

植物根系对土壤团聚体形成作用机制研究回顾

刘均阳,周正朝,苏雪萌

(陕西师范大学地理科学与旅游学院,西安 710000)

摘要: 土壤团聚体是土壤结构的基本单元,土壤水力侵蚀的微观描述即为土壤团聚体的破裂过程。研究表明:植物根系可以改变土壤的力学以及水文特征,促进土壤团聚体的形成和稳定。因此,对近 20 年国内外的相关研究成果进行较为系统的回顾,从根系对土壤团聚体的物理、生物、电化作用 3 个研究视角,分析了植物根系对土壤团聚体形成的作用机制,提出了现有研究中存在的问题及研究趋势,这对深入认识植物根系对土壤团聚体的影响及其作用机制、发展根—土相互作用的土壤侵蚀过程模型具有重要的意义。

关键词: 植物根系; 土壤团聚体; 土壤电化性质; 土壤微生物; 土壤动物

中图分类号: S157 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-2242(2020)03-0267-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2020.03.040

Review of the Mechanism of Root System on the Formation of Soil Aggregates

LIU Junyang, ZHOU Zhengchao, SU Xuemeng

(School of Geography Science and Tourism, Shaanxi Normal University, Xi'an 710000)

Abstract: Soil aggregate is the basic unit of soil structure and the microscopic description of soil hydraulic erosion is the fracture process of soil aggregate. According to the research data, plant roots have the ability to change the mechanical and hydrological characteristics of soil and promote the formation and stability of soil aggregates. Therefore, this paper makes a systematic review of the relevant research results at domestic and abroad in the past 20 years, analyzed the mechanism of plant roots on the formation of soil aggregates, and put forward the existing problems and research trends from the perspectives of the physical, biological and electrochemical studies on soil aggregates by roots. It is of great significance to deeply understand the effect of plant roots on formation and stability of soil aggregates, and to develop the soil erosion process model of root-soil interaction.

Keywords: plant root system; soil aggregates; electrochemical properties of soil; soil microorganisms; soil animals

土壤团聚体是土壤结构的基本单元^[1],是土壤抵御外界作用力破碎的关键因素^[2],它的形成和稳定影响着土壤入渗、结皮、营养元素循环,以及坡面土壤的分离和输移等过程^[3-4]。作为土壤肥力和环境问题的关键因素,提高土壤稳定性可以有效提高土壤质量、防止土壤侵蚀以及其他由于土壤退化而引起的环境问题^[5]。因此,促进土壤团聚体的形成、增强团聚体稳定性,在土壤侵蚀防治与水土保持工作中具有重要作用。

植被作为陆地生态系统的重要组成部分,具有拦截降雨、增加入渗和地表糙度、提高土壤有机质含量而发挥阻控土壤侵蚀的作用^[6]。其中根系作为植被的重要组成部分,不仅是接收与输送养分、水分的基本通道,还可以通过交错、穿插、网络固结、根土黏结等作用,改善

土壤理化特性^[7],促进土壤团聚体的形成和稳定,在水土保持中发挥着不可替代的作用。

在近 20 年中,国内外学术界针对植物根系在土壤团聚体形成与稳定过程中的作用机制开展了大量研究,并取得了众多卓有成效的研究成果^[8-9]。根系主要通过网络串连作用、根土黏结作用及根系生物化学作用 3 种方式缠绕、固结土壤,因此,本文以植物根系对土壤团聚体形成和稳定过程中的物理、生物、电化作用 3 种作用方式为研究视角,对国内外的研究资料进行梳理,并提出目前研究中存在的主要问题及亟需开展的研究方向,期望能够推动植物根系在土壤侵蚀预防和治理过程中的相关研究及土壤侵蚀模型的建立,为解决土壤侵蚀与水土保持学科领域关键科学问题提供理论基础。

收稿日期:2019-10-20

资助项目:国家重点研发计划项目(2017YFC0504702);国家自然科学基金项目(41977061,41571260)

第一作者:刘均阳(1987—),女,在读博士研究生,主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail:236123705@qq.com

通信作者:周正朝(1980—),男,教授,博士生导师,主要从事环境变化与土壤侵蚀研究。E-mail:zhouzhengchao@126.com

1 植物根系对土壤团聚体形成和稳定的物理作用

植物根系的物理作用是土壤团聚体形成和稳定的重要因素之一。根系不仅可以通过压缩和缠绕等方式,使根际周围的细小颗粒不断形成较大颗粒,还可以通过对土壤水分的吸收,使根际周围土壤含水量降低,进而增加土壤的稳定性。因此,在土壤团聚体的形成和稳定过程中,植物根系的物理作用至关重要。

1.1 植物根系的物理缠绕作用

植物根系在土壤中穿插生长,与土壤团粒、水分等形成活性有机体,与施于土壤的力一起成为土壤的挤压力,并且根系愈多愈深愈长,吸附面积就愈大,吸附力愈大,因此根系形态特性与土壤团聚体的形成和稳定有密切关系。

