千差万别,土壤团聚体对维持和提升土壤质量有地域差异,但从土壤团聚体的胶结物质出发有助于解析它们的共性特征,提出互补的培育和调控措施,促进稳定性土壤团聚体的形成和土壤质量的提升。

1 土壤团聚体的形成过程与理论

Emerson^[6]在1959年首先提出了黏团说,认为黏粒先定向凝聚,再在有机质的作用下与石英颗粒黏结形成黏团。随后,Edwards和Bremner^[7]提出微团聚体理论,认为土壤颗粒以黏粒-多价金属-有机质、黏粒-多价金属-黏粒或有机质-多价金属-有机质等方式复合成微团聚体。基于上述理论,Tisdall和

Oades^[8]提出了多级团聚理论,认为土壤矿物质颗粒($<20\ \mu\text{m}$)在腐殖化有机质和金属离子等作用下形成稳定的微团聚体($20\sim 250\ \mu\text{m}$),这些微团聚体再通过真菌菌丝和根系等短期黏结力、或土壤微生物和根系分泌的多糖等临时黏结力的作用形成弱稳定性的大团聚体($>250\ \mu\text{m}$)。Oades^[9]对多级团聚体模型进行了重要补充,指出大团聚体内部的根和真菌菌丝等有机物质分泌或分解过程中形成的胶结物质,将大团聚体内部的土壤颗粒黏结在一起;随着这些易降解有机物的分解或外力作用,又可导致大团聚体破碎。

近年来的大量研究主要是验证了多级团聚理论,重点探讨了土壤有机质与团聚体的关系。根据团聚体在碳汇中的作用,Bronick和Lal^[10]提出了团聚体形成的三阶段:有机质吸附在土壤颗粒表面;黏土矿物表面聚合有机质;聚合的有机质受到黏土矿物的保护避免土壤微生物的接触。根据有机质具有两性分子特点,在溶液中能够自组装(self-assembly),Kleber等^[11]提出了有机无机相互作用的概念性模型,将有机分子与矿物表面的作用区域分为三个圈层:与矿物表面紧密接触的内圈(contact zone),主要由有机物与矿物表面基团的配位形成稳定的内圈复合物;紧接着由疏水力和静电引力相互作用形成中圈(zone of hydrophobic);外圈(kinetic zone)则由亲水力、阳离子桥键、氢键等作用力形成,此圈层可与土壤溶液进行自由交换,对养分的有效性和污染物的调控起重要作用。

2004年*Science*的专刊“*Soils-the final frontier*”上,Young和Crawford^[12]指出土壤团聚体是最复杂的生物材料,是具有自组织功能的土壤-生物复合体,并提出土壤有机无机复合体的自组织概念模型(conceptual model for self-organization)。Malamoud

等^[13]基于英国洛桑试验站的碳循环模型 (RothC-26.3), 提出了 Struc-C 团聚体形成的机理性模型, 该模型可较好地描述和预测土壤有机碳与黏粒矿物结合形成团聚体的过程以及对土壤孔隙度等物理性质的影响 (图 1)。

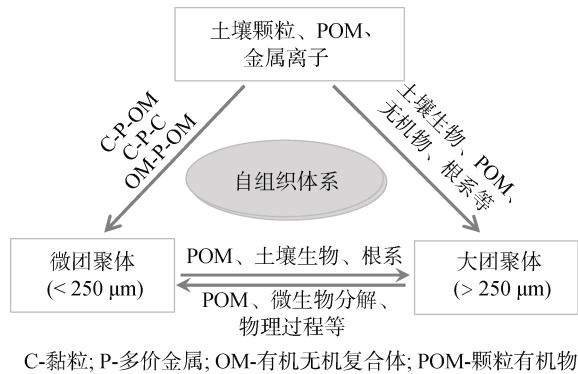


图 1 土壤团聚体形成过程示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the formation process of soil aggregates

由于土壤类型和环境条件的复杂性, 团聚体形成机制尚无普适性的理论。Oades 和 Waters^[14]通过破碎试验指出, 氧化土中团聚体的形成主要取决于金属氧化物, 并不具有多级团聚结构。在这个过程中, 微团聚体如何胶结成大团聚体、各类型胶结物质在不同粒级团聚体中的作用过程与机理仍不清楚。

2 土壤胶结物质是团聚体形成的关键

土壤团聚体的胶结物质可概分为有机和无机两种。有机胶结物质包括瞬时性、临时性和持久性三类。不同类型土壤有机质是各级团聚体形成的重要因素, 腐殖化有机质是微团聚体形成的重要胶结物质, 新鲜有机质和根系及其分泌物对大团聚体的形成具有重要作用^[15]。微生物的胶结作用可分为生物学和非生物学两种, 生物学作用包括微生物在土壤颗粒表面的生长繁殖和分泌的有机物质以及植物生长过程中根系的胶结作用; 非生物作用是将微生物及其分泌物简单地看成有机分子。尽管富含碳的腐殖质优先与蒙皂石结合^[16], 但对于草地和灌丛的表土, 高岭石结合的有机物主要是多糖, 蒙皂石结合的有机物主要是芳香环的碳^[17]。可见, 结合机制与土壤环境条件的差异, 会导致不同黏土矿物吸持或

保留的有机物类型不同。不同类型有机质在土壤粗细颗粒中含量不同, 相比于细黏粒, 粗黏粒含有较多的羧基和氧烷基碳, 而氨基酸、脂肪酸、单糖和氨基糖较少^[18], 这与粗黏粒中氧化物通过配位交换选择固定氧烷基碳、细黏粒中伊利石选择固定烷基碳和芳香环碳有关^[19]。因此, 有机质的不同化学组分对不同粒级土壤颗粒或团聚体的胶结作用不同, 这种性质差异会诱导形成不同粒级和不同稳定性的团聚体^[20]。

2.1 无机矿物的胶结作用

无机胶结物质往往被视为永久胶结物质。铁铝氧化物通常带正电荷, 常以胶膜形式覆盖于黏粒矿物表面, 在土壤团聚过程中充当“桥”的作用。不同结晶度氧化物影响团聚体的稳定性^[21-25]。水稳定性团聚体含量及其平均重量直径 (MWD) 与草酸铵溶液提取的弱晶质铁、铝氧化物含量呈极显著正相关, 而与连二亚硫酸钠-柠檬酸钠 (DCB) 提取的晶质铁、铝氧化物含量的相关性不明显, 非晶质水铁矿的团聚作用远大于晶质针铁矿与赤铁矿^[24, 26]; 与赤铁矿相比, 针铁矿表面带有较多的羟基, 更易与高岭石等矿物结合, 对土壤的胶结作用更大^[27]。土壤中氧化铝的胶结能力较氧化铁的强, 这与它们在土壤中的形态和表面电荷密度有关^[28]。晶质氧化铁 (Fe_d) 与 $\leq 20 \mu m$ 的团聚体稳定性呈极显著正相关, 而非晶质氧化铁 (Fe_o) 只与 $\leq 0.2 \mu m$ 的团聚体稳定性呈显著正相关, 非晶质氧化物对小颗粒的团聚作用更强^[27]。铁铝氧化物对团聚体稳定的机制主要是: 溶液中的铁铝充当絮凝剂, 充当黏粒和有机分子的胶结剂, 以凝胶状沉淀在黏粒表面。

