# 凋落物分解对土壤生物的影响*

许湘琴[1] 林植华[1,2] 陈慧丽[1**]

([1] 杭州师范大学环境与生命科学学院, 杭州 310036; [2] 丽水学院化学与生命科学学院, 浙江丽水 323000)

**摘 要** 凋落物分解是生态系统物质循环和能量流动的重要环节,而土壤生物是凋落物分解的主要完成者。大量研究分析了土壤生物在凋落物分解中的作用,然而有关凋落物分解对土壤生物影响的研究则相对较少,致使我们对凋落物分解和土壤生物的相互作用了解依然不够深入。本文综述了凋落物对土壤微生物和土壤动物的影响,并进一步探讨了其影响机制。凋落物对土壤微生物的影响与凋落物类型或组成、在土壤中的掩埋位置及其破碎化程度紧密相关;大多数研究表明凋落物对土壤动物群落结构有明显影响;凋落物对土壤生物的影响主要通过直接改变土壤生物的食源和生境。今后需要加强跨区域长期定位实验研究,注重整合研究凋落物分解和生态系统过程,深入研究凋落物分解与土壤生物的相互作用机制。

**关键词** 凋落物分解; 土壤微生物; 土壤动物; 影响机制

**中图分类号** Q938 **文献标识码** A **文章编号** 1000-4890(2011)6-1258-07

**Effects of litter composition on soil organisms: A review.** XU Xiang-qin[1], LIN Zhi-hua[1,2], CHEN Hui-li[1**] ([1]*The College of Environmental and Life Science, Hangzhou Normal University, Hangzhou* 310036, *China*; [2]*School of Chemistry and Life Sciences, Lishui University, Lishui* 323000, *Zhejiang, China*). *Chinese Journal of Ecology*, 2011, **30**(6): 1258-1264.

**Abstract**: Litter decomposition is a key process of nutrient cycle and energy flow in ecosystems, while soil microorganism and soil fauna are the main executants of litter decomposition. There are many studies addressed on the roles of soil organisms in litter decomposition, but the studies on the effects of litter decomposition on soil organisms are relatively scarce, and the interactions between litter decomposition and soil organisms remain largely unclear. This paper briefly reviewed the studies on the effects of litter decomposition on soil microorganism and soil fauna, and discussed the key underlying mechanisms. The effects of litter decomposition on soil microorganism not only depend on litter properties (type or composition) and litter's fragmentation degree, but also relate to the litter's buried location. Many studies indicated that litter decomposition had remarkable effects on the community structure of soil fauna, and these effects were mainly from the alternations of soil organisms' food source and habitat. It was proposed that the future research should focus on the long-term experimental studies across regions, integrated research on litter decomposition and ecosystem processes, and affecting mechanisms of litter decomposition on soil organisms.

**Key words**: litter decomposition; soil microorganism; soil fauna; affecting mechanism.

凋落物分解包括水溶性化合物的淋溶、土壤动物对凋落物的破碎、由微生物进行的物质转换以及有机物和矿质化合物向土壤转化等过程(Loranger *et al.*,2002; Hättenschwiler *et al.*,2005),是生态系统物质循环和能量流动中的重要环节(Wardle *et al.*,2004;林波等,2004)。参与凋落物分解过程中的土壤生物可分为土壤微生物和土壤动物两大类群,微生物包括细菌、真菌和放线菌,土壤动物包括原生动物类群的鞭毛虫、纤毛虫、肉足虫,微型节肢动物(如土壤螨类和弹尾目昆虫)以及线虫、线蚓和蚯蚓等。在陆地生态系统中,土壤生物区系是食物网中

* 浙江省教育厅项目(Y200907936)和杭州师范大学科技创新基金项目(2009XJ009)资助。

** 通讯作者 E-mail: huilichen@fudan.edu.cn

收稿日期: 2010-11-16 接受日期: 2011-02-27

分解者的重要组成部分,也是养分矿化作用等重要生态过程的主要调节者(Wardle,1995;Bardgett & Wardle,2003)。土壤生物在凋落物分解过程中起着非常重要的作用,大型土壤动物通过凋落物破碎化、土壤微环境改变、从而影响中小型土壤动物及微生物;中小型土壤动物影响微生物类型、数量和活性,通过分泌排泄物刺激微生物生长(Edwards & Heath,1963),而微生物直接参与凋落物的分解;同时,凋落物作为食物链的一个环节,为土壤微生物和土壤动物提供物质和能量,并为它们提供栖息地,与土壤生物亚系统相联系。在陆地生态系统中,凋落物释放的化感物质抑制、排挤和毒杀其他生物,为植物营造更广阔的生存和发展空间。有自毒作用的凋落物则使自身种群受到抑制和调节。因此,了解凋落物分解对土壤生物的作用,是认识生态系统内物质和能量交换过程的基础(张静等,2008)。

