

doi:10.3969/j.issn.1006-8023.2024.02.002

# 阔叶红松林不同演替系列土壤可溶性有机碳含量及影响因素

张东来<sup>1</sup>,张玲<sup>2\*</sup>

(1. 黑龙江省生态研究所,哈尔滨 150081;2. 黑龙江省林业科学研究所,哈尔滨 150081)

**摘要:**为准确预测全球变化背景下中国小兴安岭地区森林生态系统碳汇动态、合理制定森林经营措施,以小兴安岭阔叶红松林不同演替系列典型群落为研究对象,采用时空替代法,探讨3个演替系列6种典型群落土壤可溶性有机碳含量及影响因素。结果表明,中生演替系列和旱生演替系列演替进程中土壤可溶性有机碳呈波动式趋势,0~10 cm层最大,10~20 cm层出现下降趋势,20~40 cm层后开始逐渐升高的趋势。湿生演替系列表现随土层的增加而降低的趋势。中生演替系列土壤可溶性有机碳积累与土壤毛细管孔隙度呈正相关,与凋落物量呈显著正相关( $P<0.05$ ),与土壤全氮、全磷、全钾含量呈显著负相关( $P<0.05$ )。湿生演替系列土壤可溶性有机碳与土壤含水率呈正相关,与土壤毛细管孔隙度和凋落物量呈显著正相关( $P<0.05$ ),与土壤全氮含量呈显著负相关( $P<0.05$ );旱生演替系列土壤可溶性有机碳与土壤毛细管孔隙度、砂粒比、凋落物量、土壤全氮含量呈极显著负相关( $P<0.01$ ),与土壤全磷含量和土壤全钾含量呈极显著正相关( $P<0.01$ )。

**关键词:**阔叶红松林;演替;可溶性有机碳;含量;影响因素

中图分类号:S714.1

文献标识码:A

文章编号:1006-8023(2024)02-0010-07

## Soluble Organic Carbon Content and Influencing Factors in Different Succession Series of Broad-leaved Korean Pine Forests

ZHANG Donglai<sup>1</sup>, ZHANG Ling<sup>2\*</sup>

(1. Heilongjiang Ecology Institute, Harbin 150081, China; 2. Forestry Research Institute of Heilongjiang Province, Harbin 150081, China)

**Abstract:** In order to accurately predict the carbon sink dynamics of the forest ecosystem in the Xiaoxing'an Mountains region of China under the background of global change and formulate reasonable forest management measures, the typical communities of different succession series of the Xiaoxing'an Mountains broad-leaved Korean pine forest were selected as research object, the spatiotemporal substitution method was used to explore the soil soluble organic carbon content and influencing factors of six typical communities in three succession series. The results showed that the soil soluble organic carbon showed a fluctuating trend during the succession process of the mesoseres series and xeroseres series, with the maximum in the 0-10 cm layer, a decreasing trend in the 10-20 cm layer, and a gradually increasing trend after the 20-40 cm layer. The performance of the hydroseres succession series decreases with the increase of soil layer. The accumulation of soluble organic carbon in the soil of mesoseres succession series was positively correlated with soil capillary porosity, significantly positively correlated with litter volume ( $P<0.05$ ), and significantly negatively correlated with soil total nitrogen, total phosphorus, and total potassium content ( $P<0.05$ ). In the hydroseres series, there was a positive correlation between soil soluble organic carbon and soil moisture content, and a significant positive correlation with soil capillary porosity and litter ( $P<0.05$ ), and a significant negative correlation with soil total nitrogen content ( $P<0.05$ ). The soluble organic carbon in the soil of the xeroseres series was extremely significantly negatively correlated with soil capillary porosity, sand to particle ratio, litter volume, and total nitrogen content ( $P<0.05$ ), while it was extremely significantly positively correlated with total phosphorus and total potassium content in the soil.

**Keywords:** Broad-leaved Korean pine forest; succession; soluble organic carbon; content; influencing factors

收稿日期:2023-10-21

基金项目:国家自然科学基金资助项目(31270494,31600485);黑龙江省省属业务费项目(CZKYF20203013)。

第一作者简介:张东来,硕士,研究员。研究方向为植物生态学、森林培育学。E-mail:slkyzdl@163.com

\*通信作者:张玲,博士,研究员。研究方向为植物生态学、经济林。E-mail:slyszl@126.com

引文格式:张东来,张玲.阔叶红松林不同演替系列土壤可溶性有机碳含量及影响因素[J].森林工程,2024,40(2):10-16.

ZHANG D L,ZHANG L. Soluble organic carbon content and influencing factors in different succession series of broad-leaved Korean pine forests[J]. Forest Engineering, 2024, 40(2):10-16.

