

草地土壤团聚体与有机碳固存关系研究进展

郑晒坤¹, 夏菲^{2*}, 魏巍², 王敬龙², 杨彩红¹, 王军强^{2,3}, 薛云尹³,
石昊¹, 吴皓阳³, 冉林灵³, 严双³, 姜晓敏¹

(1. 甘肃农业大学林学院, 甘肃 兰州 730070; 2. 西藏自治区农牧科学院草业科学研究所, 西藏 拉萨 850000; 3. 西华师范大学生态研究院, 四川 南充 637009)

摘要: 土壤团聚体作为土壤结构重要的组成部分, 易受到气候变化及人为活动影响。团聚体固碳是认可度较高的固碳措施之一, 其固碳功能与土壤团聚体的形成息息相关。本文通过对相关文献的总结, 整理了土壤团聚体稳定性及其与有机碳的关系, 以草地土壤团聚体为例从放牧及草地退化两个方面分析了草地土壤团聚体的稳定性变化, 重点将草地土壤团聚体稳定性变化对有机碳的影响进行系统归纳和总结, 提出当前研究的进展、不足并对研究前景进行了展望。

关键词: 草地土壤; 土壤有机碳; 团聚体; 土壤碳固定

中图分类号: S152.4; S283

文献标志码: A

Research Progress on the Relationship Between Grassland Soil Aggregates and Organic Carbon Sequestration

ZHENG Shaikun¹, XIA Fei^{2*}, WEI Wei², WANG Jinglong², YANG Caihong¹, WANG Junqiang^{2,3}, XUE Yunyin³,
SHI Hao¹, WU Haoyang³, RAN Linling³, YAN Shuang³, JIANG Xiaomin¹

(1. College of Forestry, Gansu Agricultural University, Gansu Lanzhou 730070, China; 2. Institute of Pratacultural Science, Tibet Academy of Agricultural and Animal Husbandry Sciences, Tibet Lhasa 850000, China; 3. Institute of Ecology, China West Normal University, Sichuan Nanchong 637009, China)

Abstract: As an important component of soil structure, soil aggregates are susceptible to climate change and human activities. Carbon sequestration by aggregates is one of the highly recognized carbon sequestration measures, and its carbon sequestration function is closely related to the formation of soil aggregates. Based on the summary of relevant literature, this paper sorted out the stability of soil aggregates and its relationship with organic carbon. Taking soil aggregates in grassland as an example, the changes in the stability of soil aggregates in grassland were analyzed from two aspects of grazing and grassland degradation, and the impact of soil aggregate stability changes on organic carbon in grassland was systematically induced and summarized. The progress and deficiency of the current research are put forward and the prospect of the research is prospected.

Key Words: grassland soil; soil organic carbon; aggregate; soil carbon fixation

草地生态系统是全球分布最广的陆地生态系统之一, 储存在其中的土壤有机碳达到了全球土壤有机碳库的10%~30%。土壤团聚体结构对土壤有机碳的固存起着关键作用。土壤有机碳也对团聚体的形成和稳定有积极影响。因此草地土壤团聚体与其有机碳含量之间动态关系一直备受关注,

探讨草地土壤团聚体的固碳作用对于草地资源的可持续利用具有重要意义。

1 土壤团聚体稳定性和有机碳的关系

土壤团聚体是由土壤机械与具有吸收钙的腐殖质凝结而成的、近似球形的较疏松的多孔小土团, 其稳定性则指抵抗外力破坏的能力(包括水稳性和机械稳定性)。土壤团聚体和分布在其中的孔隙中共同构成了土壤结构体, 是土壤结构的基础^[1], 它决定着土壤行为、可产值以及对土壤侵蚀和退化的抑制能力。其稳定性是描述土壤抵抗侵

收稿日期: 2024-04-10

基金项目: 西藏自治区重点研发计划项目(XZ202201ZY0005N)。

作者简介: 郑晒坤(1997-), 男, 硕士研究生, 主要从事草地科学研究, E-mail: zhengshaikun@163.com; *为通信作者, 夏菲(1987-), 女, 硕士, 助理研究员, 主要从事牧草育种及荒漠化治理研究, E-mail: 414677849@qq.com。

