

基于高能水分特性法的土壤团聚体结构稳定性研究进展

黄悦¹, 张风宝^{1,2}, 高晶霞³, 申楠^{1,2}, 杨明义^{1,2}

(1.西北农林科技大学 水土保持研究所黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨凌 712100;
2.中国科学院 水利部 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 3.宁夏农林科学院 园艺研究所, 银川 750002)

摘 要:土壤团聚体稳定性是影响土壤质量、入渗、抗侵蚀能力及根系生长的重要土壤物理性质,同时也是判断土壤是否退化的重要指标。目前国内外关于团聚体稳定性的研究以分析团聚体水稳性为主,团聚体结构稳定性相关研究较少,而使用高能水分特性法(HEMC)测定团聚体结构稳定性重现性高,可检测不同处理间微小差异且试验及计算过程精准可控,在国外已有较多研究。研究通过 HEMC 法分析了土壤改良剂、土地利用与土壤管理和不同土壤理化性质下团聚体结构稳定性的特征及影响因子,结果表明不同处理间土壤团聚体结构稳定性差异较明显,且有机质与黏粒含量是影响团聚体结构稳定性的主要因素,而国内还鲜有相关报道。该研究就 HEMC 方法的原理、测定过程、数据处理、指标计算及相关研究进展进行了总结,并结合我国大力提倡保护耕地资源、修复退化土壤及实施植被恢复的大背景,对利用该方法进行土壤结构、土壤质量、土壤抗蚀性等方面的研究提出了一些建议,期望能够推广利用该方法,为土壤质量演变、构建和评价健康土壤提供基础数据支持。

关键词:土壤团聚体; 水稳性; 结构稳定性; 高能水分特性法

中图分类号:S152.4

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2022)06-0431-07

Progress in Research on Structural Stability of Soil Aggregates Based on High Energy Moisture Characteristic Method

HUANG Yue¹, ZHANG Fengbao^{1,2}, GAO Jingxia³, SHEN Nan^{1,2}, YANG Mingyi^{1,2}

(1.State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2.Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3.Institute of Horticulture, Ningxia Academy of Agricultural and Forestry Sciences, Yinchuan 750002, China)

Abstract: The stability of soil aggregates is an important soil physical property which affects not only the soil quality, infiltration, resistance to erosion and root growth, but also is an important indicator for assessing whether a soil is degraded or not. At present, the researches on the stability of soil aggregate both in China and abroad mainly focus on the water stability with few studies on the structural stability of the aggregates. The high energy moisture characteristic (HEMC) method can determine the structural stability of soil aggregates, which is highly reproducible and can also determine small differences between different treatments. The test and calculation process can be accurately controlled, and many studies using the HEMC method have been reported abroad. There are many reports on the HEMC method for analyzing the characteristics and major factors which determine the structural stability with soil amendments, land use and soil management, and different soil physical and chemical properties. The results show that the structural stability of soil aggregates differs significantly between different treatments, and the contents of organic matter and clay are the main factors affecting the structural stability of soil aggregates. These studies were mainly reported overseas with few relevant reports in China. This research summarises the principles of the HEMC method,

收稿日期:2021-09-05

修回日期:2021-10-12

资助项目:宁夏回族自治区农业高质量发展和生态保护科技创新示范项目(NGSB-2021-8-05);国家自然科学基金项目(41877080);国家自然科学基金青年资助项目(41907054)

第一作者:黄悦(1998—),女(瑶族),广西桂林人,硕士研究生,主要从事土壤侵蚀研究。E-mail:hyue_825@163.com

通信作者:张风宝(1980—),男(回族),宁夏彭阳人,博士,研究员,主要从事坡面土壤侵蚀过程及其环境效应研究。E-mail:fbzhang@nwsuaf.edu.cn

measuring process, data processing, index calculation and related research advances, and puts forward some suggestions for researches on soil structure, soil quality and soil resistance to erosion. The research combines the background relevant to arable land protection, restoration of degraded soils and vegetation restoration promoted in China. It is hoped that this method can be promoted and used for providing basic data support for the evolution of soil quality, promotion and evaluation of soil health.

Keywords: soil aggregate; water stability; structural stability; high energy moisture characteristic method

