



张新生,卢杰,张新军.土壤微生物与植被互作的研究进展[J].黑龙江农业科学,2022(1):88-93.

土壤微生物与植被互作的研究进展

张新生,卢杰,张新军

(西藏农牧学院高原生态研究所/西藏高原森林生态教育部重点实验室/西藏林芝高山森林生态系统国家野外科学观测研究站,西藏林芝 860000)

摘要:为促进退化森林生态系统的修复,本文从植被与土壤微生物多样性的关系、植被与土壤微生物群落的关联性以及土壤微生物与植被的相互反馈和调控的角度进行综述,并在此基础上,提出生态退化、全球变暖与CO₂浓度升高等全球化问题对土壤微生物与植被的相互反馈和调控的影响。在全球生态环境问题日益加剧的背景下,人类活动极大的影响了土壤微生物与植被的生存环境,建议探明气候变化下土壤微生物与植被的相互反馈和调控机制,以及二者在生态恢复方面的耦合关系。

关键词:土壤微生物;植被;相互反馈;调控;生态安全

土壤微生物与植被之间存在着密切联系,两者相互反馈与调控,保持陆地生态系统的稳定性^[1]。一方面,植被进行光合作用和呼吸作用,生产有机物,调节碳循环,维持森林养分循环和能量循环,对土壤微生物产生影响^[2]。另一方面,土壤微生物通过分解植被产生的凋落物以及自身的多样性增加土壤中营养成分和矿物质含量、提高土壤中的酶活性,还会影响土壤基质,对植被根系产生作用,进而影响植被生长发育^[3-4]。根据成土环境和土层深度的不同,土壤微生物群落和多样性明显产生变化^[5]。因此,土壤微生物以土壤为媒介对植被根系产生作用,而植被通过自身产生的凋落物或根系活动对土壤微生物群落结构和多样性产生影响。

目前,关于土壤微生物与植被的研究主要集中在土壤微生物多样性、群落结构对植物的影响等方面^[4-5],而当前全球生态安全问题日益严重,尤其是生态退化、全球变暖及CO₂浓度升高问题越发突出,这直接影响到土壤微生物与植被的相互反馈与调控。因此,面对这些问题,需要从土壤微生物与植被相互作用的角度出发,理解两者的关系,为生态恢复和解决全球变暖及CO₂浓度升高问题提供理论依据,为全球生态安全问题提供应对策略。

1 研究现状

1.1 植被与土壤微生物多样性的关系

土壤微生物是指土壤中个体微小,种类和数量众多的微小生物,主要包括细菌、真菌、以及原生动物等,而土壤微生物多样性是指这些微小生物在遗传、种类和生态系统层次上的变化,主要包括4个部分:物种多样性、遗传多样性、结构多样性以及功能多样性^[6-7]。与植被相关的研究主要集中在土壤微生物功能多样性上,而土壤微生物物种多样性与结构多样性主要体现在土壤微生物群落研究当中,在土壤微生物遗传多样性方面的研究多集中于其进化或变异等。

土壤微生物功能多样性是指土壤微生物执行的功能范围以及这些功能的执行过程,如分解和代谢功能、营养传递功能以及促进或抑制植物生长的功能等^[8]。在植被与土壤微生物功能多样性方面,张静等^[9]为探明延河流域内人工引进刺槐对土壤生态的影响,以人工刺槐(*Robinia pseudo-acacia*)林和乡土植物林的土壤微生物为研究对象,发现人工引种刺槐对土壤微生物群落的影响存在明显的环境梯度效应,同时土壤温度、土壤含水量对土壤微生物群落结构起到调控作用;程智超等^[10]在黑龙江中央站黑嘴松鸡保护区内以白桦(*Betula platyphylla*)林、蒙古栎(*Quercus mongolica*)林、兴安落叶松(*Larix gmelinii*)林下的土壤微生物为研究对象,发现土壤pH、土壤有机质和全氮的不同是导致3种植被的土壤微生物功能多样性产生差异的原因。

