

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

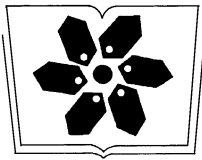
Acta Ecologica Sinica



第 32 卷 第 24 期 Vol.32 No.24 **2012**

中国生态学学会
中国科学院生态环境研究中心
科学出版社

主办
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

第 32 卷 第 24 期

2012 年 12 月 (半月刊)

目 次

从文献计量角度分析中国生物多样性研究现状.....	刘爱原,郭玉清,李世颖,等 (7635)
CO ₂ 浓度升高和模拟氮沉降对青川箭竹叶营养质量的影响.....	周先容,汪建华,张 红,等 (7644)
陕西中部黄土高原地区空气花粉组成及其与气候因子的关系——以洛川县下黑木沟村为例.....	吕素青,李月从,许清海,等 (7654)
长三角地区 1995—2007 年生态资产时空变化.....	徐昔保,陈 爽,杨桂山 (7667)
基于智能体模型的青岛市林地生态格局评价与优化.....	傅 强,毛 锋,王天青,等 (7676)
青藏高原高寒草地生态系统服务功能的互作机制.....	刘兴元,龙瑞军,尚占环 (7688)
北京城市绿地的蒸腾降温功能及其经济价值评估.....	张 彪,高吉喜,谢高地,等 (7698)
武汉市造纸行业资源代谢分析.....	施晓清,李笑诺,赵吝加,等 (7706)
丽江市家庭能耗碳排放特征及影响因素.....	王丹寅,唐明方,任 引,等 (7716)
基于分布式水文模型和福利成本法的生态补偿空间选择研究.....	宋晓谕,刘玉卿,邓晓红,等 (7722)
设施塑料大棚风洞试验及风压分布规律.....	杨再强,张 波,薛晓萍,等 (7730)
湖南珍稀濒危植物——珙桐种群数量动态.....	刘海洋,金晓玲,沈守云,等 (7738)
云南岩陀及其近缘种质资源群体表型多样性.....	李萍萍,孟衡玲,陈军文,等 (7747)
沙埋和种子大小对柠条锦鸡儿种子萌发、出苗和幼苗生长的影响.....	杨慧玲,梁振雷,朱选伟,等 (7757)
栗山天牛天敌花绒寄甲在栎林中的种群保持机制.....	杨忠岐,唐艳龙,姜 静,等 (7764)
基于相邻木排列关系的混交度研究.....	娄明华,汤孟平,仇建习,等 (7774)
三种回归分析方法在 Hyperion 影像 LAI 反演中的比较.....	孙 华,鞠洪波,张怀清,等 (7781)
红松和蒙古栎种子萌发及幼苗生长对升温与降水综合作用的响应.....	赵 娟,宋 媛,孙 涛,等 (7791)
新疆杨边材贮存水分对单株液流通量的影响.....	党宏忠,李 卫,张友焱,等 (7801)
火干扰对小兴安岭毛赤杨沼泽温室气体排放动态影响及其影响因素.....	顾 韩,牟长城,张博文 (7808)
不同潮汐和盐度下红树植物幼苗秋茄的化学计量特征.....	刘滨尔,廖宝文,方展强 (7818)
腾格里沙漠东南缘沙质草地灌丛化对地表径流及氮流失的影响.....	李小军,高永平 (7828)
西双版纳人工雨林群落结构及其林下降雨侵蚀力特征.....	邓 云,唐炎林,曹 敏,等 (7836)
西南高山地区净生态系统生产力时空动态.....	庞 瑞,顾峰雪,张远东,等 (7844)
南北样带温带区栎属树种种子化学组成与气候因子的关系.....	李东胜,史作民,刘世荣,等 (7857)
模拟酸雨对龙眼叶片 PS II 反应中心和自由基代谢的影响.....	李永裕,潘腾飞,余 东,等 (7866)
沈阳市城郊表层土壤有机污染评价.....	崔 健,都基众,马宏伟,等 (7874)
降雨对旱作春玉米农田土壤呼吸动态的影响.....	高 翔,郝卫平,顾峰雪,等 (7883)
冬季作物种植对双季稻根系酶活性及形态指标的影响.....	于天一,逢焕成,任天志,等 (7894)
施氮量对小麦/玉米带田土壤水分及硝态氮的影响.....	杨蕊菊,柴守玺,马忠明 (7905)
微山湖鸟类多样性特征及其影响因素.....	杨月伟,李久恩 (7913)
新疆北部棉区作物景观多样性对棉铃虫种群的影响.....	吕昭智,潘卫林,张 鑫,等 (7925)
杭州西湖北里湖沉积物氮磷内源静态释放的季节变化及通量估算.....	刘静静,董春颖,宋英琦,等 (7932)
基于实码遗传算法的湖泊水质模型参数优化.....	郭 静,陈求稳,张晓晴,等 (7940)
气候环境因子和捕捞压力对南海北部带鱼渔获量变动的影响.....	王跃中,孙典荣,陈作志,等 (7948)
象山港南沙岛不同养殖类型沉积物酸可挥发性硫化物的时空分布.....	颜婷茹,焦海峰,毛玉泽,等 (7958)
专论与综述	
提高植物抗寒性的机理研究进展.....	徐呈祥 (7966)
植被对多年冻土的影响研究进展.....	常晓丽,金会军,王永平,等 (7981)
凋落物分解主场效应及其土壤生物驱动.....	查同刚,张志强,孙 阁,等 (7991)
街尘与城市降雨径流污染的关系综述.....	赵洪涛,李叙勇,尹澄清 (8001)
期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 374 * zh * P * ¥70.00 * 1510 * 40 * 2012-12	

封面图说: 永兴岛海滩植被——永兴岛是中国西沙群岛的主岛,也是西沙群岛及南海诸岛中最大的岛屿。国务院 2012 年 6 月批准设立的地级三沙市,管辖西沙群岛、中沙群岛、南沙群岛的岛礁及其海域,三沙市人民政府就驻西沙永兴岛。永兴岛岛上自然植被密布,野生植物有 148 种,占西沙野生植物总数的 89%,主要树种有草海桐(羊角树)、麻枫桐、野枇杷、海棠树和椰树等。其中草海桐也称为羊角树,是多年生常绿亚灌木植物,它们总是喜欢倚在珊瑚礁岸或是与其他滨海植物聚生于海岸沙滩,为典型的滨海植物。

彩图提供: 陈建伟教授 北京林业大学 E-mail: cites.chenjw@163.com

DOI: 10.5846/stxb201204020461

查同刚, 张志强, 孙阁, 王高敏, 负小琴, 王伊琨, 刘艳. 凋落物分解主场效应及其土壤生物驱动. 生态学报, 2012, 32(24): 7991-8000.

Zha T G, Zhang Z Q, Sun G, Wang G M, Yun X Q, Wang Y K, Liu Y. Home-field advantage of litter decomposition and its soil biological driving mechanism: a review. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(24): 7991-8000.

