

## 塔里木河中游不同生境胡杨林土壤有机碳及活性组分特征

马继龙<sup>1,2,3</sup>, 王新英<sup>2,3\*</sup>, 刘茂秀<sup>2,3</sup>, 史军辉<sup>2,3</sup>, 艾吉尔·阿不拉<sup>2,3</sup>

(1. 新疆农业大学 林学与风景园林学院, 新疆 乌鲁木齐 830052; 2. 新疆林科院造林治沙研究所, 新疆 乌鲁木齐 830063;  
3. 新疆塔里木河胡杨林生态系统国家定位观测研究站, 新疆 乌鲁木齐 830046)

**摘要:**以塔里木河中游不同生境典型胡杨河岸林为研究对象,分析旱生、中生和周期性水淹3种不同生境下0~100 cm土体中土壤有机碳及活性组分含量变化特征。结果表明,1)3种生境胡杨林SOC含量均值依次为中生(3.65 g/kg)>旱生(3.56 g/kg)>周期性水淹(3.35 g/kg);随土壤深度的增加,SOC含量均呈波动性下降趋势。2)3种生境土壤MBC含量均值依次为中生(408.93 mg/kg)>周期性水淹(289.80 mg/kg)>旱生(182.75 mg/kg),而EOC和DOC含量为周期性水淹(2.28 g/kg,104.39 mg/kg)>中生(1.92 g/kg,67.40 mg/kg)>旱生(1.89 g/kg,57.79 mg/kg);随土壤深度的增加,EOC含量总体增加后降低,DOC含量呈降低趋势;MBC在不同生境和土层间均差异显著( $P<0.05$ );EOC仅表层(0~10 cm)与下层(60~100 cm)差异显著( $P<0.05$ );中生生境DOC土层间差异显著( $P<0.05$ )。3)40~100 cm土层MBC/SOC、20~60 cm土层EOC/SOC、10~100 cm土层DOC/SOC在3种生境间差异显著( $P<0.05$ )。4)3种生境SOC与DOC均呈显著正相关( $r>0.58, n=15$ ),活性组分之间相关性在中生生境下最显著。综合以上分析,不同生境和土层对SOC及活性组分含量产生显著影响,旱生和周期性水淹生境SOC及活性组分含量在0~20 cm土层维持着较高水平,中生生境则在20~40 cm土层保持着较高的SOC活性组分分配比例,其土壤微生物活性最高,SOC转化速率较高。

**关键词:**胡杨河岸林;生境;土壤有机碳;活性组分

**中图分类号:**S792.11

**文献标志码:**A

**文章编号:**1001-7461(2024)02-0182-07

### Characteristics of Soil Organic Carbon and Active Fractions in *Populus euphratica* of Different Habitats in the Middle Reaches of the Tarim River

MA Ji-long<sup>1,2,3</sup>, WANG Xin-ying<sup>2,3\*</sup>, LIU Mao-xiu<sup>2,3</sup>, SHI Jun-hui<sup>2,3</sup>, Aijier Abula<sup>2,3</sup>

(1. College of Forestry and Landscape Architecture, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, Xinjiang, China;  
2. Research Institute of Afforestation and Desertification Prevention and Control, Xinjiang Academy of Forestry Sciences,  
Urumqi 830063, Xinjiang, China; 3. Xinjiang Poplar Riparian Forest Ecosystem National Positioning Observation and  
Research Station in Tarim River, Urumqi 830046, Xinjiang, China)

**Abstract:** Taken the typical *Populus euphratica* riparian forests in different habitats in the middle reaches of the Tarim River as the research objects, the variation characteristics of soil organic carbon (SOC) and active components in 0–100 cm soil layer in xerophytic, mesophytic and periodically flooded habitats were analyzed. The results showed that 1) The average SOC content of *P. euphratica* forests in the three habitats was mesophytic (3.65 g/kg)>xerophytic (3.56 g/kg)>periodic flooding (3.35 g/kg). The SOC content decreased with the increase of soil depth. 2) The average soil microbial biomass carbon (MBC) content in the three habitats was mesophytic (408.93 mg/kg)>periodically flooded (289.80 mg/kg)>xerophytic

