

外源氮输入下土壤有机碳与土壤微生物生物量碳分形特征

朱荣玮^{1,2}, 葛之葳^{1,2}, 阮宏华^{1,2}, 徐 瑾^{1,2}, 彭思利^{1,2}

(1. 南京林业大学 南方现代林业协同创新中心, 江苏 南京 210037; 2. 南京林业大学 生物与环境学院, 江苏 南京 210037)

摘要: 研究江苏北部沿海地区杨树 *Populus deltoides* ‘I-35’ 人工林不同量氮输入下土壤总有机碳(TOC)质量分数、土壤微生物生物量碳(SMBC)质量分数的时间动态特征以及土壤 TOC 质量分数随 SMBC 质量分数变化的分形特征。试验设置 5 种施氮水平, 分别为 N_0 (施氮 $0 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$, 对照), N_1 (施氮 $5 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$), N_2 (施氮 $10 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$), N_3 (施氮 $15 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$), N_4 (施氮 $30 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$), 于 2015 年 4, 6, 8, 10, 12 月各采集 1 次样品进行土壤性状理化分析, 并引入分形理论对数据进行分析。结果表明: 不同施氮水平处理下各个月份对土壤 TOC 质量分数影响极显著($P < 0.01$), 土壤 TOC 质量分数随时间变化的分形维数(D)变化范围是 1.805~1.949, D 从大到小排序为 N_3, N_2, N_4, N_1, N_0 ; 在 6 月和 10 月, 不同施氮水平处理对 SMBC 质量分数无显著影响($P > 0.05$), 在 4 月、8 月、12 月, 施氮水平对 SMBC 质量分数影响极显著($P < 0.01$), SMBC 质量分数随时间变化的 D 变化范围是 1.728~1.963, D 从大到小排序为 N_2, N_3, N_1, N_4, N_0 ; 不同施氮水平处理下土壤 TOC 质量分数随 SMBC 质量分数变化的 D 变化范围是 2.207~2.342, D 从大到小排序为 N_3, N_2, N_4, N_1, N_0 ; 不同月份土壤 TOC 质量分数随 SMBC 质量分数变化的 D 变化范围是 1.650~6.149, D 从大到小排序为 6 月、10 月、4 月、8 月、12 月。综上, N_2, N_3 中等施氮水平处理下, 土壤 TOC 和 SMBC 随时间变化以及土壤 TOC 随 SMBC 变化的复杂程度更高。研究区 6 月和 10 月土壤微生物的作用比较强烈, 土壤 TOC 质量分数随 SMBC 质量分数变化更具随机性和复杂性。图 2 表 4 参 37

关键词: 森林土壤学; 氮输入; 土壤有机碳; 土壤微生物生物量碳; 分形理论; 杨树人工林

中图分类号: S714.8

文献标志码: A

文章编号: 2095-0756(2019)04-0656-08

Fractal dimension of soil organic carbon and microbial biomass carbon with nitrogen additions

ZHU Rongwei^{1,2}, GE Zhiwei^{1,2}, RUAN Honghua^{1,2}, XU Jin^{1,2}, PENG Sili^{1,2}

(1. Co-Innovation Center for the Sustainable Forestry in Southern China, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, Jiangsu, China; 2. College of Biology and Environment, Nanjing Forest University, Nanjing 210037, Jiangsu, China)

Abstract: The temporal dynamic characteristics of soil total organic carbon (TOC) content, soil microbial biomass carbon (SMBC) content, and the fractal characteristics of soil TOC content with SMBC content of poplar (*Populus deltoides* ‘I-35’) plantations in coastal areas of northern Jiangsu Province were studied. Five nitrogen (N) levels were set in the sampled area, namely N_0 (N $0 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$, control), N_1 (N $5 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$), N_2 (N $10 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$), N_3 (N $15 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$), and N_4 (N $30 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$). Soil samples for laboratory analyses were collected in April, June, August, October, and December 2015, and fractal theory was used to analyze the data. Results showed that the soil TOC mass fraction for the different concentrations of N added treatments were highly significant ($P < 0.01$), and the fractal dimension D of the soil TOC mass fraction with time ranged from 1.805 to 1.949. The fractal dimension D was ranked as $N_3 > N_2 > N_4 > N_1 > N_0$. In June and October, different concentra-

收稿日期: 2018-08-28; 修回日期: 2018-12-04

基金项目: “十三五”国家重点研究发展计划项目(2016YFD0600204); 国家自然科学基金资助项目(41601254); 江苏高校优势学科建设工程资助项目(PAPD)

作者简介: 朱荣玮, 从事土壤生态学研究。E-mail: 750690874@qq.com。通信作者: 葛之葳, 讲师, 博士, 从事土壤生态学研究。E-mail: gezhiwei@njfu.edu.cn

tions of N added treatments had no significant effects on the SMBC mass fraction ($P>0.05$). In April, August, and December, the effects of the SMBC mass fraction for different concentrations of N added treatments were highly significant ($P<0.01$), and the fractal dimension D of the soil TOC mass fraction with time ranged from 1.728 to 1.963. The fractal dimension D was ranked as $N_2>N_3>N_1>N_4>N_0$. The fractal dimension D of the soil TOC mass fraction with the SMBC mass fraction for different concentrations of N added ranged from 2.207 to 2.342, and the fractal dimension D was ranked as $N_3>N_2>N_4>N_1>N_0$. The fractal dimension D of the soil TOC mass fraction with the SMBC mass fraction for different months ranged from 1.650 to 6.149, and the fractal dimension D was ranked as June>October>April>August>December. N_2 and N_3 were obtained. Under the medium concentration of nitrogen treatment, the time dynamics of soil TOC and SMBC and soil TOC varies with SMBC were more random and complex than other concentrations; In June and October, the soil TOC varies with SMBC was more flexible and complex. [Ch, 2 fig. 4 tab. 37 ref.]

