

DOI:10.13275/j.cnki.lykxyj.2022.03.003

海涂围垦区不同林分土壤活性有机碳垂直变化特征

刘江伟^{1,2}, 徐海东¹, 林同岳³, 曹国华³, 成向荣^{1*}

(1. 中国林业科学研究院亚热带林业研究所, 浙江 杭州 311400; 2. 西北农林科技大学林学院, 陕西 杨凌 712100;
3. 江苏省东台市林场, 江苏 东台 224200)

摘要: [目的] 探索海涂围垦区不同林分土壤有机碳和活性碳组分的垂直分布及其影响机制, 为围垦区林分土壤碳库稳定性评价和树种筛选提供科学依据。 [方法] 以海涂围垦区 3 种主要林分 (美洲黑杨、水杉和银杏) 为研究对象, 分析 0~100 cm 深度土壤有机碳、微生物量碳和溶解性有机碳垂直分布特征及其与土壤理化性质和酶活性的关系。 [结果] 3 种林分土壤有机碳、微生物量碳和溶解性有机碳含量均随土层深度增加逐渐降低, 其中, 0~20 cm 土层水杉和美洲黑杨林分土壤有机碳含量显著高于银杏林分, 20 cm 以下土层 3 种林分之间差异较小; 0~60 cm 土层水杉林分微生物量碳和溶解性有机碳含量最高, 其次为美洲黑杨林分, 银杏林分最低, 60 cm 以下土层 3 种林分之间差异较小。土壤溶解性有机碳/土壤有机碳和微生物量碳/土壤有机碳比值均随土层深度增加先增大后减小 (除银杏林分土壤溶解性有机碳/土壤有机碳比值在各土层之间无显著差异外), 20~60 cm 土层 3 种林分土壤溶解性有机碳/土壤有机碳和微生物量碳/土壤有机碳比值较高, 总体上, 3 种林分土壤溶解性有机碳/土壤有机碳和微生物量碳/土壤有机碳比值在剖面分布差异较小。冗余分析和相关性分析表明, 各林分土壤有机碳及活性碳组分与有效氮和蔗糖酶极显著正相关, 与土壤 pH 极显著负相关。 [结论] 树种显著影响沿海围垦区土壤剖面活性有机碳分布, 但对剖面土壤有机碳库稳定性影响较小。试验区美洲黑杨和水杉人工林土壤固碳潜力优于银杏人工林。

关键词: 海涂围垦区; 土层深度; 林分; 土壤有机碳; 活性有机碳

中图分类号: S714

文献标志码: A

文章编号: 1001-1498(2022)03-0018-09

土壤活性有机碳是指土壤中稳定性差、周转速率快、易矿化分解的有机碳组分。虽然土壤活性有机碳占土壤有机碳的比例较低, 但其对土地利用和植被覆盖等的变化更敏感, 更能反映土壤碳的动态变化^[1]。土壤溶解性有机碳和微生物量碳是主要的活性有机碳组分, 其中, 溶解性有机碳在土壤碳的迁移转化过程中发挥了重要作用, 可以直接被土壤微生物利用, 易于分解和矿化, 土壤微生物量碳则是最活跃的组分, 控制着有机碳的转化^[2]。因此, 研究土壤溶解性有机碳和微生物量碳的变化对于评估土壤活性有机碳特征及有机碳库稳定性具有重要

意义。

沿海滩涂是海洋向陆地的过渡地带, 大规模围垦有效缓解了人地矛盾^[3]。然而, 滩涂围垦后不同土地利用方式可能会改变滩涂土壤性质, 进而影响土壤有机碳及其组分变化, 最终影响整个生态系统的碳循环过程^[4]。目前, 国内外学者对于农田、森林、草地土壤有机碳及其活性碳组分的分布开展了大量研究^[5-7], 而围垦对沿海滩涂土壤有机碳及其活性碳组分影响的研究主要集中在农田生态系统, 且局限于表层 (0~20 cm) 土壤^[8]。林木比农作物根系分布更深, 其对深层土壤有机碳分布影响

收稿日期: 2021-09-15 修回日期: 2021-12-13

基金项目: 国家自然科学基金项目 (31870596)

* 通讯作者: 成向荣. E-mail: chxr@caf.ac.cn

可能更大^[9]。此外, 土壤活性有机碳的动态变化与植被类型也密切相关^[10]。有关不同林分类型土壤有机碳及活性有机碳组分研究已有较多报道^[11-15], 但滩涂围垦后不同林分类型土壤活性有机碳含量和垂直分布特征仍知之甚少。美洲黑杨 (*Populus deltoides* Marshall)、水杉 (*Metasequoia glyptostroboides* Hu & W. C. Cheng) 和银杏 (*Ginkgo biloba* L.) 是我国江苏沿海地区防护林建设的主要造林树种^[16]。本研究以江苏省东台市海涂围垦区这 3 个树种为研究对象, 分析 3 种林分 0~100 cm 土层土壤有机碳及活性有机碳含量、土壤理化性质和酶活性变化, 揭示海涂围垦区不同林分对土壤有机碳及其活性碳组分垂直分布的影响, 为沿海防护林碳汇功能评价及树种筛选提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验区位于江苏省东台市林场 (120°49' E, 32°52' N), 该林场林地面积约 2 187 hm², 森林覆盖率 86%, 美洲黑杨、水杉和银杏为主要造林树种。其地处黄海之滨, 处于亚热带和暖温带的过渡

区域, 属过渡性海洋季风性气候。年均气温 14.6 °C, 无霜期 220 d, 降水量 1 051 mm, 年均日照时数 2 169.6 h。林地整体地势平坦, 土壤为典型砂质壤土。