土壤团聚体是由矿物颗粒和有机无机物结合形成的组成土壤结构的基本单元,其含量在一定程度上反映了土壤持水性和供蓄养分等能力的高低,其组成和稳定性对土壤肥力、土壤结构及抗蚀性等具有重要作用,是评价土壤质量及重建健康土壤的重要指标^[1-2]。团聚体破碎会导致土壤孔隙塌陷和结构破坏,渗透性、水力传导率和抗蚀性降低,从而使灌溉和降水过程中更易产生径流,引起水土流失,进而驱动土壤进一步退化^[3-4]。因此研究土壤团聚体稳定性在分析土壤质量、结构、抗蚀性及评价土壤生产力等方面有重要意义。土壤团聚体稳定性是土壤团聚体抵抗外力作用或受到外部环境变化影响而维持其原本结构的能力,是决定土壤入渗、抗侵蚀能力和退化程度的重要土壤物理性质,被广泛用于评估土壤质量及土壤对侵蚀的敏感性^[5-6]。团聚体稳定性受土壤固有属性(有机质、质地等)、气候、土地利用方式、耕作管理、微生物活性等的综合影响^[7-8]。目前国内关于团聚体稳定性的研究多关注其水稳性,团聚体水稳性的测定方法也较多。测定团聚体结构稳定性的高能水分特性(high energy moisture characteristic, HEMC)法在国内的应用还鲜有报道,因此,本文旨在对测定团聚体结构稳定性的 HEMC 法进行系统描述与总结,以期在我国大力提倡保护耕地资源、修复退化土壤及大面积实施植被恢复的大背景下,为利用该方法进行土壤结构、土壤质量、土壤抗蚀性研究提供基础理论支撑。

1 团聚体稳定性测定方法

土壤团聚体的主要特点是水稳性和多孔性。团聚体水稳性是指团聚体抵抗因水力作用所发生的破碎分解的能力,测定方法包括水滴法、超声波分散法、Le Bissonnais(LB)法和湿筛法。土壤团聚体被水分解是由多种物理和物理化学机制导致的,目前已确定了4种主要机制:崩解,快速润湿过程中包裹的空气压缩而引起的破裂;快速润湿过程中差异膨胀引起的分解;受雨滴打击而发生的分解和因渗透压引起的物理化学分散^[9]。水滴法^[10]主要是模拟雨滴撞击造成的团聚体分解,使用单滴降雨模拟器形成不同特征的

液滴撞击到单个土壤团聚体上以测定团聚体水稳性,但该方法由于效率较低,目前应用极少。超声波分散法^[11]是一种非常有效的完全分解团聚体的方法,但在正常情况下,田间土壤从未受到超声波振动,因此该方法不适用于模拟田间土壤分散。在田间,降雨或灌溉下的团聚体分解是雨滴撞击、空气压缩、差异膨胀和分散的综合结果^[11]。因此,Le Bissonnais^[9]提出了将干筛法分离出的团聚体进行快速湿润(FW)、慢速湿润(SW)和预湿后扰动(WS)3种处理以区分团聚体的不同崩解机制,再利用湿筛法测定团聚体水稳性。但LB法处理过程较复杂且涉及多个测试,并没有广泛应用。湿筛法^[12]是国内外最常用的方法,通常会结合干筛法,首先用一定的作用力将土壤团聚体分散,然后用水力筛分的方法区分各粒级团聚体。土样在湿润过程中同时发生了崩解、差异膨胀和物理—化学分散作用,其中崩解作用的强烈程度与土样初始湿度和湿润速度有关,土样初始含水量越少、湿润速度越快,崩解作用越强烈^[13]。目前使用的湿润方法主要是向土样中注水预湿,但这一过程受人为因素影响较大,主要是不能保证每次土样的湿润速度相同。因此,即使在不同土地利用类型之间定性评估有很大差异的情况下,湿筛法得到的结果也难以进行统计比较且难以重现^[4,14]。

团聚体结构稳定性是指团聚体在受到外力作用(如耕作、种植和灌溉等)时保持团粒和孔隙排列的能力^[15],更多关注团聚体的孔径分布变化,其测定方法是HEMC法。该方法主要是以受控的方式缓慢或快速润湿团聚体,再通过不同基质吸力下可排水孔隙体积的变化来确定土壤团聚体的结构稳定性。与应用最广泛的湿筛法相比,HEMC法将崩解与团聚体分解期间发生的其他过程分离开来^[16]。同时,湿筛法是通过筛分各粒级团聚体含量计算得到团聚体水稳性指标,HEMC法则适用于测定某一粒级大团聚体的结构稳定性,且操作较复杂,耗时更长,使其未被广泛应用。但HEMC法具有高重现性且灵敏可控,可用于确定具有广泛稳定性水平的干旱和湿润地区土壤团聚体的结构稳定性^[17-18]。同时该方法对不同处理下土壤孔径分布的微小变化非常敏感,从而可以

比较不同处理之间团聚体结构稳定性的差异^[19-20], 克服了水稳性结果难以重现的不足, 为精细化研究团聚体的形成机制奠定基础。

2 HEMC 法的原理

测定团聚体结构稳定性的高能水分特性法由 Childs^[21] 首次提出, Collis-George 和 Figueroa^[22] 进行改进, Pierson 和 Mulia^[23] 又进一步改进后对该方法进行了详细说明, 最后 Levy 和 Mamedov^[24] 完善了该方法并对试验过程和建模方法进行量化和标准化。该方法通过准确控制团聚体的润湿过程, 保证润湿和截留空气是造成团聚体分解的唯一力量, 通过不同基质吸力下可排水孔隙体积的变化来确定土壤团聚体的结构稳定性^[18,25]。