目前,大量关于凋落物分解的研究都集中于土壤生物对植物凋落物分解的影响,而关于凋落物分解对土壤生物影响方面的研究还比较少,限制了我们对其模式和机理的理解(Hättenschwiler *et al.*,2005)。为此,本文综述了凋落物对土壤微生物、土壤动物的影响,探讨了其影响机制,并对未来的研究提出一些建议,为今后凋落物研究提供新思路。

## 1 凋落物分解过程中的养分释放

凋落物分解是一个重要的生态系统过程(McMahon *et al.*,2005)。一方面凋落物的分解使植物中的无机元素逐步归还土壤,保持了土壤肥力,保证了生产力的稳定;另一方面凋落物也给土壤生物提供了营养物质,是生态系统中腐屑食物链的重要物质基础。

凋落物通过淋溶和分解,将各种元素释放出来,归还土壤无机养分库中,并可以被植物根系吸收利用,实现生态系统内部化学元素的交换,即生物地球化学循环。Chapin 等(2002)研究表明,大多数生态系统中植物所吸收的土壤养分,90% 以上的氮和磷以及 60% 以上的矿质元素都来自于植被归还给土壤的养分再循环。凋落物分解会影响土壤理化性质,而土壤理化性质和土壤生物息息相关。Armoson (1984)研究表明,凋落物分解的最终产物——腐殖质是土壤腐殖质层的主要成分,影响土壤的理化性质,在土壤的发育中发挥重要作用,与土壤亚系统相联系。作为凋落物的主要组成成分的碳水化合物和木质素,能供给土壤生物发育和生长所需的能量,并能供给结合到它们体内的碳素。水溶性化合物(如单糖)通过土壤微生物迅速地被利用,但其他碳水化合物的长链分子的分解或破碎,因其分子大而进行较慢。Dinakaran 和 Krishnayya(2010)根据研究推断,地上凋落物改变土壤中有机质含量。而此前,Leonard (2006)通过研究证明,土壤中有机质含量和凋落物上的小型节肢动物数量呈正相关。

## 2 凋落物对土壤生物的影响

### 2.1 对土壤微生物的影响

凋落物的分解是一个相对较长的过程,在分解过程中凋落物的化学构成发生变化,同时土壤理化环境也发生变化,这些变化会引起分解者的数量及其群落构成的改变(Andersson *et al.*,2004)。王纪杰等(2008)通过培养实验发现,在毛竹凋落物分解过程中,微生物利用碳源的功能多样性指数随着时间的延长而呈下降态势,直到 30 周时呈现明显下降态势。其原因是由于不同微生物有着各自新陈代谢特征和生理需求,土壤微生物多样性的下降,使土壤微生物群落趋于简单化,群落功能也趋于单一化(严海元等,2010)。

研究发现,凋落物分解对真菌/细菌有明显的影响。在植物没有衰老腐烂前,已有微生物存在(Tester,1988)。植物在分解过程中,真菌和细菌的生物量会有所升高(Malosso *et al.*,2004)。真菌/细菌比例在分解过程中升高(Lundquist *et al.*,1999;Henriksen & Breland,2002;Malosso *et al.*,2004),但是也有一些研究发现,其比例不变甚至下降(Broder & Wagner,1988)。植物凋落物的分解主要依靠真菌群落(Holland & Coleman,1987;Frey *et al.*,1999;Guggenberger *et al.*,1999;Six *et al.*,2002)。Potthoff 等(2008)通过 28 d 的室内培养发现,玉米茎杆凋落物分解过程中真菌碳/细菌碳的比例从 3.6 上升到 5.0,真菌麦角固醇上升了 60%,真菌在分解过程中占优势地位。McMahon (2005)等通过 PLFA 分析,发现在 $^{13}C$ 标记的黑麦草凋落物分解过程中,真菌标记(18∶2ω6,9)在各处理组中都很高。也有研究表明,植物凋落物分解中细菌为主要的分解者(Six *et al.*,2002),如刘增文等(2008)研究发现,在落叶松和油松林地分别客置灰楸(*Catalpa fargesii*)和锐齿栎(*Quercus aliena* var. *acuteserrata*)枯落叶后,微生物数量及其微生物碳和氮含量均有所增加,其中

