

变化环境下土壤生物多样性潜在威胁与影响因素

李保杰¹, 朱江¹, 陈少祥², 王 腾¹, 陈 浩¹, 周生路¹, 吴绍华¹

(1. 南京大学 地理与海洋科学学院, 南京 210046; 2. 江苏省射阳县国土资源局, 江苏 射阳 224300)

摘 要:作为地球上生物最为丰富的生境,土壤生态系统具有高度的生物多样性,并与地上生态系统有着密切联系。随着经济快速发展,人为干扰日益严重,土壤生物多样性遭受严重威胁,在物种大量灭绝及对土壤生物多样性总体认识相对局限的双重背景下,有效保护土壤生物多样性迫在眉睫。首先,提出了土壤生物多样性的威胁框架,并详述了土地利用变化、农业管理措施、土壤退化、转基因作物、外来植物入侵五大威胁因素在生态系统、物种、基因三个尺度下的不同作用过程。其次,阐明了各威胁因素对土壤生物多样性的具体影响及其驱动机制。最后指出,尽管人们对于上述威胁因素的研究已经有了部分成果,但对于研究各威胁因素在不同尺度下的影响,明确因素间相互作用方式及贡献程度,进行土壤生物多样性威胁的空间精细化制图等方面还面临着巨大挑战。分析土壤生物多样性潜在威胁能够为实现对其综合定量评估、保护土壤生物多样性以及城市规划等提供有力依据。

关键词:土壤生物; 生物多样性; 综述; 土地利用变化; 土壤污染

中图分类号: P934; X176

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2015)06-0354-07

Potential Threats and Influence Factors to Soil Biodiversity in Changing Environment

LI Baojie¹, ZHU Jiang¹, CHEN Shaoxiang², WANG Teng¹, CHEN Hao¹, ZHOU Shenglu¹, WU Shaohua¹

(1. School of Geographic and Oceanographic Science, Nanjing University,

Nanjing 210046, China; 2. Sheyang Land Resources Bureau, Sheyang, Jiangsu 224300, China)

Abstract: As the most abundant biological habitat on the planet, soil ecosystem has the greatest biodiversity, and closely associated with the above-ground ecosystem. Along with the rapid economic development, disturbance by humans has become increasingly serious, and the soil biodiversity suffered significant threat. Under the background of mass extinction and the limit knowledge of soil biodiversity, it is extremely urgent for human to protect the soil biodiversity. First, we proposed a framework of threats to soil biodiversity, and analyzed the influence processes of five kinds of threats (land-use change, agricultural management, soil degradation, transgenic plants and invasive plants) to soil biodiversity at ecosystem, species and gene scales. Then, we deeply discussed the specific influence and mechanism of each threat to soil biodiversity. Finally, although researchers got some achievements about the threats to soil biodiversity, we still face lots of challenges, including the influence of specific threat to soil biodiversity at different scales, interactions and contributions among different threats to soil biodiversity, spatial explicit mapping of threats to soil biodiversity. Analysis on the potential threats to soil biodiversity can provide important information for protecting soil biodiversity, quantitative evaluation of potential threats to soil biodiversity, and urban planning.

Keywords: soil biota; biodiversity; review; land use change; soil pollution

生物多样性极大影响了生态系统服务,逐渐成为
一个全球关注问题。土壤生物多样性包括土壤微团
聚体到整个土壤景观各个尺度下土壤生物的基因多
样性、物种多样性和生态系统多样性^[1]。作为最大的
生物多样性库之一,土壤生物多样性远高出地上几个
量级,1 g 土壤中就可能含有多达 10 亿的细菌细胞、

长达 200 m 的真菌菌丝以及大量的螨、线虫、节肢动
物等。土壤生物在土壤的形成发育、维持生态系统循
环稳定、废物分解、授粉等方面扮演着极为重要的角
色,尤其在养分循环和凋谢物分解中不可替代,提供
了气候调节、驱动养分循环、碳封存等大量生态系统
服务,甚至一种土壤生物就可以在生态系统中起到决

定作用,亚马逊森林被砍伐后,黄颈透钙蚓使土壤形成透水透气性差的表面结皮,极大改变了生态系统的结构^[2]。目前,生物多样性研究大多关注的是地上生物多样性的损失及其生态响应^[3-4],地下部分的生物多样性研究较少,主要集中于土壤生物多样性与生态系统功能的关系、与地上生物多样性的相互耦合和反馈,以及其地理分布格局等,虽然广泛应用了分子生物学、同位素等多项先进技术,但是一些相关假说和观点目前仍然存在诸多争议,土壤环境的极度异质性和资源多样性也使研究土壤生物多样性困难重重。

