

田路路, 雋英华, 孙文涛. 冻融作用对土壤微生物的影响综述[J]. 江苏农业科学, 2016, 44(10): 438–443.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2016.10.127

冻融作用对土壤微生物的影响综述

田路路¹, 雋英华², 孙文涛²

(1. 沈阳农业大学土地与环境学院, 辽宁沈阳 110866; 2. 辽宁省农业科学院植物营养与环境资源研究所, 辽宁沈阳 110161)

摘要:土壤微生物种类繁多, 分布广泛, 对土壤及周围生物的影响很大。冻融作用在全球范围内普遍存在, 通过改变土壤的理化性质, 影响土壤微生物的生命活动。本文重点综述了微生物在细胞、基因蛋白质及生理代谢水平上对冻融作用的响应行为, 简要阐明因冻融改变的土壤环境因子对微生物的影响, 进一步分析冻融对微生物群落结构和生物量的改变机制, 并对将来可能的研究方向进行展望。

关键词:土壤; 冻融作用; 微生物; 生化特性; 微生物量; 群落结构; 细胞; 生理代谢水平; 全球气候变暖

中图分类号: S154.34 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2016)10-0438-05

土壤是一个固、液、气三相组成的高度异质环境, 发育着丰富的微生物群落。微生物在土壤中分布广、数量大, 土壤中栖息着微生物约 100 亿个/g^[1]。土壤微生物参与矿化作用, 分解有机质, 释放 C、N、P、S 等矿质元素, 具有解毒土壤、净化环境的作用^[1], 影响土壤腐殖质及土壤团聚体的形成及其稳定性^[2-4], 可进行生物固氮、增加土壤氮含量^[1,5-6], 影响植物生长及病虫害的防治, 在土壤生态系统及农业生产中都具有重要的地位^[1]。冻融作用是在全球中高纬度和高海拔地区普遍存在的一种自然现象, 是一种由于昼夜性、季节性或气候性的热量变化而在土壤表土及以下一定深度发生的反复冻结-融化现象^[7]。全球受冻融作用影响的土地面积占陆地总面积的 70%, 北半球陆地表面超过一半地区会经历土壤冻融作用^[8], 而我国北方地区具有土壤季节性冻融的重要气候特征。冻融作用可以明显改变土壤的物理、化学及生物学性质, 如破坏土壤结构、影响团聚体稳定性、释放一部分可供微生物直接利用的营养元素、加强有机质的矿化作用、增强酶的活化效应等^[9-11]。冻融对土壤理化性质及生物学性质的改变, 不仅影响微生物自身的生存代谢活动, 而且还影响其参与土壤中各种生理生化活动。

近年来, 全球气候日益变暖, 高纬度地区土壤积雪和冻融环境都可能发生变化^[12-13]。Mellender 等对瑞典欧洲赤松林的研究发现, 气候变暖会使地表覆盖积雪减少, 地表 10 cm 处平均温度上升, 春季变暖时间提前, 冻融循环次数增多^[14]; Henry 对加拿大 31 个气象站 40 年的气候和土壤温度数据进行分析也发现了类似现象^[15]。这种全球变暖的现象直接改变了冻融的时间、强度及其频率, 相应的冻融对土壤微生物的影响也将发生一定的改变。冻融作用不仅可以直接从内部影响土壤微生物, 而且可以通过改变土壤的理化性质和生物学

性质来从外部影响微生物。本研究主要综述冻融作用对土壤微生物自身内部特性的影响, 冻融导致的土壤环境因子变化对土壤微生物的影响, 以及冻融作用对微生物群落结构和生物量的影响, 最后简要展望该领域研究在将来可能的发展方向。

1 冻融对土壤微生物自身内部特性的影响

1.1 冻融对微生物细胞的影响

首先, 在冻融开始时, 土壤温度下降至冻结, 会将其中的微生物细胞冻伤, 冻结产生的胞内冰晶体的增长造成细胞膜和细胞器的机械性损伤, 而引起细胞的形态发生变化^[16], 这与一些学者的研究结论^[17-18]相似。其次, 冻结使未冻水中的溶质浓缩, 改变土水势, 细胞内外渗透压失去平衡, 使细胞失水, 细胞膜流动性降低, 细胞壁受损^[16,19]。朱琳等对乳酸菌细胞膜冻干损失的研究结果表明, 冻结形成的冰晶会直接破坏膜结构, 造成机械损伤, 一般冰晶越大, 细胞膜越易损伤破裂, 造成细胞死亡^[20]。另一方面, 当细胞内水分逸出, 缩水达到最小临界值时, 细胞膜的渗透率产生不可逆的增加, 导致原先不能透过膜的溶液也变成可渗透的, 进而致使细胞死亡。此外, 融化复水时可能发生的重结晶作用, 也足以破坏细胞质膜或具膜的细胞器官^[16]。

一般细胞内部高于 -10 ℃ 不会冻结, 但当细胞含水量小于 10% 时, 即使温度降低到 -40 ℃, 细胞质也不会冻结^[19]。这一现象说明细胞含水量对冻融作用中微生物细胞的冻结过程具有一定的影响, 对于研究如何冷冻保存生物但又不破坏其细胞完整度及活性身份具有借鉴意义。