Fernando 等^[10]通过测定不同植物根系对土壤团聚体的短期影响发现,不同根系对土壤结构发育的影响趋势是相同的,但形成的干/水稳性团聚体的数量和稳定性存在差异,其中细根($<1\text{ mm}$)和中间根($1\sim5\text{ mm}$)对土壤团聚体的形成有更强的促进作用,高根密度是影响土壤团聚的主要机制,且细根数量和构型也会决定根系对土壤团聚体的整体影响效果^[11]。随后,Hudek 等^[12]为量化根系对土壤团聚体稳定性的影响,测定分析了不同植物的根长密度与土壤团聚体的稳定性的关系,结果表明植物根系的生长明显促进了土壤团聚体的稳定性, 2 cm/cm^3 的根长密度是土壤团聚体稳定性增加的关键阈值,这与 Vergani 等^[13]的试验结果基本一致;Demenois 等^[14]测定并分析了根系特征(根质量密度、根长密度)与土壤团聚体稳定性的关系,结果表明含有较高根质量密度、根长密度值的土壤,其土壤团聚体稳定性也较高;Erktan 等^[15]通过对不同演替阶段的根系特性及土壤团聚体稳定性的测定发现,植物根系的比根长(总根长与根干重的比)随着植被演替而逐渐降低,与土壤团聚体稳定性呈负相关关系,而根重密度和根长度密度在整个演替梯度中并没有显著的变化;Xiao 等^[16]也通过对我国黄土高原次级演替阶段中根系和土壤团聚体性质的测定得到,根系比根长与土壤团聚体稳定性显著相关的结果;Li 等^[17]通过试验证明,根表面积密度也能很好地反映根系的物理缠绕作用,因此根系的表面积密度也是描述根系促进土壤团聚体形成和稳定性能力的重要指标;但在万海霞等^[18]的试验中根系参数(根长密度、比根长)与土壤团聚体稳定性指标并未表现出显著的相关性。

土壤团聚体形成和稳定的影响因素除了上述所提到的根系直径等以外,还包括根系数量、根面积比、

根锥度、底面直径、最大根深等^[19],各影响因素之间有一定的异同点,但何者影响作用最大及其所占比重还不明确;根系的整体形态结构对土壤团聚体的形成和稳定也应有一定的影响,但在水土保持领域中,关于根系整体构型方面的研究主要集中在土壤抗剪强度^[20]和边坡稳定^[21]方面,与土壤团聚体的关系还鲜有涉及;同种植物根系随土层深度的分布特征还会因生长地点、气候和土壤环境、植被状况(密度、树龄等)的不同而有很大的差异^[22]。因此,若要全面揭示植物根系如何通过物理缠绕作用增强土壤团聚体的稳定性,还需要更多的试验来加以佐证,不断推进植物根系与土壤之间作用机理的研究。

1.2 植物根系的根—土黏结作用

植物根系的根—土黏结作用在很大程度上取决于植物根系渗出液、分泌物、植物黏液、黏胶、溶解产物等根系分泌物^[23]。为验证根系分泌物对土壤团聚体的黏聚作用,宋日等^[24]通过对土壤水稳性团聚体数量和土壤有机质含量进行分析发现,根系所提供的分泌物,可作为土粒团聚的胶结剂,配合须根的穿插和缠结,提高水稳性大团聚体($>1\text{ mm}$)比例,增加水稳性团聚体稳定性。因此,根系对团聚体的稳定作用除了直接物理缠绕以外,根系分泌物也作为胶结物质,使微团聚体聚合为大团聚体。

在根系分泌物中,根源有机物普遍存在于团聚体形成的所有过程中(瞬时、暂时和持久),并且除了黏聚作用,根源有机物还在团聚体周围形成疏水涂层,降低土壤的润湿性,减缓润湿率,从而降低土壤崩解的敏感性^[25],因此根源有机物对土壤团聚体的形成和稳定至关重要。在根源有机物中,根源有机碳与土壤团聚体相互关系的研究最多。Wang 等^[26]曾在实行退耕还林之后的黄土高原进行采样和测定,结果表明植被恢复促进了土壤有机碳和总氮在各团聚体中的积累,并且大团聚体数量、平均重量直径(MWD)和平均几何直径(MGD)分别增加 78%,27%,9%。为揭示团聚体稳定性与土壤有机碳的关系,Fattet 等^[8]通过对土壤有机碳含量和土壤团聚体稳定性的测定和分析后发现,土壤有机碳可以增加土壤团聚体稳定性,且在免耕条件下,团聚体的形成和稳定过程与土壤中颗粒有机碳动力学直接相关^[9];王心怡等^[27]也通过测定不同林龄杉木人工林的土壤团聚体及其有机碳变化特征发现,不同林龄土壤团聚体稳定性及有机碳变化规律为成熟林 $>$ 幼龄林 $>$ 中龄林,土壤有机碳对团聚体稳定性具有积极作用,且具有明显的垂直变化特征;Guo 等^[28]也通过试验得到土壤有机碳含量与土壤水稳性团聚体含量显著相关的结论。

除了根源有机物以外,根系也会产生其他具有胶

结性能的胶结物质如木质素、蛋白质、糖类、脂肪和蜡等,它们可以通过阳离子桥、多糖物质—OH 基、H 质子的桥梁等作用把土粒团聚起来,使土壤具有更强的稳定性。但有关这些根系分泌的胶结物质在不同外界环境条件、自身遗传结构及组织材料作用下,对土壤团聚体形成和稳定的影响及量化等方面的研究相对缺失^[29]。因此,有关植物根系分泌的“胶结物质”的定性和定量研究还需要进一步的深入。

2 植物根系对土壤团聚体形成和稳定的生物作用

根系还可以间接地通过对土壤微生物或土壤中小型动物的影响来提高土壤团聚体的数量和稳定性^[30-31]。特别是在物理机制被证明无效的条件下,生物体自身能够在矿物基质中诱导出一个新的微观结构,这种结构通过对水的吸附会产生相应的吸力,进而促进生物细胞周围黏土颗粒的重组和重新定向,最终实现团聚体结构稳定性的强化。

