

The Characteristics of Forest Soil Carbon Pools and Influencing Factors in Xiaowutai Mountain

Funing Xin

Hebei Xiaowutai Mountain National Nature Reserve Management Center, Zhangjiakou, Hebei, 075700, China

Abstract

Forest soil constitutes a vital component of terrestrial carbon sinks. Under climate change, the stability and sensitivity of mountain forest soil carbon sinks have garnered sustained attention. Xiaowutai Mountain lies within the critical transitional zone for mountain forest distribution in North China, featuring significant altitude gradients and distinct vertical vegetation zones, making it an ideal natural study site for investigating spatial variations and control mechanisms of soil carbon sinks. Building upon existing research findings and a standardized framework for soil carbon accounting, this paper examines the content characteristics, vertical distribution patterns, and differences among vegetation types regarding total soil carbon and key carbon components, while also analyzing influencing factors and their pathways through climatic-terrain interactions, vegetation litter input, soil physicochemical properties, and human disturbance.

Keywords

Xiaowutai mountain; forest soil; soil organic carbon; carbon pool; influencing factors

小五台山森林土壤碳库特征及影响因素

忻富宁

河北小五台山国家级自然保护区管理中心，中国·河北 张家口 075700

摘 要

森林土壤是陆地碳库的重要组成部分，在气候变化背景下，山地森林土壤碳库的稳定性与敏感性受到持续关注。小五台山位于华北山地森林分布的关键过渡地带，海拔梯度大，植被垂直带谱明显，为识别土壤碳库的空间分异与控制机制提供了天然样区。本文在综合已有研究认识与土壤碳库核算通用框架的基础上，围绕土壤总碳与关键碳组分的含量特征、垂直分布规律及不同植被类型差异展开论述，并从气候地形、植被凋落物输入、土壤理化性质与人类干扰等方面讨论影响因素与作用路径。

关键词

小五台山；森林土壤；土壤有机碳；碳库；影响因素

1 引言

土壤碳库在陆地生态系统碳循环中具有基础性地位，其变化不仅取决于植被生产与凋落物输入，还受微生物分解、矿物保护、冻融与水热条件等多过程耦合控制。权威评估指出，全球土壤有机碳在地表至 100 厘米土层的储量量级约为 1500 拍克碳，在地表至 200 厘米土层约为 2400 拍克碳，显示出土壤碳库的巨大体量与潜在反馈效应。对山地森林而言，强烈的海拔梯度会在短距离内形成明显的温度与水分差异，进而影响凋落物质量、根系周转、微生物群落与矿物结合过程，使土壤碳库呈现显著的空间异质性。

2 研究区概况与研究方法

2.1 研究区自然地理概况

小五台山地形起伏强烈，海拔梯度带来显著的水热差异与生境镶嵌。小五台山的主峰东台海拔为 2882 米，为太行山主峰，京津冀最高峰，这样的垂直高差使得同一山体上可以出现从山麓到亚高山的连续生态序列，坡向差异进一步改变辐射条件与土壤水分保持，形成阴坡偏冷湿、阳坡偏暖干的常见格局。

在自然地理背景上，小五台山处于华北季风控制区，年内降水与温度变化具有明显季节性。对于土壤碳过程来说，季风区的集中降水会通过土壤含水率波动与淋溶作用影响溶解性有机碳迁移，而冬季低温与冻结期又可能通过抑制分解与改变团聚体结构，影响碳的留存与再矿化节奏。由于本文不进行虚构定量结果，气候的具体数值建议以后续采用保护区气象站或邻近站点多年序列来支持统计检验，这样更

【作者简介】忻富宁（1987-），男，中国河北张家口人，硕士，高级工程师，从事森林生态系统监测与科学研究。

稳妥也更可复核。

2.2 研究区植被与土壤类型

小五台山植被随海拔上升通常呈现由阔叶林到针阔混交林再到针叶林与灌丛草甸的过渡,林下调落物来源与分解难易度随之改变。阔叶林凋落物往往更易分解,促进表层活性碳积累与周转;针叶林凋落物木质素含量高、酸性更强,常与更厚的有机层和更明显的酸化过程相联系,从而影响矿物结合碳的形成与稳定化。土壤类型在山地环境中常表现为随母质与海拔变化的复合分布,同一坡面上也可能因侵蚀与堆积导致土层厚度差异,进而改变单位面积碳库核算结果。山地土壤的一个常见现象是表层有机质丰富但厚度变化大,所以在设计碳库研究时,土层分层深度与容重测定必须同步进行,否则碳密度与碳储量容易被系统性高估或低估。

2.3 样品采集与实验测定方法

针对小五台山的地形与植被镶嵌特征,较常用的方案是在典型海拔带与典型植被类型下布设样地,兼顾坡位与坡向,按土层分层采集土样并测定容重。分层深度可采用0至10厘米、10至20厘米、20至40厘米、40至60厘米等层次,以保证既能刻画表层强变异区,也能覆盖较稳定的矿质土层。每层样品需去除石砾与根系粗段后混匀,保留部分鲜样用于微生物量与溶解性碳测定,风干细磨部分用于总碳与颗粒组分分析。总碳或有机碳的测定可采用元素分析仪干燃烧法,或在去除无机碳干扰后测定,具体取决于土壤碳酸盐背景。微生物量碳常用氯仿熏蒸浸提法。颗粒有机碳与矿物结合有机碳的分离可参照物理分级与密度分离思路,经典的颗粒有机质分离与变化判别框架。土壤理化性质如粒径组成、全氮、pH与阳离子交换量等,可按通用土壤分析方法体系执行。

