

DOI: 10.5846/stxb201811262573

于伟伟, 陈媛媛, 杨宁, 崔博文, 王效科. 硬化地表对油松和白蜡树下非根围及根围土壤微生物量碳氮的影响. 生态学报, 2020, 40(4): 1376-1382.  
Yu W W, Chen Y Y, Yang N, Cui B W, Wang X K. Effects of pavements on soil microbial biomass carbon and nitrogen in non-rhizosphere and rhizosphere of *Pinus tabulaeformis* and *Fraxinus chinensis*. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(4): 1376-1382.

## 硬化地表对油松和白蜡树下非根围及根围土壤微生物量碳氮的影响

于伟伟<sup>1,2</sup>, 陈媛媛<sup>1</sup>, 杨宁<sup>1</sup>, 崔博文<sup>1,2</sup>, 王效科<sup>1,2,3,\*</sup>

1 中国科学院生态环境研究中心, 城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085

2 中国科学院大学, 北京 100049

3 北京城市生态系统研究站, 北京 100085

**摘要:**硬化地表是城市化发展的重要特征, 为了明确硬化地表下土壤环境的变化, 以北京典型绿化树油松和白蜡为试验材料, 设置透水硬化地表(PP)、不透水硬化地表(IPP)和自然地表(Ctr)3个水平的地表类型, 探讨硬化地表对非根围和根围土壤微生物量碳(MBC)、氮(MBN)的影响。结果表明, 与对照(Ctr)相比, PP和IPP显著降低了油松和白蜡树下非根围土壤MBC、MBN、MBC/OC(微生物量碳/有机碳)和MBN/TN(微生物量氮/全氮)( $P < 0.05$ ), 并显著降低了油松下根围土壤MBN/TN( $P < 0.05$ ); PP显著降低了白蜡树下根围土壤MBN、MBC/OC、MBN/TN和油松下根围土壤MBC( $P < 0.05$ )。硬化地表引起的土壤MBC、MBN的变化与土壤全碳、全氮、有机碳的变化显著正相关( $P < 0.05$ ), MBN的变化与含水量呈显著负相关( $P < 0.05$ )。可见, 硬化地表不利于土壤微生物的生长, 并且在非根围土壤中表现更为明显, 这种不利影响将可能进一步影响城市绿地的养分循环、树木生境和生态系统服务功能。

**关键词:**硬化地表; 微生物量碳; 微生物量氮; 非根围; 根围; 油松; 白蜡树

## Effects of pavements on soil microbial biomass carbon and nitrogen in non-rhizosphere and rhizosphere of *Pinus tabulaeformis* and *Fraxinus chinensis*

YU Weiwei<sup>1,2</sup>, CHEN Yuanyuan<sup>1</sup>, YANG Ning<sup>1</sup>, CUI Bowen<sup>1,2</sup>, WANG Xiaoke<sup>1,2,3,\*</sup>

1 State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3 Beijing Urban Ecosystem Research Station, Beijing 100085, China

**Abstract:** The objective of this study is to evaluate effects of urban pavements on soil microbial biomass in different trees. In-situ simulation test was arranged in the suburb of Changping District, Beijing, China. Pine (*Pinus tabulaeformis*) and ash (*Fraxinus chinensis*) were planted at the 1.0 m × 1.0 m density in three different treatment plots: pervious brick pavement (PP) with a permeability coefficient of more than 0.4 mm/s, impervious brick pavement (IPP) with a permeability coefficient near zero, and non-pavement for control (Ctr). Topsoil (0—20 cm depth) which includes rhizosphere (tree pool) and non-rhizosphere (0.7 m away from trunk) were analyzed by the chloroform fumigation and extraction methods for soil microbial biomass carbon and nitrogen. The results showed the following: compared to Ctr, the soil microbial biomass carbon (MBC), microbial biomass nitrogen (MBN), MBC/OC (organic carbon) and MBN/TN (total nitrogen) in non-rhizosphere of pine and ash and MBN/TN in rhizosphere of pine were significantly decreased by PP

基金项目: 国家自然科学基金项目(41571053, 71533005); 国家重点研发计划(2016YFC0503004)

收稿日期: 2018-11-26; 网络出版日期: 2019-11-20

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wangxk@cees.ac.cn

and IPP treatments. The MBN, MBC/OC, and MBN/TN in rhizosphere of ash and MBC in rhizosphere of pine were reduced by PP treatment. The soil MBC and MBN which were changed by pavements were positively correlated to soil total carbon (TC), TN and OC, and the soil MBN was negatively correlated to soil moisture. In general, pavements adversely affect the soil microorganisms, especially in non-rhizosphere, which may further affect the nutrient cycle, tree habitat, and ecosystem service of urban green space at a large scale.