1.2 研究方法

1.2.1 样地选择及取样 选择美洲黑杨、水杉和银杏 3 种典型林分, 每种林分面积均大于 13 hm², 在各林分内随机建立 50 m × 50 m 样地 3 个, 样地间隔至少 200 m, 调查样地内林木树高、胸径、林下植被生物量和林分密度等 (表 1)。在每个样地内随机选择 6 个点, 每个点挖 100 cm 深的剖面, 分层 (0~20、20~40、40~60、60~80、80~100 cm) 采集土壤样品, 并将每个样地内相同土层的土壤混合为 1 个混合土样, 编号后用装有冰袋的保温箱带回实验室进行相关土壤性质的测定。同时在每一层进行环刀采样, 用于土壤密度 (SD) 分析。从混合土样中, 选取部分鲜土样测定土壤溶解性有机碳 (DOC)、微生物量碳 (MBC) 含量和蔗糖酶 (INS) 活性; 将剩余土样自然风干后, 用于土壤有机碳 (SOC)、全氮 (TN)、有效氮 (AN)、速效磷 (AP)、全磷 (TP) 含量及 pH 值测定。

表 1 林分概况

Table 1 General characteristics of stands

林分类型 Stand types	树高 Height /m	胸径 Diameter at breast height/cm	林下植被生物量 Understory vegetation biomass/(t·hm ⁻²)	林龄 Stand age/a	林分密度 Stand density /(tree·hm ⁻²)
美洲黑杨 <i>P. deltoides</i>	14.64±0.38 A	22.23±0.23 A	1.5±0.03 A	14	326±24 C
水杉 <i>M. glyptostroboides</i>	10.49±0.30 B	16.76±0.78 B	1.5±0.08 A	13	469±28 B
银杏 <i>G. biloba</i>	11.71±0.35 AB	15.23±0.39 B	1.1±0.08 B	14	510±38 A

注: 不同大写字母表示不同林分之间差异显著 ($p < 0.05$)。

Note: Different capital letters indicated significant difference among different forest types at 0.05 level.

1.2.2 土壤分析测定 土壤密度采用环刀法测定; pH 值采用电极法测定 (水土比为 2.5 : 1), 土壤盐分采用电导率法测定 (水土比为 5 : 1)。土壤蔗糖酶活性采用 3, 5-二硝基水杨酸比色法测定。全氮、有效氮、全磷和速效磷含量测定方法参照文献 [17]。

土壤有机碳采用浓硫酸-重铬酸钾外加热法测定; 土壤微生物量碳采用氯仿熏蒸-0.5 mol·L⁻¹ K₂SO₄ 提取法, 浸提液用碳氮分析仪 (Multi N/C 3000, Analytik Jena AG) 测定, 熏蒸与未熏蒸土壤有机

碳含量差值即为土壤微生物量碳的值^[18]。土壤溶解性有机碳采用冷水浸提法测定, 称鲜土 30 g, 水土比为 2 : 1, 25 °C 下恒温振荡器中振荡 30 min (250 次·min⁻¹) 后, 离心 10 min (7 000 r·min⁻¹), 上清液用 0.45 μm 滤膜抽滤, 滤液用碳氮分析仪 (Multi N/C 3 000, Analytik Jena AG) 测定^[19]。

1.3 数据处理

采用 SPSS 23.0 软件进行数据统计分析。所有数据进行数据正态性检验和方差齐性检验, 利用双因素方差分析法 (Two-way ANOVA) 比较林

分、土层及林分和土层交互作用对土壤性质的影响,再用 Duncan 法比较不同林分类型和不同土层间土壤性质的差异 ($p < 0.05$); 使用 R 语言 Vegan 包的冗余 (RDA) 分析评价不同林分土壤理化性质和酶活性对土壤有机碳及其活性碳组分的影响,在 RDA 分析之前对所有解释变量进行了共线性检验,排除了方差因子膨胀系数 (VIF) > 10 的变量,最后采用 Pearson 相关法分析不同林分土壤有机碳及其活性碳组分与土壤理化性质的相关性。

表 2 林分和土层对土壤理化性质的影响

Table 2 Effects of soil layers and stand types on soil properties

因子 Factors	全氮 TN	有效氮 AN	全磷 TP	速效磷 AP	pH	土壤密度 SD	蔗糖酶 INS	盐分 Salinity
林分Stand	1.16	0.20	2.35	14.17**	6.81**	7.34**	7.67**	2.03
土层Soil layer	82.31**	63.75*	12.04**	14.19**	15.63**	3.23*	46.71**	1.46
林分 × 土层 Stand × Soil layer	2.20	1.06	0.08	1.94	0.67	0.28	2.73*	1.34

注: * 表示显著 ($p < 0.05$), ** 表示极显著 ($p < 0.01$)。

Notes: * indicates significant at 0.05 level, and ** indicates extremely significant at 0.01 level.