蚀过程中破坏作用的重要指标,也影响着土壤生物地球化学循环^[2]。

1991年Waters等^[3]提出土壤有机质(OM)是土壤团聚体稳定的关键因素,随后的研究也表明,土壤有机质含量的高低也受团聚体稳定性的影响^[4]。土壤有机碳(SOC)主要由动植物残骸及其形成的腐殖质和土壤微生物体等构成,可以促进团粒形成进而改善土壤结构和提高土壤耕作性能,是土壤微生物获取能量的重要来源之一。同时,团聚体中有机碳含量的增加也会提高团聚体稳定性^[5]。

Hassink^[6]发表的有机碳与土壤黏粒含量的研究报告使得学术界开始高度关注微团聚体对有机碳的保护机制,先后从土壤粘粒、粉粒矿物特性和比例以及包裹在大团聚体中的微团聚体对外源碳有固持作用等方面对微团聚体固碳机制进行研究。也有学者运用同步辐射红外光谱技术,研究了不同粒径团聚体中土壤有机碳官能团的变化。研究结果显示,随着团聚体稳定性的提升,土壤有机碳中的易氧化官能团(如脂肪-C、醇-C)的增量超越芳香-C,从而提升了土壤有机碳的化学稳定性^[7]。

2 草地土壤团聚体稳定性及其有机碳分布特征

2.1 草地土壤团聚体稳定性变化研究进展

团聚体是土壤基本结构单位,其通过调节水分和气体交换,生物活动等影响土壤抗蚀性^[8]和养分可用性进而影响植物的生长^[9]。土壤团聚体稳定性主要受土壤质地、有机质、土壤含水量、冻结温度、冻融过程等因素的影响^[10]。目前关于草地土壤团聚体稳定性的研究主要集中在放牧和草地退化过程方面。

2.1.1 放牧过程对草地土壤团聚体稳定性的影响

放牧过程中家畜的采食、粪尿归还和践踏都会影响团聚体的稳定性。例如Li等^[11]研究发现,在集约化放牧下,大团聚体(>5 mm)减少,而较小的团聚体(0.25 mm以上)增加。裴雯等^[12]发现随着草地放牧强度逐步增大,土壤大团聚体含量相对减少,微颗粒则明显增加,团聚体稳定性逐步降低。Dormaar等^[13]研究发现,重度放牧条件下土壤水稳性团聚体的MWD减小,土壤压实度增加,土壤结构稳定性降低。禁牧能通过增加草地植物来影响草地微生物量和细胞外酶活性进而增加土壤中水稳定大团聚体的比例(>0.25 mm)^[14]。

2.1.2 草地退化过程对草地土壤团聚体稳定性的影响

有研究证明,多年生禾草的生长可以促进团聚体的形成,这是由于牧草根际聚集的微生物产生了大量的多糖和酚类结合剂^[15-16]。与禾草类似,豆科植物也被证明对团聚体聚合稳定性有积极影响。例如,Haynes等^[17]观察到与禾草相比,羽扇豆下的团聚体稳定性和微生物生物量碳更高。Bardgett等^[18]研究表明,红杉对微生物生物量有积极的影响,从而促进土壤有机质与矿物颗粒结合,为团聚体碳固存提供基础。然而,这个过程也可能是土壤团聚体总量的变化导致了植物生产力的提高,与物种多样性可能没有关系^[19]。

草地退化减少了地上枯枝落叶和地下分泌物等有机物的输入,影响了根系的生长和真菌的繁殖,从而降低了土壤团聚体的稳定性^[20]。细的草根和伴生的真菌菌丝能将微小的土壤颗粒物物理地包裹在团聚体中^[21]。土壤微生物群落也有助于支持土壤团聚体的聚合和解聚以此建立最优的栖息地^[22],例如,有研究证明,微生物生物量碳与团聚体稳定性呈显著正相关,表明微生物在团聚体稳定过程中的重要作用^[16]。对于真菌来说尤其如此,许多菌丝充当胶结物形成大团聚体^[23]。反之,退化过程中对土壤微生物的扰动可能导致大团聚体的聚合稳定性降低。