2.1 菌根对土壤团聚体的影响

近几年随着人们对土壤侵蚀问题的关注,越来越多的学者将菌根与团聚体的稳定性联系到一起^[32-33]。已有研究^[34]证明,根系作为宿主所形成的菌根,在不同尺度上对微团聚体和大团聚体的形成有着一定的促进作用。

目前,相关研究主要关注丛枝菌根和外生菌根对土壤团聚体的影响。其中,利用丛枝菌根研究不同空间尺度上菌根真菌对土壤结构形成与稳定的影响相对较多。已有研究^[35]表明,丛枝菌根可有效提高土壤团聚体稳定性,且土壤团聚体稳定性与丛枝菌根的菌丝总长度和菌丝密度值呈正相关^[36],主要作用于小尺寸的大团聚体($<0.5\text{ mm}$)^[37],但菌丝真菌必须与植物根系结合形成共同体,才能对土壤团聚体的形成和稳定起到积极作用^[38]。此外,不同种类丛枝菌根真菌因其形态结构、生理特性、代谢产物等区别对土壤结构的影响不尽相同,甚至同一种真菌在形成与稳定土壤团聚体的效率上也可能存在差异^[36];对外生菌根的研究表明,真菌通常通过形成根尖包膜来引起根系结构的广泛变化,间接地促进土壤团聚体的形成和稳定过程。在有关外生菌根与团聚体形成和稳定关系之间的定量研究^[38]中也得到了与丛枝菌根类似的结果,即外生菌根可有效增加土壤团聚体的稳定性,主要作用于直径较大的($>0.5\text{ mm}$)团聚体。

菌根真菌对土壤团聚体的影响机制可以总结为几个方面:菌丝可包围和缠绕土壤初级颗粒、有机质和小团聚体,促进大团聚体的形成,并且菌丝的形态特征也会对真菌稳定土壤团聚体的程度和规模产

生强烈的影响^[39];真菌菌丝具有一定的抗拉强度,由菌丝体充当“柔性绳袋”可以调动一定的可塑性来承受孔隙水压力,以此来预防脆性断裂^[40];菌根真菌的生理代谢活动可分泌粘性物质^[41-43],使周围粒径较小的微团聚体聚集成较大的团聚体;菌根真菌可以为土壤“胶结剂”(土壤有机碳 SOC 等)提供物理保护,防止其被土壤生物分解^[44];菌根真菌可以影响根际周围的水分关系^[45],增加水稳团聚体数量;感染菌根真菌会导致根形态的变化,进而影响土壤团聚体的稳定过程^[38]。

菌根真菌在影响土壤团聚体形成和稳定过程中具有物种特异性,即不同菌种对土壤团聚体的作用不同^[46],并且同一种真菌在形成土壤团聚体和稳定土壤团聚体的效率上可能存在差异^[36]。因此,如果充分发挥菌根真菌的固土作用,就需选择特定地点的、兼容的植物和菌根真菌,这样才能保证其成功和效率的前景最大化。

2.2 植物根系—土壤微生物对土壤团聚体的影响

土壤团聚体的稳定性部分取决于土壤微生物多样性和组成^[47]。这些微生物本身或生理活动的分泌物对土壤有胶结作用,可将根系附近较小的团聚体黏聚成较大的团聚体,且在微生物的作用下,有机质分解产生的稳定高分子聚合有机酸可防止团聚体消散,从而提高了团聚体的稳定性^[48]。

植物根系通过影响微生物活性及多样性来间接影响土壤团聚体的形成和稳定。Liu 等^[49]调查了刺槐造林后细根参数和根际微生物群落组成的变化,研究发现细根的存在可以有效地影响根际土壤系统中根际微生物群落的组成。这主要是因为根系的脱落物或植物根系向土壤中分泌的某些无机和有机物质,是微生物重要的物质和能量来源,并且植物相应的次生代谢产物,以及根系分泌物中的低分子量化合物、聚合糖、根缘细胞和死根冠细胞,也会影响地下微生物的多样性和根际微生物群落的构成^[50-51]。植物除了为微生物提供养分外,其所选择的根际生物群落种类也有所不同,在 Germida 等^[52]的一项研究中就揭示了植物与微生物这种相互作用的关系:古老的小麦品种被系统发育多样的根瘤菌定植,而现代的作物品种的根际则以快速生长的变形菌为主,这是因为根系分泌物具有高度的植物物种特异性,但有关这种特异性的研究还很有限,需要进一步扩展加深。

目前,也有一些试验证明植物产生和分泌的某些次生代谢产物对微生物具有毒性,可能会抑制根际微生物群落的形成与发展。例如,人参根系分泌的酚酸类物质对纤维素分解菌等功能微生物类群有较强烈的抑制作用,其数量和活性随根系分泌物积累而

显著降低^[53]。但根际微生物的结构不只受根系的影响,还受植物生长阶段的气候和季节、食草动物、农药处理、土壤的类型和结构等诸多因素的影响,因此需要综合考虑生境条件对微生物活性的影响。

2.3 植物根系—土壤中小型动物对土壤团聚体的影响

土壤动物生物量相对较少,但其在促进土壤养分循环方面起着重要作用^[23],也会通过粉碎根系和菌丝对提高土壤团聚体数量以及土壤结构稳定性有积极作用。例如,土壤中的中小型动物可以在身体内部将摄取的土壤与腐化的有机物质混合,然后再以颗粒或其他形式将其排出体外,从而稳定团聚体结构^[54]。还有一些动物如蚯蚓通过增加土壤根际碳含量^[55]或通过身体的蠕动和建造的穴居影响土壤的渗透性,进而促进土壤团聚体的形成和稳定^[56]。