细菌的增幅最大,其次是放线菌,真菌的增幅稍少。这可能和不同研究中用不同方法观察到不同类型的真菌和细菌有关(McMahon *et al.*,2005),也可能源于凋落物本身的质地,特别是碳氮比,含氮量高的凋落物适合细菌快速生长,而含碳高的凋落物主要由木质素组成,适合真菌生长(严海元等,2010;赵溪等,2010)。

植物凋落物类型或组成的变化会改变土壤微环境,从而对土壤微生物造成影响(Hättenschwiler *et al.*,2005)。Nicolardot 等(2007)将小麦秸秆和黑麦残渣分别放在土壤中分解,发现细菌的空间异质性在黑麦分解过程中比在小麦秸秆中大。Trinder 等(2009)采用凋落物袋方法(凋落物和相应的活植物材料混合),发现羊胡子草(*Eriophorum vaginatum*)、窄叶羊胡子草(*E. angustifolium*)和苏格兰石楠(*Calluna vulgaris*)的凋落物对真菌类型组成有显著的影响,这可能和袋中活植物材料所携带的内生真菌有关。刘增文等(2008)研究发现,混合凋落物能够促进土壤微生物生物量的提高,且凋落物不同的混合方式对土壤微生物生物量促进作用不同。Kubartová 等(2009)研究了法国南部温带森林凋落物分解中的真菌多样性,发现在分解的初期(4 个月前)阔叶树欧洲山毛榉(*Fagus sylvatica*)的凋落物比针叶树挪威云杉(*Picea abies*)以及它们的混合样凋落物拥有更多种类的真菌,而在分解的后期(24 个月后)混合凋落物样品中的真菌丰富度显著高于单一的山毛榉和云杉凋落物,并且混合凋落物的分解速率也显著高于单一的山毛榉和云杉凋落物。多样的凋落物类型能够为微生物提供多样的生态位,因而混合凋落物比单一凋落物有更多适应性的微生物存在,从而有着更高的分解速率(严海元等,2010)。

凋落物所在土壤中的位置也会对土壤微生物产生影响。McMahon 等(2005)通过 PLFA 分析发现,在$^{13}C$ 标记的黑麦草凋落物分解过程中,土壤不同层微生物空间异质性差异显著,埋在土壤里的凋落物比置于土壤表层的凋落物中含有更多的标记$^{13}C$。与此结果一致,较早的研究也发现,在土壤表层的植物凋落物分解比埋在土壤里的凋落物分解速度慢(Holland & Coleman,1987)。Bastian 等(2009)发现,细菌和真菌群落随着凋落物所处的位置发生显著变化:成熟小麦秸秆分解刺激微生物群落的遗传结构发生变化,这种变化会随凋落物在土壤中所处的位置(土壤表层、距离土壤表层 6 mm 以下)发生变化,并且真菌群落比细菌群落空间异质性更大,其原因可能是在不同空间上微生物群落的营养和功能生态位不同。

凋落物破碎化程度也会对土壤微生物产生影响。Witkamp (1963)对白栎、舒氏栎、美国水青、红桑和糖槭凋落物上的微生物计数 1 年以上,发现微生物数量与凋落物的粉碎程度呈正相关。Tarafdar 等(2001)研究发现,在小麦秸秆分解过程中,其长度影响微生物活性和生物量。小麦秸秆越短,其影响越大。一个较快的分解系统中,小麦秸秆的长度不能超过 1 cm。研究者通常在凋落物分解实验中,根据实验需要,把凋落物剪短,以提高微生物活性和生物量,利于其分解(Hättenschwiler *et al.*,2005;McMahon *et al.*,2005;Potthoff *et al.*,2008;Bastian *et al.*,2009)。