收稿日期:2021-09-20

基金项目:西藏自治区科技计划(XZ202101YD0013C)。

第一作者:张新生(1998-),男,硕士研究生,从事森林生态研究。E-mail:739584818@qq.com。

通信作者:卢杰(1973-),男,博士,教授,从事生态学研究。E-mail:tibetlj@163.com。

国外关于植被与土壤微生物功能多样性的研究主要以土壤微生物的代谢功能和活性为主, Blanca 等^[11]为研究木炭生产对 0~15 cm 层土壤微生物酶促和代谢谱的影响,在墨西哥中部对以栎属(*Quercus*)为主的温带森林进行研究,发现木炭生产对土壤中的微生物功能多样性和酶促微生物活性均有负面影响;Markowicz 等^[12]为测试位于西里西亚高地(波兰)不同年龄的未开垦煤矿弃土堆的优势植物物种和土壤微生物群落的功能群之间是否存在联系,研究发现随着堆龄的增长以及植物功能多样性逐渐增加,微生物功能多样性会产生明显差异,优势植物斑块中微生物群的平均比例解释了 60% 的方差,而土壤理化参数仅解释了 30% 的方差。

1.2 植被与土壤微生物群落的相关性

土壤微生物群落是指特定时空条件下,一定面积或体积土壤中细菌、真菌、以及原生动物的生物群体,其种群数量和结构与植被、土壤类型、环境因子等密切相关^[13]。植被与土壤微生物群落的相关性主要体现在两个方面:土壤微生物群落结构方面和土壤微生物群落时空分布方面。

在植被与土壤微生物群落结构方面,张彧娜等^[14]为探究植被修复模式对喀斯特地区土壤微生物群落结构和土壤微生物生物量的影响,以降香黄檀(*Dalbergia odorifera*)纯林、顶果木(*Arcorarpus fraxinifolius*)纯林以及顶果木×降香黄檀混交林 3 种人工林为研究对象,发现两种植被混交林内的真菌细菌比最高,对维持土壤生态系统的稳定性更加有利;范雅倩等^[15]为研究土壤微生物的生态功能,以松山 6 种植被为研究对象,对其土壤微生物群落结构进行分析,发现不同植被类型的细菌与真菌群落结构基本相似。国外关于植被与土壤微生物群落结构的代表性研究有 Vicky 等^[16]为评估土壤和植被因素的异质性是否反映在微生物群落中,在澳大利亚南部的一个河岸地区建立 9 个包含不同环境条件的样方,发现土壤微生物群落(真菌、细菌、古细菌)的变化与植被因子的差异有关,尤其是次冠层,在较小程度上与土壤化学性质有关;Mitchell 等^[17]为测试树木和林下物种之间的作用与土壤微生物群落(SMC)、群落水平生理特征(CLPP)和土壤微型动物群是否存在交互作用,采用白桦(*Betula*

platyphylla)、毛桦(*Betula pubescens*)、山梨(*Pyrus ussuriensis*)、栎属和樟子松(*Pinus sylvestris*)树苗进行盆栽试验,结果发现树木和林下植被之间的相互作用会影响土壤微生物群落结构及其活动。

在有关植被与土壤微生物群落时空分布方面,赵梦赛等^[18]以江西大岗山丝栗栲(*Castanopsis fargesii*)林为研究对象,同时对其群落组成和多样性的时空变化特征进行研究,结果发现,在空间变化上,土壤微生物有明显的表聚现象,但同层土壤微生物群落在时间变化上不明显^[18]。还有学者单独研究土壤微生物群落的空间分布特征,周赛等^[19]就只研究了毛竹(*Phyllostachys heterocycla*)林下土壤微生物群落空间分布与剖面分布特征;也有学者单独对土壤微生物群落的时间变化进行研究,郑裕雄等^[20]以米槠(*Castanopsis carlesii*)天然林和桔园(*Citrus reticulata*)为研究对象,对两种植被下土壤微生物群落季节性变化特征进行研究,结果发现,植被类型和季节变化是导致土壤微生物群落结构差异性的主要原因。

在植被与土壤微生物群落时空分布方面,国外学者大多单独从某一方面进行研究。在空间方面, Morris 等^[21]发现土壤微生物群落动态将反映土壤微生物和植物的特定身份以及过程的空间模式,这些模式和功能的紧密关系背后的机制反映了自养生物对分解者和共生者的营养获取的依赖以及这些生物的漫长进化历史;在时间方面, Busse 等^[22]选择了 3 个松树种植园,在重复的田间研究中使用草甘膦进行 9~13 年的植被控制后,季节性地比较了其微生物生物量、呼吸和代谢多样性(Biolog 和分解代谢反应曲线)的间接影响,发现无论采用何种除草剂处理,群落规模、活动和代谢多样性通常在春季最大,并随着场地质量的提高而增加。