收稿日期:2023-01-17 修回日期:2023-03-30

基金项目:自治区林草科技专项(XJLYKY-2022-01);自治区公益性科研院所基本科研业务费专项(KY2019047)。

第一作者:马继龙。研究方向:荒漠化防治。E-mail:mjl4ever888@163.com

\*通信作者:王新英,副研究员。研究方向:生态恢复与保护。E-mail:xjauwxy@126.com

(182.75 mg/kg). The readily oxidizable carbon (EOC) and dissolved organic carbon (DOC) contents were periodically flooded (2.28 g/kg, 104.39 mg/kg) > mesophytic (1.92 g/kg, 67.40 mg/kg) > xerophytic (1.89 g/kg, 57.79 mg/kg). With the increase of soil depth, EOC content increased and then decreased, while DOC content showed a decreasing trend. There were significant differences in MBC among different habitats and soil layers ( $P < 0.05$ ). Significant differences in EOC were found only between surface layer (0–10 cm) and the bottom layer (60–100 cm) soil ( $P < 0.05$ ). There were significant differences in DOC between soil layers in Mesozoic habitats ( $P < 0.05$ ). 3) MBC/SOC in 40–100 cm soil layer, EOC/SOC in 20–60 cm soil layer and DOC/SOC in 10–100 cm soil layer were significantly different among the three habitats ( $P < 0.05$ ). 4) There was a significantly positive correlation between SOC and DOC in the three habitats ( $r > 0.58, n = 15$ ), and the correlation between active components was the most significant in the Mesozoic habitats. Based on the above analysis, different habitats and soil layers have significant effects on SOC and active component contents. The xerophytic and periodically flooded habitats maintained a higher SOC and active component content in 0–20 cm soil layer, while the mesophytic habitats maintained a higher SOC allocation ratio in 20–40 cm soil layer, and the soil microbial activity is the highest. SOC conversion rate is high.

**Key words:** *Populus euphratica* riparian forest; habitat; soil organic carbon; active composition

森林土壤有机碳库占全球土壤有机碳库的70%~73%<sup>[1]</sup>,是全球碳循环的重要部分,其积累和分解直接影响着全球碳平衡,开展土壤碳循环研究对于准确评估全球碳收支具有重要意义<sup>[2]</sup>。森林土壤有机碳(soil organic carbon, SOC)主要贮存于林下枯落物和表层土壤中,其形成常和植被、气候等环境要素相关,与森林生态系统的发育具有密切关系<sup>[3]</sup>。因此,森林土壤有机碳的研究是生态学领域的热点问题。微生物生物量碳(microbial biomass carbon, MBC)、易氧化有机碳(easily oxidizable organic, EOC)和可溶性有机碳(dissolved organic carbon, DOC)是土壤有机碳库中最活跃的组成部分。其中,MBC对土壤环境变化极其敏感,密切影响着土壤碳库的变化,对维持碳平衡具有重要意义;EOC是土壤有机质变化动态的敏感性指标,可衡量土壤碳库的稳定性;DOC影响土壤中有有机碳累积和植物根系呼吸,对森林土壤固碳、土壤呼吸具有重要意义<sup>[4]</sup>。研究森林土壤有机碳及其活性组分含量的动态变化,对于认识森林土壤有机碳在陆地生态系统碳循环中的地位 and 作用具有重要意义<sup>[4]</sup>。

土壤水分是陆地生态系统中推动生产力和碳循环的最重要环境因素之一,直接或间接影响土壤有机质的形成、分解、迁移和固定<sup>[5]</sup>。适宜的土壤水分能够促进植被生长,提高生态系统的净初级生产力,增加有机物输入土壤的量<sup>[6]</sup>;过高或过低的水分条件则会减少有机物输入土壤的量且会抑制微生物活性,从而影响有机物质的矿化分解<sup>[7]</sup>。全球气候变化已成为不可争议的事实,它将导致干旱和水淹事件的频繁发生,最终影响森林土壤碳吸存<sup>[8]</sup>。有研

究发现,干旱土壤以及自然风干土壤再湿润后出现CO<sub>2</sub>排放量短时激增的现象<sup>[9]</sup>。受干旱环境背景控制的干旱区河岸林,与荒漠基质有着密切的生态过程联系,对区域环境要素改变和人类活动的扰动非常敏感,但由于不规则降水、干旱或者季节性洪水导致土壤含水量的变化,尤其是表层土壤不断经历着干湿交替过程,这些干湿交替过程会对土壤结构、微生物活性和有机碳的迁移与淋溶过程产生影响,终影响SOC的分布格局<sup>[10]</sup>。有学者对成熟森林土壤有机碳积累过程进行了有益的探讨<sup>[11]</sup>,而森林土壤有机碳对环境变化的动态响应仍不清楚。因此,掌握森林土壤有机碳含量及其活性组分的动态变化,可以了解其对环境变化的动态响应,以期更好应对当前大气CO<sub>2</sub>浓度升高等环境问题。

新疆塔里木河流域分布着世界上面积最大、保存最完整的原始胡杨林,受周期性洪水漫溢影响,在塔里木河两侧形成大面积、长时间、周期性的水淹生境,随着与塔河河岸距离的增加,胡杨林地下水位逐渐降低,地上植物生长受限,植被种类减少,形成了中生生境及早生生境。旱生、中生、周期性水淹3种典型生境使胡杨林生态系统成为在荒漠背景下分布着具有湿地和森林特征的特殊生态系统,具有独特的土壤碳水循环过程。目前,已有学者在塔里木河流域开展了胡杨林恢复对SOC的影响研究<sup>[12]</sup>,但针对胡杨林旱生、中生及周期性水淹3种不同生境SOC及活性组分特征变化的研究鲜有报道。因此,本研究选取土壤微生物生物量碳(MBC)、易氧化有机碳(EOC)和可溶性有机碳(DOC)作为表征土壤活性有机碳(SOC)的动态指标,分析塔里木河中游