美洲黑杨、水杉、银杏林分全氮、有效氮、全磷和速效磷含量及蔗糖酶活性随土层深度增加呈降低趋势,而土壤密度和 pH 呈增加趋势 (表 3)。0~100 cm 剖面土壤全氮、全磷和盐分含量在 3 种林分之间无显著差异 (除 40~60 cm 土层水杉林分全磷含量显著大于银杏林分外)。0~40 cm 土层 3 种林分土壤有效氮含量无显著差异,而 40~100 cm 土层银杏林分土壤有效氮含量显著高于美洲黑杨林分 ($p < 0.05$)。0~60 cm 土层银杏林分土壤速效磷含量显著高于美洲黑杨林分 ($p < 0.05$), 而 60~100 cm 土层 3 种林分土壤速效磷含量无显著差异。0~40 cm 土层水杉林分蔗糖酶活性显著低于美洲黑杨和银杏林分 ($p < 0.05$)。各土层土壤 pH 在 3 种林分之间差异较小。20~40 cm 土层水杉林分土壤密度显著大于美洲黑杨和银杏林分,40~60 cm 土层银杏林分土壤密度显著低于美洲黑杨和水杉林分 ($p < 0.05$)。

2.2 土壤有机碳及活性有机碳含量的变化

研究区 3 种林分 0~40 cm 土层土壤有机碳含量随土层深度增加显著降低 ($p < 0.05$), 40~100 cm 土层土壤有机碳含量保持相对稳定 (图 1)。0~20 cm 土层水杉和美洲黑杨林分土壤有机碳含量无显著差异,均显著高于银杏林分有机碳含量 ($p < 0.05$); 20~80 cm 土层各林分之间土壤有机

2 结果与分析

2.1 土壤理化性质变化

研究区美洲黑杨、水杉、银杏 3 种林分极显著影响土壤速效磷含量、pH、土壤密度、蔗糖酶活性 ($p < 0.05$), 土层显著或极显著影响所有指标 (除土壤盐分外), 林分和土层交互作用仅显著影响土壤蔗糖酶活性 ($p < 0.05$) (表 2)。

碳含量差异不显著,80~100 cm 土层美洲黑杨林分土壤有机碳含量显著高于银杏林分 ($p < 0.05$)。研究区各林分土壤溶解性有机碳和微生物量碳含量均随土层深度增加逐渐降低; 0~20 cm 土层水杉和美洲黑杨林分溶解性有机碳和微生物量碳含量显著高于银杏林分 ($p < 0.05$), 40~60 cm 土层水杉林分溶解性有机碳含量显著高于美洲黑杨和银杏林分 ($p < 0.05$), 60~80 cm 土层 3 种林分土壤溶解性有机碳含量无显著差异 ($p > 0.05$), 80~100 cm 土层土壤溶解性有机碳含量为美洲黑杨林分 $>$ 银杏林分 $>$ 水杉林分 ($p < 0.05$), 40~100 cm 土层土壤微生物量碳含量在 3 种林分之间无显著差异 ($p < 0.05$)。

研究区各林分不同土层的溶解性有机碳/土壤有机碳 (DOC/SOC)、微生物量碳/土壤有机碳 (MBC/SOC) 比值变化范围分别为 0.72%~3.48% 和 2.11%~7.48%, 3 种林分土壤 DOC/SOC 和 MBC/SOC 比值均随土壤深度增加先增大后减小 (除银杏林分 DOC/SOC 比值在各土层之间无显著差异外), 20~60 cm 土层 3 种林分土壤 DOC/SOC 和 MBC/SOC 比值较高。0~20 cm 土层银杏和水杉林分 DOC/SOC 和 MBC/SOC 比值高于美洲黑杨林分, 40~60 cm 土层水杉林分土壤 DOC/SOC 比值显著高于其它 2 种林分。总体

表 3 不同林分土壤剖面性质的比较

Table 3 Comparison of soil physic-chemical properties in soil profile among different stand types