1.2 冻融对微生物生理生物学的影响

1.2.1 冻融对微生物生理学的影响 冻融作用对微生物生理学方面的影响主要体现在 2 个方面, 一是生理代谢活动, 二是能量供应^[21]。一般认为, 多年冻土层中幸存下来的微生物大部分时间都处于休眠状态, 仅在局部区域或时段具有一定的代谢活动能力^[22]。Brinton 等利用天冬氨酸外消旋作用的研究结果表明, 微生物在 -10 ℃ 下可生长繁殖 4 万多年, 即微生物在冻结环境中仍可以从周围的冻土中得到可利用的养分来维持生存^[23]。Gilichinsky 等研究发现, 虽然西伯利亚多

收稿日期: 2015-08-01

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金(编号: 41301253); 辽宁省农业领域青年科技创新人才培养计划(编号: 2014018)。

作者简介: 田路路(1990—), 女, 河南鲁山人, 硕士研究生, 从事冻融对土壤氮矿化影响方面的研究。E-mail: 760848132@qq.com。

通信作者: 孙文涛。E-mail: wentaow@163.com。

年冻土微生物在 $-12 \sim -5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的冻结过程中仍可以合成脂类,但在 $-1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时其合成速度骤然降低,即受极端环境限制,微生物代谢活动微弱,仅能维持基本的生命活动^[24]。总的来说,冻结时期能够存活下来的微生物的代谢水平分为 3 种情况:(1)代谢足以维持细胞生长;(2)代谢仅能维持细胞存活,不能支持细胞生长;(3)细胞进入休眠期,仅能在条件好转时进行代谢,以修复冻结期积累下来的受损物质^[25]。

融化后的土壤微生物天冬氨酸利用率提高,丙氨酸利用率下降,而乳酸摄取能力基本不变^[20,24]。在相同的培养条件下,经过冻融作用后苏醒的微生物与无经历冻融的微生物相比,前者的细胞增殖和菌落形成速率明显高于后者,虽然前者菌落总数较少,但其生存能力却强于后者或普通微生物^[14,26]。

冻结会破坏细胞的膜结构,包括细胞中的具膜细胞器,如线粒体、叶绿体等。这就会直接导致依赖于膜或具膜细胞器而进行的生理代谢活动遭受影响或破坏,扰乱细胞内能量的产生、释放和利用^[16]。众所周知,能量的供应水平与微生物的代谢水平密切相关,能量供应充足时,微生物代谢生长正常;能量供应缺乏时,微生物的代谢活动微弱,甚至会进入休眠状态或死亡^[27]。

1.2.2 冻融对微生物生物学的影响 冻融对微生物生物学方面的影响主要体现在 DNA 和蛋白质合成表达方面。Price 等研究发现,基因组为 3 Mbp、蛋白质平均分子量为 36 ku 的微生物细胞,在冻结条件下,仅有不到 1% 的基因被复制,合成不到 100 个蛋白质分子^[27]。可见,冻结显著削弱了细胞中 DNA 和蛋白质的合成活动。在低温胁迫条件下,某些细菌可合成 DnaK 和 GroEL 等冷休克蛋白,二者可与 mRNA 结合并促进翻译,从而保证自身生物活动的进行^[28]。Brinton 等对西伯利亚冻土微生物进行研究后发现,微生物可以修复蛋白质,稳定其氨基酸构象^[23]。

总的来说,冻融作用会抑制微生物细胞中 DNA 和蛋白质的合成表达,但为了克服这一现象所带来的危害,某些细胞会启动其他的基因表达方式,促进基因的合成表达,或发挥其蛋白质的稳定修复作用,以克服生存困境。这体现了生物学水平上的进化性,对于生物困境进化的研究具有重要意义。

1.3 冻融速率对微生物的影响

关于冻融速率对微生物的影响作用,不同学者观点不同。孙辉等在对冻融试验的设计方法进行研究时发现,许多室内模拟试验利用冰箱控制冻结过程,使土壤温度快速降低到较低温度,这对绝大多数土壤微生物来说是致命的,因为在自然条件下,冻融过程中土壤冻结温度是逐步下降的,在土地表面积雪和植被等的覆盖下,土壤温度下降极其平稳和缓慢,使得微生物有一段适应低温的缓冲时间^[7]。但也有学者认为,土壤的快速冻结和融化对微生物的影响较小,而缓慢冻结和融化则对微生物细胞损伤较大^[16]。冻结时细胞外部形成冰晶颗粒,冰晶颗粒越大,对细胞器破坏力越强,如果冻结速率很慢,微生物细胞会充分进行脱水,以致细胞内外渗透压失去平衡,破坏细胞壁结构,最后导致细胞破碎死亡^[16]。当冻融速率大于 $1\text{ }000\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 时,细胞内水分可在跨膜运输前迅速冻结,避免细胞内外渗透压失去平衡所造成的危害^[16];在融化过程中,如果融化速率足够高,胞内重结晶现象就可以避免,

