

森林土壤有机碳空间分布特征及其影响因素研究

艾东升

四川省安岳县自然资源和规划局 四川 安岳 642350

摘要：森林土壤有机碳分布受多因素影响。水平尺度上，纬度、植被类型和地形条件不同，其密度有别；垂直剖面上，有机碳含量随土层深度增加而递减。气候因素中，温度和降水通过影响微生物活动等调控有机碳动态。植被与生物因素从输入、分解转化等环节影响其含量与稳定性。人类活动方面，土地利用变化、经营管理措施影响碳储量与平衡，全球变化下大气CO₂浓度升高和氮沉降对其影响复杂，净效应因生态系统和管理方式而异。

关键词：森林土壤；有机碳；空间分布；影响因素；碳循环

引言：森林土壤有机碳作为陆地生态系统碳循环的关键环节，其分布特征受自然因素与人类活动共同调控。水平尺度上，纬度、植被类型及地形条件通过影响水热条件与有机质输入，塑造了有机碳的差异分布格局；垂直剖面中，有机碳随深度增加呈递减趋势，表层积累显著而深层稳定。同时，气候、植被、地形与土壤性质等自然因素，以及土地利用变化、经营管理措施和全球变化响应等人类活动，均深刻影响着土壤有机碳的动态平衡。

1 森林土壤有机碳的空间分布特征

1.1 水平尺度上的分布差异

在水平尺度上，森林土壤有机碳密度受多种因素的综合影响，在不同纬度带、植被类型和地形条件下表现出明显的差异。（1）从纬度角度来看，高纬度区域通常具有较高的土壤有机碳储量。这是因为高纬度地区气候寒冷，低温环境抑制了微生物的活性，减缓了有机质的分解速率。同时，寒冷的条件使得植被生长周期较长，有机物质输入相对稳定且持续积累。例如，在北极和亚北极地区的针叶林森林中，大量的枯枝落叶和倒木在低温下分解缓慢，逐渐形成了深厚的有机碳层。相反，热带与亚热带地区气候温暖湿润，微生物活动极为活跃，有机质分解速率快。尽管这些区域植被生长旺盛，有机物质输入量大，但快速的分解作用使得碳积累相对较低。（2）植被类型也是影响土壤有机碳密度的重要因素。不同类型的植被具有不同的生物量、凋落物特性和根系分布。乔木林通常比灌草丛具有更高的碳储量，因为乔木的生物量大，能够通过光合作用固定更多的碳，并以凋落物和根系残体的形式输入到土壤中。而且，不同植被类型的凋落物化学组成不同，如针叶林的凋落物含有较多的木质素和单宁等难分解物质，分解速率较慢，有利于有机碳的积累。（3）地形条件同样对土壤有

机碳分布产生显著影响。坡度、坡向和海拔等地形要素通过改变水热条件来影响有机碳的积累。例如，在山地地区，阴坡由于光照较少、温度较低，微生物活性受到抑制，有机质分解缓慢，土壤有机碳含量通常高于阳坡^[1]。

1.2 垂直剖面上的分布规律

在垂直剖面上，森林土壤有机碳含量呈现出随土层深度增加而递减的显著趋势，这种分布规律是多种生态过程共同作用的结果。（1）表层土壤（0-20cm）作为植被凋落物、根系等有机物质的主要输入层，在森林土壤有机碳循环中占据核心地位。每年，大量的植物残体如枯枝、落叶、残根等不断落入表层土壤，同时植物根系在生长和周转过程中也会向土壤释放有机物质，使得该层土壤有机碳来源丰富。据研究，表层土壤有机碳占比通常超过50%。在此层土壤中，充足的有机物质为微生物提供了良好的生存环境和丰富的食物来源，促使微生物活动极为旺盛。微生物通过分解作用将有机物质转化为简单的无机物，同时自身也进行繁殖和代谢。尽管分解过程迅速，但由于有机物质的持续输入，表层土壤能够不断补充因分解而损失的有机碳，从而始终保持着较高的有机碳含量。（2）随着土层深度的增加，情况发生了明显变化。深层土壤远离地表，难以直接获得来自植被凋落物的输入，根系分布也相对较少，导致有机碳来源逐渐减少。同时，受温度、湿度和氧气含量等环境因素的综合影响，微生物的生存环境变得相对恶劣，其活性逐渐减弱，对有机质的分解作用也随之降低。因此，深层土壤中的碳具有较高的稳定性。这些碳经过长期的积累和复杂的生物化学转化过程，形成了诸如腐殖质等较为稳定的有机质形态。深层土壤有机碳的稳定存在，不仅有助于维持土壤生态系统的结构和功能，为土壤生物提供栖息场所和养分，还能减缓碳的释放速率，在全球气候变化的调节中发挥着不可或缺的重要作用^[2]。