3 种生境下胡杨林 SOC 及活性组分分布特征,明晰生境条件在维持土壤碳库平衡中的重要作用,为塔里木河流域胡杨林生态系统碳水循环研究提供理论依据,进而为塔里木河流域天然胡杨林保育提供技术支持。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于新疆塔里木胡杨国家级自然保护区(84°15′—85°30′E, 40°55′—41°15′N),属典型温带大陆性平原荒漠气候。区域干旱少雨,年均气温 10.7℃,年均降水量仅为 45.2 mm,蒸发强烈,潜在蒸发量高达 1 887~2 910 mm;平均大风 15 d,最大风速 12~24 m/s,时有干热风 and 沙尘暴发生。研究

区面积约 2.5 km<sup>2</sup>,林分郁闭度约为 0.52,林木生长良好。区域内优势种为胡杨(*Populus euphratica*),灌木主要有怪柳(*Tamarix chinensis*)铃铛刺(*Halimodendron halodendron*)、琵琶柴(*Reaumuria songonica*)等,草本主要有芨芨草(*Achnatherum splendens*)、蒿草(*Kobresia myosuroides*)等;土壤类型为胡杨林土。

### 1.2 样地设置

在研究区内垂直塔河(由远及近)选择旱生、中生、周期性水淹 3 种不同生境胡杨林区布设样地。每个生境内布设 3 块 100 m×100 m 的样地。旱生生境样地仅有乔木胡杨,中生生境样地分布有乔木胡杨和灌木怪柳,周期性水淹生境样地乔、灌、草均有分布,植被种类较多。不同生境样地基本情况见表 1。

表 1 不同生境样地基本情况

Table 1 Basic information on sample sites in different habitats

样地	距河道垂直距离/km	平均土壤含水量(%)	平均地下水位/m	主要植被情况	郁闭度/盖度	胡杨密度/(株·hm <sup>-2</sup> )	生长状况	有无周期性水淹
旱生	11.85	10.99	5.25	胡杨	0.32	345	冠层 1/3 有顶枯	无
中生	7.84	31.50	2.95	胡杨、怪柳	0.46/0.29	480	林冠完整,极少枯枝	无
周期性水淹	1.85	76.30	0.06	胡杨、怪柳、芦苇、铃铛刺、琵琶柴等	0.71/0.65	615	林冠完整,无枯枝	有,最深可达 1.8 m

### 1.3 样品采集

在 3 个不同生境样地内按照“品”字形布设 3 个正方形监测样方,共布设监测样方 27 个,样方规格为 30 m×30 m。于 9 月中旬在监测样方内按“S”形布设 5 个采样点,分 5 层(0~10、10~20、20~40、40~60、60~100 cm)采集土壤样品。将每个样方中同层土样混合为 1 个样,每份混合样约采集 1.0 kg。样品采集后去石块、粗根等杂质,立即带回实验室,一部分风干测定 SOC 与 EOC;另一部分过 2 mm 筛,于 4℃保存测定 MBC 和 DOC。

### 1.4 测定指标

SOC 采用重铬酸钾-外加热法测定<sup>[13]</sup>;DOC、EOC、MBC 分别采用冷水浸提法测定<sup>[14]</sup>、KMnO<sub>4</sub>氧化法测定<sup>[15]</sup>和氯仿熏蒸-K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>提取法<sup>[16]</sup>测定。

### 1.5 数据处理

运用 Microsoft Excel 2010 和 SPSS 19.0 进行数据处理,采用单因素方差分析和最小显著差异法,分析不同生境间 SOC 和活性组分及其比例的差异性,用 Person 相关系数表征不同生境 SOC 及活性组分间的相关关系,利用 Orgin 2021 软件制图。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同生境下土壤有机碳(SOC)分布特征

旱生生境 SOC 含量随土壤深度的增加呈波动性下降趋势,0~10 cm 土层含量最高,40~60 cm

土层出现小幅累积,60~100 cm 土层含量最低;中生生境随土壤深度的增加呈逐渐降低趋势,0~40 cm 土层含量显著高于 40~100 cm( $P<0.05$ );周期性水淹生境随土壤深度的增加呈增加后降低再增加的趋势,在 10~20 cm 和 60~100 cm 土层呈现 SOC 的累积,含量分别为 5.76 g/kg 和 3.32 g/kg,10~20 cm 土层 SOC 含量显著高于 20~60 cm 土层( $P<0.05$ )。

3 种生境 0~100 cm 土层 SOC 含量均值依次为中生(3.65 g/kg)>旱生(3.56 g/kg)>周期性水淹(3.35 g/kg)(表 2)。20~40 cm 土层中生生境 SOC 含量显著高于旱生生境和周期性水淹生境;40~60 cm 土层旱生生境显著高于中生生境和周期性水淹生境;60~100 cm 土层周期性水淹生境显著高于中生生境( $P<0.05$ )。综合以上分析,不同生境及土壤垂直层次对 SOC 含量影响显著。