**Key Words:** pavement; MBC; MBN; non-rhizosphere; rhizosphere; *Pinus tabulaeformis*; *Fraxinus chinensis*

硬化地表是城市化的重要标志<sup>[1]</sup>。城市地表硬化是指利用地面砖、石材砖、柏油、水泥、混凝土、沥青等覆盖自然土壤,便于行人和车辆通行的现象<sup>[2]</sup>,主要分为透水硬化(透水混凝土砖块路面,人行道等)和不透水硬化(混凝土建筑,柏油路面等)两种形式<sup>[3]</sup>。硬化地表在为城市提供干净整洁的环境的同时,也产生一系列负面影响,如减少雨水下渗形成地表径流<sup>[4]</sup>,增加地表温度<sup>[5]</sup>,改变土壤和植物的蒸发<sup>[6]</sup>,阻止土气交换<sup>[7]</sup>等。为了缓解硬化地表给城市带来的不利影响和城市绿地面积不足,城市绿化树木已经栽种到硬化地表上<sup>[8]</sup>,然而硬化地表会抑制树木的生长<sup>[6-9]</sup>,降低植物根茎生物量<sup>[10]</sup>。不同类型硬化地表对树木生长的影响存在差异,有研究认为透水硬化地表上植物生长优于不透水硬化地表<sup>[11-12]</sup>,也有研究认为两种类型硬化地表对树种生长影响无显著差异<sup>[13]</sup>。可能由于不同树种对硬化地表的响应存在差异<sup>[14]</sup>。

土壤微生物是生物地球化学循环的驱动者,是生态系统功能和服务的重要支撑者。土壤微生物量能够直接或间接反映土壤肥力状况,与碳、氮等养分循环密切相关,对土壤养分转化和供应起重要作用<sup>[15]</sup>。城市化过程中土地覆盖方式的变化会显著影响碳储存的数量、理化性状以及空间分布<sup>[16]</sup>,进而影响土壤微生物量。硬化地表从多方面影响土壤性质,如增加土壤的紧实度<sup>[17]</sup>、改变土壤理化特性<sup>[18-19]</sup>、提高土壤温度、降低土壤含水量<sup>[20]</sup>、引起土壤碳流失<sup>[21]</sup>、阻碍凋落物进入土壤、造成土壤微生物量碳、氮含量降低<sup>[18, 22-23]</sup>。与不透水硬化相比,透水硬化能在一定程度上缓解硬化地表对土壤微生物的消极影响<sup>[23]</sup>。Francini 等<sup>[24]</sup>发现不同地表植被及树种对土壤微生物的影响不同。已有研究均为硬化地表对树木生长和非根围土壤微生物的研究,硬化地表对不同树种非根围和根围土壤微生物量碳、氮(MBC, Microbial Biomass Carbon; MBN, Microbial Biomass Nitrogen)影响的研究还较少见报道。非根围及根围土壤微生物对硬化地表响应的差异并不清楚,致使硬化地表对城市土壤微生物地下过程的影响认识不全面。

本研究原位模拟透水和不透水两种类型硬化地表,并设置自然地表为对照,选取 5 年树龄的常绿针叶树油松(*Pinus tabulaeformis*)和落叶阔叶树白蜡(*Fraxinus chinensis*)林中非根围(距离树干 0.7 m 左右)和根围(20 × 20 cm 的树池内)0—20 cm 的表层土,采用氯仿熏蒸浸提法分析土壤 MBC、MBN,探讨不同类型硬化地表对土壤微生物量的影响及不同树种非根围和根围土壤微生物的响应,为全面评价城市绿地生态系统提供数据支撑和科学依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 试验地概况

试验地设在北京市昌平区马池口镇丈头村种子管理站(40°12'N, 116°08'E),属暖温带大陆性季风气候,四季分明,年平均降水量 550.3 mm,集中于夏季的 6—8 月份,年均气温 12.1 °C。土壤类型为潮土,质地为砂壤。硬化地表于 2012 年 4 月铺设,试验开始前土壤基本理化性质为:有机质含量 16.4 g/kg,全氮 0.9 g/kg,速效磷 38.1 mg/kg,速效钾 102.1 mg/kg,土壤 pH 值为 8.3。

### 1.2 试验设计

试验地于 2012 年 4 月 12 日铺设,设置对照、透水地表和不透水地表三个处理,以自然地表作为对照,渗透率超过 0.4 mm/s 的透水砖铺设地面作为透水地表,渗透率几乎为 0 的不透水砖铺设地面作为不透水地表。每个处理 3 个重复,分别种植油松和白蜡,每个重复种植树木 23 棵,分 5 行,行距和株距均为 1 m。硬化地表

上树根周围留有 20 cm×20 cm 的方形树坑。试验所用砖的大小为 20 cm×10 cm×6 cm(长×宽×高)。供试油松和白蜡选用 1 年生幼苗,于 2012 年 4 月 16 日移栽。

