

帽儿山

Maoershan

Senlin Shengtaixitong Turangdongwu ji
Turangtantongliang Dongtai Yanjiu

森林生态系统土壤动物及 土壤碳通量动态研究

张利敏 ● 著



中国财经出版传媒集团



经济科学出版社
Economic Science Press

帽儿山森林生态系统土壤 动物及土壤碳通量 动态研究

张利敏 著

中国财经出版传媒集团



经济科学出版社
Economic Science Press

图书在版编目 (CIP) 数据

帽儿山森林生态系统土壤动物及土壤碳通量动态研究/张利敏著. —北京: 经济科学出版社, 2019. 3
ISBN 978 - 7 - 5218 - 0434 - 8

I. ①帽… II. ①张… III. ①森林生态系统 - 土壤生物学 - 动物学 - 研究②森林生态系统 - 土壤 - 碳 - 储量 - 研究 IV. ①Q958. 113②S153. 6

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2019) 第 059251 号

责任编辑: 刘 莎
责任校对: 隗立娜
责任印制: 邱 天

帽儿山森林生态系统土壤动物及土壤碳通量动态研究

张利敏 著

经济科学出版社出版、发行 新华书店经销

社址: 北京市海淀区阜成路甲 28 号 邮编: 100142

总编部电话: 010 - 88191217 发行部电话: 010 - 88191522

网址: [www. esp. com. cn](http://www.esp.com.cn)

电子邮件: [esp@esp. com. cn](mailto:esp@esp.com.cn)

天猫网店: 经济科学出版社旗舰店

网址: [http: //jjkxcs. tmall. com](http://jjkxcs.tmall.com)

固安华明印业有限公司印装

880 × 1230 32 开 5.5 印张 110000 字

2019 年 3 月第 1 版 2019 年 3 月第 1 次印刷

ISBN 978 - 7 - 5218 - 0434 - 8 定价: 23.00 元

(图书出现印装问题, 本社负责调换。电话: 010 - 88191510)

(版权所有 侵权必究 打击盗版 举报热线: 010 - 88191661)

QQ: 2242791300 营销中心电话: 010 - 88191537

电子邮箱: [dbts@esp. com. cn](mailto:dbts@esp.com.cn))

前 言

土壤动物是指在生命周期中有一段时间稳定地在土壤中渡过，而且对土壤能产生一定影响的动物，是土壤中和落叶下生存着的各种动物的总称，种类极其丰富，分布非常广泛。土壤动物主要属无脊椎动物，包括环节动物、节肢动物、软体动物、线形动物、原生动物等等。它们是生态系统物质循环中的重要消费者和分解者，在其生命活动过程中，对土壤有机物质进行强烈的破碎和分解，一方面积极同化各种有用物质以建造其自身，另一方面又将其排泄产物归还到环境中不断改造环境。所以在土壤环境中生活的多种土壤动物，参与土壤的形成、发育、理化性状变化，在土壤肥力的形成和演变、有机物质的分解等多方面起

着重要作用，同时也是土壤碳循环的重要一环。

岩石圈是地球上最大碳库，土壤碳通量是陆地碳库将碳素以 CO_2 形式归还大气的主要途径。土壤中的微生物、根系及土壤动物通过呼吸作用将碳释放到大气，然后再通过绿色植物的光合作用及生命活动将其固定在土壤中，亿万年来维持着一个较为稳定的水平。然而现阶段人类的活动，很大程度上改变了土壤碳通量，森林的过度砍伐和土地利用改变导致土壤呼吸已经成为陆地生态系统向大气释放二氧化碳的最大的源，土壤碳库逐渐变成碳源，生态系统的碳汇功能正在减弱，这已经对人类的生存和发展造成了严重的威胁，这种现状已经引起从政府到学术界的广泛关注。我们迫切需要对碳循环的各个环节进行深入研究，掌握其机理和现状，以对其发展变化进行准确预测。百年来，该领域的研究主要集中在地上部分，然而随着发展，越来越多的学者意识到，地下部分才是这个过程中最不确定的因素。而我们对这个部分，尤其是地下的土壤动物部分仍然知之甚少。

所以，本书从土壤生态学的角度出发，以典型温

带森林为研究区域，选择水热条件及理化性质不同的森林生态系统，对该地区的土壤动物与土壤呼吸的特征及相互关系进行研究。本书阐述了温带森林土壤呼吸的变化规律，土壤动物群落结构的季节变化特征，并通过季节变化规律推断土壤呼吸与土壤动物群落结构多样性对温度变化的响应。这些研究结果将为土壤生态学研究工作者提供参考和借鉴。