Key words: forest soil science; nitrogen addition; soil total organic carbon; soil microbial biomass carbon; fractal theory; poplar plantation

中国已成为全球氮沉降最严重的区域之一。长期的氮沉降可能导致森林生态系统功能受到严重的影响。森林土壤碳储量约占全球土壤碳储量的 70%，其细微的变化就可能会造成大气中二氧化碳浓度发生巨大的改变^[1-2]。土壤微生物在能量传递与转换、养分循环以及植被生长发育过程中扮演着重要的角色^[3-5]。土壤微生物易受环境因子的影响，对土壤 pH 值、土壤温度和土地利用类型等因素十分敏感^[6]。外源氮输入对土壤微生物的影响由于施氮种类、生态系统环境差异以及不同种类微生物对外源氮的施加耐受程度差异等因素而不尽相同^[7-8]。土壤微生物的活性与土壤总有机碳(total organic carbon, TOC)的关系非常密切和复杂。在同种类型的土壤上，土壤微生物生物量碳(soil microbial biomass carbon, SMBC)质量分数的动态变化和土壤 TOC 分解进行的程度趋势十分相似^[9]；大部分类型森林植被下两者质量分数呈极显著相关^[10]。一些学者^[11]认为土地利用类型、取样地点、人为活动影响以及土壤基本理化性质等因素存在差异，使两者之间的内在联系很复杂。我们认为不同量外源氮输入下土壤 TOC 和 SMBC 并不是简单的线性或模型相关，而是一种复杂的自相似的相关关系。因此，在研究两者之间的规律时引入分形理论^[12]，它的数学基础是分形几何学。BURROUGH^[13]首次将分形理论运用于土壤科学的研究中，结果显示与单纯的依靠数学公式和函数分析土壤属性的时空变化特征相比，运用分形维数更加贴切和准确。近年来，国内外很多学者也将分形理论运用于一系列土壤属性时空变化规律的研究中^[14-15]。本研究基于江苏省盐城东台林场氮输入实验样地，运用分形理论描述了不同量外源氮输入对 SMBC 质量分数和土壤 TOC 质量分数随时间变化的动态特征以及这 2 个指标的复杂相关关系，对预测土壤 TOC 的早期变化，准确反映不同经营方式下土壤碳库的生产潜力有重大意义。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

研究区设在江苏省盐城市境内的东台林场，其地理位置为 32°48′40″N，120°49′31″E。东台林场地处江苏省中东部黄海之滨，创建于 1965 年，属于暖温带和亚热带的过渡区，四季分明，常年平均气温为 14.6℃，年均无霜期为 225.0 d，年均降水量为 1 051.0 mm，年均日照时数为 2 169.6 h。土壤类型为脱盐草甸土，质地为砂质壤土，pH 值偏碱性。试验样地于 2012 年 2 月开始设立，通过人工外源氮输入模拟未来氮沉降趋势。根据经营管理措施和立地条件基本相同的原则，在林场内选择 11 年生中林龄杨树 *Populus deltoides* ‘I-35’ 人工林分。①样地面积：大小为 20 m×90 m，3 个重复。②样地内样方设置：各个重复样地包括 5 块 10 m×20 m 样方（随机区组实验方法排列），样方之间缓冲带宽为 10 m，总面积为 20 m×90 m。③实验处理：样方施氮量梯度处理为 N_0 (施氮 0 g·m⁻²·a⁻¹，对照)， N_1 (施氮 5 g·m⁻²·a⁻¹)， N_2 (施氮 10 g·m⁻²·a⁻¹)， N_3 (施氮 15 g·m⁻²·a⁻¹)， N_4 (施氮 30 g·m⁻²·a⁻¹)，在每年的生长季节 5-10 月进行施氮处理，1 次·月⁻¹，共施 6 次·a⁻¹^[16-17]。

1.2 样品采集与分析方法

选用2015年期间的数据。在实验样地内,于4,6,8,10,12月在各个施氮样方内随机选取5个采样点,用土钻取0~10 cm层土壤。土壤样品带回实验室后,将同一个施氮样方内的5袋土壤样品充分混合成1袋,共计75袋。将新鲜土样分为2份,一份去杂后,过2 mm的钢筛后进行SMBC的测定;另一份自然风干、去杂、过2 mm筛后进行土壤总有机碳(TOC)以及pH值等其他指标的测定。土壤TOC采用岛津TOC-VCPH分析仪测定^[18];土壤微生物生物量碳采用氯仿熏蒸-硫酸钾浸提法测定^[19];土壤pH值采用 $m(\text{土}):m(\text{水})=1.0:2.5$ 电位法测定^[20];土壤硝态氮($\text{NO}_3\text{-N}$)采用双波长紫外分光光度法测定^[21]。

