

文章编号:1001—7380(2023)05—0001—07

# 杨树人工林土壤微生物生物量碳 对模拟氮沉降的响应

徐亚明

(东台市林场,江苏 东台 224242)

**摘要:**在杨树人工林生长季的6,8,10月,对3种不同龄(幼龄、中龄、成熟)林开展野外模拟氮沉降试验。每种龄林设置20个样方,设定4个梯度,即N1,N2,N3,N4[N沉降依次分别为5,10,15,30 g/(m<sup>2</sup>·a)]和对照N0(无N沉降),样地内采集3个深度(0—15,15—25,25—40 cm)的土样测定土壤微生物生物量碳含量,以研究苏北沿海杨树人工林土壤微生物生物量碳对氮沉降的响应。结果表明:幼龄杨树人工林的土壤微生物生物量碳含量随着施氮量的增加而增加,最大值为607.75 mg/kg;一定量的氮处理可以增加中龄林和成熟林土壤微生物生物量碳的含量,过高则会抑制土壤微生物生物量碳的含量;幼龄杨树人工林中土壤微生物生物量碳含量随土层的加深而降低;3个龄级杨树人工林中土壤微生物生物量碳含量都具有显著的时间动态,幼龄林土壤微生物生物量碳含量的最大值出现在10月(607.75 mg/kg),中龄林出现在8月(1444.43 mg/kg),成熟林则出现在6月(974.33 mg/kg)。研究结果显示,氮沉降对表层土壤微生物的影响最大;高含量氮的沉降抑制杨树人工林的生长。

**关键词:**氮沉降;林龄;杨树;人工林;土壤微生物生物量碳

中图分类号:S792.11

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1001-7380.2023.05.001

## Effect of nitrogen deposition simulation on soil microbial biomass carbon in poplar plantations at different stand ages

Xu Yaming

(Dongtai Forest Farm, Jiangsu Province, Dongtai 224242, China)

**Abstract:** Field trials by nitrogen deposition simulation at three ages of poplar plantation (young, middle-aged and mature) were conducted during the growth season (in June, August and October). Each stand age was set with 20 plots and 4 nitrogen deposition gradients, including N1, N2, N3 and N4 [5, 10, 15 and 30 g/(m<sup>2</sup>·a) respectively] and N0 (Control). Soil at three depths (0—15, 15—25 and 25—40 cm) in plot to measure soil microbial biomass carbon (SMBC) content, in order to study the response to nitrogen deposition in poplar plantations along the coast of northern Jiangsu. The results showed that the SMBC content of young poplar stand increased with the increase of nitrogen application, the maximum reaching 607.75 mg/kg; A certain nitrogen treatment could increase the content of SMBC in mid-aged and mature stands while excessive nitrogen treatment could inhibit the content of SMBC; The SMBC in young poplar stand decreased with the deepening of soil layers; The SMBC content in the three-aged poplar stands showed significant temporal dynamics. The maximum SMBC content in young stand appeared in October (607.75 mg/kg), mid-aged stand appeared in August (1444.43 mg/kg), and mature stand appeared in June (974.33 mg/kg). It was concluded that nitrogen deposition had the greatest effect on the surface soil microorganisms, and high nitrogen deposition inhibited the growth of poplar plantations.

**Key words:** Nitrogen deposition; Stand age; Poplar; Plantation; Soil microbial biomass carbon (SMBC)

收稿日期:2023-08-11;修回日期:2023-09-08

基金项目:江苏省重点研发计划社会发展项目“基于生物多样性保护和固碳增汇双目标的沿海滩涂生态修复关键技术研究”(BE2022792)

作者简介:徐亚明(1969-),男,江苏东台人,高级工程师,大学本科毕业。主要从事林业技术推广、园林绿化、森林经营与管理工

作。Tel:13182125626, E-mail:2418925728@qq.com

土壤是最大的陆地碳库,土壤微生物是土壤活性有机质中最活跃的部分,是土壤中植物有效养料的储备库,可以反映参与调控土壤中能量和养分循环以及有机物质转化的对应微生物的数量<sup>[1]</sup>,通常以微生物生物量碳(Microbia biomass carbon, MBC)含量来表示土壤微生物量的大小。土壤微生物生物量碳(SMBC)是反映土壤养分有效性和土壤微生物状况随环境变化的重要指标;其灵敏性极高,能在总碳变化之前反映出土壤有机质成分微小的变化<sup>[2]</sup>。

在陆地生态系统中,土壤圈的碳、氮循环是全球生物地球化学循环的重要组成部分。不断加剧的全球氮沉降对森林生态系统碳循环产生深刻的影响,进而改变了森林生态系统的生产力和生物量积累,氮沉降的增加甚至已成为国内外一些地区森林衰退的主要原因<sup>[3]</sup>。目前,全球变化与土壤碳循环之间的反馈作用,即酸沉降、大气CO<sub>2</sub>浓度增加和人为活动与土壤碳循环之间相互影响的研究,已经成为碳循环研究的热点。