一些学者比较系统地研究了分解过程中微生物群落结构和功能多样性及其演替过程(McMahon *et al.*,2005)。$^{13}C$ 标记的 PLFA 分析法使我们更加全面了解微生物群落结构及各微生物群落的功能。如,McMahon 等(2005)通过 PLFA 分析法发现,黑麦草凋落物中的$^{13}C$ 在其分解过程中衍生到微生物脂质中。分解过程有多种微生物参与,众多的微生物在分解过程中必然产生竞争,从而导致演替现象的发生。有研究表明,在玉米残渣分解过程中,微生物会出现不同的群落演替,细菌和真菌的群落结构在早期和晚期有显著不同(Bastian *et al.*,2009)。

**2.2** 对土壤动物的影响

土壤动物是指栖息在包括大型植物残体在内的土壤环境中,并且在那里进行活动的各类动物(Six *et al.*,2002),它们是土壤生态系统中的重要组成部分。尽管凋落物分解主要是微生物活动的结果,但土壤动物对凋落物的制约以及对微生物的影响也十分重要(Coleman & Crossley,1996)。大型土壤动物可直接碎裂和取食凋落物,从而使土壤中和凋落物上的微生物群落结构发生变化,特别是真菌和细菌的变化。而微生物直接参与凋落物的分解,并且其群落结构变化还会引起以土壤微生物为食的小型和微型土壤动物发生变化(Armoson,1984)。土壤动物群落结构随凋落物分解过程中凋落物质量、化学成分以及微生物组成的改变而发生变化。因此,凋落物分解过程中,土壤动物组成的有序变化能够反映出凋落物结构、化学和生物特性,一些土壤动物种的出现或消失以及取食方式的改变,也会对食物网

结构产生一定的影响(林英华等,2006)。

迄今为止,大量的研究关注于土壤动物对凋落物分解的影响(Hättenschwiler *et al.*,2005),而关于凋落物分解对土壤动物影响方面的研究很少。一些研究表明,土壤动物群落结构在凋落物分解过程中发生变化。Hasegawa 和 Hiroshi(1995)研究发现,在分解的早期阶段,真菌处于生物量增值期,弹尾目等食菌性类群取食真菌为该阶段土壤动物的主要取食特征;在分解的后期,真菌生物量大幅度减少,土壤动物取食植物碎屑成为主要取食特征。徐国良等(2005)利用凋落物网袋法,在 18 个月的时间内调查分析了凋落物分解过程中的土壤动物密度,发现各凋落物袋分解中土壤动物密度均体现了前期较低、增长缓慢,后期较高、变化迅速的特点。林英华等(2005)发现,在百望山枸树(*Broussonetia papyrifer*)落叶分解过程中,大型土壤动物和中小型土壤动物的数量和类群变化相似,并均在 7 月达到最高,9 月则开始下降,其变化与凋落物分解的速度和所释放出的营养物质浓度有着密切的关联。此后,林英华等(2006)采用凋落袋法发现土壤动物多样性随辽东栎(*Quercus liaotungensis*)或辽东栎和油松(*Pinus tabulaeformis*)混交林叶片凋落物分解而明显增加,土壤动物群落异质性较高,土壤动物优势类群与凋落物分解残存量没有明显的相关性。值得一提的是,他们的研究也表明,土壤动物多样性在单一辽东栎叶片分解过程和辽东栎、油松混交林叶片分解过程之间没有明显的差异。王邵军等(2010)对北亚热带常绿阔叶林米槠(*Castanopsis carlesii*)凋落叶分解的研究发现,凋落物分解过程中土壤动物类群数在分解前期较多,中、小型土壤动物个体数量在分解中期剧增。罗媛媛等(2010)研究了不同常绿阔叶林群落优势种木荷(*Schima superba*)凋落叶的分解速率及土壤节肢动物群落的结构和动态,发现不同分解阶段中土壤节肢动物的多样性均有一定的变化。凋落物分解过程中,土壤动物不同类群对凋落物残存量变化的不同反应可能与各自的取食习性相关。也有研究表明,在凋落物分解过程中土壤动物群落结构无显著变化,如张雪萍等(2000)发现,凋落物分解过程中,凋落物分解量与土壤动物个体数之间的没有明显相关性,有关土壤动物多样性分析表明,土壤动物的多样性与样品分解过程无明显关系。