有利于微生物细胞的存活^[29]。

1.4 冻融强度和频数对微生物的影响

冻融频数对微生物影响明显。1 次冻融循环能杀死 50% 的土壤微生物^[30],并明显减少约 33% 的土壤 DNA 含量^[25]。多次冻融循环显著降低土壤中可培养微生物数量,减少可培养微生物的多样性^[31]。但是,这些经过多次冻融后存活下来的微生物,具有极强的抗冻融能力和生存能力^[21]。范志平等对河岸缓冲带土壤的研究结果表明,冻融频数对土壤微生物氮含量有极显著影响($P < 0.01$),冻融温差对土壤微生物氮含量有显著影响^[32]。而徐俊俊等关于冻融交替对高寒草地土壤影响的研究结果表明,冻融温度未显著改变土壤微生物氮含量,影响土壤微生物氮含量的主要是冻融频数^[33]。熊雪晶对高寒森林土壤微生物的研究结果说明,较温和的冻融会降低土壤真菌数量,而对放线菌数量影响不大;强烈的冻融循环会增加土壤真菌数量,却显著降低土壤放线菌数量^[34]。

2 土壤环境因子对微生物的间接影响

微生物在土壤中的生存需要适宜的温度、水分、通气条件及营养物质,以此来维持其正常的生命代谢活动。土壤冻融通过影响土壤温度、水分、通气性以及水分物质迁移间接影响微生物的生物量和活性^[35],另外,土壤中死亡微生物也会对残余幸存微生物产生影响^[36]。

2.1 土壤温度和水分

土壤中大部分营养元素转化过程,尤其是氮素转化都是微生物参与的生物化学过程^[37]。冻融作用通过改变土壤环境因子进而影响土壤微生物的数量及活性,其中温度和水分是影响土壤氮素转化的最主要因素^[38-40]。温度直接影响氮素生物化学过程,间接影响微生物的耗氧量和土壤好气环境;水分的可利用性直接影响微生物活性,同时通过控制土壤中氧气的扩散间接影响氮素矿化和好氧微生物活性^[41]。

2.2 通气性

微生物中既有好氧微生物,也有厌氧微生物,所以它们降解转化土壤有机物质的过程可能是好氧的,也可能是厌氧的,这时土壤通气性就显得十分重要^[42]。王恩姮等对东北典型黑土的研究结果表明,季节性冻融后,黑土总孔隙度和毛管孔隙度均有不同程度的降低^[3]。而邓西民等对壤质黏土犁底层原状土的研究发现,冻融后土壤孔隙度增加 $6.1\% \sim 16.3\%$ ^[43]。刘虹等研究认为,在冻融过程中,土壤孔隙度呈现先减小后增大的变化趋势^[44]。可见,冻融作用对土壤孔隙度的影响受多因素决定,其结果各不相同。

2.3 水分物质的迁移

微生物不仅自身的生命活动离不开水,而且在与外界环境交流反应时更离不开水,微生物只能生活在水溶性的环境中^[42]。其中,土壤有效性水分是维持微生物活性的重要资源,它影响着土壤微生物群落生理结构和功能^[45]。

土壤冻融过程中常伴随水分的迁移和再分布,温度是导致土壤水分迁移的驱动力^[46]。在土壤自上而下的冻结过程中,水分自下而上迁移^[46]。土壤的冻结过程会固定大量的水分和底物,降低可利用氧气的含量,形成相对厌氧的环境^[47],促进微生物的异养生长^[48-49]。在冻结土壤融化时,由于上层冰雪融化和下层冰冻阻碍水的排放等原因,造成融化后土壤

含水量明显提高^[50]。此时,土壤孔隙度和氧气减少,有利于微生物获得充足的水分和营养物质,也有利于微生物进行反硝化作用,促进微生物的异养生长^[51]。另一方面,冻融作用使土壤水分含量显著提高,养分更容易溶出,或通过各种途径包裹在矿物颗粒或吸附于土壤胶体的表面随水分迁移而流失^[36]。

2.4 死亡微生物

冻融作用通过低温或干湿交替杀死土壤中的一部分微生物,死亡微生物会释放出营养物质,而残余生存下来的微生物将死亡微生物作为基质而使自身活性在某种程度上增强^[36],特别在土壤融化时,受冻结作用死亡的微生物细胞及破碎的土壤团粒结构、植物残体,会释放出碳、氮等物质,为残余微生物提供大量的营养物质^[52-56]。同时,温度的升高,可利用水分和通气程度的增加也为微生物修复受损细胞及大量生长提供了必要条件^[57]。Mecleod 等研究发现,土壤冻结能够破坏微生物细胞膜,使胞内物质被释放到土壤中^[58]。Goodroad 等研究发现,土壤残余微生物有选择性地利用死亡微生物产生基质,这些微生物在冬季仍然很活跃^[59-60]。

3 冻融对微生物群落结构的影响

土壤微生物群落以细菌数量最多,占土壤微生物数量的70%~90%,放线菌、真菌次之。微生物在土壤中的分布状况与生物化学活性,一方面反映了土壤因子对微生物的影响和作用;同时显著影响土壤肥力、植物生长发育与土壤改良状况,揭示着土壤发育的演变规律^[61]。