指标 Index	林分 Stand	土层 Soil layer/cm				
		0~20	20~40	40~60	60~80	80~100
全氮 TN/ (g·kg ⁻¹)	美洲黑杨 <i>P. deltooides</i>	0.776±0.043 Aa	0.357±0.037 Ab	0.205±0.009 Ac	0.186±0.023 Ac	0.168±0.018 Ac
	水杉 <i>M. glyptostroboides</i>	0.859±0.100 Aa	0.402±0.107 Ab	0.213±0.047 Ac	0.171±0.015 Ac	0.170±0.001 Ac
	银杏 <i>G. biloba</i>	0.586±0.178 Aa	0.388±0.043 Ab	0.245±0.031 Ac	0.198±0.010 Ac	0.178±0.003 Ac
有效氮 AN/ (mg·kg ⁻¹)	美洲黑杨 <i>P. deltooides</i>	73.033±16.781 Aa	27.067±4.779 Ab	7.020±1.103 Bc	7.020±1.68 Bc	2.600±1.471 Bd
	水杉 <i>M. glyptostroboides</i>	69.933±11.756 Aa	27.300±11.031 Ab	11.43±2.64 ABc	8.573±1.09 Bbc	6.500±1.603 Ac
	银杏 <i>G. biloba</i>	56.333±16.012 Aa	31.967±3.364 Ab	15.30±4.864 Ac	13.76±2.593 Ac	9.997±1.435 Ac
全磷 TP/ (g·kg ⁻¹)	美洲黑杨 <i>P. deltooides</i>	0.872±0.101 Aa	0.724±0.031 Ab	0.66±0.016 ABb	0.679±0.061 Ab	0.683±0.038 Ab
	水杉 <i>M. glyptostroboides</i>	0.901±0.128 Aa	0.760±0.053 Aab	0.714±0.028 Ab	0.671±0.006 Ab	0.693±0.023 Ab
	银杏 <i>G. biloba</i>	0.831±0.125 Aa	0.700±0.041 Aab	0.636±0.023 Bb	0.623±0.023 Ab	0.655±0.023 Ab
速效磷 AP/ (mg·kg ⁻¹)	美洲黑杨 <i>P. deltooides</i>	5.180±1.440 Ba	3.600±0.864 Bab	2.65±0.559 Bb	3.35±1.250 Aab	2.337±0.469 Ab
	水杉 <i>M. glyptostroboides</i>	5.560±2.639 Ba	3.297±0.189 Bab	2.50±0.461 Bb	2.46±0.461 Ab	2.347±0.483 Ab
	银杏 <i>G. biloba</i>	9.540±1.059 Aa	7.333±1.526 Aa	4.92±1.271 Ab	3.15±0.390 Ab	2.903±0.237 Ab
pH	美洲黑杨 <i>P. deltooides</i>	8.643±0.191 Ab	8.820±0.071 Aab	8.933±0.02 Aa	8.950±0.050 Aa	8.923±0.045 Aa
	水杉 <i>M. glyptostroboides</i>	8.523±0.101 Ac	8.707±0.081 ABb	8.83±0.05 ABab	8.85±0.087 Aab	8.90±0.047 Aa
	银杏 <i>G. biloba</i>	8.620±0.070 Ab	8.633±0.033 Bb	8.757±0.074 Aa	8.803±0.019 Aa	8.843±0.017 Aa
土壤密度 SD/ (g·cm ⁻³)	美洲黑杨 <i>P. deltooides</i>	1.379±0.055 Aa	1.442±0.033 Ba	1.510±0.021 Aa	1.467±0.095 Aa	1.49±0.043 Aa
	水杉 <i>M. glyptostroboides</i>	1.469±0.039 Ab	1.516±0.033 Aab	1.566±0.045 Aa	1.550±0.022 Aa	1.50±0.009 Aab
	银杏 <i>G. biloba</i>	1.403±0.037 Aa	1.424±0.021 Ba	1.472±0.117 Ba	1.459±0.046 Aa	1.43±0.030 Aab
蔗糖酶 INS/ (mg·kg ⁻¹ ·d ⁻¹)	美洲黑杨 <i>P. deltooides</i>	54.220±9.116 Aa	22.487±14.421 Ab	5.89±2.12 ABbc	3.092±0.575 Bc	1.147±0.074 Ac
	水杉 <i>M. glyptostroboides</i>	26.824±2.838 Ba	6.356±2.380 Bb	2.427±0.468 Bc	1.961±0.674 Bc	1.664±0.738 Ac
	银杏 <i>G. biloba</i>	34.411±11.00 ABa	15.821±2.810 Ab	6.846±2.042 Ab	5.378±0.899 Ab	3.60±0.783 Bb
盐分 Salinity/ (g·kg ⁻¹)	美洲黑杨 <i>P. deltooides</i>	0.014±0.002 Aa	0.017±0.002 Aa	0.015±0.001 Aa	0.015±0.002 Aa	0.016±0.001 Aa
	水杉 <i>M. glyptostroboides</i>	0.017±0.003 Aa	0.014±0.001 Aa	0.013±0.001 Aa	0.015±0.002 Aa	0.019±0.004 Aa
	银杏 <i>G. biloba</i>	0.013±0.001 Aa	0.014±0.001 Aa	0.014±0.001 Aa	0.015±0.001 Aa	0.015±0.002 Aa

注: 不同小写字母表示相同指标同一林分不同土层之间差异显著 ($p < 0.05$), 不同大写字母表示同一土层不同林分之间差异显著 ($p < 0.05$), 下同。

Notes: Different lower case letters indicates significant difference among different soil layers in the same forest type at 0.05 level, and different capital letters indicates significant difference among different forest types in the same soil layer at 0.05 level, The same below.

上, 3 种林分 DOC/SOC 和 MBC/SOC 比值在剖面分布差异较小。

2.3 土壤活性有机碳与土壤基本理化性质的相关性
研究区 3 种林分土壤有机碳及其活性碳组分与

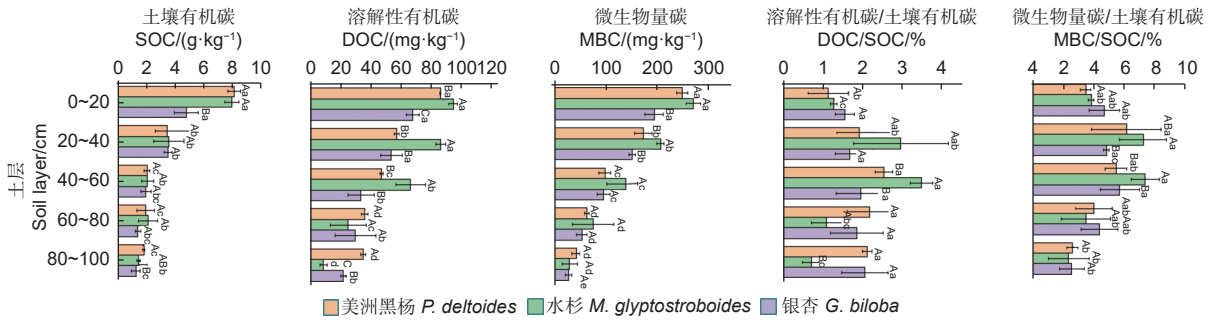


图 1 不同林分土壤活性有机碳垂直分布特征和分配比例

Fig. 1 Vertical distribution characteristics and distribution proportion of soil labile organic carbon among different stands

全氮、有效氮、全磷、速效磷含量和蔗糖酶活性显著正相关（除水杉林分溶解性有机碳与速效磷含量无显著相关性外），与 pH 极显著负相关（ $p < 0.01$ ）；与土壤盐分无显著相关性（ $p > 0.05$ ），美洲黑杨林

分土壤有机碳及其各组分与土壤密度显著负相关（ $p < 0.05$ ），水杉林分仅土壤有机碳含量与土壤密度显著负相关（ $p < 0.05$ ），银杏林分土壤有机碳各组分与土壤密度无显著相关性（ $p > 0.05$ ）（表 4）。