2 土壤微生物与植被的相互反馈和调控

2.1 土壤微生物对植被的影响

土壤微生物能够直接或间接地影响植被。在直接作用方面,土壤微生物影响植被的效应有正向与负向的反馈。在正向反馈调节中,土壤微生物多样性和土壤微生物群落可以分解有机质,为植被根系提供能量和物质来源,维持生态系统养

分循环^[23];另一方面,某些土壤微生物种群能与植被形成共生的关系,加快植被根系从土壤中吸收养分,促进植被发育与演替,有学者发现丛枝菌根真菌(AMF)能与多数植物产生共生关系,主要通过影响植物根系活动来作用于土壤微生物群落结构和多样性^[24]。

由于同时存在植被对养分的吸收与土壤微生物对养分的固持,两者之间存在对土壤中营养的竞争关系,这就是负向反馈。同时,负向反馈也体现在土壤微生物的某些病原菌可以感染植被,使得植被发生疾病等,减缓植被生长甚至杀死植被,不利于植被的生长发育^[25]。原因就在于土壤微生物能够改变根系分泌物的成分,当根系受到某些土壤微生物病毒的感染时,会增强根系分泌作用,并且产生适合这些病毒生长的营养物质,改变了根系分泌物所产生的成分。国内相关研究表明,在小麦(*Triticum aestivum*)黄花叶病毒病不同发生度中,土壤微生物种类以及数量有所差异,不同的种类和数量将导致病毒感染程度不同^[26]。

在间接作用方面,根据食物链模型,土壤微生物群落通过分解凋落物和改变土壤中各矿物质元素的矿化速率来间接对植被产生调节作用,植被的根系分泌物主要受其附近的矿质营养成分影响^[27]。董学德等^[28]以麻栎(*Quercus acutissima*)-刺槐(*Robinia pseudoacacia*)混交林和麻栎纯林为研究对象,发现土壤微生物群落会对凋落物分解速率产生影响,其丰富度指数和多样性指数与凋落物分解速率呈正相关;Azaizeh等^[29]研究了丛枝菌根真菌和其他土壤微生物对玉米(*Zea mays*)生长、矿质养分获取和根系分泌的影响,发现根际和根平面上的土壤微生物活性能够促进玉米生长、矿质养分获取,但是限制了从根部回收渗出液(根系分泌物);与Azaizeh不同的是Suanne等^[30]发现土壤微生物可以诱导根中桃叶珊瑚苷浓度的增加,促进车前草(*Plantago asiatica*)根中次生代谢物和根系分泌物的水平。

2.2 植被对土壤微生物的反馈与调控

根据食物链模型来看,植被作为生产者必定能够对作为分解者的土壤微生物产生反馈与调控作用^[31]。从植被自身来看,对土壤微生物进行作用的主要是植被根系以及植被产生的凋落物。在植被根系方面,植物通过根系活动,直接影响土壤

微生物多样性和群落结构,而植被根系所分泌的根系分泌物是影响土壤微生物的主要因子,根系分泌物能够为土壤微生物提供生长发育所需要的能源与碳源,扩大土壤微生物群落^[32]。同时根系分泌物所产生的一些物质也会抑制某些土壤微生物的生长。

此外根系分泌物还影响土壤微生物的种类、数量、代谢以及分布。在土壤微生物的种类和数量方面,由于植被类型和植物物种多样性的不同,根系分泌物的成分有所差异,不同成分对土壤微生物的影响不同,所以根际微生物的种类和数量也会有所差异^[33]。高雪峰等^[34]为研究短花针茅(*Stipa breviflora*)根系分泌物对土壤微生物的影响,利用短花针茅根系分泌物中的3种化学组分,对其土壤进行处理,发现短花针茅的根系分泌物能够促进土壤微生物的生长生存。从土壤微生物的分布角度,根系分泌物对土壤微生物的影响有两方面。一方面,土壤微生物的纵向分布规律是从根冠到成熟区数量不断增加;另一方面,在横向分布上根系的不同区域内土壤微生物的分布有着明显差异。