### 2.2 不同生境下土壤有机碳活性组分分布特征

2.2.1 不同生境下土壤微生物生物量碳(MBC)分布特征 3 种生境 0~100 cm 土体 MBC 含量均值依次为中生(408.93 mg/kg)>周期性水淹(289.80 mg/kg)>旱生(182.75 mg/kg),中生生境不同土层 MBC 含量均高于旱生生境(图 1)。3 种生境胡杨林 0~100 cm 土体 MBC 含量随土壤深度的增加呈现出不同趋势,旱生和周期性水淹生境变化趋势均为降低后增加再降低,均以 0~10 cm 土层含量最

高;而中生生境则与之相反并以 20~40 cm 土层含量最高。早生生境不同土层间 MBC 含量无差异显著,而中生和周期性水淹生境差异显著( $P<0.05$ )。除 0~10 cm 土层外,其他土层不同生境间 MBC 含量差异显著( $P<0.05$ ),表明不同生境对 MBC 含量及分布有显著影响。

表 2 不同生境土壤有机碳含量

土层/cm	土壤有机碳含量/(g·kg <sup>-1</sup> )		
	早生生境	中生生境	周期性水淹生境
0~10	5.79±0.57 Aa	6.60±0.64 Aa	4.02±0.52 Bab
10~20	4.95±0.48 Aa	6.46±0.31 Aa	5.76±0.42 Aa
20~40	2.96±0.37 Bb	5.46±0.71 Aa	2.64±0.36 Bb
40~60	4.30±0.38 Aa	2.09±0.12 Bb	2.57±0.24 Bb
60~100	2.59±0.51 ABb	2.08±0.31 Bb	3.32±0.20 Aab

注:表中数据为(平均值±标准误差)。表中同列数字不同小写字母表示差异显著( $P<0.05$ ),同行数据不同大写字母表示差异显著( $P<0.05$ )。

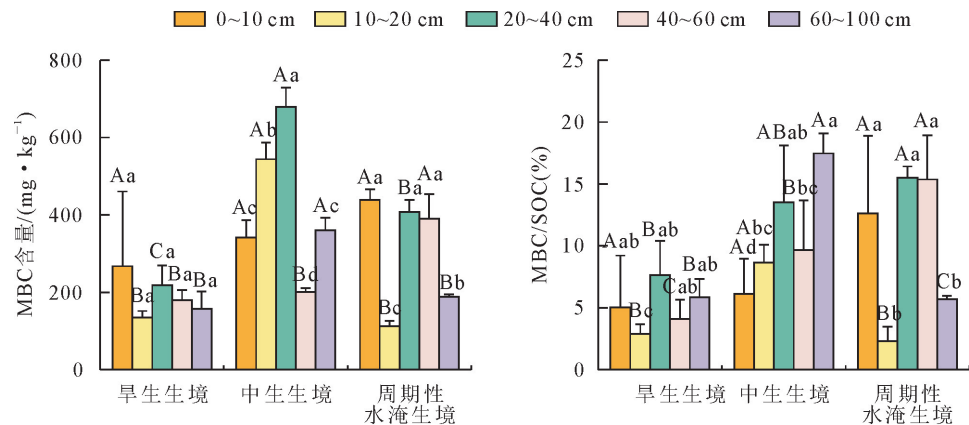
不同生境土层间 MBC 占 SOC 比例在 2.31%~17.48%。随土壤深度的增加,早生生境 MBC/SOC 总体呈“W”形变化,中生生境升高后在 20~40 cm 土层降低,而周期性水淹生境在 10~20 cm 和 60~100 cm 土层锐减,其他土层间差异小。3 种生境间 MBC/SOC 变化趋势与 MBC 含量变化趋势相同,早生和周期性水淹生境以 20~40 cm 土层最高,中生生境则以 60~100 cm 土层最高。同一生境不同土层间 MBC/SOC 差异显著,不同生境间 10~100 cm 土层 MBC/SOC 差异显著( $P<0.05$ ),中生生境平均 MBC/SOC 最高,达 13.11%。

2.2.2 不同生境土壤易氧化有机碳(EOC)分布特征 3 种生境 0~100 cm 土体 EOC 含量均值依次

为周期性水淹(2.28 g/kg)>中生(1.92 g/kg)>早生(1.89 g/kg)(图 2)。随土壤深度的增加早生和周期性水淹生境 EOC 含量先增加后降低,在 20~40 cm 土层达到最高,而中生生境则逐渐降低。总体而言,早生和周期性水淹生境各土层间 EOC 含量差异不显著,中生生境差异显著( $P<0.05$ )。0~20 cm 土层 EOC 含量均以中生生境最高,20~100 cm 土层 EOC 含量周期性水淹生境显著高于早生及中生生境( $P<0.05$ )。