也有一些研究表明,凋落物类型或组成会对土壤动物产生影响。Crossley 和 Hoglund(1962)发现,山茱萸(*Cornus officinalis*)叶子的分解袋内比火炬松(*Pinus taeda*)和白栎(*Quercus fabri*)树叶具有更多的微节肢动物。Sadayoshi 等(2000)通过比较灌木、木薯、橡胶和草莓凋落物分解过程中土壤中型动物和蚯蚓数量,发现中型土壤动物在灌木凋落物分解过程中数量最多,而蚯蚓数量在草莓凋落物中数量最多。Simoneta(2004)研究发现,凋落物组成多样性越高,土壤无脊椎动物群落空间异质性越高。Chen 等(2007)研究发现,与土著种芦苇(*Phragmites australis*)相比,入侵物种互花米草(*Spartina alterniflora*)凋落物分解过程中能够产生更多的食细菌线虫。但是,官昭瑛等(2010)研究发现,本地植物红锥(*Castanopsis hystrix*)和薏米(*Semen coicis*)以及外地植物托里桉(*Eucalyptus torelliana*)和马缨丹(*Lantana camara*)凋落物上,土壤动物多样性及其摄食功能群组成没有显著的差异。这在很大程度上与凋落物自身的理化特性有关,也可能是土壤动物对研究所选用的本地和外来树叶没有特别的取食偏好,从而造成定殖的随机性,也可能是底栖动物仅仅利用凋落物作为生活场所而并不是作为取食的对象。

**2.3** 凋落物对土壤生物的影响机制

植物凋落物分解会影响土壤生物群落的食物源和生境,从而对土壤生物群落造成影响。并且一种土壤生物的变化,会影响或导致其他生物的相应变化。整个分解过程包括许多细菌、真菌、无脊椎动物参与的两种不同的食物链,即碎屑食物链和腐食食物链。当植物的地上部分存活时,淋溶作用伴随着微生物的分解作用(陶世如,2009)。土壤微生物比较快地迁移到凋落物表面,数量迅速增加,随着线虫、中小型节肢动物和原生动物的迁移,它们的捕食作用使得细菌和真菌的数量减少。伴随着淋溶的过程,土壤动物通过将凋落物破碎化,把大块的有机物碎解成小块,这些小块有机物既为土壤动物提供食物来源,又为微生物生长繁殖提供了能量和养分(Hendrix *et al.*,1986;徐国良等,2005;李云乐等,2006;陶世如,2009)。李云乐等(2006)研究发现,麦秸最初被分解的是蛋白质、水溶性物和半纤维素等易分解成分,直接以其为食的细菌、真菌和原生动物数量较多。并且温度和水分适宜,蚯蚓的数量也逐渐增多。在有机物分解前期秸秆分解的相对速率较大。

土壤动物与土壤微生物的相互作用关系错综复

杂,既有协同作用,又有制约作用(Anderson & Ineson,1984;Swift & Boddy,1984)。一方面,土壤动物可强烈影响微生物群落,土壤无脊椎动物低水平的选择性牧食作用调控土壤微生物的种群、数量和散布(Parkinson *et al.*,1979;Newell,1984),其分泌排泄物刺激微生物生长(Kautz & Topp,1998)。有研究表明,土壤动物通过取食细菌和真菌及将微生物繁殖体向新的位点运输直接调节微生物的活动。土壤动物消耗微生物生物量后,排泄出无机氮,然后这些无机氮素又进一步供给微生物或被植物所吸收利用(陈国康和曹志平,2005;张静等,2008)。食腐动物的粪便和碎裂凋落物增加了表面积,增大微生物种群定居的空间(Deniel & Anderson,1992);另一方面,微生物降解和脱除凋落物的化感物质,可改善土壤动物的食物质量(Swift & Boddy,1984),微生物生物量的快速周转可为土壤动物提供重要的食物资源(Zimmer & Topp,1998)。

## 3 展 望

综上所述,可以总结出:(1)凋落物分解对真菌和细菌的影响不同,凋落物类型或组成、在土壤中所处的位置及破碎化程度会对土壤微生物产生影响;(2)在凋落物分解过程中,土壤动物群落结构发生变化,凋落物类型或组成会对土壤动物产生影响;(3)植物凋落物分解会影响土壤生物群落的食物和生境,从而对土壤生物群落造成影响。

