

# 干湿交替下土壤团聚体稳定性研究进展与展望<sup>①</sup>

刘 艳<sup>1,2</sup>, 马茂华<sup>1</sup>, 吴胜军<sup>1</sup>, 冉义国<sup>1,2</sup>, 王小晓<sup>1,2</sup>, 黄 平<sup>1\*</sup>

(1 中国科学院水库水环境重点实验室, 中国科学院重庆绿色智能技术研究院, 重庆 400714; 2 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘 要:** 团聚体是土壤结构的基本单元, 对土壤系统功能(如结构稳定和肥力保持等)至关重要。而干湿交替是导致土壤团聚体演变的重要环境因子, 显著影响团聚体稳定性。本文回顾了 70 多年来干湿交替对土壤团聚体稳定性影响的研究历程, 总结了干湿交替条件下土壤团聚体粒径分布和水稳性的变化特征, 着重阐述了干湿交替对团聚体稳定性的影响机制, 以及影响干湿交替条件下团聚体稳定性的主要因素, 并比较分析了近 80 年来土壤团聚体稳定性研究的主要方法。通过梳理发现, 尽管目前报道了大量有关干湿交替对不同类型土壤团聚体稳定性的影响, 但是相关研究多集中在单一的土壤系统中, 鲜有从复合生态系统的角度探索干湿交替复合作用过程与多重影响机制。同时, 由于不同研究所采用的方法差异较大, 导致其结果往往可比性较差。由此, 本文提出了该领域今后潜在的研究方向: 敏感脆弱区干湿交替下土壤团聚体形成和演变机制; 干湿交替对土壤团聚体中化学污染物迁移转化的影响; 新技术, 如电子计算机断层扫描技术(computed tomography, CT)等在团聚体研究中的应用; 植物群落与土壤团聚体周转变交互作用过程与机理等。

**关键词:** 土壤团聚体; 结构稳定性; 干湿交替; 生态系统功能; 断层扫描技术

**中图分类号:** S152.4 **文献标识码:** A

土壤团聚体是由砂粒、粉粒、黏粒在各种有机无机胶结剂的作用下粘结而成的基本土壤结构单元<sup>[1]</sup>, 其稳定性显著影响土壤结构与功能。20 世纪下半叶, 土壤团聚体的形成机制研究得到了突破性进展, 相继提出了 Emerson 土壤团粒结构模型<sup>[2]</sup>、微团聚体形成模型<sup>[3]</sup>、团聚体等级模型<sup>[4]</sup>。土壤团聚体根据其粒径大小可以分为大团聚体(>0.25 mm)和微团聚体(<0.25 mm), 也可根据其抗外力作用分为稳定性团聚体和非稳定性团聚体, 其中水稳性团聚体是较受关注的一类稳定性团聚体<sup>[5-7]</sup>。土壤团聚体易受到土壤动物、微生物、植物根系、人类活动及环境变化(如干湿交替、冻融交替、火)等因素影响, 其中干湿交替是土壤经历最频繁的水分条件变化过程, 对土壤团聚体粒径分布和稳定性等产生重要影响<sup>[7]</sup>。

干湿交替是土壤经历多次干燥湿润的循环往复过程, 是影响土壤颗粒团聚过程的重要环境因子。有关“干湿交替”的研究最早见于 20 世纪 30 年代, 后由 1958 年 Birch<sup>[8]</sup>发现干湿交替对土壤呼吸的激发作

用而受到广泛关注。自然界中, 降雨、物质的扩散流动及冷凝等自然现象的湿润作用, 及太阳辐射、风等的干燥作用共同形成了土壤的干湿交替过程<sup>[7]</sup>。干湿交替通过改变土壤团聚体周围的水环境及孔隙度, 使团聚体收缩和膨胀, 影响团聚体的形成、粒径分布、结构稳定性, 且其对水稳性团聚体理化性质的影响尤为显著<sup>[7, 9]</sup>。除此之外, 干湿交替可通过改变微生物群落及活性, 影响团聚体内有机质和营养元素的释放, 进而影响土壤肥力。大量研究表明, 干湿交替影响团聚体与颗粒有机物、微生物群落之间的关系<sup>[10-11]</sup>, 同时改变土壤养分(如碳<sup>[12]</sup>、氮<sup>[13]</sup>、磷<sup>[14]</sup>)循环。

针对干湿交替对团聚体稳定性影响的重要研究历程, 本文进行了整理和归纳(图 1)。20 世纪 80 年代以前, 有关干湿交替对土壤团聚体影响的研究侧重于土壤含水量对团聚体的影响机制, 包括降雨、浸湿速率等对土壤团聚体稳定性的影响。例如, Seginer 和 Morin 研究表明, 裸露土壤的入渗能力下降与降落在地表的水滴数量有关, 而与降雨时间无直接关联;

基金项目: 国家自然科学基金项目(41401243, 41771266, 41701247), 重庆市社会事业与民生保障科技创新专项重点研发项目(cstc2017shms-zdyfX0074), 中国科学院青年创新促进会项目(2017391), 重庆市应用开发计划项目(cstc2014yykfC20002)和土壤与农业可持续发展国家重点实验室开放基金项目(Y412201401)资助。

\* 通讯作者(huangping@cigit.ac.cn)

作者简介: 刘艳(1992—), 女, 湖北荆州人, 硕士研究生, 主要从事土壤团聚体和生态系统服务研究。E-mail: liuyan1115@mails.ucas.edu.cn

随后, Utomo 和 Dexter<sup>[21]</sup>利用去离子水对土壤进行处理,发现干湿交替会促使团聚体中微裂纹的形成,从而降低团聚体的抗拉强度,增加土壤易碎性,降低团聚体稳定性。80 年代后,研究方向细化到干湿交替对土壤团聚体养分循环、孔隙结构、气体分布的影响。例如 Mikha 等<sup>[23]</sup>研究发现干湿交替可显著减少

土壤有机碳矿化量。另外,进入 21 世纪以来,电子计算机断层扫描技术(CT)也逐渐应用到团聚体微观结构及稳定性研究中,例如 Ma 等<sup>[24]</sup>利用基于同步辐射 X 射线的显微断层扫描技术(SR- $\mu$ CT)对干湿交替条件下老成土团聚体内部孔隙结构变化的影响进行了研究。

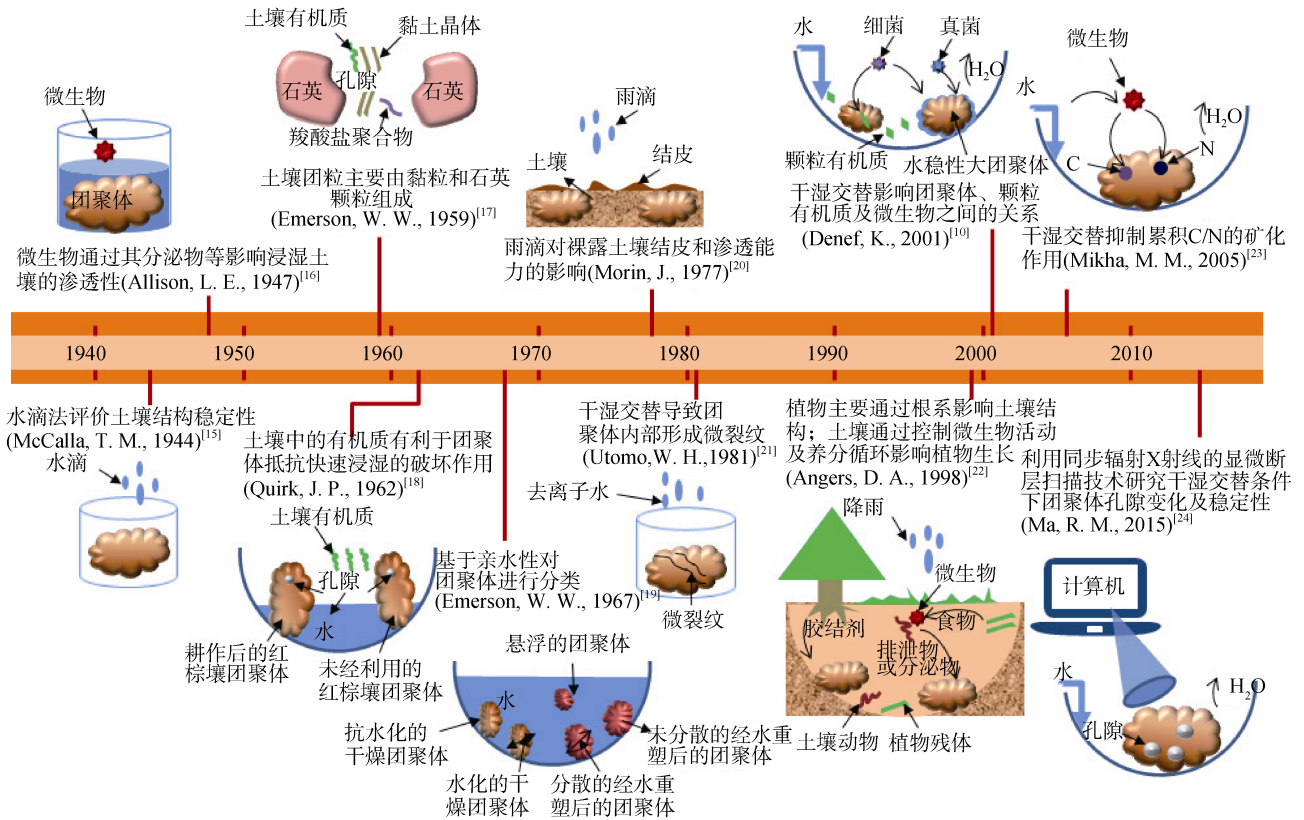


图 1 干湿交替对土壤团聚体影响的重要研究历程  
Fig. 1 Milestones of critical advances in understanding the effect of wetting-drying cycle on soil aggregates

