

国家自然科学基金项目 (201501070) 资助
研究一般项目 (L2015451) 资助

温带森林凋落物和土壤 有机碳稳定性 对大气氮沉降等因素的响应

吴娜娜 唐婧 王宇思 著

Wendai Senlin Diaoluowu He Turang
Youjitan Wendingxing
Dui Daqi Dan Chenjiang Deng Yinsu De Xiangying

中国矿业大学出版社

辽宁省博士科研启动基金项目(201501070)资助
辽宁省教育厅科学研究一般项目(L2015451)资助

温带森林凋落物和土壤有机碳稳定性 对大气氮沉降等因素的响应

吴娜娜 唐 婧 王宇思 著

中国矿业大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

温带森林凋落物和土壤有机碳稳定性对大气氮沉降等因素的响应 / 吴娜娜, 唐婧, 王宇思著. —徐州: 中国矿业大学出版社, 2018.7

ISBN 978 - 7 - 5646 - 4034 - 7

I. ①温… II. ①吴…②唐…③王… III. ①温带林—森林生态系统—研究 IV. ①S718.54

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 160718 号

书 名 温带森林凋落物和土壤有机碳稳定性对大气氮沉降等因素的响应

著 者 吴娜娜 唐 婧 王宇思

责任编辑 李 敬

出版发行 中国矿业大学出版社有限责任公司

(江苏省徐州市解放南路 邮编 221008)

营销热线 (0516)83885307 83884995

出版服务 (0516)83883937 83884920

网 址 <http://www.cumtp.com> E-mail: cumtpvip@cumtp.com

印 刷 徐州中矿大印发科技有限公司

开 本 880×1230 1/32 印张 3.75 字数 101 千字

版次印次 2018 年 7 月第 1 版 2018 年 7 月第 1 次印刷

定 价 22.50 元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)

前言

氮沉降的升高有可能增加凋落物和土壤中碳存储量(carbon storage),主要是由于氮素对木质素类等难降解成分分解酶活性有抑制作用,然而,目前有关森林覆盖层和土壤对氮添加响应的报道显示出并不一致的结论。在本书中,介绍了对中国长白山阔叶红松林林地施氮处理6年,施氮量为背景条件下增加 $50 \text{ kgN}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 的森林覆盖层和土壤矿质层中有机碳和氮以及木质素酚类(lignin phenols)和次级脂肪酸(ΣSFA)的调查研究。结果显示,在调查的四个层位中,总碳并未受到氮添加的影响[凋落物层(forest floor litter), $P=0.157$; 降解凋落物层(degraded litter), $P=0.212$; O层(O-horizon), $P=0.170$; 土壤矿质层(mineral soil), $P=0.198$],同时,总氮也并未呈现出显著的变化。但是在降解凋落物层($P=0.100$)和矿质层($P=0.118$),木质素酚类的浓度有增加的趋势,约 $5\% \sim 16\%$; 在凋落物层($P=0.550$)和 O层($P=0.933$)并未观察到显著变化。同时,在森林覆盖层和土壤层,表征木质素降解程度的参数没有受到氮添加作用的连续性影响,但在降解凋落物层 Ac/Al_v 有显著下降的趋势。可萃取的次级脂肪酸的浓度在 O层呈现出显著性增加的现象,增加约 16% ($P=0.041$)。在凋落物和土壤层,木质素分子动力学主要受微生物分解、转移和吸附动力学的影响,氮添加所起到的作用并未得到相关的证实。该研究结果与现有的部分研究结果一致,即整体来说,短期的氮添加不足以引起凋落物和土壤化学特性中的碳氮的改变,但木质素酚类和次级脂肪酸的响应可能与抑制微生物分解的相关过程有关。