随土壤深度的增加,早生生境 EOC/SOC 升高后在 40~60 cm 土层降低,中生和周期性水淹生境总体呈增加后降低趋势。早生生境 20~40、60~100 cm 土层 EOC/SOC 显著高于其他土层,中生生境 40~100 cm 土层显著高于 0~40 cm 土层,周期性水淹生境 20~60 cm 土层显著高于 0~20 cm 土层( $P<0.05$ )。20~60 cm 土层不同生境间 EOC/SOC 差异显著( $P<0.05$ ),其他土层不同生境间无显著差异。

2.2.3 不同生境土壤可溶性有机碳(DOC)分布特征 随土壤深度的增加,3 种生境 DOC 含量总体上均呈降低趋势,均以 0~10 cm 土层含量最高,3 种生境 0~100 cm 土体均值依次为周期性水淹(104.39 mg/kg)>中生(67.40 mg/kg)>早生(57.79 mg/kg)(图 3)。中生生境土层间 DOC 含量差异显著,早生生境 0~10 cm 显著高于其他土层,周期性水淹生境 0~20 cm 与 20~100 cm 土层差异显著( $P<0.05$ )。10~100 cm 土层 DOC 含量周期性水淹生境显著高于早生生境( $P<0.05$ )。



不同小写字母表示土层间差异显著( $P<0.05$ ),不同大写字母表示不同生境差异显著( $P<0.05$ )。下同。

图 1 不同生境土壤 MBC 分布特征及分配比例

Fig. 1 Distribution characteristics and allocation ratio of soil MBC in different habitats

不同生境土层间 DOC 占 SOC 比例在 1.00%~4.46%,随土壤深度的增加总体呈波动性下降。早生生境 0~10 cm 土层 DOC/SOC 显著高于其他土层,中生生境 0~10 cm 土层显著高于 20~40 cm 土层

( $P<0.05$ ),周期性水淹生境土层间差异不显著。周期性水淹生境 10~100 cm 土层 DOC/SOC 相对较高且显著高于其他生境( $P<0.05$ )。不同生境以周期性水淹生境平均 DOC/SOC 最高,可达 3.27%。



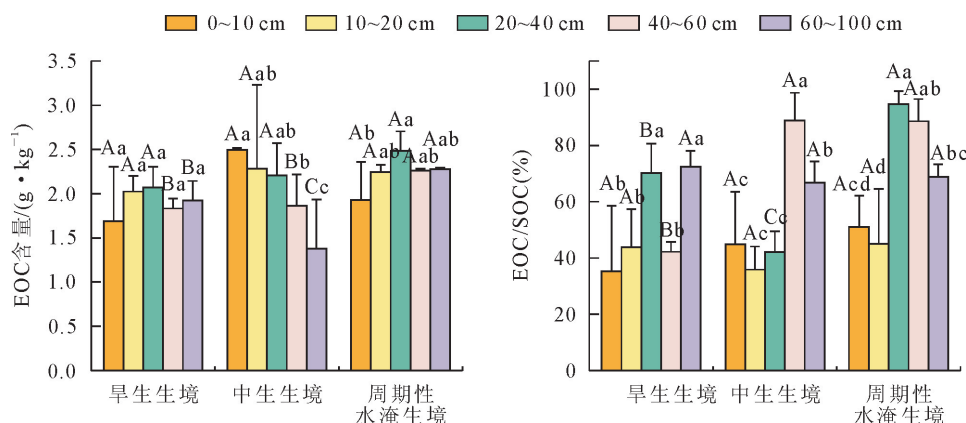


图2 不同生境土壤 EOC 分布特征及分配比例

Fig. 2 Distribution characteristics and allocation ratio of soil EOC in different habitats

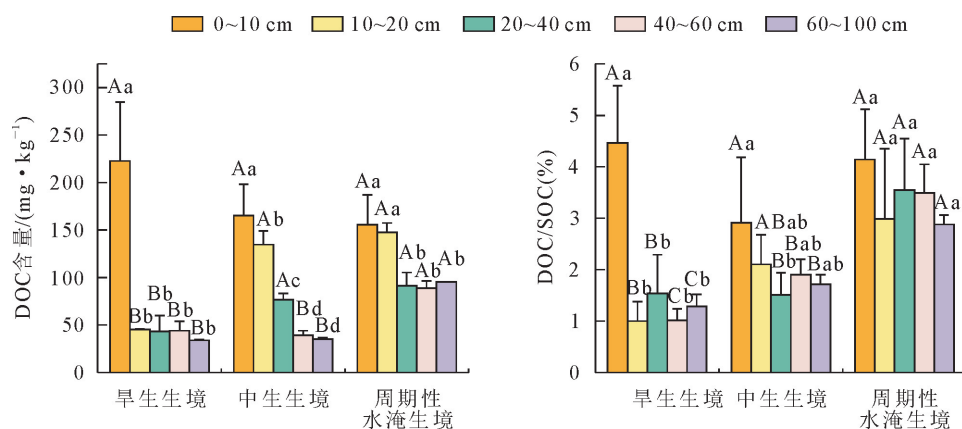


图3 不同生境土壤 DOC 分布特征及分配比例

Fig. 3 Distribution characteristics and allocation ratio of soil DOC in different habitats