植物根系在这些过程中的主要作用是为中小型动物的生存提供必需的食物。例如,具有尖细型口器的线虫可以侵入植物组织,以植物根细胞内含物和汁液为生;而某些蚂蚁则是以蚜虫咬食树叶时植物所产生的糖汁为生等^[23]。同时也有一些研究表明,某些土壤动物的活动可能导致土壤退化,如蚯蚓对土壤的摄食会破坏微团聚体中一些现有的结合剂,致使黏土重新排列,从而导致土壤侵蚀和结皮。但从长远来看,在有充分植物根系供给的情况下,土壤动物的活动对土壤团聚体的稳定性是具有积极作用的。

目前,植物根系对土壤中小型动物影响的研究还停留在较为基础的层面上,仍有很多影响需要进一步的明确,例如植物分泌物对土壤中小型动物的特异选择、植物根系生长对土壤中小型动物生境的影响等。

3 植物根系对土壤团聚体形成和稳定的电化作用

3.1 土壤电化性质对土壤团聚体的影响

土壤是一个带负电体,在土壤颗粒表面吸附等量的异号电荷,使其在宏观上表现出电中性。但是在 $1\sim 1\,000\text{ nm}$ 的介观尺度上,土壤颗粒表面电荷在土壤颗粒附近形成了巨大的静电场,不仅影响土壤颗粒间的相互作用,也影响土壤颗粒表面带电离子的行为,因此对土壤颗粒的凝絮和分散具有一定的作用。

基于土壤胶体的研究^[57]发现,相对于雨滴击溅等外部作用力而言,长程范德华力、静电斥力和水合斥力等土壤内部作用力在控制土壤团聚体形成和稳定的过程中更为重要,而土壤电化性质(包括表面电荷数量、比表面积、表面电荷密度、表面电场强度、表面电位^[58])是影响土壤颗粒间静电斥力与水合斥力大小的关键因素。有研究^[59]表明,土壤电荷在土壤颗粒表面附近形成的电场高达 10^8 V/m ,在降雨过

程中直接控制着土壤颗粒相互作用、团聚体形成与破碎以及土壤颗粒的迁移,因而被认为是降雨过程中导致土壤团聚体破裂进而引发土壤侵蚀的根本原因^[60-61]。此外,土壤颗粒表面电位还影响着团聚体的破碎机制,即在高表面电位下,团聚体以“爆炸”的方式破碎,而在低表面电位下,团聚体以分散或膨胀的方式破碎^[62],且 200 mV 的表面电位是土壤颗粒迁移的临界电位^[60]。因此,土壤电化性质与土壤团聚体稳定性有着直接的相关关系,但由于土壤电化性质测定方法的局限性及不确定性,有关土壤表面电荷密度、土壤电位等数据资料相对不足^[63]。

3.2 植物根系对土壤电化性质的影响

植被的生长可改变土壤电化性质^[58,64]。陈晶晶^[64]通过对植物篱标准径流小区长达3年的监测发现,植物生长对土壤颗粒表面电化性质影响显著(随着植物生长土壤颗粒比表面积增加、表面电场强度和表面电荷密度降低等),并随着定植年限的增加呈递变趋势。马仁甜等^[58]对子午岭林区退耕演替过程中土壤电化性质测定也得到类似结果,即随着植被的演替,该地区土壤表面电荷数量、比表面积、表面电荷密度均随植被的恢复而增加。

根系作为植物与土壤关联的主要器官,在植物改变土壤电化性质的过程中扮演了重要的角色,但对于二者相关性的研究还处于比较初级的阶段。植物根系影响土壤电化性质的方式有:首先,植物根系通过分泌有机质改变土壤颗粒表面电荷数量和密度。土壤有机质大多是通过植物根系分泌而来,这些有机质一般带负电荷,可以通过压缩土壤颗粒间的双电层结构来降低土壤颗粒表面的净负电荷密度,进而改变土壤的胶体状况^[65]。同时土壤有机质中的有机胶体作为土壤固相中阳离子交换量最大的部分,会随有机质含量的增加而增加,进而影响土壤表面电荷数量^[66]。其次,植物根系通过固结或富集作用影响土壤颗粒的比表面积及表面电荷密度。植物根系以不同形态分布于土壤中,通过缠绕、交错、翻转等对土壤中黏粒和粉粒等土壤单粒起到富集或固结作用,特别是在稳定边坡的过程中,根系增加土壤的比表面积及表面电荷数量的效果更优。此外,根系利用自身的吸附交换作用,可改变土壤中阳离子数量,影响土壤胶体表面电荷性质。在植物的生长代谢过程中,根系通过呼吸、吸收等生理作用与土壤中 K^+ 、 Cl^- 、 NO_3^- 等离子进行吸附或交换,选择性地吸收或转移离子,以此来影响土壤颗粒表面的电荷性质^[67]。

在过去的几十年里,有关植物根系与土壤电化方面的研究都是把土壤表面电荷性质和土壤酸碱度分开进行的。近些年,由于人们对土壤侵蚀问题的持

续关注,以及研究方法和研究目的的转变和发展,有学者将土壤电化学性质与土壤团聚体稳定性以及土壤侵蚀结合到一起进行研究,并取得了一些成果,但有关植物根系生长对土壤电化学性质的影响机制、影响周期及二者之间的定量响应关系研究相对欠缺,需要进一步深入。

