

DOI:10.12403/j.1001-1498.20220553

# 平原沙土区不同林分类型下土壤有机碳库特征及其影响因子

王磊<sup>1</sup>, 刘晴虞<sup>1</sup>, 关庆伟<sup>1\*</sup>, 史经攀<sup>2</sup>, 彭婷婷<sup>3</sup>,  
朱相丞<sup>4</sup>, 杨樾<sup>5</sup>, 刘静<sup>6</sup>

(1. 南京林业大学生物与环境学院, 江苏 南京 210037; 2. 丰县水利局, 江苏 徐州 221799; 3. 南京长江江豚省级自然保护区管理站, 江苏 南京 210019; 4. 江苏省水利工程建设局, 江苏 南京 210029; 5. 南京市长江河道管理处, 江苏 南京 210011; 6. 瓮安县水务局, 贵州 瓮安 550400)

**摘要:** [目的] 明晰不同林分类型下土壤有机碳库特征, 以为平原沙土区土壤碳库的提高和生态恢复提供理论依据。[方法] 以江苏省平原沙土区丰县 16 年生杨树纯林、柳树纯林、杨柳混交林 3 种林分类型及相邻的撂荒地(对照)为对象, 测定 0~20、20~40、40~60、60~80、80~100 cm 等 5 个土壤层次有机碳及活性组分和土壤酶活性, 计算土壤碳库管理指数, 并对土壤有机碳库特征和环境因子进行相关性分析。[结果] (1) 3 种林分类型及对照各土层有机碳含量和储量范围分别为 1.03~5.88 g·kg<sup>-1</sup> 和 3.53~17.55 t·hm<sup>-2</sup>。与对照相比, 0~100 cm 土层, 3 种林分类型土壤有机碳含量增加了 45.2%~82.2%。杨树纯林 0~100 cm 土层有机碳储量分别是柳树纯林、杨柳混交林和对照的 1.23、1.24、1.83 倍。(2) 与对照相比, 0~100 cm 土层, 3 种林分类型的土壤易氧化有机碳、可溶性有机碳和微生物生物量碳含量分别提高了 28.6%~48.0%、6.8%~9.7% 和 21.6%~33.4%。3 种林分类型土壤碳库管理指数显著高于 100% ( $P < 0.05$ )。(3) 林分类型显著影响土壤蔗糖酶和多酚氧化酶活性 ( $P < 0.05$ ), 杨柳混交林 0~100 cm 土层多酚氧化酶活性显著高于杨树纯林和对照 ( $P < 0.05$ )。(4) 相关性分析表明, 土壤有机碳库特征受多酚氧化酶和  $\beta$ -葡萄糖苷酶活性显著影响, 有机碳含量和储量、易氧化有机碳含量及碳库管理指数受蔗糖酶、过氧化物酶活性显著影响, 微生物生物量碳受蔗糖酶活性显著影响。冗余分析表明, 土壤碳氮比和细根生物量是土壤有机碳库特征的主要影响因素。[结论] 平原沙土区营造人工林提高了土壤有机碳及活性组分和有机碳库稳定性, 杨树纯林提高土壤有机碳储量效果最好。

**关键词:** 平原沙土区; 林分类型; 有机碳; 活性有机碳组分; 碳库管理指数; 土壤酶活性

**中图分类号:** S714.2

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1001-1498(2023)04-0072-10

土壤有机碳是土壤中地上地下凋落物、根系沉积物、动物残体和微生物体及其分解和合成的有机物质中的碳, 是评价土壤肥力和土壤质量的重要指标<sup>[1]</sup>。由于土壤有机碳库含量巨大, 其微小的变化将对全球碳循环和气候变化产生显著影响<sup>[2-3]</sup>。土壤有机碳储量受林分类型、地形地貌、气候变化和

土地利用方式等自然和人为因素的影响, 但土壤总有机碳对这些环境因素的响应表现出一定的滞后性, 难以在短期内观测其变化<sup>[4-5]</sup>。土壤活性有机碳组分是土壤中活性较高、易分解矿化的有机碳, 对区域环境变化的响应更敏感<sup>[6]</sup>, 可以及时、准确地反映土壤有机碳对干扰和环境变化的响应<sup>[7]</sup>。碳

收稿日期: 2022-11-17 修回日期: 2022-12-24

基金项目: 江苏省水利科技项目(2020054)

作者简介: 王磊, 硕士研究生。从事森林生态学研究。电话: 18951195693。E-mail: 315879908@qq.com

\* 通讯作者: 关庆伟, 教授。从事森林生态系统结构、功能与过程等方面的研究。电话: 13951082270。E-mail: guanjuan999@163.com

库管理指数是陆地生态系统中土壤碳动态变化率的敏感指标,可以衡量环境因素对土壤有机碳数量和质量的影响<sup>[8-9]</sup>。因此,明确有机碳及其活性有机碳组分和碳库管理指数等有机碳库特征对预测土壤碳循环具有重要意义。

不同林分类型的根系分布、凋落物组成和微生物群落结构等存在差异,导致光照、水分和土壤理化性质等环境条件变化,进而影响土壤有机碳积累和转化速率<sup>[10-11]</sup>。Wang等<sup>[2]</sup>认为,黄土高原延河流域森林较高的凋落物输入,增加土壤氮磷含量,降低土壤容重和pH值,促进有机碳及活性组分的积累和固存。Yao等<sup>[12]</sup>对昆士兰赫伯特河流域土壤研究发现,不同植被的凋落物输入、酶活性以及微生物组成存在差异,增加潮汐森林0~30 cm土层有机碳含量。Yuan等<sup>[13]</sup>对亚热带冲击平原土壤有机碳库研究认为,相较于香樟(*Cinnamomum camphora* (L.) Presl)和水杉(*Metasequoia glyptostroboides* Hu & W. C. Cheng),落叶阔叶重阳木(*Bischofia polycarpa* (Levl.) Airy Shaw)人工林较低的碳氮比和较短的细根寿命加速凋落物分解,缓解土地利用方式转变初期有机碳的损失。Dawud等<sup>[14]</sup>和Ratcliffe等<sup>[15]</sup>指出,林分类型对土壤有机碳的影响在不同气候和土壤类型下存在差异。

江苏省总面积约10.72万km<sup>2</sup>,其中,平原沙土区面积约2万km<sup>2</sup>,主要分为黄河故道沙土区、沿海平原沙土区和通南高沙土区。江苏省丰县属典型黄河故道沙土区,土壤类型以潮土和风沙土为主,土壤风化程度高,结构疏松,抗侵蚀能力弱,自然肥力低,孔隙率高,保水性差<sup>[16-17]</sup>。以往对平原沙土区研究多集中于植被恢复措施的水土保持效果<sup>[18]</sup>,较少关注土壤碳库特征和土壤质量提升。前人研究表明,植被恢复可以改变沙土有机碳储量<sup>[19]</sup>,但造林初期不同林分类型下沙土区土壤有机碳库特征及其与环境因子的关系尚不清楚。基于此,本研究以江苏省平原沙土区丰县16年生杨树(*Populus × euramevicana* cl. 'Zhonglin 46')纯林、柳树(*Salix × jiangsuensis* cl. 'J-172')纯林、杨柳混交林3种林分类型及相邻的撂荒地(对照)为对象,测定土壤有机碳及活性组分、蔗糖酶、过氧化物酶、多酚氧化酶和β-葡萄糖苷酶活性,并计算土壤碳库管理指数,旨在明晰不同林分类型下土壤有机碳库特征及其影响因子,以期为平