与天然林相比,人工林是受人为控制的生态系统类型。在生态保护的大背景下,从天然林中获得的木材资源量急剧下降,中国的森林碳汇主要贡献来自人工林。杨树作为我国栽培历史悠久的乡土树种,具有易繁殖、成林快、用途广泛等优点,是我国人工林产业化栽培的主要树种之一。目前关于大气氮沉降对杨树人工林SMBC的影响还没有深入的研究,分析不同梯度氮沉降对SMBC含量的影响,揭示SMBC对模拟氮沉降的响应,可为滨海平原区人工林优化、功能提升提供科学依据。

## 1 研究区概况和研究方法

### 1.1 研究区概况

研究地区位于江苏省盐城市境内的东台林场(120°49'E, 32°52'N),属亚热带和暖温带的过渡区,邻近黄海,具有明显的过渡性、海洋性和季风性气候。常年平均气温为14.6℃,无霜期为220 d,降雨量为1 051.0 mm,年均日照2 169.6 h。土壤类型为脱盐草甸土,土壤质地为沙质壤土,土壤偏碱性。东台林场为江苏省沿海重点防护林,林场占地面积为2 000 hm<sup>2</sup>,森林覆盖率为85%,东台林场分布的主要植被有人工营造的72杨(*Populus euramericana* cv I-72)、69杨(*P. deltoids* cv I-69)、35杨(*P.*

*deltoids* CL'35/66')、水杉(*Metasequoia glyptostroboides*)、银杏(*Ginkgo biloba*)、杉木(*Cunninghamia lanceolata*)等,林下植物有罗布麻(*Apocynum venetum*)、葎草(*Humulus scandens*)、野蔷薇(*Rosa multiflora*)等。

### 1.2 研究方法

1.2.1 样地设置 从研究区立地条件和经营管理措施基本一致的林分中选择不同林龄杨树(黑杨派无性系I-35)人工林分,并按照幼龄林(4年生)、中龄林(8年生)、成熟林(15年生)林龄3个梯度划分。每个林龄4个重复样方,每个样方内均匀分为5个小样方,每个小样方面积为(25 m×30 m)。

1.2.2 模拟氮沉降方法 设置氮沉降梯度,根据本地区的大气氮沉降情况,氮处理的强度和频度参考同类研究的处理方法<sup>[4]</sup>:N0(对照,无氮沉降),N1, N2, N3, N4[N沉降分别为5, 10, 15, 30 g/(m<sup>2</sup>·a)],随机喷洒在5个不同的小样方里,每个水平处理重复4个。于2018年试验开展期间分6次进行施加外源氮素处理(分别在生长季的6, 8, 10月),将氮素人工均匀洒入样地,然后喷洒少量水,对对照样地喷洒同量水,以减少不同处理间的差异。

1.2.3 野外采集与室内试验 由于盐城土壤为沙质壤土,土层40 cm以下有机碳变化比较小,所以在试验样地内,用土壤采样器进行多点混合采集土壤原状样品,根据剖面,分表层(0—10 cm)、中层(10—25 cm)、下层(25—40 cm)进行采样。

于2019年1月进行采样,土壤样品带回实验室后,鲜样去杂,过2 mm钢筛后贮藏于4℃的冰箱内,备用,土壤微生物量碳采用氯仿熏蒸-硫酸钾浸提法测定<sup>[5]</sup>。将经过熏蒸和未熏蒸的新鲜土壤(10 g)分别用0.5 mol/L的K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>溶液浸提,浸提液使用TOC-VCPH自动分析仪进行测定。利用下述表达式求土壤微生物量碳含量(SMBC,单位mg/kg):

$$SMBC = (E_c - E_{c0}) / 0.38。$$

式中, $E_c$ 和 $E_{c0}$ 分别为熏蒸和未熏蒸土样的浸提液碳含量(mg/kg),0.38为校正系数。

### 1.3 数据计算与统计分析

采用Sigmaplot 10.0软件进行制图,数据处理采用SPSS 13.0进行统计分析。分别取幼龄林、中龄林和成熟林3块样地的平均值比较不同时间、不同土层土壤微生物生物量碳的差异。

## 2 结果和分析

### 2.1 不同梯度氮沉降下杨树人工林 SMBC 的变化

氮沉降增加了土壤中营养物质含量,特别是有效氮含量随着施氮处理的增加而显著增加,为土壤微生物生长提供了丰富的营养来源,使得土壤微生物在施氮处理下得到了促进生长的作用。在本研究中,不同氮沉降水平下 SMBC 含量变幅很大,为 72.30—1 444.43 mg/kg。幼龄林的 SMBC 含量和施