2 影响森林土壤有机碳分布的主要因素

2.1 气候因素

气候因素在森林土壤有机碳的分布格局形成中扮演着至关重要的角色,其中温度和降水是调控土壤有机碳动态的关键气候因子,二者通过影响微生物活动、植物生长及有机质分解等过程,对土壤有机碳的积累与释放产生深远影响。(1)温度对土壤有机碳的影响主要体现在微生物活性方面。低温环境下,微生物的新陈代谢速率减缓,酶活性降低,使得有机质的分解过程变得迟缓,有机碳得以在土壤中长时间留存和积累。相反,高温会激发微生物的活性,加速其分解有机质的进程,导致土壤有机碳的释放速率加快,不利于碳的积累。(2)降水同样对土壤有机碳分布有着显著作用。高湿环境能够为土壤微生物提供充足的水分,维持其正常的生理活动,同时也有利于植物的生长,增加有机物质的输入。而且,湿润的土壤环境可以在一定程度上抑制有机质的分解,促进有机碳的积累。而干旱条件下,土壤水分匮乏,微生物活动受限,植物生长也受到抑制,有机物质输入减少,同时干燥的土壤环境会加速有机质的氧化分解,使得土壤有机碳含量降低。例如,寒温带森林处于低温高湿的环境,其土壤碳密度普遍高于热带干旱林区,这充分体现了气候因素对森林土壤有机碳分布的重要影响。

2.2 植被与生物因素

植被与生物因素在森林土壤有机碳的分布与动态变化中起着核心作用,它们从有机碳的输入、分解转化等多个环节影响着土壤有机碳的含量与稳定性。(1)植被类型是决定有机碳输入量的关键因素之一。不同植被类型具有不同的生物量和生产力,乔木林通常拥有庞大的树冠和发达的根系,其生物量远高于灌草丛,能够通过光合作用固定更多的碳,并以凋落物和根系残体的形式输入到土壤中,因此乔木林土壤一般比灌草丛具有更高的碳储量。而且,凋落物的质量,如碳氮比(C/N比),对有机碳的分解速率有着重要影响。C/N比高的凋落物分解缓慢,能够为土壤提供长期稳定的碳源;反之,C/N比低的凋落物则分解较快,碳释放速率高。(2)微生物群落结构在土壤有机碳的转化与稳定过程中发挥着不可或缺的调控作用。土壤中存在丰富多样的微生物,包括细菌、真菌等,它们通过分解有机物质,将复杂的有机碳化合物转化为简单的无机物,同时也会合成自身细胞物质,将部分碳固定在体内。不同微生物类群具有不同的分解能力和偏好,其群落结构的变化会直接影响有机碳的分解速率和转化方向,进而影响土壤有机碳的积累

与稳定^[3]。

2.3 地形与土壤性质

地形与土壤性质是影响森林土壤有机碳分布的关键因素,它们从不同层面调控着有机碳的积累与稳定。

(1)地形要素对土壤有机碳分布的影响主要体现在对水热条件的改变上。坡度不同,地表径流和土壤侵蚀的强度存在差异。陡坡处,水流速度快,土壤侵蚀严重,表层富含有机碳的土壤容易被冲刷带走,导致土壤有机碳含量降低;而缓坡地区,土壤侵蚀相对较弱,有利于有机碳的积累。坡向通过影响光照和温度条件,间接作用于有机碳分布。阳坡光照充足、温度较高,微生物活动旺盛,有机质分解速率快,土壤有机碳含量相对较低;阴坡则光照较少、温度较低,微生物活性受到一定抑制,有机质分解缓慢,更利于有机碳的积累。海拔也会改变温度和降水格局,高海拔地区气温低、湿度大,有机碳分解速率慢,使得土壤有机碳得以大量积累。(2)土壤性质同样对有机碳的固存能力有着重要调节作用。土壤质地决定了土壤的孔隙结构和保水保肥能力,黏粒含量高的土壤,其比表面积大,对有机碳的吸附作用强,能够有效减少有机碳的分解和流失,增强碳的稳定性。土壤pH值会影响微生物的活性和群落结构,进而影响有机碳的分解过程。不同矿物组成对有机碳的吸附和固定机制也有所不同,一些矿物能够与有机碳形成稳定的复合体,提高土壤有机碳的稳定性,从而影响其在土壤中的分布和含量。