不同干湿交替阶段,在团聚体粒径分布和稳定性变化特征方面,目前学者尚未得出一致结论。Shiel 等<sup>[26]</sup>研究发现在干湿交替初期,黏质土(61% 黏粒, 33% 粉砂)团聚体粒径下降明显,且经过 4 次干湿交替后,机械重组后的团聚体和自然状态下的团聚体粒径分布相似;但 Mikha 等<sup>[23]</sup>研究表明干湿交替初期,粉砂壤土(22% 黏粒, 69% 粉砂, 9% 砂粒)团聚体粒径分布没有显著变化,直到第 4 次干湿交替后,干湿交替对团聚体才有微小影响;Denef 等<sup>[10]</sup>研究了干湿交替对团聚体稳定性及土壤有机质、微生物群落的影响,结果表明,尽管前 2 次干湿交替会显著降低粉砂壤土(23% 黏粒, 36% 粉砂, 41% 砂粒)团聚体稳定性,促进团聚体周转,但在团聚体整个崩解和形成周期中,干湿交替对团聚体周转并无较大影响。因此,开展干湿交替条件下土壤团聚体稳定性研究,探究干

湿交替对团聚体的作用机理及影响因素,对于农业生产、干湿交替敏感区域(如湿地、河岸带、水库消落带等)的保护及生态恢复具有重要的指导意义。

本文结合近年来国内外研究成果,主要讨论了干湿交替对土壤团聚体的作用过程和机理,比较分析了干、湿过程对土壤团聚体的影响机制,并总结了团聚体稳定性的研究方法,旨在探讨影响团聚体对干湿交替响应的主导因素,及该领域已取得的主要进展、存在的问题以及今后的发展方向,为土壤团聚体研究、农业生产及生态环境脆弱区域管理提供参考。

### 1 团聚体稳定机制

团聚体稳定性是指在外力作用下,土壤维持其自身结构的能力,其对土壤的水分渗透和侵蚀具有重要影响<sup>[27]</sup>。早在 20 世纪初,就有学者对团聚体稳定性

进行了研究,多集中在影响因素、衡量指标及方法学的研究上,鲜有深入探讨团聚体稳定机制的研究。到 20 世纪中叶,尽管土壤有机质、黏粒及铁铝氧化物等胶结剂对团聚体的稳定作用得到了重视,但系统阐述团聚体稳定机制的研究仍然较为鲜见。直至 80 年代初,各类土壤胶结剂在土壤团聚过程中的作用才得到系统认识。土壤胶结剂是促进团聚体形成和稳定的关键物质, Tisdall 和 Oades<sup>[1]</sup>将其分为有机胶结剂和无机胶结剂。目前,受到国内外认可的团聚体稳定机制主要包括:土壤有机质、根系菌丝及其分泌物等有机胶结剂对团聚体的粘结作用;黏粒、多价金属离子、氧化物等无机胶结剂与团聚体颗粒间的相互作用力。

有机胶结剂分为临时性胶结剂(temporary binding agents)、瞬时性胶结剂(transient binding agents)、持久性胶结剂(persistent binding agents)<sup>[1]</sup>,受微生物活动及植物根系影响较大。临时性胶结剂主要包括根系、菌丝和真菌,主要通过物理缠结作用促进团聚体稳定,尤其影响大团聚体的水稳性;瞬时性胶结剂包括微生物和植物产生的多糖,其可将黏粒大小的颗粒粘结成团聚体,但易被微生物快速分解<sup>[1]</sup>;而持久性胶结剂则主要是由持久性的芳香腐殖质组成,多为土壤黏粒、多价金属及有机质的混合物,非常稳定,不易受快速湿润和人类活动的影响,是保持微团聚体水稳性的重要胶结剂<sup>[1]</sup>。

无机胶结剂主要包括黏粒、多价金属离子、铝硅酸盐、氧化物(如晶质氧化铁)等<sup>[1,28]</sup>,受成土母质类型影响。其中,黏粒是重要的无机胶结剂,其膨胀、分散和絮凝均影响团聚体稳定性,尤其对黏土的团聚体稳定性影响明显。团聚体在水化作用下,部分黏粒会慢慢释放,并聚集在团聚体周围,堵塞孔隙,对土壤结构产生不利影响;但部分黏粒会发生絮凝,促进团聚体的形成<sup>[29]</sup>。黏粒对团聚体稳定性既有促进作用,也有抑制作用,这与土壤电解质碱度、可交换性钠含量等特征有关。而其他无机胶结物(如多价金属离子、氧化物等)影响电解质性质,从而影响颗粒对团聚体的稳定作用。有研究表明,铁、铝倍半氧化物可作为絮凝剂,促进黏粒絮凝,提高微团聚体稳定性<sup>[30]</sup>。

不同类型或性质的土壤,各类胶结剂的含量不尽相同,其主导的稳定机制往往差异较大。例如,对于有机质含量较低的红壤,无机胶结剂在团聚体稳定过程中起主导作用。闫峰陵<sup>[31]</sup>研究表明,红壤团聚体稳定性与土壤有机质、腐殖酸等有机胶结剂相关性较低,而与铁铝氧化物及黏粉粒等无机胶结剂含量呈显著正相关关系;Zhang 和 Horn<sup>[32]</sup>对第四纪红黏土进行研究,结果再次表明土壤有机质对团聚体的粘结作

用要小于由于土壤矿物膨胀或气体产生的压实作用。此外, Jozefaciuk 和 Czachor<sup>[33]</sup>利用从黄土(Loessial soil)中提取的 4 类添加物(有机质、氧化铁、硅胶、氧化铝)人工合成团聚体,研究发现除了氧化铝,其他添加物均能增加大团聚体的水稳性,但当这 3 类添加物含量较低时降低粒径为 1 ~ 2 mm 团聚体的稳定性。尽管不同含量的胶结剂对团聚体稳定的贡献大小存在差别,而对于自然土壤,不同胶结剂的共同作用可能导致团聚体稳定性向不同方向变化。从上述作用机理来看,团聚体胶结剂易受到外界环境因子的影响。其中,干湿交替对团聚体稳定影响过程和机制一直以来是土壤团聚体研究的重要内容。