氮梯度间存在显著的线性正相关(如图 1), SMBC 含量随着施氮质量比的增加而增加,最大值为 607.75 mg/kg。这是因为造林初期杨树生长受到氮素的限制,加上通过枯落物等形式返还的有机碳量少, SMBC 含量在林分发育初期含量较低。氮沉降补充了土壤中的氮素,促进了杨树的生长,所以 SMBC 含量随着施氮浓度的增加而显著增加。这说明在杨树人工林生长初期,氮沉降可能会促进 SMBC 含量的增加。

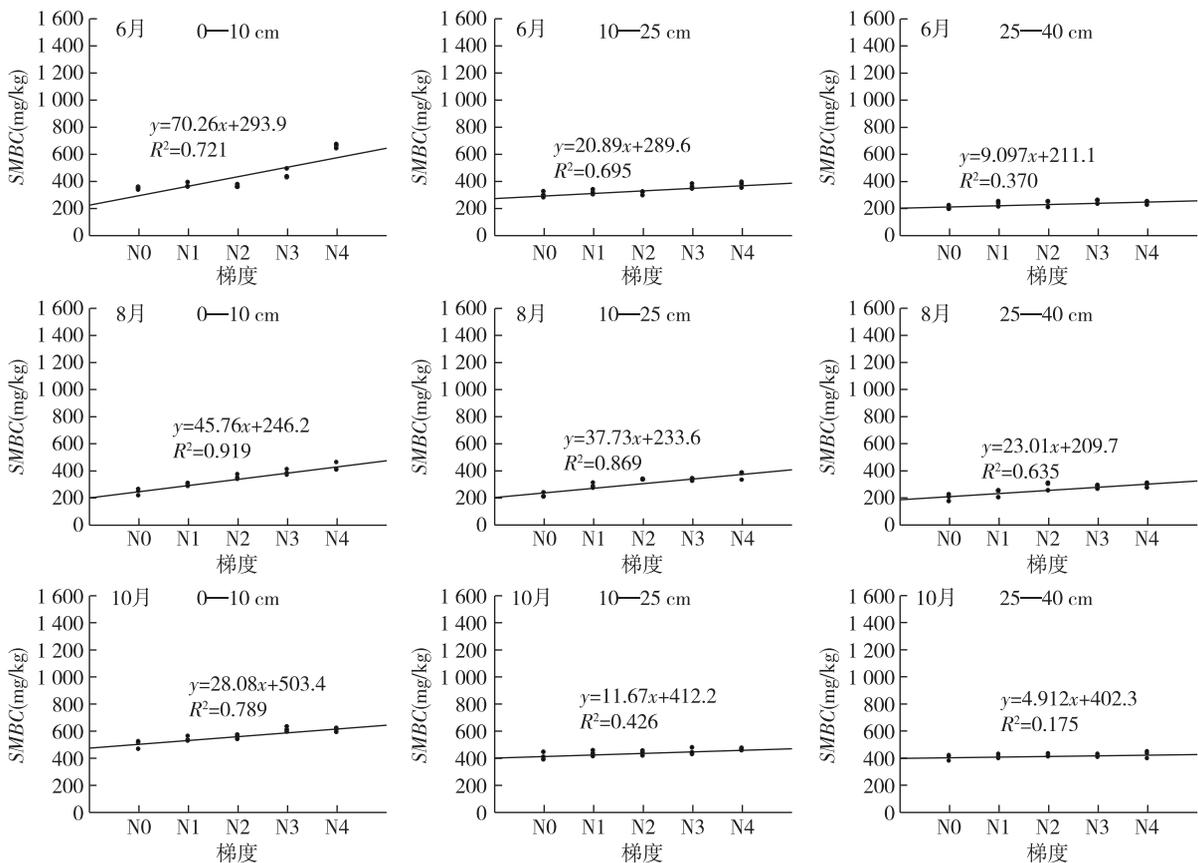


图1 不同氮处理水平幼龄林土壤微生物生物量碳变化

低氮沉降促进 SMBC 增加,而高氮沉降降低了土壤微生物的繁殖速度和存活率,以及改变土壤微生物群落,进而降低 SMBC。在中龄和成熟杨树人工林中(如图 2,3)会出现微生物生物量碳含量随着氮梯度的增加而先降低后升高,这可能与不同的微生物种类对不同含氮量的响应有关。随着林分的发育,外部干扰减少以及微生物群落结构发生变化,植物残余物量增加,土壤有机碳含量随着林龄的增加而升高<sup>[6]</sup>。氮沉降改变土壤微生物的群落结构组成以及影响土壤微生物功能。尽管施肥能促进碳吸存和微生物的生长,但是处于中龄的杨树