4 根系强化土壤抗侵蚀性的团聚体效应

土壤团聚体的数量和稳定性是减少土壤侵蚀的关键^[68]。土壤团聚体的粒径分布及稳定性影响土壤孔隙分布,以及水分在土表及土体内的运移方式与途径^[69],进而影响土壤的入渗、结皮等过程;此外,土壤团聚体结构间胶结力较大^[70],可以增加土壤颗粒间的亲和力,以抵抗较强的雨滴击溅和径流冲刷。研究^[71]表明,土壤团聚体(特别是水稳性团聚体)的数量和稳定性是评估土壤抗蚀性和抗冲性十分重要的因子,与土壤侵蚀量之间呈显著负相关。Yan 等^[72]在 WEEP 模型的基础上,利用团聚体水稳性代替可蚀性因子建立了新的细沟和细沟间土壤侵蚀预测模型,取得了良好效果。

根系通过交错、缠绕或分泌胶结物质等方式提高土壤团聚体数量^[12],无论是死根或者活根,都会增加团聚体的稳定性,进而减少土壤侵蚀量。在此过程中,根系的物理缠绕作用是最主要的,占根系总效应 77.7%~82.0%^[17]。Vannoppen 等^[11]也通过水槽冲刷试验证明,植物根系可以有效地提高土壤的抗侵蚀能力,且须根相比(粗)主根($D>5\text{ mm}$)的作用更为有效,原因是根系直径对土壤的团聚作用影响显著,特别是在水蚀过程中,浅而密的细根网是最有效的^[19]。在此过程中,粗根主要起到的是锚固作用,增加植物对外部环境的阻抗性,浅层粗根系的方向也可能对土壤侵蚀控制产生影响。此外,植物根系在土壤中的分布情况也在很大程度上影响着土壤抗侵蚀的能力。例如 Fan 等^[20]对 5 种不同植物进行的原状抗剪试验表明,带有明显斜根和垂直根的植物其所增加的抗剪强度比以横向根为主的植物更多,并且 R 型根系在防止剪切破碎作用中最为有效,V 型根系对土壤抗剪切力的增强作用比 R 型根系少一点,H 型根系作用最弱;而 Li 等^[21]通过比较不同根系结构对边坡土壤稳定性的影响表明,R 型根系(带有较多的斜向根)植物会引起更为严重的水土流失,H 型根系(分布范围最大)在水流剪切力较小的情况下也能够减小土壤侵蚀,并能对边坡起到一个周期性的影响。

可见,植物根系在减少土壤侵蚀方面扮演着重要的角色。但由于根系影响土壤抗侵蚀性的团聚体效应存在明显的个体类型差异,加之大多数土壤受气候、管理效应等多重影响,在可蚀性方面表现出的时

间维度变化使得要探明根系—土壤团聚体效应在提高土壤抗侵蚀性中的作用还需要更为深入的研究。

5 展望

在人类漫长的预防与治理土壤侵蚀的历史中,植物技术作为一种有效的生物措施已被广泛的用于世界各地^[73],并且经过长期的试验与实践证实,植物根系在改善土壤侵蚀方面发挥着无可取代的作用。目前,就植物根系对土壤团聚体的作用及其机制已开展了大量研究,并取得了许多卓有成效的成果,为控制土壤侵蚀提供了宝贵的参考资料。但鉴于植物根系的隐蔽性和试验取样的复杂性^[74],自然状态下植物根系对土壤团聚体形成与稳定的作用依旧难以准确的量化测定,总体上存在研究视角单一,系统性不强的问题。因此,未来相关研究应侧重于:

(1)采样方法的科学优化。由于植物根系在土壤中的分布较为复杂且取样困难,自然状态下根系特征对土壤团聚体的影响尚不明确,应尝试采用更为科学的采样方法,优化二者间的响应关系。

(2)植物根系—土壤团聚体作用机制的新型假设。试验证明,土壤电场是团聚体破碎的关键因素,但有关植物根系与土壤电场(或土壤电化学性质)之间关系的研究资料不足,未来应通过土壤电化方法获得植物根系与土壤团聚体的关系,深入理解二者间作用机制。

(3)试验结果间可比性的提升。由于植物类型、地理环境、评价指标的差异,限制了研究结果之间可比性。扩大研究的区域范围和植物种类等,获得更多的研究结果是推进科学进步的有效途径。

(4)试验数据可靠性的加强。由于室内试验与田间试验各有优缺点,根系对土壤团聚体的影响还需要更多的室内及田间试验相结合,彼此补充验证。

参考文献:

- [1] 赵京考,刘作新,韩永俊.土壤团聚体的形成与分散及其在农业生产上的应用[J].水土保持学报,2003,17(6): 163-166.
- [2] Bernard B, Roose E. Aggregate stability as an indicator of soil susceptibility to runoff and erosion: validation at several levels[J].Catena,2002,47(2):133-149.
- [3] Cédric L, Leguedois S, Bissonnais Y L. Aggregate breakdown dynamics under rainfall compared with aggregate stability measurements[J].European Journal of Soil Science,2010,56(2):225-238.
- [4] Le Bissonnais Y. Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodibility: I. Theory and methodology[J].European Journal of Soil Science,2010,48(1): 39-48.
- [5] Zhu G Y, Shangguan Z P, Deng L. Soil aggregate sta-