原沙土区土壤碳库的提高和生态恢复提供理论依据。

## 1 研究区概况

试验地位于江苏省丰县复新河中游(34°24'25"~34°56'27"N, 116°21'15"~116°52'03"E),属黄泛冲积平原,海拔34.5~48.2 m;属暖温带季风气候,四季分明,光照充足,雨量适中,雨热同期;春季天气多变,夏季高温多雨,秋季天高气爽,冬季寒潮频袭,无霜期200 d左右。年平均降水量630.4 mm,年平均气温15.3℃。试验地土壤以微碱性潮土为主<sup>[20]</sup>,土壤湿润,土质分布均匀,周边区域以农业为主。主要乔木树种有杨树、柳树、泡桐(*Paulownia tomentosa* (Thunb.) Steud.)、构树(*Broussonetia papyrifera* (L.) L'Her. ex Vent.)、女贞(*Ligustrum lucidum* Ait.)等。

## 2 研究方法

### 2.1 样地设置和采样方法

试验地为2006年河道整治形成的立地条件相近的防护林,宽约40 m,长约6 km。沿河道依次营造长约2 km林龄相同的杨树纯林、柳树纯林和杨柳混交林。杨树品种为“46-杨”,柳树品种为“苏柳172”林龄16 a,初始营造密度均为500株·hm<sup>-2</sup>。杨树纯林(PPP)、柳树纯林(WPP)、杨柳混交林(PWM)下皆有天然更新的灌木和草本,其中,灌木主要有枸杞(*Lycium chinense* Miller)、苕麻(*Boehmeria nivea* (L.) Gaudich.)等;草本植物主要有狗尾草(*Setaria viridis* (L.) Beauv.)、沼生水马齿(*Callitriche palustris* L.)等。试验地基本概况见表1。

采样时间为2022年3月。在每种林分类型分别设置3个间距大于300 m的面积为20 m × 20 m的标准样地,根据试验地踏勘情况,选择与3种林分类型相邻的以狗尾草等草本植物为主的立地条件相同的撂荒地作为对照(CK),撂荒地同样设置3个远离林分边界的面积为20 m × 20 m的标准样地。在每个标准样地中按“S”型选取5个采样点,去除地表凋落物后挖取土壤剖面,每个剖面大小为1 m × 1.5 m × 1.2 m,分0~20、20~40、40~60、60~80、80~100 cm 5个土层分别采集土壤,将5个采样点同一土层的土壤混合成该标准样

表1 试验地基本概况

Table 1 Basic information of the sample plots

林分类型 Stand types	平均胸径 Mean DBH/cm	平均树高 Mean height/m	郁闭度 Canopy density	凋落物厚度 Litter thickness/cm	细根生物量 Fine root biomass/(t·hm <sup>-2</sup> )	细根碳储量 Fine root carbon stock/(t·hm <sup>-2</sup> )	凋落物生物量 Litter biomass/(t·hm <sup>-2</sup> )	凋落物碳储量 Litter carbon stock/(t·hm <sup>-2</sup> )
杨树纯林 PPP	28.8±1.6	16.8±0.6	0.9	2.2	8.69±0.55 A	3.93±0.31 A	12.89±0.01 A	5.49±0.19 A
柳树纯林 WPP	14.9±2.3	7.2±0.4	0.4	1.3	4.66±0.63 B	2.09±0.35 B	8.85±2.61 B	3.86±0.61 B
杨柳混交林 PWM	28.67±2.67(杨树)/ 18.43±1.72(柳树)	17.84±0.41(杨树)/ 8.31±1.01(柳树)	0.7	1.5	4.12±0.74 B	1.69±0.35 B	9.99±0.76 B	4.35±0.19 AB
撂荒地 CK	—	—	—	0.2	1.14±0.04 C	0.45±0.02 C	2.86±1.38 C	1.21±0.35 C

注：表中的数据为“平均值±标准误”。不同大写字母表示不同林分之间差异显著 ( $P<0.05$ )。下同。

Notes: The data is “mean±standard error”. Capital case letters that differ indicate significant ( $P<0.05$ ) differences among stand types. The same below.

地的土壤样品。用镊子仔细去除土壤中的根系，过 2 mm 筛备用。将每个标准样地的土壤样品分为 2 份，一份作为鲜土保存在 4 ℃ 冰箱中，用于土壤可溶性有机碳 (DOC)、微生物生物量碳 (MBC) 和 pH 值的测定；另一份经自然风干过筛等处理后用于全碳 (TC)、有机碳 (SOC)、易氧化有机碳 (EOC)、蔗糖酶、过氧化物酶、多酚氧化酶和 β-葡萄糖苷酶及其它土壤理化性质的测定。使用内径 9 cm、高 20 cm 的根钻，在 5 个采样点分 5 个土壤层次分别采集 1 份土芯，混合为一份装袋，带回实验室用 0.2 mm 细筛淘洗，筛选出直径 < 2 mm 的细根。在每个标准样地中随机选取 3 个 1 m × 1 m 的小样方，收集各小样方地表凋落物混合为该标准样地的凋落物样。

## 2.2 指标测定

试验地土壤偏碱性，土壤、凋落物和细根的全

碳和全氮含量采用元素分析仪 (Vario Element III, Germany) 测定，SOC 采用重铬酸钾-外加热法测定；DOC 经 K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 浸提，采用 TOC 仪 (TOC-VCPH + TNM-1, Shimazu Inc., Japan) 测定；MBC 用氯仿熏蒸-K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 提取法测定；EOC 采用 333 mmol·L<sup>-1</sup> 高锰酸钾氧化法测定。土壤团聚体平均重量直径参考 Elliot<sup>[21]</sup> 湿筛法测定，其它土壤理化指标参照鲍士旦<sup>[22]</sup> 的分析方法，容重和含水率用环刀法测定；细根生物量和凋落物生物量用烘干称量法测定；pH 值用电位法 (水土比为 2.5:1) 测定。

土壤酶活性参考关松荫<sup>[23]</sup> 的方法测定，蔗糖酶用 3,5-二硝基水杨酸比色法测定；土壤过氧化物酶和多酚氧化酶以邻苯三酚为底物，用没食子素比色法测定；土壤 β-葡萄糖苷酶用对硝基酚比色法测定。土壤基本理化性质见表 2。