土壤碳储量核算在逻辑上依赖三项基础量,即碳含量、容重与土层厚度。可用文字公式表达为,某土层单位面积碳储量等于该层碳含量乘以容重再乘以厚度,并对石砾体积分数进行修正。山地土壤石砾含量变化大,这一步的实测往往比算法更重要。

2.4 数据处理与分析方法

数据分析可围绕三个层面展开。第一层面是描述统计与变异性评估,比较不同植被类型、不同海拔带、不同坡向下土壤总碳与各组分的集中趋势与离散程度。第二层面是垂直分布拟合,可采用指数衰减或分段线性模型刻画碳随深度递减的速率差异,并通过模型参数比较同样地形的剖面形态。第三层面是影响因素识别与解释,常用相关分析与多元回归,必要时引入冗余分析或结构方程模型来区分直接效应与间接效应。显著性检验可采用双侧检验并控制多重比较误差,尤其是在同时比较多个植被类型与多层土壤时,避免把偶然差异误判为机制信号。

由于山地样地之间的空间自相关很常见,统计上还应关注独立性假设是否被破坏。若样点沿同一沟谷或同一坡面

密集分布,可通过分层抽样与混合效应模型把坡面或海拔带作为随机效应项,从而降低伪重复风险。

3 小五台山森林土壤碳库特征

3.1 土壤总碳及各组分含量特征

小五台山森林土壤的总碳水平通常表现为表层显著富集、深层相对稳定的格局。表层碳主要来自凋落物分解产物与细根周转输入,属于周转较快、对气候与干扰更敏感的部分;而深层碳更多与矿物表面吸附、微团聚体包埋等稳定化机制相关,周转时间更长。若按组分理解,颗粒有机碳往往对近年植被输入变化响应更快,适合用来指示林分更新、干扰或恢复的短中期效应;矿物结合有机碳的变化更慢,但与长期碳汇能力更相关。

在华北山地森林的一般经验中,针叶林与阔叶林在表层活性碳的比例上可能存在差异,这种差异既来自凋落物化学性状,也来自土壤酸度与微生物分解体系差异。对小五台山而言,若同时测定溶解性有机碳与微生物量碳,还可更细致地追踪碳从输入到微生物加工再到矿物稳定的路径强弱,从而把总量差异解释为过程差异,而不只是现象罗列。

3.2 土壤碳库的垂直分布规律

土壤碳随深度递减几乎是森林生态系统的共同特征,但递减速率与拐点深度在山地环境中变化更大。表层0至20厘米往往承载了最强的凋落物输入与根际效应,碳含量变化幅度也最大,受坡向与林分结构影响尤为明显。进入20厘米以下,根系分布减少、温度波动减弱、矿物保护增强,碳含量下降趋势趋于平缓,碳库稳定性相对更高。

在小五台山这样的高海拔山地,冻融作用可能改变团聚体形成与破坏的平衡,使表层有机质既可能因低温而积累,也可能在春季融化期因物理破碎与脉冲性矿化而出现阶段性损失。若在不同季节重复采样,可观察到溶解性有机碳与微生物量碳的季节摆动,这对解释年际尺度碳库变化很关键。

3.3 不同植被类型下土壤碳库特征差异

不同植被类型下土壤碳库差异的核心来自输入端与稳定端的共同变化。阔叶林往往提供更丰富的易分解底物,使表层微生物活性更高,从而可能形成较高的微生物残体输入并促进矿物结合碳形成;针叶林则可能在较冷湿或较酸性条件下形成更厚的有机层,使表层碳库显著,但矿质层的碳稳定化路径未必同步增强。灌丛与草甸系统的根系往往更密集,地下输入占比更高,可能在一定深度形成相对突出的碳富集带。

小五台山的垂直带谱意味着同一地理单元内可比较多类型生态系统,这种对比优势也带来一个现实问题,即土壤母质与地形背景往往随植被一起变化,导致植被效应与环境效应缠绕在一起。因此在解释植被差异时,最好在相近坡位与母质条件下进行配对样地设计,或在统计模型中把地形因

子纳入控制项。

4 小五台山森林土壤碳库的影响因素

4.1 自然因素对土壤碳库的影响

气候是最上游的控制因子。温度决定分解速率的上限,水分决定微生物可利用性与扩散条件;在季风区,水热不同步还会造成分解与输入的错配,形成阶段性积累或损失。地形通过改变辐射、积雪与径流汇聚来塑造微气候,阴坡往往更利于有机质保存,而阳坡更易发生干旱胁迫与氧化分解。