凋落物的分解过程受气候条件、凋落物的质量和有机分解者等共同协调作用,然而这些因素的相对重要性和相互关系随着植物群落发育过程而变化。本书还介绍了有关在美国东部的史密森尼环境研究中心(Smithsonian Environmental Research Center, SERC)开展的研究,通过凋落物袋野外实验,调查了在蚯蚓(earthworm)和森林年龄(forest age)两个因子影响下,北美鹅掌楸(tulip poplar)凋落物分解 11 个月有机碳和氮以及木质素酚类和次级脂肪酸的变化。在该研究区域,总共设置了 6 个样地:2 个林龄较小的样地(Young),具有高数量的蚯蚓;2 个林龄较大的样地(Old),伴随着低数量的蚯蚓;2 个成熟林样地(Mature),没有蚯蚓。研究发现,凋落物分解 11 个月后,碳和氮浓度以及木质素酚类的浓度并没有受到蚯蚓的显著影响。然而,蚯蚓优先降解脂肪类物质的现象在小孔径的凋落物袋中被积累的 Σ SFA 所证实。林龄对分解产物的碳和氮的浓度具有重要的影响,成熟林中碳和氮的浓度显著高于处于演替中的森林,特别是微生物细菌和真菌的组成和群落结构可能是潜在控制因子。成熟林中,木质素的浓度比较低, Σ SFA 的浓度比较高,可能在处于演替中的森林中因蚯蚓的存在而间接导致真菌生物量下降或者土壤其他特性的改变。在蚯蚓和森林年龄的影响下,凋落物分解产物由脂肪类向芳香族转移,从而有可能影响有机碳的稳定性。

本书内容以第一作者沈阳建筑大学吴娜娜的博士学位论文为基础,并整理其承担的辽宁省博士科研启动基金项目“东北人工林土壤碳稳定性对大气氮沉降增加的响应”和辽宁省教育厅科学研究一般项目“模拟氮沉降对东北人工林土壤固碳潜力影响研究”的部分结果而成。书稿撰写过程中,沈阳建筑大学唐婧和中国能源建设集团辽宁电力勘测设计院有限公司王宇思提供了一些资料和帮助。

温带森林凋落物和土壤有机碳稳定性对大气氮沉降等因素的

前 言

响应研究,为更准确地评估大气氮沉降增加背景下凋落物和森林土壤的固碳潜力及构建全球碳循环模型提供了数据支持和理论依据。由于作者水平有限,本书在研究的深度与广度上还有不足,不妥之处在所难免,敬请读者不吝指正。

作 者

2018年6月

目 录

1 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 凋落物的来源、研究方法及其分解过程	2
1.3 凋落物和土壤有机碳化学	6
1.4 植物-土壤系统碳分配研究——碳稳定性同位素 脉冲标记技术	9
1.5 氮沉降	15
1.6 蚯蚓和森林年龄	20
1.7 本研究的意义、内容和技术路线	23
2 研究区域与研究方法	28
2.1 长白山研究区域概况	28
2.2 SERC 研究区域概况	34
2.3 碳氮及其稳定同位素分析	38
2.4 木质素和次级脂肪酸分析	43
2.5 统计分析	49
3 氮添加对长白山阔叶红松林凋落物和土壤中有机碳 化学性质的影响	51
3.1 氮添加对蚯蚓种类和数量的影响	51
3.2 氮添加对碳氮含量的影响	53
3.3 氮添加对碳氮稳定同位素的影响	55

温带森林凋落物和土壤有机碳稳定性对大气氮沉降等因素的响应

3.4	氮添加对木质素浓度的影响	57
3.5	氮添加对次级脂肪酸浓度的影响	63
4	蚯蚓和森林年龄对 SERC 凋落物中有机碳化学性质的影响	68
4.1	凋落物碳氮含量及其稳定同位素的分布特征受蚯蚓和森林年龄的影响	68
4.2	蚯蚓和森林年龄条件下凋落物生物化学组成的分布特征	72
4.3	蚯蚓对凋落物分解过程的影响	77
4.4	森林年龄对凋落物分解过程中碳氮的影响	79
4.5	森林年龄对凋落物分解过程中木质素和次级脂肪酸的影响	81
4.6	分解过程中凋落物质量随时间序列的变化	82
5	结论与展望	86
5.1	结论	86
5.2	展望与不足	88
	参考文献	90

CHAPTER 1

绪 论

1.1 引 言

陆地生态系统中,土壤碳存储量占 73%,达 1 500 PgC (Post et al.,1982),是大气碳存储量的 2 倍,约是陆地植被碳库的 3 倍(图 1.1),因此土壤碳库已被认为是陆地生态系统的最大碳库(Siegenthaler et al.,1993)。由土壤呼吸产生的 CO_2 年释放量是化石燃料燃烧产生 CO_2 年释放量的 10 倍(Raich et al.,1995),所以土壤碳库的微小变化,将对大气中的二氧化碳浓度产生明显的波动,对全球碳平衡造成重大的影响(Schlesinger et al.,2000)。森林生态系统占陆地面积的 30%,碳库占土壤碳存储量的 45%(Dixon et al.,1991),如图 1.1 所示,因此,研究森林土壤碳库的动态变化对全球碳循环具有重要的意义。