冻融作用可以强烈影响微生物活性和微生物群落组成^[52,62-65]。以细菌种群为例,刘利对川西亚高山/高山森林群落土壤的研究结果表明,在季节性土壤冻结过程中,细菌类群数量明显降低,细菌类群的丰富度及多样性也显著降低,温度的急剧下降改变了土壤细菌群落的结构^[66]。主要原因是:一方面不耐低温的细菌类群可能在冻结过程中死亡,另一方面耐受低温型的细菌类群得以存活,并保持一定的活性^[59-60,67]。而在整个微生物群落中,冻融循环能够改变微生物的代谢群落,夏季以细菌为主,冬季则转以真菌为主^[56,68]。王怀玉等对亚高山冷杉林土壤微生物的研究发现,经过1个季节性冻融后,土壤细菌和放线菌数量显著减少,真菌数量明显增加,同时,土壤真菌/细菌比值有所增加^[69]。这是因为真菌较细菌对低温的抗性更强^[70],一方面真菌可以依靠其发达的菌丝系统利用更广范围的资源以调节胞内环境,从而更能适应土壤水热状态的改变,另一方面冻融循环可能通过其机械作用促使菌丝体分化,增加真菌数量,相关研究还需要进一步深入^[71]。但也有一些研究持不同观点,例如,Staricka 等对极地苔原微生物的研究发现,在多次单日尺度(白天2℃,9h;晚上-4℃,15h,18个循环)冻融循环后,微生物C/N的值降低,表明微生物群落优势种从真菌逐渐转向细菌^[72];Schimel 等根据 TGGE 分析方法,得出冻融循环对土壤微生物群落结构没有影响^[73];Beare 也认为,冻融变化有时并不会引起土壤细菌和真菌丰富度的变化^[74]。

4 冻融对微生物量的影响

土壤微生物量是活体微生物的生物量,是活体微生物数

量的直接体现^[75]。在整个冻融循环期间,微生物量的变化可能经过以下阶段:(1)冻融初期,低温直接杀死相当部分土壤微生物,导致土壤微生物量下降^[76-77],Mikan 等研究发现,当土壤温度降到-10℃以下时,微生物量迅速下降^[78]。但微生物量不会随着冻结持续下降,因为存活下来的微生物特别是低温嗜冷微生物^[79],从土壤团粒、植物根系和凋落物以及死亡微生物释放的养分中得到有效基质,以维持其生存^[10]。(2)土壤融化初期,微生物量急剧增加,这是由于土壤融化时释放出冻结期积累养分,增加土壤中的有效基质,从而激发微生物的快速生长繁殖^[75-76]。(3)但是,这种微生物的增加不会持久。一方面,随着融化过程中的淋溶流失和复苏植物的吸收利用,土壤中的有效基质被快速消耗,限制微生物量的持续增加^[80-81]。另一方面,自然环境中雪被融化导致土壤含水量剧烈变化,微生物细胞内水分和土壤自有水之间的水势失衡可能导致微生物细胞死亡,又降低土壤中的微生物量^[76]。

Schimel 等研究认为,冻融交替使微生物死亡,降低土壤中微生物数量^[73]。Walker 等认为,在最初几个冻融循环中,土壤微生物中氮含量显著下降,随后有所升高^[31]。杨思忠等认为,变温幅度稍大的冻融循环可显著降低微生物数量,但冻融循环过程释放的养分也利于微生物生长,使微生物数量增加^[21]。而 Grogan 等研究发现,冻融对土壤微生物量没有显著影响或影响不大^[55-56],这与 Koponen 等的研究结果^[79]一致。可见,冻融循环对土壤微生物量影响的研究结果还具有很多不确定性,亟待深入研究。

5 展望

微生物是土壤生态系统中极其重要和最为活跃的部分,是地上和地下生态系统联系的纽带和桥梁,在土壤养分循环、系统稳定性、抗干扰能力以及可持续利用中占主导地位,控制着土壤生态系统功能的关键过程^[82-83]。由于其生长繁殖迅速,环境适应性强,对水热条件和气候等自然条件的变化反应敏感,所以研究冻融作用对微生物的影响可以反映出多方面的问题。从微观方向来看,微生物在分子细胞、基因蛋白质等水平上对低温冻结或冻融作用的反映机理,一方面代表了生命对于环境的极限适应能力,有助于深入探讨生物在逆境中的进化问题,另一方面也从内部解释了微生物在冻融条件下的死亡、休眠以及生理生化功能的改变。从宏观方向来看,目前全球变暖已经成为不争的事实^[84],由此引起的季节性冻融变化必然直接或间接作用于生态系统地下/地上部分,而这些直接或间接的作用大多数都是通过微生物的活动进行的。尽管已有许多研究结果证明了冻融对土壤微生物的影响^[52,62-65],但也有研究持不同的观点^[56,65,85]。这可能是由于试验控制技术很难模拟自然环境,也可能由于地域环境条件不同,还有可能是微生物自身类群不同而导致的差异,其具体原因及反应机理都有待进一步研究。

参考文献:

- [1] 吕贻忠,李保国. 土壤学[M]. 北京:中国农业出版社,2006: 139-143.
- [2] 汪太明,王业耀,香 宝,等. 交替冻融对东北典型土壤腐殖质的影响[J]. 生态环境学报,2010,19(12):2870-2874.