碳酸钙是黏粒和有机质含量低的钙质土壤中的主要胶结物质。碳酸钙对团聚体稳定性的作用可能依赖于碳酸钙颗粒分布和黏粒含量, 高含量黏粒和细颗粒碳酸钙对土壤有很好的团聚作用^[29]。在弱碱性氧化环境的黄土堆积过程中, 粉尘堆积物可通过雨水、霜雪、生物活动等作用发生次生碳酸盐化, 次生碳酸盐与黄土粉尘中黏粒物质结合形成微团聚体^[30]。黄土团聚体中碳酸钙大约参与了 99% 的团聚体形成, 团粒越大, 碳酸钙含量越高。黄土土壤结构的形成主要经历了两个阶段: 干冷时期, 黄尘堆积先形成黄土点棱接触支架式多孔结构, 再在有机物的参与下形成团粒和团块状结构; 温湿时期, 生

物的黏化作用增强,大部分腐殖质矿化后,新形成的黏粒重新包裹,形成梭块和棱柱状结构。也有科学家认为,无机碳对土壤结构的影响是通过有机碳转化来调控。土壤有机碳增加使微生物的呼吸加强、CO₂含量增加,导致土壤中碳酸盐的溶解和重沉淀。在有机碳(SOC)低的土壤中大团聚体的形成也可由碳酸盐来胶结^[31];由于高含量的碳酸盐减少了SOC的矿化、增加了Ca²⁺含量,从而提高对SOC的保护作用^[32]。但现有的研究鲜有报道碳酸钙是如何将土壤颗粒胶结在一起,从而形成不同粒径的团聚体。

2.2 土壤微生物的胶结作用

土壤微生物是团聚体形成和稳定过程中重要的生物驱动因子。微生物细胞自身是一种带有电荷的胶体物质,可借助静电力与土壤颗粒彼此连接,并通过细菌菌毛、真菌菌丝等自身结构,将土壤颗粒机械地缠绕起来,形成土壤颗粒聚集体。此外,微生物分泌的胞外物质(如胞外聚合物、球囊霉素等)作为重要的有机胶结剂,其对土壤团聚体形成稳定的黏合作用也长期备受关注。

胞外聚合物(Extracellular Polymeric Substances, EPS)是微生物生长代谢中释放的高分子聚合物,主要由多糖、蛋白质和DNA等组成,是一类具有丰富官能团的生物黏液。EPS在矿物表面的黏附行为会改变土壤矿物的表面电荷,进而影响到矿物颗粒之间的自团聚行为,团聚效果也受到环境pH、离子强度、EPS类型和浓度等影响^[33]。EPS不仅可以作为土壤颗粒的黏合剂,亦可成为分散剂,这归因于静电作用和空间位阻效应所起主导作用的强弱关系^[34]。早在20世纪中叶,研究人员就发现向土壤中添加微生物分泌的胞外多糖可以显著促进土壤团聚体的形成。多糖的黏性、羧基含量、分子量等理化性质^[35-36],以及土壤矿物类型、阳离子交换量、盐基饱和度等均会影响土壤团聚效果^[37-38]。通过向土壤中接种易分泌EPS的恶臭假单胞菌(*Pseudomonas putida*) GAP-P45,发现土壤团聚体稳定性提高50%以上^[39]。不同细菌菌株促进土壤颗粒团聚的能力差异取决于菌株EPS的组成成分^[40]。Cheng等^[41]分离出两株分泌EPS的土壤细菌并测试了其对土壤团聚的影响程度,发现添加两株细菌或其EPS都能显著增加土壤水稳性大团聚体的含量。Büks和Kaupenjohann^[42]

向土壤中添加各种酶如 α -葡萄糖苷酶、 β -半乳糖苷酶、DNA酶和脂肪酶来降解土壤中胞外物质,发现酶处理降低了土壤团聚体的稳定性。Redmile-Gordon等^[43]发现土壤可提取的EPS中蛋白质含量与团聚体稳定性之间存在较好的相关性,但也有研究发现土壤EPS中多糖含量与团聚体稳定性之间存在正相关关系^[44]。植物根系分泌物通过提供易获取的养分物质,刺激了根际微生物生长以及EPS的分泌量,从而导致土壤的团聚程度随着远离根际距离而呈现递减趋势^[45]。多价阳离子也会影响土壤EPS的产量和结构,从而改变EPS对土壤团聚体的稳定作用^[45]。土壤EPS组分对团聚体稳定性的贡献程度可能因土壤质地、土地利用方式和植被类型等而异。因此,分泌EPS的土壤微生物具有巨大的潜力,通过提高EPS分泌量和改变EPS结构,进而增加土壤团聚体、改善土壤结构和提升土壤地力^[46]。

真菌菌丝可提高微团聚体向大团聚体的胶结,特别是丛枝菌根(AMF)分泌的球囊霉素(glomalin),可占土壤有机碳源的27%,有“全能胶水”的黏结能力,能显著提高土壤团粒结构的稳定性^[47-48]。球囊霉素作为一类糖蛋白,具有特殊的结构:糖蛋白是由短的寡糖链与蛋白质共价相连构成的分子,主链较短,糖链是缀合蛋白质的辅基,所以糖含量常小于蛋白质。尽管不同类型糖蛋白差异较大,但寡糖和蛋白质主要是糖的半缩醛羟基与氨基酸的羟基通过O-糖苷键结合、或与氨基酸的酰胺基通过N-糖苷键结合。糖链结构带有大量的羟基和羧基(与腐殖酸性质相近),与表面带正电荷的土壤氧化物通过静电、配位等方式紧密结合;而其中的蛋白质带有大量的胺基或酰胺基团,又可与表面带大量负电荷的层状硅酸盐矿物或腐殖质物质通过静电、疏水等方式紧密结合。同时,由于糖蛋白本身结构的稳定性和特异性,当它与土壤组分相互作用时,或许会形成稳定的空间结构(图2)。它的这些作用过程与机制使球囊霉素具有“全能胶水”的功能,可为土壤团聚体的培育提供重要支撑。

2.3 根系的胶结作用

根系作为植物的重要组成部分,是接收与输送养分、水分的重要通道;同时,可通过交错、穿插、网络固结、根土黏结等作用,改善土壤理化特性。植物根系作为土壤结构的重要改良剂,在增强团聚