### 2.3 不同生境土壤有机碳及活性组分相关性

3 种生境有机碳及活性组分间相关性表现差异,旱生及中生生境有机碳及活性组分间相关性表现强于周期性水淹生境(表 3)。旱生生境 SOC 与 DOC 呈显著正相关( $r=0.61$ );中生生境 SOC 与 EOC、DOC 呈极显著正相关( $r=0.76$ ;  $r=0.74$ ), EOC 与 DOC 极显著正相关( $r=0.71$ );周期性水淹生境仅 SOC 与 DOC 显著正相关( $r=0.58$ )。综合相关性分析,说明干旱和周期性洪水漫溢对土壤有机碳及活性组分分布影响显著。

## 3 讨论

### 3.1 不同生境土壤有机碳(SOC)分布特征

土壤水分条件是影响森林土壤碳库的关键因素<sup>[17]</sup>。本研究表明,3 种不同生境胡杨林 SOC 含量均值依次为中生>旱生>周期性水淹,水分对土壤有机碳含量影响显著。SOC 的主要来源是植物凋落物和动植物残体的分解、代谢<sup>[18]</sup>,随着郁闭度增大植被生产力提高,对土壤碳的贡献增强,土壤中 SOC 含量也随之升高。而本研究中周期性水淹生境虽然具有较高的郁闭度,但 SOC 含量却最低,一

表3 不同生境土壤 SOC 及活性组分相关性

Table 3 Correlation of SOC and active fractions in soils of different habitats

生境	组分	SOC	MBC	EOC	DOC
旱生	SOC	1	—	—	—
	MBC	0.266	1	—	—
	EOC	0.247	-0.482	1	—
	DOC	0.613 *	0.404	-0.172	1
中生	SOC	1	—	—	—
	MBC	0.457	1	—	—
	EOC	0.760 **	0.319	1	—
	DOC	0.742 **	0.249	0.714 *	1
周期性水淹	SOC	1	—	—	—
	MBC	-0.504	1	—	—
	EOC	0.010	-0.136	1	—
	DOC	0.582 *	-0.169	-0.295	1

注: \* 表示在 0.05 水平上显著相关, \*\* 表示在 0.01 水平上显著相关,  $n=15$ 。

方面可能是由于周期性洪水漫溢造成的水淹环境会导致一部分 SOC 流失到水体中,可使胡杨河岸林生态系统形成具有一定时长独特稳定的地下水碳库;另一方面周期性水淹生境由于积水原因会导致植物凋落物和动植物残体无法直接输入到土壤。本研究

中 SOC 含量在旱生和中生生境 0~10 cm 土层最高,并在 40~60 cm 土层有所增加;而周期性水淹生境则在 10~20 cm 土层最高(表 2),且在 60~100 cm 层次上 SOC 含量有所增加,一方面是由于胡杨在干旱生境中水分胁迫严重,造成树体顶枯及大量根系死亡进入土壤,而胡杨根系主要分布在 40~60 cm,引起了该层次 SOC 含量增加;另一方面可能是溶于水的 SOC 经过土壤淋溶作用往更深层次纵向沉积引起。相比于旱生和周期性水淹生境,中生生境 SOC 与活性组分间保持着较好的相关关系(表 3),干旱环境和水淹环境降低胡杨林土壤碳循环过程中 SOC 及活性组分间的分解转化,进而影响到不同土壤层次 SOC 及活性组分的含量及分布。

### 3.2 不同生境土壤有机碳活性组分分布特征

MBC 是植物营养物质的源和库,对环境变化非常敏感,是生态系统功能及土壤质量变化的早期预测指标<sup>[19]</sup>。干旱半干旱地区降水量是影响土壤微生物群落结构的主要因子,淹水条件也会导致微生物群落结构发生改变<sup>[20]</sup>,进而会影响到土壤中 MBC 含量及分布。本研究中,中生生境不同土层 MBC 含量均高于旱生和周期性水淹生境,表明干旱与水淹逆境引起微生物群落结构的改变,抑制微生物活性,影响微生物对土壤有机质的矿化分解,进而引起 MBC 含量下降,而中生生境土壤通气性良好,水分适宜,微生物活性高,使 MBC 含量较高。土壤微生物对生物化学循环的影响遍及整个土壤剖面<sup>[21]</sup>,研究表明 MBC 具有表聚性,随土壤深度增加而减少<sup>[22]</sup>。胡杨林土壤 MBC 含量在旱生和周期性水淹生境中也表现出强烈的表聚性,但中生生境则在 20~40 cm 土层出现了富集现象,因 MBC 含量与土壤含水量、土壤养分元素、地上地下生物量等众多因素密切相关,造成这种现象的原因还有待更进一步的研究。