- bility and aggregate-associated carbon and nitrogen in natural restoration grassland and Chinese red pine plantation on the Loess Plateau[J]. *Catena*, 2017, 149: 253-260.
- [6] Zhang G H, Tang K M, Ren Z, et al. Impact of grass root mass density on soil detachment capacity by concentrated flow on steep slopes[J]. *Transactions of the Asabe*, 2013, 56(3): 927-934.
- [7] 杨帆,程金花,张洪江,等.坡面草本植物对土壤分离及侵蚀动力的影响研究[J]. *农业机械学报*, 2016, 47(5): 129-137.
- [8] Fattet M, Fu Y, Ghestem M, et al. Effects of vegetation type on soil resistance to erosion: Relationship between aggregate stability and shear strength[J]. *Catena*, 2011, 87: 60-69.
- [9] Gale W J, Cambardella C A, Bailey T B. Root-derived carbon and the formation and stabilization of aggregates[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2000, 64(1): 201-207.
- [10] Fernando D L, Gutiérrez C, González C, et al. Root-aggregation in a pumiceous sandy soil[J]. *Geoderma*, 2007, 142: 308-317.
- [11] Vannoppen W, Baets S D, Keeble J, et al. How do root and soil characteristics affect the erosion-reducing potential of plant species? [J]. *Ecological Engineering*, 2017, 109: 186-195.
- [12] Hudek C, Stanchi S, Amico D, et al. Quantifying the contribution of the root system of alpine vegetation in the soil aggregate stability of moraine[J]. *International Soil and Water Conservation Research*, 2017, 5(1): 36-42.
- [13] Vergani C, Graf F. Soil permeability, aggregate stability and root growth: A pot experiment from a soil bio-engineering perspective[J]. *Ecohydrology*, 2016, 9(5): 830-842.
- [14] Demeñois J, Carriconde F, Bonaventure P, et al. Impact of plant root functional traits and associated mycorrhizas on the aggregate stability of a tropical Ferral-sol[J]. *Geoderma*, 2018, 312: 6-16.
- [15] 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 and Soil*, 2016, 398(1/2): 121-137.
- [16] Xiao L, Yao K H, Li P, et al. Increased soil aggregate stability is strongly correlated with root and soil properties along a gradient of secondary succession on the Loess Plateau[J]. *Ecological Engineering*, 2020, 143: 1-9.
- [17] Li Q, Liu G B, Zhang Z, et al. Relative contribution of root physical enlacing and biochemical exudates to soil erosion resistance in the Loess soil[J]. *Catena*, 2017, 153: 61-65.
- [18] 万海霞,马璠,许浩,等.宁夏南部黄土丘陵区典型草本群落根系垂直分布特征与土壤团聚体的关系[J]. *水土保持研究*, 2019, 26(6): 80-86.
- [19] Bert R, Jean P, Frédéric D, et al. The role of fine and coarse roots in shallow slope stability and soil erosion control with a focus on root system architecture: A review[J]. *Trees*, 2007, 21: 385-402.
- [20] Fan C C, Chen Y W. The effect of root architecture on the shearing resistance of root-permeated soils[J]. *Ecological Engineering*, 2010, 36(6): 813-826.
- [21] Li Y P, Wang Y Q, Ma C, et al. Influence of the spatial layout of plant roots on slope stability[J]. *Ecological Engineering*, 2016, 91: 477-486.
- [22] Roering J J, Schmidt K M, Stock J D, et al. Shallow landsliding, root reinforcement, and the spatial distribution of trees in the Oregon Coast Range[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2003, 40(2): 237-253.
- [23] 黄昌勇,徐建明.土壤学[M].3版.北京:中国农业出版社, 2010: 44-57.
- [24] 宋日,刘利,马丽艳,等.作物根系分泌物对土壤团聚体大小及其稳定性的影响[J]. *南京农业大学学报*, 2009, 32(3): 93-97.
- [25] Bengough A G. Water dynamics of the root zone: Rhizosphere biophysics and its control on soil hydrology[J]. *Vadose Zone Journal*, 2012, 11(2): 1-6.
- [26] Wang Y X, Ran L S, Fang N F, et al. Aggregate stability and associated organic carbon and nitrogen as affected by soil erosion and vegetation rehabilitation on the Loess Plateau[J]. *Catena*, 2018, 167: 257-265.
- [27] 王心怡,周聪,冯文瀚,等.不同林龄杉木人工林土壤团聚体及其有机碳变化特征[J]. *水土保持学报*, 2019, 33(5): 126-131.
- [28] Guo Y F, Fan R Q, Zhang X P, et al. Tillage-induced effects on SOC through changes in aggregate stability and soil pore structure[J]. *Science of The Total Environment*, 2019, 703: 1-9.
- [29] 程洪,颜传盛,李建庆,等.草本植物根系网的固土机制模式与力学试验研究[J]. *水土保持研究*, 2006, 13(1): 62-65.
- [30] Schutter M E, Dick R P. Microbial community profiles and activities among aggregates of winter fallow and cover cropped soil[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2002, 66(1): 142-153.
- [31] Berg G, Smalla K. Plant species and soil type cooperatively shape the structure and function of microbial communities in the rhizosphere[J]. *FEMS Microbiology Ecology*, 2009, 68(1): 1-13.
- [32] Wu Q S, Srivastava A K, Cao M Q, et al. Mycorrhizal function on soil aggregate stability in root zone and root-free hyphae zone of trifoliate orange[J]. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 2015, 61(6): 813-825.
- [33] Zhang H Q, Liu Z K, Chen H, et al. Symbiosis of ar-