人工林,氮素不是主要影响其生长的限制因子。

### 2.2 氮沉降增加条件下不同林龄杨树人工林 SMBC 在不同土层中的含量变化

土壤微生物生物量碳是土壤有机碳中最活跃的生物活性组分,虽然所占比例较低,但对土壤有机碳的动态过程却具有重要的影响<sup>[7]</sup>, SMBC 的大小可以指示其新陈代谢活动的强弱,它是土壤碳循环中最为活跃的部分,土壤微生物参与土壤碳、氮等元素的循环过程和土壤矿物质的矿化过程,对有机物质的分解转化、养分的转化和供应起着重要的主导作用<sup>[8]</sup>。幼龄林各月的 SMBC 含量与土层存在

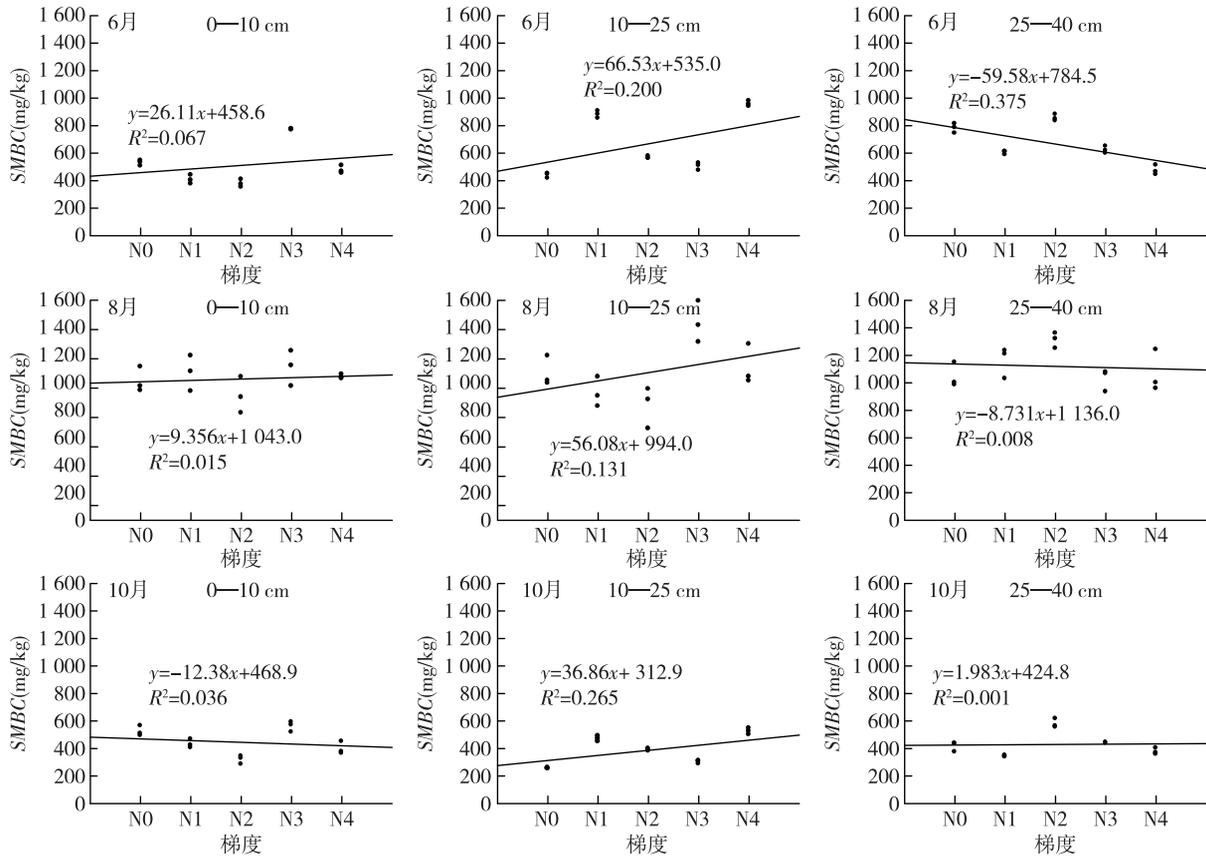


图2 不同氮处理水平下中龄林土壤微生物生物量碳变化

负显著相关(如图1),随着土层的增加,SMBC含量显著下降,最小值(197.31 mg/kg)出现在8月的下层土壤中。表层土壤(0—10 cm)受凋落物分解的影响明显,为土壤微生物提供了能量来源;加之,表层土壤根系分布较多,表层土壤疏松,由根呼吸和微生物呼吸产生的CO<sub>2</sub>很快就通过气体交换而释放到空气中,有利于该层次微生物的活动。