- [3] 王恩焯,赵雨森,陈祥伟. 典型黑土耕作区土壤结构对季节性冻融的响应[J]. 应用生态学报,2010,21(7):1744-1750.
- [4] Martin J P, Martin W P, Page J B. Soil aggregation[J]. Advance in Agronomy, 1995, 7: 1-37.
- [5] Summerfield R J, Rieley J O. Substrate freezing and thawing as a factor in the mineral nutrient status of mire ecosystems[J]. Plant and Soil, 1973, 38(3): 557-566.
- [6] Hentschel K, Borken W, Matzner E. Repeated freeze-thaw events affect leaching losses of nitrogen and dissolved organic matter in a frost soil[J]. Plant Nutr Soil Sci, 2008, 171(5): 699-706.
- [7] 孙辉,秦纪洪,吴杨. 土壤冻融交替生态效应研究进展[J]. 土壤, 2008, 40(4): 505-509.
- [8] Zhang T, Barry R G, Knowles K, et al. Distribution of seasonally and perennially frozen ground in Northern Hemisphere[C]//Proceedings of the Eighth International Conference on Permafrost, 2003: 284-1289.
- [9] 朴春和,刘广深,洪业汤. 干湿交替和冻融作用对土壤肥力和生态环境的影响[J]. 生态学杂志, 1995, 14(6): 29-34.
- [10] Herrmann A, Witter E. Source of C and N contributing to the flush in mineralization upon freeze-thaw cycles in soils[J]. Soil Biology & Bio-chemistry, 2002, 34: 1495-1504.
- [11] 王风,韩晓增,李良皓,等. 冻融过程对黑土水稳性团聚体含量影响[J]. 冰川冻土, 2009, 31(5): 915-919.
- [12] Mellander P E, Laudon H, Bishop K. Modelling variability of snow depths and soil temperatures in Scots pine stands[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2009, 133(1/2/3/4): 109-118.
- [13] Hobbie S E, Chapin F. Winter regulation of tundra litter carbon and nitrogen dynamics[J]. Biogeochemistry, 1996, 35(2): 327-338.
- [14] Mellander P E, Lfvenius M O, Laudon H. Climate change impact on snow and soil temperature in boreal Scots pine stands[J]. Climatic Change, 2007, 85(1/2): 179-193.
- [15] Henry H L. Climate change and soil freezing dynamics: historical trends and projected changes[J]. Climatic Change, 2008, 87(3/4): 421-434.
- [16] Mazur P. Cryobiology: the freezing of biological systems[J]. Science, 1970, 168(3934): 939-949.
- [17] Methé B A, Nelson K E, Deming J W, et al. The psychrophilic lifestyle as revealed by the genome sequence of *Cohnella psychrerythraea* ³⁴H through genomic and proteomic analyses[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2005, 102(31): 10913-10918.
- [18] Rivkina E M, Friedmann E I, McKay C P, et al. Metabolic activity of permafrost bacteria below the freezing point[J]. Applied and Environmental Microbiology, 2000, 66(8): 3230-3233.
- [19] Finegold L. Molecular and biophysical aspects of adaptation of life to temperatures below the freezing point[J]. Advances in Space Research, 1996, 18(12): 87-95.
- [20] 朱琳,刘宁,张英华,等. 乳酸菌细胞膜的冻干损伤[J]. 食品科学, 2006, 27(2): 266-269.
- [21] 杨思忠,金会军. 冻融作用对冻土区微生物生理和生态的影响[J]. 生态学报, 2008, 28(10): 5065-5074.
- [22] Horneck G, Baumstark-Khan C. Astrobiology: the quest for the conditions of life[M]. Berlin: Springer, 2001: 125-142.
- [23] Brinton K F, Tsapin A I, Gilichinsky D A, et al. Aspartic acid racemization and age depth relationships for organic carbon in Siberian permafrost[J]. Astrobiology, 2002, 2(1): 77-82.
- [24] Gilichinsky D, Wagener S. Microbial life in permafrost: a historical review[J]. Permafrost and Periglacial Processes, 1995, 6(3): 243-250.
- [25] Pesaro M, Widmer F, Nicollier G, et al. Effects of freeze-thaw stress during soil storage on microbial communities and methadation degradation[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2003, 35(8): 1049-1061.
- [26] Gilichinsky D A, Soina V S, Petrova M A. Cryoprotective properties of water in the earth cryolithosphere and its role in exobiology[J]. Origins of Life and Evolution of the Biosphere; the Journal of the International Society for the Study of the Origin of Life, 1993, 23(1): 65-75.
- [27] Price P B, Sowers T. Temperature dependence of metabolic rates for microbial growth, maintenance, and survival[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2004, 101(13): 4631-4636.
- [28] Morita R Y. Bioavailability of energy and its relationship to growth and starvation survival in nature[J]. Canadian Journal of Microbiology, 1988, 34(4): 436-441.
- [29] Dumont F, Marechal P A, Gervais P. Influence of cooling rate on *Saccharomyces cerevisiae* destruction during freezing: unexpected viability at ultra-rapid cooling rates[J]. Cryobiology, 2003, 46(1): 33-42.
- [30] Deluca T H, Keeney D R, McCarty G W. Effect of freeze-thaw events on mineralization of soil nitrogen[J]. Biology and Fertility of Soils, 1992, 14(2): 116-120.
- [31] Walker V K, Palmer G R, Voordouw G. Freeze-thaw tolerance and clues to the winter survival of a soil community[J]. Applied and Environmental Microbiology, 2006, 72(3): 1784-1792.
- [32] 范志平,李胜男,李法云,等. 冻融交替对河岸缓冲带土壤无机氮和土壤微生物量氮的影响[J]. 气象与环境学报, 2013, 29(4): 106-111.
- [33] 徐俊俊,吴彦,张新全,等. 冻融交替对高寒草甸土壤微生物量氮和有机氮组分的影响[J]. 应用与环境生物学报, 2011, 17(1): 57-62.
- [34] 熊雪晶. 季节性冻融对亚高山冷杉林土壤微生物活性的影响[D]. 雅安: 四川农业大学, 2009.
- [35] Jarvis S C, Stockdal E A, Shepherd M A, et al. Nitrogen mineralization in temperate agricultural soils: processes and measurement[J]. Advances in Agronomy, 1996, 57(8): 187-235.
- [36] 王洋,刘景双,王国平,等. 冻融作用与土壤理化效应的关系研究[J]. 地理与地理信息科学, 2007, 23(2): 91-96.
- [37] 廖晓勇,张杨珠,刘学军,等. 农业生态系统中土壤氮素行为的研究现状与展望[J]. 西南农业学报, 2001, 1(3): 94-98.
- [38] 巨晓棠,李生秀. 土壤氮素矿化的温度水分效应[J]. 植物营养与肥料学报, 1998, 4(1): 37-42.
- [39] 周才平,欧阳华. 温度和湿度对长白山两种林型下土壤氮矿化的影响[J]. 应用生态学报, 2001, 12(4): 505-508.
- [40] Puri G, Ashman M R. Relationship between soil microbial biomass and gross N mineralization[J]. Soil Biology and Biochemistry, 1998, 30(2): 251-256.
- [41] 章燕平. 环境因素对菜地土壤氮素转化及其生物学特性的影响[D]. 杭州: 浙江大学, 2010: 1-3.