## 2 干湿交替对土壤团聚体稳定性的影响

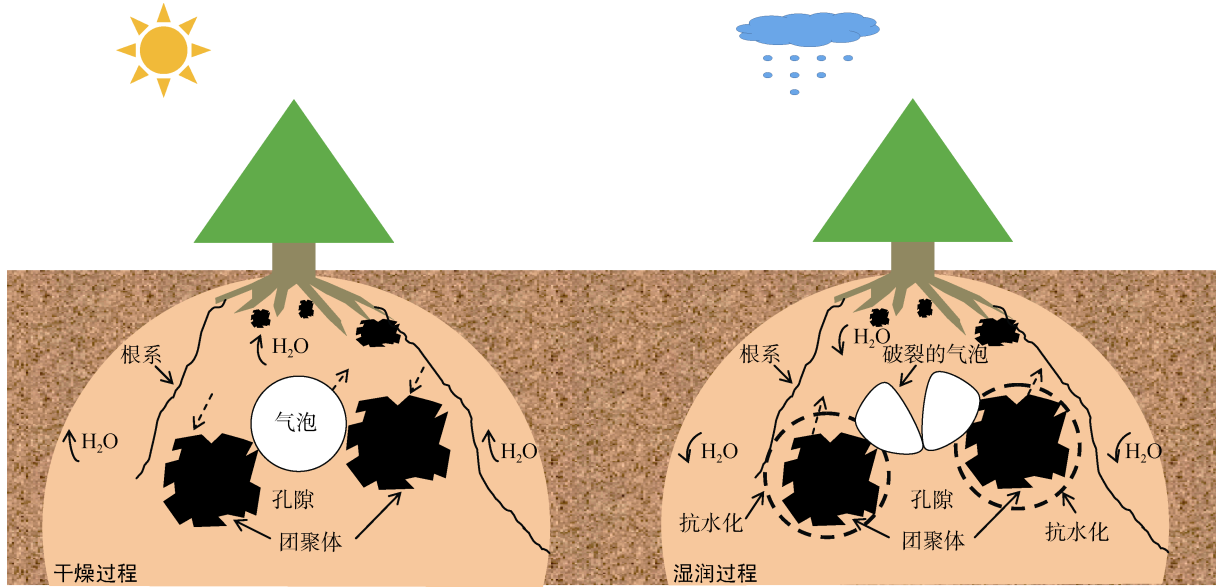
### 2.1 干湿交替对团聚体粒径分布的影响

团聚体形成受干湿交替作用的影响,且不同粒级土壤团聚体在形成的不同阶段,对干湿交替的响应不尽一致。在微团聚体形成初期,由于降雨等因素引起的干湿交替作用会影响黏粒、粉粒、砂粒的悬浮和迁移<sup>[8]</sup>,以及对颗粒粘起重要作用的多价阳离子形态,如铁离子<sup>[1]</sup>;在大团聚体形成过程中,对结构不稳定的土壤进行快速的湿润或浸透,会导致土壤团聚体崩解<sup>[34]</sup>,进而影响大团聚体稳定性。干湿交替对不同粒径的团聚体影响程度也不同,受团聚体中心离蒸发面距离和孔隙结构的影响<sup>[35]</sup>。例如,粒径小且多孔的团聚体受到干湿交替作用后,更容易在短时间内干燥和浸湿<sup>[35]</sup>。干湿交替主要通过改变团聚体间或团聚体内的孔隙结构<sup>[36]</sup>,使团聚体收缩和膨胀,改变土壤团聚体粒径<sup>[37]</sup>,其影响机制如图 2 所示。在干燥过程中,土壤水分蒸发,外界空气进入土壤孔隙,团聚体孔隙间气泡膨胀,团聚体受到挤压而收缩,其粒径减小;在湿润过程中,水进入土壤孔隙,团聚体孔隙间气泡受到挤压,同时团聚体产生一定的抗水化性,并由于吸水发生膨胀,团聚体粒径增大。

干湿交替主要通过自然降雨、灌溉、水位变化、人工模拟降雨试验等实现,国内外针对干湿交替对团聚体粒径的影响尚未得出一致结论,但基本认为干湿交替初期(1 ~ 4 次)会降低团聚体粒径,但经过多次干湿交替后,团聚体粒径分布趋向稳定且团聚作用下降(表 1)。例如, Degens 和 Sparling<sup>[43]</sup>对西澳大利亚珀斯市(Perth, Western Australia)大学农场的灰化土(a lateritic podzol)进行室内干湿交替处理,发现经过最初 2 次干湿交替后,大团聚体(粒径 > 2 mm、1 ~ 2 mm、0.25 ~ 0.5 mm)下降 48% ~ 65%;经过第 3 次干湿交替后,团聚体快速恢复到最初的 78% ~ 100%,经过

第 4~6 次干湿交替后,土壤团聚作用下降。而 Sarah 和 Rodeh<sup>[42]</sup>在自然降雨和模拟降雨条件下对石灰土团聚体研究,发现灌木和无灌木地区微环境的团聚体粒径和稳定性均随降水量的增加而增大,且增加干湿交替次数可提高土壤结构稳定性;在国内,王彬<sup>[40]</sup>

对哈尔滨市宾县黑土进行研究,结果表明干湿交替过程初期对大团聚体破坏作用明显,且干湿交替可促进粒径<0.2 mm 的微团聚体向粒径为 0.2~1 mm 的团聚体转化,此转化过程存在阈值现象(3 次),一旦达到形成新生团聚体的阈值后其团聚作用随之下降。



(“↗”代表膨胀,“↘”代表收缩,土壤为非变性土)

图 2 干湿交替条件下团聚体粒径变化机制(改编自 Kaiser 和 Berhe<sup>[38]</sup>)  
Fig. 2 Change mechanism in soil aggregate size induced by wetting-drying cycle

表 1 干湿交替对团聚体粒径分布的影响

Table 1 Effects of wetting-drying cycle on size distribution of soil aggregates

文献	研究地点	土壤类型与质地	干湿交替描述	主要结论
[39]	湖北省咸宁市	第四纪黏土、泥质页岩发育红壤	室内人工模拟降雨	在 60 mm/h 雨强下,雨滴对团聚体的机械打击破碎作用主要发生在降雨的最初阶段; 大团聚体的百分含量及 MWD 均随降雨时间增加呈幂函数减小
[40]	哈尔滨市宾县	黑土	室内干湿交替	干湿交替过程初期对大团聚体破坏作用明显,且影响团聚体稳定性; 干湿交替促进粒径<0.2 mm 微团聚体向 0.2~1 mm 粒径团聚体转化
[41]	不详	典型黑土、典型潜育土、典型石灰土	降雨模拟法、干湿循环法、Yoder 湿筛法	Yoder 湿筛法主要破坏 3~5 mm 和 5~10 mm 粒径的团聚体; 干湿循环次数不同,破坏不同粒径范围的团聚体; 模拟降雨方法对各级团聚体的影响几乎相等
[23]	美国堪萨斯州大学农场	粉砂壤土	室内干湿交替	干湿交替对团聚体粒径分布没有显著影响
[42]	以色列朱迪亚沙漠	石灰土	自然降雨	灌木和无灌木地区微环境的团聚体粒径随喷灌水量增加而增加; 干湿交替次数影响土壤结构
[43]	西澳大利亚珀斯市的大学农场	灰化土	室内干湿交替	干湿交替 2 次,大团聚体粒径降低; 干湿交替 3 次,破坏作用下; 干湿交替 4~6 次,团聚作用下降
[26]	英国诺森伯兰郡斯坦福德姆	潜育土	室内干湿交替	在干湿交替初期黏质土(61% 黏粒, 33% 粉砂)团聚体粒径下降明显; 干湿交替 4 次后,经过机械重组的团聚体和自然状态下的团聚体有着相似的粒径分布

以上研究表明,尽管国内外有关干湿交替对土壤团聚体粒径分布的影响进行了研究,但由于土壤理化

性质、干湿交替试验条件不一致等原因,研究结果可比性欠缺,对减少土壤侵蚀、提高耕作效率等应用

性不强。今后研究需加强不同质地土壤在相同干湿交替条件下的对比研究,需对干湿交替作用尤其是室内试验操作规范化,并逐渐加强干湿交替与其他作用(如植物根系)对团聚体粒径分布的交互作用研究,从而加深干湿交替对团聚体粒径影响的认识。

## 2.2 干湿交替对团聚体水稳性的影响

干湿交替主要通过影响团聚体膨胀和收缩、胶结剂的稳定性,改变团聚体水稳性。对团聚体快速浸湿,可导致团聚体形成微裂纹<sup>[21]</sup>,降低颗粒的粘聚力,促进水化,降低团聚体水稳性。对团聚体进行干燥,会促进水中悬浮的矿物颗粒粘结,以及可溶性物质(如二氧化硅、碳酸盐和有机分子)聚集,同时胶结物质和可溶性矿物质在颗粒间接触点周围结合,促进团聚体形成,增强土壤粘聚力<sup>[8]</sup>。干湿交替还可通过影响微生物群落分布及活动<sup>[11,44]</sup>,影响过渡性和暂时性胶结剂的合成和分解。例如,Zhu 等<sup>[45]</sup>研究发现,剧烈的干湿交替作用(8次,每周3d,土壤含水量从25%降到10%左右)抑制向日葵根际微生物呼吸作用和砂壤土有机质的分解与矿化。但在不同理化性质的土壤中,微生物群落类型和分布特征差异较大,且干湿交替条件下微生物对胶结剂稳定性的影响机制还不明确。

目前,团聚体水稳性研究多集中于对土壤有机碳和土地利用方式(包括耕作、施肥、植被恢复等)的响应上,也有部分学者研究了冻融交替等自然环境因素,以及胶结剂(如根系分泌物)、土壤物理化学性质

(如含水率)对团聚体稳定性的影响。尽管进入21世纪以来,有关水稳性团聚体的报道明显增加,但有关干湿交替对团聚体水稳性的影响研究较少。大量研究结果表明,干湿交替影响团聚体水稳性,但针对不同土壤类型,相关结果不尽一致(表2)。总体而言,干湿交替能促进变性土的团聚作用,利于水稳性团聚体的形成;而对红壤、粉砂壤土等一般起抑制作用,且在作用初期(1~4次),干湿交替对水稳性团聚体破坏明显。Utomo 和 Dexter<sup>[7]</sup>认为干湿交替对水稳性团聚体有显著影响,且免耕土壤在干湿交替的作用下,水稳性团聚体持续减少;对于翻耕地,部分水稳性团聚体起初会逐渐增加到最大值,然后伴随干湿交替过程不断减少。Denef 等<sup>[10]</sup>对粉砂壤土研究发现,干湿交替使大团聚体(>2 mm)数量从占总土壤质量的30%减少到21%,且大团聚体经过了2次干湿交替后具有了抗水化性。而 Bravo-Garza 等<sup>[46]</sup>认为,对于变性土,干湿交替促进水稳性团聚体的形成,增加大团聚体的数量。虽然不同研究的干湿交替试验设计和供试土壤性质有所区别,但是可以看出干湿交替影响团聚体水稳性,且作用程度与土壤类型、干湿交替频率有关。因此,需对比不同土壤类型的团聚体稳定性对干湿交替响应机制研究。同时,鉴于干湿交替对土壤团聚体稳定性研究多集中在单一的土壤系统中,今后需加强对干湿交替条件下土壤-植物复合系统中植物根系、群落结构等对团聚体水稳性的影响研究。