在对土壤生物多样性认识相对局限的背景下,包括土壤生物多样性在内的全球生物多样性却遭受到前所未有的威胁。2010年发布的《全球生物多样性展望》指出2002年各国决定到2010年实现大幅降低生物多样性丧失速度的目标并未实现。2012年世界自然保护联盟濒危物种红色名录显示,评估的所有物种中已经灭绝和受到不同程度威胁的占32%^[5]。土壤生物目前已经记录的物种仅占其整体的很小部分,比如土壤微生物已知量可能仅占总量的1%,部分物种可能在未记录之前就已灭绝。荷兰20a间真菌减少了65%^[6];瑞士联邦环境办公室首次公布了瑞士详细的937种可能面临灭绝的真菌类红色名录^[7]。更有研究发现,法国南部一些大型特有蚯蚓已经灭绝,更多的蚯蚓在热带地区消失^[8]。

土壤物种的大量灭绝及土壤生物多样性的研究相对局限使得尽可能降低土壤生物多样性损失尤为重要,并且土壤生物多样性监测仍然很不完善(仅有5个国家进行了蚯蚓监测),没有全球范围土壤生物的背景值,目前减少土壤生物多样性损失只能通过深入了解威胁因素,探寻威胁因素驱动机制及其对多样性的影响来实现。本文构建了变化环境下威胁土壤生物多样性的研究框架,阐述了不同尺度下威胁因素对其的影响,并对各个威胁因素对土壤生物多样性的胁迫机理进行了分析。

1 土壤生物多样性潜在威胁框架

自然和人为双重驱动下,过度开发、土壤退化、土壤污染等生态问题开始凸显^[9],这些因素可以在不同尺度下,威胁土壤生物多样性。欧盟委员会发布的欧洲土壤保护主题战略提出主要影响土壤生物多样性的有土壤侵蚀、有机质下降、土壤污染、土壤压实、土壤封闭、盐渍化和洪涝灾害。欧盟环境总署的《Soil biodiversity: functions, threats and tools for policy makers》最终报告中又将气候变化、土地利用变化、转基因、物种入侵、管理方式等因素列入其中^[1]。本文将土壤生物多样性威胁因素分为五大类:土地利用变化、管

理方式、土壤退化、转基因作物、外来植物入侵。五类威胁因素会在生态系统、物种、基因三个尺度单独或综合的对土壤生物多样性构成威胁。

生态系统尺度下,过度开发(放牧等)与剧烈的土地利用变化,直接造成生态系统破坏及栖息地丧失,包括土壤生物在内的物种全部会遭受威胁;土壤理化性质(有机质、蓄水量等)会导致气候因子(温度、降水等)的改变来影响生态系统下土壤生物多样性,Lipson和Schmidt研究表明,高山冻土土壤细菌群落结构组成具有季节性变化规律,增温还会改变土壤动物群落和组成,影响土壤动物多样性^[10];土壤酸化、土壤污染及其在大气迁移等会改变地球化学条件,氮沉降导致生态系统内氮素可获得性发生变化,土壤中的C:N发生改变,进而影响土壤生物多样性变化。土壤污染全球的迁移转化,使原本无污染的生态系统面临威胁,改变土壤生物多样性。

物种尺度下,土地利用变化及各种农业管理措施,可能会阻碍土壤生物选择适宜栖息地,并打破区域生态状态及物种间平衡,降低繁殖能力和适应能力差的土壤生物物种多样性;有机污染和重金属污染等会通过高毒性及生物富集威胁土壤物种,直接将对污染响应敏感或自适应能力差的物种淘汰。人类有意无意引入的外来植物很可能会通过种间竞争在入侵地获得竞争优势,而地下与土壤生态系统的紧密联系也使得本地土壤物种面临威胁^[11]。

基因尺度上,高强度的人为活动导致的土壤退化等因素会引起气候、蒸散类型等环境条件变化,使土壤生物通过遗传变异来改变其遗传多样性,失去某些在此种条件下“劣势”的基因,也会通过改变种群大小发生随机遗传漂变过程致使基因库遭受威胁^[12];转基因技术的兴起在造福人类的同时,带来了基因污染,转基因作物不仅有竞争优势,并且其外源基因和表达产物在土壤中保持活性,可能与土壤生物进行基因重组,破坏基因库。

2 威胁土壤生物多样性的影响因素与驱动过程

土壤生物多样性对各威胁因素的响应不同,甚至有些因素(外来植物入侵、转基因等)在威胁土壤生物多样性方面还存在诸多争议,根据土壤多样性的研究进展,文章归纳了土地利用变化、农业管理措施、土壤退化、土壤污染等环境变化因素对土壤生物多样性的影响及驱动过程,为保护土壤生物多样性和土壤生态系统提供依据。