利用Origin 8.5, SPSS 19.0和Excel 2016等进行数据分析和图表处理。采用重复测量方差分析和单因素方差分析不同施氮水平土壤TOC和SMBC的差异显著性,并对不同月份、不同量氮输入下的土壤TOC质量分数、SMBC质量分数做多重比较(显著性水平为0.05)。

1.3 土壤分形维度的计算

HAUSDORFF在1919年提出了连续空间的概念,也就是空间维数是可以连续变化的,它可以是整数也可以是分数,称为豪斯道夫维数。设一个整体 S 划分为 N 个大小和形态完全相同的小图形,每一个小图形的线度是原图形的 r 倍,则豪斯道夫维数 $D=\lim[\log N(r)/\log(1/r)]$ 。计算的基本原理为分形集都遵循一定的标度律,即测度随测量尺度按照一种幂指数规律而变化,即在双对数坐标中作图,并运用最小二乘法拟合一条直线,其斜率 k 与分形维数 D 之间有如下关系: $D=f(k)$ 。采用不同的测度,对应的函数 $D=f(k)$ 也不相同,如利用变异函数法(semivariogram, SV)和根据功率谱密度法计算分维(power spectrum density, PSD)^[22]等。本研究采用PSD法分析土壤TOC和SMBC随月份变化的分形关系以及土壤TOC与SMBC的分形关系。分形PSD曲线具有下列表达幂函数关系:

$$S(f) \propto f^{-w} \quad (1)$$

式(1)中: f 是频率,在本研究中代表月份; $S(f)$ 是PSD,在本研究中代表土壤TOC, SMBC; w 是PSD曲线的线性回归所得回归直线的斜率。斜率 w 与分形维数 D 的关系为:

$$D=(5-w)/2 \quad (2)$$

式(2)中: D 定量表征了土壤TOC和SMBC随月份变化的复杂程度以及土壤TOC质量分数随SMBC质量分数变化的复杂程度^[23]。

2 结果与分析

2.1 氮输入下土壤TOC的时间动态

氮输入对土壤TOC质量分数影响显著($P<0.05$),氮输入在不同月份对土壤TOC质量分数的影响不同(图1)。经多因素方差分析,在4,6,8,10,12月氮添加对土壤TOC质量分数影响极显著($P<0.01$)。氮输入处理下土壤TOC质量分数在生长季6~8月显著降低,在非生长季10~12月、12~4月显著增加。进一步对不同量氮输入水平下土壤TOC质量分数做多重比较,发现不同量氮输入水平下土壤TOC质量分数变化差异极显著($P<0.01$)。

研究区不同施氮水平下土壤TOC质量分数随时间变化的分形维数(D)进行分析(表1)。由表1看出: N_0 施氮水平下土壤TOC质量分数与时间变化呈线性正相关,但未达到显著水平; N_1 , N_3 和 N_4 施氮水平下土壤TOC质量分数与时间变化呈线性显著正相关; N_2 施氮水平下土壤TOC质量分数与时间变化呈线性极显著正相关,这与彭赛^[24]和肖晗冉^[25]的研究一致。研究区不同施氮水平下土壤TOC质量分数随时间变化的 D 变化范围是1.805~1.949,土壤TOC质量分数随时间变化的分维均很接近,且接近于2,同布朗粒子运动轨迹的维数2很接近,表明不同施氮水平下土壤TOC质量

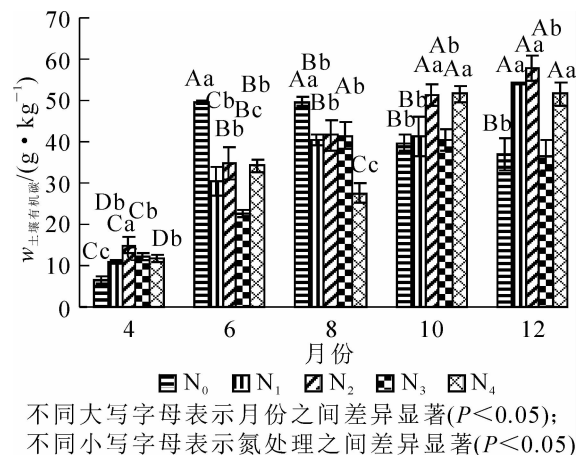


图1 氮输入下杨树人工林土壤TOC的时间动态
Figure 1 Dynamics of total organic carbon in poplar plantations under nitrogen treatment

分数随时间变化具有较大的随机性和复杂性^[26]。不同施氮水平下的 D 从大到小依次为 N_3 , N_2 , N_4 , N_1 , N_0 。在 N_3 和 N_2 施氮水平下, D 数值较大, 在这 2 个施氮水平下土壤 TOC 质量分数随时间变化的复杂程度更高, 说明中等施氮量处理对土壤 TOC 质量分数随时间变化的影响更显著; N_1 施氮水平下的 D 值小于 N_2 , N_3 和 N_4 施氮水平下的 D 值, 说明 N_1 施氮水平下土壤 TOC 质量分数随时间变化的复杂程度相对较小, 此施氮水平处理对土壤 TOC 质量分数随时间变化的影响较微弱; N_4 施氮水平下 D 值于 N_2 和 N_3 施氮水平下的 D 值, 说明 N_4 施氮水平下土壤 TOC 质量分数随时间变化的复杂程度相对较小, 此施氮处理对土壤 TOC 质量分数随时间变化的影响较微弱。