## 0 引言

阔叶红松林是我国温带典型的地带性顶极植被类型。由于历史原因及人为干扰,阔叶红松林面积大幅减少,导致次生演替发生。不同立地条件下的原始阔叶红松林被破坏(皆伐或火烧)后,由于地形因子中的坡向和部位不同,产生土壤水分差异,形成3个演替系列:中生系列、旱生系列和湿生系列,其分类的依据是特殊水分关系<sup>[1]</sup>。

可溶性有机碳(Dissolved organic carbon, DOC)通常是指在特定的空间范围内,会受到植物及微生物强烈作用的土壤碳,在土壤中有极强的移动性,是最容易被土壤微生物分解利用的土壤有机碳<sup>[2]</sup>。在生态系统碳、氮循环中,DOC是土壤碳库最活泼的有机碳组分之一<sup>[3]</sup>。DOC主要来自林冠与地表枯枝落叶层的淋溶、根系归还与分泌物等,受不同生长阶段森林凋落物数量和根系活动的影响<sup>[4]</sup>。诸多年来,国内外研究学者研究可溶性有机碳涉及较全面,如森林土壤、农田土壤可溶性有机碳<sup>[5]</sup>,主要涉及不同土地利用方式土壤可溶性有机碳含量差异<sup>[6-10]</sup>、不同群落类型土壤有机碳含量的季节动态<sup>[11-16]</sup>、天然林与人工林土壤可溶性有机碳含量差异的研究<sup>[17-20]</sup>。土壤养分随演替的进行总是不断地发生变化,可溶性有机碳也不例外<sup>[21]</sup>。土壤可溶性有机碳受气候、土地利用方式及土壤性质的影响,不同生态系统土壤水溶性有机碳存在较大的差异<sup>[22]</sup>。以阔叶红松林不同演替系列中生演替系列、湿生演替系列和旱生演替系列的典型群落为研究对象,每个演替系列分别选择立地条件相似的顶级群落和次生群落进行对比研究,探讨群落演替过程

中土壤可溶性有机碳的变化及影响因子,可为准确预测全球变化背景下中国小兴安岭地区森林生态系统碳汇动态、合理制定森林经营措施提供科学参考。

## 2 研究地概况及研究方法

### 2.1 研究地概况

研究样地选择在凉水国家级自然保护区内(47°10'50" N, 128°53'20" E),土壤为暗棕壤,地带性植被为以红松(*Pinus koraiensis*)为主,伴生着红皮云杉(*Picea koraiensis*)、冷杉(*Abies nephrolepis*)、枫桦(*Betula costata*)、紫椴(*Tilia amurensis*)、糠椴(*T. mandshurica*)、裂叶榆(*Ulmus laciniata*)、花楷槭(*Acer ukurunduense*)、青楷槭(*A. tegmentosum*)、大青杨(*Populus ussuriensis*)和色木槭(*A. Mono Maxim.*)等20余种树种,主要下木有刺五加(*Acanthopanaxsenticosus*)、珍珠梅(*Sorbaria kirilowii*)、毛榛子(*Corylus mandshurica*)和东北山梅花(*Philadelphusschrenkii*)等,草本植物主要有宽山苔草(*Carex sid-erosticta*)、猴腿蹄盖蕨(*Athyrium maltidentatum*)和小叶芹(*Aegopoeium alpestre*)等,藤本植物有山葡萄(*Vitis amuensis*)、五味子(*Schizandra chinensis*)和狗枣猕猴桃(*Actinidia kolomikta*)等。

该区属于温带大陆性季风气候特征,年均气温-0.3℃,年均最低气温-6.6℃,年均最高气温7.5℃,年降水量680mm,无霜期120d。原始阔叶红松林,林龄200a以上,次生林以白桦、枫桦和山杨(*Populus davidiana*)等为主,林龄在40a以上。该地区为典型的低山丘陵地貌,海拔为300~500m,坡度多为10°~25°,地带性土壤类型为暗棕壤,样地概况见表1。

表1 不同演替系列典型群落类型样地概况

Tab. 1 General situation of different succession series forest sample plots

演替系列 Succession series	群落类型 Community type	海拔/m Elevation	坡向 Aspect	坡度/(°) Slop	郁闭度 Canopy	林龄/a Years	多度/种 Abundance	树高/m Tree high	胸径/cm Diameter at breast height
中生演替系列 Mesosereres series	阔叶红松林 <i>Pinus koraiensis</i> forest	346	东南	20	0.8	200	47	19	12.1
	枫桦次生林 <i>Betula costata</i> - <i>Pinus</i> secondary forest	400	西北	15	0.7	20	43	22	25.2
湿生演替系列 Hydrosereres series	云冷杉-红松林 <i>Picea koraiensis</i> - <i>Pinus</i> <i>koraiensis</i> forest	330	西北	3	0.6	200	44	18	17.3
	白桦次生林 <i>Betula platyphylla</i> - secondary forest	310	西	4	0.8	50	40	15	12.2
旱生演替系列 Xerosereres series	蒙古栎-红松林 <i>Quercus mongolica</i> - <i>Pinus</i> <i>koraiensis</i> forest	392	南	40	0.8	250	40	24	35.1
	黑桦-蒙古栎次生林 <i>Quercus mongolica</i> - <i>Betula</i> <i>dahurica</i> secondary forest	430	南	25	0.9	40	28	13	15.9