### 1.3 样品的采集与测定

于 2015 年 9 月 9 日用直径 2.5 cm 的土钻采集 0—20 cm 土层的土壤样品。每个小区按“Z”形随机采用 5 点混样的方法取距离树干 0.7 m 左右的土样作为非根围土,取树池内的土样作为根围土,硬化地表撬开砖,取完土后将砖复原,不透水硬化处理用水泥密封砖缝。样品带回实验室过 2 mm 筛后风干并分二份,一份放在 4 °C 冰箱用于微生物碳、氮的测定,另一份风干用于土壤理化性状的测定。

### 1.4 分析方法

微生物量碳、氮的测定采用氯仿熏蒸-浸提-非色散红外吸收法:称取两份鲜土(25 g),一份用氯仿熏蒸 24 h,另一份未熏蒸;用 100 mL 0.5 mol/L 的 K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 溶液萃取,在摇床上震荡 30 min,用 Whatman 滤纸过滤;滤液用总有机碳(氮)分析仪(Elementar, Liqui TOC II, Germany)测定<sup>[25]</sup>。

土壤微生物量碳(C)和氮(N)计算:

$$C = C_F - C_{UF} / K \quad (1)$$

$$N = N_F - N_{UF} / K \quad (2)$$

式中,C<sub>F</sub>和 N<sub>F</sub>分别为熏蒸土壤浸提液的碳和氮含量,C<sub>UF</sub>和 N<sub>UF</sub>分别为未熏蒸土壤浸提液中的碳和氮含量,K 为熏蒸提取法的转换系数,取值 0.45。

土壤理化性状的测定参见土壤农化分析<sup>[15]</sup>,土壤全碳、全氮和有机碳用元素分析仪测定<sup>[26]</sup>,土壤 pH 值(土水比 1: 5)用 pH 计测定<sup>[27]</sup>测定。

### 1.5 数据处理

运用 SPSS 22.0 对数据进行统计分析。不同硬化处理间土壤微生物量碳的差异采用 One-Way ANOVA 进行显著性分析,非根围和根围之间采用非配对两样本平均值显著差异检验。用 Origin Pro 2016 制图。

## 2 结果与分析

### 2.1 硬化地表对不同树种土壤理化性状的影响

硬化地表对不同树种下土壤理化性状有不同程度的影响(表 1)。与 Ctr 相比,IPP 使油松非根围和根围土壤含水量均显著降低 11%( $P < 0.05$ ),使白蜡根围土含水量显著降低 27%( $P < 0.05$ )。与 PP 相比,IPP 使油松非根围土壤全碳、全氮和 C/N 分别显著升高 18%、27%和显著降低 16%( $P < 0.05$ ),使根围土壤含水量显著降低 11%( $P < 0.05$ );使白蜡根围土壤含水量和全碳分别显著降低 33%和升高 12%( $P < 0.05$ )。

表 1 不同硬化处理下土壤理化性质

Table 1 Physical and chemical characterization of soils in different pavements

树种 Tree species	位置 Location	处理 Treatments	含水量/% Moisture	全碳/(g/kg) Total carbon	全氮/(g/kg) Total nitrogen	有机碳/(g/kg) Organic carbon	C/N
油松	非根围	自然地表 Ctr	14.67±0.882a	15.99±0.915ab	0.900±0.087ab	8.407±0.398a	9.44±0.743ab
		透水 PP	13.67±0.333ab	14.057±0.367b	0.760±0.040b	7.447±0.568a	9.77±0.407a
		不透水 IPP	13.00±0.577b	16.530±0.436a	0.963±0.042a	7.853±0.288a	8.217±0.626b
	根围	自然地表 Ctr	15.00±0a	16.173±0.678a	0.957±0.058a	8.803±0.347a	9.223±0.3a
		透水 PP	15.00±0.577a	15.473±1.007a	0.927±0.103a	8.343±0.702a	9.07±0.272a
		不透水 IPP	13.33±0.333b	17.537±0.847a	1.087±0.026a	8.463±0.350a	7.787±0.295a
白蜡	非根围	自然地表 Ctr	11.27±0.433a	15.797±0.298a	0.943±0.035a	8.513±1.212a	8.513±1.212a
		透水 PP	13.71±1.401a	15.047±0.032a	0.857±0.012a	8.220±0.113a	8.22±0.113a
		不透水 IPP	11.53±1.318a	15.993±0.912a	0.923±0.112a	8.113±0.775a	8.113±0.775a
	根围	自然地表 Ctr	13.92±0.351a	16.627±0.148ab	1.000±0.015a	9.237±0.943a	9.237±0.943a
		透水 PP	15.2±0.84a	15.497±0.288b	0.953±0.037a	9.877±0.463a	9.877±0.463a
		不透水 IPP	10.23±0.472b	17.320±0.282a	1.033±0.043a	10.27±0.711a	10.27±0.711a