### 2.3 氮沉降增加条件下不同林龄杨树人工林SMBC在不同生长季的含量变化

土壤微生物生物量随季节性变化与温、湿度、土壤理化性质等环境因素以及地上植被的生长状况有关。如图1,幼龄林各土层SMBC含量和月份存在显著正相关,最大值607.75 mg/kg出现在10月;中龄林最大值1444.43 mg/kg出现在8月;成熟林各土层SMBC含量和月份存在显著负相关,最大值974.33 mg/kg出现在6月。

由于造林过程中穴垦地等管理措施对土壤造成的干扰,加之造林初期杨树通过枯落物等形式返还的有机碳量少,SMBC含量在林分发育初期含量较低,所以施氮初期(6月),幼龄林各对照土层SMBC含量(343.41,296.80,200.95 mg/kg)显著低

于中龄林(527.51,436.12,779.42 mg/kg)和成熟林(765.69,404.34,673.17 mg/kg)(如图1—3)。6月,植物开始进入生长旺盛期,足够的养分供给和适宜的水热条件,极大地提高了微生物的活性,促进了SMBC含量不断增加。随着施氮时间的增加,10月时,幼龄林10—25 cm土层和25—40 cm土层的SMBC含量和中龄林无显著差异;各土层SMBC含量显著高于成熟林。

东台林场的降雨主要集中在7—8月,由于长时间的降雨影响微生物的生长,所以10月SMBC的含量显著低于8月,中龄林SMBC含量出现在8月。同时,在本研究中,中龄林8月SMBC显著高于其他林龄SMBC含量(如图1—3)。这可能是由于中龄林林内光照、热量条件以及林内植被发育好,有利于微生物的活动。成熟杨树人工林生长缓慢,氮浓度已基本达到饱和状态,由于6月开始施加氮肥,氮素超过杨树本身需要;成熟林内林下光照不足,温度较低,形成相对封闭的小气候,造成土壤微生物数量的减少,所以6月SMBC含量显著高于8月和10月。