HEMC 法是以受控的方式缓慢或快速润湿团聚体, 并在高能量(即, 基质势为 $0 \sim -5.0 \text{ J/kg}$ 或 $0 \sim 50 \text{ cmH}_2\text{O}$ 张力)下得到土壤水分特征曲线。通过量化快速和缓慢润湿的土壤水分特征曲线的差异获得团聚体稳定性指标(图 1A)。对于给定的润湿速率, 结构指数(structural index, SI)定义为可排水孔隙的

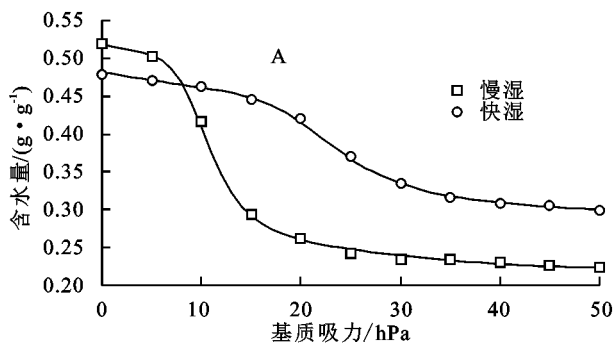
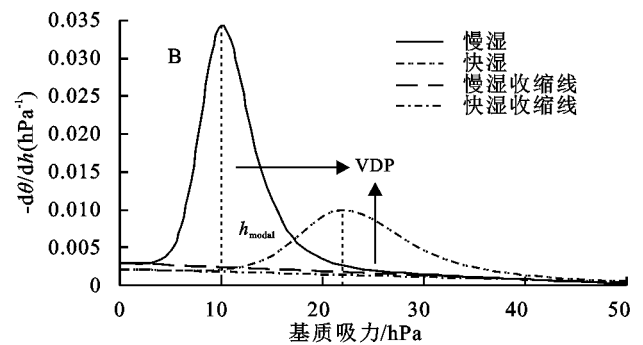


图 1 快湿与慢湿的(A)水分特征曲线和(B)比水容量曲线示意图^[27]

体积(volume of drainable pores, VDP)与模态吸力(modal suction, h_{modal})的比值^[22]。其中 h_{modal} 对应于比水容量曲线峰值处的基质势, VDP 定义为比水容量曲线下方和孔隙收缩基线上方区域的面积(图 1B), 孔隙收缩基线代表了由于团聚体收缩而不是孔隙排空而造成的失水率^[22]。快湿和慢湿的 SI 值之比, 称为稳定性比(stability ratio, SR), 用于比较团聚体在 $0 \sim 1$ 的相对范围内的结构稳定性。SR 值越接近于 1, 表示团聚体越稳定, 抵抗因快速润湿而产生破碎的能力越强; SR 值接近于 0, 表示团聚体越不稳定, 即快速润湿越容易破坏团聚体, 团聚体孔隙体积或直径发生明显变化^[17,25]。因此, 团聚体结构稳定性随着 SR 的增加而提高。有部分研究是直接根据 SI 值判断团聚体结构稳定性, 但 Collis-George 和 Figueroa^[22] 研究表明 SI 值会随团聚体的大小而变化, 而 SR 是无量纲的, 因此对不同处理的团聚体稳定性进行比较时, 选择 SR 指标较为准确。同时还有部分研究用快速润湿下处理 A 与对照处理 B 获得的 SI 值之比来描述团聚体的结构稳定性, 此时 $\text{SR} > 1$ 表示测试处理的团聚体比对照处理的团聚体更稳定, $\text{SR} < 1$ 则相反^[14,26]。



3 HEMC 法的测定过程

3.1 测定设备

HEMC 法的测定仪器有两种, 一种是最开始使用的组合装置(图 2A), 主要由蠕动泵、砂芯漏斗、移液管、刻度尺与带阀门的管道组成; 另一种是操作更简单方便的沙箱(Eijkelpamp, Giesbeek, The Netherlands)(图 2B), 主要由供应瓶、箱体、沙子、滑动测量标尺和吸力校准仪组成。

两者都是通过蠕动泵快速与缓慢润湿团聚体, 但原始仪器的蠕动泵与测定装置相连接, 当土壤完全饱和时需立刻停止进水, 该过程易使结果产生误差。其后的测定过程, 原始仪器是通过降低移液管内液体高度对团聚体施以不同基质吸力, 然后根据每个基质吸力下 2 分钟平衡期所排水量计算团聚体含水量。沙箱则是将装有团聚体的环刀放入沙箱内, 通过开关 A

及吸力校准仪调节基质吸力并进行排水(该过程平衡时间较长), 然后通过称重计算团聚体含水量。

相较而言, 原始仪器的可控性稍弱, 装置也较容易出现漏水现象(尤其是阀门连接处), 且人为读数易产生误差, 其优点在于效率更高; 沙箱则更自动化, 其过程精准可控, 大大减少了人为因素导致的误差, 但测定过程所需时间较长, 不同基质吸力下的平衡时间难以精确确定。