2.2 氮输入下 SMBC 的时间动态

氮输入对 SMBC 质量分数影响极显著 ($P < 0.01$), 氮输入在不同月份对 SMBC 质量分数的影响不同 (图 2)。经多因素方差分析, 6 和 10 月氮输入对 SMBC 无显著影响 ($P > 0.05$)。4, 8 和 12 月氮添加对 SMBC 质量分数影响极显著 ($P < 0.01$)。氮添加处理下 SMBC 质量分数在生长季 6–8 月显著增加, 在 8–10 月生长季末其质量分数又显著降低, 在 12 月达到峰值。进一步对不同氮添加水平下 SMBC 质量分数做多重比较, 发 4 个处理下 SMBC 质量分数变化差异极显著 ($P < 0.01$)。

对研究区不同氮水平下 SMBC 质量分数随时间变化的 D 进行分析 (表 2)。由表 2 看出: N_0 , N_1 , N_3 , N_4 施氮水平下 SMBC 质量分数与时间变化均呈线性正相关, 且达到显著水平, 不同施氮水平之间的显著性水平差异不大。研究区不同施氮水平下 SMBC 质量分数随时间变化的 D 变化范围是 1.728~1.963, 且数值接近于 2, 说明 SMBC 质量分数随时间变化具有较大随机性和复杂性^[27]。不同施氮水平下的 D 从大到小依次为 N_2 , N_3 , N_1 , N_4 , N_0 , N_2 和 N_3 施氮水平下的 D 的值较大, 在这 2 个施氮水平下 SMBC 质量分数随时间变化的复杂程度更高, 说明中等施氮水平处理对 SMBC 质量分数随时间变化的影响更显著; N_4 施氮水平下 SMBC 质量分数随时间变化的 D 值小于 N_2 和 N_3 施氮水平下的 D 值, 说明此施氮处理对 SMBC 质量分数随时间变化的影响较微弱; 在 N_1 施氮水平下 SMBC 质量分数随时间变化的 D 值小于 N_2 , N_3 和 N_4 施氮水平下的 D 值, 说明此施氮水平下 SMBC 质量分数随时间变化的复杂程度较小, 对 SMBC 质量分数随时间变化的影响较微弱。

2.3 氮输入下 SMBC 随土壤 TOC 变化的分形特征

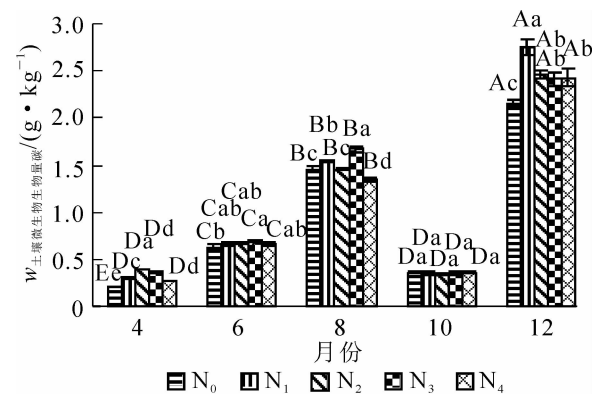
从表 3 可见: 在时间的动态变化作用下, 研究区不同施氮水平下土壤 TOC 质量分数随 SMBC 质量分数变化的 D 变化范围是 2.207~2.342, D 值普遍较大, 表明不同施氮水平下土壤 TOC 质量分数随 SMBC 质量分数变化具有较大的随机性和复杂性^[28]。不同施氮水平下的 D 从大到小依次为 N_3 , N_2 , N_4 , N_1 , N_0 。在 N_3 和 N_2 施氮水平下, D 值较大, 在这 2 个施氮水平下土壤 TOC 质量分数随 SMBC 质量分数变化

表 1 氮输入下土壤 TOC 时间动态的分形特征

Table 1 Dynamics fractal characteristics of total organic carbon under nitrogen treatment

施氮水平	拟合方程	R^2	分形维数 (PSD 法)
N_0	$y=1.390x+0.263\ 8$	0.500 4	1.805
N_1	$y=1.362x+0.307\ 7$	0.893 2*	1.819
N_2	$y=1.190x+0.523\ 5$	0.930 0**	1.905
N_3	$y=1.103x+0.482\ 9$	0.930 2*	1.949
N_4	$y=1.300x+0.359\ 6$	0.836 9*	1.851

说明: x 表示月份的对数值; y 表示土壤 TOC 质量分数的对数值; * 表示 $P < 0.05$; ** 表示 $P < 0.01$



不同大写字母表示月份之间差异显著 ($P < 0.05$); 不同小写字母表示氮处理之间差异显著 ($P < 0.05$)

图 2 氮输入下杨树人工林 SMBC 的时间动态

Figure 2 Dynamics of soil microbial biomass carbon in poplar plantations under nitrogen treatment

表 2 氮输入下 SMBC 时间动态的分形特征

Table 2 Dynamics fractal characteristics of soil microbial biomass carbon under nitrogen treatment