- [42] 夏北成. 环境污染物生物降解[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002: 179 – 187.
- [43] 邓西民, 王 坚, 朱文珊, 等. 冻融作用对犁底层土壤的物理性状的影响[J]. 科学通报, 1998, 43(23): 2538 – 2541.
- [44] 刘 虹, 刘翠竹, 白俊峰. 冻融作用对土壤中阿特拉津微生物降解的影响研究[J]. 吉林化工学院学报, 2010, 27(4): 36 – 40.
- [45] Williams M A, Rice C W. Seven years of enhanced water availability influences the physiological, structural, and functional attributes of a soil microbial community[J]. Applied Soil Ecology, 2007, 35(3): 535 – 545.
- [46] 张立新, 韩文玉, 顾同欣. 冻融过程对景电灌区草窝滩盆地土壤水盐动态的影响[J]. 冰川冻土, 2003, 25(3): 297 – 302.
- [47] Clein J S, Schimel J P. Microbial activity of tundra and taiga soils at sub – zero temperatures[J]. Soil Biology and Biochemistry, 1995, 27(9): 1231 – 1234.
- [48] Brooks P D, Williams M W, Schmidt S K. Inorganic nitrogen and microbial biomass dynamics before and during spring snowmelt[J]. Biogeochemistry, 1998, 43(1): 1 – 15.
- [49] Brooks P D, Williams M W. Snowpack controls on nitrogen cycling and export in seasonally snow – covered catchments[J]. Hydrological Processes, 1999, 13(14/15): 2177 – 2190.
- [50] 龚家栋, 祁旭升, 谢忠奎, 等. 季节性冻融对土壤水分的作用及在农业生产中的意义[J]. 冰川冻土, 1997, 19(4): 328 – 333.
- [51] 宋长春, 王毅勇, 王跃思, 等. 季节性冻融期沼泽湿地 CO₂、CH₄ 和 N₂O 排放动态[J]. 环境科学, 2005, 26(4): 7 – 12.
- [52] Lipson D A, Schmidt S K. Seasonal changes in an alpine soil bacterial community in the Colorado Rocky mountains[J]. Applied and Environmental Microbiology, 2004, 70(5): 2867 – 2879.
- [53] Edwards A C, Cresser M S. Freezing and its effect on chemical and biological properties of soil[J]. Advances in Soil Science, 1992, 18: 59 – 79.
- [54] Lipson D A, Schadt C W, Schmidt S K. Changes in soil microbial community structure and function in an alpine dry meadow following spring snow melt[J]. Microbial Ecology, 2002, 43(3): 307 – 314.
- [55] Grogan P, Michelsen A, Ambus P, et al. Freeze – thaw regime effects on carbon and nitrogen dynamics in sub – arctic heath tundra mesocosms[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2004, 36(4): 641 – 654.
- [56] Sharma S, Szele Z, Schilling R, et al. Influence of freeze – thaw stress on the structure and function of microbial communities and denitrifying populations in soil[J]. Applied and Environmental Microbiology, 2006, 72(3): 2148 – 2154.
- [57] 王 奥. 季节性冻融对高山森林土壤微生物与生化特性的影响[D]. 雅安: 四川农业大学, 2012.
- [58] Meeleod R A, Calcott P H. Cold shock and freezing damage to microbes the survival of vegetative microbes[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2003: 81 – 109.
- [59] Goodroad L L, Keeney D R. Nitrous oxide emissions from soil during thawing[J]. Canadian Journal of Soil Science, 1984, 64(2): 187 – 194.
- [60] Burton D L, Beanchamp E G. Profile nitrous oxide and carbon dioxide concentration in a soil subject to freezing[J]. Soil Science Society of America Journal, 1994, 58(1): 115 – 122.
- [61] Somova L A, Pechurkin N S. Functional, regulatory and indicator features of microorganisms in man – made ecosystems[J]. Advances in Space Research, 2001, 27(9): 1563 – 1570.