2.2 草地土壤团聚体稳定性变化对有机碳的影响

草地生态系统是维持和发展畜牧业的基础和保障,储存了全球20%~30%的土壤有机碳,并拥有超过10%的陆地生物量碳^[24]。但由于集约化放牧,大多数草原正在面临着与土壤碳相关温室气体排放的退化风险^[25]。因此,了解退化草原有机碳损失的机制对于制定有效措施减缓气候变化至关重要。

草地退化过程中植物生长相关养分的限制增加,土壤的团聚体稳定性得以改变,从而降低了初级生产力^[26],在此过程中土壤微生物群落结构和组成也发生了变化。因此,草地退化对土壤结构和SOC的影响一般会体现在团聚体的分布及稳定性变化上。草地退化将对植被盖度和类型产生显著的影响,从而直接影响团聚体中有机碳的含量^[27],同样,Zhu等^[28]研究发现,团聚体养分对植被类型的变化响应更为敏感。地上生物多样性与土壤有机质积累均能促进微团聚体间相互胶结来提高土

壤中的大团聚体数量进而提高土壤有机碳储量和稳定性^[29]。根系生物量对表土团聚体有机碳的贡献较大,而植物覆盖度和地上生物量对深层土壤团聚体有机碳的影响相对较大^[30]。

早期的研究发现放牧会引起微团聚体碳氮储量的增加,这可能是由于放牧过程中微生物产物增加所导致(如多糖)^[31],而微生物产物在稳定土壤团聚体有机碳方面也发挥着重要的作用^[32]。相比其他因素,团聚体粒径对微生物多样性和群落结构影响更大^[33],微生物的快速生长对微团聚体(<0.25 mm)中微生物群落结构的贡献高于大团聚体(>2 mm)^[34],单位体积土壤中微生物量随团聚体粒径减小而增加,导致大团粒来自植物的外援有机质占据优势,而微小粒级团聚体中来自于微生物代谢物的有机质占优势^[35]。此外,放牧过程中,粪尿归还还是草地生态系统维系草地碳氮循环的关键步骤,受动物体型大小影响显著,例如,奶牛平均每天产生排泄物约是兔子的2.5倍^[36],因此,放牧不同类型的动物对草地土壤团聚体中有机碳的影响也不同。

总之,土壤团聚体会抑制土壤有机碳的分解和矿化作用。其形成过程也会将土壤有机碳包裹并进行有效的固定和隔离,减少其矿化作用,在退化草地修复与利用的过程中,需重视土壤团聚体稳定性及其对有机碳稳定性的关键作用,旨在精准调控团聚体中有机碳含量,从而增强草地土壤的固碳潜力。

3 现有研究的不足与展望

当前,国内外学者开展了大量的关于草地利用方式、放牧强度以及草地退化等因素对土壤团聚体粒径分布与稳定性的影响,并分析了团聚体稳定性变化对土壤有机碳迁移、转化的影响,然而,也存在诸多不足之处。

1)关于草地土壤团聚体稳定性及其并联导致的有机碳稳定性变化缺乏整体性、连续性、长期动态变化监测,导致研究结果代表性不强。因此,需进一步加强长期定位试验的推广,探索在不同利用方式或不同演替阶段草地土壤团聚体稳定性变化和植物群落的交互作用,并阐明在此期间土壤有机碳的变化特征及机制,同时注重强化不同尺度、不同时间序列的系统性研究。

2)不同土层土壤有机碳的稳定机制不同,探讨整个土壤剖面土壤有机碳稳定性变化及其关键影

响因子是了解草地利用过程中土壤碳库演替的关键。因此,应该加强植物根系构型、分布以及碳输入方式对土壤团聚体稳定过程影响的研究,并耦合土壤中物理、化学和微生物指标,探讨草地利用过程中土壤团聚体稳定性发生变化的调控机制。

3)草地土壤和耕地以及林地土壤有本质的区别,特别是高寒草甸地区,地下根生物量大,土壤由草根互相穿插交织而成,草根错综复杂,有机质含量较高。目前还没有形成一种有效的方法对草地土壤团聚体进行分离,大多借鉴其他类型土壤所采用的方法,因此,优化现有土壤团聚体分离方法尤为重要。