EOC 是 SOC 中周转最快的组分,也是土壤有机质动态变化的敏感性指标<sup>[4]</sup>。本研究中,EOC 与 SOC 在中生生境中随土壤深度的增加变化趋势一致,呈极显著正相关关系,说明胡杨林土壤在未受干旱和水淹逆境影响下 SOC 与 EOC 的关系符合一般规律。本研究中,周期性水淹生境胡杨林土壤 0~100 cm 土体 EOC 含量高于旱生和旱生生境(图 2),主要是由于洪水漫溢造成土壤呈还原环境,导致氧的可获得性受到限制<sup>[24]</sup>,不利于 SOC 的氧化分解,而旱生和中生生境土壤呈氧化环境,更有利于 SOC 的分解转化。

DOC 是土壤微生物可直接利用的有机碳源,具有一定的溶解性,易分解矿化释放到大气或随水流

失<sup>[25]</sup>。土壤水分含量对 DOC 溶解产生了积极影响,本研究中周期性水淹生境 DOC 平均含量高于旱生和旱生生境,周期性水淹增加了土壤团聚体分散,提高了土壤有机碳的溶出,从而增加了 DOC 含量,这与 Wang 等<sup>[26]</sup>研究得出不同时间浸提淹水处理的 DOC 含量均高于好气处理结果一致。3 种生境胡杨林 DOC 含量随土壤深度的增加呈降低趋势,且上层土壤含量显著高于下层土壤,这主要是由于 DOC 与 SOC 呈显著正相关( $r > 0.58, n = 12$ ),SOC 含量显著影响了 DOC 的含量与分布。

### 3.3 不同生境土壤有机碳及活性组分分配比例

与 SOC 及其活性组分含量相比,有机碳活性组分分配比例更能反映土壤碳库的循环转化<sup>[27]</sup>。土壤 MBC 与 SOC 比值称为微生物熵,反映土壤中 MBC 的形成速率及有机碳库的周转变率<sup>[28]</sup>。本研究中,3 种生境 MBC/SOC 均值变化顺序依次为中生生境>周期性水淹生境>旱生生境,3 种生境间 MBC/SOC 变化趋势与 MBC 含量变化趋势相同,中生生境胡杨林土壤微生物熵最高,再次说明了中生生境土壤较早生和周期性水淹生境具有更高的微生物活性,形成 MBC 的速率及有机碳库的周转变率更快,这与侯翠翠等<sup>[29]</sup>研究得出极少水淹生境 MBC/SOC 高于周期性水淹生境的结果一致。

EOC/SOC 可以表明养分的循环速率以及 SOC 的活性<sup>[30]</sup>。本研究中,3 种生境 SOC 及活性组分分配比例中,以 EOC 所占 SOC 的比重最大,EOC/SOC 及 DOC/SOC 均值变化顺序依次为周期性水淹>中>旱生,这与崔东等<sup>[31]</sup>研究得出季节性水淹生境 DOC 占 SOC 的比例高于极少水淹生境结果一致,说明周期性短时间的淹水对土壤 SOC 转化分解方面具有一定的促进作用。

## 4 结论

3 种生境下,中生生境 SOC 含量高于旱生和周期性水淹生境,周期性水淹生境因淋溶作用 SOC 向深层累积;中生生境 MBC 含量显著高于旱生和周期性淹水生境,表现出强烈的表聚性;周期性水淹生境更利于 EOC 的累积;3 种生境 DOC 含量随土壤深度的增加均呈降低趋势;中生生境较早生和周期性水淹生境而言,具有较高的土壤微生物活性及有机碳的转化率;3 种生境 SOC 与 DOC 显著正相关,中生生境下 SOC、EOC、DOC 三者间显著正相关。因周期性洪水漫溢的影响,可使胡杨林生态系统形成具有一定时长独特稳定的地上水体碳库,溶解于水体中的碳如何参与碳循环过程有待进一步研究,进而为塔里木河流域胡杨河岸林土壤碳循环研究提