凋落物分解主场效应及其土壤生物驱动

查同刚^{1,*}, 张志强¹, 孙 阁², 王高敏¹, 负小琴³, 王伊琨¹, 刘 艳¹

(1. 北京林业大学水土保持学院, 水土保持与荒漠化防治教育部重点实验室, 北京 100083;

2. 美国农业部林业局南方研究站, 北卡罗来纳州, 罗利 27606; 3. 北京林业大学林学院, 北京 100083)

摘要:凋落物分解主场效应是指凋落物具有在其生长的栖息地比在别的生境分解更快的特征, 土壤生物的特化作用被认为是主场效应的产生机理。主场效应是除基质质量和物理化学环境外控制凋落物分解的重要因子, 可影响模拟精度的 8%。凋落物分解主场效应驱动机制的深入研究对促进分解模型中纳入生物因子, 提高区域尺度模拟精度具有重要作用。虽然时间和基质质量可导致主场效应强度变化, 但不能全面解释主场效应强度差异特别是负效应的产生。通过分析凋落物分解过程中土壤生物的作用机理, 指出凋落物分解主场效应的土壤生物驱动可能包括土壤微生物的调节性适应, 土壤动物的后期插入以及物理化学环境的间接影响。为深入了解主场效应土壤生物驱动机制, 更好地模拟凋落物分解过程, 提出延长凋落物分解交互移置实验时间, 拓展实验空间, 结合室内模拟分析和构建分解模型等方法与途径。

关键词:凋落物分解; 主场效应; 土壤生物特化作用; 土壤微生物适应性; 交互移置实验

Home-field advantage of litter decomposition and its soil biological driving mechanism: a review

ZHA Tonggang^{1,*}, ZHANG Zhiqiang¹, SUN Ge², WANG Gaomin¹, YUN Xiaoqin³, WANG Yikun¹, LIU Yan¹

1 Key Laboratory of Soil and Water Conservation and Desertification Combating, Ministry of Education, College of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

2 USDA Forest Service, Southern Research Station, Raleigh 27606, North Carolina, USA

3 College of Forestry, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

Abstract: Decomposition has been studied for decades due to its significance in understanding nutrient cycling and carbon sequestration processes. The current study identified the three interacting factors that control decomposition: the physicochemical environment, litter quality, and decomposer organisms. Existing biogeochemical models that are derived by local climate and litter quality parameters can explain about 70% of the variation in litter decomposition. However, the role of soil organisms has been largely ignored in these models that assume the functions of soil organisms are mainly controlled by temperature, moisture and litter quality. Recent studies suggest that leaf litters tend to decompose more rapidly in the habitat from which it was derived (i. e. home) than in other habitats (i. e. new home away from its origin), this phenomena has been termed as the home-field advantage (HFA) in litter decomposition.

In contrast to plant growth, leaf litter-soil feedbacks are expected to consistently cause positive feedback at a home habitat resulting in faster litter decay. This is because 1) leaf litter from different plant species often varies considerably in structure and chemical composition; and 2) leaf litter inputs are a major source of nutrients and energy for soil biota that access decomposed litter. Thus, competition among soil biota for accessing nutrients may create a selective pressure for

基金项目: 林业公益性行业科研专项经费(201204102)

收稿日期: 2012-04-02; 修订日期: 2012-09-26

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhtg73@bjfu.edu.cn

organisms that are efficient at breaking down litter derived locally resulting in *HFA*. Unique soil biota developed in the litter derived from the original ecosystem has been regarded as the reason for this phenomenon. Quantifying *HFA* is more complex than a simple comparison between the decomposition rates for a litter type at its home site and an away site, because differences in environmental conditions between the sites could also influence decomposition. The method originally developed for evaluating home-site effects in plants allows the *HFA* to be calculated for each of the litters separately in fully reciprocal transplant experiments of three or more litter species.

Existing literature suggests there is a large amount of variation in *HFA* among reciprocal transplants between different tree species. Differences in litter traits could explain some of these variations, but it is apparent that other factors influence the relationship given the initially large *HFA* observed in field and laboratory experiments, as well as periods of home-field disadvantage. Thus we need a better understanding of the drivers of *HFA* and how soil biota are involved in order to address this potential problem in how we model decomposition. Based on the review about the roles of soil organisms on litter decomposition, three mechanisms are considered to reveal the soil biological drive of *HFA*: soil microorganism adjustability has a weakening effect on the *HFA*, soil animals' late entry can lead to different *HFA* intensity, including a disadvantage of home decomposition, environmental climatic conditions have indirect effects on *HFA*, especially under soil water stress. Integrating these using an ecosystem approach helps to elucidate the effects of soil organisms on the *HFA* of litter decomposition, and interpret the causes of different intensity, especially negative effect of *HFA*. In order to clearly understand the effects of soil organisms on *HFA*, long term reciprocal litter transplant experiments, including in-situ and laboratory, should be established across a large geographic and climatic gradient. Based on the effects of soil organisms on *HFA*, mathematical models of litter decomposition should incorporate with biological factors. This is especially important for global ecosystems that are used for understanding climate change effects on carbon and nutrient cycles.

Key Words: Litter decomposition; home-field advantage; specialization of soil organism; adjustability of soil microorganism; reciprocal transplant experiment

由于在碳固持^[1-3]和养分循环^[4-5]等方面的重要意义,凋落物分解过程已经引起科学家一百多年的关注。分解过程的驱动因素包括三个方面:物理化学环境(如气温、湿度、光照)、凋落物质量(如木质素/N)和参与分解过程的有机体(如细菌、真菌和无脊椎动物)^[6]。其中土壤生物的活动被认为受温湿度和凋落物质量的控制,所以无论全球和区域尺度模型如 BIOME BGC、CENTURY 及三库指数模型^[7]或局部模型如基质质量关系模型、非生物环境因子关系模型等^[8],都在很大程度上忽略了土壤生物的作用^[9]。虽然这些模型在一定程度上能够很好地模拟分解过程,但在全球尺度上仍有 30% 左右的分解变化不能被解释^[7],这可能来自于对未来气候情境变化的模拟误差,也可能是缺乏对参与分解过程的生物体的深入了解^[10]。不同凋落物之间的相互影响、紫外辐射等都可能发挥作用,而“主场效应”被 Ayres E. 等认为是控制凋落物分解的第二因子(叶基质量与环境因子为第一因子)^[11]。

很多研究发现,凋落物具有在其生长的栖息地(主场)比在别的生境(客场)分解更快的特征,仿照体育名词称其为凋落物分解的“主场效应(*HFA*)”^[11-15]。这种效应在叶凋落物上表现尤其明显,原因有:1)不同生境中植物的叶凋落物常在质量上(如叶形、叶面积、碳氮比和木质素含量等)有显著不同^[16,12];2)叶凋落物是土壤生物在分解凋落物过程中吸收养分和能量的主要来源。因此在土壤生物间可能存在对这些养分的竞争,会造成土壤生物选择性地对同生境植被的凋落物分解特别有效,即具有特化作用^[12]。与化学组成相比,叶凋落物质量与其植被栖息地直接相关^[10]。因此,如果分解模型参数化的数据来自“客场”凋落物、标准基质(凋落物质量)或者非原位实验,分解模型将有可能获得错误结论。这就需要对主场效应的驱动机制,特别是土壤生物参与过程进行深入了解,以便更好地模拟凋落物分解过程^[10]。此外,目前最强的主场效应均发现于草地和森林系统之间^[10,17],因此凋落物质量相差越大可能导致更大的主场效应,而气候变化、人工造林、林火、树

种入侵等都可能引起草地-森林系统之间的转换^[18-19]。

1 凋落物分解主场效应的研究进展

1.1 凋落物分解主场效应及其计算

Bocock K. L. 等 1960 年就发现橡树 (*Quercus palustris*) 的叶片在主场环境分解的速度更快一些^[20]。在基质质量(叶形、C/N、木质素含量)和物理化学环境对凋落物分解影响的研究中,很多研究者都报道了类似的规律^[2,21-22],但这些研究并没有关注这一现象,也没有尝试量化主场效应的强度。直到 2009 年,美国科罗拉多州立大学的 Ayres E. 采用 3 个标准:1) 试验至少包括 2 种或 2 种以上植物凋落物的交互移置实验;2) 采用凋落物袋法进行实验;3) 文献中报道了每种凋落物在主、客场的质量损失量(或分解速率系数)筛选出 35 个相关研究计算主场效应系数。结果表明 77% 的实验中凋落物在主场比客场分解要快,主场效应显著 >0 ($P < 0.01$, t 检验),平均达到 $(8.0 \pm 1.8)\%$ 。而且 34% 的移置实验中凋落物在主场比客场分解要快 10% 以上,而没有任何凋落物在客场分解速率高于主场 10%。因此 Ayres E 等明确了主场效应特别是正效应的广泛存在^[10,23],同时指出由于基质质量相差较大,乔木和草本凋落物之间往往表现出较强的主场效应。自此凋落物分解主场效应引起越来越多学者的关注^[10,24]。