## 2.2 研究方法

试验样地选择3个演替系列,即中生演替系列(阔叶红松林和枫桦次生林)、湿生演替系列(云冷杉-红松林和白桦次生林)、旱生演替系列(蒙古栎-红松林和黑桦-蒙古栎次生林)6种典型群落为研究对象<sup>[23]</sup>。每种演替系列选择立地条件相似的顶级群落和次生演替群落对比研究。每个群落选3块标准样地(20 m×20 m),每个样地挖取5样点,做土壤剖面,并采集0~10、10~20、20~40、40~60 cm土样,每个演替系列采用各个典型样地数据平均值。每层取土样1 kg左右,将新鲜土样去除根系、凋落物后过2 mm筛,然后分成2部分,一部分装入无菌塑料袋密封后4℃冰箱保存,一部分风干处理。

### 2.2.1 土壤物理性质测定

毛管持水量测定采用原状环刀土样浸泡法,土壤容重采用环刀法,土壤pH采用电位法,见鲍士旦<sup>[23]</sup>《土壤农化分析》。

#### 1) 土壤砂粒比测定

土壤砂粒比采用吸管法(0.25~1 mm),将大于2 mm石砾按不同粒径分开,分别放入蒸馏水煮沸若干次。吸湿含水率,去除有机质,去除CaCO<sub>3</sub>。制备悬液,细土料的沉降分析,分散剂空白测定和计算<sup>[23]</sup>。

#### 2) 凋落物量

在样地内随机收集5个0.5 m×0.5 m样方的地面凋落物,烘干测定凋落物现存量。

### 2.2.2 土壤可溶性有机碳测定

土壤可溶性有机碳测定:称取1 g土壤样品于50 mL离心管中,加入30 mL去离子水,在200 r/min条件下充分振荡30 min,混匀后经8 000 r/min离心10 min,0.45 μm的醋酸纤维膜过滤,最终得到样品浸出液,于-20℃条件下保存。采用TOC自动测定仪(TOC-VC PN,日本岛津)测定。

## 2.3 数据处理与分析

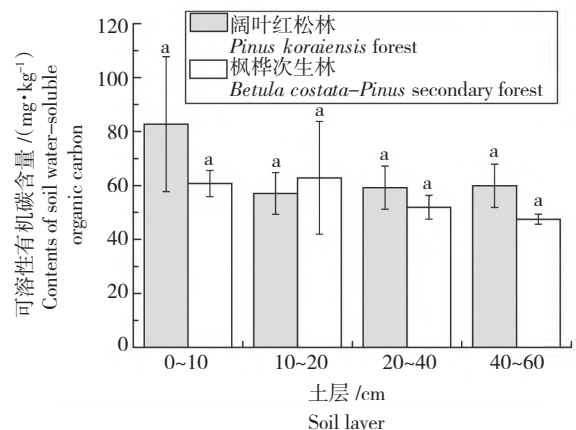
所有数据用Excel统计处理后,以SPSS11.5软件进行统计分析,图表中数据为平均值±标准差;采用单因素方差分析(one-way ANOVA)和多重比较法(Duncan)检验比较各参数间的差异,显著性水平与极显著性水平分别设定为 $P<0.05$ 和 $P<0.01$ 。为整体反映小兴安岭阔叶红松林土壤可溶性有机碳含量与土壤理化性质的相关关系,采用SPSS19,origin9.1等软件进行数据分析和制图,以土壤可溶性有机碳含量为自变量( $x$ ),理化性质因子为因变量( $y$ ),将3种演替系列的土壤有机碳及各组分含

量数据与其理化性质(土壤容重、土壤含水率、土壤毛管孔隙度、土壤饱和含水量、土壤酸碱度、土壤全氮、全磷、全钾)数据综合,进行相关性分析和显著性检验。达到 $P<0.05$ 显著性时,认为二者可能存在直接或者间接的相互影响,否则认为不存在影响。

## 3 结果与分析

### 3.1 中生演替系列土壤可溶性有机碳含量

中生演替系列土壤水溶性有机碳含量垂直结构为0~10、20~40、40~60 cm层,表现为阔叶红松群落大于次生群落。中生演替系列土壤水溶性有机碳含量各层无显著差异,阔叶红松林0~10 cm层平均值为(82.75±25.02) mg/kg,阔叶红松林其他土壤层与枫桦次生林各层土壤可溶性有机碳含量均从(47.48±1.85) mg/kg至(62.86±20.89) mg/kg。阔叶红松林与枫桦次生林土壤可溶性有机碳含量较高,群落相对稳定,如图1所示。



a 代表每层土壤有机碳含量差异不显著。

a represents that there is no significant difference in the organic carbon content of each soil layer.