基于目前的研究现状,认为凋落物分解对土壤生物的影响研究,在以下几方面亟待加强:(1)跨区域长期定位研究。植物凋落物分解是一个缓慢的过程,需要较长的时间,才能反映出动态分解过程。而目前的很多研究都是在短期内观测,无法确定是否反映参与凋落物分解过程的主要土壤生物群落。并需在全球范围建立生态系统定位研究站网络,通过相对统一研究方法,获得一批可比性强的数据进行综合。(2)注重整合性研究。植物凋落物分解与生态系统过程之间有着密切的联系,很难完全割裂开来单独评价植物凋落物分解对土壤生物的影响。因此,以后的研究应注重整合性研究植物凋落物分解和生态系统过程。(3)凋落物分解在生态系统信息传递中的作用有待深入系统的研究。凋落物所携带的次生化学物质的释放可以对栖居于土壤和凋落物的动物、微生物产生影响。由于关于生态系统中信息传递的研究还很不充分,人们对凋落物在生态系统信息传递中的作用也了解不多,有待于未来深入系统的研究。(4)机理性研究有待深入。如建立包含多个分解因子的数量模型,目前的研究主要以单一因素建立分解速率方程。(5)新方法和新技术的应用。随着现代生态学的发展,遥感技术、近红外光谱技术(NIRS)、稳定同位素技术和现代分子生物学技术的不断应用,为更加深入地探讨植物凋落物分解对土壤生物影响机制提供了便利和新的视野。

**致 谢** 感谢南京大学牛克昌老师对文章的修改。

**参考文献**

陈国康, 曹志平. 2005. 土壤生物的生态学研究. 土壤通报, **36**(2): 259-264.

官昭瑛, 何 莹, 安玉蓉, 等. 2010. 外来植物凋落物分解对底栖动物多样性及其摄食功能群的影响. 生态学报, **30**(11): 2828-2835.

林 波, 刘 庆, 吴 彦, 等. 2004. 森林凋落物研究进展. 生态学杂志, **23**(1): 60-64.

林英华, 杨德付, 张夫道, 等. 2006. 栎林凋落层土壤动物群落结构及其在凋落物分解中的变化. 林业科学研究, **19**(3): 331-336.

林英华, 张夫道, 刘海东. 2005. 百望山土壤动物群落结构在拘树落叶分解中的变化. 动物学杂志, **40**(3): 60-66.

刘增文, 段而军, 高文俊, 等. 2008. 秦岭山区人工林地枯落叶客置对土壤生物、化学性质的影响. 应用生态学报, **19**(4): 704-710.

李云乐, 乔玉辉, 孙振钧, 等. 2006. 不同土壤培肥措施下农田有机物分解的生态过程. 生态学报, **26**(6): 1933-1939.

罗媛媛, 袁金凤, 沈国春, 等. 2010. 常绿阔叶林片段中木荷凋落叶分解速率及中小型土壤节肢动物群落的结构动态. 应用生态学报, **21**(2): 265-271.

陶世如. 2009. 互花米草凋落物空中分解的季节动态:原位和凋落物袋分解法比较(硕士学位论文). 上海: 复旦大学.

王纪杰, 徐秋芳, 姜培坤. 2008. 毛竹凋落物对阔叶林土壤微生物群落功能多样性的影响. 林业科学, **44**(9): 146-151.

王邵军, 阮宏华, 汪家社, 等. 2010. 武夷山土壤动物群落结构在凋落物分解过程中的变化. 西南林学院学报, **30**(6): 43-47.

徐国良, 莫江明, 周国逸, 等. 2005. 氮沉降下鼎湖山森林凋落物分解及与土壤动物的关系. 生态环境, **14**(6): 901-907.

严海元, 辜夕容, 申 鸿. 2010. 森林凋落物的微生物分解. 生态学杂志, **29**(9): 1827-1835.

张 静, 王邵军, 阮宏华. 2008. 土壤动物对森林凋落物分解的影响. 南京林业大学学报(自然科学版), **32**(5): 140-144.

张雪萍, 张 毅, 侯威岭, 等. 2000. 小兴安岭针叶凋落物的分解与土壤动物的作用. 地理科学, **20**(6): 552-556.