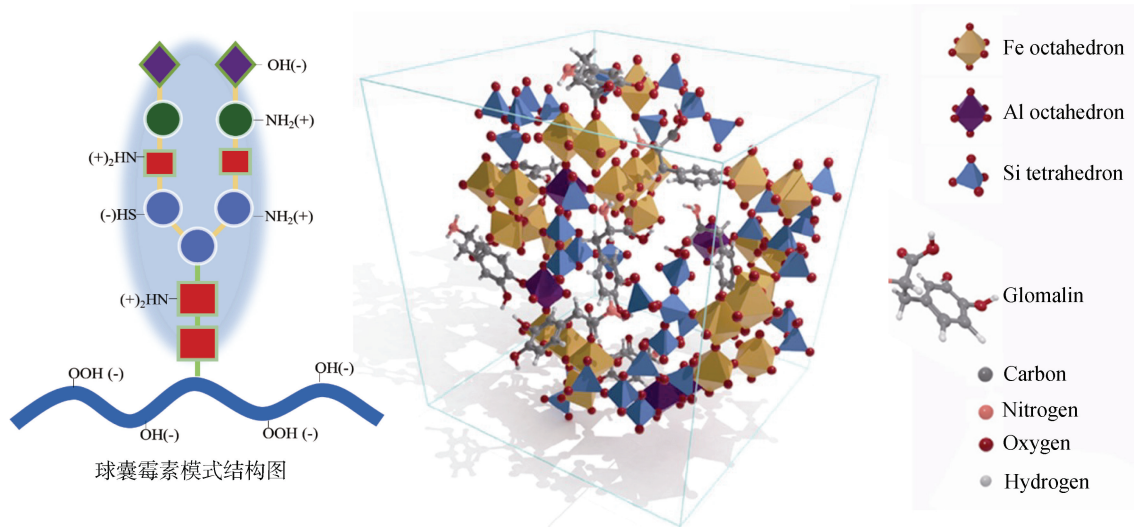


图 2 球囊霉素“全能胶水”的示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the “all-round glue” properties of glomalin

体的形成和稳定性、改善土壤凝聚力方面发挥重要作用^[49]。有研究表明，与休耕相比，种植作物的土壤由于根系对团聚体的物理缠结以及根系分泌物的增加，可显著提高土壤团聚体稳定性^[50]。不同作物根系的构型存在较大差异，其与土壤团聚体稳定性存在显著相关性。如荞麦根际土壤的团聚稳定性要高于燕麦和黑麦，具有更大根长、根表面积以及根长密度的物种可以显著增加表土的团聚体稳定性^[51]。根平均直径和根质量密度与团聚体稳定性呈正相关，而根长度与团聚体稳定性呈负相关^[52]。覆盖作物多样性改善了地下根系覆盖度，从而增加了其对土壤特性的积极影响^[53]。须根系植物比直根植物具有更高的单位体积根生物量、更高的根密度和更大的比表面积，使须根系植物具有更好的团聚效果和根际效应^[54]。

Watteau 等^[55]使用透射电子显微镜 (TEM) 观察了根组织形态、根与土壤之间的界面，发现根系在土壤-根界面处产生 2~20 mm 大小的稳定团聚体，对根系附着的土壤结构稳定性有很大影响。Freitas 等^[56]通过构建团聚体土柱研究根系在土柱内的生长趋势，结果表明，随着团聚体密度的增加，根系穿透团聚体的长度呈指数下降；随着团聚体大小的增加，根的生长也从微孔转移到大孔。Ali 等^[57]从力学角度研究了根系对土壤的团聚作用，多年生香根草的高根数密度、高根质量密度和低根木质素/纤维素比等性质有助于提高 SOC 含量，影响表面电

荷特性，降低净排斥力，从而提高团聚体的稳定性。

3 胶结机制决定着土壤团聚体的形成与转化

土壤团聚体的胶结机制主要体现在各组分之间的键能、反应过程、结合位点和结合方式^[58]。有机颗粒表面的阴离子基团可通过多价阳离子 ($\text{Al}^{3+}/\text{Ca}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$) 吸附在黏土矿物表面形成微结构：黏粒-多价阳离子-有机质，是形成土壤微团聚体的主要胶结机制^[9]，其键合力的顺序为： $\text{Al}^{3+} > \text{Fe}^{3+} > \text{Ca}^{2+} > \text{Na}^{+}$ ^[59]。土壤中主要有钙键、铁键、铝键和少量的微量元素等构成的复合体；铁、铝键复合体中腐殖质的热稳定性、对金属离子的亲和力及分子结构中胡敏酸的芳构化度都高于钙键复合体，而富里酸的芳构化度则低于钙键复合体^[60]。针对有机质 (L)、金属离子 (M)、矿物三元配合物的可能结构特征，有学者提出了 I 型 S-M-L 和 II 型 S-L-M 两种配合模型 (S 代表吸附点)。在蒙脱石-金属离子-腐殖酸体系中，表面形成的三元配合物最可能为 I 型结构；氧化硅、氢氧化铝和高岭石等矿物对水杨酸吸附则为 II 型结构。

土壤团聚体中各组分由氢键、范德华力、静电吸附、配位体交换、疏水作用或熵效应 (entropic effects) 等多种结合键能胶结^[2, 61-62]。通过密度函数理论 (DFT) 计算发现，阳离子的胶结作用分为直

接和间接两种：直接作用中，随着水分含量的增加，其配位方式由双齿配位转变为单齿配位；间接作用中，水分含量会影响团聚体中质子的释放数量，并进一步提出了土壤团聚体中阳离子的桥键模型^[63]。氧化铁-层状硅酸盐复合体的形成过程主要以 Fe-O-Si 键胶结^[64]。不同矿物对腐殖酸的结合键能不同，石英主要为氢键作用，氢氧化铝主要为表面配位作用，高岭石为多种形式并存。红外光谱 (FTIR) 和核磁共振 (¹³C NMR) 分析显示，赤铁矿与富里酸的作用主要是有机物表面的羟基或羧基与矿物表面的配位体交换^[65]；但通过配位和电荷分布理论模型 (LCD) 的理论计算，富里酸与针铁矿的相互作用主要是静电吸附^[66]。高岭石对胡敏酸的物理吸附是过渡吸附，化学吸附才是形成稳定高岭石-胡敏酸复合体的主要方式，并多发生在高岭石中 Al-OH 吸附位。钙饱和蒙脱石对土壤胡敏酸的高能位点吸附以化学吸附为主，是吸热反应；低能位点吸附以物理吸附为主，是放热反应^[67]。土壤经焦磷酸钠处理后，残留的有机质与黏粒矿物的连接主要是通过羟基形成的氢键，不是氨基与黏粒矿物的相互作用^[68]。