2.1 土地利用变化

土地利用变化主要通过对土壤微生境的改变进而对土壤生物多样性造成影响,森林砍伐会清除包含大部分真菌和无脊椎动物栖息的枯枝落叶层,降低其生物多

样性。同样,草地向农田或树木苗圃的转变以及部分管理方式摧毁了大型土壤动物的栖息地,树木苗圃的转变会损毁真菌网络和其他真菌菌丝,使土壤群落结构及功能不稳定,长时间内对大量土壤生物造成威胁。

表 1 不同土地利用类型下土壤生物多样性分布^[1]

土地利用类型	森林土壤	草地	耕地	城市土壤
总多样性	++	++	+	—
“化学工程师”	真菌为主	真菌为主 真菌 10~100 m/g 细菌 10 ⁸ ~10 ⁹ /g	细菌为主 细菌 10 ⁸ ~10 ⁹ /g	细菌为主
“生物监管者”	食真菌类原生生物和线虫: 100~1000/g 小型节肢动物:10 ⁶ /m ²	原生生物及线虫为主 原生动物:1000/g 线虫:10~100/g 小型节肢动物: 5000~20000/m ²	以食细菌类动物为主 原生动物:1000/g 线虫:10~20/g 小型节肢动物: <100/m ²	可忽略
“生态系统工程师”	蚯蚓和蚂蚁为主 下居型蚯蚓:100/m ²	蚯蚓为主	表层居住和下层居住蚯蚓: 50~300/m ²	可忽略

注:土壤生物可以分为三个功能组:“化学工程师”是将有机质分解成植物可利用的营养物质,并可以传输营养物质的生物;“生物监管者”是以植物、其他无脊椎动物和土壤微生物为食或寄生的小型无脊椎动物;“生态系统工程师”是通过在土壤中形成孔隙网络、聚合体或颗粒搬运等来影响土壤结构的生物。

不同的土地类型其土壤生物多样性也大不相同(表 1),森林和草地均有复杂的根系层,为土壤动物提供栖息地,森林土壤枯枝落叶层丰富,气候稳定,草地土壤虽然枯枝落叶层有限,但是土壤生物多样性也很高,Watt 等发现草地中蚯蚓相比其他任何地类具有最大的生物量和多样性^[13];耕地比自然土壤有更低的土壤生物多样性。传统农业只追求供给服务而忽视气候调节、水调节、土壤结构保持等生态服务,结果景观向均质化发展,不适的土壤生境形成,导致大尺度土壤生物多样性变化;城市土壤随着城市化的扩张而不断增大,但城市大面积土壤均被建筑物或交通设施覆盖,并且土壤压实与封闭普遍存在,生物多样性最低。

2.2 农业管理措施

农业集约化管理、传统耕作等农业措施也是威胁土壤生物多样性的重要因素。农业集约化下过多氮肥的使用扰乱了土壤生态系统的结构。施用氮肥可以通过抑制酶活力和累积毒性从而对土壤腐生菌和菌根真菌起到较强的抑制作用^[14],长期施用氮肥可以减少土壤微生物的活性。Donnison 在集约管理模式下制干草草原试验表明集约管理致使土壤真菌生物量明显减少^[15],农业集约化的单一种植模式同样不利于土壤动物多样性,Bardgett 等人发现农业集约化会降低土壤动物多样性,而低投入的农业生态系统更有利于维持土壤动物多样性^[16]。

传统耕作破坏了土壤团聚体,造成表层土壤有机质的降低,土壤中微生物多样性及生物量均低于免耕土壤^[17],可能由于是传统耕作土壤呼吸作用通常高

于免耕土壤,碳储量减少,导致土壤生物多样性降低。土壤耕作还会造成土壤结构的变化,对土壤微生物动力学产生负面影响,显著降低细菌多样性^[18]。另外,蚯蚓和一些土居型动物生物量在耕作过程中明显减少,长期耕作还会导致如弹尾目、蜉蝣目等小型土壤动物总生物量降低几率增大,大型动物数量减少^[19]。

2.3 土壤退化

土壤退化所造成的土壤生物多样性威胁主要包括有机质降低、土壤侵蚀、盐渍化、土壤的压实封闭、土壤酸化及土壤污染。

2.3.1 有机质降低 温度、降水、风力或雨水强度等气候因素会导致景观有机质含量的差异;人为干预下由自然到农业生态系统的转变会导致土壤碳库 50%~75%的流失,深耕会加剧土壤侵蚀和淋溶,过度灌溉和放牧也会造成有机质大量流失^[20]。土壤有机质在保持土壤肥力方面至关重要,是影响土壤微生物多样性、群落组成等的关键参数。土壤生物在酶的作用下形成腐殖质,是土壤有机质新陈代谢的内在动力,而土壤生物的最终物质、能量来源都是来自植物残体等以及由其降解而来的有机质,有机质降低会直接影响土壤生物多样性的变化。大量研究表明,有机碳含量与土壤微生物功能多样性有着明显相关性,并且与土壤动物的种类、数量、生物量呈显著的正相关^[21]。