凋落物分解主场效应的实验数据必须来自凋落物交互移置实验(RLTE)^[23],即每种叶片要同时在场和客场进行分解实验。可以采用叶质量或养分损失为指标,用简单的线性模型或方差分析评估主场效应,而具体量化要借鉴体育运动队主场效应的测算方法计算主场效应系数。

两种叶片的交互移置实验可按以下过程计算^[23]:如果用 A , B 代表两种研究的凋落物,以 a , b 代表它们对应的生境,那么凋落物在各生境中的相对质量损失可以表示为:

$$A_{RMLa} = \frac{A_a}{A_a + B_a} \quad (1)$$

那么主场效应系数(HFA_l)可以表示为:

$$HFA_l = \left(\frac{A_{RMLa} + B_{RMLb}}{A_{RMLb} + B_{RMLb}} \right) \quad (2)$$

若有 3 种或 3 种以上植物凋落物交互移置实验,那么可以按下式计算每种凋落物在主场的分解增加量(ADH),若计算结果为正值表明主场优势,负值为主场不利,等于零表明没有主场效应^[10]。

$$ADH_{a1-1} = \frac{HDD_{a1-1} - ADD_{a1} - H}{N - 2} \quad (3)$$

式中, HDD 为主场分解差异, ADD 为客场分解差异, H 为所有实验植物凋落物的平均主场绩效, N 为凋落物种类数。下标小写字母表示不同的凋落物(如 $a1$ 表示生境 1、A1 的凋落物 1,如此类推),大写字母表示生境。

主场分解差异为各凋落物在主场和所有客场分解速率差异之和,即:

$$HDD_{a1-1} = (D_{a1-1A1} - D_{a2A1}) + (D_{a1-1A1} - D_{a3A1}) + \dots + (D_{a1-1A1} - D_{\beta A1}) \quad (4)$$

客场分解差异为各凋落物在客场和对应主场分解速率差异之和,即:

$$ADD_{a1} = (D_{a1A2} - D_{a2A2}) + (D_{a1A3} - D_{a3A3}) + \dots + (D_{a1F3} - D_{\beta F3}) \quad (5)$$

平均主场绩效 H 通过所有主场分解差异除以($N-1$)获得:

$$H = \frac{HDD_{a1-1} + HDD_{a1-2} + HDD_{a1-3} + \dots + HDD_{\beta-3}}{N - 1} \quad (6)$$

以上两种计算过程的不同在于,对于 3 种或 3 种以上凋落物交互移置分解实验,计算出的为每种凋落物的主场分解效应(式 3—式 6);对于只有两种凋落物的交互移置实验(不以主场效应为研究目的的实验常见)不能计算出每种凋落物的主场效应,而是计算出主场效应系数 HFA_l (式 1 和式 2),辅以双边单因子 t -检验可以衡量不同凋落物在主、客场的分解速率差异是否显著^[10,24]。

1.2 土壤生物特化作用是凋落物分解主场效应的根本原因

土壤生物对同生境中植被凋落物分解的特化作用被认为是凋落物分解主场效应的根本原因^[23]。植物凋

落物在物理结构和化学组成方面的显著差异会影响分解^[25-26],导致土壤生物多样性的不同^[27-28]。土壤生物(包括微生物、原生动物、线虫、微型节肢动物和大型动物等)调节凋落物分解的同时也从中吸收能量和养分,造成不同土壤生物间的竞争。这样就会导致土壤微生物特化而专门分解源于同生境植被种类的凋落物,产生主场效应^[23]。土壤微生物对凋落物分解的特化作用可以由不同方式证明。土壤生物产生特定的酶来分解不同的凋落物基质,但是单一类型或类群往往不能产生分解某些基质的酶^[23]。例如木质素真菌是可有效分解木质素的少数微生物之一,因此它在产生木质素含量较高凋落物的林内土壤中更丰富^[29]。土壤动物在分解不同性质和厚度的凋落物过程中也表现出类似特征^[30],且其行为特性也可能产生主场效应^[23]。

基于以上分析,主场效应的好处将主要被土壤微生物获得(凋落物分解释放的养分和能量被更快地吸收),而植被获益的可能性很小^[11]。大量研究证实,如果土壤生物群落确实适应于植被类群,那么不同的植物种类林分中土壤群落组成应该有差别^[31-33]。凋落物及其微生物的室内分解实验也发现,在“主场”微生物作用下凋落物具有更高的呼吸速率,这表明生态系统间土壤群落组成差异可造成凋落物分解的主场效应^[34]。虽然 Ayres 等对 3 种乔木凋落物培养分解实验发现“主场”微生物作用下的凋落物并没有分解更快,但正如作者分析,实验持续时间短以及对中型和大型土壤动物的去除等都可能限制了对主场效应的探究^[35]。

1.3 凋落物主场效应强度差异的可能原因

凋落物分解主场效应并不一定表现为正效应(主场效应系数 >0),也可能表现出负效应(主场效应系数 <0)或零效应(主场效应系数 $=0$)。研究发现 35 组乔木凋落物主场效应数据中,总体强度范围为 $-9\%—29\%$,有 8 组表现出负效应;3 组草本和乔木之间的数据为 $2\%—240\%$ ^[23],近期的实验也发现草本和乔木之间的负效应^[10]与混合凋落物之间的零效应^[24]。造成主场效应强度差异的原因可能为:

1.3.1 凋落物分解实验持续时间

Ayres 等分析凋落物分解的指数衰减模型 $X/X_0 = e^{-kt}$ 后认为:凋落物在“主场”比在“客场”分解快意味着“主场”的分解常数 k 要大于“客场”,那么若将“主场(较大的 k 值)”和客场(较小的 k 值)的凋落物质量存留量绘制成图(图 1a),则主客场间凋落物质量存留量的差别就是主场效应(图 1b)。基于这种阐述,分解早期的主场效应会随时间延长而逐渐增大,中段相对平稳,分解后期会随时间呈现下降趋势(即主场的叶质量绝大部分已经分解)(图 1b)。养分存留量(如 N 存留量)也可衡量主场效应,图 1c 中实线为主场氮存流量,虚线为客场氮存流量;图 1d 为主、客场氮存留量的差别即主场效应。其规律与凋落物质量存留量表现一致,但在分解的最早期阶段,N 固定会随着凋落物质量损失而增加^[36],主场凋落物分解会比客场固定更多 N 从而表现出负效应^[11]。

由于采样时间间隔和样品数量的影响,野外实验很难观察到时间和主场效应间的这种关系,但室内分解培养实验与以上分析基本吻合^[11];Ayres 等对白杨(*Populus tremuloides*)、美国黑松(*Pinus contorta*)和恩格尔曼氏云杉(*Picea engelmannii*)凋落物室内分解实验表明,美国黑松的主场效应首先上升,在 225 d 时达到稳定;白杨在 119—176 d 中保持高峰水平,然后开始下降;但云杉没有表现出类似规律。

但是,主场效应强度与时间的这种关系不能解释有些实验发现的基于质量损失量的负效应,其可能原因在于:在分解过程的某些阶段凋落物结构和化学特征发生变化,使其适应于客场生物类群而分解更快^[11]。