由于有机质的复杂性和异质性，不同类型有机分子在矿物上的吸附能力和吸附机制存在差异，导致有机分子在矿物上的吸附过程中出现优先吸附^[69]。结合衰减全反射-傅里叶变换红外光谱和高效液相-体积排阻色谱等技术，发现 pH 是土壤有机无机复

合体形成演化的关键因素，高 pH 时针铁矿表面位点选择性吸附分子量大于 12.9 kDa 的有机胶体；高岭石-针铁矿二元体则选择性吸附分子量小于 12.9 kDa 的有机胶体，其中二元体的针铁矿表面位点和高岭石硅氧基面位点分别选择性吸附分子量大于 7.5 kDa 和小于 7.5 kDa 的有机胶体^[70]。基于相互作用的热焓效应，发现土壤腐殖酸与矿物的复合过程是受焓驱动的放热反应，pH 4.0 时静电吸附和配体交换的相对贡献占比 26%~31%，pH 8.0 时疏水作用主导该过程 (图 3)。在进一步扩展 LCD 模型后发现有有机质在矿物界面上的空间分布和构象变化由双电层 (EDL) 中 Stern 层的静电势梯度决定：在低 pH 下，腐殖酸在针铁矿表面的吸附以内圈化学络合为主，Stern 层优先被占据；随 pH 升高，内圈络合作用减弱，腐殖酸形成近球状构象，在 Stern 层的相对占有量减少，部分腐殖酸进入 EDL 的扩散层^[71]。胶体类型和结合方式是驱动土壤有机无机复合体形成和演变的内因^[72]。

近年来，利用石英晶体微天平 (QCM-D)、二维相关红外光谱 (ATR-FTIR/2D-COS)、共聚焦拉曼显微镜等界面过程分析技术，研究发现在有机质-矿物的界面分子尺度上，EPS 中的蛋白质通过氢键优先吸附至层状硅酸盐矿物表面，而核酸则通过配位交换特异性识别铁氧化物^[73-74]。随着体系离子强度的增加，土壤矿物表面 EPS 中蛋白质结构由弱刚性的长链结构向强刚性的螺旋结构转变^[75]。此外，矿物-

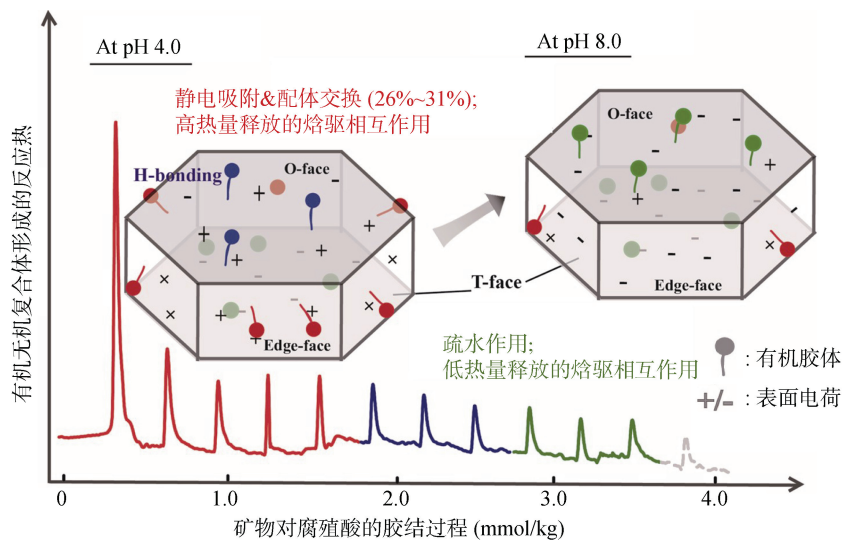


图 3 有机无机复合体的形成过程与机制

Fig. 3 The formation process and mechanism of organic-inorganic associations

有机复合体的两种形成方式（吸附和共沉淀）会导致 EPS 组分的选择性保留，并且氧化物类型（铁和铝）也会引起该过程中 EPS 组分的保留存在差异^[76-77]。在微生物-矿物的界面分子尺度上，发现希瓦氏菌（*Shewanella oneidensis*）外膜 c 型细胞色素 OmcA 和 MtrC 蛋白分别主导了细胞在针铁矿表面初期和后期定殖过程^[78]。当铁氧化物被腐殖酸或二氧化硅等有机无机组分包被后，外膜蛋白与矿物之间的黏附作用受到抑制，削弱了希瓦氏菌的定殖能力，进而影响着后续微团聚体的形成发育^[79]。

4 影响团聚体形成与稳定性的环境因子

显著影响土壤团聚体结构和稳定性的自然要素主要包括地形地貌、气候因素、植被因素和土地覆被；这些要素通过影响土壤的形成过程，进而影响 SOC 含量、土壤呼吸、土粒的重排等方面，从而调控团聚体的结构。气候通过影响温度、湿度、干湿与冻融交替过程使土壤颗粒定向排列来改变土壤的团聚。土壤湿度和干湿交替过程对土壤团聚具有两面性：一方面在湿润过程中，土壤颗粒易于分散，破坏膨胀性土壤的团聚，降低团聚体的稳定性；另一方面，干燥过程中易形成包被和桥接。同时，干湿交替还有利于有机质与土壤颗粒结合形成大团聚体和大孔隙^[80-81]。温度和湿度影响着土壤生物和微生物活性，从而影响腐殖质的分解速率，导致团聚体稳定性的变化^[10]。

植物类型影响土壤颗粒团聚的速率和稳定性。水稳定性团聚体（WSA）及其平均直径（MWD）与苯酚、木质素、蛋白质、糖类植物残体的化学组成密切相关^[82]。玉米残体含大量的酚类物质，其对团聚体的稳定性增强最大，但连作玉米会减少微团聚体数量；连作苜蓿的土壤团聚体稳定性较高，种植豆类作物的土壤团聚体稳定性较差。在植被自然恢复演替过程中，土壤的孔隙与结构参数大小表现为：顶级群落阶段>先锋乔木阶段>灌丛群落阶段>草地群落阶段>弃耕地阶段，说明植被自然恢复明显促进土壤孔隙与结构状况的提高与改善^[83]。植被生长演替会影响 SOC 的数量与质量，从而影响团聚体的空间变异。不同植被类型下，土壤团聚体稳定性空间相关和自相关的差异性源自土壤内外因