供一定基础理论支撑。

## 参考文献:

- [1] SIX J. Measuring and understanding carbon storage in afforested soils by physical fractionation[J]. Soil Science Society of America Journal, 2002, 66(6): 1981-1987.
- [2] 霍海霞, 张建国, 马爱生, 等. 干旱荒漠区土壤碳循环研究进展与展望[J]. 西北林学院学报, 2018, 33(1): 98-104.  
HUO H X, ZHANG J G, MA A S, *et al.* Progress and prospects of soil carbon cycle in arid deserts[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2018, 33(1): 98-104. (in Chinese)
- [3] DIMA C. Effects of nitrogen enrichment on belowground communities in grassland: relative role of soil nitrogen availability vs. soil acidification[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2015, 89: 99-108.
- [4] 张哲, 王邵军, 李雾航, 等. 土壤易氧化有机碳对西双版纳热带森林群落演替的响应[J]. 生态学报, 2019, 39(17): 6257-6263.
- [5] 王强, 韩欢, 耿增超, 等. 秦岭辛家山典型植被类型土壤活性有机碳分布特征[J]. 西北林学院学报, 2018, 33(2): 35-42.  
WANG Q, HAN H, GENG Z C, *et al.* Distribution characteristics of active soil organic carbon under typical vegetation types in Xinjiashan forest in Qinling Mountains [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2018, 33(2): 35-42. (in Chinese)
- [6] LAL R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security[J]. Science, 2004, 304: 1623-1627.
- [7] SALA O, PARTON W, JOYCE L, *et al.* Primary production of the central grassland region of the United States[J]. Ecology, 1988, 69(1): 40-45.
- [8] BOWDEN R D, NEWKIRK K M, RULLO G M. Carbon dioxide and methane fluxes by a forest soil under laboratory-controlled moisture and temperature conditions[J]. Soil Biology & Biochemistry, 1998, 30(12): 1591-1597.
- [9] SIMARD S M, AUSTIN M E. The role of mycorrhizas in forest soil stability with climate change[J]. Climate Change and Variability, 2010, 17: 275-276.
- [10] FIERER N, SCHIMEL J P. Effects of drying-rewetting frequency on soil carbon and nitrogen transformations[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2002, 34(6): 777-787.
- [11] 张雪雯, 莫熠, 张博雅, 等. 干湿交替及凋落物对若尔盖泥炭土可溶性有机碳的影响[J]. 湿地科学, 2014, 12(2): 134-140.
- [12] MO J N, ZHANG W, ZHU W X, *et al.* Nitrogen addition reduces soil respiration in a mature tropical forest in Southern China[J]. Global Change Biology, 2008, 14(2).
- [13] 杨玉海, 李卫红, 李慧敏, 等. 塔里木河下游退化生态系统恢复对土壤有机碳的影响[J]. 土壤通报, 2010, 41(4): 855-859.
- [14] 孙彩丽. 陕北退耕还林(草)的土壤固碳效应及对碳组分的影响[D]. 杨陵: 西北农林科技大学, 2014.
- [15] LIANG B C. Management-induced change in labile soil organic matter under continuous corn in eastern Canadian soils[J]. Biology and Fertility of Soils, 1998, 26(2): 88-94.
- [16] BLAIR G. Soil carbon fractions based on their degree of oxidation, and the development of a carbon management index for agricultural system[J]. Aust. J. Agr. Res., 1995, 46.
- [17] WU J F, SYERS J K. Fumigation-extraction method for the measurement of soil microbial biomass's [J]. J. Soil Biol & Biochem., 1994, 26(1): 117-125.
- [18] SIERRA C A, TRUMBORE S E, DAVIDSON E A, *et al.* Sensitivity of decomposition rates of soil organic matter with respect to simultaneous changes in temperature and moisture [J]. Journal of Advances in Modeling Earth Systems, 2015, 7(1): 335-356.
- [19] JOHN L. Let the soil work for us[J]. Bioscience, 1997(5): 321-322.
- [20] XU X F, THORNTON P E, POST W M. A global analysis of soil microbial biomass carbon, nitrogen and phosphorus in terrestrial ecosystems [J]. Global Ecology and Biogeography, 2013, 22(6): 737-749.
- [21] 张敬智, 马超, 郝建. 淹水和好气条件下东北稻田黑土有机碳矿化和微生物群落演变规律[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(6): 1160-1166.
- [22] BUSS H L, BRUNS M A, SCHULTZ M J, *et al.* The coupling of biological iron cycling and mineral weathering during saprolite formation, Luquillo Mountains, Puerto Rico [J]. Geobiology, 2005, 3(4): 247-260.
- [23] 彭晓茜, 王妮. 内蒙古温带草原土壤微生物生物量碳的空间分布及驱动因素[J]. 微生物学通报, 2016, 43(9): 1918-1930.
- [24] 曾从盛, 钟春棋, 全川, 等. 土地利用变化对闽江河口湿地表层土壤有机碳含量及其活性的影响[J]. 水土保持学报, 2008(5): 125-129.
- [25] SHAO X X, YANG W Y, WU M. Seasonal dynamics of soil labile organic carbon and enzyme activities in relation to vegetation types in Hangzhou Bay tidal flat wetland [J]. PLoS one, 2015, 10(11).
- [26] WANG F L, BETTANY J R. Influence of freeze-thaw and flooding on the loss of soluble organic carbon and carbon dioxide from soil [J]. Journal of Environmental Quality, 1993, 22(4).
- [27] 张耀鸿, 王艳玲, 李仁英, 等. 互花米草入侵对滩涂土壤活性有机碳组分的影响[J]. 土壤通报, 2012, 43(1): 102-106.
- [28] 张金波, 宋长春. 土地利用方式对土壤碳库影响的敏感性评价指标[J]. 生态环境, 2003(4): 500-504.
- [29] 侯翠翠, 宋长春, 李英臣, 等. 不同水分条件下小叶章湿地表层土壤有机碳及活性有机碳组分季节动态[J]. 环境科学, 2011, 32(1): 290-297.
- [30] 朱志建, 姜培坤, 徐秋芳. 不同森林植被下土壤微生物量碳和易氧化态碳的比较[J]. 林业科学研究, 2006(4): 523-526.
- [31] 崔东, 闫俊杰, 刘海军, 等. 伊犁河谷不同类型湿地土壤活性有机碳组分及其含量差异[J]. 生态学报, 2019, 38(7): 2087-2093.