

分类号: Q14

学校代码: 10269

密 级:

工 号: 20194094



華東師範大學

博士后研究工作报告

亚热带常绿阔叶林土壤有机碳深度分布模式及其稳定性研究

博士后姓名: 王婧

合作导师: 夏建阳 教授

周天舒 教授

流动站 (一级学科): 环境科学与工程

院系 (所): 生态与环境科学学院

研究工作开始时间: 2019 年 9 月

研究工作完成时间: 2022 年 8 月

华东师范大学 (上海)

2022 年 8 月

分类号 Q14

密级

U D C

编号

华 东 师 范 大 学

博 士 后 研 究 工 作 报 告

亚热带常绿阔叶林土壤有机碳深度分布模式及
其稳定性研究

王婧

工作完成日期 2019 年 9 月—2022 年 8 月

报告提交日期 2022 年 8 月

华 东 师 范 大 学 （上海）

2022 年 8 月

亚热带常绿阔叶林土壤有机碳深度分布模式及其稳定性研究

Vertical distribution of soil organic matter and its stability in subtropical
evergreen broad-leaved forests

博 士 后 姓 名 王 婧

流动站（一级学科）名称 环境科学与工程

专 业（二级学科）名称 环境科学

研究工作起始时间 2019 年 9 月 2 日

研究工作期满时间 2022 年 8 月 2 日

华东师范大学人事部（上海）

2022 年 8 月

摘要

森林是陆地生态系统最大的碳库。尽管森林覆盖面积只占陆地生态系统面积的 30%，森林植被碳储量和土壤碳储量分别占全球植被碳储量的 86%和全球土壤的 71%。因此维持和提升森林生态系统碳储量是减缓气候变化的有效途径之一。在全球气候变化的背景下，森林生态系统的固碳能力受到两方面的影响，一方面森林生态系统植被、凋落物及土壤固持着巨大的有机碳。另一方面，碳原子在森林中具有较长的驻留时间，特别是在植被的茎干和土壤中。在森林生态系统的发育过程中，有机碳输入速率（净初级生产力）的强度和趋势决定森林碳储量的年际变化规律，而驻留时间决定有机碳是否能长久固持。本人在前期研究工作基础上，结合华东师范大学在浙江天童、天目山和舟山群岛等建立的常绿阔叶林固定样地和连续观测平台，通过长期监测、野外调查、放射性碳同位素和模型模拟等手段，揭示土壤有机碳驻留时间和碳年龄的影响因素，为保护常绿阔叶林生态系统的碳汇能力提供理论及数据支持。

由于各国行之有效的森林保护政策，全球森林面积和林龄持续增加。随林龄增加，有机碳输入速率的强度和趋势逐渐下降，因此驻留时间是决定森林固碳能力的关键因素。基于本人前期调查发现中国东部森林的林龄与土壤有机碳驻留时间存在协同增长现象，但是该现象仍缺乏机理性解释。现阶段尚不清楚这两种机制在森林长期发育过程中的相对贡献。本文以中国 12 个东部典型森林样地为研究对象，采用放射性同位素技术，探究我国东部森林年龄和土壤有机碳驻留时间协同增长现象的关键机制，揭示不同组分碳驻留时间的差异及变化规律。在全球范围内，深层（30-100 厘米； 3081 ± 398 年）的 τ_{soc} 显著高于表层土壤（0-30 cm； 332 ± 56 年）。在深层而非表层土壤中检测到林分年龄与 τ_{soc} 之间存在正相关关系。为了验证林分年龄和深 τ_{soc} 之间的正相关关系，我们从中国东部的 12 个永久林地中采集了土壤样本。表层和深层的平均 τ_{soc} 分别为 249 ± 80 和 2087 ± 246 年。

不同海拔梯度的山区由于包含了温度、湿度、光照等诸多环境因子的剧烈变化，有助于分离环境因子、碳输入和土壤特性对土壤有机碳驻留时间的影响。本研究选取天目山具有独特的云雾林特征（海拔 900~1150 米），以亚热带常绿阔叶林土壤为观测对象，系统测量海拔梯度上土壤有机碳含量及其碳年龄，利用气候

梯度差异分析和放射性碳同位素 (^{14}C) 的方法, 区分气候、土壤理化性质对土壤碳年龄的相对贡献, 探讨亚热带森林不同海拔分异主导下的土壤有机碳保存机制和空间差异性。研究结果表明天目山土壤有机碳、全氮、全磷和有效磷含量随土壤深度变化呈现出随剖面递减的趋势。随着海拔的升高, 土壤有机碳年龄也随之升高, 深层土壤有机碳年龄高达 $5196 \pm 50 \text{ year}$ 。温度是调控土壤有机碳年龄分布的最重要因子。同时利用指数函数对天目山土壤有机碳、全氮、全磷和有效磷的垂直分布规律进行模拟, 结果显示表明, 土壤有机碳、全氮和全磷的衰减系数并不会随着海拔的变化而变化, 但土壤中有效磷的衰减系数随着海拔增加而增加。