赵 溪, 李君剑, 李洪建, 等. 2010. 关帝山不同植被恢复类型对土壤碳、氮含量及微生物数量的影响. 生态学杂志, **29**(11): 2102-2110.

Armoson KA(林伯群译). 1984. 森林土壤: 性质和作用. 北京: 科学出版社.

Andersson M, Kjøller A, Struwe S. 2004. Microbial enzyme activities in leaf litter, humus and mineral soil layers of European forests. *Soil Biology and Biochemistry*, **36**: 1527-1537.

Anderson JM, Ineson P. 1984. Interaction between microorganisms and soil invertebrates in nutrient flux pathways of forest ecosystems// Anderson JM, Rayner ADM, Walton DWH, eds. Invertebrate Microbial Interacions. Cambridge: Cambridge University Press: 59-88.

Bardgett R, Wardle D. 2003. Herbivore-mediated linkages between aboveground and belowground communities. *Ecology*, **84**: 2258-2268.

Bastian F, Bouziri L, Nicolardot B, *et al*. 2009. Impact of wheat straw decomposition on successional patterns of soil microbial community structure. *Soil Biology and Biochemistry*, **41**: 262-275.

Broder M, Wagner G. 1988. Microbial colonization and decomposition of corn, wheat, and soybean residue. *Soil Science Society of America Journal*, **52**: 112-117.

Chapin FS, Matson PA, Mooney HA. 2002. Principles of Terrestrial Ecosystem Ecoloyg. New York: Springer Verlag.

Chen HL, Li B, Fang CM, *et al*. 2007. Exotic plant influences soil nematode communities through litter input. *Soil Biology and Biochemistry*, **39**: 1782-1793.

Coleman DC, Crossley DA. 1996. Fundamentals of Soil Ecology. New York: Academic Press.

Crossley DA, Hoglund MP. 1962. A litter-bag mehtod for the study ofmicroarthropods inhabiting leaf litter. *Ecology*, **43**: 571-573.

Deniel O, Anderson JM. 1992. Microbial biomass an activity in constrasting soil materials after passage throgh the gut of the earthworm *Lumbriicus rubellus* Hoffmeister. *Soil Biology and Biochemistry*, **24**: 465-470.

Dinakaran J, Krishnayya NSR. 2010. Variations in soil organic carbon and litter decomposition across different tropical vegetal covers. *Current Science*, **99**: 1051-1060.

Edwards C, Heath G. 1963. The role of soil animals in breakdown of leaf material// Doeksen J, van der Drift J, eds. Soil organisms. Amesterdam: North-Holland Publish Company: 75-84.

Frey S, Elliott E, Paustian K. 1999. Bacterial and fungal abundance and biomass in conventional and no-tillage agroecosystems along two climatic gradients. *Soil Biology and Biochemistry*, **31**: 573-585.

Guggenberger G, Frey S, Six J, *et al*. 1999. Bacterial and fungal cell-wall residues in conventional and no-tillage agroecosystems. *Soil Science Society of America Journal*, **63**: 1188-1198.

Hasegawa M, Hiroshi T. 1995. Changes in feeding attributes offour collembolan populations during the decomposition process of pineneedles. *Pedobiologia*, **39**: 155-169.

Hättenschwiler S, Tiunov A, Scheu S. 2005. Biodiversity and litter decomposition in terrestrial ecosystems. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, **36**: 191-218.

Hendrix P, Parmelee R, Crossley Jr D, *et al*. 1986. Detritus food webs in conventional and no-tillage agroecosystems. *BioScience*, **36**: 374-380.

Henriksen T, Breland T. 2002. Carbon mineralization, fungal and bacterial growth, and enzyme activities as affected by contact between crop residues and soil. *Biology and Fertility of Soils*, **35**: 41-48.

Holland E, Coleman D. 1987. Litter placement effects on microbial and organic matter dynamics in an agroecosystem. *Ecology*, **68**: 425-433.

Kautz G, Topp W. 1998. Nachhaltige waldbauliche Maβnahmen zur Verbesserung der Bodenqualitat. *Forstwissenschaftliches Centralblatt*, **117**: 23-43.

Kubartová A, Ranger J, Berthelin J, *et al*. 2009. Diversity and decomposing ability of saprophytic fungi from temperate forest litter. *Microbial Ecology*, **58**: 98-107.