森林土壤有机质是指存在于土壤中的所有含碳的有机物质,包括土壤中各种动、植物残体,微生物及其分解和合成的各种有机

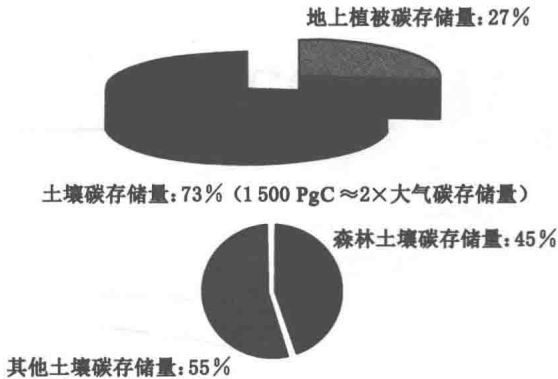


图 1.1 陆地生态系统碳库分布图

物质(李靖,1999)。在风化和成土过程当中,最先出现于母质中的有机体是微生物,所以对原始土壤来讲,微生物是土壤有机质的最早来源。随着生物的进化和成土过程的发展,动、植物残体就成为土壤有机质的基本来源(文启孝,1989)。在通常的自然植被条件下,土壤中的有机物质绝大部分直接来源于土壤上生长的植物残体和根系分泌物。对于森林土壤来说,土壤有机碳主要来源于凋落物和根系分泌物。根系分泌物是指根系在其生长发育期间不断以根产物的形式释放到土壤中的分泌物质,直接或间接影响土壤的营养有效性(王建林 等,1993)、腐殖质及微生物的活动(吴辉等,1992),进而影响土壤有机质的含量。

1.2 凋落物的来源、研究方法及分解过程

凋落物是指丛林生态系统内,由生物组分产生并归还到林表地面,起到保持生态系统功效的全部有机物质总称,是分解者的物

质和能量的来源(王凤友,1989),包括林内乔木和灌木的枯枝、枯叶、落皮及果实、野生动物残骸及代谢产物,和林下枯死的草本植物及枯死植物的根。森林凋落物每年秋季有大量的有机质归还土壤,是森林土壤有机质的主要来源。

目前研究凋落物量的研究方法主要有:

(1) 收集面积法。即直接采用凋落物收集器法(Litter Trap)估测森林凋落量,一般根据不同的研究目的与对象,凋落物收集器的面积各不相同,多采用 1 m^2 的收集器。为了达到更好的收集效果,总收集面积应达到调查面积的 1% (王凤友,1989)。但一般野外样地面积比较大,很难达到,所以实际工作中,一个样地至少设置 10 个收集器,每个收集器的面积不小于 0.2 m^2 (MacLean et al.,1978)。

(2) 样品收集法。采取定期收集凋落物的方法来估测森林凋落量,不同的森林类型和季节,收集的时间不同。例如,热带雨林凋落量比较大,并且雨水淋洗和凋落物的分解速度比较快,收集的时间一般很短(Spain,1984);阔叶林凋落物的分解也比较快,一般 3 个月左右采集一次样品;而对于针叶林凋落物的分解缓慢,可半年或一年定期采集一次样品(王建林 等,1998)。凋落物质量损失和分解速度的研究通常采用凋落物袋法(Litter Bag),具体是指将凋落物风干称重后置于凋落物袋中,将其放于森林凋落物覆盖层或者埋藏于土壤内,定期进行时间序列测量凋落物分解的质量损失和分解速率的方法。凋落物袋一般采用尼龙网制作而成,网袋孔径的大小对于分解具有一定的影响,目前多采用控制孔径大小而控制进入袋内参与分解的生物类群(Filley et al.,2008b)。凋落物袋孔径的大小,依据所研究的对象、目的和具体环境而定,是影响凋落物分解的重要因素。