施氮水平	拟合方程	R^2	分形维数 (PSD 法)
N_0	$y=1.544x+1.489\ 0$	0.484 7*	1.728
N_1	$y=1.368x+1.703\ 0$	0.389 1*	1.816
N_2	$y=1.075x+1.967\ 0$	0.306 4*	1.963
N_3	$y=1.131x+1.926\ 0$	0.930 2*	1.935
N_4	$y=1.380x+1.660\ 0$	0.431 0*	1.810

说明: x 表示月份的对数值; y 表示 SMBC 质量分数的对数值; * 表示 $P < 0.05$

的复杂程度更高,说明中等施氮水平处理对土壤 TOC 质量分数随 SMBC 质量分数变化的影响更显著; N_1 施氮水平下的 D 值小于 N_2 , N_3 和 N_4 施氮水平下的 D 值,说明 N_1 施氮水平下土壤 TOC 质量分数随 SMBC 质量分数变化的复杂程度相对较小,此施氮处理对土壤 TOC 质量分数随 SMBC 质量分数变化的影响较微弱; N_4 施氮水平下 D 值小于 N_2 和 N_3 施氮水平下的 D 值,说明 N_4 施氮水平下土壤 TOC 质量分数随 SMBC 质量分数变化的复杂程度相对较小,此施氮处理对土壤 TOC 质量分数随 SMBC 质量分数变化的影响较弱。

由表 4 可知:在不同施氮水平处理下,不同月份下土壤 TOC 质量分数随 SMBC 质量分数变化的 D 值从大到小依次为 6, 10, 4, 8, 12 月。研究区不同月份下土壤 TOC 质量分数随 SMBC 质量分数变化的 D 值变化范围是 1.650~6.149, D 值差异较大,说明土壤 TOC 质量分数随 SMBC 质量分数变化的随机性和复杂性和月份有很大的相关性^[23]。

表 3 氮输入下 SMBC 随土壤 TOC 变化的分形特征

Table 3 Dynamics fractal characteristics of soil microbial biomass carbon with total organic carbon under nitrogen treatment

施氮水平	拟合方程	R^2	P	分形维数 (PSD)法
N_0	$y=0.5865x-0.1868$	0.4382	0.2236	2.207
N_1	$y=0.4515x+0.1883$	0.4721	0.1999	2.274
N_2	$y=0.3331x+0.5938$	0.2750	0.3643	2.334
N_3	$y=0.3157x+0.5257$	0.2761	0.3632	2.342
N_4	$y=0.3431x+0.5104$	0.2579	0.3824	2.329

说明: x 表示 SMBC 质量分数的对数值; y 表示土壤 TOC 质量分数的对数值

表 4 不同月份 SMBC 随土壤 TOC 变化的分形特征

Table 4 Dynamics fractal characteristics of soil microbial biomass carbon with total organic carbon under different months

月份	拟合方程	R^2	P	分形维数 (PSD)法
4	$y=1.104x-1.7030$	0.8501	0.0258	1.948
6	$y=-7.299x+22.1300$	0.8843	0.0173	6.149
8	$y=1.408x-2.8720$	0.2905	0.3486	1.796
10	$y=-3.280x+10.0000$	0.1041	0.5965	4.140
12	$y=1.700x-4.0880$	0.4506	0.2147	1.650

说明: x 表示 SMBC 质量分数的对数值; y 表示土壤 TOC 质量分数的对数值

3 讨论

土壤的形态和演化过程都非常复杂,想要精确恰当地描述和阐释土壤属性的时空特征,运用一般的变异函数达不到对土壤时空特征定量化描述的水平^[29]。分形理论运用不同于传统技术的空间分析理论,其核心分析理念自相似理论的运用更为研究土壤各种属性的时空变异提供了一种新颖的方法^[30]。将要分析和量化的土壤理化指标利用分形维数来分析其时空特征具有简单可行的特点。

本研究结果显示: N_1 氮输入水平下土壤 TOC 质量分数随 SMBC 质量分数变化的 D 值小于 N_2 , N_3 和 N_4 氮输入水平下的 D 值,此氮输入水平对土壤 TOC 质量分数随 SMBC 质量分数变化的影响并不显著,而 N_2 和 N_3 氮输入水平对土壤 TOC 质量分数随 SMBC 质量分数变化的影响极显著。 N_2 , N_3 中等施氮水平处理下,极显著影响了土壤 SMBC 及其代谢强度,这可能是因为中等施氮水平处理促进了林地植被、地表草本植物和灌木的生长,林木凋落物和根系产物输入上升,增加了有机质的输入,为土壤微生物提供了更多的能源使微生物群落的生物量增加并且提高了其代谢强度。这与许多研究结果相一致。门中华^[31]在研究不同的硝态氮供应水平下冬小麦 *Triticum aestivum* 植株对氮素的利用水平时发现:中等氮输入下小麦植株具有最高的根系活力及氮素同化能力,这主要是由于中等水平的氮输入能够提高土壤微生物代谢强度。马慧君等^[32]在模拟氮沉降对杨树人工林土壤微生物优势种群结构影响的研究中,也得出了中等水平的氮输入能够提高土壤微生物代谢强度的结果,说明氮施加的水平在土壤肥力的增加和植物生长具有重要意义。 N_4 施氮水平下土壤 TOC 质量分数随 SMBC 质量分数变化的 D 值小于 N_2 和 N_3 氮输入水平下的 D 值,并且 N_4 氮输入处理下的土壤 TOC 质量分数随时间变化的 D 值和 SMBC 质量分数随时间变化的 D 值均小于中等水平 N_2 和 N_3 ,这说明过量氮输入可能会降低林场植物的生长量、土壤微生物生物量及其活性。王晓荣等^[33]在中亚热带栎属 *Quercus* 不同树种幼苗的生长和生物量分配对短期氮沉降的响应的研究中,发现高水平氮输入对生物量积累产生了一定的抑制作用,导致这种现象出现的原因是高