Leonardo K. 2006. Decomposition and microarthropod abundance in litter and soil in a southern appalachian wetlands complex. Proceedings of the National Conference On Undergraduate Research, 301-307.

Loranger G, Ponge J, Imbert D, *et al*. 2002. Leaf decomposition in two semi-evergreen tropical forests: Influence of litter quality. *Biology and Fertility of Soils*, **35**: 247-252.

Lundquist E, Jackson L, Scow K, *et al*. 1999. Changes in microbial biomass and community composition, and soil carbon and nitrogen pools after incorporation of rye into three California agricultural soils. *Soil Biology and Biochemistry*, **31**: 221-236.

Malosso E, English L, Hopkins D, *et al*. 2004. Use of $^{13}$C-labelled plant materials and ergosterol, PLFA and NLFA analyses to investigate organic matter decomposition in Antarctic soil. *Soil Biology and Biochemistry*, **36**: 165-175.

McMahon SK, Williams MA, Bottomley PJ, *et al*. 2005. Dynamics of microbial communities during decomposition of carbon-13 labeled ryegrass fractions in soil. *Soil Science Society of America Journal*, **69**: 1238-1247.

Newell K. 1984. Interactions between two decomposer basidiomycetes and a collebolan under Sitka spruce: Distribution, abundance and selective grazing. *Soil Biology and Biochemistry*, **16**: 227-233.

Nicolardot B, Bouziri L, Bastian F, *et al*. 2007. A microcosm experiment to evaluate the influence of location and quality of plant residues on residue decomposition and genetic structure of soil microbial communities. *Soil Biology and Biochemistry*, **39**: 1631-1644.

Parkinson D, Visser S, Whittaker JB, *et al*. 1979. Effects of collembolan grazing on fungal colonization of leaf litter. *Soil Biology and Biochemistry*, **16**: 227-233.

Potthoff M, Dyckmans J, Flessa H, *et al*. 2008. Decomposition of maize residues after manipulation of colonization and its contribution to the soil microbial biomass. *Biology and Fertility of Soils*, **44**: 891-895.

Sadayoshi M, Sri Y, Ainin N. 2000. Relation to soil animal populations and plant litter decomposition in a tropical region. *Edaphologia*, **65**: 55-60.

Simoneta NY. 2004. Integrating soil macroinvertebrate diversity, litter decomposition and secondary succession in a tropical montane cloud forest in Mexico. Doctoral Dissertation: University of Edinbergh.

Six J, Feller C, Denef K, *et al*. 2002. Soil organic matter, biota and aggregation in temperate and tropical soils: Effects of no-tillage. *Agronomie*, **22**: 755-775.

Swift MJ, Boddy L. 1984. Animal-microbial interactions in wood decomposition// Anderson JM, Rayner ADM, Walton DWH, eds. Invertebrate Microbial Interacions. Cambridge: Cambridge University Press: 88-131.

Tarafdar J, Meena S, Kathju S. 2001. Influence of straw size on activity and biomass of soil microorganisms during decomposition. *European Journal of Soil Biology*, **37**: 157-160.

Tester C. 1988. Role of soil and residue microorganisms in determining the extent of residue decomposition in soil. *Soil Biology and Biochemistry*, **20**: 915-919.

Trinder C, Johnson D, Artz R. 2009. Litter type, but not plant cover, regulates initial litter decomposition and fungal community structure in a recolonising cutover peatland. *Soil Biology and Biochemistry*, **41**: 651-655.

Wardle D. 1995. Impacts of disturbance on detritus food webs in agro-ecosystems of contrasting tillage and weed management practices. *Advances in Ecological Research*, **26**: 105-185.

Wardle D, Bardgett R, Klironomos J, *et al*. 2004. Ecological linkages between aboveground and belowground biota. *Science*, **304**: 1629-1633.

Witkamp M. 1963. Break down of confined and non-confined litter. *Oikos*, **14**: 138-147.

Zimmer M, Topp W. 1998 Microorganisms and cellulose digestion in the gut of *Porcelli scaber* (Isopoda: Oniscidae). *Journal of Chemical Ecology*, **24**: 1397-1408.

**作者简介** 许湘琴,女,1986年生,硕士研究生。从事凋落物分解和土壤生物多样性研究。E-mail: charisty93@163.com

**责任编辑** 魏中青