3.2 测定过程

土壤样品先风干后过 2 mm 筛, 取两约 15 g 再次筛分后的团聚体(经国外大量试验表明 $0.5 \sim 1.0 \text{ mm}$ 粒径的团聚体更适用于 HEMC 法且通常为土壤大团聚体的主要部分)放置在砂芯漏斗或环刀内形成约 5 mm 厚的土层。使用原始仪器时, 根据蠕动泵的速率及进水时间计算出快速和缓慢润湿的团聚体饱和含水量(saturated water contents, θ_s), 然后以

0.1~0.2 J/kg 的增量降低移液管中凹液面的高度(即通过对比刻度尺,使凹液面降低 1~2 cm),从而增加所施加的基质吸力,在 2 分钟的平衡期后记录每个基质吸力下从团聚体排出的水量,并计算出团聚体的相应残留含水量(residual water contents, θ_r)^[24]。使用沙箱时,先用蠕动泵对团聚体进行快速和缓慢润

湿,再将样品在基质吸力(matric suction, h)为 0 hPa 下平衡后称重,计算出 θ_s ,然后在不同基质吸力(0~50 hPa,间隔 5 hPa)下平衡后称重,计算出团聚体相应的 θ_r ^[27]。最后使用 van Genuchten 模型在测定的 HEMC 数据上拟合出快湿和慢湿样品的水分特征曲线以确定团聚体的结构稳定性指标。

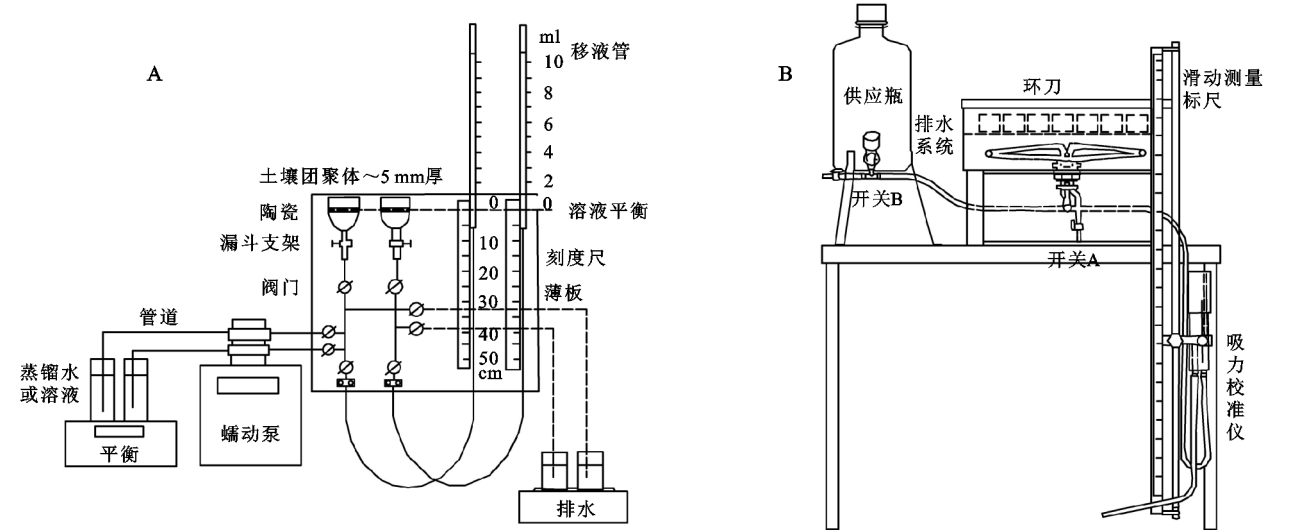


图 2 HEMC 法测定的(A)原始仪器^[15]和(B)沙箱

测定过程中对土样进行快速与缓慢润湿是为了模拟田间最初干燥土壤与降雨或灌溉后潮湿土壤的差异。最开始快速润湿是将团聚体直接倒入足够深度的水层中,这导致几乎所有团聚体完全分解^[21];缓慢润湿是将浸入水中的灯芯嵌入土样中慢慢润湿约 24 h 使土样饱和^[28],改进后的过程则是将土样放在底部放置了滤纸的漏斗中,然后将样品在烧杯中浸泡过夜,蒸馏水从底部进入漏斗使得土样缓慢润湿饱和^[29]。为降低团聚体从空气干燥状态润湿到饱和的破坏力,利用原始仪器通过悬挂水柱调节漏斗上团聚体的基质吸力下降速度来控制团聚体的吸水速率,缓慢润湿也是相同的处理方法,不同之处在于基质吸力的间隔设定值不同,即处理时间不同^[23]。但快速和缓慢润湿的操作过程仍存在不可控性,为使快湿和慢湿过程更易于控制和操作,又改进为使用蠕动泵分别以 100 mm/h, 2 mm/h 的速率对团聚体进行快速与缓慢润湿处理^[24]。