素的共同作用。

合理的土壤管理可增加土壤生物量、减少有机碳的矿化与流失^[84]。传统耕作措施可压实土壤、破坏土壤微生物生态、增加有机质暴露，加快矿化速率而使有机质含量降低，团聚体的稳定性下降；而少耕免耕有利于土壤形成大孔隙，增强水分移动性和有效性^[85]。施肥可提高土壤生物量，增强土壤的团聚；但也改变了土壤 pH 和电解质浓度，对土壤团聚体稳定性产生负面效应，影响程度依赖于肥料类型^[86]。磷肥有利于稳定性团聚体的形成；铵态氮肥易使土壤颗粒分散，但当铵态氮转化为硝态氮，这种分散作用随之消失^[87]。此外，灌溉过程中，灌溉水中离子类型和含量也会影响黏粒的胶结和分散。覆盖作物残体、施加有机肥（如粪肥、堆肥）均可增加土壤中碳的来源，从而提高土壤大团聚体含量^[88-89]。

地形地貌能够影响土壤水热条件和成土物质再分配，不同地形部位的土壤团聚体有着不同的空间特征，其中线性地形（曲率几乎为 0）较凹面地形（碗状地形、且碗口朝上）更益于大团聚体的形成^[90]；凹面地形较凸面地形（碗状地形、且碗口朝下）更益于稳定性团聚体的形成^[91]；Zádorová 等^[92]也发现相同结果，进一步研究发现坡度与团聚体稳定性的相关性较低，说明该研究区，坡度对土壤物质的再分配作用较弱。此外，团聚体稳定性的空间相关性分析表明凸面地形的团聚体空间相关性强于凹面的，说明凸面地形的团聚体主要受到土壤本质因素的作用，相比之下凹面团聚体受外在因素的影响更强^[93]。这可能因为相比于凹面，凸面地形土壤含有较低的 SOC、铁和锰，不益于团聚体的稳定，且土壤较为贫瘠，因此受到人为干扰作用的概率更小^[91]。耕作、放牧等人为作用对团聚体稳定性也不容忽视，尤其是对土壤可蚀性^[94]；而团聚体稳定性的极值分布主要由土地利用、高程和土壤本身决定，由于步长尺度对团聚体空间分布影响较弱，暗示着土壤母质、气候等外界因素影响显著^[95]。

5 未来主要发展方向

土壤团聚体形成、转化及其影响因素的研究已取得长足进步，但土壤是一个多组分、多相的开放

体系, 组分与结构复杂。未来还可在以下几个方面深入研究:

(1) 土壤团聚体的原位分析方法还需突破。现有团聚体粒径、稳定性等特性主要通过湿筛或干筛等破坏性分析方法所获得, 不能真实反映土壤团聚体的胶结过程和稳定机制。结合微流控芯片、共聚焦显微镜、微区断层扫描、荧光成像等技术, 创新发展土壤矿物-有机物-微生物界面相互作用的原位研究方法和一体化自动监测平台, 揭示团聚体形成过程中的物理-化学-生物耦合反应机理, 是土壤团聚体研究领域亟待解决的技术难题。

(2) 土壤团聚体形成过程的定量化描述还需深入。胶结物质在土壤团聚体的形成转化过程中起着决定性作用, 土壤作为具有自组织功能的有机无机复合体, 胶结物质驱动着“土壤矿物颗粒→有机无机复合体→微团聚体→大团聚体”的自组织形成过程, 但该过程的定量描述与临界特征(如胶结物质的类型、数量、胶结能力等)仍需加强。

(3) 土壤团聚体稳定性在景观尺度上的空间结构仍是薄弱环节。土壤团聚体是微观尺度上物理、化学、生物过程产物, 其在景观尺度上也受到物质循环、能量平衡的影响。由于区域尺度上土壤性质、环境因素(气候、地形、植被因素)和人类活动的时空变异快速、复杂, 使得景观尺度上土壤团聚体形成、动态和稳定的复杂过程仍不清楚, 这对深入理解土壤团聚体的环境功能和有效培育措施带来挑战。因此, 需进一步综合使用经典统计和地统计学方法, 实现大尺度上较高精度土壤团聚体稳定性空间分布信息的快速获取, 是目前有待深入研究的科学问题。

(4) 良好土壤结构体培育的产品与技术研发还有待加强。根据土壤团聚体层级结构特征, 利用物理、化学、生物等手段活化土壤铁铝氧化物和硅酸盐矿物, 增加表面积和表面活性, 促进微团聚体的形成; 结合有机分子的胶结特征, 研发以“有机分子-活性铁铝氧化物-土壤硅酸盐矿物”复合物原位自组装的土壤团聚体培育技术。同时, 以土壤矿物-有机质-微生物交互作用为核心, 突破“细菌-真菌-线虫-蚯蚓-根系”等土壤多级生物网络, 强化团聚体的稳定性, 研发“团聚体-有机质-生物功能”互作耦合的培肥增效技术。

深入理解胶结物质驱动下的土壤团聚体形成过

程与稳定机制, 从宏观表现与微观机制上揭示土壤退化和演变内因, 为培育良好土壤团聚体、开发优良土壤改良剂提供科学依据, 也为土壤可持续利用、抗蚀性的微观机理、环境修复、全球碳汇效应等领域提供基础数据和科学依据。

参考文献 (References)

- [1] Amézqueta E. Soil aggregate stability: A review[J]. *Journal of Sustainable Agriculture*, 1999, 14 (2/3): 83—151.
- [2] Blanco-Canqui H, Lal R. Mechanisms of carbon sequestration in soil aggregates[J]. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 2004, 23 (6): 481—504.
- [3] Dou S, Li K, Cui J T, et al. Advancement in the study on formation, transformation and structural characteristics of soil humic substances[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2008, 45 (6): 1148—1158. [窦森, 李凯, 崔俊涛, 等. 土壤腐殖物质形成转化与结构特征研究进展[J]. *土壤学报*, 2008, 45 (6): 1148—1158.]
- [4] Lal R. Food insecurity's dirty secret[J]. *Science*, 2008, 322 (5902): 673—674.
- [5] Zhao Q G, Zhang T L, Lu R K, et al. Mechanism, temporal-spatial changes and controlling countermeasures of soil degradation in hilly red soil region of southeastern China[M]. Beijing: Science Press, 2002. [赵其国, 张桃林, 鲁如坤, 等. 中国东部红壤地区土壤退化的时空变化、机理及调控[M]. 北京: 科学出版社, 2002.]
- [6] Emerson W W. The structure of soil crumbs[J]. *Journal of Soil Science*, 1959, 10 (2): 235—244.
- [7] Edwards A P, Bremner J M. Microaggregates in soils[J]. *Journal of Soil Science*, 1967, 18 (1): 64—73.
- [8] Tisdall J M, Oades J M. Organic matter and water-stable aggregates in soils[J]. *Journal of Soil Science*, 1982, 33 (2): 141—163.
- [9] Oades J M. Soil organic matter and structural stability: mechanisms and implications for management[J]. *Plant and Soil*, 1984, 76 (1/3): 319—337.
- [10] Bronick C J, Lal R. Soil structure and management: A review[J]. *Geoderma*, 2005, 124 (1/2): 3—22.
- [11] Kleber M, Sollins P, Sutton R. A conceptual model of organo-mineral interactions in soils: Self-assembly of organic molecular fragments into zonal structures on mineral surfaces[J]. *Biogeochemistry*, 2007, 85 (1): 9—24.
- [12] Young I M, Crawford J W. Interactions and self-organization in the soil-microbe complex[J]. *Science*, 2004, 304 (5677): 1634—1637.
- [13] Malamoud K, McBratney Alex B, Minasny B, et al. Modelling how carbon affects soil structure[J]. *Geoderma*, 2009, 149 (1/2): 19—26.
- [14] Oades J, Waters A. Aggregate hierarchy in soils[J]. *Soil*