本书是研究组对土壤动物与土壤碳循环关系研究的一个阶段性总结，系统介绍了我们在该研究过程中的研究方法和主要的研究成果。本书的所有章节均为张利敏所著，第四章土壤动物的研究结果由李娜提供和整理。

本书是国家自然科学基金项目“基于分子技术对不同有机碳输入方式下土壤线虫与微生物关系的研究(31670619)”和“东北典型温带森林大型土壤动物呼吸对气候暖化的响应(41101048)”，以及黑龙江省留学归国人员科学基金“基于分子技术对不同有机碳输入下土壤微食物网的研究(LC2018011)”等研究的基础上整理而成的主要成果，同时本书的出版也得到了

哈尔滨师范大学研究生培养质量提升工程项目的资助。衷心感谢张雪萍教授的指导，感谢帽儿山森林生态系统国家野外科学观测研究站全体工作人员的支持，感谢李娜、王琳等同学的鼎力相助。

由于作者水平有限，难免有错误和疏漏之处，敬请读者批评指正！

张利敏

2019年3月于哈尔滨

目 录

第一章 绪论	1
第一节 研究目的意义	1
第二节 国内外研究概况、水平和发展趋势	4
第三节 研究主要内容	21
第二章 研究区概况及研究方法	26
第一节 研究区概况	26
第二节 研究方法	30
第三章 土壤呼吸及土壤异养呼吸与温度及 湿度的关系	38
第一节 实验设计与方法	38

帽儿山森林生态系统土壤动物及土壤碳通量动态研究

第二节 实验结果	41
第三节 讨论与结论	51
第四章 土壤动物群落季节变化动态	56
第一节 实验设计与方法	56
第二节 实验结果	58
第三节 讨论与结论	80
第五章 土壤速效养分季节变化动态	84
第一节 实验设计与方法	84
第二节 实验结果	86
第三节 讨论与结论	103
第六章 土壤呼吸与土壤动物相互关系	107
第一节 实验设计与方法	107
第二节 实验结果	109
第三节 讨论与结论	124
第七章 主要结论与展望	129
参考文献	138
后记	164

第一章

绪 论

第一节 研究目的意义

全球气候变化已成为科研工作者、政府机关乃至国际社会非常关注的领域（方精云，2000）。它对生态系统生产力、植物群落结构和土壤生化过程都产生了非常深刻的影响（IPCC，2007）。全球气候变化归根结底是全球碳循环发生变化的结果（Cox et al.，2000）。土壤碳库是陆地生态系统中最大的碳库，以有机形式储存于土壤中的碳有1 400 ~ 1 500PgC，远远多于陆地植被碳库（500 ~ 600PgC）和全球大气碳库（750PgC）（Schlesinger，1990）。土壤表面 CO₂ 通量（Soil surface CO₂

flux, RS), 即通常所指的土壤呼吸 (soil respiration), 是陆地生态系统最大的碳通量 (Schlesinger and Andrews, 2000), 占大气 CO₂ 年输入量的 20% ~ 40% (Raich and Schlesinger, 1992), 是化石燃料释放 CO₂ 的十倍之多 (Schimel et al., 1996), 其数量的微小改变也会对大气 CO₂ 浓度产生很大影响 (Schlesinger and Andrews, 2000)。土壤异养呼吸 (土壤动物呼吸及土壤微生物呼吸) 是土壤呼吸的重要组成部分, 作为土壤有机碳的气态损失的直接途径, 是评价土壤碳收支的关键环节 (花可可等, 2014)。

土壤动物及土壤微生物是土壤生态系统分解作用和养分转化的重要调节者 (Neher, 2001; Ritz and Trudgill, 1999; Yeates, 2003)。在全球变化过程中, 有机体要生存必须具备一个负反馈机制, 使有机体的内部环境不随外部环境的变化而剧烈变化, 从而使整个有机体基本保持稳定 (Kooijman, 1995)。在对微生物的研究过程中, 已经发现了这一机制, 气候变暖引起土壤微生物类群比率 (真菌/细菌) 变化、增强土壤真菌的优势, 微生物群落结构发生相应改变 (张卫健等, 2004), 而这些改变使得全球性的气温升高对总微生物量的影响并不明显 (张乃莉等, 2007)。于强等 (2010) 对内蒙古草原生态系统的研究也表明在群落尺度上, 共协稳定的物种有更高和更稳定的生物量, 由共协稳定物种主导的生态系统有更高的生产力和更大的稳定性 (Yu et al., 2010)。作为土壤生态系统有机体的