1.3.2 凋落物质量

凋落物质量的差异也可以造成主场效应强度的差异^[23]。例如,高质量凋落物由相对容易降解的化学物质组成,大多数土壤生物群落都包含可降解该凋落物的微生物,所以主场效应强度很小或没有。相反,低质量凋落物往往包含高抗性或有毒成分,由于很少土壤生物群落含有可以快速降解这些化学成分的生物,被认为具有更强的主场效应。Hunt 等在森林、高山草甸和草原生态系统之间进行的凋落物交互移置实验证明了这一点。他们发现相对不稳定的草本植物,无论高山或草原的,在 3 个生态系统中分解速度相近;而高抗性的松凋落物表现出很强的主场效应^[37]。类似地,近期两个室内培养实验发现不稳定的草本植物凋落物在不同微生物群落间的分解速率没有差别,而抗性较强的乔木凋落物在森林系统的微生物群落比草本群落微生物间分

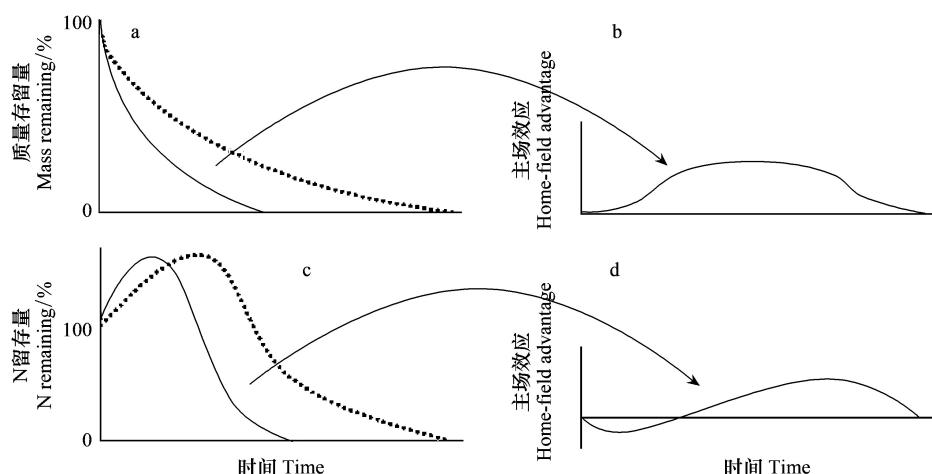


图1 主场效应与时间关系图解

Fig. 1 Schematic diagram of leaf litter remaining at 'home' (solid line) and 'away' (dotted line)

(a) 主场(实线)和客场(虚线)叶枯落物存留量;(b) 主客场凋落物质量差异代表主场效应的质量损失;氮存留量具有类似的规律,然而,由于在早期氮固定(c),氮存留量主场效应会有一个负效应阶段(即氮固定在主场比客场发生的早一点)(d)

解速度要快很多^[34]。这一研究发现主场效应强度与叶质量的关系要强于 Aryes 等在 3 个乔木树种凋落物间的研究结果,原因可能在于采用的凋落物质量相差更大^[11]。因此,凋落物质量较低被认为是主场效应发生的必要条件之一,因为高质量凋落物会被绝大多数生物降解,从而不存在主场生物的特化作用,也就不会发生主场效应^[24]。

1.3.3 土壤生物的驱动作用分析

土壤生物特化作用是主场效应的驱动机制,但具体过程与机理并不清晰。

土壤动物被认为可能与主场效应强度有关。一是土壤动物的行为特性可能产生主场效应,例如,动物可能选择性埋藏某些凋落物作为食物存储,或者用作垒巢和洞穴通道。这样可能低估主场效应在凋落物损失方面的强度,因为土壤动物无法从凋落物分解袋搬运出凋落物^[2]。二是螨虫类主要是甲螨(真菌的喂养者和线虫的捕食者)具有明显的生境特殊性而与凋落物类型无关。微型节肢动物扩散性较弱,往往具有很强的微生境特化作用^[38]。螨虫的生境特化表明这些动物可能在凋落物分解主场效应中发挥重要作用。同样,排除微型和大型土壤动物(如蚯蚓、多足类)的细孔分解袋实验或室内培养实验都可能对凋落物分解产生错误的估计^[10]。在巴西热带雨林的凋落物分解实验中,大型和中型土壤动物对混合凋落物的分解没有显著效果。作者分析是因为实验在冬季和春季进行,而土壤动物的活动受气候影响明显,在气温较低、湿度较小的环境中土壤动物的作用被低估;并且土壤动物可能主要在微生物初步分解后的环境中发挥作用^[24],这一点与我国学者的研究结果基本一致^[39-40]。

土壤微生物对主场效应强度的影响,有以下相互关联的几点解释:①土壤微生物群落组成(或功能特点)的差别程度会影响主场效应强度,但不太可能影响特定凋落物类型^[11]。这一观点同样基于土壤微生物特化作用,因为微生物与同生境凋落物相互适应,所以微生物相差大意味着凋落物质量相差大。那么新引入植物往往因为土壤微生物群落组成与其未完全适应而表现出较弱的主场效应^[11],这一点对于人工造林凋落物分解具有参考价值。②土壤微生物的调整性能可能减弱主场效应。如果土壤微生物种类丰度较低或殖民化一个立地时,土壤微生物群落可能会根据凋落物类型调整其个体丰度,从而适应凋落物分解的需要^[24]。细菌的短暂世代间隔和真菌菌丝体的快速增生能力,都使土壤微生物群落具有根据不同基质特征快速调整的特性,从而适应新生境中凋落物的分解^[41]。森林演替系列的交互移置实验没有发现明显的主场效应,表明在森林更新过程中,与凋落物分解相关的生态系统功能能够很快得到恢复^[42]。③土壤微生物的功能性冗余导致无主场效应。有些土壤包含极其大量的微生物类群和动物类群^[43],有些学者总结为土壤生物的功能性冗余,因

为土壤生物丰富度分析表明仅有 10 多种土壤生物对生态系统功能具有显著影响^[44]。这种功能性冗余可能导致土壤微生物类群含有适于各种生境植被凋落物的微生物。然而,很多研究发现这种功能性冗余在不同林分的森林生态系统并不多见,且这些土壤微生物群落构成在分解方面具有功能性的差异^[15,23]。

虽然凋落物分解主场效应广泛存在已是不争的事实,但其生物驱动机制研究仍然不够深入,现有理论在解释凋落物分解主场效应强度特别是负效应方面仍有很多相互矛盾的地方^[10],因此通过土壤生物对凋落物分解作用机理的深入分析可能提高对主场效应的理解^[2,24]。

2 土壤生物对凋落物分解主场效应强度差异的可能影响

2.1 土壤生物在凋落物分解中的作用研究进展

2.1.1 土壤生物作用机制

凋落物分解包括:①淋溶过程,即凋落物中水溶性化合物的淋溶;②粉碎过程,主要是土壤动物对凋落物的破碎,同时土壤干湿交替、冻融交替等也使枯枝落叶变小或转化;③代谢过程,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,是生态系统物质循环和能量流动中的重要环节^[45-46]。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、蚯蚓等。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、土壤微环境改变等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,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。

2.1.2 不同分解阶段土壤生物功能差异

凋落物分解是包括水溶性化合物淋溶、微生物和土壤动物作用等的综合过程,可分为凋落物失重较快的营养控制阶段和后期分解较慢的纤维素控制阶段。凋落物袋分解实验发现土壤动物密度呈现出前期较低、增长缓慢,后期较高、变化迅速的特点(尤其是在土壤动物丰富的季风林内),研究者把这种现象称为凋落物分解过程中土壤动物的“后期进入”^[40]。不同阶段发挥作用的土壤生物不同:营养控制阶段,由于分解内容主要是一些水溶性或较易分解的基质,因此淋溶及微生物等的贡献起着决定性的作用;在纤维素控制的第二阶段,由于基质分解难度的加大,淋溶和微生物等的作用开始淡化,而具有更强大裂解能力的土壤动物开始发挥关键性的作用,但土壤动物作用的增加也可能是前期大量繁殖的微生物群落刺激的结果^[39-40]。