3 人类活动对土壤有机碳的影响

3.1 土地利用变化

人类活动引发的土地利用变化,对土壤有机碳的储量与动态平衡有着直接且深刻的影响。(1)森林砍伐是致使土壤有机碳大量释放的关键因素。森林生态系统长期积累下,土壤中储存着丰富的有机碳,主要来源于植被凋落物、根系周转等。当森林被砍伐,植被覆盖消失,土壤直接暴露在外,失去了植被对风、水等侵蚀力的抵御作用,表层富含有机碳的土壤易被侵蚀流失。同时,砍伐后土壤环境改变,温度升高、湿度变化,为微生物活动创造了更有利条件,微生物分解作用加剧,加速了土壤中原有有机碳的分解,使其以二氧化碳等形式释放到大气中,导致土壤有机碳含量锐减。(2)农田开垦也会对土壤有机碳产生负面影响。将自然植被开垦为农田,破坏了原有的生态平衡,土壤翻耕等操作使土壤结构改变,有机碳矿化分解速度加快。而且农田生态系统的有机物质输入有限,难以弥补因分解造成的碳损失,进一步降低了土壤有机碳含量。(3)退耕还林和生

态恢复措施能增加植被覆盖,提高有机物质输入,改善土壤环境,抑制微生物过度分解,有助于提升土壤的碳汇功能,对维持生态系统的碳平衡意义重大。

3.2 经营管理措施

在森林经营活动中,间伐、施肥等林业措施对土壤碳循环有着重要影响,通过改变凋落物输入情况和土壤微环境,进而左右着土壤碳的动态变化。(1)间伐是通过有计划地砍伐部分林木来调整林分结构。合理的间伐能改善林内的光照、通风条件,为林下植被创造更适宜的生长环境。林下植被丰富度与生物量提升,会使更多凋落物输入土壤,为土壤有机碳积累提供物质基础。同时,间伐改变了林内温度、湿度等微气候,影响微生物的活性和群落结构。不同微生物对碳的分解转化能力不同,微气候改变会促使微生物分解速率变化,从而影响土壤碳循环进程。(2)施肥能调节土壤肥力,促进树木生长。树木生长旺盛,光合作用增强,可固定更多二氧化碳,并通过根系分泌和凋落物归还等方式增加土壤碳输入。此外,施肥还能改变土壤的酸碱度和养分比例,影响微生物生存环境,间接影响其对有机碳的分解与固定。(3)实施可持续的经营管理措施,依据森林生长阶段和生态特征,科学确定间伐强度与频率,合理选择肥料种类和用量,可促进森林生态系统健康发展,维持或增加土壤碳储量,发挥森林在应对气候变化中的碳汇作用^[4]。

3.3 全球变化响应

在全球变化的背景下,大气CO₂浓度升高和氮沉降成为影响土壤有机碳的关键因素,它们对土壤有机碳的影响具有复杂性和不确定性,净效应会因生态系统类型与管理方式的不同而存在显著差异。(1)大气CO₂浓度升高通常会对植被生长产生刺激作用。在CO₂浓度增加的环境中,植物的光合作用效率提高,能够固定更多的碳,进而促进自身的生长和生物量积累。植被生长的增强意味着有更多的凋落物和根系分泌物进入土壤,为土壤有机碳的积累提供了丰富的碳源,在一定程度上增加了碳

输入。(2)氮沉降同样可能对植被生长和土壤碳循环产生影响。氮是植物生长所必需的营养元素,适量的氮沉降可以缓解生态系统中的氮限制,促进植物的生长和繁殖,增加植被的碳固定能力,使更多的碳输入到土壤中。(3)大气CO₂浓度升高和氮沉降也可能带来负面影响。它们可能会改变土壤微生物的群落结构和活性,加速土壤有机碳的分解过程,导致碳的释放增加。在不同的生态系统类型中,如森林、草原、农田等,以及不同的管理方式下,如施肥、灌溉、间伐等,这种促进碳输入和加速碳分解的作用强度会发生变化,最终决定着土壤有机碳的净变化是增加还是减少。

结束语

森林土壤有机碳分布受水平与垂直尺度差异、气候、植被与生物、地形与土壤性质等多因素综合影响,呈现复杂特征。同时,人类活动通过土地利用变化、经营管理措施以及对全球变化的响应,深刻改变着土壤有机碳的储量与动态平衡。这些影响既有促进碳积累、提升碳汇功能的积极方面,也存在导致碳释放、破坏碳平衡的消极后果。深入探究森林土壤有机碳的空间分布特征、影响因素及人类活动的作用机制,对于准确评估森林生态系统碳循环功能、制定科学合理的森林经营与生态保护策略,以应对全球气候变化挑战,具有至关重要的理论和实践意义。

参考文献

- [1]文丽,李超,程凯凯,等.不同农田模式下土壤有机碳、氮、磷及化学计量比的垂直分布特征[J].湖南农业科学,2023(2):38-42.
- [2]王明智.森林土壤碳储量与林分结构关系的研究[J].生态学报,2022,42(5):1234-1246
- [3]刘晓敏.林分结构对森林碳储量的影响机制探讨[J].林业科学,2021,57(3):567-575
- [4]张志远.不同林分结构下土壤碳储量的变化研究[J].土壤学报,2020,57(2):345-356