凋落物在分解过程中,其所含的营养物质逐渐释放到土壤中,对土壤有机质含量具有重要的影响(Hobara et al.,2014)。凋落

物分解的快慢对于土壤有机质的积累以及土壤肥力的维持和改善具有非常重要的意义(Chapin III et al., 2002)。凋落物是森林生态系统生产力的主要构成部分,其分解过程是生物地球化学循环中的重要环节之一,是森林植物在其生长发育过程中所需养分的主要来源。凋落物分解是生态系统物质的循环和能量的转换,通过凋落物的分解归还至大气中的 C 量是全球碳循环中的一个重要组成部分。以往研究发现,全球因凋落物分解所释放的 CO_2 量为 68 GtC/a,约占全球年碳流通量的 70% (Raich et al., 1992)。凋落物的分解速度是森林生物量和养分含量的主要决定因素,同时对土壤的理化性质具有重要的影响。

凋落物的分解过程是多门学科的交叉过程,包括物理和化学过程,以及对其研究所需要的生态学、土壤学、微生物学及其生物化学等(Swift et al., 1979)。森林凋落物的分解过程,一般由以下作用共同完成:淋溶作用,即凋落物中可溶性物质通过降水等而被淋溶;自然粉碎作用,即主要经由腐食动物的啃食破坏完成;代谢作用,即主要由腐生微生物的活动把复杂的有机化合物转化为简单无机化合物。淋溶作用是潮湿环境中凋落物质量损失的主要过程;凋落物经由土壤动物粉碎破坏后,增加了凋落物的表面积,并为微生物的发展滋生供给能量和营养;之后的碎屑在各类分解者主要包括真菌、细菌和放线菌以及各类酶系统作用下生物降解(郭剑芬等, 2006)。凋落物的分解过程一般分为两个阶段:分解速率较快阶段和分解速率较慢阶段,初期出现较快的分解速率,主要是由于分解的是水溶性物质和易分解的碳水化合物,之后随着木质素等难降解组分不断积累,分解速率明显减慢(Aerts, 1997)。

凋落物分解快慢受内因和外因的共同影响。内因主要指凋落物自身的化学成分、物理结构等固有的性质,如凋落物含碳量、木质素含量、C/N 比值等(Moore et al., 1999),在外界环境一致条件下,因基质质量的差异可能造成凋落物分解速率 5~10 倍的变化。

N、P、木质素浓度、C/N、C/P、木质素与养分比值是常见的凋落物质量指标,其中 C/N 和木质素/N 是比较常用的反映凋落物分解速率的参数(Sariyildiz et al.,2003)。外因指影响凋落物分解的各类情况因子,包括生物因子和非生物因子,其中生物因子主要是指各类分解者,如土壤动物和微生物等是主导因子,对凋落物的分解起到直接的作用,但是温度作为影响生命活动的主导因子,对微生物的数量和酶活性具有重要的影响。土壤微生物和土壤动物大都集中分布在 0~10 cm 的土层中,该区域的温度比较适宜,并且由于土层枯枝落叶覆盖使其保持湿润状态,有利于微生物的分解,以及通过粉碎作用及对凋落物中难分解成分的生物降解而加速凋落物的分解(Garcia-Pausas et al.,2004)。土壤中酶的活性高低直接影响着微生物对凋落物的分解,微生物的群落组成又影响着酶的类型及生产率,以往研究表明,大部分微生物具有产生蛋白质酶和纤维素酶的作用,而只有少量的微生物主要是真菌,具有产生木质素酶的作用,因此,相对于其他组分来说,木质素相对更稳定一些(Voriskova et al.,2014)。非生物因子则是通过影响分解者生物的活动而对凋落物分解起到间接作用,如土壤温度、土壤湿度、土壤的 pH 值等(Cornwell et al.,2008)。土壤 pH 值越低(4.5~5.7),凋落物的分解越慢,因此氮沉降增加及土壤有机质演替过程中有机酸累积均可造成 pH 值降低,从而影响微生物的数量及凋落物的分解速率(Micks et al.,2004)。