4 HEMC 法的数据处理与结构稳定性指标计算

结构稳定性指标计算是基于拟合水分特征曲线应用最广泛的 van Genuchten^[30] 模型。在 HEMC 法的发展过程中, van Genuchten 模型也经历了改进。原始的四参数(分别为 θ_r , θ_s , n 和 α)模型准确估算了 h_{modal} , 但未提供对 VDP 的准确估算, 因此 Pierson 和 Mulla^[23] 对该

模型进行了七参数修正(即增加了参数 A, B, C), 这种修改对参数 n 和 α 的值影响很小, 但显著影响了 θ_r 和 θ_s 的值, 因此修正后的模型能更准确地拟合出水分特征曲线。使用改进的 van Genuchten 模型确定土壤团聚体结构稳定性指标的具体过程如下^[27,31]:

(1) 使用 Microsoft Excel 的非线性优化技术, 将下式(1)拟合到测得的 HEMC 数据中, 得出拟合参数:

$$\theta(h) = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) [1 + (\alpha h)^n]^{(\frac{1}{n}-1)} + Ah^2 + Bh + C \tag{1}$$

式中: θ 为重量含水量(g/g); h 为设置的土壤基质吸力(hPa); θ_r 和 θ_s 不能用残留和饱和含水量来物理解释^[23], 因此分别是伪残留和饱和含水量(g/g); 曲线形状参数 α (hPa⁻¹) 和 n (无量纲) 分别是控制水分特征曲线位置和陡度的经验参数; 参数 A (hPa⁻²), B (hPa⁻¹) 和 C (g/g) 是提高模型对测量数据拟合度的二次系数。

(2) 比水容量函数 $[C(\theta) = |d\theta/dh|]$ 为公式(1)的一阶导数:

$$C(\theta) = |d\theta/dh| = (\theta_s - \theta_r) [1 + (\alpha h)^n]^{(\frac{1}{n}-1)} \frac{1}{n} (\alpha h)^n (n / \{h[1 + (\alpha h)^n]\}) + 2Ah + B \tag{2}$$

VDP(g/g)值是通过辛普森数值积分找到的孔隙收缩基线上方和比水容量曲线下方的面积计算得到(即 $2Ah + B$)。孔隙收缩基线代表由于团聚体收缩而不是孔隙排空引起的水损失率, 在理论上等于 $(\theta_s - \theta_r)$ 。

(3) 将公式(1)的二阶导数等于零计算得到 $C(\theta)$ 峰值处的 h (即模态吸力 h_{modal}):

$$d^2\theta/dh^2 = (\theta_s - \theta_r) \left(\frac{1}{n} - 1 \right) \left(\frac{1}{n} - 2 \right) n^2 \alpha^2 (ah)^{(2n-2)} \\ \left[1 + (ah)^n \right]^{\left(\frac{1}{n} - 3 \right)} + (\theta_s - \theta_r) \left(\frac{1}{n} - 1 \right) (n-1) \\ n^2 \alpha^2 (ah)^{(n-2)} \left[1 + (ah)^n \right]^{\left(\frac{1}{n} - 2 \right)} + 2A = 0 \quad (3)$$

一般由于 A 值极低, $2A$ 项对公式(3)的影响可以忽略不计, 因此 h_{modal} 可通过下式近似得到:

$$h_{\text{modal}} \approx \frac{1}{\alpha} \left(\frac{n-1}{n} \right)^{1/n} \quad (4)$$

(4) 分别通过以下公式确定快速润湿(fast wetting, FW)和缓慢润湿(slow wetting, SW)样品的 SI 值以及测定团聚体的 SR 值:

$$SI = \frac{VDP}{h_{\text{modal}}} \quad (5)$$

$$SR = \frac{SI_{\text{FW}}}{SI_{\text{SW}}} \quad (6)$$

5 土壤团聚体结构稳定性变化的影响因素研究

目前通过 HEMC 法分析土壤团聚体结构稳定性的研究多是与土壤改良剂(聚丙烯酰胺、生物炭、菌根等)、土地利用与土壤管理(耕作、灌溉等)以及不同土壤理化性质等方面相关, 得到的结果可为未来相关研究提供基础。

5.1 土壤改良剂

土壤改良剂能有效地改善土壤理化性状和土壤养分状况, 提高团聚体结构稳定性和退化土壤的生产力^[32]。添加相对新鲜的有机物比添加稳定的有机物对团聚体结构稳定性的影响更有效^[26]。阴离子聚丙烯酰胺(PAM)作为最受关注的人工合成土壤改良剂之一, 在改善土壤结构和提高团聚体结构稳定性方面具有良好效果, 且有效性通常随着 PAM 浓度(0~200 mg/L)的增大而提高^[33-35]。生物炭是由各种有机原料在不同温度热解下产生的多孔、富碳材料, 添加后可显著提高团聚体结构稳定性, 但无论生物炭原料的类型和施用率如何, 提高热解温度都会相对降低团聚体结构稳定性^[36]。除 PAM 和生物炭外, 施用石灰、石膏也会提高土壤团聚体结构稳定性, 且效果随着农业石膏施用量的增加而提高^[19]。生物改良剂(如菌根)的应用也较广泛, 丛枝菌根真菌和植物之间的共生关系能提高土壤团聚体的结构稳定性^[37]。