表 4 土壤活性有机碳与土壤理化性质的相关性

Table 4 Correlations between soil labile organic carbon and soil physical and chemical properties

林分 Stands	指标 Index	全氮 TN	有效氮 AN	全磷 TP	速效磷 AP	pH	盐分 Salinity	土壤密度 SD	蔗糖酶 INS
美洲黑杨 <i>P. deltoides</i>	SOC	0.904**	0.900**	0.738**	0.639**	-0.693**	-0.060	-0.422**	0.820**
	MBC	0.883**	0.879**	0.716**	0.669**	-0.736**	-0.184	-0.381**	0.815**
	DOC	0.916**	0.912**	0.732**	0.666**	-0.733**	-0.160	-0.390**	0.834**
水杉 <i>M. glyptostroboides</i>	SOC	0.983**	0.988**	0.583*	0.554*	-0.906**	0.170	-0.525*	0.960**
	MBC	0.844**	0.825**	0.651**	0.598*	-0.887**	-0.075	-0.328	0.773**
	DOC	0.721**	0.704**	0.599*	0.509	-0.755**	-0.267	-0.191	0.651**
银杏 <i>G. biloba</i>	SOC	0.993**	0.941**	0.944**	0.780**	-0.828**	-0.413	-0.153	0.978**
	MBC	0.789**	0.791**	0.598*	0.935**	-0.809**	-0.397	-0.177	0.767**
	DOC	0.743**	0.788**	0.564*	0.837**	-0.665**	-0.394	-0.177	0.767**

注：* 表示显著相关（ $p < 0.05$ ），** 表示极显著相关（ $p < 0.01$ ）。下同。

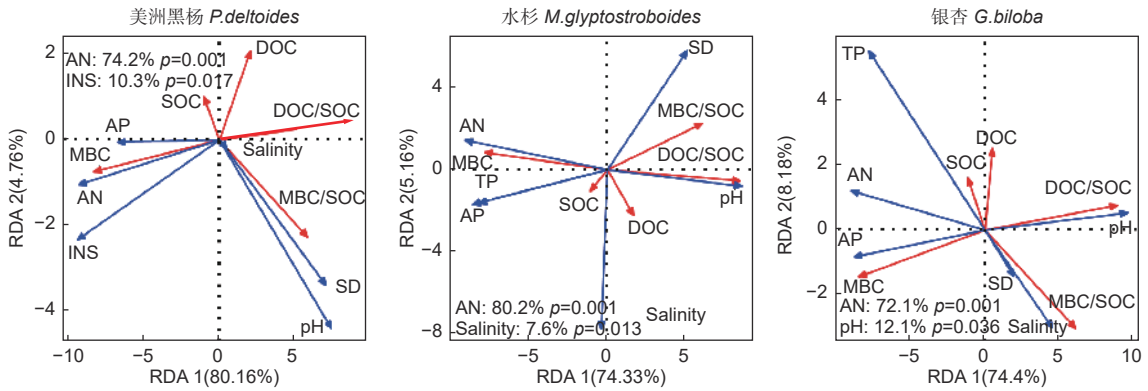
Notes: * indicates significant correlation at 0.05 level, and ** indicates extremely significant correlation at 0.01 level. The same below.

冗余分析表明：第 1 标准轴（RDA1）和第 2 标准轴（RDA2）分别解释了美洲黑杨林分土壤活性有机碳组分变异的 80.16% 和 4.76%，水杉林分土壤活性有机碳组分变异的 74.33% 和 5.16%，银杏林分土壤活性有机碳组分变异的 74.4% 和 8.18%（图 2）。在美洲黑杨林分中，有效氮含量、蔗糖酶活性分别解释了土壤活性有机碳组分变化的 74.2%（ $p = 0.001$ ）、10.3%（ $p = 0.017$ ）；在水杉林分中，有效氮、盐分含量分别解释了土壤活性有机碳组分变化的 80.2%（ $p = 0.001$ ）、7.6%（ $p = 0.013$ ）；在银杏林分中，有效氮含量、pH 分别解释了土壤活性有机碳组分变化的 72.1%（ $p =$

0.001）、12.1%（ $p = 0.036$ ）。由此可知，有效氮是影响美洲黑杨、水杉和银杏林分土壤活性有机碳的主要因子。

3 讨论

许多研究表明，随着土层深度增加土壤有机碳含量逐渐降低^[20-22]。本研究也发现，0~40 cm 土层土壤有机碳含量随土层深度增加而降低，但 40~100 cm 土层土壤有机碳含量保持相对稳定。因为植物凋落物和根系以土壤表层较多，增加了外源碳的形成效率和输入量，导致浅层土壤有机碳含量较高。深层土壤有机碳含量保持相对稳定，一方



注: AN: 有效氮; TP: 全磷; AP: 速效磷; Salinity: 盐分; SD: 土壤密度; INS: 蔗糖酶; SOC: 土壤有机碳; DOC: 溶解性有机碳; MBC: 微生物量碳。

Notes: AN: available nitrogen; TP: total phosphorus; AP: available phosphorus; Salinity: salinity; SD: soil density; INS: invertase; SOC: soil organic carbon; DOC: dissolved organic carbon; MBC: microbial biomass carbon.