同列不同字母表示处理间差异显著( $P < 0.05$ )

## 2.2 硬化地表对不同树种微生物量碳的影响

土壤 MBC 在不同树种、不同位置均存在显著差异,树种和处理以及树种和位置的交互作用对土壤 MBC 均有显著影响(图 1)。与 Ctr 相比,PP 和 IPP 使油松非根围土壤 MBC 分别显著降低 74%和 83% ( $P < 0.05$ ),使白蜡非根围土壤 MBC 分别显著降低 72%和 69% ( $P < 0.05$ );PP 使白蜡根围土壤 MBC 显著降低 52% ( $P < 0.05$ )。与根围土相比,油松非根围土壤 MBC 在 PP 和 IPP 下分别显著降低 75%和 87% ( $P < 0.05$ );白蜡土壤 MBC 在 IPP 下显著降低 76% ( $P < 0.05$ )。可见,硬化地表降低非根围土壤 MBC。

## 2.3 硬化地表对不同树种微生物量氮的影响

土壤 MBN 在不同树种、不同位置均存在显著差异,位置和处理以及位置和树种的交互作用对土壤 MBN 均有显著影响,树种、处理以及位置三者的交互作用对土壤微生物量氮也有显著影响(图 1)。与 Ctr 相比,PP 和 IPP 使油松非根围土壤 MBN 分别显著降低 67%和 80% ( $P < 0.05$ ),使白蜡非根围土壤 MBN 分别显著降低 64%和 64% ( $P < 0.05$ );使油松根围土壤 MBN 分别显著降低 84%和 37% ( $P < 0.05$ )。与 PP 相比,IPP 使油松根围土壤 MBN 显著升高 43% ( $P < 0.05$ ),使白蜡根围土壤 MBN 显著升高 38% ( $P < 0.05$ )。与根围土相比,油松和白蜡非根围土壤 MBN 在 IPP 下分别显著降低 74%和 78% ( $P < 0.05$ )。

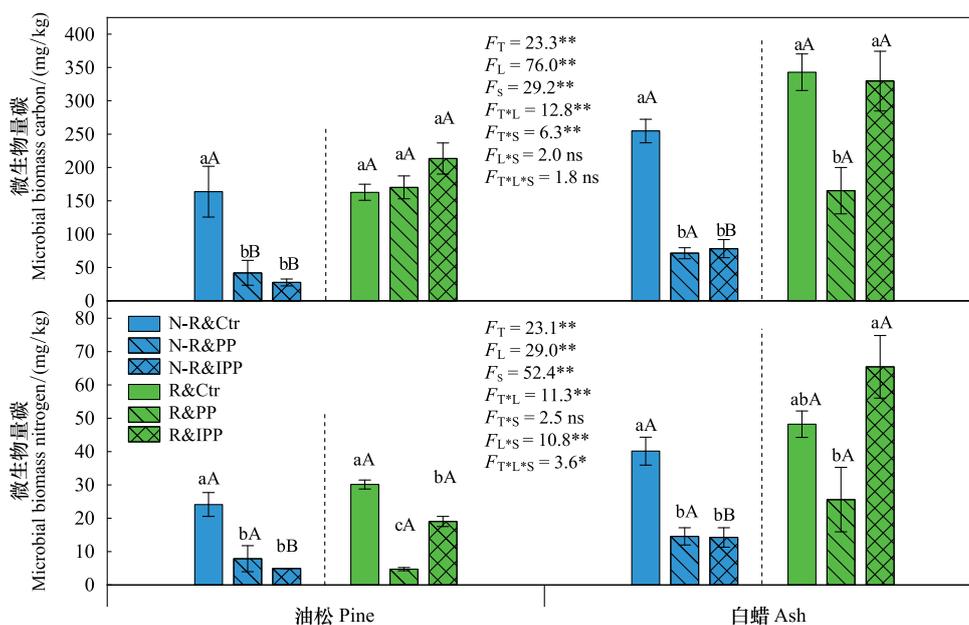


图 1 土壤微生物量碳氮的分布

Fig.1 Allocation of soil microbial carbon and nitrogen

N-R: 非根围 non-rhizosphere; R: 根围 rhizosphere; Ctr: 自然地表 control; PP: 透水硬化地表 pervious pavement; IPP: 不透水硬化地表 impervious pavement; T: 处理 treatments; L: 位置 location; S: 树种 tree species; \*, \* < 0.05, \*\* < 0.01; ns: 不显著 no significant difference; 图中小写字母表示硬化处理间差异,大写字母表示非根围和根围差异 ( $P < 0.05$ );  $F$ :  $F$  检验值