表 2 干湿交替对团聚体水稳性的影响研究  
Table 2 Effect of wetting-drying cycle on water stability of soil aggregates

文献	研究地点	土壤类型与质地	干湿交替描述	主要结论
[46]	墨西哥利纳雷斯	变性土	室内干湿交替	干湿交替促进水稳性团聚体形成,增加大团聚体(>2 mm)数量
[47]	中国重庆	灰棕紫泥	人工模拟降雨	水稳性土壤团聚体(>0.25 mm)含量的变化特征与降雨强度有密切关系
[48]	中国陕西、湖北、黑龙江	黄土、红壤、黑土,农耕地	Yoder 湿筛	红壤的团聚体稳定性最好,其次为黑土,黄土;不同湿润速度对红壤 MWD 的影响差异均显著;快速湿润对黑土、黄土 MWD 影响显著
[10]	美国科罗拉多	粉砂壤土	室内干湿交替	干湿交替降低大团聚体数量;经2次干湿交替后大团聚体具有抗水化性
[49]	澳大利亚	淋溶土、变性土	室内干湿交替	增加干湿交替次数,团聚体稳定性增强
[7]	澳大利亚	细砂壤土、红棕壤	室内干湿交替	干湿交替对水稳性团聚体有显著影响;经2~4次干湿交替后,免耕地团聚体的水稳性显著下降;干湿交替影响土壤团聚体水稳性,且与耕作措施有关

## 3 干湿交替下土壤团聚体稳定性的主要影响因素

### 3.1 土壤理化性质

土壤有机质是参与土壤结构发育的重要物质<sup>[50]</sup>,

直接影响土壤的团聚过程,以及土壤结构稳定性对干湿交替的响应<sup>[51-52]</sup>。一般认为,土壤有机质通过降低土壤的浸湿程度和增加团聚体的粘聚度来提高团聚体稳定性。例如,微团聚体可在新鲜有机质的粘合作用下形成大团聚体,其水稳性与土壤有机质的动态变

化紧密相关,且颗粒态有机质对大团聚体具有直接或间接的稳定作用<sup>[53]</sup>。除此之外,土壤有机质的减少不仅会导致水稳性大团聚体减少<sup>[54]</sup>,而且会使可分散性黏粒大量增加,从而导致有机胶结剂氧化,降低土壤团聚体稳定性<sup>[52]</sup>。但也有学者指出土壤有机质中的有机阴离子,如黄腐酸根、柠檬酸根、草酸根等,会增加黏粒扩散,降低微团聚体稳定性<sup>[30]</sup>。同时干湿交替可能会导致已有的团聚体中有机物质暴露分解,促进团聚体的形成,并在微生物参与下实现团聚体周转和物质循环<sup>[11]</sup>。近年来,有关颗粒有机质(particulate organic matter, POM)对团聚体稳定性的作用研究逐渐受到关注。已有研究表明在干湿循环 2 次左右 POM 可促进大团聚体的形成<sup>[10]</sup>,且 POM 还是微团聚体的重要组分,能免受微生物分解和干湿交替干扰。

影响土壤团聚体对干湿交替响应的理化性质还包括土壤矿物组成及质地、初始含水量、孔隙度等方面。不同矿物组成和质地的土壤,其黏土矿物含量有所差别,且团聚体间的孔隙连通性也不相同,故不同质地的土壤抗干湿交替胁迫能力也不同,从而对团聚体的粒径大小及稳定性的影响也有差异。例如, Gregory 等<sup>[55]</sup>对英国贝德福德郡(Bedfordshire)的钙质土、棕砂土进行对比研究,发现黏土比砂壤土更易受到干湿交替的影响。初始含水量影响土壤团聚体对干湿交替的响应,大部分研究表明初始含水量影响土壤入渗速率及土壤的团聚作用、水化力大小,并在一定程度上决定了团聚体的破碎机制<sup>[56-58]</sup>。早在 20 世纪 60 年代,初始含水量对团聚体稳定性的影响就已经受到关注<sup>[59]</sup>,但有关其对不同类型土壤的作用还尚未得出一致结论。王彬<sup>[40]</sup>对黑龙江黑土进行研究,发现初始含水量增加会降低团聚体稳定性;但 Zhou 等<sup>[60]</sup>对中国西南喀斯特地区的石漠化土壤进行研究,指出初始含水量的增加有利于团聚体的稳定。团聚体自身的孔隙度是影响其响应干湿交替的重要因素,尤其对于水稳性团聚体,其高孔隙度保证了其渗水能力,减缓干湿交替的破坏作用。

近 10 年来,有关土壤理化性质影响土壤团聚体对干湿交替响应的研究热度明显上升,主要集中在土壤有机质、初始含水率等。就有机质而言,尽管目前对 POM 的研究已逐渐深入到其在各类团聚体中的周转及 POM 中碳、氮赋存规律的研究,但 POM 在团聚体形成过程中的作用机理和周转,以及与影响 POM 作用的因素(如黏粒含量、干湿交替)之间的相互作用尚不明晰。鉴于目前有关初始含水量对不同地

区、不同特征的土壤团聚体稳定性影响研究的结果不一致性,今后还需加强土壤含水量对团聚体形成和稳定的影响机制研究,以及不同性质土壤间的对比性研究。另外,对于受到强烈人为扰动的土壤,其理化性质影响团聚体对干湿交替响应的机制有待进一步研究。

### 3.2 植物根系

土壤团聚体与植被根系密不可分,大团聚体水稳性极大地依赖于植被根系和菌丝<sup>[4]</sup>。植物根系分泌的瞬时性胶结剂(如多聚糖),并由此衍生的持久性胶结剂(如芳香烃类腐殖质)都有利于团聚体的形成和稳定<sup>[52]</sup>,增强团聚体抗水化能力。根系分泌物除了可作为胶结剂外,还可为土壤微生物提供营养物质,从而直接或间接影响土壤团聚过程。Niu 和 Nan<sup>[61]</sup>研究表明,无芒隐子草的根系可提高砂壤土团聚体的粘聚力和土壤抗水蚀能力;莞亚茹等<sup>[62]</sup>模拟根系分泌物,证实了低分子量根系分泌物中的葡萄糖组分可促进黑土中微团聚体的形成,且谷氨酸和苹果酸有利于微团聚体胶结成大团聚体。植物根系还可增加土壤团聚体内部的团聚度与孔隙数量,提高土壤渗水能力,降低干湿交替的影响。例如由政等<sup>[63]</sup>对黄土高原退耕地不同演替阶段的茵陈蒿(前期)、铁杆蒿(中期)、白羊草(后期)的根系与团聚体稳定性之间的关系进行研究,发现植物根系的长度、直径的增加可改善土壤孔隙结构,且表层 0.5~2 mm 的根系特征(根长、表面积、生物量)与团聚体稳定性极显著相关;Qu 等<sup>[64]</sup>对中国岷江上游干旱河谷地区的石灰性始成土进行研究,指出在生态系统演替初期,先锋植物(如细裂叶莲蒿)的根系生长有利于形成健康的土壤团聚体,提高土壤结构稳定性,并促进退化生态系统的后续演替。

近年来,国内外有关植物根系对团聚体稳定性的影响主要集中在对作物(如大豆、小麦、玉米)和草本(如白三叶、苜蓿、冰草)研究上,其次是灌木(如柠条、沙棘)和乔木(如刺槐)。植物根系对生态系统的不同演替阶段土壤团聚体的形成与稳定具有重要作用,然而干湿交替条件下,不同演替阶段植物及其根系的适生特征对土壤团聚体稳定性的影响机制尚不明晰,有待进一步研究。

### 3.3 土壤动物

一般而言,含较多团聚体的土壤中有大量中型动物区系(Mesofauna)和大型动物区系(Macrofauna)的种群<sup>[52]</sup>。细菌和真菌在微尺度上( $\mu\text{m} \sim \text{cm}$ )团聚和稳定土壤结构,而蚯蚓和白蚁在小尺度( $\text{mm} \sim \text{m}$ )上影响