凋落物分解过程中化学成分的变化受到研究方法的限制,但随着实验技术的发展,如同位素示踪法、生物化学法的应用,凋落物分解过程中成分的变化规律逐渐明了。对凋落物的深入研究促进了对生态系统主要功效过程的熟悉,对森林生态系统的功效评价与管理具备积极作用。目前 CO₂ 浓度升高、气温上升、氮沉降增加等全球变化问题日益受到关注,因此,在此环境变化下,凋落物分解过程随之会有怎样的变化成为生态学家关注的热点之一。

1.3 凋落物和土壤有机碳化学

凋落物和土壤有机碳的化学组成基本类似,其中土壤有机碳(soil organic carbon, SOC)主要来自植物和微生物,在环境条件、输入和土壤性质的影响下,伴随着不同程度的物理和化学保护而形成复杂的混合物(Sollins et al., 1996; Sollins et al., 2006)。土壤有机碳由于背景值较高,对气候变化、土地管理措施以及土地利用方式改变的响应具有一定的滞后性,因此,短时间内很难检测出其发生的微小变化。

根据研究需要的不同,有机碳组分的分类方法各异。但根据各类方法性质的差异及获得的组分差异,这些方法可分为三类:物理技术、化学技术和生物学技术。

1.3.1 物理技术

物理分组的根据是密度、粒径巨细和空间散布,可分离出有机碳的活性组分和惰性组分。由于破坏性小,物理分组成为当前研究土壤有机碳组分的主要方法之一。通过物理性质的差异或者破坏空间分布获得不同稳定性的碳组分。有机碳与不同粒径土粒的结合程度及在土壤团聚体内外的分布都会影响其分解动态。原始状态的土壤,通过干湿筛及振荡、超声波处理分散、密度离心和沉降等,将可分离出有机碳的活性组分和惰性组分。物理方法可分为密度分组、粒径分组和联合分组(张国等, 2011)。

(1) 根据密度,可以分为轻组碳和重组碳。轻组碳主要是指新添加的,介于新鲜有机质和腐殖质间的碳库,主要包括各种半分解的残体(von Lützow et al., 2007);重组碳主要是指腐殖质,大部分与矿物结合,分解程度较高,因此 C/N 较低,是土壤有机碳的主

要储存库(John et al.,2005)。

(2) 颗粒巨细分组主要包括有机碳的团聚体分组和粒径分组,两者之间的区别在于土壤崩解处置时前者采用湿筛和振荡分离的方式取得水稳定性团聚体,后者除采取湿筛外,用超声波进一步分离土壤,粉碎团聚体,从而取得更稳定的有机物-土粒复合体。团聚体分组出来的团聚体以 $250\ \mu\text{m}$ 为界分为大团聚体($>250\ \mu\text{m}$)和微团聚体($<250\ \mu\text{m}$),微团聚体进一步可细分为 $53\sim 250\ \mu\text{m}$ 团聚体和 $<53\ \mu\text{m}$ 团聚体(Puget et al.,2000)。粒径分组根据有机碳结合的土粒按大小分为黏粒($<2\ \mu\text{m}$)、粉粒($2\sim 20\ \mu\text{m}$)和砂粒($20\sim 2\ 000\ \mu\text{m}$)(Preger et al.,2010)。

(3) 联合分组是指将密度和粒径两种方式相结合分离出颗粒有机碳(particulate organic carbon)的方式。颗粒有机碳主要包括相对粗大的非腐殖质化的不同分解阶段的植物残体以及微生物的分解产物等,与轻组碳的性质相似,但含有更低的 C/N,分解更完全(Gregorich et al.,2006)。颗粒有机碳有两种存在形式:位于团聚体间的游离态(fPOM)和团聚体内的闭蓄态(oPOM),后者具有更高的稳定性(von Lützow et al.,2007)。

1.3.2 化学技术

化学分组基于土壤有机碳在各类提取剂中的溶解性、水解性和化学反应性从而分离出各类组分:溶解性有机碳是生物可代谢有机碳,包括有机酸、酚类和糖类等;酸水解方法可将有机碳分为活性成分和惰性成分,活性成分主要包括蛋白质、核酸和多糖,惰性难分解成分主要是木质素、脂肪、蜡、树脂和软木脂等;利用 KMnO_4 方法模拟酶氧化可分离出活性碳和非活性碳,新鲜有机碳中所含成分按分解速率大小依次为:简单糖类和氨基酸 $>$ 蛋白质 $>$ 纤维素 $>$ 半纤维素 $>$ 脂类、淀粉和蜡 $>$ 木质素等(Rovira et al.,2000)。