氮处理植株由培养介质中吸收的氮量、植株吸氮量、根系活力、营养液 pH 值变化均介于中氮与低氮处理之间。门中华^[31]在不同的硝态氮供应水平下冬小麦植株对氮素的利用水平的研究中也得出了这一结论。

本研究中, 不同月份土壤 TOC 质量分数随 SMBC 质量分数变化的 D 从大到小依次为 6, 10, 4, 8, 12 月, 在 6 月 D 值最大, 此时土壤 TOC 质量分数随 SMBC 质量分数变化最具随机性和复杂性。周义贵等^[34]在川西亚高山地区米亚罗林区研究发现云杉 *Picea asperata* 低效林土壤 TOC 和 SMBC 质量分数变化均在夏季达到显著水平, 导致这种现象的原因是研究区 6 月气温较高, 水分充足, 林场植被根系生长旺盛, 各种生命活动增加, 林木凋落物及根系产物输入上升, 使得 6 月土壤 TOC 最高, 此时土壤微生物新陈代谢和各种生命活动比较旺盛, 对土壤 TOC 的作用强烈。10 月植被处于生长期的末期, 植被生长利用了大量的养分, 使得林场土壤 TOC 质量分数出现了降低的趋势。KALBITZ 等^[35]在研究生物降解诱导土壤溶性有机物性质变化的实验中发现: 秋季的土壤 TOC 质量分数出现了降低的趋势, 这主要是由于此时研究区湿热多雨的气候特点, 土壤微生物的作用依旧比较强烈, 一直在减少的土壤 TOC 质量分数在土壤微生物的强烈作用下, 两者质量分数的变化呈现出复杂和随机的特性。4 月土壤微生物各项生命活动开始加强, 但损耗较高, 此时土壤 TOC 输入量也比较小, 所以 D 值较小; 8 月虽然此时土壤微生物种群数量比较大, 但大量土壤 TOC 输入下, 土壤微生物的对土壤 TOC 作用强度比 6, 10 和 4 月微弱; 12 月 D 最小, 土壤 TOC 质量分数随 SMBC 质量分数变化受到外界影响较小, 随机性和复杂性降低。周莉^[36]在岩溶环境下土壤活性有机碳和土壤呼吸动态变化的研究中发现: 在冬季时土壤 TOC 和 SMBC 质量分数受外界影响较少并出现最低值, 这主要是由于冬季气温全年最低, 微生物活性降低, 故 SMBC 和 TOC 质量分数均处于全年较低水平。

本研究应用分形理论研究了苏北沿海地区杨树人工林不同水平氮输入下土壤 TOC 和 SMBC 之间质量分数变化的关系以及土壤 TOC 质量分数、SMBC 质量分数随时间变化的情况。运用分形理论分析阐释不同施氮水平下土壤不同形式碳之间的相互关系以及随月份变化特征简单有效, 对林业生产上制定合理的施氮策略具有很大的潜力和应用前景。从现有研究成果来看, 分形理论的确提出了量化土壤属性空间分布特征的新思路, 可以成为土壤时空变化研究的重要理论基础^[37]。

4 参考文献

- [1] BIRDSEY R A, PLANTINGA A J, HEATH L S. Past and prospective carbon storage in United States forests [J]. *For Ecol Manage*, 1993, **58**(1/2): 33 - 40.
- [2] SUNDQUIST E T. The global carbon dioxide budget [J]. *Science*, 1993, **259**(5097): 934 - 941.
- [3] SPARLING G P. Ratio of microbial biomass carbon to soil organic carbon as a sensitive indicator of changes in soil organic matter [J]. *Austr J Soil Res*, 1992, **30**(2): 195 - 207.
- [4] 徐振锋, 尹华军, 赵春章, 等. 陆地生态系统凋落物分解对全球气候变暖的响应[J]. *植物生态学报*, 2009, **33**(6): 1208 - 1219.
XU Zhenfeng, YIN Huajun, ZHAO Chunzhang, *et al.* A review of responses of litter decomposition in terrestrial ecosystems to global warming [J]. *Chin J Plant Ecol*, 2009, **33**(6): 1208 - 1219.
- [5] DOOLEY S R, TRESEDER K K. The effect of fire on microbial biomass: a meta-analysis of field studies [J]. *Biogeochemistry*, 2012, **109**(1/3): 49 - 61.
- [6] BÁRCENAS-MORENO G, ROUSK J, ERLAND BÅÅTH E. Fungal and bacterial recolonisation of acid and alkaline forest soils following artificial heat treatments [J]. *Soil Biol Biochem*, 2011, **43**(5): 1023 - 1033.
- [7] 袁颖红, 樊后保, 王强, 等. 模拟氮沉降对杉木人工林土壤有效养分的影响[J]. *浙江林学院学报*, 2007, **24**(4): 437 - 444.
YUAN Yinghong, FAN Houbao, WANG Qiang, *et al.* Available nutrients with increased N deposition in soils of *Cunninghamia lanceolata* plantations [J]. *J Zhejiang For Coll*, 2007, **24**(4): 437 - 444.
- [8] 王晖, 莫江明, 鲁显楷, 等. 南亚热带森林土壤微生物量碳对氮沉降的响应[J]. *生态学报*, 2008, **28**(2): 470 - 478.
WANG Hui, MO Jiangming, LU Xiankai, *et al.* Effects of elevated nitrogen deposition on soil microbial biomass carbon