- buscular mycorrhizal fungi and *Robinia pseudoacacia* L. improves root tensile strength and soil aggregate stability[J].Plos One,2016,11(4):1-12.
- [34] Graf F, Frei M. Soil aggregate stability related to soil density, root length, and mycorrhiza using site-specific *Alnus incana* and *Melanogaster variegatus*[J].Ecological Engineering,2013,57:314-323.
- [35] Zhang Z F, Azim M, Zhang J C, et al. Effects of arbuscular mycorrhizal fungi on inoculated seedling growth and rhizop-here soil aggregates [J]. Soil and Tillage Research,2019,194:1-7
- [36] Bedini S, Pellegrino E, Avio L, et al. Changes in soil aggregation and glomalin-related soil protein content as affected by the arbuscular mycorrhizal fungal species *Glomus mosseae* and *Glomus intraradices*[J].Soil Biology and Biochemistry,2009,41(7):1491-1496.
- [37] Ambriz E A, Báez-Pérez J M, Sánchez Y, et al. Fraxinus-Glomus-Pisolithus symbiosis: Plant growth and soil aggregation effects[J].Pedobiologia,2010,53(6):369-373.
- [38] Bearden B N, Petersen L. Influence of arbuscular mycorrhizal fungi on soil structure and aggregate stability of a vertisol[J].Plant and Soil,2000,218(1/2):173-183.
- [39] Rillig M C, Mummey D L. Mycorrhizas and soil structure[J].New Phytologist,2006,171(1):41-53.
- [40] Li Z J, Shukla V, Wenger K, et al. Estimation of hyphal tensile strength in production-scale aspergillus oryzae fungal fermentations[J].Biotechnology and Bioengineering,2002,77(6):601-613.
- [41] Caesar-Tonthat T C, Shelver W L, Thorn R G, et al. Generation of antibodies for soil aggregating basidiomycete detection as an early indicator of trends in soil quality[J].Applied Soil Ecology,2001,18(2):99-116.
- [42] Tagu D, Bellis R D, Balestrini R M, et al. Immuno-localization of hydrophobin HYDPt-1 from the ectomycorrhizal basidiomycete *Pisolithus tinctorius* during colonization of *Eucalyptus globulus* roots[J].New Phytologist,2001,149:127-135.
- [43] Mankel A, Krause K, Kothe E. Identification of hydrophobin gene that is developmentally regulated in the ectomycorrhizal fungus *Tricholoma terreum*[J].Applied Environmental Microbiology,2002,68:1408-1413.
- [44] 肖玖军,邢丹,毛明明,等.AM真菌对桑树根围土壤团聚体的影响机制[J].土壤学报,2020,57(3):773-782.
- [45] Augé R M. Arbuscular mycorrhizae and soil/plant water relations[J].Canadian Journal of Soil Science,2004,84:373-381.
- [46] Graf F, Frei M, Schwarz M, et al. Use and importance of mycorrhiza in site-specific restoration[J].Soil bioengineering: Ecological Restoration with Native Plant and Seed Material,2006:155-160.
- [47] Zhao F Z, Fan X D, Ren C J, et al. Changes of the organic carbon content and stability of soil aggregates affected by soil bacterial community after afforestation [J].Catena,2018,171:622-631.
- [48] 湛芸,祝亚军,何丙辉.三峡库区狗牙根根系固坡抗蚀效应研究[J].水土保持学报,2010,24(6):44-47.
- [49] Liu J L, Ngoc H, Shen Z, et al. Response of the rhizosphere microbial community to fine root and soil parameters following *Robinia pseudoacacia* L. afforestation[J].Applied Soil Ecology,2018,132:11-19.
- [50] Narula N, Kothe E, Behl R K. Role of root exudates in plant-microbe interactions[J].Journal of Applied Botany and Food Quality,2008,82(2):122-130.
- [51] 何欢,王占武,胡栋,等.根系分泌物与根际微生物互作研究进展[J].河北农业科学,2011,15(3):69-73.
- [52] Germida J J, Siciliano S D. Taxonomic diversity of bacteria associated with the roots of modern, recent and ancient wheat cultivars [J]. Biology and Fertility of Soils,2001,33(5):410-415.
- [53] 肖春萍,杨利民,马锋敏.栽培年限对人参根际土壤微生物活性及微生物量的影响[J].中国中药杂志,2014,39(24):4740-4747.
- [54] 吴军虎,邵凡凡,刘侠.蚯蚓粪对土壤团聚体组成和入渗过程水分运移的影响[J].水土保持学报,2019,33(3):81-87.
- [55] Zhu X Y, Hu Y C, Wang W. Earthworms promote the accumulation of maize root-derived carbon in a black soil of Northeast China, especially in soil from long-term no-till[J].Geoderma,2019,340:124-132.
- [56] Coq S, Bernard G, Oliver R, et al. Earthworm activity affects soil aggregation and organic matter dynamics according to the quality and localization of crop residues: An experimental study (Madagascar)[J].Soil Biology and Biochemistry,2007,39(8):2119-2128.
- [57] Hu F, Xu C, Li H, et al. Particles interaction forces and their effects on soil aggregates breakdown[J].Soil and Tillage Research,2015,147:1-9.
- [58] 马任甜,胡斐南,刘婧芳,等.黄土高原植被恢复过程中土壤表面电化性质的演变特征[J].土壤学报,2020,57(2):392-402.
- [59] Li S, Li H, Xu C Y, et al. Particle interaction forces induce soil particle transport during rainfall[J].Soil Science Society of America Journal,2013,77(5):1563-1571.
- [60] 李嵩.离子界面反应对土壤侵蚀强度的影响[D].重庆:西南大学,2015.
- [61] 黄学茹,李航,李嵩,等.土壤电场与有机大分子的耦合对土壤团聚体稳定性的影响[J].土壤学报,2013,50(4):734-742.