图1 中生演替系列可溶性有机碳

Fig. 1 Soil water-soluble organic carbon in mesoserer series

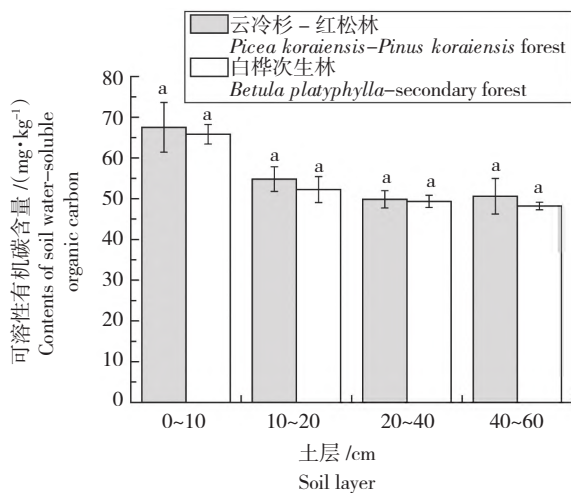
### 3.2 湿生演替系列土壤可溶性有机碳含量

湿生演替系列土壤可溶性有机碳含量为云冷杉红松林土壤可溶性有机碳积含量高于白桦次生林,差异不显著。湿生演替系列2种群落类型土壤可溶性有机碳含量均表现为0~10 cm层(67.52 mg/kg±6.10 mg/kg)高于其他层。顶级群落云冷杉红松林与白桦次生林10~20、20~40、40~60 cm层土壤可溶性有机碳含量相对较稳定,如图2所示。

### 3.3 旱生演替系列土壤可溶性有机碳含量

旱生演替系列土壤可溶性有机碳含量在0~10、20~40、40~60 cm层差异不显著。同一层土壤差异

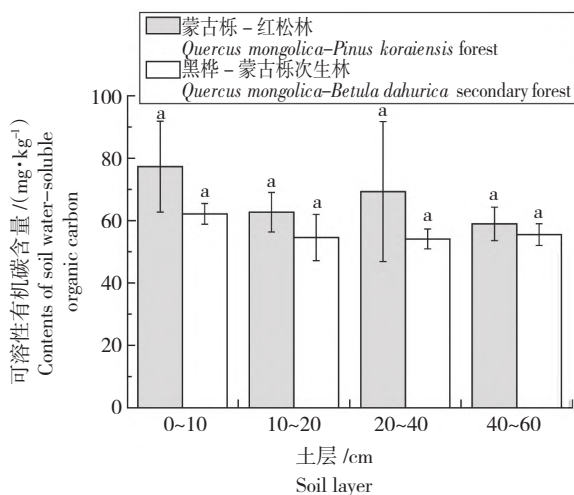
均不显著。早生演替系列 2 种群落类型顶级群落蒙古栎红松林大于黑桦蒙古栎次生林。蒙古栎红松林土壤可溶性有机碳含量出现不同层之间呈现高低波动式变化,在 0~10 cm 层最高,在 10~20 cm 层出现降低的趋势,20~40 cm 层开始升高,40~60 cm 层开始降低。黑桦蒙古栎次生林在 0~40 cm 层呈现随土壤层的加深而降低的趋势,在 40~60 cm 层有升高的趋势,说明白桦次生林土壤可溶性有机碳在深层有积累的趋势,如图 3 所示。



a 代表每层土壤有机碳含量差异不显著。  
a represents that there is no significant difference in the organic carbon content of each soil layer.

图 2 湿生演替系列可溶性有机碳

Fig. 2 Soil water-soluble organic carbon in hydroseres series



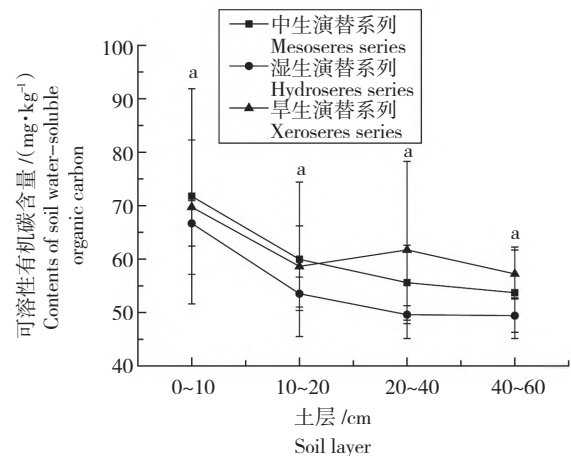
a 代表每层土壤有机碳含量差异不显著。  
a represents that there is no significant difference in the organic carbon content of each soil layer.