团聚体结构和土壤稳定性<sup>[52]</sup>。对土壤团聚体粒径分布影响较大的土壤动物主要包括蚯蚓和白蚁<sup>[28]</sup>。蚯蚓主要通过挖掘洞穴和生成排泄物影响土壤团聚体的形成和稳定<sup>[52]</sup>，但并非所有的蚯蚓都对团聚体有重要的影响。根据蚯蚓的取食和排泄习性可以将其分为表栖类、深土栖类、内栖类<sup>[52]</sup>，其中深土栖类和内栖类主要通过内脏消化土壤或落叶等后形成的排泄物影响土壤团聚体形成<sup>[52, 65]</sup>。蚯蚓可以调节大团聚体和微团聚体的形成，并通过其血管束的粘合作用和肠道的消化作用以及排泄物的固定作用增加土壤团聚体的稳定性<sup>[28]</sup>，且蚯蚓粪影响着大团聚体的抗水化性<sup>[52]</sup>。尽管目前白蚁对土壤团聚体的影响机制还不明确，但是有部分研究表明有些白蚁物种可以影响土壤的微团聚体。例如，Six 等<sup>[28]</sup>认为只有富含有机质和可交换阳离子的白蚁物种才可以改善土壤结构，提高稳定性；Jungerius 等<sup>[66]</sup>对肯尼亚埃尔多雷特(Eldoret)南部地区的食土白蚁研究，发现该白蚁通过取食土壤物质，将其在肠道系统内消化，并储存在粪球内排出，促进微团聚体的形成。

目前，有关土壤动物影响团聚体的研究多集中在蚯蚓上，其他动物种类相对较少。尽管蚯蚓对土壤团聚体有着不可忽视的影响，但研究不同地区独特土著动物对土壤结构稳定性的影响也有重要意义，这对改善区域植物生长环境和土壤稳定性有不可忽视的作用。从系统的完整性考虑，土壤动物与其他环境因素(如根系)的相互作用也是今后需要研究的科学问题。此外，土壤动物对干湿环境的适应活动，影响土壤团聚体稳定性，但干湿交替这种对土壤团聚体稳定性的间接影响机制还不清楚。

### 3.4 微生物群落

微生物群落主要通过影响土壤颗粒粘结以及分解或合成有效胶结剂直接影响团聚体的稳定性<sup>[67]</sup>。Cosentino 等<sup>[68]</sup>研究表明真菌对土壤的物理缠结、胞外多糖和疏水物质的形成具有重要作用，其生物量与团聚体稳定性之间有较好的相关性。微生物生物量大小和群落组成的差异影响土壤团聚体对干湿交替的响应。例如 Denef 等<sup>[69]</sup>对美国科罗拉多州的粉砂壤土进行研究，发现进行杀真菌剂处理后的土壤中没有形成大团聚体，这表明真菌在水稳性大团聚体的形成过程中起着重要作用。另外，多数情况下干湿交替对微生物群落的影响受土地利用方式的限制。Fierer 等<sup>[70]</sup>对美国加利福尼亚大学塞奇威克自然保护区土壤进行研究，发现干湿交替影响橡树土壤的细菌群落组成，而对草地影响较小；Gordon 等<sup>[71]</sup>对英国兰开夏

郡牧场的棕壤土研究发现，干湿交替极大地降低了微生物生物量碳、真菌磷脂脂肪酸以及真菌细菌的磷脂脂肪酸比值。除此之外，干湿交替对细菌和真菌的影响也有所差别。例如，Butterly 等<sup>[72]</sup>对添加了葡萄糖、淀粉、纤维素的深色淋溶土进行研究，发现干湿交替降低了真菌的含量，而细菌革兰氏阳性菌有所增加。

近 10 年来，国内有关微生物影响团聚体对干湿交替的响应研究多集中在团聚体养分迁移与转化的机制上，多数研究认为在干湿交替条件下，微生物通过呼吸作用及其对土壤团聚体中养分的矿化作用来影响碳、氮等营养元素的迁移转化；国外除了上述研究方向外，还侧重于干湿交替条件下团聚体与微生物之间的相互作用，如团聚体对微生物的保护机制研究、微生物对团聚体稳定性的影响等。为此，今后需开展干湿交替下不同土壤类型团聚体的响应机制研究，尤其是微生物学机制，以及微生物与其他因素(如根系)对团聚体的交互作用研究。

### 3.5 土地利用管理措施

土地利用与田间管理方式(如地表覆盖、耕作制度)影响土壤孔隙结构、导水率，及土壤中有机的分布，从而间接影响土壤团聚体对干湿交替的响应。有研究表明，团聚体粒径分布及稳定性变化的 66.6% 是由土地利用类型变化引起<sup>[73]</sup>。目前，不同的耕作制度(包括少耕、传统耕作和免耕)对团聚体的影响是研究热点<sup>[74-76]</sup>。研究表明不同的耕作制度对团聚体的影响有所差别，免耕更有利于团聚体稳定。例如，Álvaro-Fuentes 等<sup>[77]</sup>对西班牙萨拉戈萨省旱地农田研究，比较了传统耕作、少耕和免耕对土壤团聚作用的影响，发现其对土壤结构的改善作用依次增强，且耕作强度的降低有利于增强团聚体水稳性；Hontoria 等<sup>[78]</sup>对西班牙卡尼亚梅罗红壤地区的表层砂壤土研究发现，与传统耕作相比，免耕土壤在 6 a 后其表层土壤(<100 mm)的大团聚体含量增加了 40%，在退化的红壤地区，免耕比传统耕作更有利于形成和稳定大团聚体。除此之外，施用秸秆等有机物，可显著增加经过湿筛后的土壤团聚体几何平均直径和 MWD，调节土壤团聚体分布及稳定性，改善土壤结构<sup>[79]</sup>。

## 4 研究方法

从 20 世纪 30 年代以来，学者就展开了对土壤团聚体稳定性研究方法的探索，有关团聚体粒径分析及团聚体稳定性评价的研究方法如表 3 所示。

湿筛法、水滴法及降雨模拟法主要通过衡量团聚体抗水化和抗机械破碎能力来衡量团聚体稳定性。其

中,湿筛法简单易行,但耗时耗力;水滴法评价精确度有待提高;模拟降雨法更适于田间试验。20 世纪 90 年代, Le Bissonnais<sup>[82]</sup>在上述研究方法的基础上,总结了导致团聚体崩解的水化、膨胀、雨滴破碎及物理化学分散四大机制,并提出了统一的评价团聚体稳定性的框架和实验操作步骤。尽管 Le Bissonnais 法可用于比较不同土壤的团聚体稳定性,但实验步骤复杂。值得注意的是,上述方法均对土壤结构具有破坏性。直至 20 世纪末,CT 的研发与应用使土壤结构可视化成为可能。相比传统研究方法,CT 对土壤结构不具有破坏性,并能在微尺度水平观察土壤结构的 3D 形态特征及液相在土壤结构中的流动。21 世纪以来,同步加速器、显微 CT 技术的出现,以及算法精确度的提高促进了 CT 在土壤科学上的应用<sup>[90]</sup>。目前国内外 CT 在土壤科学上的应用主要包括土壤孔隙和有机质分布、矿物颗粒的空间排列、团聚体粒径分析,同时也运用于土壤液相分布及气体释放特征研究。相比于国外,CT 技术在我国土壤结构定量化研究中的应用仍处于起步阶段。目前国内 CT 技术主要应用于较大尺度(mm ~ m)的研究,如土壤砂石含量<sup>[91]</sup>、大孔隙(>5 mm)<sup>[92]</sup>。尽管近年来部分学者利用 CT 技术在团聚体尺度开展了一些研究,如周虎等<sup>[93]</sup>应用

同步辐射显微 CT 对第四纪红黏土母质的水稻土中团聚体结构进行了分析,但是在团聚体和微孔隙尺度上开展的研究较少。

总体而言,土壤团聚体粒径分析和稳定性评价经历从定性描述到定量分析,从人工实验操作到与电脑数字化相结合的发展过程。研究方法的改进降低了人为因素对土壤结构的破坏作用,并逐步实现了土壤团聚体结构分析的可视化,提高了分析结果的精确度和可靠性。目前研究多结合 Yoder 湿筛法及 CT 技术对土壤团聚体粒径和稳定性进行分析。CT 技术以其对土壤结构不具破坏作用而受到广泛关注,但其图像精确度的提高有赖于算法的改进。且有研究表明,X 射线影响团聚体中微生物的数量及代谢活性<sup>[94]</sup>,这在一定程度上限制了 CT 技术在团聚体中微生物的分布特征及演变研究上的应用。今后需加强 CT 技术图像处理的算法研究,提高图像精确度,同时加强低危害性辐射源的开发,减少其对土壤结构中生物的影响,从而促进 CT 技术在多尺度土壤结构研究中的应用。除此之外,针对不同类型及处于不同环境条件下(如干湿交替、冻融交替等)的土壤,标准的采样方法和土样前处理采样步骤亟待建立,以提高研究结果的可比性。

表 3 评价团聚体稳定性的重要研究方法  
Table 3 Important study methodologies in analyzing size distribution and stability of soil aggregates