重要组成部分，土壤动物数量及群落结构会在全球变暖背景下产生何种响应，这种变化是否会对土壤异养呼吸及土壤碳收支产生影响，土壤异养呼吸与土壤动物群落结构变化之间是否也具有这样一个维持动态平衡的机制等等是本研究想要解决的问题。因此，本研究采用时间代空间的方法，通过对土壤动物群落结构及土壤异养呼吸季节动态的研究来揭示土壤动物对全球暖化的响应机制，探究基于群落水平的土壤动物群落结构是否与温度变化之间存在着一种趋于保持系统稳定的动态平衡，这不仅对于估算生物学过程在东北森林生态系统碳收支中的作用非常关键，而且对于评测中国陆地生态系统在全球碳循环的功能和地位也有着极其重要的意义。

森林生态系统作为陆地生物圈的主体，其本身系生态系统重要的碳库，占全球植被碳库的86%以上，同时也维持着巨大的土壤碳库，约占全球土壤碳库的73%（Post and Emanuel, 1982）。位于中高纬度的东北森林，林地面积占全国的31.4%，是中国森林碳库主要分布地区之一（全国森林资源统计，1996）。且研究表明，随纬度升高，呼吸作用在生态系统碳平衡中占的地位越来越重要（Valentini et al., 2000）。因此对于东北森林，尤其是东北东部的天然次生林（主要分布在黑龙江省）的土壤呼吸及土壤异养呼吸的研究对于了解森林碳库的形成机制、揭示全球碳循环动态具有重要意义（杨金艳和王传

宽, 2006; 杨阔和王传宽, 2010; 国庆喜等, 2010)。国内对不同森林类型的土壤动物生态功能特征已经有过部分研究(柯欣等, 1999; 张雪萍等, 2001, 2005; 殷秀琴等, 2007), 但对土壤动物在森林生态系统碳循环中的作用鲜有报道, 且以往的研究多数都是针对各种森林类型独立进行的, 分析和对比研究结果时, 难以排除立地条件的影响。因此本研究通过对帽儿山同一地点水热条件不同的森林生态系统的土壤动物群落结构及其呼吸释放碳通量的研究, 将不同森林生态系统土壤动物群落结构的季节变化与土壤碳动态联系起来, 使得在土壤动物生态功能研究方面更具有针对性。

第二节 国内外研究概况、水平和发展趋势

一、土壤碳通量

(一) 土壤呼吸及其组分界定

土壤呼吸即土壤表面 CO_2 通量, 是陆地生态系统碳循环的重要环节, 是陆地生态系统将碳素以 CO_2 形式归还大气的主要

途径（陈全胜等，2004）。土壤呼吸包括三个生物学过程和一个非生物过程（见图 1-1）：生物过程包括土壤根系呼吸、土壤动物呼吸和土壤微生物呼吸；非生物过程主要指土壤含碳物质的化学氧化过程（Singh and Gupta, 1977），明确各组分在土壤呼吸中的贡献是碳循环研究和全球变化模拟中的一个课题。根系呼吸是指活根组织等通过代谢把光合作用合成的碳水化合物氧化分解，释放出 CO_2 的过程，也称自养呼吸，其代谢底物

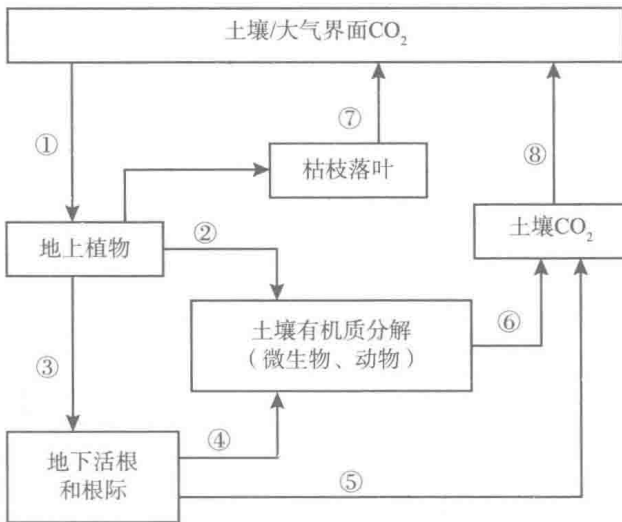


图 1-1 土壤呼吸 C 转化过程

注：①光合作用生产有机物质，净植物生产力；②地上植物残体返回土壤；③分配到植物根系的 C；④根系凋落物及分泌物；⑤活根及根际微生物呼吸；⑥土壤微生物及动物呼吸；⑦凋落物呼吸；⑧土壤表面 CO_2 释放，即土壤总呼吸。

资料来源：王兵艾，2011。

来自植物地上部分。土壤中有有机质、枯枝落叶、死根等在微生物及土壤动物的生命活动下，一部分被分解释放 CO_2 ，另一部分被微生物及土壤动物用于自身合成的过程，称土壤异养呼吸，其利用的是土壤中的有机或无机碳（王兵等，2011）。