- in the main subtropical forests of southern China [J]. *Acta Ecol Sin*, 2008, **28**(2): 470 – 478.
- [9] 吴金水, 刘守龙, 童成立. 土壤有机质周转计算机模拟原理[J]. 土壤学报, 2003, **40**(5): 768 – 774.
WU Jinshui, LIU Shoulong, TONG Chengli. Principles in modelling the turnover of soil organic matter using computer simulation [J]. *Acta Pedol Sin*, 2003, **40**(5): 768 – 774.
- [10] 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, **19**(4): 523 – 526.
ZHU Zhijian, JIANG Peikun, XU Qiufang. Study on the active organic carbon in soil under different types of vegetation [J]. *For Res*, 2006, **19**(4): 523 – 526.
- [11] 刘文娜, 吴文良, 王秀斌, 等. 不同土壤类型和农业用地方式对土壤微生物量碳的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2006, **12**(3): 406 – 411.
LIU Wenna, WU Wenliang, WANG Xiubin, *et al.* Effects of soil type and land use pattern on microbial biomass carbon [J]. *Plant Nutr Fert Sci*, 2006, **12**(3): 406 – 411.
- [12] PAUL J W, BEAUCHAMP E G. Soil microbial biomass C, N mineralization, and N uptake by corn in dairy cattle slurry-and urea-amended soils [J]. *Canadian J Soil Sci*, 1996, **76**(4): 469 – 472.
- [13] BURROUGH P A. Multiscale sources of spatial variation in soil (II) a non-Brownian fractal model and its application in soil survey [J]. *Eur J Soil Sci*, 2010, **34**(3): 577 – 597.
- [14] ARMSTRONG A C. On the fractal dimensions of some transient soil properties [J]. *Eur J Soil Sci*, 2010, **37**(4): 641 – 652.
- [15] 刘洋, 张健, 闫邦国, 等. 青藏高原东缘高山森林-苔原交叉带土壤微生物生物量碳、氮和可培养微生物数量的季节动态[J]. 植物生态学报, 2012, **36**(5): 382 – 392.
LIU Yang, ZHANG Jian, YAN Bangguo, *et al.* Seasonal dynamics in soil microbial biomass carbon and nitrogen and microbial quantity in a forest-alpine tundra eco-tone, Eastern Qinghai-Tibetan Plateau, China [J]. *Chin J Plant Ecol*, 2012, **36**(5): 382 – 392.
- [16] FENN M E, JOVAN S, YUAN F, *et al.* Empirical and simulated critical loads for nitrogen deposition in California mixed conifer forests [J]. *Environ Poll*, 2008, **155**(3): 492 – 511.
- [17] LU Xiankai, MO Jianming, GUNDERSERN P, *et al.* Effect of simulated N deposition on soil exchangeable cations in three forest types of subtropical China [J]. *Pedosphere*, 2009, **19**(2): 189 – 198.
- [18] 卜丹蓉. 施用沼液和生物炭对杨树林土壤活性有机碳、氮的影响[D]. 南京: 南京林业大学, 2015.
BU Danrong. *Effects of Biogas Slurry and Biochar on Soil Labile Organic Carbon and Nitrogen in a Poplar Plantation in a Coastal Area of Northern Jiangsu, China* [D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2015
- [19] FREY S D, OLLINGER S, NADELHOFFER K, *et al.* Chronic nitrogen additions suppress decomposition and sequester soil carbon in temperate forests [J]. *Biogeochemistry*, 2014, **121**(2): 305 – 316.
- [20] 赵瑞芬, 于志勇, 程滨, 等. 不同前处理条件对土壤 NO₃-N、NH₄-N 含量影响的研究[J]. 中国农学通报, 2009, **25**(10): 174 – 177.
ZHAO Ruifen, YU Zhiyong, CHENG Bin, *et al.* Effects of pretreatment on content of soil NO₃-N, NH₄-N [J]. *Chin Agric Sci Bull*, 2009, **25**(10): 174 – 177.
- [21] 黄玉芳, 叶优良, 杨素勤. 双波长分光光度法测定土壤硝态氮的可行性研究[J]. 中国农学通报, 2009, **25**(2): 43 – 45.
HUANG Yufang, YE Youliang, YANG Suqin. Feasibility of NO₃⁻-N determination by dual wavelength spectrophotometric method [J]. *Chin Agric Sci Bull*, 2009, **25**(2): 43 – 45.
- [22] KENKEL N C, WALKER D J. Fractals and ecology [J]. *Abst Bot*, 1993, **17**(1/2): 53 – 70.
- [23] 鲁植雄, 潘君拯. 土壤强度分维研究[J]. 农业机械学报, 1993, **24**(3): 1 – 6.
LU Zhixiong, PAN Junzheng. Fractal dimensions of soil strengths [J]. *Trans Chin Soc Agric Mach*, 1993, **24**(3): 1 – 6.
- [24] 彭赛. 氮添加对杨树人工林凋落物分解过程的影响[D]. 南京: 南京林业大学, 2016.
PENG Sai. *Effects of Nitrogen Addition on Litter Decomposition in Poplar Plantations in a Coastal Area, China* [D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2016.
- [25] 肖晗冉. 氮添加与凋落物处理对苏北杨树人工林土壤动物群落结构的影响[D]. 南京: 南京林业大学, 2017.