亚高山针叶林针凋落物的分解被分为 3 个阶段:1)新鲜凋落物,C/N 较低,主要土壤生物为真菌,刚刚开始分解的第一阶段;2)半分解凋落物,C/N 达到最高,土壤动物和细菌为主要土壤生物,分解迅速的第二阶段以及 3)完全分解凋落物,C/N 较第二阶段有所下降,分解缓慢的第三阶段^[47]。与土壤微生物不同,土壤动物可通过凋落物的口味、硬度甚至颜色主动选择食物。新鲜或轻微分解的针叶具有很高的可分解性能,但其坚硬的表皮很难被动物(特别是无脊椎动物)摄食;随着真菌的分解作用破坏表皮,土壤动物开始侵入并摄食内部组织^[48]。

可见,无论是 2 个阶段或者 3 个阶段,一个共同的规律是分解早期发挥主要作用的是土壤微生物,对于难分解的纤维素(木质素)等,土壤动物会后期介入并发挥重要作用。

2.1.3 土壤动物和微生物间的相互作用

土壤动物和微生物的相互作用是二者相互影响的过程,土壤动物通过摄食、迁移、代谢分泌等活动影响土壤微生物的数量、活性及其群落结构;土壤微生物活性及其组成和功能的改变有助于加速凋落物分解和养分的释放,利于土壤动物的活动。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摄食作用调控土壤微生物的种群、数量和散布,其分泌物和排泄物刺激微生物生长。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^[48]。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吸收利用^[49]。食腐动物的粪便和碎裂凋落物增

加了表面积,增大了微生物种群定居的空间;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,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^[50]。

2.1.4 环境因素对土壤生物的影响

土壤生物的活动与温度、水分和光照密切相关,并随着环境因子的变化呈现规律性改变^[51]。近来研究表明:大型和中型土壤动物对凋落物分解的影响受气候因素影响显著,在相对寒冷干燥的气候条件下对凋落物分解作用有所降低^[24]。在水分亏缺的干旱半干旱地区,太阳辐射是影响凋落物分解的唯一因素,总太阳辐射和中波紫外线 B 的减弱分别导致凋落物分解速率下降 60% 和 33%;而土壤微生物活动、土壤资源供给等都没有显著差异,由此推断光降解作用是凋落物分解的主要方式^[52]。项目组在暖温带半湿润黄土区(存在季节性干旱)的研究也发现,凋落物分解速率的主导因素存在季节性变化,即在水分充足时(6—10 月)主要受基质特性、土壤生物影响,而在水分亏缺时太阳辐射对凋落物分解速率具有重要作用。

2.2 主场效应强度差异的可能原因

结合以上土壤生物对凋落物分解作用机理的研究进展,关于凋落物分解主场效应强度差异可能存在以下机理:

1) 土壤微生物的调整性能会弱化凋落物分解的主场效应,而土壤微生物冗余可能导致零效应。土壤微生物特化作用产生主场效应,但土壤细菌的短生命周期和真菌快速增生能力都使土壤微生物具有快速调整适应凋落物分解需要的能力,这种快速调整性能必然会减弱微生物特化作用进而弱化凋落物分解的主场效应。

2) 土壤动物通过“后期进入”与土壤微生物共同驱动纤维素/木质素的分解进而对主场效应产生显著影响,营养控制阶段主场效应的驱动因子为土壤微生物。低质量的凋落物具有更强的主场效应,土壤动物通过“后期进入”,通过破碎、摄食等促进土壤微生物的作用,土壤动物的选择性摄食可能是主场效应的一个重要驱动因素,而且这种选择性摄食可能导致不同主场效应强度包括负效应的产生。

3) 环境因子对主场效应具有间接影响,水分亏缺时影响更加明显。无论是微生物特化作用或调整适应过程,都需要一定的温度、水分和光照条件;如果水分亏缺条件下光降解作用成为凋落物分解主要过程^[52],那么光强将造成主场效应强度变化甚至负效应的产生。

3 问题与展望

综上所述,凋落物交互移置实验表明主场效应广泛存在于不同生境的植被凋落物分解过程中,特别是叶凋落物中;土壤生物的特化作用是主场效应产生的根本原因,而分解阶段(实验时间)、叶基质质量和土壤生物的调整性能被用来解释主场效应强度的差异;主场效应被认为是继叶基质质量和环境条件后最重要的影响凋落物分解的影响因素。但是,主场效应的明确提出只有 10 多年的时间^[12],确认其普遍存在并引起广泛关注只有两三年的时间^[23],所以现有研究集中在不同生态系统、凋落物类型引起主场效应强度差异的表象研究上,对其生物驱动机制停留在比较分析和理论推导阶段^[10-11,14,24],缺少针对凋落物分解主场效应生物驱动机制的专门研究和深入分析。这直接导致主场效应强度的差异、特别是负效应的存在没有科学合理的解释,也使得提高全球尺度上凋落物分解模型预测的精度^[10,24]一直停滞于理论可能。今后的研究应考虑以下三点:

(1) 时间与空间尺度的积累与扩展

主场效应在分解早期随时间延长逐渐增加,分解后期随时间延长逐渐减弱,因此凋落物分解交互移置实验持续时间对主场效应强度具有一定影响^[11]。然而,分解早期和分解后期并没有统一的时间界定,不同凋落物基质性质、环境条件和微生物类群等都可能对这一时间界定产生影响。目前的凋落物交互移置实验持续时间基本只有 1—1.5a,很少达到 2a。实验持续时间延长到 2—3a 或全凋落物分解周期,是探索时间对主场效应强度影响的必要途径。

地域尺度上,目前主场效应研究可见报道全部在欧洲和美洲,而在亚、非和大洋洲未见任何报道;在气候尺度上,主要集中在热带、亚热带和寒温带区域,缺少暖温带的研究。然而无论凋落物基质性质、气候条件或者土壤生物区系都具有显著的空间差异,影响凋落物分解速率的主导因子必然有所差别。如在干旱地区,太

阳辐射特别是 UV-B 是影响凋落物分解的最主要控制因子^[52]。系统研究不同空间尺度主场效应的驱动机制,是解释主场效应强度差异,推动主场效应生物驱动机制的有效手段。

(2) 野外原位和室内模拟实验的比较分析

凋落物分解交互移置实验利于证明主场效应的存在和计算其强度,是主场效应研究的主要手段;但由于气候、地理、生物等条件的异质性,原位实验很难揭示凋落物分解主场效应的驱动机制。室内模拟实验可以控制温度、湿度、光照,或者人为分离或添加某些土壤生物,从而成为研究主场效应机理的重要方法。

(3) 主场效应驱动机制模型构建

凋落物分解主场效应自 2009 年系统提出后之所以引起研究者广泛关注,是因为它可能提高大尺度凋落物分解模型模拟精度 10% 左右^[10-11]。因此,基于凋落物分解主场效应土壤生物驱动机制深入研究,构建包含土壤生物因子在内的主场效应驱动模型,才能为在大尺度分解模型中纳入生物因子,探索现有模型不能解释的 30% 分解变化提供理论指导和方法基础。

References:

- [1] Sayer E J, Heard M S, Grant H K, Marthews T R, Tanner E V J. Soil carbon release enhanced by increased tropical forest litter fall. *Nature Climate Change*, 2011, 1(6): 304-307.
- [2] Prescott C E. Litter decomposition: what controls it and how can we alter it to sequester more carbon in forest soils? *Biogeochemistry*, 2010, 101(1): 133-149.
- [3] Lecerf A, Marie G, Kominoski J S, LeRoy C J, Bernadet C, Swan C M. Incubation time, functional litter diversity, and habitat characteristics predict litter-mixing effects on decomposition. *Ecology*, 2011, 92(1): 160-169.
- [4] Parton W, Silver W L, Burke I C, Grassens L, Harmon M E, Currie W S, King J Y, Adair E C, Brandt L A, Hart S C, Fasth B. Global-scale similarities in nitrogen release patterns during long-term decomposition. *Science*, 2007, 315(5810): 361-364.
- [5] Wang S L, Chen C Y. *Forest Litter Ecology*. Beijing: Science Press, 2010.
- [6] Swift M J, Heal O W, Anderson J M. *Decomposition in Terrestrial Ecosystems*. London: Blackwell Scientific Publications, 1979.
- [7] Adair E C, Parton W J, del Grosso S J, Silver S L, Harmon M E, Hall S A, Burke I C, Hart S C. Simple three-pool model accurately describes patterns of long-term litter decomposition in diverse climates. *Global Change Biology*, 2008, 14: 2636-2660.
- [8] Liu Z W, Gao W J, Pan K W, Du H X, Zhang L P. Discussion on the study methods and models of litter decomposition. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(6): 1993-2000.
- [9] Zhang D Q, Hui D F, Luo Y Q, Zhou G Y. Rates of litter decomposition in terrestrial ecosystems: global patterns and controlling factors. *Journal of Plant Ecology*, 2008, 1(2): 85-93.
- [10] St John M G, Orwin K H, Dickie I A. No 'Home' versus 'away' effects of decomposition found in a grassland-forest reciprocal litter transplant study. *Soil Biology and Biochemistry*, 2011, 43(7): 1482-1489.
- [11] Ayres E, Steltzer H, Berg S, Wall D H. Soil biota accelerate decomposition in high-elevation forests by specializing in the breakdown of litter produced by the plant species above them. *Journal of Ecology*, 2009, 97(5): 901-912.
- [12] Gholz H L, Wedin D A, Smitherman S M, Harmon M E, Parton W J. Long term dynamics of pine and hardwood litter in contrasting environments: toward a global model of decomposition. *Global Change Biology*, 2000, 6(7): 751-765.
- [13] Vivanco L, Austin A T. Tree species identity alters forest litter decomposition through long-term plant and soil interactions in Patagonia, Argentina. *Journal of Ecology*, 2008, 96(4): 727-736.
- [14] Strickland M S, Lauber C, Fierer N, Bradford M A. Testing the functional significance of microbial community composition. *Ecology*, 2009, 90(2): 441-451.
- [15] Strickland M S, Osburn E, Lauber C, Fierer N, Bradford M A. Litter quality is in the eye of the beholder: initial decomposition rates as a function of inoculum characteristics. *Functional Ecology*, 2009, 23(3): 627-636.
- [16] Santiago L S. Extending the leaf economics spectrum to decomposition: evidence from a tropical forest. *Ecology*, 2007, 88(5): 1126-1131.
- [17] Norris M D, Blair J M, Johnson, L C. Land cover change in eastern Kansas: litter dynamics of closed-canopy eastern red cedar forests in tall grass prairie. *Canadian Journal of Botany*, 2001, 79(2): 214-222.
- [18] Hibbard K A, Archer S, Schimel D S, Valentine D W. Biogeochemical changes accompanying woody plant encroachment in a subtropical savanna. *Ecology*, 2001, 82(7): 1999-2011.

- [19] Richardson D M, Rejmánek M. Conifers as invasive aliens: a global survey and predictive framework. *Diversity and Distributions*, 2004, 10(5/6): 321-331.
- [20] Bockock K L, Gilbert O, Capstick C K, Twinn D C, Waid J S, Woodman M J. Changes in leaf litter when placed on the surface of soils with contrasting humus types: 1) losses in dry weight of oak and ash leaf litter. *Journal of Soil Science*, 1960, 11(1): 1-9.
- [21] Hobbie S E, Reich P B, Oleksyn J, Ogdahl M, Zytowskiak R, Hale C, Karolewski P. Tree species effects on decomposition and forest floor dynamics in a common garden. *Ecology*, 2006, 87(9): 2288-2297.
- [22] Barlow J, Gardner T A, Ferreira L V, Peres C A. Litter fall and decomposition in primary, secondary and plantation forests in the Brazilian Amazon. *Forest Ecology and Management*, 2007, 247(1/3): 91-97.
- [23] Ayres E, Steltz H, Simmons B L, Simpson R T, Steinweg J M, Wallenstein M D, Mellor N, Parton W J, Moore J C, Wall D H. Home-field advantage accelerates leaf litter decomposition in forests. *Soil Biology and Biochemistry*, 2009, 41(3): 606-610.
- [24] Giebelmanna U C, Martins K G, Brandle M, Schädler M, Marques R, Brandl R. Lack of home-field advantage in the decomposition of leaf litter in the Atlantic rainforest of Brazil. *Applied Soil Ecology*, 2011, 49: 5-10.
- [25] Santiago L S. Extending the leaf economics spectrum to decomposition: evidence from a tropical forest. *Ecology*, 2007, 88(5): 1126-1131.
- [26] Yang Z J, Zeng J, Xu D P, Li S J, Lu J. The processes and dominant factors of forest litter decomposition: a review. *Ecology and Environment*, 2007, 16(2): 649-654.
- [27] Bardgett R D, Walker L R. Impact of coloniser plant species on the development of decomposer microbial communities following deglaciation. *Soil Biology and Biochemistry*, 2004, 36(3): 555-559.
- [28] Yang G R, Tong C L, Zhang W J, Wu J S. Decomposition of organic matter by soil organisms in terrestrial carbon cycling and its influence factors. *Chinese Journal of Soil Science*, 2005, 36(4): 605-606.
- [29] Paul E A. *Soil Microbiology, Ecology, and Biochemistry*. 3rd ed. Amsterdam: Academic Press, 2007.
- [30] Lin Y H, Zhang F D, L H D, Su H L. Fluctuation of soil fauna community in baiwangshen during paper mulberry leaf litter decomposition. *Chinese Journal of Zoology*, 2005, 40(3): 60-66.
- [31] Bardgett R D, Walker L R. Impact of coloniser plant species on the development of decomposer microbial communities following deglaciation. *Soil Biology and Biochemistry*, 2004, 36(3): 555-559.
- [32] Fu G, Liu Z W, Cui F F. The feature of soil enzyme activity and quantity of microorganism under artificial forests and their relationship with soil nutrients in Qinling mountain area. *Journal of Northwest Agricultural and Forestry university: Natural Science Edition*, 2008, 36(10): 88-94.
- [33] Xu X Q, Lin Z H, Chen H L. Effects of litter composition on soil organisms: a review. *Chinese Journal of Ecology*, 2011, 30(6): 1258-1263.
- [34] Strickland M S, Lauber C, Fierer N, Bradford M A. Testing the functional significance of microbial community composition. *Ecology*, 2009, 90(2): 441-451.
- [35] Ayres E, Dromph K M, Bardgett R D. Do plant species encourage soil biota that specialize in the rapid decomposition of their litter? *Soil Biology and Biochemistry*, 2006, 38(1): 183-186.
- [36] Parton W J, Silver W L, Burke I C, Grassens L, Harmon M E, Currie W S, King J Y, Adair E C, Brandt L A, Hart S C, Fasth B. Global-scale similarities in nitrogen release patterns during long-term decomposition. *Science*, 2007, 315(5810): 361-364.
- [37] Hunt H W, Ingham E R, Coleman D C, Elliott E T, Reid C P P. Nitrogen limitation of production and decomposition in prairie, mountain meadow, and pine forest. *Ecology*, 1988, 69(4): 1009-1016.
- [38] Nielsen U N, Osler G H R, Campbell C D, Burslem D F R P, Van der W R. The influence of vegetation type, soil properties and precipitation on the composition of soil mite and microbial communities at the landscape scale. *Journal of Biogeography*, 2010, 37(7): 1317-1328.
- [39] Zhou G Y, Guan L L, Wei X H, Tang X L, Liu S G, Liu J X, Zhang D Q, Yan J H. Factors influencing leaf litter decomposition: an intersite decomposition experiment across China. *Plant Soil*, 2008, 311(1/2): 61-72.
- [40] Xu G L, Mo J M, Zhou G Y, Xue H. Litter decomposition under N deposition in Dinghushan forests and its relationship with soil fauna. *Ecology and Environment*, 2005, 14(6): 901-907.
- [41] McGuire K L, Bent E, Borneman J, Majumder A, Allison S D, Treseder K K. Functional diversity in resource use by fungi. *Ecology*, 2010, 91(8): 2324-2332.
- [42] Ostertag R, Marín-Spiotta E, Silver W L, Schulten J. Litterfall and decomposition in relation to soil carbon pools along a secondary forest chronosequence in Puerto Rico. *Ecosystems*, 2008, 11(5): 701-714.
- [43] Wu T H, Ayres E, Li G, Bardgett R D, Wall D H, Garey J R. Molecular profiling of soil animal diversity in natural ecosystems: incongruence of molecular and morphological results. *Soil Biology and Biochemistry*, 2009, 41(4): 849-857.
- [44] Bardgett R D, Walker L R. Impact of coloniser plant species on the development of decomposer microbial communities following deglaciation. *Soil Biology and Biochemistry*, 2004, 36(3): 555-559.