土壤自养呼吸和异养呼吸是全球碳平衡中的重要组成部分，对二者进行分离量化有利于准确估算生态系统的净初级生产力和净生态系统生产力及生态系统的碳素周转率，对于定量研究生态系统地下碳通量和碳分配具有重要意义，同时有助于认识全球变化条件下可能形成的不同的碳通量的变化格局（Raich and Schlesinger, 1992; Bond - Lamberty et al., 2004; Boone et al., 1998; Pregitzer et al., 2000; 王兵等，2011）。但由于研究对象本身的差异性及其复杂性，只能得到粗略的结果。就现有的研究结果来看，二者在土壤呼吸中所占比例在不同地区差异十分显著。不同纬度森林生态系统土壤自养呼吸贡献不同，高纬度的北方森林自养呼吸在土壤碳通量中所占比例较大，可达 62% ~ 89%（Ryan et al., 1997）；温带落叶阔叶林中土壤自养呼吸在土壤呼吸中所占比例为 33% ~ 50%（Bowden et al., 1993）；在热带森林中该比例为 10% ~ 50%（Hanson et al., 2000）。不同植被类型土壤自养呼吸贡献不同，温带地区的阔叶林中根系呼吸占土壤呼吸的 33% ~ 50%（Bowden et al., 1993）；针叶林中根系呼吸占土壤呼吸比例为 35% ~

62% (Strirgl and Wickland, 1998; Ewel et al., 1987); 草原生态系统根系呼吸所占比例为 17% ~ 40% (Buyanovsky et al., 1987); 而农田生态系统中该比例为 12% ~ 38% (Buyanovsky and Wagner., 1995; Singh et al., 1988; Paustian et al., 1990)。这种差异可能是由于生态系统、物种或者处于演替阶段的差异引发的, 也可能是由于测定方法的不同造成的。

目前为止, 尚无标准方法量化土壤呼吸各组分, 常用的方法包括以下几种: 根系分离测定法、根生物量外推法、根系去除比较法、同位素法、室内培养分析法、间接测定法、组分综合法等方法 (Hanson et al., 2000; 唐罗忠, 2008; 王兵等, 2011)。其中同位素法对样地干扰小, 可原位分离根呼吸和微生物呼吸, 结果相对准确, 具有不可替代的优势, 但高成本、分析困难减弱其实用性; 根系去除法由于对土壤结构造成扰动, 通常会加剧土壤微生物的呼吸作用, 从而导致对根系呼吸量的估计偏低, 但能有效区分土壤各组分呼吸, 实用性较强 (Kuzyakov, 2006; Rochette and Flanagan, 1997); 根系生物量回归法可以对许多测点进行同时测定, 但得出的根系呼吸量比例有时偏高 (Kuzyakov, 2006); 间接测定法需要建立所测指标与土壤呼吸间的定量关系, 一般只适用于特定的生态系统 (王兵等, 2004)。

(二) 土壤呼吸的温度敏感性

许多研究表明,土壤呼吸和温度之间具有显著的相关关系(Bond - Lamberty, 2010),主要有线性关系(Witkamp, 1966; Froment, 1972; Gupta and Singh, 1981; Lessard et al., 1994)、二次方程关系(Fang and Moncrieff, 2001)、乘幂关系(Kucera and Kirkham, 1971; Lomander et al., 1998; Fang and Moncrieff, 2001)、指数关系(Kucera and Kirkham, 1971; Norman et al., 1992; Lloyd and Taylor, 1994; Raich and Potter, 1995; Landsberg and Gower, 1997; Lavigne et al., 1997; Davidson et al., 1998; Luo et al., 2001; Fang and Moncrieff, 2001; Wang et al., 2002)、逻辑斯蒂方程(Logistic)(Schlesinger and Jones, 1984; Jenkinson et al., 1991)和阿伦尼乌斯方程(Arrhenius)(Johnson and Thornley, 1985; Lloyd and Taylor, 1994; Fang and Moncrieff, 2001; Bond - Lamberty et al., 2004)等。

人们通常采用土壤呼吸的温度敏感性(Q_{10})来表示土壤呼吸对温度变化的反应强度(Lundegårdh, 1927)。伦德高(Lundegårdh)研究表明土壤呼吸在 $10^{\circ}\text{C} \sim 20^{\circ}\text{C}$ 时 Q_{10} 值为2,自此, Q_{10} 方程被广泛用于土壤呼吸的估算,且许多生态学模型均采用单一固定的 Q_{10} 值(Fung et al., 1987)。但实际上,土壤呼吸对温度变化的反应不是一成不变的,在不同的温度条件