5.2 土地利用与土壤管理

土地利用和土壤管理是影响土壤结构的最直接

人为活动, 其变化会影响土壤孔隙度和渗水性, 植物的枯枝落叶和根系均能显著提高土壤有机质含量, 进而有助于团聚体的形成和稳定性的提高^[38-39]。长期耕作会显著降低土壤有机质、排水孔隙度和团聚体结构稳定性, 长期免耕则会显著提高土壤团聚体结构稳定性^[3, 35, 40]。不同土地利用条件下林地的土壤结构稳定性最高, 但当不同土地利用的土壤有机质含量差异较小或土壤本身较稳定时, 其团聚体结构稳定性没有显著差异^[20, 25, 41-42]。温度对土壤结构稳定性也会产生影响, 团聚体结构稳定性通常随着温度的升高而降低^[43]。不同水质的灌溉也会改变土壤的性质, 影响田间径流和土壤流失^[4]。干旱和半干旱地区的团聚体结构稳定性不取决于灌溉水的电解质浓度, 而在土壤 pH 值较高(>6.5)的情况下, 灌溉水的离子浓度决定了湿润地区土壤团聚体的结构稳定性^[44]。高浓度的有机物对团聚体稳定性会产生有利影响, 废水中通常含有相对较高的有机物, 因此长期利用处理废水进行灌溉有助于提高团聚体结构稳定性, 减少水土流失, 尤其是在可降低团聚体崩解的条件下(如低至中等降雨强度或低强度灌溉的区域)^[45-47]。

5.3 土壤理化性质

虽然土壤改良剂类型、添加量和土地利用类型、灌溉水质等均会对土壤团聚体结构稳定性产生影响, 但实质上是不同处理改变了土壤的理化性状, 从而使团聚体结构稳定性发生变化。大部分研究表明, 土壤改良剂对团聚体结构稳定性的影响与土壤特性(如黏粒含量、黏土矿物组成、电解质、pH 和团聚体尺寸)直接相关, 且改善效果与固有的团聚体稳定性、黏粒和有机质含量成反比^[14, 17, 26, 33-35, 40]。施用改良剂可提高土壤有机碳储量、增加土壤大孔隙, 从而提高团聚体结构稳定性, 对粗糙和中等质地的土壤影响效果更明显^[26-27, 37, 48-50]。不同土地利用和土壤管理对团聚体结构稳定性的影响主要取决于土壤有机质, 其次是团聚体孔隙度^[35, 40-43]。

团聚体结构稳定性主要取决于土壤类型、有机质含量和土壤质地^[15]。据报道, 高岭土的团聚体结构稳定性大于蒙脱土和伊利土^[3, 14, 24]。有机质是团聚体形成的主要胶结剂, 是影响团聚体结构稳定性的重要因素, 且稳定性通常随着含量的增加而提高^[3, 20, 51]。但 Levy 等^[24]研究结果表明团聚体结构稳定性与土壤有机质无关, 这可能是由于所研究的干旱和半干旱土壤中的有机质含量<2%。当土壤有机质含量较低时, 其他土壤性质(如黏粒含量)可能会对团聚体结构稳定性产生更大影响。团聚体结构稳定性通常随土壤黏粒含量的增加而提高, 主要归因于黏粒的疏水性与高团聚能力^[3, 16-17, 24, 33]。Amoli 等^[41]研究则表明: 土壤结构稳定性主要受控于

有机质与黏粒混合量,而不是总有机质含量,因此增加有机质/黏粒比,可以提高土壤结构稳定性。除土壤类型、质地、有机质外,土壤碱度(可交换钠百分比)、盐度(阳离子浓度)也会影响团聚体结构稳定性。增加土壤碱度会增加黏粒的物理化学分散,减弱黏粒的团聚作用,导致团聚体结构稳定性削弱^[16,24,45]。Crescimanno 等^[52]研究表明即使在低碱度(2%~5%)水平下,土壤也可能发生退化。阳离子对土壤团聚体的形成也有直接影响,尤其是在土壤有机质或黏粒含量较低的土壤中,团聚体的形成以阳离子为主^[53]。Bhardwaj 等^[54]研究表明团聚体结构稳定性受土壤碱度的影响高于土壤盐度。