图 3 旱生演替系列可溶性有机碳

Fig. 3 Soil water-soluble organic carbon in xeroseres series

### 3.4 不同演替系列土壤可溶性有机碳含量差异

阔叶红松林不同演替系列可溶性有机碳含量各垂直结构间差异不显著。0~10 cm 层,土壤可溶性有机碳积累由大到小均表现为:中生演替系列(71.74 mg/kg±20.13 mg/kg)、早生演替系列(69.71 mg/kg±12.56 mg/kg)、湿生演替系列(66.67 mg/kg±4.25 mg/kg),差异不显著。10~20 cm 层土壤可溶性有机碳含量表现由大到小为:中生演替系列、早生演替系列、湿生演替系列,均值为(59.95±14.45)、(58.62±7.60)、(53.51±3.11) mg/kg,差异不显著。20~40、40~60 cm 层土壤可溶性有机碳由大到小表现为:早生演替系列、中生演替系列、湿生演替系列,3 个演替系列土壤可溶性有机碳含量差异不显著,如图 4 所示。



a 代表每层土壤有机碳含量差异不显著。  
a represents that there is no significant difference in the organic carbon content of each soil layer.

图 4 不同演替系列可溶性有机碳

Fig. 4 Soil water-soluble organic carbon in difference succession series

### 3.5 不同演替系列土壤可溶性有机碳含量影响因素分析

中生演替系列土壤可溶性有机碳含量与土壤毛管孔隙度正相关,与凋落物量呈显著正相关( $P < 0.05$ ),与土壤全氮、全磷、全钾含量呈显著负相关( $P < 0.05$ )。湿生演替系列土壤可溶性有机碳与土壤含水率正相关,与土壤毛管孔隙度和凋落物量呈正相关( $P < 0.05$ ),与土壤全氮含量呈显著负相关( $P < 0.05$ );旱生演替系列土壤可溶性有机碳与土壤毛管孔隙度、砂粒比、凋落物量、土壤全氮含量呈极显著负相关( $P < 0.01$ ),与土壤全磷含量和土壤全钾含量呈极显著正相关( $P < 0.01$ ),见表 2。

表2 不同演替系列土壤可溶性有机碳与土壤理化性质相关性分析

Tab. 2 Correlation analysis between soil water-soluble organic carbon and soil physio-chemical properties in different succession series

环境因子 Environment Factors	群落类型 Community type		
	中生演替系列 Mesoserres series	湿生演替系列 Hydroserres series	旱生演替系列 Xeroserres series
毛管孔隙度 Soil capillary porosity	0.408	0.550 *	-0.821 ***
砂粒比 Sand to particle ratio			-0.585 *
土壤含水率 Soil moisture content		0.462	
凋落物量 Litter	0.564 *	0.554 *	-0.951 ***
土壤全氮 Total N	-0.563 *	-0.666 *	-0.801 **
土壤全磷 Total P	-0.526 *		0.875 **
土壤全钾 Total K	-0.558 *		0.877 **

注: \* 相关性在 0.05 水平(双尾)时显著。 \*\* 相关性在 0.01 水平(双尾数)时显著。

Note: \* Correlation is significant at the 0.05 level (2-tailed).

\*\* Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).

#### 4 结论与讨论

目前国内关于土壤可溶性有机碳含量相关研究较多,结果存在一定的差异。本研究中生演替系列土壤可溶性有机碳积累呈波动式变化,湿生演替系列表现随土层的增厚而降低,旱生演替系列土壤可溶性有机碳与中生演替系列变化趋势相同。中生演替系列和湿生演替系列土壤可溶性有机碳积累在顶级群落和次生群落差异不显著。以往研究认为不同土地利用方式下农田土壤可溶性有机碳含量少,针叶林比阔叶林土壤可溶性有机碳含量高<sup>[24-25]</sup>,研究结果的差异可能与群落类型、群落演替历史以及物种与物种间的作用有关。在次生演替中,群落与环境结合在一起作为生态系统的一部分,在这个系统中,种群之间的相互作用以及群落之间的相互作用决定着发展的方向。在演替期间,群落的变化是一个梯度或群落生态群代替另一个群落生态群的结果,恢复至阔叶红松次生林。分布如此广泛的次生植被,构成了极其复杂的土壤碳库时空格局,进而影响土壤有机碳的含量。本研究土壤可溶性有机碳积累在土壤表层均由大到小表现为:中生演替系列、旱生演替系列、湿生演替系列,差异不显著,20~60 cm 层由大到小则为:旱生演替