- [62] Yang W Q, Feng R F, Zhang J, et al. Carbon stock and biochemical properties in the organic layer and mineral soil under three subalpine forests in Western China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2007, 27(10): 4157 – 4165.
- [63] Palacios – Vargas J G, Gomez – Anaya J G G. Lista actualizada de colémbolos micetófilos de México (Hexapoda: Entognatha) [J]. Folia Entomologica Mexicana, 1994, 92: 21 – 30.
- [64] 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 and Tillage Research, 2004, 79(1): 7 – 31.
- [65] Sjörsen H S, Michelsen A, Holmström M. Effects of freeze – thaw cycles on microarthropods and nutrient availability in a sub – Arctic soil[J]. Applied Soil Ecology, 2005, 28(1): 79 – 93.
- [66] 刘 利. 季节性冻融对亚高山/高山森林土壤微生物多样性的影响[D]. 雅安: 四川农业大学, 2010.
- [67] Ostroumov V E, Siegert C. Exobiological aspects of mass transfer in microzones of permafrost deposits[J]. Advance in Space Research, 1996, 18(12): 79 – 86.
- [68] Henry H A. Soil freeze – thaw cycle experiments: trends, methodological weaknesses and suggested improvements[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2007, 39(5): 977 – 986.
- [69] 王怀玉, 杨万勤. 积极我想冻融对亚高山冷杉林土壤微生物数量的影响[J]. 林业科学, 2012, 48(5): 88 – 94.
- [70] Lipson D A, Schmidt S K, Monson R K. Links between microbial population dynamics and nitrogen availability in an alpine ecosystem[J]. Ecology, 1999, 80(5): 1623 – 1631.
- [71] Buckeridge K M, Grogan P. Deepened snow alters soil microbial nutrient limitations in Arctic birch hummock tundra[J]. Applied Soil Ecology, 2008, 39(2): 210 – 222.
- [72] Staricka J A, Benoit G R. Freeze – drying effects on wet and dry aggregate stability[J]. Soil Science Society of America Journal, 1995, 59(1): 218 – 223.
- [73] Schimel J P, Clein J S. Microbial response to freeze – thaw cycles in tundra and taiga soils[J]. Soil Biology and Biochemistry, 1996, 28(8): 1061 – 1066.
- [74] Beare M H. Fungal and bacterial pathways of organic matter decomposition and nitrogen mineralization in arable soils[J]. Journal of the Optical society of America, 1965, 55(5): 574 – 575.
- [75] Margesin R, Jud M, Tschérko D, et al. Microbial communities and activities in alpine and subalpine soils[J]. Fems Microbiology Ecology, 2008, 67(2): 208 – 218.
- [76] Jefferies R L, Walker N A, Edwards K A. Is the decline of soil microbial biomass in late winter coupled to changes in the physical state of cold soils? [J]. Soil Biology & Biochemistry, 2010, 42(2): 129 – 135.
- [77] 杨玉莲, 吴福忠, 何振华, 等. 雪被去除对川西高山冷杉林冬季土壤微生物生物量碳氮和可培养微生物数量的影响[J]. 应用生态学报, 2012, 23(7): 1809 – 1816.
- [78] Mikan C J, Schimel J P, Doyle A P. Temperature controls of microbial respiration in arctic tundra soil above and below freezing[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2002, 34(11): 1785 – 1795.
- [79] Koponen H T, Jaakkola T, Keinänen – Toivola M M, et al. Microbial communities, biomass, and activities in soils as affected by freeze