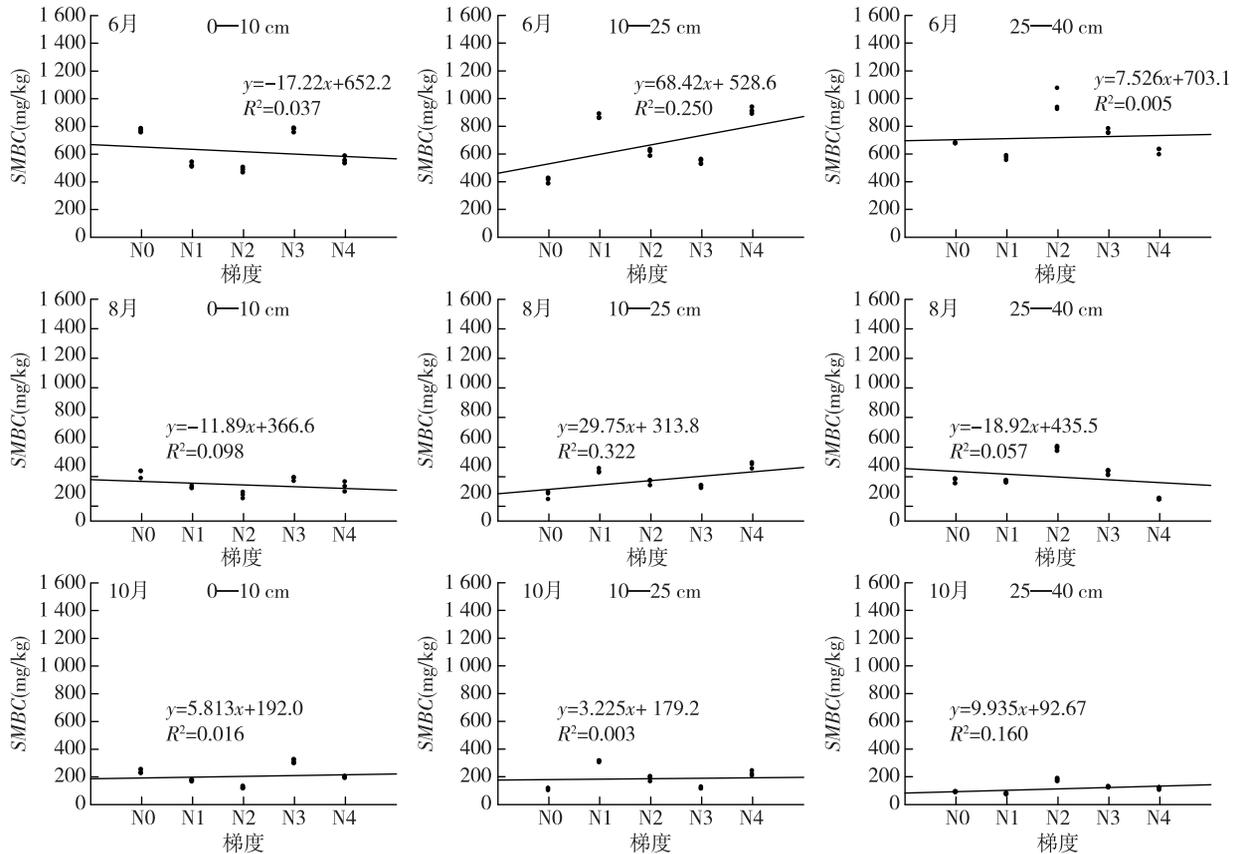


图3 不同氮处理水平下成熟林土壤微生物生物量碳变化

### 3 讨论

#### 3.1 氮沉降对不同林龄杨树人工林 SMBC 的影响

尽管有研究显示氮沉降带来的森林地上碳吸存增加极少<sup>[9]</sup>,但是氮沉降通过增加土壤氮的可利用性能够促进植物的生长进而大幅度增加森林地上部分碳吸存。在本研究中,幼龄林的土壤 MBC 含量随着施氮浓度的增加而增加;中龄和成熟杨树人工林中出现土壤 MBC 含量随着氮浓度的增加而先降低后升高,这可能与不同的微生物种类对不同氮浓度的响应有关。其他研究也得到过类似结论,符鲜等<sup>[10]</sup>研究河套灌区土壤不同盐渍化程度下土壤微生物对氮肥的响应机理时,得出结论是细菌、真菌、放线菌数量和微生物量碳、氮含量均随着施氮量的增加呈现出先增加后降低的趋势。吴勇等<sup>[11]</sup>探究不同施氮处理对紫花苜蓿土壤养分、pH 值及土壤微生物数量的影响中显示,一定范围内的施氮可以有效改善土壤理化性质、提高土壤微生物数量。当氮素超过一定的限度,造成土壤酸化,影响植物生长,依赖于植物根系分泌的营养物质生存的根际土壤微生物的生长将会受到抑制,造成土壤微生物

量的下降。有研究显示氮沉降没有显著影响松林的土壤 pH 值和土壤微生物量碳、氮含量,但却显著地降低了阔叶林的土壤 pH 值和土壤微生物量碳、氮含量( $P < 0.05$ ),而对混交林的降低程度也接近显著<sup>[12]</sup>。

大量研究表明,大气氮沉降对植物生长的影响取决于植物所在生态系统中的氮饱和程度,适量的氮沉降促进植物生长,而氮素充足的生态系统中,氮沉降反而对植物生长产生负面效果<sup>[13]</sup>。Bytnerowicz 等<sup>[14]</sup>研究发现,在氮沉降的临界负荷之内,适宜程度的氮沉降能改变植物的生物学特性、化学组成和生化过程并加速植物的生长,如果超过了氮的临界负荷,营养缺乏和其他负面效果将会使得树木生长缓慢,并且造成森林生态系统生物多样性的减少。适量的氮沉降可提高植物光合作用能力,夏凡育等<sup>[15]</sup>研究表明,大气 NO<sub>2</sub> 湿沉降显著影响桑树叶片光合特性,表现为低浓度促进,高浓度抑制,叶面喷施达到一定量时,光合反应中心开放程度增大,活性提高,光能吸收性能指数提高,能量利用效率增强。吕琳玉等<sup>[16]</sup>研究显示大气氮沉降量在一定范围内增加可促进植物叶片光合作用的反应速率。

大量的研究认为,氮沉降的增加会危害到森林生态系统的健康。如 Whytemare 等<sup>[17]</sup>认为过剩的氮改变了生态系统内部的生物地球化学循环,从而导致森林衰退。李德军等<sup>[18]</sup>的研究也表明,氮的干沉降能伤害叶片、减少根冠比。马翔等<sup>[19]</sup>的研究则指出过高的氮沉降抑制耐冬山茶和茶梅生长。

### 3.2 氮沉降增加条件下不同林龄杨树人工林 SMBC 的时间分布特征

土壤微生物量直接参与生态系统碳、氮和其他养分的循环,与生态系统生产力密切相关。因此,土壤微生物生物量碳的季节变化可一定程度上反映土壤有机碳的周转和养分的循环<sup>[20]</sup>。本研究表明,各林龄 SMBC 存在显著时间动态,但是不同林龄的最大值出现在不同的月,这与其他研究结果不尽一致。赵妍丽等<sup>[21]</sup>研究落叶松和水曲柳人工林发现,SMBC 含量 5 月最低,9 月最高;Zhou 等<sup>[22]</sup>报道了竹林春季土壤微生物生物量碳低于夏季。刘明慧等<sup>[23]</sup>在研究长白山原始红松林 SMBC 时发现其峰值出现在 6 月和 9 月。这些研究结果的差异可能与研究地区、植被类型以及气候条件的差异有关。