研究方法分类	研究方法	文献	衡量参数	特点
外力分散类	Yoder 湿筛法	[80]	MWD	破坏水稳性团聚体; 团聚体分析基于水化特性
	水滴法	[15]	水滴数	水滴影响团聚体膨胀,易形成致密层; 与水滴对团聚体的击打程度及水滴温度、大小有关,且受土壤温度和湿度影响
	人工降雨模拟法	[81]	MWD	通过描述土壤对侵蚀力的敏感度来评价团聚体稳定性; 相对于田间试验,简单易行
	Le Bissonnais 法	[82]	块度分布, MWD	考虑各种团聚体崩解机制,包括水化、膨胀、雨滴破碎、物理化学分散; 可用于比较不同土壤或气候条件下土样的团聚体稳定性
数字设备类	超声波法	[83-84]	球面直径<2 mm 颗粒的质量百分率	产生稳定的悬浊液,不会显著影响土壤悬浊液的 pH 和导电性; 尤其适用于石灰性土壤和含有大量蒙脱土和有机质的土壤
	双能量 X 射线断层扫描技术	[85]	异质度, Hounsfield 单位的加权平均数标准差	使土壤结构可视化,不破坏团聚体结构; 可观察微尺度水平土壤结构的 3D 形态; 使用两种不同能级进行扫描,减小含水量对含有黏粒矿物土壤结构的影响
	单光子发射计算机断层成像技术(SPECT)	[86]	放射性	示踪物空间分布定量化; 定量描述无干扰的土柱优势流空间分布; 可用于实时分析
	激光衍射法	[87-88]	土壤颗粒的体积百分比; 折射率(refractive index)	测量激光散射角度分析团聚体粒径分布; 计算出的黏粒含量小于移液管计算的含量,但砂粒含量高于移液管法计算的含量
其他	转移矩阵法	[89]	团聚体稳定指数	随机性; 包含不同方法测得的团聚体稳定性结果; 适用于评价不同粒径的团聚体稳定性



## 5 研究展望

干湿交替在自然界中普遍存在,其对土壤团聚体形成和稳定具有重要作用,相关研究越来越受到重视。干湿交替影响胶结剂的合成和分解,并在各类因素的直接或间接作用下,共同影响团聚体稳定性。复合生态系统对团聚体稳定性具有多重影响机制,但目前针对干湿交替影响团聚体的研究多集中在单一土壤系统中,鲜有从复合生态系统的角度探究团聚体的形成过程和机理,且厘清干湿交替下各类因素对团聚体的作用过程和机理是亟待解决的重要科学问题。同时,研究技术的进步,如无损探测,包括 CT 和同步辐射光源等,为今后团聚体形成及其作用机制的研究提供了新的手段,且有关团聚体粒径分布状况及其周转的研究可以进一步拓展。鉴于团聚体对土壤结构和功能以及对生态系统功能的重要性,今后需加强以下几个方面的研究。

1) 敏感脆弱区干湿环境变化下土壤团聚体形成和演变机制。环境因素和人为活动影响土壤团聚体稳定性。有关小尺度区域的环境因子对团聚体的影响研究已逐渐趋于成熟,但大尺度、高频度的人为干扰或环境变化对土壤团聚体的影响研究还比较少见。敏感脆弱区通常对高频度的环境变化响应敏感,但在此条件下土壤团聚体形成和演变机制尚不清晰。水陆交错带是最常见的受干湿交替影响较大的区域,如三峡水库消落带,自 2010 年正式蓄水后,在水位涨落幅度达 30 m 的库区岸边带,形成了面积为 348.9 km<sup>2</sup> 的消落带,其水位变化受季节和人为控制的影响很大,涉及范围广,规律性强。消落带为新生生态系统,土壤稳定性对于新生系统的演替具有决定性影响,研究此类地区干湿交替条件下土壤团聚体形成和演变机制对于敏感脆弱区的生态恢复具有重要意义。鉴于此,本文提出以下亟需开展的研究方向: 在与干湿交替相关的强干扰的人为因素(如修建水库)或高频次的环境变化(如潮涨潮落)作用下,此类地区(如水陆交错带)土壤团聚体形成的主要机制及团聚体粒径、稳定性等的演变规律; 干湿交替作用强烈地区(如消落带)且处于演替初期的新生生态系统中土壤团聚体的稳定机制及影响因素; 在干湿交替作用下,土壤微生物群落分布、动物迁移对脆弱生态系统土壤团聚体稳定性及其养分循环的影响。

2) 干湿交替对土壤团聚体中污染物迁移转化的影响。干湿交替对土壤物理化学性质有重要影响,如氧化还原电位、pH、含水量。但化学污染物包括重金属及各类新型污染物,在土壤团聚体中各粒径的分

布规律及在干湿交替条件下其形态转化规律尚不明确。目前,我国土壤污染形势不容乐观,各类新型污染物层出不穷。例如,卤代呋啉(PHCs)是多集中在河流湖泊沉积物及土壤中的新型有机污染物,目前其来源、分布及生态毒理效应尚不清楚<sup>[95]</sup>。探究污染物迁移转化机制,研究有效的土壤修复方法刻不容缓。探索干湿交替条件下污染物在土壤团聚体中的迁移转化规律,有利于修复处于环境变化条件下受污染的土壤生态系统,改善土壤环境质量。

3) 断层扫描技术在团聚体研究中的应用。目前,断层扫描技术的辐射源主要包括 X 射线、 $\gamma$  射线、光子、中子、正电子,其中 X 射线、 $\gamma$  射线是最常见的辐射源。由于 X 射线断层扫描技术对团聚体结构不具有破坏性,并能在微观尺度水平观察土壤结构,这使 CT 技术在团聚体微生物功能及分布特征研究中的应用成为可能。但由于辐射源的放射性,限制了断层扫描技术在团聚体中微生物研究中的应用。今后需加强断层扫描技术优化研究,减少辐射源对微生物及土壤动物的影响; 加强图像算法的研究,提高图像分辨率,促进断层扫描技术在团聚体研究中的应用。

4) 植物群落与土壤团聚体间交互作用特征与机理。地下结构功能是近几年的相关研究热点之一,其中植物根系对土壤结构功能的影响越来越受到关注。在生态系统的不同演替阶段,土壤有着不同的特性和功能,并受到环境变化的影响。土壤团聚体的形成对脆弱生态系统恢复具有重要作用,尤其在植物群落演替早期,环境条件处于不稳定状态,大量土壤有机质积累和植物根系生长有利于团聚体的稳定和植物群落形成<sup>[96]</sup>。最近研究表明,在多样化的植物群落中,一些特定植物功能物种会影响土壤的物理过程<sup>[97]</sup>。尽管植物根系是植物多样性影响土壤团聚体稳定性的关键途径,但目前生物多样性与地下生态系统功能关系的研究还较少。除此之外,团聚体孔隙大小、粒径分布、稳定性等性质影响植物营养物质吸收及根系分布,从而间接影响植被初级生产力。但目前针对在生态系统不同演替阶段、不同环境条件下(如干湿交替)的土壤团聚体物理化学性质变化规律和特征及其与植物群落之间的交互作用并不明晰。因此,需进一步探索不同演替阶段土壤团聚体和植物群落的交互作用变化特征,及相互作用机制,这有利于完善环境变化下对土壤团聚体和植物群落功能形成的认知,实现脆弱生态系统的生态恢复。另外,在全球环境变化的背景下,干湿交替过程中单一系统的土壤团聚体演变研究应该加强与生态系统过程、功能及其提供的生态系统服务的结合,形成跨尺度和跨系统的综合交叉