地下有机碳库是陆地生态系统碳转化与分配的核心。不同来源的有机质呈现出极大的空间异质性和垂向分布变异性, 限制了地下碳库的精确评估。地下碳库的来源主要包括植物源和微生物源有机质, 目前不同来源的有机碳对地下有机碳库的贡献尚待深入研究。海岛生态系统易受到频繁干扰, 土壤发育和植被演化都是多种因素共同作用的结果, 可以综合反应地下碳库在长期尺度上的循环过程。海岛不仅是我国远洋探索和海洋保护的重要支点, 还是具有维持生物多样性和生态功能的平台。尽管已有部分关于海岛生态系统的土壤理化性质的研究, 然而海岛土壤有机碳动态等研究基础数据匮乏, 限制了对海岛生态系统的深入了解。本文在舟山群岛 35 个岛屿上 68 个固定样地为实验平台, 运用放射性同位素和多层连续取样的方法, 解决以下两个问题: 1) 定量舟山群岛地下有机碳库的大小和组成; 2) 结合土壤理化性质、岛屿地理属性和气候因子, 探讨不同土层有机碳的主要调控机制。结果显示舟山海岛土壤有机质含量随土壤深度变化呈现出随剖面递减的趋势, 其中 0-30 cm 的土壤有机碳含量占整个剖面的质量分数为 77%, 全氮含量占整个剖面的质量分数为 68%, 全磷含量占整个剖面的质量分数为 46%; (2) 利用 6 组不同函数的方程对舟山土壤有机质的垂直分布结构进行模拟, 结果显示渐近线指数函数模拟达到最优, 土壤有机质的衰减系数平均值为 -2.73, 具有中等变异性。这些研究内容将为不同深度土壤中有机碳库大小、来源及其主要调控机制提供数据和机理支持, 也为精确土壤碳循环模型提供全新视角。

关键词: 土壤有机碳, 表层和深层, 放射性碳同位素, 土壤异质性, 林龄, 海拔, 岛屿生态系统

Abstract

Understanding the influence of forest demographic processes on soil carbon persistence is pivotal for predicting terrestrial feedback to climate change. Although many Earth system models incorporate forest demography and vertical soil profiles, the relationship between stand age and soil carbon persistence on the geographic scale remains unclear. We established a global database of stand age and radiocarbon-derived mean residence time of soil organic carbon (τ_{soc}) from 318 forest soil samples. On the global scale, the mean τ_{soc} was significantly higher in the deep (30-100 cm; 3081 ± 398 years) than surface (0-30 cm; 332 ± 56 years) layers. A positive correlation between forest stand age and τ_{soc} was detected in the deep but not surface soil layer. To validate the positive relationship between stand age and deep τ_{soc} , we sampled soils from twelve permanent forest plots across eastern China. The mean τ_{soc} was 249 ± 80 and 2087 ± 246 years in the surface and deep layers, respectively. The partial Mantel test showed that stand age significantly contributes to the geographic variation of τ_{soc} in deep rather than surface soils. Further, the results of the structural equation model illustrated that mineral protection by iron oxide explained the positive correlation between stand age and τ_{soc} of deep soils on the regional scale. Our findings suggest that forest demographic processes regulate the spatial variation of carbon persistence in deep soil. This study also recommends Earth system models to better implement age-related processes in predicting soil carbon cycle for global forest ecosystems.

Mountain with different altitude gradients contains drastic changes in varying environmental factors such as temperature, humidity, and light, which could separate the effects of environmental factors, carbon input, and soil properties on the residence time of soil organic carbon. Here, we test soil organic carbon content and radiocarbon isotope (^{14}C)-based carbon age on the altitude gradient in Tianmu Mountain, which has unique characteristics of the cloud forest. The results showed a decreasing trend with the soil depth of soil organic carbon, total nitrogen, total phosphorus, and available phosphorus concentration in Tianmu Mountain. With the increase in elevation, the soil organic carbon age also increased, and the deep soil organic carbon age was as high as 5196 ± 50 years. Temperature is the most important factor regulating the age

distribution of soil organic carbon. At the same time, the exponential function was used to simulate the vertical distribution of soil organic carbon, total nitrogen, total phosphorus, and available phosphorus in Tianmu Mountain. The results showed that the elevation did not change the depth coefficients of soil organic carbon, total nitrogen, and total phosphorus. However, the depth coefficient of available phosphorus in the soil increases with elevation.