2.3.2 土壤侵蚀 人为活动干预短期内增加土壤侵蚀,森林砍伐、过度放牧直接将土壤暴露于地表,农田深耕会加剧风蚀和水蚀作用。土壤侵蚀的直接影响就是上层土壤的去除及土壤有机质的降低,土壤生

物营养可利用性下降,对土壤生物多样性造成威胁^[22]。土壤侵蚀也通过降低植物生物量、生产力间接影响土壤理化性质及其生态服务。植物生物量减少会降低土壤碳输入,碳储量的降低反过来会影响植物生长,两者综合导致土壤贫瘠化,降低土壤生物多样性。此外,土壤侵蚀往往与其他因素相互联系,难以完全独立分析,土壤侵蚀会造成土壤有机质降低,蓄水量减少,径流深度增加,营养物质流失,从而减少土壤生物量和土壤生物多样性;反过来,土壤生物量和土壤生物多样性的降低会直接导致土壤有机质的降低,又会加剧土壤侵蚀,形成循环。

2.3.3 盐渍化 高盐分能够影响植物和土壤群落的新陈代谢。随着全球变暖的影响,全球盐渍化土地每年以 $1.0 \times 10^6 \sim 1.5 \times 10^6 \text{ hm}^2$ 速度增长,土壤盐渍化问题日益严峻。滨海地区地下水过度使用等灌溉措施因素可以导致土壤盐渍化。即使其他条件均适宜,土壤盐渍化严重,大部分土壤生物也不能生存。盐渍化会通过直接或改变土壤理化性质间接影响微生物的生物量和多样性。很多细菌超过其最适盐分浓度后,会进入休眠状态。盐分升高,造成土壤微生物渗透胁迫,降低其多样性。Owojori 等研究发现土壤的一些可溶性盐离子(Na^+ 等)可以直接通过影响土壤生物的生长发育繁殖来对土壤生物群落结构、多样性构成威胁^[23]。土壤动物对盐渍化也有很强的敏感性。Liu 等发现随着盐渍化程度加重,布甲科动物群落和多样性降低^[24]。在黑河中游干旱绿洲研究大型土壤动物时,刘继亮也发现了随盐渍化程度提高,土壤动物群落个体密度和类群丰富度降低^[25]。

2.3.4 土壤压实与封闭 重型机械和人为踩踏等人为因素导致的土壤压实,改变了土壤结构,形成压实层,土壤水分、空气和蚯蚓等生物由于过度紧实难以进入,土壤生物行为发生变化。几乎所有的试验都表明压实会减少微小节肢动物的数量,Bouwman 等试验表明压实会导致食菌类和杂食类的线虫数量减少^[26];其也会改变土壤干湿状况和透气性,间接影响土壤微生物的活动, O_2 和 CO_2 扩散速度的减缓,使土壤中 O_2 被消耗,有氧类微生物多样性降低。土壤封闭阻碍了土壤与地上的物质交换和能量流动,自然过程中土壤封闭过程主要指结皮的形成,当前最主要原因是城市化的发展,也会伴随着土壤径流量增大,城市内涝以及土壤侵蚀等一系列影响土壤生物多样性的过程。随着封闭土壤有机质和水分的消耗,土壤细菌逐渐进入非活动状态,碳源输入的减少可能是导致封闭土壤微生物功能多样性降低的主要原因之一^[27],研究发现开放土壤放线菌与真菌的数量较封

闭土壤高出两个数量级^[28],土壤动物通常会迁移到开放土壤中或死亡,降低区域内土壤动物多样性。

2.3.5 土壤酸化 土壤 pH 值能改变土壤理化性质和生物过程,是控制土壤动物分布、组成的主要物化参数,也会影响土壤动物与微生物的相互作用,威胁土壤生物多样性。张萍华通过模拟酸雨测定不同基质土壤中微生物含量,结果表明,细菌、放线菌的数量都随着 pH 降低而减少^[29]。对于线虫,目前的研究较少,研究多从 pH 对其他环境因素(重金属活化等)的影响间接导致生物量和群落结构的变化进行探讨^[30],跳虫由于特有的生理特性对酸度并没有很强的敏感性,但螨虫类生物更适宜在 pH 中性环境中生存,特定的小型节肢动物对于 pH 值的敏感性很大程度上受到重金属含量、植被类型等土壤环境的影响,蚯蚓在 $\text{pH} < 3.5$ 基本无法生存,4.5 以下也十分稀少^[31],对 pH 敏感性很高。