表2 试验地土壤理化性质

Table 2 Physical and chemical properties of soil in the sample plots

林分类型 Stand types	全碳 TC content/ (g·kg <sup>-1</sup> )	全氮 TN content/ (g·kg <sup>-1</sup> )	碳氮比 C:N	全磷 TP content/ (g·kg <sup>-1</sup> )	全钾 TK content/ (g·kg <sup>-1</sup> )	pH值	土壤容重 Bulk density (g·cm <sup>-3</sup> )	土壤含水率 Water content/%	平均重量直径 Mean weight diameter/mm
杨树纯林 PPP	13.61±0.70 AB	0.60±0.04 A	25.67±0.70 B	1.45±0.03 B	18.68±0.62 B	8.27±0.10 A	1.64±0.03 A	20.75±1.42 A	0.71±0.08 A
柳树纯林 WPP	13.34±0.66 AB	0.57±0.05 A	29.97±1.04 B	1.53±0.02 AB	20.98±0.64 A	8.39±0.04 A	1.66±0.03 A	20.09±1.40 A	0.66±0.03 AB
杨柳混交林 PWM	13.97±0.74 A	0.53±0.07 B	26.60±1.39 B	1.52±0.02 AB	19.91±0.26 AB	8.21±0.13 A	1.64±0.03 A	22.19±1.05 A	0.52±0.01 BC
撂荒地 CK	12.49±0.48 B	0.39±0.04 B	46.40±3.65 A	1.56±0.03 A	20.16±0.23 AB	8.09±0.02 A	1.63±0.03 A	23.94±1.25 A	0.40±0.02 C

注：土壤理化性质数据为 0~20、20~40、40~60、60~80、80~100 cm 5 个土层的平均值。

Note: The data of soil physical and chemical properties were the average values in five soil layers (0-20, 20-40, 40-60, 60-80 and 80-100 cm).

## 2.3 数据处理和结果分析

土壤有机碳储量 (SOCS) 计算公式如下：

$$SOCS = SOC \times \rho \times h \times (1 - \delta) / 10$$

式中：SOC 为有机碳含量， $\rho$  为土壤容重， $h$  为土层厚度， $\delta$  为土壤砾石含量。

根据 Blair 等<sup>[8]</sup> 的方法，以撂荒地作为对照进行碳库管理指数 (CPMI) 的计算，公式如下：

$$CPMI = CPI \times LI \times 100\%$$

式中：碳库指数 (CPI) = 样品 SOC / 对照 SOC。

碳库活度指数 ( $LI$ ) = 样品碳库活度 ( $L$ ) / 对照碳库活度 ( $L_c$ )。

$$L = EOC / (SOC - EOC)$$

用 Excel 2019 进行数据整理和 CPMI 的计算, 用 SPSS 21 对数据进行统计分析。利用 Shapiro-Wilk 法检验方程残差分布的正态性, SOCS、MBC、CPMI、蔗糖酶、多酚氧化酶和  $\beta$ -

葡萄糖苷酶等指标符合正态分布, SOC、EOC、DOC 和过氧化物酶等采用对数转换, 利用方差分析 (ANOVA) 和最小显著差异法 (LSD) 比较各指标间差异, 双因素方差分析见表 3。采用 Pearson 法和冗余分析 (RDA) 进行相关性分析; 用 Origin 2018 软件进行统计图制作。

表 3 林分类型和土层对土壤有机碳及活性组分和酶活性的影响

Table 3 Effects of stand types and soil layer on SOC, labile fractions and enzyme activities

指标 Indicator	林分类型 Stand types		土层 Soil layers		林分类型 × 土层 Stand types × soil layers	
	F	P	F	P	F	P
有机碳含量 SOC	27.015	<0.05	35.437	<0.05	1.478	0.173
有机碳储量 SOCS	19.930	<0.05	45.566	<0.05	0.712	0.731
易氧化有机碳 EOC	18.988	<0.05	30.684	<0.05	0.853	0.598
可溶性有机碳 DOC	1.166	0.335	12.634	<0.05	0.568	0.854
微生物生物量碳 MBC	20.276	<0.05	8.193	<0.05	0.661	0.777
蔗糖酶活性 Invertase activity	4.550	<0.05	3.553	<0.05	0.809	0.639
过氧化物酶活性 Peroxidase activity	1.364	0.268	4.701	<0.05	1.493	0.167
多酚氧化酶活性 Polyphenol oxidase activity	23.941	<0.05	6.826	<0.05	1.150	0.350
$\beta$ -葡萄糖苷酶活性 $\beta$ -Glucosidase activity	0.470	0.705	8.490	<0.05	0.853	0.598

### 3 结果与分析

#### 3.1 不同林分类型土壤有机碳含量和储量分布特征

由图 1 可知: 试验地 3 种林分类型和对照各土层 SOC 和 SOCS 范围分别为 1.03~5.88 g·kg<sup>-1</sup> 和 3.53~17.55 t·hm<sup>-2</sup>, 在不同林分类型和土层间差异显著 ( $P<0.05$ ) (表 3)。3 种林分类型 0~100 cm 土层的 SOC 和 SOCS 显著高于对照, 分别增加了 45.2%~82.2% 和 47.7%~83.1%, 其中, 杨树纯林 SOC 显著高于柳树纯林和杨柳混交林 (表 4)。在垂直分布上, SOC 随土层加深而降低, 0~20 cm 土层的 SOC 显著高于 20~100 cm 各土层 ( $P<0.05$ )。与柳树纯林、杨柳混交林和对照相比, 杨树纯林 0~20、20~40、40~60、60~80 和 80~100 cm 土层 SOCS 分别增加了 14.6%~19.2%、24.1%~168.1%、27.9%~108.1%、20.5%~149.2% 和 11.3%~144.4%; 0~100 cm 土层杨树纯林的 SOCS 分别是柳树纯林、杨柳混交林和对照的 1.23、1.24、1.83 倍。