6 研究展望

高能水分特性法通过区分崩解与团聚体分解期间发生的其他过程以测定土壤团聚体的结构稳定性,这是一种可确定广泛结构稳定性水平且试验及计算过程精准可控的方法。目前,国外已有较多研究通过 HEMC 法分析了土壤团聚体结构稳定性特征及其与土壤理化性质、土壤改良剂、土地利用与土壤管理等因素的关系,结果表明有机质含量是影响土壤团聚体结构稳定性的关键因素,除此之外,黏粒含量也对土壤团聚体结构稳定性产生显著影响。

国内目前还鲜有关于团聚体结构稳定性的研究报道,因此可引进 HEMC 法研究不同土地利用方式、植被演替过程、不同侵蚀环境、不同土壤改良方法等条件下土壤的团聚体结构稳定性变化特征,尤其是在中国植被恢复和土地资源提质增效的大背景下,基于该方法研究土壤团聚体的演变可为改良土壤结构、增强土壤抗蚀性、防治水土流失及土壤质量评价等方面提供更切实的理论支持。根据已有的研究,有机质含量、黏粒含量、碱度、阳离子浓度等土壤理化指标与团聚体结构稳定性指标密切相关,因此未来的研究方向可致力于探讨土壤团聚体结构稳定指标与土壤关键理化指标的定量关系,揭示团聚体结构稳定性的主控因子及演变的驱动机制。团聚体稳定性是决定土壤抗侵蚀和退化能力的重要土壤物理性质,因此,团聚体结构稳定性指标是否能衡量土壤抗侵蚀能力和土壤质量,预测土壤侵蚀程度和评价土壤健康程度,进而将其引入土壤侵蚀模型、耕地质量评价模型也是一个重要研究方向。

参考文献:

- [1] 卢金伟,李占斌.土壤团聚体研究进展[J].水土保持研究,2002,9(1):81-85.
- [2] 王小云.土壤团聚体与土壤侵蚀关系研究进展[J].安徽农业科学,2016,44(23):106-108.
- [3] Norton L D, Mamedov A I, Huang C H, et al. Soil aggregate stability as affected by long-term tillage and clay mineralogy[J]. *Advances in Geoecology*, 2006,38:422-429.
- [4] Mamedov A I. Soil water retention and structure stability as affected by water quality[J]. *Eurasian Journal of Soil Science*, 2014,3:89-94.
- [5] Amezketa E. Soil aggregate stability:a review[J]. *Journal of Sustainable Agriculture*, 1999,14:83-151.
- [6] Nciizah A D, Wakindiki I I C. Physical indicators of soil erosion, aggregate stability and erodibility[J]. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 2015,61(6):827-842.
- [7] Saygin S D, Cornelis W, Erpul G, et al. Comparison of different aggregate stability approaches for loamy sand soils[J]. *Applied Soil Ecology*, 2012,54:1-6.
- [8] 王进,刘子琦,鲍恩侯,等.喀斯特石漠化区林草恢复对土壤团聚体及其有机碳含量的影响[J].水土保持学报,2019,33(6):249-256.
- [9] Le Bissonnais Y. Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodibility: I. Theory and methodology[J]. *European Journal of Soil Science*, 1996,47(4):425-437.
- [10] Farres P J. Some observations on the stability of soil aggregates to raindrop impact[J]. *Catena*, 1980,7(2):223-231.
- [11] Almajmaie A, Hardie M, Acuna T, et al. Evaluation of methods for determining soil aggregate stability[J]. *Soil & Tillage Research*, 2016,167:39-45.
- [12] Yoder R E. A direct method of aggregate analysis of soils and a study of the physical nature of erosion losses[J]. *Journal of the American Society of Agronomy*, 1936,28(5):337-351.
- [13] 王秀颖,高晓飞,刘和平,等.土壤水稳性大团聚体测定方法综述[J].中国水土保持科学,2011,9(3):106-113.
- [14] Mamedov A I, Wagner L E, Huang C, et al. Polyacrylamide effects on aggregate and structure stability of soils with different clay mineralogy[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2010,74(5):1720-1732.
- [15] Mamedov A I, Levy G J. High energy moisture characteristics: linking between some soil physical processes and structure stability[M]//Logsdon S, Berli M, Horn R. *Quantifying and Modeling Soil Structure Dynamics*. Soil Science Society of America, Madison, Wi, 2013:41-74.
- [16] Levy G J, Mamedov A I, Goldstein D. Sodicty and water quality effects on slaking of aggregates from semi-arid soils[J]. *Soil Science*, 2003,168(8):552-562.
- [17] Mamedov A I, Beckmann S, Huang C H, et al. Aggregate stability as affected by polyacrylamide molecular weight, soil texture, and water quality[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2007,71(6):1909-1918.