2.3.6 土壤污染 重金属或有机污染物可以通过气体干湿沉降、废物处理、直接应用等途径进入土壤环境中,土壤污染由于其毒性和生物富集特征直接影响了土壤生物的生长繁殖,改变了生物的生物量、雌雄比,并可能导致基因变异。有机污染物可以改变或损坏对于土壤生态系统服务(如有机质分解)至关重要的动态过程,导致营养物质循环改变和肥效降低^[32]。

土壤污染对微生物多样性的影响国内外已经开展了大量研究,Li 等在 Cu、Zn 冶炼厂周围发现微生物多样性随重金属浓度升高而降低^[33],且 Cd 污染的土壤其可培养的微生物数量很少^[34]。虽然有些微生物对污染抗性较大,但会导致物种多样性单一化。大部分小型无脊椎动物也会由于土壤污染改变其生物多样性,重金属污染会影响线虫个体寿命,损坏线虫群落功能^[35]。跳虫在污染严重地区的物种丰富度最低^[36]。蚯蚓,相对于蚂蚁类对土壤污染有更强的敏感性。宋玉芳测定了 Cu、Zn、Pb、Cd 复合污染对蚯蚓的急性致死效应,结果表明污染导致了 100% 的蚯蚓死亡^[37]。有机农药如敌草隆会直接导致酸杆菌类微生物消失^[38],郑丽萍运用 Biolog-ECO 技术表明高浓度有机氯污染对土壤微生物有着明显的抑制作用^[39]。

2.4 转基因作物

转基因技术可以通过增强作物抗药性等用来提高作物产量,但它也被认为是土壤生物的一种污染源。转基因作物的外源基因及其表达产物可以通过作物残茬、根系分泌物、花粉等形式进入土壤生态系统。迄今对于转基因作物对土壤生物的影响大小没有定论,但是随着时间积累及生物富集作用的不断扩大,危害性是否显现具有高度的不可预见性。

转基因作物根系分泌物及残体进入土壤后,可能会与土壤微生物相互作用,对微生物群落结构及多样性构成影响。Donegan 等发现种植转基因紫花苜蓿比正常情况下土壤细菌群落功能多样性单一,但可培养的部分细菌数量增多^[40],钱迎倩研究发现带有几丁质酶的抗真菌转基因作物会减少土壤的菌根种群^[41]。目前研究较多的转 Bt 基因作物比常规作物对土壤真菌和细菌的数量有明显影响^[42]。也有不少研究发现转基因作物残茬对土壤微生物不构成明显影响^[43]。就土壤动物而言,转凝集素基因马铃薯的试验表明原生动物、变形虫生物量较对照有显著降低^[44];但线虫基本不会受到转基因作物影响^[45]。不同物种蚯蚓对于转基因作物呈现出不一致的响应趋势^[46]。转基因作物对土壤生物的影响依赖于很多因素,其对土壤生物多样性潜在威胁不可忽视。

2.5 外来植物入侵

地上和地下生态系统的紧密联系、相互影响,使得不同植物群落下的土壤生物群落结构及组成有较大差异。外来植物会通过改变根系物化学组成等来引起对土壤的物质输入变化,根系的不同会引起当地含水量、容重等土壤理化性质进而影响土壤生物多样性,并且入侵植物与土著植物凋落物数量与质量的差异也会影响土壤生物多样性,此外,外来植物入侵也可以通过改变土壤净初级生产力、氮循环方向等来改变土壤碳氮循环,威胁土壤生物多样性。

外来植物入侵可以影响菌根真菌的群落结构及丰富度,在北美洲森林由于欧洲十字花科植物入侵,减少了菌根真菌数量,对本地树木生长产生消极影响^[47]。Belnap 发现美国犹他州土著 C_3 、 C_4 植物土壤真菌种类和数量均高于入侵的旱雀麦^[48]。也有研究表明外来植物会显著增加土壤微生物的生物量^[49]。部分关于土壤小型节肢动物研究表明外来植物入侵会导致其数量降低,如美国东南部日本高桥草的入侵,降低了螨虫外其他小型节肢动物的数量^[50],Belnap 等人除了研究入侵植物土壤微生物多样性的变化外,也发现土壤无脊椎动物数量显著降低^[48]。但另一部分研究表明外来植物入侵会增加土壤动物多样性,如在对新西兰次南极区群岛外来植物的优势群落土壤的研究中 Gremmen 发现其与土著植物群落的土壤生物相比,有着更多大型的无脊椎动物和螨虫类^[51]。还有研究表明米草属植物入侵光滩后,土壤中的无脊椎动物丰富度比临近土壤高^[52]。Yeates 等人在比较了新西兰入侵植物和土著植物土壤中的无脊椎动物的多样性后,发现不同土壤生物对外来植物响应有不同的响应趋势^[53]。对于土壤大型动物,外