## 2.4 硬化地表对土壤微生物量碳与有机碳比值 (MBC/OC) 和微生物量氮与全氮比值 (MBN/TN) 的影响

土壤 MBC/OC (微生物量碳/有机碳) 和 MBN/TN (微生物量氮/全氮) 反应土壤微生物对养分的利用率。硬化地表下不同树种土壤 MBC/OC 和 MBN/TN 存在差异(表 2)。就不同类型硬化地表而言,与 Ctr 相比,油松和白蜡非根围土壤 MBC/OC 与 MBN/TN 在 PP 和 IPP 下均显著降低 ( $P < 0.05$ ),油松根围土壤 MBN/TN 在 PP 和 IPP 下均显著降低 ( $P < 0.05$ ),白蜡根围土壤 MBC/OC 与 MBN/TN 在 PP 下均显著降低 ( $P < 0.05$ )。就根围和非根围土而言,与根围土相比,油松非根围 MBC/OC 在 PP 和 IPP 下均显著降低 ( $P < 0.05$ ),MBN/TN 在 IPP 下显著降低 ( $P < 0.05$ );白蜡非根围土壤 MBC/OC 和 MBN/TN 在 IPP 下均显著降低 ( $P < 0.05$ )。

表 2 硬化地表下不同树种非根围和根围土壤 MBC/OC、MBN/TN/%

Table 2 Effect of pavements and tree species on no-rhizosphere and rhizosphere soil ratio of MBC/OC, MBN/TN

树种 Tree species	处理 Treatments	MBC/OC		MBN/TN	
		非根围 Non-rhizosphere	根围 Rhizosphere	非根围 Non-rhizosphere	根围 Rhizosphere
油松	自然地表 Ctr	1.923±0.413aA	1.847±0.094aA	2.697±0.406aA	3.160±0.1aA
	透水 PP	0.610±0.315bB	2.047±0.157aA	1.087±0.567bA	0.527±0.087cA
	不透水 IPP	0.350±0.061bB	2.553±0.384aA	0.510±0.030bB	1.753±0.127bA
白蜡	自然地表 Ctr	3.070±0.270aA	3.733±0.132aA	4.253±0.360aA	4.817±0.342aA
	透水 PP	0.870±0.104bA	1.650±0.261bA	1.707±0.320bA	2.630±0.946bA
	不透水 IPP	1.020±0.290bB	3.187±0.208aA	1.677±0.574bB	6.283±0.669aA

同列不同小写字母表示硬化处理间差异显著,同行不同大写字母表示非根围和根围间差异显著( $P<0.05$ )

### 2.5 微生物量碳、氮与土壤理化性质之间的关系

土壤微生物量碳氮与土壤理化性质相关分析(表 3)。土壤微生物量碳与土壤全碳显著正相关( $P<0.05$ ),与全氮、有机碳极显著正相关( $P<0.01$ )。土壤微生物量氮与土壤全碳、全氮显著正相关( $P<0.05$ ),与有机碳极显著正相关( $P<0.01$ ),与含水量显著负相关( $P<0.05$ )。其中,土壤微生物量碳和土壤微生物量氮呈极显著正相关( $P<0.01$ )。土壤微生物量碳氮与土壤理化性质的相关性较好,表明硬化地表下土壤微生物量碳氮能够作为反应土壤质量变化的指标。

表 3 硬化地表下土壤微生物量碳、氮与土壤理化性质相关分析

Table 3 Correlations between physico-chemical properties and MBC, MBN under pavements

变量 Variables	pH	含水量 Moisture	全碳 Total carbon	全氮 Total nitrogen	有机碳 Organic carbon	C/N	MBN
MBC	0.028	-0.175	0.386 *	0.445 **	0.572 **	0.185	0.865 **
MBN	0.055	-0.357 *	0.363 *	0.360 *	0.603 **	0.215	1

$N=36$ , \*\*  $<0.01$ , \*  $<0.05$

### 3 讨论

本研究发现硬化地表下两个树种非根围土壤微生物 MBC 和 MBN 均显著降低( $P<0.05$ )(图 1)。以往关于硬化地表对土壤微生物影响的研究均为非根围土壤,Piotrowska 和 Charzyński<sup>[23]</sup>通过野外实际采样的方法研究半透水和不透水硬化地表对土壤微生物的影响,结果表明两种类型的硬化地表均降低土壤 MBC、MBN;Wei 等<sup>[22]</sup>通过现场观测也发现不透水硬化地表降低土壤 MBC、MBN,均与本研究一致。一方面,植物凋落物为土壤微生物提供食物和能量,硬化地表阻碍凋落物进入土壤<sup>[21]</sup>,造成土壤 MBC、MBN 含量降低<sup>[18, 22-23]</sup>;另一方面,硬化地表从多方面影响土壤性质,如硬化地表增加土壤的紧实度<sup>[17]</sup>、提高土壤温度、降低土壤含水量<sup>[20]</sup>,进而改变土壤理化特性<sup>[18-19]</sup>,本研究中也发现不同类型的硬化地表下土壤理化性状有不同程度的改变(表 1),土壤 MBC、MBN 与土壤理化性状关系密切(表 3),理化性状的改变自然也会引起土壤 MBC、MBN 的变化;其次,硬化地表导致土壤质量降低,可供土壤微生物利用的 C、N 养分减少,也不利于土壤微生物的生长。本研究中两个树种在 PP 和 IPP 下非根围土壤 MBC/OC(微生物量碳/有机碳)和 MBN/TN(微生物量氮/全氮)均显著降低(表 2),MBC/OC、MBN/TN 被定义为微生物商<sup>[28]</sup>,对土壤质量的变化具有指示意义,该比值越高,土壤质量越高,越利于土壤微生物的生长<sup>[29]</sup>。刘恩科等<sup>[30]</sup>通过研究农田土壤微生物发现 MBC/OC、MBN/TN 的变化趋势和 MBC、MBN 一致,本试验关于非根围土壤微生物的研究与之相符。可见,硬化地表导致非根围土壤质量下降。