土壤微生物生物量碳的季节性动态变化是一个复杂过程,不同森林生态系统其 SMBC 变化不同,即使在同一生态系统,植被不同,其 SMBC 变化也可能不同。SMBC 随季节变化与温度、湿度、土壤理化性质等环境因素有关,本研究中没有涉及 SMBC 含量和其他理化性质的研究。SMBC 与土壤水分关系的研究报道较多,但至今仍无确定性结论,有关温度对 SMBC 影响的结论也各不相同。Verburg 等发现较高土壤温度下微生物活性增强<sup>[24]</sup>,Domisch 等则得到相反的结论:当土壤温度较高时,泥炭土壤中微生物生物量碳呈降低趋势<sup>[25]</sup>。Joergensen 等<sup>[26]</sup>却认为,除土壤温度的间接作用外(如影响植物生长),只有当其处于较低(低于 6 °C)或较高(35 °C 以上)的情况下,才会对土壤微生物生物量产生大的影响,成为土壤微生物活动的主要限制因子,引起微生物生物量碳的大幅度下降。Chen 等<sup>[27]</sup>认为,土壤湿度对土壤微生物量季节波动的影响较大,而温度影响较小。也有报道称,土壤水分与微生物生物量密切相关,干旱条件(降水量减少)降低森林 SMBC 含量<sup>[28]</sup>。本研究结果显示,SMBC 含量的大小受施氮浓度的影响,但是并没有研究 SMBC 含量和气候、温度等理化性质的影响,需要今后进一步研究。

## 4 结论

森林是陆地生态系统中最大的碳库,杨树是我国人工林产业化栽培的主要树种之一。本研究通过调查分析不同林龄杨树人工林 SMBC 的分布特征及其变化规律,为进一步深入研究沿海地区人工林土壤有机碳动态及其在区域和全球碳循环中的作用,阐明杨树人工林的经营管理对碳汇功能的影响提供理论依据。通过对不同林龄的杨树人工林土壤调查取样,测定其 SMBC 含量,经过分析,得出以下结论:幼龄杨树人工林的 SMBC 含量和氮浓度之间存在显著正相关;一定浓度的氮处理可以增加 SMBC 含量,过高则会抑制 SMBC 含量。幼龄杨树人工林的 SMBC 含量和土层存在负显著相关,SMBC 含量随着土层的增加而减少。3 个林龄杨树人工林中 SMBC 含量都具有明显的时间动态,幼龄林 SMBC 最大值出现在 10 月,中龄林出现在 8 月,成熟林则出现在 6 月。施氮初期(6 月),中龄林和成熟林 SMBC 含量显著高于幼龄林,中龄林和成熟林 SMBC 无显著差异;8 月,中龄林 SMBC 含量显著高于幼龄林和成熟林,幼龄林和成熟林无显著差异;10 月,成熟林 SMBC 含量显著低于幼龄林和中龄林,幼龄林和成熟林无显著差异。研究表明,氮沉降对表层 SMBC 含量的影响显著,即对表层土壤微生物影响最大,随着土层加深影响减弱;随着氮沉降浓度升高,SMBC 含量呈现负相关,即高浓度氮沉降对土壤微生物产生抑制作用,给杨树人工林的生长带来显著的抑制作用,其中对中林龄及成熟杨树林的影响较大。因此,在杨树人工林经营管理过程中,要关注大气氮沉降带来的土壤理化性质变化,对杨树人工林产生的生长抑制作用,并采取必要的保护措施。

### 参考文献:

- [1] WANDER M M, TRAINA S J, STINNER B R, et al. Organic and conventional management effects on biologically active soil organic matter pools [J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 1994, 58 (4): 1130-1139.
- [2] 汪杏芬,李世仪,白克智,等. CO<sub>2</sub> 倍增对植物生长和土壤微生物生物量碳、氮的影响 [J]. *植物学报*, 1998, 40 (12): 1169-1172.
- [3] BOXMAN A W, BLANCK K, BRANDRUD T E, et al. Vegetation and soil biota response to experimentally changed nitrogen inputs in coniferous forest ecosystems of the NITREX project [J]. *Forest Ecology and Management*, 1998, 101 (1/3): 65-79.