图2 不同林分土壤基本理化性质对活性有机碳组分影响的冗余分析 (RDA)

Fig. 2 Redundancy analysis (RDA) of the effects of soil physico-chemical properties on soil labile organic carbon at different soil depths (0~100 cm) in different forest types

面可能与3种林分深层土壤pH变化较小有关。研究显示,土壤pH和盐分含量是影响沿海地区土壤微生物活性的关键因素^[23],深层土壤pH和盐分含量的较小变化可能对土壤微生物的活性产生了较小影响,进而导致深层土壤有机碳含量的相对稳定。另外,土壤有机碳与土壤养分含量显著正相关,微生物对底物分解利用也需要消耗氮磷养分,而深层土壤较低的氮磷养分变化特征也使得土壤有机碳的变异相对较小。此外,水杉和美洲黑杨林分表层土壤有机碳含量均显著高于银杏林分,深层土壤有机碳含量差异较小,这与Soleimani等^[24]研究结果相似,林分初期的碳固存主要发生在表层土壤^[9],不同林分表层土壤有机碳含量的差异可能归因于林下植被生物量的不同^[25],水杉和美洲黑杨林分林下植被生物量高于银杏林分,较高的林下植被生物量可能导致更多的凋落物输入土壤表层。深层土壤密度和pH等影响有机碳含量的理化性质指标差异均较小,各林分根系在深层土壤中分布差异较小,均可能导致不同林分土壤有机碳含量在深层土壤中差异较小。刘宝^[26]研究发现,不同林分土壤有机碳含量在0~40 cm土层差异显著,这可能是不同林分之间树种组成差异造成的,因为不同林木根系空间分布特征存在差异^[27]。

土壤活性有机碳主要来源于植物地上/地下凋落物以及土壤微生物的分泌物,是表征土壤活性碳库的重要组分^[28]。本研究发现,土壤溶解性有机碳、微生物量碳含量均随土层深度增加逐渐减小,

这与前人研究结果一致^[29]。在表土中,微生物活性高是微生物量碳积累的主要决定因素^[30]。表土环境有利于微生物的活动,因为这些物质到达深层土壤之前,土壤微生物可以迅速吸收大量的有机碳和营养物质。在表土中拥有较高的微生物生物量和较快的生物量周转,导致更多的微生物残留物持续地被隔离在表层土壤中。土壤溶解性有机碳和微生物量碳正相关,因为淋溶产生的有机质和微生物间接分解的有机质是溶解性有机碳的主要来源,同时,溶解性有机碳也是微生物生存的主要能源物质。此外,氮在活性有机碳组分的形成中起着重要作用^[31]。土壤活性碳库与土壤有效养分密切相关,其中,有效氮是微生物维持生命活动的关键养分元素,且易被微生物吸收和利用,因此,可能主导了微生物来源碳(如溶解性有机碳)的含量^[32]。本研究发现,土壤pH与活性碳组分显著负相关,这与方晰^[33]研究结果相反,这可能与土壤酸碱性有关,后者偏酸性土壤(pH 4.2~6.2),即随着pH的降低(尤其pH<4.5)会抑制微生物活性,同时导致活性碳的吸附能力降低。试验区土壤为碱性土(pH 8.5~8.9),高pH同样会降低微生物生物量和酶活性(如蔗糖酶活性),从而导致活性碳组分的降低。本研究中,水杉和美洲黑杨林分0~60 cm土层溶解性有机碳和微生物量碳含量高于银杏林分,由于土壤微生物的主要养分来源是森林地上和地下植物残体,美洲黑杨和水杉林下较高的林下植被生物量有助于提高其土壤微生物活性和生物量,进而

促进活性碳组分含量。然而, Sun 等^[34]发现, 不同林分类型对活性有机碳的影响主要集中在表层。这可能与水杉叶的特性有关, 即水杉具有高的叶表面积且叶质薄柔软。因此, 水杉凋落叶易分解, 且有利于迁移到较深层土壤, 为微生物的生长提供了碳源, 从而增加深层土壤活性碳组分。研究报道, 沿海滩涂水杉细根生物量在 0~60 cm 土层高出银杏和美洲黑杨细根生物量的 5%~7%^[35], 因此, 水杉在 0~60 cm 土层可能增加根系分泌物以及可溶性物质的迁移, 从而增加了溶解性有机碳的含量。同时, 上述分析表明活性碳组分更能反映不同树种对深层土壤有机碳动态的影响。

活性有机碳占土壤有机碳比率可以反映土壤有机碳库的稳定性^[36]。研究区各林分不同土层的溶解性有机碳/土壤有机碳 (DOC/SOC) 比值变化范围为 0.72%~3.48%, 高于朱浩宇等^[37]对缙云山 4 种不同林分的研究结果 (0.23%~0.39%), 这可能与围垦地区不同森林类型不同土层溶解性有机碳含量受到微生物、降水淋溶和地下径流等作用的影响有关, 且受围垦地区土质结构疏松、土壤有机质含量较低所致。土壤微生物量碳/土壤有机碳 (MBC/SOC) 比值变化范围为 2.11%~7.48%, 与肖焯等^[38]研究结果 (1.27%~5.94%) 接近。本研究中, 土壤 DOC/SOC 和 MBC/SOC 均随土层深度增加先增大后减小。朱丽珍等^[36]发现, 不同恢复年限的人工林土壤 DOC/SOC 的值随土层深度的增加而升高, 而 MBC/SOC 呈下降趋势。这些不同的研究结果可能与土壤质地、树种根系分布和气候等因素有关。本研究不同林分之间土壤 MBC/SOC 在剖面分布差异较小, 这表明不同林分对土壤有机碳稳定性影响较有限。Pang 等^[39]研究发现, 直杆蓝桉 (*Eucalyptus maideni* F. V. Muell.) 和云南松 (*Pinus yunnanensis* Franch.) 人工林 0~30 cm 土层 MBC/SOC 也无显著差异。