赵 彤,韩霖昌,张 扬,等. 4年作物种植对不同比例砒砂岩与沙复配土水稳性团聚体的影响[J]. 江苏农业科学,2016,44(10):443-447.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2016.10.128

4年作物种植对不同比例砒砂岩与沙复配土水稳性团聚体的影响

赵 彤,韩霖昌,张 扬,王欢元,姬 先

(陕西省土地工程建设集团/国土资源部退化及未利用土地整治工程重点实验室,陕西西安 710075)

摘要:为深入研究毛乌素沙地砒砂岩和沙复配成土过程,采用砒砂岩与沙 1:1、1:2、1:5 等 3 种不同体积比混合所得复配土种植作物,分析 4 年作物种植中不同复配土水稳性团聚体的变化规律。结果表明:作物种植前,3 种复配土中 >0.25 mm 与 $0.25 \sim 2.00$ mm 水稳性团聚体质量百分比大小顺序为 $1:1 > 1:2 > 1:5$,整体含量较低, >0.25 mm 水稳性团聚体百分比维持在 18.38%~28.22% 之间,每种复配土中 $0.25 \sim 0.50$ 、 $0.50 \sim 2.00$ 、 $2.00 \sim 5.00$ 、 >5.00 mm 等 4 种粒级水稳性团聚体比例相近;种植 4 年后,1:2 复配土的 >0.25 mm 水稳性团聚体百分比明显增加并超过其余 2 种,达到 32.34%,1:1、1:2、1:5 等 3 种复配土 >0.25 mm 团聚体的主要成分分别为 $0.25 \sim 0.50$ mm (53.54%)、 $0.25 \sim 0.50$ mm (59.43%)、 $0.05 \sim 2.00$ mm (52.16%),3 种复配土的 $0.25 \sim 2.00$ mm 团聚体均明显增加,且以 1:2 的增幅最高;1:2 复配土有机质与 $0.25 \sim 0.50$ 、 $0.25 \sim 2.00$ mm 水稳性团聚体呈极显著相关关系。表明作物种植 4 年后提高了 3 种复配土中 $0.25 \sim 2.00$ mm 团聚体的比例,并且 1:2 复配土最有利于该粒级团聚体的形成。

关键词:砒砂岩;沙;复配土;水稳性团聚体;胶结作用;作物种植

中图分类号: S156 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2016)10-0443-05

土壤团聚体是土壤的基本结构单元,在土壤中具有保证土壤水肥气热、影响土壤酶的种类和活性、维持土壤疏松熟化层 3 大功能。不同粒级的微团聚体在营养元素的保持、供应及转化能力等方面发挥着不同的作用^[1]。土壤团聚体结构是土壤肥力的物质基础和作物高产所必需的土壤条件之一。土壤团聚体的形成是一个非常复杂的过程,包括一系列的物理、化学及生物作用,主要依赖于土壤中各胶结物质的数量和性质^[2]。成土母质是土壤形成的物质基础,对土壤无机胶体的组成和作用有很大影响,而有机胶结物质的形成与微生物数量、活性及其代谢产物和植物根系分泌物、有机质的输入等有关^[3]。团聚体的稳定性是指团聚体抵抗外力作用或外部环境变化而保持其原有形态的能力,包括水稳性、力学稳定

性、化学稳定性、酸碱稳定性和生物稳定性等^[4],其中水稳性团聚体是评价土地质量的重要指标。土壤团聚体的数量和稳定性也是衡量土壤可蚀性的重要指标^[5-6]。

我国毛乌素沙地沙漠化严重,自然植被稀疏,极富砒砂岩与沙 2 种岩石矿物,前者干燥时胶结松散、遇水迅速膨胀,后者通体无结构、保水持水性差^[7],根据两者特点,按照一定比例混合后可以种植植物^[8-10],深入研究两者混合后的成土过程意义重大。本研究以砒砂岩与沙混合复配土为对象,研究了不同混合比例复配土随作物种植年限的增加,其水稳性团聚体的变化规律,试图揭示该复配土水稳性团聚体的形成过程,为其成土机理提供一定的理论基础,同时研究结果对进一步利用团聚体功能定向培育土壤肥力具有十分重要的意义,也能够为毛乌素沙地大规模推广砒砂岩与沙复配成土造田工程提供理论和技术指导。

1 材料与方法

1.1 材料

试验所用砒砂岩和沙均采自陕西省榆林市榆阳区小纪汗乡。砒砂岩和沙各自的黏粒、粉粒、沙粒含量分别为 7.06%、

thaw cycles[J]. Soil Biology & Biochemistry,2006,38(7):1861-1871.

[80]谭 波,吴福忠,杨万勤,等. 川西亚高山/高山森林土壤氧化还原酶活性及其对季节性冻融的响应[J]. 生态学报,2012,32(21):6670-6678.

[81]殷 睿,蒋先敏,徐振峰,等. 季节性雪被对川西亚高山岷江冷杉林冬季土壤氮矿化和淋溶的影响[J]. 水土保持学报,2013,27(5):138-143.

[82]Nielsen M N, Winding A, Binnerup S, et al. Microorganisms as indicators of soil health[R]. National Environmental Research Institute,

2002:15-16.

[83]冯瑞芳. 高寒森林土壤有机层酶活性动态及其对模拟气候变化的响应[D]. 雅安:四川农业大学,2007.

[84] Climate change 2007, the Scientific basis [M]. Cambridge: Cambridge University Press,2007.

[85]Lipson D A, Schmidt S K, Monson R K. Carbon availability and temperature control the post-snowmelt decline in alpine soil microbial biomass[J]. Soil Biology and Biochemistry,2000,32(4):441-448.