- XIAO Hanran. *Effects of Nitrogen Additions and Litter Multiplications on Soil Fauna Community Structure in the Poplar Plantations in a Coastal Area of Eastern China* [D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2017.
- [26] BURROUGH P A. Multiscale sources of spatial variation in soil (I) the application of fractal concepts to nested levels of soil variation [J]. *Eur J Soil Sci*, 1983, **34**(3): 577 – 597.
- [27] 张法升, 刘作新. 分形理论及其在土壤空间变异研究中的应用[J]. *应用生态学报*, 2011, **22**(5): 1351 – 1358.
- ZHANG Fasheng, LIU Zuoxin. Fractal theory and its application in the analysis of soil spatial variability: a review [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2011, **22**(5): 1351 – 1358.
- [28] JENNY H. *Factors of Soil Formation: A System of Quantitative Pedology* [M]. New York: Dover Publication, Inc, 1994.
- [29] DON A, SCHUMACHER J, FREIBAUER A. Impact of tropical land-use change on soil organic carbon stocks—a meta-analysis [J]. *Glob Change Biol*, 2010, **17**(4): 1658 – 1670.
- [30] POEPLAU C, DON A, VESTERDAL L, *et al.* Temporal dynamics of soil organic carbon after land-use change in the temperate zone—carbon response functions as a model approach [J]. *Glob Change Biol*, 2011, **17**(7): 2415 – 2427.
- [31] 门中华. 冬小麦硝态氮利用的生理特征及其影响因素[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2004.
- MEN Zhonghua. *Physiological Characteristics and Influence Factor of Nitrate-N Use of Winter Wheat* [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2004.
- [32] 马慧君, 张雅坤, 许文欢, 等. 模拟氮沉降对杨树人工林土壤微生物群落碳源利用类型的影响[J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2017, **41**(5): 1 – 6.
- MA Huijun, ZHANG Yakun, XU Wenhuan, *et al.* Effects of nitrogen deposition on soil microbial community C-source metabolism of poplar plantation [J]. *J Nanjing For Univ Nat Sci Ed*, 2017, **41**(5): 1 – 6.
- [33] 王晓荣, 潘磊, 唐万鹏, 等. 氮素添加对中亚热带栎属不同树种幼苗生长及生物量分配的短期影响[J]. *东北林业大学学报*, 2014, **42**(6): 24 – 28.
- WANG Xiaorong, PAN Lei, TANG Wanpeng, *et al.* Short-term effects of nitrogen addition on seedling growth and biomass allocation with different tree species of *Quercus* in the mid-subtropics of China [J]. *J Northeast For Univ*, 2014, **42**(6): 24 – 28.
- [34] 周义贵, 郝凯婕, 李贤伟, 等. 林窗对米亚罗林区云杉低效林土壤有机碳和微生物生物量碳季节动态的影响[J]. *应用生态学报*, 2014, **25**(9): 2469 – 2476.
- ZHOU Yigui, HAO Kaijie, LI Xianwei, *et al.* Effects of forest gap on seasonal dynamics of soil organic carbon and microbial biomass carbon in *Picea asperata* forest in Miyaluo of Western Sichuan, Southwest China [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2014, **25**(9): 2469 – 2476.
- [35] KALBITZ K, SCHWESIG D, SCHMERWITZ J, *et al.* Changes in properties of soil-derived dissolved organic matter induced by biodegradation [J]. *Soil Biol Biochem*, 2003, **35**(8): 1129 – 1142.
- [36] 周莉. 岩溶环境下土壤活性有机碳和土壤呼吸动态变化及影响因子[D]. 南宁: 广西师范大学, 2008.
- ZHOU Li. *Dynamic Changes in Soil Active Organic Carbon and Soil Respiration and Influence Factors in Karst Environment* [D]. Nanning: Guangxi Normal University, 2008.
- [37] 李毅, 李敏, SI Bingcheng, 等. 土壤颗粒分布体积分形维数与数量分形维数之间的关系[J]. *农业工程学报*, 2012, **28**(23): 82 – 91.
- LI Yi, LI Min, SI Bingcheng, *et al.* Relationship between volume-based and number-based fractal dimensions of soil particle size distributions [J]. *Trans Chin Soc Agric Eng*, 2012, **28**(23): 82 – 91.