Belowground organic carbon pools are the core of carbon transformation and allocation in terrestrial ecosystems. The spatial heterogeneity and vertical distribution variability from organic matters belowground limit the assessment of belowground carbon pools. Island ecosystems allow us to explore the carbon dynamics at long-term scales. Here, we conducted the 6 depth functions of soil organic matter in 68 dynamic plots on 35 islands at Zhoushan Islands. Our purposes are: 1) Quantitative concentration and depth distribution of organic carbon matter at Zhoushan Islands and 2) Combine soil physicochemical properties, island geographic traits, and climatic factors to explore the potential mechanism of carbon accumulation in different soil layers. The content of soil organic matter in Zhoushan island showed decreasing trends with the soil depth. The content of soil organic carbon, total nitrogen, and phosphorus at 0-30 cm accounted for 77%, 68%, and 46 of the mass fraction at the entire profile; (2) The vertical distribution structure of soil organic matter in Zhoushan was simulated by using 6 groups of equations with different functions. The depth coefficient was -2.73 with moderate variability. Our research will provide fundamental data and mechanisms of organic carbon pools at different layers and a new perspective for predicting parameters in soil carbon cycle models.

Keywords: soil organic carbon; surface layer and deeper layer; radiocarbon, forest age, elevation, island system

目录

摘要.....	I
Abstract.....	III
第一章 前言.....	4
1.1 全球气候变化与森林土壤碳循环.....	4
1.1.1 森林土壤有机碳组成的高度异质性.....	4
1.1.2 森林土壤有机质的垂直变化异质性.....	6
1.2 森林土壤有机质碳循环的时间参数及其影响因子.....	8
1.2.1 土壤有机碳驻留时间的定义.....	8
1.2.2 影响土壤有机碳驻留时间的主要因素.....	9
1.3 本研究的主要内容和主要问题.....	12
1.3.1 本研究的主要内容.....	12
1.3.2 本研究的主要问题.....	13
第二章 林龄与土壤有机碳驻留时间的协同增长现象及其机制模拟研究.....	16
2.1 前言.....	16
2.2 材料与方法.....	17
2.2.1 全球林龄和土壤有机碳驻留时间数据库构建.....	17
2.2.2 中国东部森林采样点选取及数据累积.....	18
2.2.3 基于放射性碳同位素计算土壤有机碳驻留时间.....	20
2.2.4 统计方法.....	20
2.3 结果.....	21
2.3.1 全球林龄和土壤有机碳驻留时间的分布规律.....	21
2.3.2 林龄和土壤有机碳驻留时间协同增长.....	22
2.3 林龄和土壤有机碳驻留时间协同增长的影响因子.....	24
2.4 讨论.....	28
2.5 结论.....	29
第三章 天目山常绿阔叶林土壤有机碳含量和碳年龄沿海拔梯度的分布规律....	33
3.1 前言.....	33
3.2 材料和方法.....	34
3.2.1 研究样地简介.....	34
3.2.2 野外采样与有机碳年龄测算：.....	34

3.2.3 有机质深度分布模拟	35
3.2.4 统计方法	35
3.3 结果	36
3.1.1 同层土壤有机碳、氮、磷随海拔梯度变化规律	36
3.1.2 同一海拔高度土壤有机碳及其驻留时间随深度变化规律	39
3.1.3 不同深度土壤有机质及碳年龄变化规律及其影响因素	41
3.4 讨论	42
3.4.1 海拔梯度对土壤有机碳积累的调控	42
3.4.2 表层和深层土壤有机碳驻留时间的变化规律及其影响机制	42
3.4.3 有机碳、氮、磷随海拔变化同其他站点的比较	43
3.5 结论	45
第四章 舟山群岛土壤有机碳深度分布特征与影响因素	48
4.1 前言	48
4.2 材料与方法	50
4.2.1 研究区地理位置	50
4.2.2 野外采样与室内分析	50
4.2.3 土壤有机质和细根生物量随土壤深度变化非线性拟合	51
4.2.4 统计分析	52
4.3 结果	53
4.3.1 土壤有机质和细根在水平和垂直方向的分布规律	53
4.3.2 土壤有机质与细根在土壤剖面的分布模拟	55
4.3.3 影响有机质分布的因素	59
4.4 讨论	61
4.4.1 舟山各岛屿土壤有机质的变化格局	61
4.4.2 土壤有机质剖面分布函数的参数估计	62
4.4.3 环境因素对土壤有机质累积影响	63
4.5 结论	64
第五章 结论与展望	65
5.1 结论	65
5.1.1 林龄与土壤有机碳驻留时间协同增长的机制研究	65
5.1.2 天目山常绿阔叶林土壤有机碳含量和碳年龄随海拔梯度的分布规律	65
5.1.3 舟山群岛地下有机碳垂直分布特征与影响因素	66

5.2 展望.....	66
参考文献:	68
全球林龄和土壤有机碳驻留时间数据库文献列表:	79
中国山地森林土壤有机质化学计量比数据库文献列表.....	82
附图.....	83
附表.....	95
致谢.....	106
博后个人简历.....	107