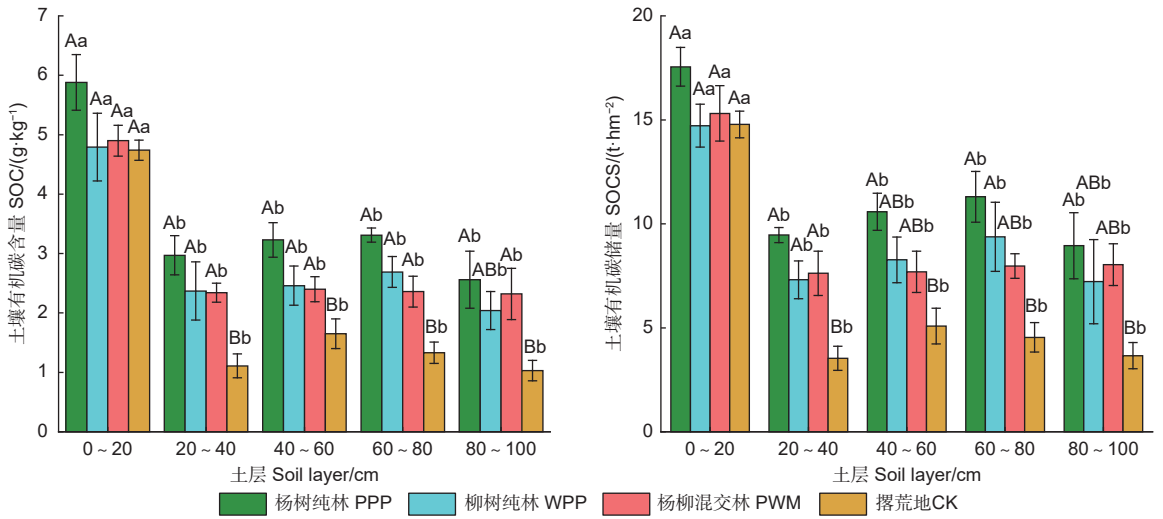
#### 3.2 不同林分类型土壤活性有机碳组分含量分布特征

由图 2 可知: 3 种林分类型和对照不同土层

的 EOC、DOC 和 MBC 范围分别为 0.73~2.38 g·kg<sup>-1</sup>、35.96~62.53 mg·kg<sup>-1</sup> 和 134.94~226.84 mg·kg<sup>-1</sup>, EOC 和 MBC 在不同林分类型和不同土层间差异显著 ( $P<0.05$ ), DOC 仅在不同土层间差异显著 ( $P<0.05$ ) (表 3)。在 0~100 cm 土层, 3 种林分类型的 EOC 和 MBC 均显著高于对照 ( $P<0.05$ ), 杨树纯林、柳树纯林和杨柳混交林的 EOC 和 MBC 分别比对照平均提高了 48.0%、28.6%、41.8% 和 33.4%、25.0%、21.6% (表 4)。杨树纯林、柳树纯林、杨柳混交林 0~20 cm 土层的 DOC 显著高于对照 ( $P<0.05$ ), 分别提高了 37.9%、24.8% 和 21.3%。3 种土壤活性有机碳组分含量在垂直分布上的规律相似, 随土层深度增加呈先降低后微升趋势。

#### 3.3 不同林分类型土壤碳库管理指数分布特征

CMPI 是基于对照土壤有机碳变化的稳定性指标, 对照土壤的 CMPI 为 100%。由图 3 可知: 0~100 cm 土层 3 种林分类型土壤的 CPMI 显著高于 100% ( $P<0.05$ ); 0~20 cm 土层 CPMI 为 杨树纯林>柳树纯林>杨柳混交林, 其中, 杨树纯林显著高于杨柳混交林 ( $P<0.05$ ); 40~100 cm



注：不同大写字母表示相同土层不同林分之间差异显著 ( $P < 0.05$ )，不同小写字母表示相同林分不同土层之间差异显著 ( $P < 0.05$ )；下同。

Notes: Capital case letters that differ within same soil layers indicate significant ( $P < 0.05$ ) differences among stand types. Lower case letters that differ within same stand type indicate significant ( $P < 0.05$ ) differences among soil layers. The same below.

图1 不同林分类型各土层有机碳含量和储量

Fig. 1 SOC and SOCS in different soil layers under various stand types

表4 不同林分类型0~100 cm 土层有机碳及活性有机碳含量

Table 4 The content of SOC and labile fraction in 0-100 cm soil layer under various stand types

林分类型 Stand types	有机碳含量 SOC/ ( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	有机碳储量 SOCS/ ( $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$ )	易氧化有机碳 EOC/ ( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	可溶性有机碳 DOC/ ( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	微生物量碳 MBC/ ( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )
杨树纯林 PPP	$3.59 \pm 0.20$ A	$57.84 \pm 1.80$ A	$1.45 \pm 0.08$ A	$43.63 \pm 1.27$ A	$193.99 \pm 5.78$ A
柳树纯林 WPP	$2.87 \pm 0.33$ B	$46.89 \pm 5.49$ A	$1.26 \pm 0.03$ A	$43.45 \pm 2.05$ A	$181.73 \pm 2.08$ A
杨柳混交林 PWM	$2.86 \pm 0.13$ B	$46.65 \pm 3.87$ A	$1.39 \pm 0.10$ A	$42.46 \pm 1.25$ A	$176.89 \pm 6.48$ A
撂荒地 CK	$1.97 \pm 0.09$ C	$31.59 \pm 2.23$ B	$0.98 \pm 0.04$ B	$39.77 \pm 2.14$ A	$145.44 \pm 5.73$ B

注：土壤有机碳及活性组分数据为0~20、20~40、40~60、60~80、80~100 cm 5个土层的平均值。土壤有机碳储量为0~100 cm土层的总和。

Notes: The data of SOC and labile fractions were the average values in five soil layers (0-20, 20-40, 40-60, 60-80 and 80-100 cm). The data of SOCS was the sum of 0-100 cm soil layer.

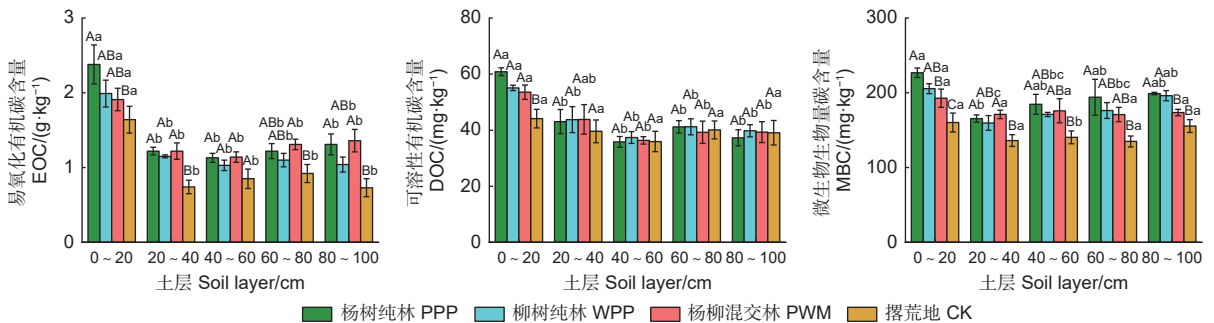


图2 不同林分类型各土层活性有机碳组分含量分布特征

Fig. 2 Distribution characteristics of labile SOC fraction content in different soil layers under various stand types

土层杨柳混交林的 CPMI 显著高于杨树纯林和柳树纯林 ( $P < 0.05$ )。

### 3.4 不同林分类型土壤酶活性的差异

由表5可知：与杨树纯林、柳树纯林和对照相

比，杨柳混交林0~100 cm 土层过氧化物酶和多酚氧化酶的活性较高，其中，杨柳混交林过氧化物酶活性显著高于柳树纯林 ( $P < 0.05$ )，提高了26.8%，多酚氧化酶的活性显著高于杨树纯林和对