- [7] Fan J L, Oestergaard K T, Guyot A, et al. Spatial variability of throughfall and stemflow in an exotic pine plantation of subtropical coastal Australia [J]. *Hydrological Processes*, 2015, 29(5): 793-804.
- [8] Keim R F, Skaugset A E, Weiler M. Temporal persistence of spatial patterns in throughfall [J]. *Journal of Hydrology*, 2005, 314(1/4): 263-274.
- [9] 时忠杰, 王彦辉, 徐丽宏, 等. 六盘山华山松 (*Pinus armandii*) 林降雨再分配及其空间变异特征 [J]. *生态学报*, 2009, 29(1): 76-85.
- [10] Allen S T, Brooks J R, Keim R F, et al. The role of pre-event canopy storage in throughfall and stemflow by using isotopic tracers [J]. *Ecohydrology*, 2014, 7(2): 858-868.
- [11] Xu X, Guan H D, Deng Z J. Isotopic composition of throughfall in pine plantation and native eucalyptus forest in South Australia [J]. *Journal of Hydrology*, 2014, 514: 150-157.
- [12] 陶泽, 司炳成, 靳静静. 矮化枣树冠层改变降雨截留历时过程同位素和化学特征 [J]. *水土保持学报*, 2017, 31(5): 189-195.
- [13] 徐振, 安树青, 王中生, 等. 川滇高山栎灌丛冠层穿透水及其稳定同位素组成变化特征 [J]. *资源科学*, 2007, 29(5): 129-136.
- [14] Allen S T, Keim R F, McDonnell J J. Spatial patterns of throughfall isotopic composition at the event and seasonal timescales [J]. *Journal of Hydrology*, 2015, 522: 58-66.
- [15] 赵亮生, 闫文德, 项文化, 等. 樟树人工林林冠截留效应分析 [J]. *中南林业科技大学学报*, 2013, 33(5): 91-95.
- [16] Pekin B, Macfarlane C. Measurement of crown cover and leaf area index using digital cover photography and its application to remote sensing [J]. *Remote Sensing*, 2009, 1: 1298-1320.
- [17] 及莹, 蔡体久. 小兴安岭原始红松林降雨截留观测及分段模拟 [J]. *北京林业大学学报*, 2015, 37(10): 41-49.
- [18] 方江平, 项文化, 刘韶辉. 西藏原始林芝云杉林雨季林冠降水分配特征 [J]. *生态学报*, 2010, 30(14): 3679-3687.
- [19] 周彬, 韩海荣, 康峰峰, 等. 太岳山不同郁闭度油松人工林降水分配特征 [J]. *生态学报*, 2013, 33(5): 1645-1653.
- [20] 韩诚, 张金池, 庄义琳, 等. 苏南丘陵区麻栎林冠层水文效应及其影响因素 [J]. *南京林业大学学报 (自然科学版)*, 2014, 38(2): 93-98.
- [21] 江森华, 吕茂奎, 胥超, 等. 亚热带米槠次生林和杉木人工林林冠截留特征比较 [J]. *水土保持学报*, 2017, 31(1): 116-121.
- [22] 宝虎, 刘殿国, 赵鹏武, 等. 大兴安岭南段白桦林降雨再分配特征研究 [J]. *干旱区资源与环境*, 2016, 30(2): 82-87.
- [23] 张宁, 郭宾良, 张国强, 等. 沿坝地区天然次生林对降雨再分配的影响 [J]. *水土保持研究*, 2015, 22(6): 99-102.
- [24] 万艳芳, 刘贤德, 王顺利, 等. 祁连山青海云杉林冠降雨再分配特征及影响因素 [J]. *水土保持学报*, 2016, 30(5): 224-229.
- [25] Sun X C, Onda Y, Hirata A, et al. Effect of canopy openness and meteorological factors on spatial variability of throughfall isotopic composition in a Japanese cypress plantation [J]. *Hydrological Processes*, 2018, 32(8): 1038-1049.
- (上接第 273 页)
- [62] Xu C Y, Yu Z H, Li H. The coupling effects of electric field and clay mineralogy on clay aggregate stability [J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2015, 15(5): 1159-1168.
- [63] Li H, Qing C L, Wei S Q, et al. An approach to the method for determination of surface potential on solid/liquid interface: Theory [J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2004, 275(1): 172-176.
- [64] 陈晶晶. 基于表面电场驱动土壤侵蚀理论下的植物篱措施水力侵蚀控制过程研究 [D]. 重庆: 西南大学, 2014.
- [65] 张磊, 徐则民, 侯汝儿, 等. 植被发育玄武岩斜坡土体基质吸力及其影响因素 [J]. *山地学报*, 2016, 34(5): 513-519.
- [66] 李学恒. 土壤化学 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2001: 106-126.
- [67] 张继澍. 植物生理学 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2006: 88-89.
- [68] Gyssels G, Poesen J, Bochet E, et al. Impact of plant roots on the resistance of soils to erosion by water: A review [J]. *Progress in Physical Geography*, 2005, 29: 189-217.
- [69] Duiker S W, Flanagan D C, Lal R. Erodibility and infiltration characteristics of five major soils of south-west Spain [J]. *Catena*, 2001, 45: 103-121.
- [70] 陈宝强, 张丹, 熊东红, 等. 元谋干热河谷坡面表层土壤力学特性对其抗冲性的影响 [J]. *农业工程学报*, 2012, 28(5): 108-113.
- [71] 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.
- [72] Yan F L, Shi Z H, Li Z X, et al. Estimating interrill soil erosion from aggregate stability of Ultisols in subtropical China [J]. *Soil and Tillage Research*, 2008, 100: 34-41.
- [73] Stokes A, Salin F, Kokutse A D, et al. Mechanical resistance of different tree species to rockfall in the French Alps [J]. *Plant and Soil*, 2005, 278(1/2): 107-117.
- [74] De B S, Poesen J, Gyssels G, et al. Effects of grass roots on the erodibility of topsoils during concentrated flow [J]. *Geo-morphology*, 2006, 76(1/2): 54-67.