凋落物分解是森林生态系统养分循环和能量流动的关键过程,影响着全球碳平衡和养分周转,其分解快慢决定着生态系统元素流动的速度,从侧面反映出土壤有效性的高低^[35]。在植被产生的凋落物分解方面,土壤微生物发挥着重要作用。植被器官凋谢向地表和地下输入凋落物,为土壤微生物提供可分解的物质和生存所需的营养,但是由于植被类型和其物种多样性的不同,导致植被所输入的凋落物也不同,因为凋落物的化学成分不同,会对土壤微生物产生不同的作用,这极大地影响了土壤微生物群落结构和多样性^[36]。有研究表明,不同植被类型的凋落物中,影响土壤微生物多样性和群落结构的重要成分是烷基碳组分^[37];不同的凋落物对土壤微生物群落结构、群落代谢活性以及土壤微生物多样性的影响具有显著差异^[38]。

3 问题与展望

3.1 生态退化与恢复过程中土壤微生物与植被的相互反馈和调控

随着全球生态环境恶化以及人类活动的破坏,生态退化问题越来越突出。全球生态环境恶

化以及人类活动不可避免会对土壤微生物与植被所生存的生态系统进行干扰和破坏,最终导致生态系统中的土壤微生物群落结构和多样性、植被生产力及功能产生退化效应^[39]。并且土壤微生物与植被的相互反馈与调控是多方面的,但是人们缺乏对此作用的重要性和复杂性的认识,土壤微生物和植被的关系在生态恢复规划、实施和监测中经常被忽视,这极大地限制了土壤微生物的生态恢复作用^[40]。有研究表明,受损矿区生态系统的恢复受植物群落和微生物群落的影响较大,矿区的人工生态修复程度要高于自然恢复区的程度^[41]。

土地利用类型或土壤化学特性是土壤微生物群落组成的主要驱动因素^[42];土壤微生物群落结构和多样性作为生态恢复后土壤质量的重要指标,也将影响生态系统某部分的变化^[43]。有研究发现,土地利用类型变化会引起土壤化学性质发生变化,将控制半干旱黄土高原地区土壤微生物群落结构,其变化的土壤微生物群落结构会对植被恢复产生影响^[44]。目前,退化或被破坏的生态系统在大多数情况下自我调节能力不足,需要人工辅助进行生态恢复。但是,在生态恢复过程中人们又忽视了土壤微生物对植被的作用,也忽视了土壤微生物在退化生态系统中修复植被的功能。因此,开展生态恢复工作要注意土壤微生物的影响,利用土壤微生物的功能多样性以及群落结构多样性,完成退化生态环境的恢复。

3.2 全球变暖与 CO₂ 浓度升高条件下土壤微生物与植被的相互反馈和调控

对植被类型以及多样性来说,全球变暖与 CO₂ 浓度升高将直接改变植被的物候期、影响植物分布以及种群组成,并间接影响植被生长环境,影响其生长发育状况^[45]。对土壤微生物群落结构和多样性而言,全球变暖与 CO₂ 浓度升高直接或间接地改变其生长的土壤环境,以及改变植物群落结构,改变地上、地下凋落物数量和成分,从而引起土壤微生物群落结构和多样性产生变化^[46]。

全球变暖通过影响植被而影响土壤微生物,土壤微生物也将直接或间接地反馈和调控植被生长发育状况。一方面,土壤微生物群落的复杂性以及气候和其他变化对其产生的多种影响阻碍了

微生物体的代谢活动^[47]。另一方面,全球气候变暖肯定会影响温度、湿度、土壤环境的碳氮比等,进而影响土壤微生物生存的生境,改变其群落结构和多样性^[48]。

有国内研究者发现大气 CO₂ 浓度升高会使土壤微生物群落的活性增加,提高植被根系区域内土壤微生物群落的物种多样性并增强其功能多样性^[49];国外学者也发现植被根系在 CO₂ 升高时可释放更丰富的可用有机物改变土壤微生物群落的生态策略,土壤微生物群落的特定生长速率对大气 CO₂ 更加敏感,并且在大气 CO₂ 浓度升高的情况下,植物为增加同化碳而进行地下易位,导致负责土壤中有有机物质周转的微生物群落的结构和活动发生变化^[50]。

在全球变暖和 CO₂ 浓度升高的背景下土壤微生物、植物及其物理环境之间发生的复杂相互作用和反馈将放大生境对土壤微生物的影响。因此,需要更好地从生态学角度了解土壤微生物如何在全球变暖和 CO₂ 浓度升高的背景下促进陆地-大气碳交换,并且需要采用多因素试验方法来了解土壤微生物及其活动如何响应气候变化、碳循环以及反馈和调控植被生长发育。