本研究发现不同硬化地表对两个树种根围土壤微生物量的影响与非根围不同(图 1,表 2)。与 Ctr 相比,油松根围土壤 MBN 和 MBN/TN 均表现为 Ctr>PP>IPP( $P<0.05$ ),白蜡根围土壤 MBC、MBC/OC 和 MBN/TN 均表现为 Ctr, IPP>PP( $P<0.05$ ),MBN 表现为 IPP>PP( $P<0.05$ )。一方面,硬化地表压紧土壤<sup>[17]</sup>,不利于土

壤微生物的生长,会导致硬化地表下土壤微生物量降低<sup>[18, 22-23]</sup>,但硬化地表下树木根系伸展受阻,树池中根系会增多<sup>[12]</sup>,根系分泌物含量也会增多,一定程度上又能促进土壤微生物的生长,加之树池中一定量枯枝落叶的堆积,为微生物提供养分,Viswanatha<sup>[6]</sup>研究发现透水和不透水硬化地表下根围土壤二氧化碳排放速度和二氧化碳浓度均较高,表明树池中微生物呼吸作用强烈,所以本试验硬化地表下根围土壤 MBC、MBN 并没有完全表现出来降低的趋势,但 Viswanatha<sup>[6]</sup>的研究发现透水硬化地表下根围土壤氧气浓度比不透水高,并认为透水硬化地表对根围土更有利,本试验并没有发现这一有利现象;另一方面,硬化地表材质不同,土壤微生物量降低程度也不同,透水硬化更利于水分流失,养分会随水分流出,Morgenroth 和 Visser<sup>[11]</sup>研究发现透水硬化地表上植物生长优于不透水硬化,本研究发现油松根围土壤微生物量在透水硬化地表下高于不透水硬化地表,与之一致。本试验对于根围土壤微生物的研究发现土壤微生物 MBC/OC、MBN/TN(微生物商)的变化趋势和 MBC、MBN 并不完全一致,这与张明等<sup>[31]</sup>的研究相符。可见,微生物商更能反应土壤质量<sup>[29]</sup>。

本研究发现硬化地表下根围土壤微生物量会高于非根围土,不同树种的响应也存在差异。一方面,地表硬化降低土壤含水量<sup>[20]</sup>,阻止土气交换<sup>[7]</sup>,增加地表温度<sup>[5]</sup>,导致非根围土壤微生物生存环境恶劣,同时,硬化地表使非根围地表与土壤分开,阻挡枯枝落叶进入非根围土,使得非根围土壤养分不足,均不利于非根围土壤微生物的生长,而根围树池中土壤没有硬化地表的阻隔,不仅有一定量枯枝落叶的堆积,还能积存一定量的水分,树池又在树荫下,不会导致温度过高,所以硬化地表下根围土壤 MBC、MBN 会高于非根围土;另一方面,硬化地表土地紧实不利于根系伸展<sup>[12]</sup>,树木根系多聚集在树池,导致非根围根系减少,树池中根围土根系分泌物会高于非根围;其次,油松和白蜡分别属于常绿针叶树和落叶阔叶树,Polyakova 和 Billor<sup>[32]</sup>研究发现不同树种凋落物不同,凋落物的种类及数量与土壤微生物量密不可分,加之不同树种根系分泌物不同,树种对不同类型硬化地表的响应存在差异<sup>[14]</sup>,本研究发现油松根围土壤微生物 MBN 在透水硬化下高于不透水,白蜡根围土壤微生物 MBN 在透水硬化地表下低于不透水,表明不同树种根围土壤微生物对不同类型硬化地表的响应存在差异。同时,不同类型硬化地表温度及表层土壤温度不同<sup>[14]</sup>,而种植不同树种也会改变土壤温度及水分含量,土壤温度和水分的变化也会影响土壤微生物的生长。