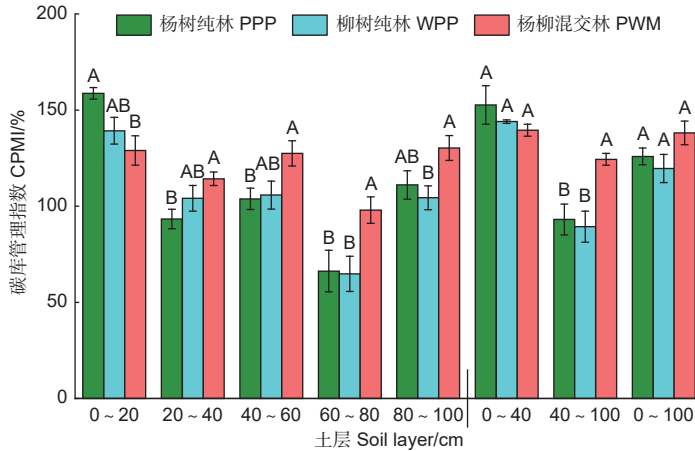


图3 不同林分类型土壤碳库管理指数

Fig. 3 The CPMI of soil in different stand types

照 ( $P<0.05$ ), 分别提高了 32.8% 和 76.2%; 杨柳混交林土壤蔗糖酶活性在 80~100 cm 土层显著高于杨树纯林 ( $P<0.05$ ); 各土层  $\beta$ -葡萄糖苷酶活性在不同林分间差异不显著。除柳树纯林多酚氧化酶活性在 20~40 cm 土层最高, 其余各林分的 4 种土壤酶活性均在 0~20 cm 土层最高, 其中, 杨柳混交林 0~20 cm 和 40~60 cm 土层的过氧化物酶活性显著高于 80~100 cm 土层 ( $P<0.05$ ), 0~20 cm 土层的  $\beta$ -葡萄糖苷酶活性显著高于 40~100 cm 各土层 ( $P<0.05$ )。双因素方差分析表明: 土层对蔗糖酶、过氧化物酶、多酚氧化酶和  $\beta$ -葡萄糖苷酶活性均有显著影响, 林分类型仅显著影响蔗糖酶和多酚氧化酶的活性, 林分类型和土层的交互作用对 4 种酶活性影响不显著 (表 3)。

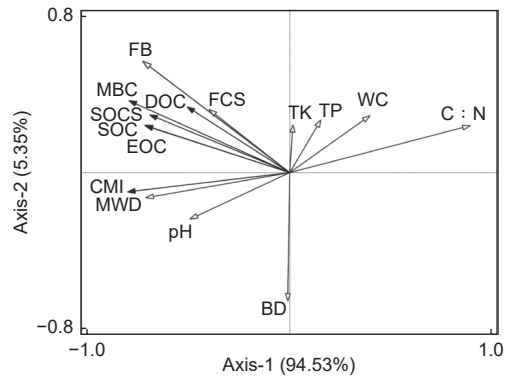
### 3.5 土壤有机碳库特征与土壤酶活性的相关性

相关性分析结果 (表 6) 表明: SOC、SOCS、EOC 和 CPMI 与 4 种土壤酶均呈显著或极显著正相关, DOC 与土壤多酚氧化酶和  $\beta$ -葡萄糖苷酶呈显著或极显著正相关, MBC 与土壤蔗糖酶、多酚氧化酶和  $\beta$ -葡萄糖苷酶呈显著或极显著正相关。

### 3.6 土壤有机碳库特征与环境因子的冗余分析

图 4 表明: 在有机碳及活性组分和 CPMI 与环境因子的 RDA 中, 第一轴和第二轴特征值分别为 0.64 和 0.04, 可累积解释其信息量 67.31%, 方差累积贡献率为 99.88%。碳氮比和细根生物量对土壤有机碳及活性组分和 CPMI 的解释率分别为 50.8% ( $P=0.002$ ) 和 10.4% ( $P=0.004$ ), 表明碳氮比和细根生物量是土壤有机碳及活性组分和 CPMI 的显著影响因素。RDA 中变量夹角的余弦值表示二者之间的相关性, 因此, 碳氮比与土壤有

机碳及活性组分和 CPMI 呈负相关; 细根生物量与土壤有机碳及活性组分和 CPMI 呈正相关。



注: FB: 细根生物量; BD: 土壤容重; MWD: 平均重量直径; WC: 土壤含水率; C:N: 碳氮比; TP: 全磷; TK: 全钾; FCS: 细根碳储量。

Notes: FB: Fine root biomass; BD: Bulk density; MWD: mean weight diameter; WC: Water content; C:N: carbon to nitrogen ratio; TP: Total phosphorus; TK: Total potassium; FCS: Fine root carbon stock.

图4 土壤有机碳库特征与环境因子的冗余分析

Fig. 4 The RDA analysis of characteristics of soil organic carbon pools and environmental factors

## 4 讨论

### 4.1 林分类型对土壤有机碳含量及储量影响

营造人工林 16 a 后, 与对照相比, 平原沙土区 3 种林分类型增加了各土层的 SOC, 与 Kukuls 等<sup>[24]</sup> 的结果一致。这主要归因于营造人工林增加了地表凋落物数量 (表 1), 为土壤有机质积累提供丰富的来源。3 种林分中杨树纯林的土壤 SOCS 最高。土壤 SOCS 的变化取决于地上地下凋落物、根瘤菌固定等有机质输入和有机质分解、