系列、中生演替系列、湿生演替系列,差异显著,该结果与肖好燕等<sup>[26]</sup>研究一致,肖好燕等<sup>[26]</sup>认为不同林分土壤可溶性有机碳含量仅在表层土壤存在显著差异,在深层差异不显著。原因是浸提方式不同,本研究采用冷水浸提,碳氮分析仪测定,测定更精准。蒙古栎-红松林土壤可溶性有机碳含量出现波动式变化,在 0~10 cm 层最高,在 10~20 cm 层出现降低的趋势,20~40 cm 层开始升高,40~60 cm 层开始降低,结果与黄宗胜等<sup>[27]</sup>研究结果一致。湿生演替系列土壤可溶性有机碳含量最少,原因是湿生演替系列土壤含水量较大,土壤可溶性有机碳随土壤水分的运移进入水体环境。

不同演替系列土壤可溶性有机碳积累差异影响因素不同,中生演替系列土壤可溶性有机碳含量与凋落物量正相关,研究指出,森林土壤 DOC 主要来源于凋落物、根系分泌物。这是因为林分中的凋落物通过淋失、分解等过程向矿质土壤层提供大量有机碳和养分,并能吸收部分的植物凋落物的分解物,成为土壤可溶性有机碳的重要来源<sup>[28-29]</sup>。众多研究均得出,阔叶林及其年均凋落物数量比针叶林大<sup>[30-31]</sup>,中生演替系列凋落物由大量阔叶树和少量针叶树组成,中生演替系列复杂的凋落物组成可以提供给更多种类的微生物生存,而多种类的微生物死亡或者分解有机物产生的 DOC 就会更丰富。湿生演替系列影响因子是凋落物量和土壤全氮含量,与其他研究结果一致<sup>[24,32]</sup>。湿生演替系列土壤可溶性有机碳与土壤毛管孔隙度、土壤含水率和凋落物量呈正相关( $P < 0.05$ ),而旱生演替系列正相反,土壤可溶性有机碳与土壤毛管孔隙度、凋落物量、土壤全氮含量呈极显著负相关( $P < 0.01$ ),说明湿生演替系列向旱生演替进程中,毛管孔隙度和土壤含水率呈下降的趋势,而土壤容重、土壤 pH、土壤全氮、全磷、全钾含量呈上升的趋势,原因是云冷杉红松林向白桦次生林演替过程中,群落由针阔叶混交林逐渐演变为阔叶混交林,优势树种以白桦、椴树和春榆等喜光树种为主,其根系发达,使土壤结构性增强,导致土质疏松,土壤有机物质增加。

总之,不同演替系列土壤可溶性有机碳的含量及影响因子不同,可溶性有机碳含量和性质能反映土壤有机碳的稳定性,通过森林演替过程中可溶性有机碳积累趋势及维持机制研究,为实现人工调控森林经营,掌握碳库变化提供科学依据。