- [45] Trumbore S E, Czimczik C I. An uncertain future for soil carbon. *Science*, 2008, 321(5895): 1455-1456.
- [46] Li Z A, Zou B, Ding Y Z, Cao Y S. Key factors of forest litter decomposition and research progress. *Chinese Journal of Ecology*, 2004, 23(6): 77-83.
- [47] Tian X J, Takishi T. Relative roles of microorganisms and soil animals on needle litter decomposition in a subalpine coniferous forest. *Acta Phytocologica Sinica*, 2002, 26(3): 257-263.
- [48] Berg B, Davey MP, de Marco A, Emmett B, Fauri M, Hobbie S E, Johansson M B, Liu C, McClaugherty C, Norell L, Rutigliano F A, Vesterdal L, de Virzo S A. Factors influencing limit values for pine needle litter decomposition: a synthesis for boreal and temperate pine forest systems. *Biogeochemistry*, 2010, 100(1/3): 57-73.
- [49] Chen G K, Cao Z P. Ecological researches on soil organisms. *Chinese Journal of Soil Science*, 2005, 36(2): 259-264.
- [50] Zhang J, Wang S J, Yuan H H. Effects of soil fauna on plant litter decomposition. *Journal of Nanjing Forestry University: Natural Science Edition*, 2008, 32(5): 140-144.
- [51] Wall D H, Bradford M A, St John M G, Trofymow J A, Behan-Pelletier V, Bignell D E, Dangerfield J M, Parton W J, Rusek J, Voigt W, Wolters V, Zadeh G H, Ayuke F, Bashford R, Beljakova O, Bohlen P, Brauman A, Flemming S, Henschel J R, Johnson D L, Hefin J T, Kovarova M, Kranabetter J. M, Kutny L, Lin K C, Maryati M, Masse D, Pokarzhevskii A, Rahman H, Sabara M G, Salamon J A, Swift M J, Varela A, Vasconcelos H L, White D, Zou X M. Global decomposition experiment shows soil animal impacts on decomposition are climate-dependent. *Global Change Biology*, 2008, 14(11): 346-355.
- [52] Austin A T, Vivanco L. Plant litter decomposition in a semi-arid ecosystem controlled by photodegradation. *Nature*, 2006, 442(7102): 555-558.

参考文献:

- [5] 汪思龙, 陈楚莹. 森林残落物生态学. 北京: 科学出版社, 2010.
- [8] 刘增文, 高文俊, 潘开文, 杜红霞, 张丽萍. 枯落物分解研究方法和模型讨论. *生态学报*, 2006, 26(6): 1993-2000.
- [26] 杨曾奖, 曾杰, 徐大平, 李尚均, 卢建. 森林枯枝落叶分解及其影响因素. *生态环境*, 2007, 16(2): 649-654.
- [28] 杨钙仁, 童成立, 张文菊, 吴金水. 陆地碳循环中的微生物分解作用及其影响因素. *土壤通报*, 2005, 36(4): 605-606.
- [30] 林英华, 张夫道, 刘海东, 苏化龙. 百望山土壤动物群落结构在栲树落叶分解中的变化. *动物学杂志*, 2005, 40(3): 60-66.
- [32] 付刚, 刘增文, 崔芳芳. 秦岭山区典型人工林土壤酶活性、微生物及其与土壤养分的关系. *西北农林科技大学学报: 自然科学版*, 2008, 36(10): 88-94.
- [33] 许湘琴, 林植华, 陈慧丽. 凋落物分解对土壤生物的影响. *生态学杂志*, 2011, 30(6): 1258-1263.
- [40] 徐国良, 莫江明, 周国逸, 薛花. 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*, 2005, 14(6): 901-907.
- [46] 李志安, 邹碧, 丁永祯, 曹裕松. 森林凋落物分解重要影响因子及其研究进展. *生态学杂志*, 2004, 23(6): 77-83.
- [47] 田兴军, 立石贵浩. 亚高山针叶林土壤动物和土壤微生物对针叶分解的作用. *植物生态学报*, 2002, 26(3): 257-263.
- [49] 陈国康, 曹志平. 土壤生物的生态学研究. *土壤通报*, 2005, 36(2): 259-264.
- [50] 张静, 王邵军, 阮宏华. 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*, 2008, 32(5): 140-144.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 32, No. 24 December, 2012 (Semimonthly)