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] CANTÓN Y, SOLÉ-BENET A, ASENCIO C, et al. Aggregate Stability in Range Sandy Loam Soils Relationships with Runoff and Erosion [J]. *CATENA*, 2009, 77(3): 192-199.
- [3] WATERS A G, OADES J M. Organic Matter in Water-Stable Aggregates [M]// *Advances in Soil Organic Matter Research*. Amsterdam: Elsevier, 2003: 163-174.
- [4] ZAGAL E, CORDOVA C, SOHI S P, et al. Free and Intra-Aggregate Organic Matter as Indicators of Soil Quality Change in Volcanic Soils under Contrasting Crop Rotations [J]. *Soil Use and Management*, 2013, 29(4): 531-539.
- [5] 张维理, Kolbe H, 张认连. 土壤有机碳作用及转化机制研究进展 [J]. *中国农业科学*, 2020, 53(02): 317.
- [6] HASSINK J. The Capacity of Soils to Preserve Organic C and N by Their Association with Clay and Silt Particles [J]. *Plant and Soil*, 1997, 191(1): 77-87.
- [7] 李婷, 赵世伟, 李晓晓, 等. 宁南山区不同年限苜蓿地土壤有机质官能团特征 [J]. *应用生态学报*, 2012, 23(12): 3266-3272.
- [8] 朱梅珂, 孔范龙, 李悦, 等. 不同水盐条件下胶州芦苇盐沼土壤水稳性团聚体的室内模拟实验研究 [J]. *湿地科学*, 2019, 17(2): 228-236.
- [9] VOLTOLINI M, TAŞ N, WANG S, et al. Quantitative Characterization of Soil Micro-Aggregates: New Opportunities from Sub-Micron Resolution Synchrotron X-Ray Microtomography [J]. *Geoderma*, 2017, 305: 382-393.
- [10] OZTAS T, FAYETORBAY F. Effect of Freezing and Thawing Processes on Soil Aggregate Stability [J]. *CATENA*, 2003, 52(1): 1-8.
- [11] LI X G, WANG Z F, MA Q F, et al. Crop Cultivation and Intensive Grazing Affect Organic C Pools and Aggregate Stability in Arid Grassland Soil [J]. *Soil and Tillage Research*, 2007, 95(1-2): 172-181.
- [12] 裴雯, 陈清, 张洛梓, 等. 放牧、水分和氮素对内蒙古草原土壤团聚体的影响 [J]. *草地学报*, 2021, 29(7): 1499-1506.
- [13] DORMAAR J F, WILLMS W D. Effect of Forty-Four Years of Grazing on Fescue Grassland Soils [J]. *Journal of Range Management*, 1998, 51(1): 122.