#### 【参 考 文 献】

[1] 周以良. 中国小兴安岭植被[M]. 北京: 科学出版

- 社,1994.
- ZHOU Y L. Vegetation of Xiao Hinggan Ling in China [M]. Beijing: Science Press, 1994.
- [2] 孙盛凯,刘新坤,朱旭毅,等. 土壤可溶性有机碳、氮的迁移淋溶规律研究进展[J]. 山西农业科学,2022,50(8):1158-1167.
- SUN S K, LIU X K, ZHU X Y, et al. Research progress on migration and leaching law of dissolved organic carbon and nitrogen in farmland[J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2022, 50(8): 1158-1167.
- [3] 孙超峰. 土壤可溶性有机碳研究进展[J]. 现代盐化工, 2022,49(1):25-27.
- SUN C F. Research progress of soil soluble organic carbon [J]. Modern Salt and Chemical Industry, 2022, 49(1): 25-27.
- [4] 张雅婷,郑裕雄,杨智杰,等. 不同林龄杉木人工林根际与非根际土可溶性有机碳的差异[J]. 亚热带资源与环境学报,2023,18(1):48-55.
- ZHANG Y T, ZHENG Y X, YANG Z J, et al. Differences of dissolved organic carbon in rhizosphere and bulk soils of Chinese fir plantations at different stand ages[J]. Journal of Subtropical Resources and Environment, 2023, 18(1): 48-55.
- [5] TOBIASOVA E. The effect of organic matter on the structure of soils of different land uses[J]. Soil and Tillage Research, 2011, 114(2): 183-192.
- [6] 简兴,翟晓钰,王喻,等. 土地利用方式改变对湿地土壤总有机碳与可溶性有机碳的影响[J]. 浙江农业学报, 2020,32(3):475-482.
- JIAN X, ZHAI X Y, WANG Y, et al. Influence of land use changes on soil total organic carbon and dissolved organic carbon in wetland [J]. Acta Agriculturae Zhejiangensis, 2020, 32(3): 475-482.
- [7] 昌维贵,赵晓燕,杨代强,等. 岷江上游干旱河谷不同土地利用类型土壤有机碳和水溶性有机碳特征分析[J]. 四川林勘设计,2011(3):20-23,36
- CHANG W G, ZHAO X Y, YANG D Q, et al. Characteristics of SOC and WDOC under different land use types at arid valley in the upper reaches of Minjiang River[J]. Sichuan Forestry Survey and Design, 2011(3):20-23,36.
- [8] 王明慧,王国兵,阮宏华,等. 苏北沿海不同土地利用方式土壤水溶性有机碳含量特征[J]. 生态学杂志,2012,31(5):1165-1170.
- WANG M H, WANG G B, RUAN H H, et al. Characteristics of soil water-soluble organic carbon under four different land use patterns in coastal area of northern Jiangsu[J]. Chinese Journal of Ecology, 2012, 31(5): 1165-1170.
- [9] 张仕吉,项文化,孙伟军,等. 湘中丘陵区不同土地利用方式土壤水溶性有机碳含量[J]. 生态学杂志,2014,33(8):2065-2071.
- ZHANG S J, XIANG W H, SUN W J, et al. Soil dissolved organic carbon concentration under different land-use patterns in a hilly area of central Hunan Province, China[J]. Chinese Journal of Ecology, 2014, 33(8): 2065-2071.
- [10] 何冬梅,王磊,冯育青,等. 不同土地利用类型对土壤可溶性有机碳的影响[J]. 南京林业大学学报(自然科学版),2016,40(6):15-19.
- HE D M, WANG L, FENG Y Q, et al. Effects of land use type on soil dissolved organic carbon in a land reclamation area from lake[J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2016, 40(6): 15-19.
- [11] 陈印平,夏江宝,曹建波,等. 黄河三角洲盐碱地不同混交林土壤可溶性有机碳氮的研究[J]. 水土保持通报,2013,33(5):87-91,104.
- CHEN Y P, XIA J B, CAO J B, et al. Dissolved organic carbon and nitrogen in different mixed forest stands in saline land of Yellow River Delta[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2013, 33(5): 87-91, 104.
- [12] 林伟盛,杨智杰,郭剑芬,等. 米楮天然林转变成杉木人工林后土壤可溶性有机碳的变化[J]. 亚热带资源与环境学报,2013,8(1):41-47.
- LIN W S, YANG Z J, GUO J F, et al. Changes of soil dissolved organic carbon after converting natural *Castanopsis carlesii* forest into *Cunninghamia lanceolata* plantation in subtropical China[J]. Journal of Subtropical Resources and Environment, 2013, 8(1): 41-47.
- [13] 魏春兰,马红亮,高人,等. 模拟氮沉降对森林土壤可溶性有机碳的影响[J]. 亚热带资源与环境学报, 2013,8(4):16-24.
- WEI C L, MA H L, GAO R, et al. Effects of nitrogen deposition on soluble organic carbon: a simulation study in subtropical forest soils[J]. Journal of Subtropical Resources and Environment, 2013, 8(4): 16-24.
- [14] 刘荣杰,李正才,王斌,等. 浙西北丘陵地区次生林与杉木林土壤水溶性有机碳季节动态[J]. 生态学杂志, 2013,32(6):1385-1390.
- LIU R J, LI Z C, WANG B, et al. Seasonal dynamics of soil water-soluble organic carbon in secondary forests and Chinese fir plantations in hilly region of northwest Zhejiang Province, East China[J]. Chinese Journal of Ecology, 2013, 32(6): 1385-1390.
- [15] 刘帅,陈玥希,孙辉,等. 西南亚高山-高山海拔梯度上森林土壤水溶性有机碳时间动态[J]. 西北林学院学报,2015,30(1):33-38.
- LIU S, CHEN Y X, SUN H, et al. Temporal dynamics of DOC in forest soil along an elevational gradient of subalpine-alpine in the southwestern China [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2015, 30(1): 33-38.
- [16] 杨青青,陈小花,余雪标,等. 滨海台地典型森林类型