- Research, 1991, 29 (6): 815.
- [15] Tan W F, Zhu Z F, Liu F, et al. Organic carbon distribution and storage of soil aggregates under land use change in Jiangnan Plain, Hubei Province[J]. *Journal of Natural Resources*, 2006, 21 (6): 973—980. [谭文峰, 朱志锋, 刘凡, 等. 江汉平原不同土地利用方式下土壤团聚体中有机碳的分布与积累特点[J]. *自然资源学报*, 2006, 21 (6): 973—980.]
- [16] Gonzalez J M, Laird D A. Carbon sequestration in clay mineral fractions from ¹⁴C-labeled plant residues[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2003, 67 (6): 1715—1720.
- [17] Wattel-Koekkoek E J W, van Genuchten P P L, Buurman P, et al. Amount and composition of clay-associated soil organic matter in a range of kaolinitic and smectitic soils[J]. *Geoderma*, 2001, 99 (1/2): 27—49.
- [18] Laird D A, Martens D A, Kingery W L. Nature of clay-humic complexes in an agricultural soil : I. Chemical, biochemical, and spectroscopic analyses[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2001, 65 (5): 1413—1418.
- [19] Schöning I, Knicker H, Kögel-Knabner I. Intimate association between O/N-alkyl carbon and iron oxides in clay fractions of forest soils[J]. *Organic Geochemistry*, 2005, 36 (10): 1378—1390.
- [20] Huang L, Wang C Y, Tan W F, et al. Distribution of organic matter in aggregates of eroded Ultisols, Central China[J]. *Soil and Tillage Research*, 2010, 108 (1/2): 59—67.
- [21] Igwe C A, Akamigbo F O R, Mbagwu J S C. Physical properties of soils of southeastern Nigeria and the role of some aggregating agents in their stability[J]. *Soil Science*, 1995, 160 (6): 431—441.
- [22] Zhang B, Horn R. Mechanisms of aggregate stabilization in Ultisols from subtropical China[J]. *Geoderma*, 2001, 99 (1/2): 123—145.
- [23] Hu G C, Zhang M K. Mineralogical evidence of the strong binding effect of iron oxides on soil aggregates[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2002, 33 (1): 25—27. [胡国成, 章明奎. 氧化铁对土粒强胶结作用的矿物学证据[J]. *土壤通报*, 2002, 33 (1): 25—27.]
- [24] Duiker S W, Rhoton F E, Torrent J, et al. Iron (hydr) oxide crystallinity effects on soil aggregation[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2003, 67 (2): 606—611.
- [25] Rhoton F E, Römken M J M, Bigham J M, et al. Ferrihydrite influence on infiltration, runoff, and soil loss[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2003, 67 (4): 1220—1226.
- [26] Barral M T, Arias M, Guérif J. Effects of iron and organic matter on the porosity and structural stability of soil aggregates[J]. *Soil and Tillage Research*, 1998, 46(3/4): 261—272.
- [27] Barberis E, Marsan F A, Boero V, et al. Aggregation of soil particles by iron oxides in various size fractions of soil B horizons[J]. *Journal of Soil Science*, 1991, 42(4): 535—542.
- [28] Goldberg S. Interaction of aluminum and iron oxides and clay minerals and their effect on soil physical properties: A review[J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 1989, 20 (11/12): 1181—1207.
- [29] Le Bissonnais Y. Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodibility : I. Theory and methodology: Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodibility[J]. *European Journal of Soil Science*, 2016, 67 (1): 11—21.
- [30] Liu D S. *Loess and the environment*[M]. Beijing: Science Press, 1985. [刘东生. *黄土与环境*[M]. 北京: 科学出版社, 1985.]
- [31] Boix-Fayos C, Calvo-Cases A, Imeson A C, et al. Influence of soil properties on the aggregation of some Mediterranean soils and the use of aggregate size and stability as land degradation indicators[J]. *Catena*, 2001, 44 (1): 47—67.
- [32] Clough A, Skjemstad J O. Physical and chemical protection of soil organic carbon in three agricultural soils with different contents of calcium carbonate[J]. *Soil Research*, 2000, 38 (5): 1005.
- [33] Lin D, Cai P, Peacock C L, et al. Towards a better understanding of the aggregation mechanisms of iron (hydr) oxide nanoparticles interacting with extracellular polymeric substances : Role of pH and electrolyte solution[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 645: 372—379.
- [34] Guhra T, Ritschel T, Totsche K U. Formation of mineral-mineral and organo-mineral composite building units from microaggregate-forming materials including microbially produced extracellular polymeric substances[J]. *European Journal of Soil Science*, 2019, 70 (3): 604—615.
- [35] Martin J P, Aldrich D G. Influence of soil exchangeable cation ratios on the aggregating effects of natural and synthetic soil conditioners[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1955, 19 (1): 50—54.
- [36] Chenu C, Cosentino D. *Microbial regulation of soil structural dynamics*//Ritz K, Young I. *The architecture and biology of soils: Life in inner space*[M]. UK: CABI, 2011: 37—70.
- [37] Martin J P, Richards S J. Influence of the copper, zinc, iron, and aluminum salts of some microbial and plant polysaccharides on aggregation and hydraulic conductivity of ramona sandy loam[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1969, 33 (3): 421—423.
- [38] Barré P, Hallett P D. Rheological stabilization of wet