来植物入侵可能会增加土壤中蚯蚓的生物量^[54],但 French 等发现,入侵南非的金合欢属植物导致了土壤中蚂蚁个体数量显著减少^[55]。目前外来植物入侵对土壤生物多样性的威胁仍没有达成完全共识。

3 讨论与展望

土壤生物多样性及其所提供的生态系统服务对全球生态系统至关重要,在科学界也早已普遍认同^[56]。土壤生物多样性研究目前还处在起步阶段,防止其受到严重威胁是当务之急,很多土壤生物可能会在未来提供医药等各种潜在价值,现在都无法预知。研究土壤所有生物的潜在价值及其在生态系统中的地位还是一项十分艰巨的任务,并且全球目前并没有相对完整的土壤生物多样性观测背景值。明确各个因素对土壤生物多样性的胁迫机制,可以为今后量化综合评估土壤生物多样性所受的潜在威胁以及它们灭绝的可能性奠定基础,避免对人类造成无法预知的灾害。本文系统的总结了土壤生物多样性所面临的各个威胁因素,并且对不同因素的威胁机理进行了分析,但由于涉及土壤生物范围较广,并没有对每个土壤生物类群面临的威胁进行详尽具体的分析。

土壤生物多样性的威胁因素有些可以通过破坏土壤生物栖息地、改变土壤理化性质来直接引起生物多样性变化,有些则是由于地上生态系统结构组成变化导致土壤生态系统及土壤生物多样性变化。各因子间不仅能单独对生物多样性造成影响,还可以通过因子间相互关系共同改变土壤生物多样性。比如土壤的压实与封闭会导致土壤侵蚀,酸化会伴随着土壤中重金属的活化,部分农业管理措施会引起土壤有机质降低等等。

过去 20 a 对于土壤生物多样性的研究进展迅速,但目前对于土壤生物多样性的威胁因素的研究仍需要一些改进:(1) 虽然土壤生物多样性的各个威胁因素均有研究,但是仍存在很多不确定性,开展多因子协同威胁土壤生物多样性的研究更是鲜有报道,研究多因素的长期控制试验、了解各因素间交互作用及因果关系,并应用分子生物学、DNA、PCR 等多种先进技术揭示环境变化对土壤生物多样性及其生态功能的影响机制是十分必要。(2) 研究土壤生物多样性威胁因素,为量化综合评估土壤生物多样性潜在威胁提供了基础,未来需进一步深化环境变化对土壤生物多样性的影响机理研究,分离多影响因素的贡献程度,客观量化土壤生物多样性威胁变化趋势,建立土壤生物多样性威胁的综合评价指标体系,并进行土壤生物多样性威胁的空间制图,为土壤生物多样性保护提供理论和技术支撑。

参考文献:

- [1] Turbé A, De Toni A, Benito P, et al. Soil biodiversity: functions, threats and tools for policy makers [R]. Belgium: European Commission DG ENV, 2010.
- [2] Chauvel A, Grimaldi M, Barros E, et al. Pasture damage by an Amazonian earthworm [J]. *Nature*, 1999, 398 (6722): 32-33.
- [3] 赵艳云, 田家怡, 孙景宽, 等. 滨州北部贝沙堤生物多样性现状及影响因素的研究[J]. *水土保持研究*, 2010, 17 (2): 136-140.
- [4] 牛莉芹, 程占红. 五台山森林群落中物种多样性对旅游干扰的生态响应[J]. *水土保持研究*, 2012, 19(4): 106-111.
- [5] IUCN. IUCN Red List of threatened species [R]. Switzerland: The World Conservation Union, 2012.
- [6] Condé S, Jones W L, Torre-Marin A, et al. EU2010 biodiversity baseline [R]. Copenhagen: European Environment Agency, 2010.
- [7] Jeffery S, Gardi C. Soil biodiversity under threat-a review [J]. *Acta Societatis Zoologicae Bohemicae*, 2010, 74(1/2): 7-12.
- [8] Ljungström P O. Introduced earthworms of South Africa. On their taxonomy, distribution, history of introduction and on the extermination of endemic earthworms [J]. *Zool. Jb. Syst.*, 1972, 99: 1-81.
- [9] 孙丽娜, 宋戈. 松嫩高平原黑土区土地利用/覆被变化及其景观生态风险分析[J]. *水土保持研究*, 2012, 19(1): 148-158.
- [10] 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.
- [11] Eom A H, Hartnett D C, Wilson G W T. Host plant species effects on arbuscular mycorrhizal fungal communities in tallgrass prairie [J]. *Oecologia*, 2000, 122 (3): 435-444.
- [12] 张大勇, 姜新华. 遗传多样性与濒危植物保护生物学研究进展[J]. *生物多样性*, 1999, 7(1): 31-37.
- [13] Watt A, Fuller R, Chamberlain D, et al. Biodiversity Assessment: Final Report of the BioAssess Project, DI-2. Biodiversity and Global Change [R]. Luxembourg: Office for the Official Publications of the European Communities, 2004.
- [14] Fog K. The effect of added nitrogen on the rate of decomposition of organic matter [J]. *Biological Reviews*, 1988, 63(3): 433-462.
- [15] Donnison L M, Griffith G S, Hedger J, et al. Management influences on soil microbial communities and their function in botanically diverse haymeadows of northern England and Wales [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2000, 32(2): 253-263.
- [16] Bardgett, R D, Cook R. Functional aspects of soil animal diversity in agricultural grasslands [J]. *Applied Soil Ecology*, 1998, 10(3): 263-276.
- [17] Beare M H, Hendrix P F, Coleman D C. Water-stable aggregates and organic matter fractions in conventional-and no-tillage soils [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1994, 58(3): 777-786.
- [18] Lupwayi N Z, Arshad M A, Rice W A, et al. Bacterial diversity in water-stable aggregates of soils under conventional and zero tillage management [J]. *Applied Soil Ecology*, 2001, 16(3): 251-261.
- [19] 林英华, 黄庆海, 刘骅, 等. 长期耕作与长期定位施肥对农田土壤动物群落多样性的影响[J]. *中国农业科学*, 2010, 43(11): 2261-2269.
- [20] Lal R. Forest soils and carbon sequestration [J]. *Forest Ecology and Management*, 2005, 220(1/3): 242-258.
- [21] 卢萍, 徐演鹏, 谭飞, 等. 黑土区农田土壤节肢动物群落与土壤理化性质的关系[J]. *中国农业科学*, 2013, 46 (9): 1848-1856.
- [22] Pimentel D, Harvey C, Resosudarmo P, et al. Environmental and economic costs of soil erosion and conservation benefits [J]. *Science*, 1995, 267(5201): 1117-1123.
- [23] Owojori O J, Reinecke A J, Voua-Otomo P, et al. Comparative study of the effects of salinity on life-cycle parameters of four soil-dwelling species (*Folsomia candida*, *Enchytraeus doerjesi*, *Eisenia fetida* and *Aporrectodea caliginosa*) [J]. *Pedobiologia*, 2009, 52(6): 351-360.
- [24] Liu Y, Yu Z, Gu W, et al. Diversity of carabids (Coleoptera, Carabidae) in the desalinized agricultural landscape of Quzhou county, China [J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2006, 113(1/4): 45-50.
- [25] 刘继亮, 李锋瑞, 牛瑞雪, 等. 黑河中游干旱绿洲土壤盐渍化对大型土壤动物群落的影响[J]. *应用生态学报*, 2012(06): 1551-1561.
- [26] Bouwman L A, Arts W B M. Effects of soil compaction on the relationships between nematodes, grass production and soil physical properties [J]. *Applied Soil Ecology*, 2000, 14(3): 213-222.
- [27] Degens B P, Schipper L A, Sparling G P, et al. Decreases in organic C reserves in soils can reduce the catabolic diversity of soil microbial communities [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2000, 32(2): 189-196.
- [28] 魏宗强. 城市封闭土壤有机碳变化及其影响因素[D]. 南京: 南京大学, 2013.
- [29] 张萍华, 闵航, 申秀英, 等. 模拟酸雨对白术根际微生物的影响[J]. *浙江师范大学学报: 自然科学版*, 2005, 28 (3): 309-312.