表5 不同林分类型土壤酶活性  
Table 5 Soil enzyme activities in different stand types

林分类型 Stand types	土层 Soil layer/ cm	蔗糖酶活性 Invertase activity/ (mg·g <sup>-1</sup> ·d <sup>-1</sup> )	过氧化物酶活性 Peroxidase activity/ (mg·g <sup>-1</sup> ·d <sup>-1</sup> )	多酚氧化酶活性 Polyphenol oxidase activity/ (mg·g <sup>-1</sup> ·d <sup>-1</sup> )	β-葡萄糖苷酶活性 β-Glucosidase activity/ (mg·g <sup>-1</sup> ·d <sup>-1</sup> )
杨树纯林 PPP	0~20	17.55±0.21 Aa	11.74±0.59 Aa	35.64±2.55 ABa	10.93±1.34 Aa
	20~40	16.51±0.50 Aab	7.38±1.30 Aab	32.98±3.07 Aab	3.17±1.31 Ab
	40~60	16.28±0.48 Aab	4.82±0.44 Bb	19.61±3.36 Bc	5.12±0.65 Ab
	60~80	15.99±0.42 Ab	4.85±1.44 Ab	18.13±3.77 Bc	3.89±1.02 Ab
	80~100	15.78±0.27 Bb	6.64±1.92 Aab	22.49±3.89 BCbc	4.20±0.65 Ab
	0~100	16.42±0.37 A	7.09±0.33 AB	25.77±1.32 B	5.46±0.54 A
柳树纯林 WPP	0~20	16.79±0.46 Aa	7.66±0.56 Ba	35.39±3.14 ABa	8.52±1.49 Aa
	20~40	16.21±0.12 Aa	4.92±0.15 Ba	35.93±3.68 Aa	4.76±1.59 Aa
	40~60	16.14±0.40 Aa	5.83±0.87 ABa	29.77±3.62 ABa	4.81±0.93 Aa
	60~80	16.25±0.10 Aa	6.44±1.30 Aa	34.47±1.40 Aa	6.15±0.72 Aa
	80~100	16.28±0.17 ABa	5.43±0.82 Aa	30.60±1.00 ABa	5.02±1.76 Aa
	0~100	16.33±0.02 A	6.05±0.41 B	33.23±1.52 A	5.85±0.22 A
杨柳混交林 PWM	0~20	17.07±0.34 Aa	9.45±1.56 ABa	39.35±3.68 Aa	9.54±1.34 Aa
	20~40	16.71±0.12 Aa	6.17±0.68 ABab	33.98±0.69 Aa	6.77±1.65 Aab
	40~60	17.00±0.42 Aa	9.45±1.80 Aa	34.04±3.20 Aa	4.71±1.32 Ab
	60~80	17.04±0.52 Aa	8.36±1.98 Aab	29.77±4.02 Aa	4.92±0.97 Ab
	80~100	16.64±0.04 Aa	4.92±0.73 Ab	33.95±2.68 Aa	4.09±1.15 Ab
	0~100	16.90±0.06 A	7.67±0.69 A	34.22±0.92 A	6.01±0.68 A
撂荒地 CK	0~20	16.51±0.37 Aa	8.23±0.90 ABa	26.12±2.79 Ba	6.87±1.13 Aa
	20~40	15.99±0.25 Aa	6.20±0.39 ABa	20.18±4.02 Ba	4.92±1.42 Aa
	40~60	16.28±0.14 Aa	7.93±1.04 ABa	19.80±3.95 Ba	5.64±1.44 Aa
	60~80	16.09±0.12 Aa	6.71±1.14 Aa	14.51±1.53 Ba	3.99±1.76 Aa
	80~100	16.02±0.28 ABa	6.20±0.42 Aa	16.48±3.94 Ca	4.20±1.47 Aa
	0~100	16.18±0.23 A	7.05±0.25 AB	19.42±0.43 C	5.12±0.24 A

注：不同大写字母表示相同土层不同林分之间差异显著 ( $P<0.05$ )，不同小写字母表示相同林分不同土层之间差异显著 ( $P<0.05$ )。

Notes: Capital case letters that differ within same soil layers indicate significant ( $P<0.05$ ) differences among stand types, lower case letters that differ within same stand type indicate significant ( $P<0.05$ ) differences among soil layers.

表6 土壤有机碳库特征与土壤酶活性的相关系数

Table 6 Pearson correlations between characteristics of soil organic carbon pools and soil enzyme activity

指标 Index	蔗糖酶活性 Invertase activity	过氧化物酶活性 Peroxidase activity	多酚氧化酶活性 Polyphenol oxidase activity	β-葡萄糖苷酶活性 β-Glucosidase activity
有机碳含量 SOC	0.376**	0.326*	0.479**	0.427**
有机碳储量 SOCS	0.376**	0.379**	0.387**	0.484**
易氧化有机碳 EOC	0.418**	0.382**	0.564**	0.461**
可溶性有机碳 DOC	0.242	0.194	0.327*	0.383**
微生物生物量碳 MBC	0.284*	0.043	0.434**	0.331**
碳库管理指数 CPMI	0.432**	0.338**	0.401**	0.389**

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

Note: \*\* $P<0.01$ , \* $P<0.05$ 。

淋溶及侵蚀等碳损失的平衡<sup>[25]</sup>。杨树是典型速生树种，适应能力强，提供了更多的凋落物和细根生物

量 (表1)，直接增加了土壤有机质的输入源，促进杨树纯林土壤积累更多 SOCS。

各林分类型 SOC 和 SOCS 都具有明显的“表聚效应”,这与沈芳芳等<sup>[26]</sup>研究结果一致,这可能是因为凋落物分解输入的有机质集中在土壤表层,且植被根系主要分布于土壤表层<sup>[27]</sup>。有机质是土壤酶促底物的主要供源,本研究中土壤 SOC 和 SOCS 与 4 种酶活性呈极显著正相关(表 6),表土层更高的酶活性(表 5)证明了这一效应。与其他林分类型相比,20~80 cm 土层,杨树纯林累积 SOCS 随土层加深逐渐升高。杨树具有发达的根系,提高了各土层有机质来源,也可能促进表层的 DOC 向下迁移<sup>[28]</sup>,使其 SOCS 累积量逐渐升高。

#### 4.2 林分类型对土壤活性有机碳组分和碳库管理指数的影响

DOC 主要来源于根系的分泌物、植物凋落物的渗透物,从而易受土壤淋溶作用<sup>[29]</sup>。本研究中,3 种林分类型有较多地表凋落物和发达根系,使 0~20 cm 土层的 DOC 显著高于对照。另外,沙质土壤因为缺乏对输入有机碳的物理保护作用<sup>[30]</sup>,会导致土壤中 DOC 淋失,而表土层的有机质输入可以抵消这种淋失作用,因此,本研究中 3 种林分类型的 DOC 仅在表土层与对照差异显著。然而,各土层 DOC 在不同林分间无显著差异,有可能是因为营造人工林在提高了有机质输入和增加 DOC 含量的同时,也提高了酶活性(表 5),使 DOC 经过土壤酶转化为 MBC,从而降低了 DOC,使得 DOC 在林分类型间差异不显著。

本研究发现,造林可以提高土壤的 MBC,这与 Wang 等<sup>[31]</sup>研究结果一致。在营造人工林后,一方面提高了凋落物数量和质量,增加了土壤 SOC,为微生物提供了可直接利用的有机碳源<sup>[29]</sup>;另一方面降低了土壤碳氮比,促进土壤微生物的生长,增加土壤 MBC(表 2,图 4)。另外,MBC 的增加与土壤蔗糖酶和多酚氧化酶活性增加有关(表 5、6),因为土壤酶是微生物活动的产物,其活性可以表征 SOC 分解转化为 MBC 的速率<sup>[32]</sup>。杨树纯林的 MBC 在表土层显著高于杨柳混交林,这是因为杨树纯林在造林 16 a 后增加有机碳来源的同时,改善了林地光照和土壤通气性,通过更多的凋落物归还和较发达根系及其分泌物分解诱导形成的微生物区系<sup>[33]</sup>,促进了表层土壤 MBC 的累积。随着土层深度增加,根系减少,土壤通气性下降,林分类型对表层以下土壤 MBC 影响降低,使得 20~80 cm 土层的 MBC 在林分间差异不显著。