3.3 展望

土壤微生物与植被相互反馈,相互调控。两者的反馈与调控,一方面体现在土壤微生物对植被的影响上,土壤微生物以土壤为媒介,直接对植被根系产生影响,以及间接从食物网和土壤 N、P 等矿化速率上对植被产生影响,最终对植被的生产力、多样性以及演替等进行反馈调节;另一方面,在植被对土壤微生物的反馈与调控过程中,可以明确植被通过调控自身根系发育、根系分泌活动以及自身产生的凋落物,对土壤微生物群落结构和多样性产生影响。

全球环境变化将干扰植被和土壤微生物的生长环境,直接或间接影响植被多样性和土壤微生物群落结构及多样性。首先,应在以后的研究中注意气候变化下土壤微生物与植被的相互反馈和调控,整体分析土壤微生物与植被的关系,注重其联动反应;其次,在分析过程中,可将影响两者的因子进行对比,得出各类因子对土壤微生物与植被的影响程度,并对其起共同作用的影响因子进行分析;最后,在生态恢复方面,土壤微生物发挥

着重要作用,要加强研究土壤微生物群落结构和多样性与不同地区、不同生长阶段植被的耦合关系。未来,更多学者将着眼于生态恢复、全球变暖以及CO₂浓度升高条件下土壤微生物与植被关系的研究。

参考文献:

- [1] 钱叶,侯怡铃,宋波,等. 龙门山地震带不同植被类型土壤微生物群落多样性分析[J]. 福建师范大学学报(自然科学版),2019,35(1):88-95.
- [2] 赵晓,周文佐,田罗,等. 土地利用变化对三峡库区重庆段植被净初级生产力的影响[J]. 生态学报,2018,38(21):7658-7668.
- [3] 蔡开朗,麦志通,曾德华,等. 极小种群野生植物海南假韶子群落土壤特性研究[J]. 中南林业科技大学学报,2018,38(6):102-108.
- [4] 张颖慧. 森林植被与土壤微生物关系研究进展[J]. 安徽农业科学,2014,42(30):10683-10684,10758.
- [5] 胡雷,王长庭,王根绪,等. 三江源区不同退化演替阶段高寒草甸土壤酶活性和微生物群落结构的变化[J]. 草业学报,2014,23(3):8-19.
- [6] 任得元,李建康,李莉. 秦岭山区人工纯林土壤微生物群落特征研究[J]. 陕西林业科技,2009(2):26-36.
- [7] 左平,欧志吉,姜启昊,等. 江苏盐城原滨海湿地土壤中的微生物群落功能多样性分析[J]. 南京大学学报(自然科学),2014,50(5):715-722.
- [8] 林先贵,胡君利. 土壤微生物多样性的科学内涵及其生态服务功能[J]. 土壤学报,2008,45(5):892-900.
- [9] 张静,温仲明,李鸣雷,等. 外来物种刺槐对土壤微生物功能多样性的影响[J]. 生态学报,2018,38(14):4964-4974.
- [10] 程智超,杨立宾,隋心,等. 黑龙江中央站黑嘴松鸡国家级自然保护区不同森林类型土壤微生物功能多样性分析[J]. 环境科学研究,2021,34(5):1177-1186.
- [11] BLANCA E G L, GRACIELA M L R A, GERARDO V M, et al. Enzyme activities and metabolic profiles of soil microorganisms at KILN sites in *Quercus* spp. temperate forests of central Mexico[J]. Applied Soil Ecology, 2011, 52:48-55.
- [12] MARKOWICZ A, WOŹNIAK G, BORYMSKI S, et al. Links in the functional diversity between soil microorganisms and plant communities during natural succession in coal mine spoil heaps [J]. Ecological Research, 2015, 30(6):1005-1014.
- [13] 王晓彤,许旭萍,王维奇. 模拟酸雨对福州平原稻田土壤真菌群落结构及多样性影响[J]. 环境科学学报,2019,39(7):2249-2259.
- [14] 张彧娜,周晓果,温远光,等. 喀斯特地区三种人工林土壤微生物群落结构特征[J/OL]. 广西植物:1-17[2021-08-08]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/45.1134.Q.20210511.0907.002.html>.
- [15] 范雅倩,安菁,梁晨. 北京市松山国家级自然保护区典型植被群落的土壤微生物群落结构特征[J]. 北方园艺,2021(1):81-86.
- [16] VICKY W, REBECCA E M, FIONA E, et al. Variation in soil microbial communities: Elucidating relationships with vegetation and soil properties, and testing sampling effectiveness[J]. Plant Ecology, 2020, 221(4):1-15.
- [17] MITCHELL R J, KEITH A M, POTTS J M, et al. Overstory and understory vegetation interact to alter soil community composition and activity[J]. Plant and Soil, 2012, 352(1-2):65-84.
- [18] 赵梦赛,栾亚宁,戴伟,等. 丝栗栲林土壤微生物 PLFA 群落结构的时空变化特征[J]. 西北林学院学报,2019,34(6):16-21,73.
- [19] 周赛,梁玉婷,张厚喜,等. 我国中亚热带毛竹林土壤微生物群落的空间分布特征及其影响因素[J]. 土壤,2015,47(2):369-377.
- [20] 郑裕雄,曹际玲,杨智杰,等. 米槠天然林和桔园土壤微生物群落结构的季节性变化[J]. 生态环境学报,2019,28(10):1991-1998.
- [21] MORRIS S J, DRESS W J. The Interrelationship between the spatial distribution of microorganisms and vegetation in forest soils[J]. The Spatial Distribution of Microbes in the Environment, 2007, 9:311-329.
- [22] BUSSE M D, RATCLIFF A W, SHETAK C J, et al. Glyphosate toxicity and the effects of long-term vegetation control on soil microbial communities[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2001, 33(12):1777-1789.
- [23] 倪惠菁,苏文会,范少辉,等. 养分输入方式对森林生态系统土壤养分循环的影响研究进展[J]. 生态学杂志,2019,38(3):863-872.
- [24] 贾琴宇,刘灵,黄庶识. AMF 对间套作体系中植物-土壤-微生物相互作用的影响及机制[J]. 广西科学院学报,2020,36(2):193-199.
- [25] 张思琪,赵季平,马梦星,等. 植被与土壤生物群落的反馈调节关系[J]. 基因组学与应用生物学,2015,34(5):1097-1102.
- [26] 吴斌,姜珊珊,张眉,等. 小麦黄花叶病毒病不同发生度土壤的微生物多样性研究[J]. 山东农业科学,2017,49(12):44-49.
- [27] 杜晓芳,李英滨,刘芳,等. 土壤微食物网结构与生态功能[J]. 应用生态学报,2018,29(2):403-411.
- [28] 董学德,高鹏,李腾,等. 土壤微生物群落对麻栎-刺槐混交林凋落物分解的影响[J]. 生态学报,2021,41(6):2315-2325.
- [29] AZAIZEH H A, MARSCHNER H, RÖMHELD V, et al. Effects of a vesicular-arbuscular mycorrhizal fungus and other soil microorganisms on growth, mineral nutrient acquisition and root exudation of soil-grown maize plants [J]. Mycorrhiza, 1995, 5(5):321-327.