土壤质地与矿物组成决定了碳的稳定化容量。黏粒与粉粒含量较高的土壤具有更强的矿物表面吸附与有机矿物复合体形成能力,更容易积累矿物结合有机碳。相反,砂质土壤更依赖团聚体物理保护与持续输入来维持碳库。氮与磷等养分条件也会通过限制植物生产与微生物代谢影响碳平衡,氮输入的增加在某些条件下可能提高凋落物量并提升土壤碳输入,但也可能改变分解者群落与酶体系,导致稳定碳分解增强,具体方向需要通过组分与过程指标共同判断。

4.2 人为因素对土壤碳库的影响

土壤团聚体的稳定性,进而使得表层有机层逐渐变薄,地表径流强度增加,不仅减少了植被凋落物等碳输入来源,还降低了碳在土壤中的稳定化机会,这种影响在小五台山实验区人为活动比较集中的区域尤为显著,形成明显的碳库空间差异。

小五台山林缘周边的放牧活动则通过改变地表植被覆盖状况与枯落物归还节律,对碳库产生深刻影响。尤其是在林缘与高山草甸交错带,该区域生态系统本就较为脆弱,放牧强度的微小差异会被放大,进而引发碳库储量的显著分化。过度放牧会导致优势植被退化,根系生长受阻,使得地下碳输入减少,同时枯落物归还量下降且质量变劣,打破土壤碳输入与输出的平衡,长期来看会削弱土壤碳汇能力。

此外,森林火灾干扰与森林病虫害等相关扰动虽也会通过改变碳输入或土壤环境影响碳库,但影响范围与强度远不及人为活动和放牧活动集中。总体而言,人为活动对土壤碳库的作用,主要通过改变植被碳输入端与土壤结构稳定端两条路径同步发生,其中人为活动与放牧的影响更为直接且广泛,仅依靠总碳含量难以厘清其内在机制,需引入碳组分与过程指标,才能更精准地揭示其对土壤碳库的作用规律。

5 结果与分析

5.1 土壤碳库特征综合分析

在综合尺度上理解小五台山土壤碳库,建议把总量分解为三类信息来读。第一类信息是表层活性碳信号,包括颗粒有机碳、溶解性有机碳与微生物量碳,它们对林分变化、干扰与季节波动更敏感,适合用于识别近期变化与管理效应。第二类信息是矿物结合有机碳及其与黏粒粉粒的耦合关

系,它更能代表长期稳定化能力。第三类信息是剖面结构,即碳随深度的衰减速率与拐点位置,它综合反映了根系分布、淋溶迁移与矿物保护的共同结果。

5.2 影响因素相关性与显著性分析

在开展相关性与显著性分析时,建议把影响因素分为水热因子、地形因子、土壤理化因子与植被输入因子四类,并在模型中体现层次关系。一个常见但容易踩坑的做法是把海拔、温度、植被类型同时放入回归而不检查共线性,最后得到的系数方向看似合理,实则不稳定。更稳妥的方式是先方膨胀因子剔除强共线变量,再用逐步回归或信息准则挑选解释力最强的组合,同时把样地或海拔带作为随机效应以处理空间聚集。

显著性检验不应只停留在是否显著,而应回到过程解释。例如若表层活性碳与凋落物量相关更强,而矿物结合碳与黏粒含量相关更强,这往往意味着碳库差异主要由输入端驱动还是由稳定化容量驱动。若阴坡样地在同一植被类型下仍表现出更高的深层碳密度,则需要考虑更高含水率导致的迁移与矿物结合增强,而不只是分解变慢。

需要强调的是,若没有实测数据就直接写出显著性结论,会让论文变得不可验证。本文在这一节只给出适用于小五台山的分析逻辑与判读框架,真正的相关系数、检验统计量与显著性水平应来自你自己的样地数据或可追溯的公开数据集。

6 结论

小五台山森林土壤碳库具有典型的表层富集与随深度递减的剖面特征,总碳差异背后往往是活性组分与矿物结合组分的协同变化。不同植被类型下碳库差异与凋落物输入质量、根系周转以及土壤酸度和质地条件密切相关,而海拔与坡向通过改变水热与冻融过程放大这种差异。影响因素的识别应避免把共线变量混作因果,建议采用分层抽样与混合效应模型等方法提高推断可靠性。面向管理实践,小五台山更需要建立长期定位监测,把活性碳指标与稳定碳指标同时纳入,才能对干扰与恢复的碳效应给出可解释、可核查的结论。

参考文献

- [1] 陈平,谷建才,曹立颜,等.小五台山森林群落物种多样性与土壤养分的相关[J].东北林业大学学报,2010,038(008):34-35.
- [2] 白晓航,张金屯,曹科,等.河北小五台山国家级自然保护区森林群落与环境的关系[J].生态学报,2017,37(11):14.DOI:10.5846/stxb201604140680.
- [3] 白晓航,张金屯.小五台山森林群落优势种的生态位分析[J].应用生态学报,2017,28(12):12.DOI:10.13287/j.1001-9332.201712.002.
- [4] 鲁少波.河北小五台山森林生态系统主要因子间量化关系研究[D].北京林业大学,2009.