CONTENTS

A bibliometric study of biodiversity research in China	LIU Aiyuan, GUO Yuqing, LI Shiyong, et al (7635)
Effects of elevated CO ₂ and nitrogen deposition on leaf nutrient quality of <i>Fargesia rufa</i> Yi .....	..... ZHOU Xianrong, WANG Jianhua, ZHANG Hong, et al (7644)
Airborne pollen assemblages and their relationships with climate factors in the central Shaanxi Province of the Loess Plateau: a case in Xiaheimugou, Luochuan County	LÜ Suqing, LI Yuecong, XU Qinghai, et al (7654)
Spatial and temporal change in ecological assets in the Yangtze River Delta of China 1995—2007 .....	..... XU Xibao, CHEN Shuang, YANG Guishan (7667)
Evaluation and optimization of woodland ecological patterns for Qingdao based on the agent-based model .....	..... FU Qiang, MAO Feng, WANG Tianqing, et al (7676)
Interactive mechanism of service function of alpine rangeland ecosystems in Qinghai-Tibetan Plateau .....	..... LIU Xingyuan, LONG Ruijun, SHANG Zhanhuan (7688)
Preliminary evaluation of air temperature reduction of urban green spaces in Beijing .....	..... ZHANG Biao, GAO Jixi, XIE Gaodi, et al (7698)
Resources metabolism analysis for the pulp and paper industry in Wuhan, China .....	..... SHI Xiaoqing, LI Xiaonuo, ZHAO Linjia, et al (7706)
The characteristics and influential factors of direct carbon emissions from residential energy consumption: a case study of Lijiang City, China	WANG Danyin, TANG Mingfang, REN Yin, et al (7716)
Spatial targeting of payments for ecosystem services Based on SWAT Model and cost-benefit analysis .....	..... SONG Xiaoyu, LIU Yuqing, DENG Xiaohong, et al (7722)
The wind tunnel test of plastic greenhouse and its surface wind pressure patterns .....	..... YANG Zaiqiang, ZHANG Bo, XUE Xiaoping, et al (7730)
Population quantitative characteristics and dynamics of rare and endangered plant <i>Davidia involucrata</i> in Hunan Province .....	..... LIU Haiyang, JIN Xiaoling, SHEN Shouyun, et al (7738)
Phenotypic diversity in populations of germplasm resources of <i>Rodgersia sambucifolia</i> and related species .....	..... LI Pingping, MENG Hengling, CHEN Junwen, et al (7747)
Effects of sand burial and seed size on seed germination, seedling emergence and growth of <i>Caragana korshinskii</i> Kom. (Fabaceae) ...	..... YANG Huiling, LIANG Zhenlei, ZHU Xuanwei, et al (7757)
Population-keeping mechanism of the parasitoid <i>Dastarcus helophoroides</i> (Coleoptera: Bothrideridae) of <i>Massicus raddei</i> (Coleoptera: Cerambycidae) in oak forest	YANG Zhongqi, TANG Yanlong, JIANG Jing, et al (7764)
Study of mingling based on neighborhood spatial permutation	LOU Minghua, TANG Mengping, QIU Jianxi, et al (7774)
Comparison of three regression analysis methods for application to LAI inversion using Hyperion data .....	..... SUN Hua, JU Hongbo, ZHANG Huaiqing, et al (7781)
Response of seed germination and seedling growth of <i>Pinus koraiensis</i> and <i>Quercus mongolica</i> to comprehensive action of warming and precipitation	ZHAO Juan, SONG Yuan, SUN Tao, et al (7791)
Impacts of water stored in sapwood <i>Populus bolleana</i> on its sap flux	DANG Hongzhong, LI Wei, ZHANG Youyan, et al (7801)
Dynamics of greenhouse gases emission and its impact factors by fire disturbance from <i>Alnus sibirica</i> forested wetland in Xiaoxing'an Mountains, Northeast China	GU Han, MU Changcheng, ZHANG Bowen (7808)
Different tide status and salinity alter stoichiometry characteristics of mangrove <i>Kandelia candel</i> seedlings .....	..... LIU Biner, LIAO Baowen, FANG Zhanqiang (7818)
Effects of shrub encroachment in desert grassland on runoff and the induced nitrogen loss in southeast fringe of Tengger Desert .....	..... LI Xiaojun, GAO Yongping (7828)
Community structure and throughfall erosivity characters of artificial rainforest in Xishuangbanna .....	..... DENG Yun, [TANG Yanlin], CAO Min, et al (7836)
Temporal-spatial variations of net ecosystem productivity in alpine area of southwestern China .....	..... PANG Rui, GU Fengxue, ZHANG Yuandong, et al (7844)

Relationships between chemical compositions of <i>Quercus</i> species seeds and climatic factors in temperate zone of NSTEC	LI Dongsheng, SHI Zuomin, LIU Shirong, et al (7857)
Effects of simulated acid rain stress on the PS II reaction center and free radical metabolism in leaves of longan	LI Yongyu, PAN Tengfei, YU Dong, et al (7866)
Assessment of organic pollution for surface soil in Shenyang suburbs	CUI Jian, DU Jizhong, MA Hongwei, et al (7874)
The impact of rainfall on soil respiration in a rain-fed maize cropland	GAO Xiang, HAO Weiping, GU Fengxue, et al (7883)
Effects of winter crops on enzyme activity and morphological characteristics of root in subsequent rice crops	YU Tianyi, PANG Huancheng, REN Tianzhi, et al (7894)
Dynamic changes of soil moisture and nitrate nitrogen in wheat and maize intercropping field under different nitrogen supply	YANG Ruiju, CHAI Shouxi, MA Zhongming (7905)
Characteristics of the bird diversity and the impact factors in Weishan Lake	YANG Yuewei, LI Jiuen (7913)
The effect of cropping landscapes on the population dynamics of the cotton bollworm <i>Helicoverpa armigera</i> (Lepidoptera, Noctuidae) in the northern Xinjiang	LU Zhaozhi, PAN Weilin, ZHANG Xin, et al (7925)
The seasonal variations of nitrogen and phosphorus release and its fluxes from the sediments of the Beili Lake in the Hangzhou West Lake	LIU Jingjing, DONG Chunying, SONG Yingqi, et al (7932)
Optimization of lake model salmo based on real-coded genetic algorithm	GUO Jing, CHEN Qiuwen, ZHANG Xiaoqing, et al (7940)
The influence of climatic environmental factors and fishing pressure on changes of hairtail catches in the northern South China Sea	WANG Yuezhong, SUN Dianrong, CHEN Zuozhi, et al (7948)
Seasonal and spatial distribution of acid volatile sulfide in sediment under different mariculture types in Nansha Bay, China	YAN Tingru, JIAO Haifeng, MAO Yuze, et al (7958)
Review and Monograph	
Research progress on the mechanism of improving plant cold hardiness	XU Chengxiang (7966)
Influences of vegetation on permafrost: a review	CHANG Xiaoli, JIN Huijun, WANG Yongping, et al (7981)
Home-field advantage of litter decomposition and its soil biological driving mechanism: a review	ZHA Tonggang, ZHANG Zhiqiang, SUN Ge, et al (7991)
Research progress on the relationship of pollutants between road-deposited sediments and its washoff	ZHAO Hongtao, LI Xuyong, YIN Chengqing (8001)

《生态学报》2013 年征订启事

《生态学报》是中国生态学学会主办的生态学专业性高级学术期刊,创刊于 1981 年。主要报道生态学研究原始创新性科研成果,特别欢迎能反映现代生态学发展方向的优秀综述性文章;研究简报;生态学新理论、新方法、新技术介绍;新书评介和学术、科研动态及开放实验室介绍等。

《生态学报》为半月刊,大 16 开本,300 页,国内定价 90 元/册,全年定价 2160 元。

国内邮发代号:82-7,国外邮发代号:M670

标准刊号:ISSN 1000-0933 CN 11-2031/Q

全国各地邮局均可订阅,也可直接与编辑部联系购买。欢迎广大科技工作者、科研单位、高等院校、图书馆等订阅。

通讯地址:100085 北京海淀区双清路 18 号 电 话:(010)62941099; 62843362

E-mail: shengtaixuebao@rcees.ac.cn 网 址: www.ecologica.cn

编辑部主任 孔红梅 执行编辑 刘天星 段 靖

生 态 学 报

(SHENGTAI XUEBAO)

(半月刊 1981 年 3 月创刊)

第 32 卷 第 24 期 (2012 年 12 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 32 No. 24 (December, 2012)

编 辑	《生态学报》编辑部 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085 电话:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn	Edited by	Editorial board of ACTA ECOLOGICA SINICA Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China Tel:(010)62941099 www.ecologica.cn Shengtaixuebao@rcees.ac.cn
主 编	冯宗炜	Editor-in-chief	FENG Zong-Wei
主 管	中国科学技术协会	Supervised by	China Association for Science and Technology
主 办	中国生态学学会 中国科学院生态环境研究中心 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085	Sponsored by	Ecological Society of China Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
出 版	科 学 出 版 社 地址:北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717	Published by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷	北京北林印刷厂	Printed by	Beijing Bei Lin Printing House, Beijing 100083, China
发 行	科 学 出 版 社 地址:东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717 电话:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net	Distributed by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net
订 购	全国各地邮局	Domestic	All Local Post Offices in China
国外发行	中国国际图书贸易总公司 地址:北京 399 信箱 邮政编码:100044	Foreign	China International Book Trading Corporation Add:P. O. Box 399 Beijing 100044, China
广告经营 许 可 证	京海工商广字第 8013 号		



ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 70.00 元