4 结论

(1) 美洲黑杨、水杉和银杏林分土壤有机碳 (0~40 cm) 和活性有机碳组分含量均表现出随土层深度增加而逐渐降低的趋势; 不同林分有机碳含量的差异仅出现在表层, 而不同林分溶解性有机碳和微生物量碳含量的差异分别表现在 0~60 cm 和 0~40 cm 土层, 说明活性碳组分比有机碳更能反映不同树种对深层土壤有机碳动态的影响。

(2) 不同林分并未显著影响土壤剖面有机碳稳定性分布特征。尽管如此, 江苏东台围垦区栽植美洲黑杨和水杉比银杏更有利于土壤碳固存。

参考文献:

- [1] 杨丽霞, 潘剑君. 土壤活性有机碳库测定方法研究进展[J]. 土壤通报, 2004, 35 (4): 502-506.
- [2] Robledano-Aymerich F, Romero-Díaz A, Belmonte-Serrato F, et al. Ecogeomorphological consequences of land abandonment in semiarid Mediterranean areas: Integrated assessment of physical evolution and biodiversity[J]. Agriculture Ecosystems & Environment, 2014, 197: 222-242.
- [3] 范亚东, 范春梅. 沿海滩涂资源围垦开发利用需求与制约因素[J]. 环球市场, 2019 (34): 285-287.
- [4] 李建国, 赵宴青, 袁冯伟, 等. 滨海滩涂围垦对土壤团聚体分布及其有机碳富集的影响——以江苏省如东县垦区为例[J]. 土壤通报, 2018, 294 (3): 54-61.
- [5] 杨秀清, 韩有志. 关帝山森林土壤有机碳和氮素的空间变异特征[J]. 林业科学研究, 2011, 24 (2): 223-229.
- [6] Nath A J, Brahma B, Sileshi G W, et al. Impact of land use changes on the storage of soil organic carbon in active and recalcitrant pools in a humid tropical region of India[J]. Science of The Total Environment, 2018, 624: 908-917.
- [7] 张苗苗, 陈伟, 林丽, 等. 青海省不同高寒草地土壤主要养分及溶解性有机碳特性研究[J]. 草业学报, 2019, 28 (3): 20-28.
- [8] 张欢. 华东沿海滩涂围垦区土壤有机碳动态及其模型预测[D]. 南京: 南京大学, 2017.
- [9] Mma B, Cep C, Weaa D, et al. Tamm review: Influence of forest management activities on soil organic carbon stocks: A knowledge synthesis - ScienceDirect[J]. Forest Ecology and Management, 2020, 466: 1-25.
- [10] Xu H, Qu Q, Chen Y, et al. Responses of soil enzyme activity and soil organic carbon stability over time after cropland abandonment in different vegetation zones of the Loess Plateau of China[J]. Catena, 2021, 196: 1-13.
- [11] Lal R. Digging deeper: A holistic perspective of factors affecting soil organic carbon sequestration in agroecosystems[J]. Global Change Biology., 2018, 24(8): 3285-3301.
- [12] 聂浩亮, 薄慧娟, 张润哲, 等. 北京海坨山典型林分土壤有机碳含量及有机碳密度垂直分布特征[J]. 林业科学研究, 2020, 33 (6): 158-165.
- [13] 陈仕奇, 吕盛, 高明, 等. 缙云山不同林分下土壤有机碳及矿化特征[J]. 环境科学, 2019, 40 (2): 953-960.
- [14] Li Y, Xu M, Zou X, et al. Comparing soil organic carbon dynamics in plantation and secondary forest in wet tropics in Puerto Rico[J]. Global Change Biology, 2010, 11(2): 239-248.
- [15] Yan M, Li T, Li X, et al. Microbial biomass and activity restrict soil function recovery of a post-mining land in eastern Loess