研究方向。

参考文献：

- [1] Tisdall J M, Oades J M. Organic-matter and water-stable aggregates in soils[J]. *Journal of Soil Science*, 1982, 33(2): 141–163
- [2] Emerson W W, Greenland D J. Soil aggregates - formation and stability[A] // De Boodt M F, Hayes M H B, Herbillon A. Soil colloids and their associations in aggregates. NATO ASI series, series B: Physics[C]. New York: Plenum Press, 1991: 485–511
- [3] Edwards A P, Bremner J M. Microaggregates in soils[J]. *Journal of Soil Science*, 1967, 18(1): 64–73
- [4] Oades J M, Waters A G. Aggregate hierarchy in soils[J]. *Australian Journal of Soil Research*, 1991, 29(6): 815–828
- [5] Udom B E, Nuga B O, Adesodun J K. Water-stable aggregates and aggregate-associated organic carbon and nitrogen after three annual applications of poultry manure and spent mushroom wastes[J]. *Applied Soil Ecology*, 2016, 101: 5–10
- [6] Xiang H M, Zhang L L, Wen D Z. Change of soil carbon fractions and water-stable aggregates in a forest ecosystem succession in South China[J]. *Forests*, 2015, 6(8): 2703–2718
- [7] Utomo W H, Dexter A R. Changes in soil aggregate water stability induced by wetting and drying cycles in non-saturated soil[J]. *Journal of Soil Science*, 1982, 33: 623–637
- [8] Birch H F. The effect of soil drying on humus decomposition and nitrogen availability[J]. *Plant & Soil*, 1958, 10: 9–31
- [9] 于晓莉, 傅友强, 甘海华, 等. 干湿交替对作为根际特征及铁膜形成的影响研究进展[J]. *土壤*, 2016, 48(2): 225–234
- [10] 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: 1599–1611
- [11] 包丽君, 贾仲君. 模拟干湿交替对水稻土古菌群落结构的影响[J]. *土壤学报*, 2017, 54(1): 191–203
- [12] Park E J, Sul W J, Smucker A J M. Glucose additions to aggregates subjected to drying/wetting cycles promote carbon sequestration and aggregate stability[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2007, 39(11): 2758–2768
- [13] 刘艳丽, 张斌, 胡锋, 等. 干湿交替对水稻土碳氮矿化的影响[J]. *土壤*, 2008, 40(4): 554–560
- [14] Nguyen B T, Marschner P. Effect of drying and rewetting on phosphorus transformations in red brown soils with different soil organic matter content[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2005, 37(8): 1573–1576
- [15] McCalla T M. Water-drop method of determining stability of soil structure[J]. *Soil Science*, 1944, 58(2): 117–121
- [16] Allison E L. Effect of microorganisms on permeability of soil under prolonged submergence[J]. *Soil Science*, 1947, 63(6): 439–450
- [17] Emerson W W. The structure of soil crumbs[J]. *Journal of Soil Science*, 1959, 10(2): 235–244
- [18] Quirk J P, Panabokke C R. Incipient failure of soil aggregates[J]. *Journal of Soil Science*, 1962, 13(1): 60–70
- [19] Emerson W W. A classification of soil aggregates based on their coherence in water[J]. *Australian Journal of Soil Research*, 1967, 5(1): 47–57
- [20] Morin J, Benyamini Y. Rainfall infiltration into bare soils[J]. *Water Resources Research*, 1977, 13(5): 813–817
- [21] Utomo W H, Dexter A R. Soil friability[J]. *Journal of Soil Science*, 1981, 32(2): 203–213
- [22] Angers D A, Caron J. Plant-induced changes in soil structure: Processes and feedbacks[J]. *Biogeochemistry*, 1998, 42(1/2): 55–72
- [23] Mikha M M, Rice C W, Milliken G A. Carbon and nitrogen mineralization as affected by drying and wetting cycles[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2005, 37(2): 339–347
- [24] Ma R M, Cai C F, Li Z X, et al. Evaluation of soil aggregate microstructure and stability under wetting and drying cycles in two Ultisols using synchrotron-based X-ray micro-computed tomography[J]. *Soil & Tillage Research*, 2015, 149: 1–11
- [25] Seginer I, Morin J. A model of surface crusting and infiltration of bare soils[J]. *Water Resources Research*, 1970, 6(2): 629–633
- [26] Shiel R S, Adey M A, Lodder M. The effect of successive wet dry cycles on aggregate size distribution in a clay texture soil[J]. *Journal of Soil Science*, 1988, 39(1): 71–80
- [27] Nciizah A D, Wakindiki I C. Physical indicators of soil erosion, aggregate stability and erodibility[J]. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 2014, 61(6): 1–16
- [28] Six J, Bossuyt H, Degryze S, et al. A history of research on the link between (micro)aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics[J]. *Soil & Tillage Research*, 2004, 79(1): 7–31
- [29] Bronick C J, Lal R. Soil structure and management: A review[J]. *Geoderma*, 2005, 124(1/2): 3–22
- [30] Amézketa E. Soil aggregate stability: a review[J]. *Journal of Sustainable Agriculture*, 1999, 14: 2–3, 83–151
- [31] 闫峰陵. 红壤表土团聚体稳定性特征及其对坡面侵蚀过程的影响[D]. 武汉: 华中农业大学, 2008
- [32] Zhang B, Horn R. Mechanisms of aggregate stabilization in Ultisols from subtropical China[J]. *Geoderma*, 2001, 99: 123–145
- [33] Jozefaciuk G, Czachor H. Impact of organic matter, iron oxides, alumina, silica and drying on mechanical and water stability of artificial soil aggregates. Assessment of new method to study water stability[J]. *Geoderma*, 2014, 221–222: 1–10
- [34] Or D. Wetting-induced soil structural changes: The theory of liquid phase sintering[J]. *Water Resources Research*, 1996, 32(10): 3041–3049

- [35] Seguel O, Horn R. Structure properties and pore dynamics in aggregate beds due to wetting-drying cycles[J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2006, 169(2): 221-232
- [36] Horn R, Taubner H, Wuttke M, et al. Soil physical properties related to soil structure[J]. *Soil & Tillage Research*, 1994, 30(2/4): 187-216
- [37] Singer M J, Southard R J, Warrington D N, et al. Stability of synthetic sand-clay aggregates after wetting and drying cycles[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1992, 56: 1843-1848
- [38] Kaiser M, Berhe A A. How does sonication affect the mineral and organic constituents of soil aggregates? -A review[J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2014, 177: 479-495
- [39] 马仁明, 王军光, 李朝霞, 等. 降雨过程中红壤团聚体粒径变化对溅蚀的影响[J]. *长江流域资源与环境*, 2013, 22(6): 779-785
- [40] 王彬. 土壤可蚀性动态变化机制与土壤可蚀性估算模型[D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2012
- [41] 石辉. 转移矩阵法评价土壤团聚体的稳定性[J]. *水土保持通报*, 2006, 26(3): 91-95
- [42] Sarah P, Rodeh Y. Soil structure variations under manipulations of water and vegetation[J]. *Journal of Arid Environments*, 2004, 58(1): 43-57
- [43] Degens B P, Sparling G P. Repeated wet-dry cycles do not accelerate the mineralization of organic C involved in the macro-aggregation of a sandy loam soil[J]. *Plant & Soil*, 1995, 175(2): 197-203
- [44] 王君, 宋新山, 严登华, 等. 多重干湿交替格局下土壤Birch效应的响应机制[J]. *中国农学通报*, 2013, 29(27): 120-125
- [45] Zhu B, Cheng W X. Impacts of drying-wetting cycles on rhizosphere respiration and soil organic matter decomposition[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2013, 63: 89-96
- [46] Bravo-Garza M R, Voroney P, Bryan R B. Particulate organic matter in water stable aggregates formed after the addition of <sup>14</sup>C-labeled maize residues and wetting and drying cycles in vertisols[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2010, 42(6): 953-959
- [47] 陈晓燕, 牛青霞, 周继, 等. 人工模拟降雨条件下紫色土陡坡地土壤颗粒分布空间变异特征[J]. *水土保持学报*, 2010, 24(5): 163-168
- [48] 范云涛, 雷廷武, 蔡强国, 等. 湿润速度对土壤表面强度和土壤团聚体结构的影响[J]. *农业工程学报*, 2008, 24(5): 46-50
- [49] Barzegar A R, Rengasamy P, Oades J M. Effects of clay type and rate of wetting on the mellowing of compacted soils[J]. *Geoderma*, 1995, 68(1/2): 39-49
- [50] Wagner S, Cattle S R, Scholten T. Soil-aggregate formation as influenced by clay content and organic-matter amendment[J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2007, 170(1): 173-180
- [51] Caron J, Espindola C R, Angers D A. Soil structural stability during rapid wetting: influence of land use on some aggregate properties[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1996, 60: 901-908
- [52] Oades J M. Soil organic matter and structural stability: Mechanisms and implications for management[J]. *Plant & Soil*, 1984, 76: 319-337
- [53] Puget P, Chenu C, Balesdent J. Dynamics of soil organic matter associated with particle-size fractions of water-stable aggregates[J]. *European Journal of Soil Science*, 2000, 51: 595-605
- [54] Tisdall J M, Oades J M. The effect of crop rotation on aggregation in a red-brown earth[J]. *Australian Journal of Soil*, 1980, 18: 423-434
- [55] Gregory A S, Bird N R A, Watts C W, et al. An assessment of a new model of dynamic fragmentation of soil with test data[J]. *Soil & Tillage Research*, 2012, 120: 61-68
- [56] Liu H, Lei T W, Zhao J, et al. Effects of rainfall intensity and antecedent soil water content on soil infiltrability under rainfall conditions using the run off-on-out method[J]. *Journal of Hydrology*, 2011, 396(1/2): 24-32
- [57] Vanapalli S K, Fredlund D G, Pufahl D E. Influence of soil structure and stress history on the soil-water characteristics of a compacted till[J]. *Géotechnique*, 1999, 49(2): 143-159
- [58] Lebissonais Y, Bruand A, Jamagne M. Laboratory experimental study of soil crusting: Relation between aggregate breakdown mechanisms and crust structure[J]. *Catena*, 1989, 16(4/5): 377-392
- [59] Cernuda C F, Smith R M, Vicente-Chandler J. Influence of initial soil moisture condition on resistance of macroaggregates to slaking and to water-drop impact[J]. *Soil Science*, 1954, 77(1): 19-27
- [60] Zhou J, Tang Y G, Zhang X H. The influence of water content on soil erosion in the desertification area of Guizhou, China[J]. *Carbonates and Evaporites*, 2012, 27(2): 185-192
- [61] Niu X L, Nan Z B. Roots of *Cleistogenes songorica* improved soil aggregate cohesion and enhance soil water erosion resistance in rainfall simulation experiments[J]. *Water Air & Soil Pollution*, 2017, 228 (3): 109
- [62] 苑亚茹, 韩晓增, 李禄军, 等. 低分子量根系分泌物对土壤微生物活性及团聚体稳定性的影响[J]. *水土保持学报*, 2011, 25(6): 96-99
- [63] 由政, 姚旭, 景航, 等. 不同演替阶段群落根系分布与土壤团聚体特征的协同变化[J]. *水土保持研究*, 2016, 23(6): 20-25
- [64] Qu L, Huang Y, Ma K, et al. Effects of plant cover on properties of rhizosphere and inter-plant soil in a semiarid valley, SW China[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2016, 94: 1-9
- [65] Lee K E. Earthworms: Their ecology and relationships with soils and land use[M]. Sydney: Academic Press, 1985: 334-335