- [14] LIU D D, JU W L, JIN X L, et al. Associated Soil Aggregate Nutrients and Controlling Factors on Aggregate Stability in Semiarid Grassland under Different Grazing Prohibition Timeframes [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 777: 146104.
- [15] ROY S, BAGCHI S. Large Mammalian Herbivores and the Paradox of Soil Carbon in Grazing Ecosystems: Role of Microbial Decomposers and Their Enzymes [J]. *Ecosystems*, 2022, 25 (4): 976–988.
- [16] MILNE R M, HAYNES R J. Comparative Effects of Annual and Permanent Dairy Pastures on Soil Physical Properties in the Tsitsikamma Region of South Africa [J]. *Soil Use and Management*, 2004, 20(1): 81–88.
- [17] HAYNES R J, BEARE M H. Influence of Six Crop Species on Aggregate Stability and Some Labile Organic Matter Fractions [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1997, 29(11–12): 1647–1653.
- [18] BARDGETT R D, MAWDSLEY J L, EDWARDS S, et al. Plant Species and Nitrogen Effects on Soil Biological Properties of Temperate Upland Grasslands [J]. *Functional Ecology*, 1999, 13(5): 650–660.
- [19] RILLIG M C, WRIGHT S F, EVINER V T. The Role of Arbuscular Mycorrhizal Fungi and Glomalin in Soil Aggregation: Comparing Effects of Five Plant Species [J]. *Plant and Soil*, 2002, 238(2): 325–333.
- [20] WIESMEIER M, STEFFENS M, MUELLER C W, et al. Aggregate Stability and Physical Protection of Soil Organic Carbon in Semi-Arid Steppe Soils [J]. *European Journal of Soil Science*, 2012, 63(1): 22–31.
- [21] TISDALL J M. Possible Role of Soil Microorganisms in Aggregation in Soils [J]. *Plant and Soil*, 1994, 159(1): 115–121.
- [22] BUYER J S, VINYARD B, MAUL J, et al. Combined Extraction Method for Metabolomic and PLFA Analysis of Soil [J]. *Applied Soil Ecology*, 2019, 135: 129–136.
- [23] TENG Z D, ZHU Y Y, LI M, et al. Microbial Community Composition and Activity Controls Phosphorus Transformation in Rhizosphere Soils of the Yeyahu Wetland in Beijing, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 628: 1266–1277.
- [24] GARCIA-FRANCO N, WALTER R, WIESMEIER M, et al. Biotic and Abiotic Controls on Carbon Storage in Aggregates in Calcareous Alpine and Prealpine Grassland Soils [J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2021, 57(2): 203–218.
- [25] YAO Y, XU Y Q, WANG G, et al. Salt-Alkaline Stress Induced Rhizosphere Effects and Photosynthetic Physiological Response of Two Ecotypes of *Leymus Chinensis* in Songnen Meadow Steppe [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2020, 53: 2584–2594.
- [26] HE M, ZHOU G Y, YUAN T F, et al. Grazing Intensity Significantly Changes the C:N:P Stoichiometry in Grassland Ecosystems [J]. *Global Ecology and Biogeography*, 2020, 29(2): 355–369.
- [27] WANG W J, WANG Q, ZHOU W, et al. Glomalin Changes in Urban–Rural Gradients and Their Possible Associations with Forest Characteristics and Soil Properties in Harbin City, Northeastern China [J]. *Journal of Environmental Management*, 2018, 224: 225–234.
- [28] ZHU D Y, YANG Q, ZHAO Y S, et al. Afforestation Influences Soil Aggregate Stability by Regulating Aggregate Transformation in Karst Rocky Desertification Areas [J]. *Forests*, 2023, 14(7): 1356.
- [29] 王兴, 钟泽坤, 张欣怡, 等. 长期撂荒恢复土壤团聚体组成与有机碳分布关系 [J]. *环境科学*, 2020, 41(5): 2416–2424.
- [30] PAN J X, SHI J W, TIAN D S, et al. Depth-Dependent Drivers of Soil Aggregate Carbon across Tibetan Alpine Grasslands [J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 867: 161428.
- [31] BULL A T. Nature and Origin of Carbohydrates in Soils. M. V. Cheshire [J]. *The Quarterly Review of Biology*, 1981, 56(2): 224.
- [32] COTRUFO M F, WALLENSTEIN M D, BOOT C M, et al. The Microbial Efficiency–Matrix Stabilization (MEMS) Framework Integrates Plant Litter Decomposition with Soil Organic Matter Stabilization: Do Labile Plant Inputs Form Stable Soil Organic Matter? [J]. *Global Change Biology*, 2013, 19(4): 988–995.
- [33] SESSITSCH A, WEILHARTER A, GERZABEK M H, et al. Microbial Population Structures in Soil Particle Size Fractions of a Long-Term Fertilizer Field Experiment [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2001, 67(9): 4215–4224.
- [34] DORODNIKOV M, BLAGODATSKAYA E, BLAGODATSKY S, et al. Stimulation of R- Vs. K-Selected Microorganisms by Elevated Atmospheric CO₂ Depends on Soil Aggregate Size [J]. *FEMS Microbiology Ecology*, 2009, 69(1): 43–52.
- [35] 窦森, 李凯, 关松. 土壤团聚体中有机质研究进展 [J]. *土壤学报*, 2011, 48(2): 412–418.
- [36] EDEN A. Coprophagy in the Rabbit [J]. *Nature*, 1940, 145 (3662): 36–37.