- 土壤可溶性有机碳季节变化[J]. 热带作物学报, 2016, 37(1): 30-35.
- YANG Q Q, CHEN X H, YU X B, et al. Seasonal dynamic pattern of soil soluble organic carbon in typical vegetation types in coastal platform[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2016, 37(1): 30-35.
- [17] SALEEM M, FETZER I, HARMS H, et al. Trophic complexity in aqueous systems: bacterial species richness and protistan predation regulate dissolved organic carbon and dissolved total nitrogen removal[J]. Proceedings Biological Sciences, 2016, 283(1825): 20152724.
- [18] FELLMAN J B, SPENCER R G M, RAYMOND P A, et al. Dissolved organic carbon biolability decreases along with its modernization in fluvial networks in an ancient landscape[J]. Ecology, 2014, 95(9): 2622-2632.
- [19] 廖妹, 杨万勤, 彭艳, 等. 土壤动物对四川盆地四种树种凋落叶在不同物候时期可溶性碳和氮动态的影响[J]. 生态学杂志, 2016, 35(12): 3172-3182.
- LIAO S, YANG W Q, PENG Y, et al. Effects of soil fauna on the concentrations of dissolved organic carbon and total dissolved nitrogen in four types of foliar litters in different phenophases in Sichuan Basin[J]. Chinese Journal of Ecology, 2016, 35(12): 3172-3182.
- [20] KELLY P T, CRAIG N, SOLOMON C T, et al. Experimental whole-lake increase of dissolved organic carbon concentration produces unexpected increase in crustacean zooplankton density[J]. Global Change Biology, 2016, 22(8): 2766-2775.
- [21] 李庆康, 马克平. 植物群落演替过程中植物生理生态学特性及其主要环境因子的变化[J]. 植物生态学报, 2002, 26(S1): 9-19.
- LI Q K, MA K P. Advances in plant succession ecophysiology[J]. Acta Phytocologica Sinica, 2002, 26(S1): 9-19.
- [22] 柳敏, 宇万太, 姜子绍, 等. 土壤活性有机碳[J]. 生态学杂志, 2006, 25(11): 1412-1417.
- LIU M, YU W T, JIANG Z S, et al. A research review on soil active organic carbon[J]. Chinese Journal of Ecology, 2006, 25(11): 1412-1417.
- [23] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- BAO S D. Soil agricultural chemistry analysis[M]. 3rd ed. Beijing: China Agriculture Press, 2000.
- [24] 王明慧, 王国兵, 阮宏华, 等. 苏北沿海不同土地利用方式土壤水溶性有机碳含量特征[J]. 生态学杂志, 2012, 31(5): 1165-1170.
- WANG M H, WANG G B, RUAN H H, et al. Characteristics of soil water-soluble organic carbon under four different land use patterns in coastal area of northern Jiangsu[J]. Chinese Journal of Ecology, 2012, 31(5): 1165-1170.
- [25] 李龙波, 刘丛强, 涂成龙, 等. 喀斯特地区黄壤和石灰土剖面土壤水溶性有机碳和易氧化态碳的比较研究[J]. 地球环境学报, 2011, 2(4): 488-496.
- LI L B, LIU C Q, TU C L, et al. Labile organic carbon in limestone soil and yellow soil in Karst areas, Southwest China[J]. Journal of Earth Environment, 2011, 2(4): 488-496.
- [26] 肖好燕, 刘宝, 余再鹏, 等. 亚热带典型林分对表层和深层土壤可溶性有机碳、氮的影响[J]. 应用生态学报, 2016, 27(4): 1031-1038.
- XIAO H Y, LIU B, YU Z P, et al. Effects of forest types on soil dissolved organic carbon and nitrogen in surface and deep layers in subtropical region, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2016, 27(4): 1031-1038.
- [27] 黄宗胜, 喻理飞, 符裕红. 喀斯特森林植被自然恢复过程中土壤可矿化碳库特征[J]. 应用生态学报, 2012, 23(8): 2165-2170.
- HUANG Z S, YU L F, FU Y H. Characteristics of soil mineralizable carbon pool in natural restoration process of Karst forest vegetation[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2012, 23(8): 2165-2170.
- [28] KALBITZ K, SOLINGER S, PARK J H, et al. Controls on the dynamics of dissolved organic matter in soils: A review[J]. Soil Science, 2000, 165(4): 277-304.
- [29] CHANTIGNY M H. Dissolved and water-extractable organic matter in soils: a review on the influence of land use and management practices[J]. Geoderma, 2003, 113(3/4): 357-380.
- [30] 郭剑芬, 杨玉盛, 林鹏, 等. 木荷与杉木人工林枯枝落叶层溶解有机碳浓度及季节动态[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 2006, 45(2): 289-292.
- GUO J F, YANG Y S, LIN P, et al. Concentrations and seasonal dynamics of dissolved organic carbon in forest floors of two plantations in subtropical China[J]. Journal of Xiamen University (Natural Science), 2006, 45(2): 289-292.
- [31] 王清奎, 汪思龙, 冯宗炜. 杉木纯林与常绿阔叶林土壤活性有机碳库的比较[J]. 北京林业大学学报, 2006, 28(5): 1-6.
- WANG Q K, WANG S L. Comparison of active soil organic carbon pool between Chinese fir plantations and evergreen broadleaved forests[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2006, 28(5): 1-6.
- [32] 周焱, 徐宪根, 阮宏华, 等. 武夷山不同海拔土壤水溶性有机碳的含量特征[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2009, 33(4): 48-52.
- ZHOU Y, XU X G, RUAN H H, et al. Content character of WSOC among four vegetation types along an elevation gradients in Wuyi Mountain[J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2009, 33(4): 48-52.