与对照相比,营造人工林后土壤 EOC 显著增加(表 4)。人工林可以通过增加林冠截留和地表凋落物覆盖(表 1),降低雨滴击溅侵蚀和地表径流冲刷,减少表层土壤扰动,避免 EOC 的分解转化,且造林后有机质的增加提高了团聚体的稳定性(表 2),使 EOC 不易分解。杨树纯林土壤 EOC 较柳树纯林和杨柳混交林的高,但差异不显著,这可能取决于林分结构和树种特性。以往研究表明,凋落物分解速率一般在针叶树和阔叶树种间差异显著<sup>[25]</sup>,进而影响微生物介导的有机碳循环过程<sup>[34]</sup>。杨树在凋落物数量上高于柳树(表 1),可能在分解速率上无显著差异,导致 EOC 在林分间无显著差异。

CPMI 是表征 SOC 总库及其活性组分关系的指标<sup>[35]</sup>,可以反映 SOC 在土壤中固存和矿化潜力<sup>[36]</sup>。营造人工林后 CPMI 值高于 100%,说明造林可以提高沙土区 SOC 固存能力。这可能是因为人工林根系木质化程度更高,在提供根系分泌物和新鲜残体的同时,增加了木质素和纤维素等难降解大分子物质<sup>[37]</sup>,导致非活性 SOC 的增加,从而提高土壤碳库稳定性。

## 5 结论

在平原沙土区营造人工林可以显著提高 0~100 cm 土层的 SOC 和 SOCS,且具有明显的“表聚效应”。杨树纯林具有较高的凋落物生物量和细根生物量,直接增加了土壤有机质的输入源,积累了更多 SOCS。造林通过改变土壤碳氮比和酶活性显著提高土壤的 EOC 和 MBC,但并未显著影响 DOC。各林分类型土壤 CPMI 显著高于 100%,表明营造人工林显著提高了土壤有机碳固存能力。因此,在平原沙土区营造人工林可以提高土壤有机碳及活性组分和有机碳库稳定性,杨树纯林提高土壤有机碳储量效果最好。

#### 参考文献:

- [1] 李金垚,潘雯,王佳,等.土壤活性有机碳及碳库管理指数对石漠化治理措施响应[J].林业科学研究,2022,35(5):156-163.
- [2] WANG B R, LIU D, YANG J J, *et al.* Effects of forest floor characteristics on soil labile carbon as varied by topography and vegetation type in the Chinese Loess Plateau[J]. *Catena*, 2021, 196: 104825.
- [3] 李帅锋,苏建荣,刘万德,等.思茅松人工林土壤有机碳和氮储量变化[J].林业科学研究,2015,28(6):810-817.



- [4] BONGIORNO G, BUNEMANN E K, OGUEJIOFOR C U, *et al.* Sensitivity of labile carbon fractions to tillage and organic matter management and their potential as comprehensive soil quality indicators across pedoclimatic conditions in Europe[J]. *Ecological Indicators*, 2019, 99: 38-50.
- [5] BARRETO P A B, GAMA-RODRIGUES E F, GAMA-RODRIGUES A C, *et al.* Distribution of oxidizable organic C fractions in soils under cacao agroforestry systems in Southern Bahia, Brazil[J]. *Agroforestry Systems*, 2011, 81(3): 213-220.
- [6] BELAY-TEDLA A, ZHOU X, BO S, *et al.* Labile, recalcitrant, and microbial carbon and nitrogen pools of a tallgrass prairie soil in the US Great Plains subjected to experimental warming and clipping[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2009, 41(1): 110-116.
- [7] YANG X, MENG J, LAN Y, *et al.* Effects of maize stover and its biochar on soil CO<sub>2</sub> emissions and labile organic carbon fractions in Northeast China[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2017, 240: 24-31.
- [8] BLAIR G, LEFROY R, LISLE L. Soil carbon fractions based on their degree of oxidation, and the development of a carbon management index for agricultural systems[J]. *Australian Journal of Agricultural Research*, 1995, 46(7): 393-406.
- [9] 钱虹宇, 周宏鑫, 罗原骏, 等. 土壤活性有机碳及碳库管理指数对高寒湿地退化的响应[J]. *生态学杂志*, 2020, 39(7): 2273-2282.
- [10] 佟小刚, 韩新辉, 杨改河, 等. 碳库管理指数对退耕还林土壤有机碳库变化的指示作用[J]. *中国环境科学*, 2013, 33(3): 466-473.
- [11] 刘江伟, 徐海东, 林同岳, 等. 海涂围垦区不同林分土壤活性有机碳垂直变化特征[J]. *林业科学研究*, 2022, 35(3): 18-26.
- [12] YAO L, ADAME M F, CHEN C R. Resource stoichiometry, vegetation type and enzymatic activity control wetlands soil organic carbon in the Herbert River catchment, North-east Queensland[J]. *Journal of Environmental Management*, 2021, 296: 113183.
- [13] YUAN Z X, JIN X M, GUAN Q W, *et al.* Converting cropland to plantation decreases soil organic carbon stock and liable fractions in the fertile alluvial plain of eastern China[J]. *Geoderma Regional*, 2021, 24: e00356.
- [14] DAWUD S M, RAULUND-RASMUSSEN K, RATCLIFFE S, *et al.* Tree species functional group is a more important driver of soil properties than tree species diversity across major European forest types[J]. *Special Feature: The Ecology of De-Extinction*, 2017, 31(5): 1153-1162.
- [15] RATCLIFFE S, WIRTH C, JUCKER T, *et al.* Biodiversity and ecosystem functioning relations in European forests depend on environmental context[J]. *Ecology Letters*, 2017, 20(11): 1414-1426.
- [16] CAMPOS R, PIRES G F, COSTA M H. Soil carbon sequestration in rainfed and irrigated production systems in a New Brazilian agricultural frontier[J]. *Agriculture*, 2020, 10(5): 156.
- [17] 徐 蛟, 王良杰. 江苏省平原沙土区河道生态提升建设探索[J]. *中国水利*, 2020(23): 42-43,4.
- [18] 黄明逸, 朱成立, 韩以振, 等. 江苏省黄河故道沙土区植被措施因子试验分析[J]. *水土保持研究*, 2017, 24(1): 140-144.
- [19] LIU H X, SUN Z J, DONG Y Q, *et al.* Precipitation drives the accumulation of soil organic carbon in the sandy desert of the Junggar Basin, Northwest China[J]. *Ecological Indicators*, 2022, 142: 109224.
- [20] 全国土壤普查办公室. 中国土种志[M]. 北京: 中国农业出版社, 1993.
- [21] ELLIOTT E T. Aggregate structure and carbon, nitrogen, and phosphorus in native and cultivated soils[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1986, 50(3): 627-627.
- [22] 鲍士旦. 土壤农化分析 3版[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [23] 关松荫. 土壤酶及其研究法[M]. 北京: 中国农业出版社, 1986.
- [24] KUKULS L, KLAVINS M, NIKODEMUS O, *et al.* Changes in soil organic matter and soil humic substances following the afforestation of former agricultural lands in the boreal-nemoral ecotone (Latvia)[J]. *Geoderma Regional*, 2019, 16: e00213.
- [25] MAYER M, PRESCOTT C E, ABAKER W E, *et al.* Tamm review: Influence of forest management activities on soil organic carbon stocks: A knowledge synthesis[J]. *Forest Ecology and Management*, 2020, 466: 118127.
- [26] 沈芳芳, 袁颖红, 樊后保, 等. 氮沉降对杉木人工林土壤有机碳矿化和土壤酶活性的影响[J]. *生态学报*, 2012, 32(2): 517-527.
- [27] 高 瑞, 王祎珂, 艾 宁, 等. 陕北特色经济林深层土壤有机碳特征及影响因素[J]. *森林与环境学报*, 2021, 41(5): 464-470.
- [28] NEFF J C, ASNER G P. Dissolved organic carbon in terrestrial ecosystems: Synthesis and a model[J]. *Ecosystems*, 2001, 4(1): 29-48.
- [29] PANG D B, CUI M, LIU Y G, *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.
- [30] RICHTER D D, MARKEWITZ D, TRUMBORE S E, *et al.* Rapid accumulation and turnover of soil carbon in a re-establishing forest[J]. *Nature*, 1999, 400(6739): 56-58.
- [31] WANG Q K, XIAO F M, ZHANG F Y, *et al.* Labile soil organic carbon and microbial activity in three subtropical plantations[J]. *Forestry*, 2013, 86(5): 569-574.
- [32] YAN M F, LI T H, LI X R, *et al.* Microbial biomass and activity restrict soil function recovery of a post-mining land in eastern Loess Plateau[J]. *Catena*, 2021, 199: 105107.
- [33] 林鑫宇, 惠 昊, 王亚茹, 等. 不同林分类型下土壤活性有机碳含量和分布特征[J]. *安徽农业大学学报*, 2021, 48(3): 437-443.
- [34] 谭桂霞, 刘苑秋, 李蓬蓬, 等. 湿地松林分结构调整对土壤活性有机碳的影响[J]. *应用生态学报*, 2014, 25(5): 1307-1312.
- [35] MEENA V S, MONDAL T, PANDEY B M, *et al.* Land use changes: Strategies to improve soil carbon and nitrogen storage pattern in the mid-Himalaya ecosystem, India[J]. *Geoderma*, 2018, 321: 69-78.
- [36] LI j, WEN Y C, LI X H, *et al.* Soil labile organic carbon fractions and soil organic carbon stocks as affected by long-term organic and mineral fertilization regimes in the North China Plain[J]. *Soil and Tillage Research*, 2018, 175: 281-290.
- [37] PRIETO I, STOKES A, ROUMET C. Root functional parameters predict fine root decomposability at the community level[J]. *Journal of ecology*, 2016, 104(3): 725-733.