相关分析结果显示,土壤 MBC、MBN 与土壤全碳、全氮、有机碳显著正相关,MBC 和 MBN 之间也显著正相关。表明本研究中土壤 MBC、MBN 与土壤养分关系密切,可以作为土壤质量的显示因子,进一步验证前人的研究结果<sup>[33]</sup>。本研究中土壤 MBC 与含水量关系不大,MBN 与含水量负相关,说明土壤 MBC、MBN 与土壤养分的关系存在差异,张洁等<sup>[34]</sup>发现土壤 MBN 受土壤含水量的影响更大。本研究发现土壤 MBC、MBN 与土壤 pH 并没有相关性,这与 Srivastava 的研究一致<sup>[35]</sup>,但 Xu 等<sup>[36]</sup>认为土壤 pH 值与城市土壤微生物密切相关并且是土壤微生物变化的驱动因子,可能由于本研究中土壤 pH 值均为中性偏碱,说明在一定范围内 pH 值并不一定是城市土壤微生物变化的驱动因子。本研究发现 MBC、MBN 与土壤 C/N 并没有相关性,张立欣等<sup>[37]</sup>认为 C/N 是影响土壤 MBC、MBN 变化的主要因素之一,可能由于不同类型硬化地表以及不同树种根围和非根围土等复杂因素的影响导致。

#### 4 结论

硬化地表改变土壤理化性状,降低土壤质量,导致土壤微生物量降低,对土壤微生物的生长具有不利影响,非根围和根围土壤微生物对硬化地表的响应存在差异,根围土壤微生物受到的不利影响相对小一点;不同树种下土壤微生物对硬化地表的响应也存在一定的差异。

#### 参考文献 (References):

- [ 1 ] Lehmann A, Stahr K. Nature and significance of anthropogenic urban soils. *Journal of Soils and Sediments*, 2007, 7(4): 247-260.
- [ 2 ] 陈媛媛,江波,王效科,李丽.北京典型绿化树种幼苗光合特性对硬化地表的响应. *生态学报*, 2017, 37(11): 3673-3682.
- [ 3 ] Fregolent L, Michelangelo S, Stefania T. Urban sprawl in Europe. *Archivio Di Studi Urbani E Regionali*, 2013, 108: 5-9.
- [ 4 ] Lee J G, Heaney J P. Estimation of urban imperviousness and its impacts on storm water systems. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 2003, 129(5): 419-426.