- soils by model root and fungal exudates depends on clay mineralogy[J]. *European Journal of Soil Science*, 2009, 60 (4): 525—538.
- [39] Sandhya V, Ali Sk Z. The production of exopolysaccharide by *Pseudomonas putida* GAP-P45 under various abiotic stress conditions and its role in soil aggregation[J]. *Microbiology*, 2015, 84 (4): 512—519.
- [40] Costa O Y A, Raaijmakers J M, Kuramae E E. Microbial extracellular polymeric substances: Ecological function and impact on soil aggregation[J]. *Frontiers in Microbiology*, 2018, 9: 1636.
- [41] Cheng C, Shang-Guan W L, He L Y, et al. Effect of exopolysaccharide-producing bacteria on water-stable macro-aggregate formation in soil[J]. *Geomicrobiology Journal*, 2020, 37 (8): 738—745.
- [42] Büks F, Kaupenjohann M. Enzymatic biofilm digestion in soil aggregates facilitates the release of particulate organic matter by sonication[J]. *Soil*, 2016, 2 (4): 499—509.
- [43] Redmile-Gordon M, Gregory A S, White R P, et al. Soil organic carbon, extracellular polymeric substances (EPS), and soil structural stability as affected by previous and current land-use[J]. *Geoderma*, 2020, 363: 114143.
- [44] Sher Y, Baker N R, Herman D, et al. Microbial extracellular polysaccharide production and aggregate stability controlled by switchgrass (*Panicum virgatum*) root biomass and soil water potential[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2020, 143: 107742.
- [45] Zethof J H T, Bettermann A, Vogel C, et al. Prokaryotic community composition and extracellular polymeric substances affect soil microaggregation in carbonate containing semiarid grasslands[J]. *Frontiers in Environmental Science*, 2020, 8: 51.
- [46] Zhang M, Cai P, Wu Y C, et al. Bacterial extracellular polymeric substances: from the perspective of soil ecological functions[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2022, 59 (2): 308—323. [张铭, 蔡鹏, 吴一超, 等. 细菌胞外聚合物: 基于土壤生态功能的视角[J]. *土壤学报*, 2022, 59 (2): 308—323.]
- [47] Spohn M, Giani L. Water-stable aggregates, glomalin-related soil protein, and carbohydrates in a chronosequence of sandy hydromorphic soils[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2010, 42 (9): 1505—1511.
- [48] Ji L L, Tan W F, Chen X H. Arbuscular mycorrhizal mycelial networks and glomalin-related soil protein increase soil aggregation in Calcaric Regosol under well-watered and drought stress conditions[J]. *Soil and Tillage Research*, 2019, 185: 1—8.
- [49] Liu J Y, Zhou Z Z, Su X M. Review of the mechanism of root system on the formation of soil aggregates[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2020, 34 (3): 267—273. [刘均阳, 周正朝, 苏雪萌. 植物根系对土壤团聚体形成作用机制研究回顾[J]. *水土保持学报*, 2020, 34 (3): 267—273.]
- [50] Monroe C D, Kladvik E J. Aggregate stability of a silt loam soil as affected by roots of corn, soybeans and wheat[J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 1987, 18 (10): 1077—1087.
- [51] Hudek C, Putinica C, Otten W, et al. Functional root trait-based classification of cover crops to improve soil physical properties[J]. *European Journal of Soil Science*, 2022, 73 (1): e13147.
- [52] Garcia L, Damour G, Gary C, et al. Trait-based approach for agroecology: contribution of service crop root traits to explain soil aggregate stability in vineyards[J]. *Plant and Soil*, 2019, 435 (1/2): 1—14.
- [53] Saleem M, Pervaiz Z H, Contreras J, et al. Cover crop diversity improves multiple soil properties via altering root architectural traits[J]. *Rhizosphere*, 2020, 16: 100248.
- [54] Li J Y, Yuan X L, Ge L, et al. Rhizosphere effects promote soil aggregate stability and associated organic carbon sequestration in rocky areas of desertification[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2020, 304: 107126.
- [55] Watteau F, Vilemin G, Burtin G, et al. Root impact on the stability and types of micro-aggregates in silty soil under maize: Root impact on soil microaggregates[J]. *European Journal of Soil Science*, 2006, 57 (2): 247—257.
- [56] Freitas P L, Zobel R W, Synder V A. Corn root growth in soil columns with artificially constructed aggregates[J]. *Crop Science*, 1999, 39 (3): 725—730.
- [57] Ali W, Hussain S, Chen J, et al. Cover crop root-derived organic carbon influences aggregate stability through soil internal forces in a clayey red soil[J]. *Geoderma*, 2023, 429: 116271.
- [58] Tan W F, Zhou S Z, Liu F, et al. Advancement in the study on interactions between iron-aluminum (hydro-) oxides and clay minerals in soil[J]. *Soils*, 2007, 39 (5): 726—730. [谭文峰, 周素珍, 刘凡, 等. 土壤中铁铝氧化物与黏土矿物交互作用的研究进展[J]. *土壤*, 2007, 39 (5): 726—730.]
- [59] Tisdall J M. Formation of soil aggregates and accumulation of soil organic matter//Carter M R, Stewart B A. Structure and organic matter storage in agricultural soils[M]. CRC Press, 2020: 57—96.
- [60] Xu J M, Cheema S U, Yuan K N. Studies on organo-mineral complexes in soil IX. Characteristics of humus in calcium-bound and iron/aluminum-bound organo-mineral complexes in soil[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1999, 36 (2): 168—178. [徐建民, 赛夫, 袁可能. 土壤有机矿物质复合体研究IX. 钙键复合体和铁铝键复合体中腐殖质