- Plateau[J]. *Catena*, 2021, 199(8): 105-107.
- [16] 王洪, 张金池, 张东海, 等. 苏北泥质海岸主要防护林树种生长特性[J]. *亚热带农业研究*, 2010, 6(3): 167-171.
- [17] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [18] 李振高, 骆永明, 滕应. 土壤与环境微生物研究法[M]. 北京: 科学出版社, 2008.
- [19] Ghani A, Dexter M, Perrott K W. Hot-water extractable carbon in soils: a sensitive measurement for determining impacts of fertilisation, grazing and cultivation[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2003, 35(9): 1231-1243.
- [20] Song B L, Yan M J, Hou H, *et al.* Distribution of soil carbon and nitrogen in two typical forests in the semiarid region of the Loess Plateau, China[J]. *Catena*, 2016, 143(3): 159-166.
- [21] 王艳丽, 字洪标, 程瑞希, 等. 青海省森林土壤有机碳氮储量及其垂直分布特征[J]. *生态学报*, 2019, 39(11): 4096-4105.
- [22] 张雄伟, 李刚, 董宽虎, 等. 山西主要草地类型土壤有机碳储量及其垂直分配特征[J]. *中国草地学报*, 2020, 233(1): 144-149.
- [23] García-Gómez C, Fernández M D, García S, *et al.* Soil pH effects on the toxicity of zinc oxide nanoparticles to soil microbial community[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2018, 25(28): 28140-28152.
- [24] Soleimani A, Hosseini S M, Massah Bavani A R, *et al.* Influence of land use and land cover change on soil organic carbon and microbial activity in the forests of northern Iran[J]. *Catena*, 2019, 177: 227-237.
- [25] Kooch Y, Sanji R, Tabari M. The effect of vegetation change in C and N contents in litter and soil organic fractions of a Northern Iran temperate forest[J]. *Catena*, 2019, 178: 32-39.
- [26] 刘宝. 中亚热带四种森林类型土壤碳库及微生物群落结构特征[D]. 福州: 福建农林大学, 2017.
- [27] Clemmensen K E, Bahr A, Ovaskainen O, *et al.* Roots and associated fungi drive long-term carbon sequestration in boreal forest[J]. *Science*, 2013, 339(6127): 1615-1618.
- [28] 石丽红, 李超, 唐海明, 等. 长期不同施肥措施对双季稻田土壤活性有机碳组分和水解酶活性的影响[J]. *应用生态学报*, 2021, 32(3): 921-930.
- [29] Sokol N W, Sanderman J, Bradford M A. Pathways of mineral-associated soil organic matter formation: Integrating the role of plant carbon source, chemistry, and point of entry[J]. *Global Change Biology*, 2019, 25(1): 12-24.
- [30] Ni X, Liao S, Tan S, *et al.* The vertical distribution and control of microbial necromass carbon in forest soils[J]. *Global Ecology and Biogeography*, 2020, 29(10): 1829-1839.
- [31] Qi H, Zhao Y, Wang X. Manganese dioxide driven the carbon and nitrogen transformation by activating the complementary effects of core bacteria in composting[J]. *Bioresource Technology*, 2021, 330: 1-9.
- [32] 倪进治, 徐建民, 谢正苗, 等. 不同施肥处理下土壤水溶性有机碳含量及其组成特征的研究[J]. *土壤学报*, 2003, 40(5): 724-730.
- [33] 方晰. 杉木人工林生态系统碳贮量与碳平衡的研究[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2004.
- [34] Sun S, Song X, He Y, *et al.* Effects of neighborhood tree species diversity on soil organic carbon and labile carbon in subtropical forest[M]. Boca Raton, FL: CRC Press, 2020: 106-115.
- [35] 江洪. 滨海盐土地人工林细根时空分布及其影响因素研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2016.
- [36] 朱丽琴, 黄荣珍, 段洪浪, 等. 红壤侵蚀地不同人工恢复林对土壤总有机碳和活性有机碳的影响[J]. *生态学报*, 2017, 37(1): 249-257.
- [37] 朱浩宇, 王子芳, 陆畅, 等. 缙云山5种植被下土壤活性有机碳及碳库变化特征[J]. *土壤*, 2021, 53(2): 354-360.
- [38] 肖焯, 黄志刚, 武海涛, 等. 三江平原不同湿地类型土壤活性有机碳组分及含量差异[J]. *生态学报*, 2015, 35(23): 7625-7633.
- [39] Pang D, Cui M, Liu Y, *et al.* Responses of soil labile organic carbon fractions and stocks to different vegetation restoration strategies in degraded karst ecosystems of southwest China[J]. *Ecological Engineering*, 2019, 138: 391-402.

Vertical Variation Patterns in Soil Labile Organic Carbon in Different Stands in Coastal Reclamation Area

LIU Jiang-wei^{1,2}, XU Hai-dong¹, LIN Tong-yue³, CAO Guo-hua³, CHENG Xiang-rong¹

(1. Research Institute of Subtropical Forestry, Chinese Academy of Forestry, Hangzhou 311400, Zhejiang, China; 2. College of Forestry, Northwest Agriculture and Forestry University, Yangling 712100, Shaanxi, China; 3. Forest Farm of Dongtai City, Jiangsu Province, Dongtai 224200, Jiangsu, China)

Abstract: [Objective] To provide a scientific basis for the evaluation of soil carbon pool stability and tree species selection in coastal reclamation areas, the vertical variations and potential influence mechanism of soil organic carbon and labile carbon fractions in different stands were investigated. [Method] We studied the vertical distribution characteristics of soil organic carbon, microbial biomass carbon, and dissolved organic carbon and their relationships with soil physicochemical properties and enzyme activities in 0-100 cm depth in *Populus deltoides*, *Metasequoia glyptostroboides* and *Ginkgo biloba* plantations. [Result] The contents of soil organic carbon, microbial biomass carbon and dissolved organic carbon gradually decreased with the increase of soil depth in three stands. The contents of soil organic carbon in the 0-20 cm soil layer were significantly higher in *M. glyptostroboides* and *P. deltoides* stands than that in the *G. biloba* stands, but there was no significant difference in the 20-100 cm soil layer among the three stands. The contents of microbial biomass carbon and dissolved organic carbon in the soil layer of 0-60 cm were the highest in the *M. glyptostroboides* stand, followed by *P. deltoides* and *G. biloba* stands, and there were no significant differences in the 60-100 cm soil layer among the three stands. The ratios of soil dissolved organic carbon/soil organic carbon and microbial biomass carbon/soil organic carbon initially increased and then decreased with the increase of soil depth (except for the ratio of soil dissolved organic carbon/soil organic carbon). The ratios of soil dissolved organic carbon/soil organic carbon and microbial biomass carbon/soil organic carbon were higher in 20-60 cm soil layer. Overall, the ratios of soil dissolved organic carbon/soil organic carbon and microbial biomass carbon /soil organic carbon in the three stands had slight difference in all soil layers. Redundancy analysis and correlation analysis showed that soil organic carbon and labile organic carbon fractions of each stand were significantly positively correlated with soil total nitrogen, hydrolyzable nitrogen and invertase activity, and negatively correlated with soil pH. [Conclusion] Tree species greatly affected the labile organic carbon in the soil profile in coastal reclamation areas, and which has a weak effect on the stability of soil organic carbon.

Keywords: tidal flat reclamation area; soil depth; forest stand; soil organic carbon; labile organic carbon

(责任编辑: 金立新)