- [18] De-Campos A B, Mamedov A I, Huang C H. Short-term reducing conditions decrease soil aggregation[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2009,73:550-559.
- [19] da Silva E A, de Oliveira G C, Silva B M, et al. Aggregate stability by the 'high energy moisture characteristic' method in an oxisol under differentiated management[J]. *Revista Brasileira De Ciencia Do Solo*, 2014, 38(5):1633-1642.
- [20] Gholoubi A, Emami H, Caldwell T G. Deforestation effects on soil aggregate stability quantified by the high energy moisture characteristic method[J]. *Geoderma*, 2019,355:113919.
- [21] Childs E C. The use of moisture characteristics in soil studies[J]. *Soil Science*, 1940,50(4):239-252.
- [22] Collis-George N, Figueroa B. The use of high energy moisture characteristic to assess soil stability[J]. *Australian Journal of Soil Research*, 1984,22(3):349-356.
- [23] Pierson F B, Mulla D J. An improved method for measuring aggregate stability of a weakly aggregated loessial soil[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1989,53(6):1825-1831.
- [24] Levy G J, Mamedov A I. High-energy-moisture-characteristic aggregate stability as a predictor for seal formation[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2002,66(5):1603-1609.
- [25] Poch R M, Antúnez M. Aggregate development and organic matter storage in mediterranean mountain soils [J]. *Pedosphere*, 2010,20(6):702-710.
- [26] Mamedov A I, Bar-Yosef B, Levkovich I, et al. Amending soil with sludge, manure, humic acid, orthophosphate and phytic acid: effects on aggregate stability[J]. *Soil Research*, 2014,52:317-326.
- [27] Hosseini F, Mosaddeghi M R, Hajabbasi M A, et al. Influence of tall fescue endophyte infection on structural stability as quantified by high energy moisture characteristic in a range of soils[J]. *Geoderma*, 2015,249:87-99.
- [28] Childs E C. Stability of clay soils[J]. *Soil Science*, 1942,53:79-92.
- [29] Feng C L, Browning G M. Aggregate stability in relation to pore size distribution1 [J]. *Soil Science of America Journal*, 1947,11:67-73.
- [30] van Genuchten Th M. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1980,44(5):892-898.
- [31] Hosseini F, Mosaddeghi M R, Hajabbasi M A, et al. Effects of endophyte-infected and non-infected tall fescue residues on aggregate stability in four texturally different soils[J]. *Geoderma*, 2017,285:195-205.
- [32] 陈义群,董元华.土壤改良剂的研究与应用进展[J].*生态环境*, 2008,17(3):1282-1289.
- [33] Mamedov A I, Huang C H, Aliev F A, et al. Aggregate stability and water retention near saturation characteristics as affected by soil texture, aggregate size and polyacrylamide application[J]. *Land Degradation & Development*, 2017,28(2):543-552.
- [34] Mamedov A I, Tsunekawa A, Haregeweyn N, et al. Soil structure stability under different land uses in association with polyacrylamide effects[J]. *Sustainability*, 2021,13(3):1407.
- [35] Mamedov A I, Fujimaki H, Tsunekawa A, et al. Structure stability of acidic luvisols: effects of tillage type and exogenous additives [J]. *Soil & Tillage Research*, 2021,206:104832.
- [36] Saffari N, Hajabbasi M A, Shirani H, et al. Biochar type and pyrolysis temperature effects on soil quality indicators and structural stability[J]. *Journal of Environmental Management*, 2020,261:110190.
- [37] Bearden B N. Influence of arbuscular mycorrhizal fungi on soil structure and soil water characteristics of vertisols[J]. *Plant and Soil*, 2001,229(2):245-258.
- [38] 罗晓虹,王子芳,陆畅,等.土地利用方式对土壤团聚体稳定性和有机碳含量的影响[J].*环境科学*, 2019,40(8):3816-3824.
- [39] 赵富王,王宁,苏雪萌,等.黄土丘陵区主要植物根系对土壤有机质和团聚体的影响[J].*水土保持学报*, 2019,33(5):105-113.
- [40] Mamedov A I, Tsunekawa A, Tsubo M, et al. Structure stability of cultivated soils from semi-arid region: comparing the effects of land use and anionic polyacrylamide application[J]. *Agronomy*, 2020,10(12):2010.
- [41] Amoli F P, Mosaddeghi M R, Davatgar N, et al. Effects of land use and reducing conditions of paddy fields on soil quality and high energy moisture characteristic structural stability indices in north of Iran[J]. *Paddy Water Environment*, 2021,19(3):433-451.
- [42] Avanzi J C, Norton L D, Naves Silva M L, et al. Aggregate stability in soils cultivated with eucalyptus[J]. *Pesquisa Agropecuaria Brasileira*, 2011,46(1):89-96.
- [43] Kelishadi H, Mosaddeghi M R, Ayoubi S, et al. Effect of temperature on soil structural stability as characterized by high energy moisture characteristic method[J]. *Catena*, 2018,170:290-304.
- [44] Levy G J, Miller W P. Aggregate stabilities of some southeastern U. S. soils [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1997,61(4):1176-1182.
- [45] Mamedov A I, Shainberg I, Levy G J. Irrigation with effluents: effects of prewetting rate and clay content on runoff and soil loss[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2001,30(6):2149-2156.