1.3.3 生物技术

生物技术是指利用生物学方法测定出微生物生物量碳和潜在可矿化碳,利用一定方法测定进行矿化的生物和被矿化的有机残体的生物量,或利用有机碳作为底物的反应来推断土壤中生物可利用的有机碳量。

(1) 微生物生物量是指土壤中体积小于 $5\sim 10\ \mu\text{m}^3$ 的活的微生物总量(包括细菌、真菌和微动物体等),由于微生物的周转周期一般少于 5 d,因此是土壤活性有机碳库的主要组成部分。土壤微生物生物量碳(microbial biomass carbon)一般采用氯仿熏蒸提取法(氯仿能够通过溶解细胞膜上的脂类从而杀死微生物,使细胞内容物释放到土壤中)测定。经由计算熏蒸和未熏蒸土壤中提取的溶解性有机碳的差值,提取周期短,适用于大批量样品的测定。

(2) 经由微生物的分解,将有机碳转化成无机碳的过程,即土壤有机碳的矿化过程当中微生物呼吸释放 CO_2 ,分解者主要是各类真菌、细菌和土壤动物。测定的方法一般为测定密闭容器内微生物分解有机碳所释放的 CO_2 (Haynes, 2005)。

Parton et al.(1987)将土壤有机碳库分为活性库、缓性库和钝性库,其研究发现,活性有机碳(active/labile organic carbon)对土地管理及利用方式等因子变化的反应较灵敏,总有机碳更敏感,常被用来作为有机碳早期变化的指示物,而钝性库则表征土壤的长期累积和固碳能力。其他研究将有机碳分为五类:可降解植物、抗分解植物、生物有机碳、物理稳定有机碳和化学稳定有机碳(Jenkinson, 1977)。另外,按照有机碳在土壤结构中的散布和功效,将其分为游离态颗粒有机碳、闭蓄态颗粒有机碳、矿物结合态有机碳和可溶性有机碳(Six et al., 1998);利用有机碳在土壤中的平均停留时间的差异,将土壤有机碳分为活性碳库、受保护的缓性碳库、未受保护的缓性碳库和难转变的稳定碳库(Kucharik et al.,

2000)。除此之外,根据有机碳库对外界因素的敏感性和周转速度,将其分为活性有机碳库和惰性有机碳库(Dalal et al., 2001),具体包括单糖、淀粉、简单蛋白质、粗蛋白、半纤维素、纤维素、脂肪、蜡质等以及木质素,其中,单糖多糖类碳水化合物易降解,而高聚物如脂肪、蜡质及木质素难降解(Kögel-Knabner, 2002; Schmidt et al., 2011)。

因此,土壤有机碳的稳定机制之一为难降解组分如木质素、软木脂及角质产生的生化保护,由进入土壤的植物残体本身的化学组成、分解程度及分解者生物群落等多种因素所决定(Sollins et al., 1996)。除此之外,土壤中的团聚体(aggregate)长久以来被作为土壤结构稳定性的替代指标,可以提高土壤有机碳稳定性,能够为包裹在其内的有机碳提供物理保护(Six et al., 2004);土壤金属氧化物、黏粒含量及其表面活性如比表面积和表面电荷、黏土矿物组成对有机碳的稳定性具有重要影响,尤其是有机碳与黏土矿物中的Fe、Al、Mn等阳离子通过配位体置换、高价离子键桥、范德华力和络合作用结合构成有机无机复合体而形成物理化学保护(Baldock et al., 2000; Filley et al., 2008a; Tisdall et al., 1982),导致有机碳的生物有效性明显下降,即提高土壤有机碳的稳定性。本书主要研究凋落物和土壤有机碳不同组分的生化稳定性。

1.4 植物-土壤系统碳分配研究——碳稳定性 同位素脉冲标记技术

工业革命以来,随着人类活动二氧化碳排放量不断增加,2008年释放到大气中的人为CO₂的量为8.7 PgC,而同年陆地从大气中吸收的CO₂量高达4.3 PgC(Le Quere et al., 2009),因此,陆地生态系统在调控全球碳循环的过程当中起着举足轻重的作用。