- 的性状特征[J]. 土壤学报, 1999, 36 (2): 168—178.]
- [61] Wei S Y, Liu F, Feng X H, et al. Formation and transformation of iron oxide-kaolinite associations in the presence of iron (II) [J]. Soil Science Society of America Journal, 2011, 75 (1): 45—55.
- [62] Chen H F, Li Q, Wang M X, et al. XPS and two-dimensional FTIR correlation analysis on the binding characteristics of humic acid onto kaolinite surface[J]. Science of the Total Environment, 2020, 724: 138154.
- [63] Aquino A J A, Tunega D, Schaumann G E, et al. The functionality of cation bridges for binding polar groups in soil aggregates : Functionality of Cation Bridges[J]. International Journal of Quantum Chemistry, 2011, 111 (7/8): 1531—1542.
- [64] Wei S Y, Tan W F, Zhao W, et al. Microstructure, interaction mechanisms, and stability of binary systems containing goethite and kaolinite[J]. Soil Science Society of America Journal, 2012, 76 (2): 389—398.
- [65] Gu B H, Schmitt J, Chen Z H, et al. Adsorption and desorption of natural organic matter on iron oxide: Mechanisms and models[J]. Environmental Science & Technology, 1994, 28 (1): 38—46.
- [66] Weng L P, Koopal L K, Hiemstra T, et al. Interactions of calcium and fulvic acid at the goethite-water interface[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2005, 69 (2): 325—339.
- [67] Wang X D, Zhang Y P, Hu T T, et al. Characteristics of adsorption of humic acids and its fractions from soils with different fertilization by montmorillonite I. The adsorption of humic acid by montmorillonite[J]. Acta Pedologica Sinica, 2000, 37 (4): 506—513. [王旭东, 张一平, 胡田田, 等. 蒙脱石对不同施肥处理土壤胡敏酸及其级分的吸附特征 I. 蒙脱石对胡敏酸的吸附特征 [J]. 土壤学报, 2000, 37 (4): 506—513.]
- [68] Cheshire M V, Dumat C, Fraser A R, et al. The interaction between soil organic matter and soil clay minerals by selective removal and controlled addition of organic matter: Soil clay-organic matter interactions[J]. European Journal of Soil Science, 2000, 51 (3): 497—509.
- [69] Xu Y, Bai Y L, Hiemstra T, et al. Resolving humic and fulvic acids in binary systems influenced by adsorptive fractionation to Fe- (hydr) oxide with focus on UV-Vis analysis[J]. Chemical Engineering Journal, 2020, 389: 124380.
- [70] Chen H F, Koopal L K, Xu J L, et al. Selective adsorption of soil humic acid on binary systems containing kaolinite and goethite : Assessment of sorbent interactions[J]. European Journal of Soil Science, 2019, 70 (5): 1098—1107.
- [71] Xu Y, Hiemstra T, Tan W F, et al. Key factors in the adsorption of natural organic matter to metal (hydr) oxides : Fractionation and conformational change[J]. Chemosphere, 2022, 308: 136129.
- [72] Chen H F, Koopal L K, Xiong J, et al. Mechanisms of soil humic acid adsorption onto montmorillonite and kaolinite[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2017, 504: 457—467.
- [73] Cao Y Y, Wei X, Cai P, et al. Preferential adsorption of extracellular polymeric substances from bacteria on clay minerals and iron oxide[J]. Colloids and Surfaces B: Biointerfaces, 2011, 83 (1): 122—127.
- [74] Lin D, Ma W T, Jin Z X, et al. Interactions of EPS with soil minerals: A combination study by ITC and CLSM[J]. Colloids and Surfaces B: Biointerfaces, 2016, 138: 10—16.
- [75] Cai P, Lin D, Peacock C L, et al. EPS adsorption to goethite: Molecular level adsorption mechanisms using 2D correlation spectroscopy[J]. Chemical Geology, 2018, 494: 127—135.
- [76] Mikutta R, Zang U, Chorover J, et al. Stabilization of extracellular polymeric substances (*Bacillus subtilis*) by adsorption to and coprecipitation with Al forms[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2011, 75 (11): 3135—3154.
- [77] Zhang M, Peacock C L, Cai P, et al. Selective retention of extracellular polymeric substances induced by adsorption to and coprecipitation with ferrihydrite[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2021, 299: 15—34.
- [78] Jing X X, Wu Y C, Shi L, et al. Outer membrane *c*-Type Cytochromes OmcA and MtrC play distinct roles in enhancing the attachment of *Shewanella oneidensis* MR-1 cells to goethite[J]. Applied and Environmental Microbiology, 2020, 86 (23): e01941-20.
- [79] Zou M Z, Wu Y C, Redmile-Gordon M, et al. Influence of surface coatings on the adhesion of *Shewanella oneidensis* MR-1 to hematite[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2022, 608: 2955—2963.
- [80] Czarnes S, Hallett P D, Bengough A G, et al. Root- and microbial-derived mucilages affect soil structure and water transport : Mucilages , soil structure and sorptivity[J]. European Journal of Soil Science, 2000, 51 (3): 435—443.
- [81] Deneff K, Six J, Bossuyt H, et al. Influence of dry-wet cycles on the interrelationship between aggregate , particulate organic matter , and microbial community dynamics[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2001, 33 (12/13): 1599—1611.
- [82] Martens D. Plant residue biochemistry regulates soil carbon cycling and carbon sequestration[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2000, 32 (3): 361—369.
- [83] Zhao S W, Zhao Y G, Wu J S. Quantitative analysis of soil pores under natural vegetation successions on the Loess Plateau[J]. Science China: Earth Science, 2010, 40 (2): 223—231. [赵世伟, 赵勇钢, 吴金水. 黄土高

- 原植被演替下土壤孔隙的定量分析[J]. 中国科学:地球科学, 2010, 40(2): 223—231.]
- [84] Huang C Q, Zhou Q, Tan W F. Effects of agricultural utilization on composition of binding agents and cementation characteristics of loess[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2017, 36(4): 43—49. [黄传琴, 周琴, 谭文峰. 不同农业利用条件对黄土胶结物质组成与团聚特征的影响[J]. 华中农业大学学报, 2017, 36(4): 43—49.]
- [85] Plante A F, McGill W B. Soil aggregate dynamics and the retention of organic matter in laboratory-incubated soil with differing simulated tillage frequencies[J]. Soil and Tillage Research, 2002, 66(1): 79—92.
- [86] Wang X X, Zhang T L, Lu R K. Effect of application of fertilizers on soil structure in red soil[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2001, 9(3): 70—72. [王兴祥, 张桃林, 鲁如坤. 施肥措施对红壤结构的影响[J]. 中国生态农业学报, 2001, 9(3): 70—72.]
- [87] Haynes R J, Naidu R. Influence of lime, fertilizer and manure applications on soil organic matter content and soil physical conditions: A review[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 1998, 51(2): 123—137.
- [88] Carrizo M E, Alesso C A, Soares Franco H H, et al. Tensile strength of mollisols of contrasting texture under influence of plant growth and crop residues addition[J]. Geoderma, 2018, 329: 1—10.
- [89] Guo Z C, Zhang J B, Fan J, et al. Does animal manure application improve soil aggregation? Insights from nine long-term fertilization experiments[J]. Science of the Total Environment, 2019, 660: 1029—1037.
- [90] Siqueira D S, Marques J, Pereira G T. The use of landforms to predict the variability of soil and orange attributes[J]. Geoderma, 2010, 155(1/2): 55—66.
- [91] Jakšik O, Kodešová R, Kubiš A, et al. Soil aggregate stability within morphologically diverse areas[J]. Catena, 2015, 127: 287—299.
- [92] Zádorová T, Jakšik O, Kodešová R, et al. Influence of terrain attributes and soil properties on soil aggregate stability[J]. Soil and Water Research, 2011, 6(3): 111—119.
- [93] Camargo L A, Marques Júnior J, Pereira G T. Spatial variability of physical attributes of an alfisol under different hillslope curvatures[J]. Revista Brasileira de Ciência do Solo, 2010, 34(3): 617—630.
- [94] Ye L P, Tan W F, Fang L C, et al. Spatial analysis of soil aggregate stability in a small catchment of the Loess Plateau, China: I. Spatial variability[J]. Soil and Tillage Research, 2018, 179: 71—81.
- [95] Ye L P, Tan W F, Fang L C, et al. Research advances in spatial variability of soil aggregate by using geostatistics[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2019, 17(2): 146—153. [叶露萍, 谭文峰, 方临川, 等. 基于地统计学的土壤团聚体空间变异研究进展[J]. 中国水土保持科学, 2019, 17(2): 146—153.]

(责任编辑: 陈德明)