- [ 5 ] Asaeda T, Ca V T, Wake A. Heat storage of pavement and its effect on the lower atmosphere. *Atmospheric Environment*, 1996, 30(3): 413-427.
- [ 6 ] Viswanathan B. Effect of Pervious and Impervious Pavement on the Rhizosphere of American Sweetgum (*Liquidambar styraciflua*) [D]. Texas: Texas A&M University, 2010.
- [ 7 ] Feng G, Wu L, Letey J. Evaluating aeration criteria by simultaneous measurement of oxygen diffusion rate and soil-water regime. *Soil Science*, 2002, 167(8): 495-503.
- [ 8 ] De Ridder K, Adamec V, Bañuelos A, Bruse M, Bürger M, Damsgaard O, Dufek J, Hirsch J, Lefebvre F, Pérez-Lacorzana J M, Thierry A, Weber C. An integrated methodology to assess the benefits of urban green space. *Science of the Total Environment*, 2004, 334-335: 489-497.
- [ 9 ] Volder A, Viswanathan B, Watson W T. Pervious and impervious pavement reduce production and decrease lifespan of fine roots of mature Sweetgum trees. *Urban Ecosystems*, 2014, 17(2): 445-453.
- [ 10 ] Grabosky J, Bassuk N, Irwin L, Van Es H. Shoot and root growth of three tree species in sidewalks. *Journal of Environmental Horticulture*, 2001, 19(4): 206-211.
- [ 11 ] Morgenroth J, Visser R. Aboveground growth response of *Platanus orientalis* to porous pavements. *Arboriculture & Urban Forestry*, 2011, 37(1): 1-5.
- [ 12 ] Morgenroth J. Root growth response of *Platanus orientalis* to porous pavements. *Arboriculture & Urban Forestry*, 2011, 37(2): 45-50.
- [ 13 ] Volder A, Watson T, Viswanathan B. Potential use of pervious concrete for maintaining existing mature trees during and after urban development. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2009, 8(4): 249-256.
- [ 14 ] Montague T, Kjelgren R. Energy balance of six common landscape surfaces and the influence of surface properties on gas exchange of four containerized tree species. *Scientia Horticulturae*, 2004, 100(1/4): 229-249.
- [ 15 ] 鲍士旦. 土壤农化分析(第三版). 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [ 16 ] Scalenghe R, Malucelli F, Ungaro F, Perazzone L, Filippi N, Edwards A C. Influence of 150 years of land use on anthropogenic and natural carbon stocks in Emilia-Romagna region (Italy). *Environmental Science & Technology*, 2011, 45(12): 5112-5117.
- [ 17 ] Philip E, Azlin Y N. Measurement of soil compaction tolerance of *Lagestromia speciosa* (L.) Pers. using chlorophyll fluorescence. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2005, 3(3/4): 203-208.
- [ 18 ] Zhao D, Li F, Wang R S, Yang Q R, Ni H S. Effect of soil sealing on the microbial biomass, N transformation and related enzyme activities at various depths of soils in urban area of Beijing, China. *Journal of Soils and Sediments*, 2012, 12(4): 519-530.
- [ 19 ] Morgenroth J, Buchan G, Scharenbroch B C. Belowground effects of porous pavements—soil moisture and chemical properties. *Ecological Engineering*, 2013, 51: 221-228.
- [ 20 ] Chen Y Y, Wang X K, Jiang B, Yang N, Li L. Pavement induced soil warming accelerates leaf budburst of ash trees. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2016, 16: 36-42.
- [ 21 ] Seto K C, Güneralp B, Hutyra L R. Global forecasts of urban expansion to 2030 and direct impacts on biodiversity and carbon pools. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2012, 109(40): 16083-16088.
- [ 22 ] Wei Z Q, Wu S H, Zhou S L, Lin C. Installation of impervious surface in urban areas affects microbial biomass, activity (potential C mineralisation), and functional diversity of the fine earth. *Soil Research*, 2013, 51(1): 59-67.
- [ 23 ] Piotrowska-Długosz A, Charzyński P. The impact of the soil sealing degree on microbial biomass, enzymatic activity, and physicochemical properties in the Ekranic Technosols of Toruń (Poland). *Journal of Soils and Sediments*, 2015, 15(1): 47-59.
- [ 24 ] Francini G, Hui N, Jumpponen A, Kotze D J, Romantschuk M, Allen J A, Setälä H. Soil biota in boreal urban greenspace: Responses to plant type and age. *Soil Biology and Biochemistry*, 2018, 118: 145-155.
- [ 25 ] 吴金水. 土壤微生物量测定方法及其应用. 北京: 气象出版社, 2006.
- [ 26 ] 王巧环, 任玉芬, 孟龄, 李虹, 傅慧敏, 王华锋. 元素分析仪同时测定土壤中全氮和有机碳. *分析试验室*, 2013, 32(10): 41-45.
- [ 27 ] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- [ 28 ] 徐华勤, 章家恩, 冯丽芳, 全国明, 毛丹娟, 秦钟. 广东省不同土地利用方式对土壤微生物量碳氮的影响. *生态学报*, 2009, 29(8): 4112-4118.
- [ 29 ] 何振立. 土壤微生物量及其在养分循环和环境质量评价中的意义. *土壤*, 1997, 29(2): 61-69.
- [ 30 ] 刘恩科, 赵秉强, 李秀英, 姜瑞波, So H B. 不同施肥制度土壤微生物量碳氮变化及细菌群落 16S rDNA V3 片段 PCR 产物的 DGGE 分析. *生态学报*, 2007, 27(3): 1079-1085.
- [ 31 ] 张明, 白震, 张威, 丁雪丽, 宋斗妍, 朱俊丰, 朱平. 长期施肥农田黑土微生物量碳、氮季节性变化. *生态环境*, 2007, 16(5): 1498-1503.
- [ 32 ] Polyakova O, Billor N. Impact of deciduous tree species on litterfall quality, decomposition rates and nutrient circulation in pine stands. *Forest Ecology and Management*, 2007, 253(1/3): 11-18.
- [ 33 ] 俞慎, 何振立, 张荣光, 陈国潮, 黄昌勇, 朱炳良. 红壤茶树根层土壤基础呼吸作用和酶活性. *应用生态学报*, 2003, 14(2): 179-183.
- [ 34 ] 张洁, 姚宇卿, 金轲, 吕军杰, 王聪慧, 王育红, 李俊红, 丁志强. 保护性耕作对坡耕地土壤微生物量碳、氮的影响. *水土保持学报*, 2007, 21(4): 126-129.
- [ 35 ] Srivastava S C. Microbial C, N and P in dry tropical soils: seasonal changes and influence of soil moisture. *Soil Biology & Biochemistry*, 1992, 24(7): 711-714.
- [ 36 ] Xu H J, Li S, Su J Q, Nie S A, Gibson V, Li H, Zhu Y G. Does urbanization shape bacterial community composition in urban park soils? A case study in 16 representative Chinese cities based on the pyrosequencing method. *FEMS Microbiology Ecology*, 2014, 87(1): 182-192.
- [ 37 ] 张立欣, 段玉玺, 王博, 王伟峰, 李晓晶, 刘矜杰. 库布齐沙漠不同人工固沙灌木林土壤微生物量与土壤养分特征. *应用生态学报*, 2017, 28(12): 3871-3880.