- [30] Korthals G W, Smilauer P, Van Dijk C, et al. Linking above-and below-ground biodiversity: Abundance and trophic complexity in soil as a response to experimental plant communities on abandoned arable land [J]. *Functional Ecology*, 2001, 15(4): 506-514.
- [31] Curry, J. Factors affecting earthworm abundance in soils [C]. Florida: CRC Press, Inc, 1998: 37-64.
- [32] Hendrix P F, Parmelee R W. Decomposition, nutrient loss and microarthropod densities in herbicide-treated grass litter in a Georgia piedmont agroecosystem [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1985, 17(4): 421-428.
- [33] Li Z, Xu J, Tang C, et al. Application of 16S rDNA-PCR amplification and DGGE fingerprinting for detection of shift in microbial community diversity in Cu-, Zn-, and Cd-contaminated paddy soils [J]. *Chemosphere*, 2006, 62(8): 1374-1380.
- [34] Roane T, Pepper I. Microbial responses to environmentally toxic cadmium [J]. *Microbial ecology*, 1999, 38(4): 358-364.
- [35] Chen G, Qin J, Shi D, et al. Diversity of soil nematodes in areas polluted with heavy metals and polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in Lanzhou, China [J]. *Environmental Management*, 2009, 44(1): 163-172.
- [36] Fiera C. Biodiversity of Collembola in urban soils and their use as bioindicators for pollution [J]. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 2009, 44(8): 868-873.
- [37] 宋玉芳, 周启星, 许华夏, 等. 土壤重金属污染对蚯蚓的急性毒性效应研究 [J]. *应用生态学报*, 2002, 13(2): 187-190.
- [38] Jacobsen C S, Hjelms M H. Agricultural soils, pesticides and microbial diversity [J]. *Current Opinion in Biotechnology*, 2014, 27: 15-20.
- [39] 郑丽萍, 龙涛, 林玉锁, 等. Biolog-ECO 解析有机氯农药污染场地土壤微生物群落功能多样性特征 [J]. *应用与环境生物学报*, 2013, 19(5): 759-765.
- [40] Donegan K K, Palm C J, Fieland V J. Changes in levels, species and DNA fingerprints of soil microorganisms associated with cotton expressing the *Bacillus thuringiensis* var. *kurstaki* endotoxin [J]. *Applied Soil Ecology*, 1995, 2(2): 111-124.
- [41] 钱迎倩, 马克平. 经遗传修饰生物体的研究进展及其释放后对环境的影响 [J]. *生态学报*, 1998, 18(1): 1-9.
- [42] 王洪兴, 陈欣, 唐建军, 等. 转 Bt 基因水稻秸秆降解对土壤微生物可培养类群的影响 [J]. *生态学报*, 2004, 24(1): 89-94.
- [43] Saxena, D, Stotzky G. *Bacillus thuringiensis* (Bt) toxin released from root exudates and biomass of Bt corn has no apparent effect on earthworms, nematodes, protozoa, bacteria, and fungi in soil [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2001, 33(9): 1225-1230.
- [44] 汪海珍, 徐建民, 谢正苗. 转基因作物在土壤环境中的残留及其对土壤生物的影响 [J]. *土壤*, 2005, 37(4): 370-374.
- [45] Griffiths B, Geoghegan I, Robertson W. Testing genetically engineered potato, producing the lectins GNA and Con A, on non-target soil organisms and processes [J]. *Journal of Applied Ecology*, 2000, 37(1): 159-170.
- [46] Vercesi M L, Krogh P H, Holmstru M. Can *Bacillus thuringiensis* (Bt) corn residues and Bt-corn plants affect life-history traits in the earthworm *Aporrectodea caliginosa* [J]. *Applied Soil Ecology*, 2006, 32(2): 180-187.
- [47] Campbell S A, Powell J R, Callaway R M, et al. Invasive plant suppresses the growth of native tree seedlings by disrupting belowground mutualisms [J]. *PLoS Biology*, 2006, 4(5): e140.
- [48] Belnap J, Phillips S L. Soil biota in an ungrazed grassland: response to annual grass (*Bromus tectorum*) invasion [J]. *Ecological Applications*, 2001, 11(5): 1261-1275.
- [49] Saggarr S, McIntosh P D, Hedley C B, et al. Changes in soil microbial biomass, metabolic quotient, and organic matter turnover under *Hieracium* (*H. pilosella* L.) [J]. *Biology and Fertility of Soils*, 1999, 30(3): 232-238.
- [50] Saggarr S, McIntosh P D, Hedley C B, et al. Microstegium vimineum invasion changes soil chemistry and microarthropod communities in Cumberland Plateau forests [J]. *Southeastern Naturalist*, 2009, 8(1): 141-156.
- [51] Gremmen N J M, Chown S L, Marshall D J. Impact of the introduced grass *Agrostis stolonifera* on vegetation and soil fauna communities at Marion Island, sub-Antarctic [J]. *Biological Conservation*, 1998, 85(3): 223-231.
- [52] Dumbauld B R, Peoples M, Holcomb L, et al. The potential influence of the aquatic weed *Spartina alterniflora* and control practices on clam resources in Willapa Bay, Washington [C] // *Proceedings of the Second International Spartina Conference*. Olympia, WA: Washington State University, 1997: 51-57.
- [53] Yeates G W, Williams P A. Influence of three invasive weeds and site factors on soil microfauna in New Zealand [J]. *Pedobiologia*, 2001, 45(4): 367-383.
- [54] Kourtev P S, Huang W Z, Ehrenfeld J G. Differences in earthworm densities and nitrogen dynamics in soils under exotic and native plant species [J]. *Biological Invasions*, 1999, 1(2/3): 237-245.
- [55] French K, Major R E. Effect of an exotic *Acacia* (Fabaceae) on ant assemblages in South African fynbos [J]. *Austral Ecology*, 2001, 26(4): 303-310.
- [56] 时雷雷, 傅声雷. 土壤生物多样性研究: 历史, 现状与挑战 [J]. *科学通报*, 2005, 59(6): 493-509.