# Characteristics of Soil Organic Carbon Pools and Their Influencing Factors under Different Stand Types in the Plain Sandy Area

WANG Lei<sup>1</sup>, LIU Qing-yi<sup>1</sup>, GUAN Qing-wei<sup>1</sup>, SHI Jing-pan<sup>2</sup>, PENG Ting-ting<sup>3</sup>,  
ZHU Xiang-cheng<sup>4</sup>, YANG Yue<sup>5</sup>, LIU Jing<sup>6</sup>

(1. College of Biology and the Environment, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, Jiangsu, China; 2. Fengxian Water Conservancy Bureau, Xuzhou 221799, Jiangsu, China; 3. Nanjing Yangtze Finless Porpoise Provincial Nature Reserve Management Station, Nanjing 210019, Jiangsu, China; 4. Water Conservancy Construction Bureau of Jiangsu Province, Nanjing 210029, Jiangsu, China; 5. Nanjing Yangtze River Management Bureau, Nanjing 210011, Jiangsu, China; 6. Wengan County Water Authority, Wengan 550400, Guizhou, China)

**Abstract:** [Objective] By investigating the characteristics of soil organic carbon pools under different stand types, this study aims to provide a theoretical basis for the enhancement of soil carbon pools and ecological restoration in plain sandy areas. [Method] Soil organic carbon (SOC), labile organic carbon fractions and soil enzyme activities were measured in five soil layers (0-20, 20-40, 40-60, 60-80 and 80-100 cm depth) for three 16-year-old stand types (poplar pure plantation, willow pure plantation and poplar-willow mixed plantation) and a nearby abandoned land (as control) at a typical plain sandy area of Feng County, Jiangsu Province. The carbon pool management index (CPMI) was estimated for the examined stands. The correlations between soil carbon pool characteristics and environmental factors therein were also analyzed. [Result] (1) In general, the organic carbon content (SOC) and storage (SOCS) of the three forest types and the control soil layers ranged from 1.03 to 5.88 g·kg<sup>-1</sup> and 3.53 to 17.55 t·hm<sup>-2</sup>, respectively. Among them, the SOC content increased by 45.2%-82.2% in the forested sites compared with the control site, and the SOCS in the 0-100 cm soil layer of pure poplar forest was 1.23, 1.24, and 1.83 times that of pure willow forest, mixed willow forest and the control, respectively. (2) Compared with the control, the soil labile organic carbon fractions, including easily oxidizable organic carbon, dissolved organic carbon and microbial biomass carbon, increased by 28.6%-48.0%, 6.8%-9.7% and 21.6%-33.4%, respectively. The CPMI was significantly higher than 100% for the three stand types ( $P<0.05$ ). (3) Soil invertase activity and polyphenol oxidase activity were significantly affected by stand types, and the polyphenol oxidase activity of poplar-willow mixed plantation was significantly higher than that of poplar pure plantation and control ( $P<0.05$ ) in 0-100 cm soil layer. (4) Pearson correlation analysis showed that characteristics of SOC pools were significantly affected by polyphenol oxidase and  $\beta$ -glucosidase activities ( $P<0.05$ ), SOC, SOCS, EOC and CPMI were significantly affected by invertase, peroxidase activities. MBC was significantly affected by invertase activity. Redundancy analysis showed that soil carbon to nitrogen ratio and fine root biomass were the main factors in affecting the characteristics of SOC pools in the study area. [Conclusion] Plantation in plain sandy soil area can improve soil organic carbon, active components and stability of organic carbon pool, and pure poplar forest has the best effect on improving soil organic carbon storage.

**Keywords:** plain sandy area; stand types; organic carbon; labile organic carbon fraction; carbon pool management index; soil enzyme activity