- [30] SUSANNE W, ROEL W, ARJEN B, et al. Microorganisms and nematodes increase levels of secondary metabolites in roots and root exudates of *Plantago lanceolata* [J]. *Plant and Soil*, 2010, 329(1-2): 117-126.
- [31] 蒋婧, 宋明华. 植物与土壤微生物在调控生态系统养分循环中的作用[J]. *植物生态学报*, 2010, 34(8): 979-988.
- [32] 吴林坤, 林向民, 林文雄. 根系分泌物介导下植物-土壤-微生物互作关系研究进展与展望[J]. *植物生态学报*, 2014, 38(3): 298-310.
- [33] 袁仁文, 刘琳, 张蕊, 等. 植物根际分泌物与土壤微生物互作关系的机制研究进展[J]. *中国农学通报*, 2020, 36(2): 26-35.
- [34] 高雪峰, 韩国栋. 短花针茅根系分泌物对荒漠草原土壤细菌群落及土壤养分的影响[J]. *中国草地学报*, 2021, 43(6): 76-84.
- [35] 余婷, 田野. 森林生态系统凋落物多样性对分解过程和土壤微生物特性影响研究进展[J]. *生态科学*, 2020, 39(1): 213-223.
- [36] 王小平, 杨雪, 杨楠, 等. 凋落物多样性及组成对凋落物分解和土壤微生物群落的影响[J]. *生态学报*, 2019, 39(17): 6264-6272.
- [37] 宋战超, 王晖, 刘世荣, 等. 南亚热带混交人工林树种丰富度与土壤微生物多样性和群落组成的关系[J]. *生态学报*, 2020, 40(22): 8265-8273.
- [38] 宋蒙亚, 李忠佩, 刘明, 等. 不同林地凋落物组合对土壤速效养分和微生物群落功能多样性的影响[J]. *生态学杂志*, 2014, 33(9): 2454-2461.
- [39] 赵龙妹. 青藏高原土壤微生物多样性研究进展[J]. *江苏农业科学*, 2019, 47(14): 6-12.
- [40] JAFARI M, BINIAZ, JANFAZA E, et al. Relationship between soil characteristics and vegetation types in Damghan [J]. *Desert*, 2013, 17(1): 129-135.
- [41] YING L, LEI S, GONG C, et al. Comparison of plant and microbial communities between an artificial restoration and a natural restoration topsoil in Coal Mining Subsidence Area [J]. *Environmental Geology*, 2019, 78(6): 204.
- [42] 岳琳艳, 郑俊强, 韩士杰, 等. 长白山温带森林不同演替阶段土壤化学性质及微生物群落结构的变化[J]. *生态学杂志*, 2015, 34(9): 2590-2597.
- [43] COSTANTINI E, BRANQUINHO C, NUNES A, et al. Soil indicators to assess the effectiveness of restoration strategies in dryland ecosystems [J]. *Solid Earth*, 2016, 7(4): 3645-3687.
- [44] QIN T, TAKESHI T, WEI Y S, et al. Land-use types and soil chemical properties influence soil microbial communities in the semiarid Loess Plateau region in China [J]. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 1770-1774.
- [45] 马丽. 气候变化和 CO₂ 浓度升高对森林影响的探讨[J]. *林业资源管理*, 2014(5): 28-34.
- [46] 桑昌鹏, 万晓华, 余再鹏, 等. 凋落物和根系去除对滨海沙地土壤微生物群落组成和功能的影响[J]. *应用生态学报*, 2017, 28(4): 1184-1196.
- [47] 沈芳芳, 刘影, 罗昌泰, 等. 陆地生态系统植物和土壤微生物群落多样性对全球变化的响应与适应研究进展[J]. *生态环境学报*, 2019, 28(10): 2129-2140.
- [48] 李保杰, 朱江, 陈少祥, 等. 变化环境下土壤生物多样性潜在威胁与影响因素 [J]. *水土保持研究*, 2015, 22(6): 354-360.
- [49] 谢云, 郭芳芸, 陈丽华, 等. 大气 CO₂ 浓度升高对宁夏枸杞根区土壤微生物功能多样性及碳源利用特征的影响 [J]. *林业科学*, 2021, 57(4): 163-172.
- [50] EVGENIA B, SERGEY B, MAXIM D, et al. Elevated atmospheric CO₂ increases microbial growth rates in soil: Results of three CO₂ enrichment experiments [J]. *Global Change Biology*, 2010, 16(2): 836-848.

Research Progress on Interaction Between Soil Microorganisms and Vegetation

ZHANG Xin-sheng, LU Jie, ZHANG Xin-jun

(Institute of Tibet Plateau Ecology, Tibet Agricultural & Animal Husbandry University/Key Laboratory of Forest Ecology in Tibet Plateau, Ministry of Education/Nyingchi National Forest Ecosystem Observation & Research Station of Tibet, Nyingchi 860000, China)

Abstract: In order to promote the restoration of degraded forest ecosystem, this paper summarized the relationship between vegetation and soil microbial diversity, the correlation between vegetation and soil microbial community, and the mutual feedback and regulation between soil microorganisms and vegetation. The effects of global warming and CO₂ concentration rise on the mutual feedback and regulation of soil microorganisms and vegetation. Under the background of increasing global ecological and environmental problems, human activities have greatly affected the living environment of soil microorganisms and vegetation. It is suggested to explore the mutual feedback and regulation mechanism of soil microorganisms and vegetation under climate change, as well as their coupling relationship in ecological restoration.

Keywords: soil microorganisms; vegetation; mutual feedback; regulation; ecological security