- [66] Jungerius P D, Van den Ancker J A M, Múcher H J. The contribution of termites to the microgranular structure of soils on the Uasin Gishu Plateau, Kenya[J]. *Catena*, 1999, 34: 349–363
- [67] Kostopoulou S K, Zotos A. The effect of soil water content and microbial activity on restoring the structure of a Vertisol[J]. *Soil & Tillage Research*, 2005, 82(2): 203–209
- [68] Cosentino D, Chenu C, Le Bissonnais Y. Aggregate stability and microbial community dynamics under drying-wetting cycles in a silt loam soil[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2006, 38(8): 2053–2062
- [69] Deneff K, Six J, Paustian K, et al. Importance of macroaggregate dynamics in controlling soil carbon stabilization[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2001, 33: 2145–2153
- [70] Fierer N, Schimel J P, Holden P A. Influence of drying-rewetting frequency on soil bacterial community structure[J]. *Microbial Ecology*, 2003, 45:63–71
- [71] Gordon H, Haygarth P M, Bardgett R D. Drying and rewetting effects on soil microbial community composition[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2008, 40: 302–311
- [72] Butterly C R, Bü nemann E K, McNeill A M, et al. Carbon pulses but not phosphorus pulses are related to decreases in microbial biomass during repeated drying and rewetting of soils[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2009, 41(7): 1406–1416
- [73] Zhao J, Chen S, Hu R, et al. Aggregate stability and size distribution of red soils under different land uses integrally regulated by soil organic matter, and iron and aluminum oxides. *Soil & Tillage Research*, 2017, 167: 73–79
- [74] Romaneckas K, Avizienyte D, Sarauskis E, et al. Impact of ploughless tillage on soil physical properties and winter wheat productivity[J]. *Journal of Food Agriculture & Environment*, 2012, 10(1): 501–504
- [75] Romaneckas K, Sarauskis E, Pilipavicius V, et al. Impact of short-term ploughless tillage on soil physical properties, winter oilseed rape seedbed formation and productivity parameters[J]. *Journal of Food Agriculture & Environment*, 2011, 9(2): 295–299
- [76] Saha S, Chakraborty D, Sharma A R, et al. Effect of tillage and residue management on soil physical properties and crop productivity in maize (*Zea mays*)-Indian mustard (*Brassica juncea*) system[J]. *Indian Journal of Agricultural Sciences*, 2010, 80(8): 679–685
- [77] Álvaro-Fuentes J, Arr ú e J L, Gracia R, et al. Soil management effects on aggregate dynamics in semiarid Aragon (NE Spain) [J]. *Science of the Total Environment*, 2007, 378 (1/2): 179–182
- [78] Hontoria C, G ó mez-Paccard C, Mariscal-Sancho I, et al. Aggregate size distribution and associated organic C and N under different tillage systems and Ca-amendment in a degraded Ultisol[J]. *Soil & Tillage Research*, 2016, 160: 42–52
- [79] 王芳. 有机培肥措施对土壤肥力及作物生长的影响[D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2014
- [80] Yoder R E. A direct method of aggregate analysis of soils and a study of the physical nature of erosion losses[J]. *Journal of American Society of Agronomy*, 1936, 28: 337–351
- [81] Young R A. Method of measuring aggregate stability under water drop impact[J]. *Transactions of the Asae*, 1984, 27(5): 1351–1354
- [82] Le Bissonnais Y. Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodibility: . Theory and methodology[J]. *European Journal of Soil Science*, 1996, 47(4): 425–437
- [83] North P F. Towards an absolute measurement of soil structural stability using ultrasound[J]. *Journal of Soil Science*, 1976, 27(4): 451–459
- [84] Zhu Z L, Minasny B, Field D J. Adapting technology for measuring soil aggregate dispersive energy using ultrasonic dispersion[J]. *Biosystems Engineering*, 2009, 104(2): 258–265
- [85] Rogasik H, Crawford J W, Wendroth O, et al. Discrimination of soil phases by dual energy X-ray tomography[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1999, 63: 741–751
- [86] Perret J P, Prashar S O, Kansas A, et al. Preferential flow in intact soil columns measured by SPECT Scanning[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2000, 63: 1530–1543
- [87] Shein E V, Milanovskii E Y, Molov A Z. The effect of organic matter on the difference between particle-size distribution data obtained by the sedimentometric and laser diffraction methods[J]. *Eurasian Soil Science*, 2006, 39(1): S84–S90
- [88] Eshel G, Levy G J, Mingelgrin U. Critical evaluation of the use of laser diffraction for particle-size distribution analysis[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2004, 68(3): 736–743
- [89] Niewczas J, Witkowska-Walczak B. Index of soil aggregates stability as linear function value of transition matrix elements[J]. *Soil & Tillage Research*, 2003, 70(2): 121–130
- [90] Taina I A, Heck R J, Elliot T R. Application of X-ray computed tomography to soil science: A literature review[J]. *Canadian Journal of Soil Science*, 2008, 88(1): 1–20
- [91] 解迎革, 李霞, 王国栋, 等. 基于电阻率断层扫描技术的土壤砾石体积含量评估[J]. *农业工程学报*, 2011, 27(7): 326–331
- [92] 吴华山, 陈效民, 陈黎. 利用 CT 扫描技术对太湖地区主要水稻土中大孔隙的研究[J]. *水土保持学报*, 2007, 21(2): 175–178
- [93] 周虎, 李文昭, 张中彬, 等. 利用 X 射线 CT 研究多尺度土壤结构[J]. *土壤学报*, 2013, 50(6): 1226–1230
- [94] 昝千惠, 房焕, 周虎, 等. X 射线对我国两种典型土壤中微生物活性及群落结构的影响[J]. *微生物学报*, 2016, 56(1): 101–109

- [95] 林坤德, 陈艳秋, 袁东星. 新型污染物卤代吡啉的环境行为及生态毒理效应[J]. 环境科学, 2016, 37(4): 1576–1583
- [96] Erktan A, Cécillon L, Graf F, et al. Increase in soil aggregate stability along a Mediterranean successional gradient in severely eroded gully bed ecosystems: combined effects of soil, root traits and plant community characteristics[J]. *Plant & Soil*, 2015, 398(1/2): 121–137
- [97] Gould I J, Quinton J N, Weigelt A, et al. Plant diversity and root traits benefit physical properties key to soil function in grasslands[J]. *Ecology Letter*, 2016, 19(9): 1140–1149

## Soil Aggregates as Affected by Wetting-Drying Cycle: A Review

LIU Yan<sup>1,2</sup>, MA Maohua<sup>1</sup>, WU Shengjun<sup>1</sup>, RAN Yiguo<sup>1,2</sup>, WANG Xiaoxiao<sup>1,2</sup>, HUANG Ping<sup>1\*</sup>

(1 *Key Laboratory of Reservoir Aquatic Environment, Chongqing Institute of Green and Intelligent Technology, Chinese Academy of Sciences, Chongqing 400714, China*; 2 *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

**Abstract:** Aggregates, as the basic unit of soil structure, play a fundamental role in ecosystem function such as soil stability and fertility. Wetting-drying cycle is the most common environmental factor affecting the properties of soil aggregates, particularly soil aggregate stability. This paper reviewed the research advances in soil aggregates affected by wetting-drying cycle over the past 70 years, and summarized the characteristics of soil aggregate size distribution, dynamics of water stability, influential factors and their function mechanisms. In addition, this review compared the different methods in measuring soil aggregate stability in the last 80 years. Although different soil types were investigated by studies focusing on soil aggregates affected by wetting-drying cycle, most of the studies were conducted focusing on soil system individually and few on influential mechanisms across ecosystems. In addition, because of the difference between study methods, the obtained results are diverse and lacking of comparability. This review also proposed several perspectives in future studies: 1) dynamics of soil aggregate distribution and formation affected by wetting-drying cycle in fragile ecological zones; 2) the influences of wetting-drying cycle on migration and transformation of heavy metals and toxic chemicals during the turnover of soil aggregates; 3) the application of computed tomography (CT) in studying soil aggregates; 4) the interaction between plant community and soil aggregates.

**Key words:** Soil aggregate; Soil structural stability; Wetting-drying cycle; Ecosystem functions; Computed tomography(CT)