- [4] 涂利华,胡庭兴,张健,等.模拟氮沉降对华西雨屏区苦竹林土壤有机碳和养分的影响[J].植物生态学报,2011,35(2):125-136.
- [5] VANCE E D, BROOKES P C, JENKINSON D S. An extraction method for measuring soil microbial biomass C[J]. Soil Biology and Biochemistry,1987,19(6):703-707.
- [6] 毛璐,崔强,赵琼,等.不同林龄杨树农田防护林土壤微生物生物量碳、氮和微生物活性[J].应用生态学报,2009,20(9):2079-2084.
- [7] 张金波,宋长春,杨文燕.三江平原不同土地利用方式下碳、氮的动态变化[J].吉林农业大学学报,2003(5):548-550,556.
- [8] 赵先丽,程海涛,吕国红,等.土壤微生物生物量研究进展[J].气象与环境学报,2006,22(4):68-72.
- [9] MAGNANI F, MENCUCCINI M, BORGHETTI M, et al. The human footprint in the carbon cycle of temperate and boreal forest[J]. Nature,2007,447(7146):848-850.
- [10] 符鲜,杨树青,刘德平,等.不同盐渍化土壤中微生物对氮肥的响应[J].植物营养与肥料学报,2018,24(3):661-667.
- [11] 吴勇,刘晓静,童长春,等.施氮对西北荒漠灌区紫花苜蓿土壤理化性质及微生物数量的影响[J].草原与草坪,2020,40(6):58-64.
- [12] 梁国华,吴建平,熊鑫,等.鼎湖山不同演替阶段森林土壤pH值和土壤微生物量碳氮对模拟酸雨的响应[J].生态环境学报,2015,24(6):911-918.
- [13] 段娜,李清河,多普增,等.植物响应大气氮沉降研究进展[J].世界林业研究,2019,32(4):6-11.
- [14] BYTNEROWICZ A, OMASA K, PAOLETTI E. Integrated effects of air pollution and climate change on forests: A northern hemisphere perspective[J]. Environmental Pollution,2007,147(3):438-445.
- [15] 夏凡育,郑美慧,李晓娜,等.大气NO<sub>2</sub>湿沉降对桑树叶片光系统的影响[J].黑龙江科学,2021,12(2):1-6,14.
- [16] 吕琳玉,张黎,刘利民,等.大气氮沉降对海北高寒草甸优势种叶片光合作用过程的影响[J].环境科学研究,2016,29(11):1617-1625.
- [17] WHYTEMARE A B, EDMONDS R L, ABER J D, et al. Influence of excess nitrogen deposition on a white spruce (*Picea glauca*) stand in southern Alaska[J]. Biogeochemistry,1997,38(2):173-187.
- [18] 李德军,莫江明,方运霆,等.氮沉降对森林植物的影响[J].生态学报,2003,23(9):1891-1900.
- [19] 马翔,李辉,郭霄,等.不同氮沉降对耐冬山茶和茶梅生长及生理特性的影响[J].青岛农业大学学报(自然科学版),2021,38(4):262-272.
- [20] JUMA N G, MCGILL W B. Decomposition and nutrient cycling in agro-ecosystems[J]. Developments in Biogeochemistry,1986,3:74-85.
- [21] 贾淑霞,赵妍丽,孙玥,等.施肥对落叶松和水曲柳人工林土壤微生物生物量碳和氮季节变化的影响[J].应用生态学报,2009,20(9):2063-2071.
- [22] ZHOU G M, XU J M, JIANG P K. Effect of management practices on seasonal dynamics of organic carbon in soils under bamboo plantations[J]. Pedosphere,2006,16(4):525-531.
- [23] 刘明慧,孙雪,于文杰,等.长白山不同海拔原始红松林土壤活性有机碳含量的生长季动态[J].南京林业大学学报(自然科学版),2018,42(2):67-74.
- [24] VERBURG P S J, VAN D D, HEFTING M M, et al. Microbial transformations of C and N in a boreal forest floor as affected by temperature[J]. Plant and Soil,1999,208(2):187-197.
- [25] DOMISCH T, FINÉR L, LEHTO T, et al. Effect of soil temperature on nutrient allocation and mycorrhizas in Scots pine seedlings[J]. Plant and Soil,2002,239(2):173-185.
- [26] JOERGENSEN R G, BROOKES P C, JENKINSON D S. Survival of the soil microbial biomass at elevated temperatures[J]. Soil Biology and Biochemistry,1990,22(8):1129-1136.
- [27] CHEN T H, CHIU C Y, TIAN G L. Seasonal dynamics of soil microbial biomass in coastal sand dune forest[J]. Pedobiologia,2005,49(6):645-653.
- [28] 方熊,刘菊秀,张德强,等.降水变化、氮添加对鼎湖山主要森林土壤有机碳矿化和土壤微生物碳的影响[J].应用与环境生物学报,2012,18(4):531-538.