

DOI: 10.5846/stxb201503310626

景莎, 田静, M. Luke McCormack, 王晶苑, 王秋凤, 杨国栋, 郭大立, 于贵瑞. 长白山原始阔叶红松林土壤有机质组分小尺度空间异质性. 生态学报, 2016, 36(20): - .

Jing S, Tian J, M. Luke McCormack, Wang J Y, Wang Q F, Yang G D, Guo D L, Yu G R. Small-scale spatial heterogeneity of soil organic matter fractions within an original broad-leaved Korean pine forest in Changbai Mountain, China. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(20): - .

长白山原始阔叶红松林土壤有机质组分小尺度空间异质性

景莎^{1,2}, 田静^{2,*}, M. Luke McCormack², 王晶苑², 王秋凤², 杨国栋¹, 郭大立², 于贵瑞²

1 山西大学环境与资源学院, 太原 030006

2 中国科学院地理科学与资源研究所, 生态系统网络观测与模拟重点实验室, 北京 100101

摘要: 土壤有机质(SOM)对于维持生态系统生产力具有非常重要的意义, 有机质的组成、空间分布和空间关联性是影响和控制诸多生态系统过程的重要因素。应用地统计学方法, 本研究对长白山原始阔叶红松林局部尺度内 0—20 cm 土壤有机质与活性有机质的空间异质性进行了研究, 并通过交叉半方差分析探讨了二者之间的相关性。研究结果表明: (1) 总体上来说, 土壤有机碳(SOC)、全氮(TN)、颗粒态有机碳(POC)和颗粒态有机氮(PON)空间异质性较小; 而土壤微生物量碳(MBC)、微生物量氮(MBN)和表层(0—10 cm)溶解性有机碳(DOC)的空间异质性较大; (2) SOC、TN、MBC、DOC、POC 和 PON 随着深度的增加空间自相关性增加; 而溶解性有机氮(DON)的空间自相关性随深度的增加变化不大; (3) SOC 与 TN 在表层和下层(10—20 cm)均存在空间上的正相关关系; (4) SOC、TN 在表层和下层分别与 MBC、MBN、DOC、DON 和 POC 呈空间上的正相关性, 但是与 PON 之间的空间相关关系较差; (5) 不同土层深度的土壤活性有机质之间的相关关系存在差异。在表层, 除 POC、PON 外, 其余土壤活性有机质组分在空间上两两相关; 但是随着土壤深度的增加, 活性有机质变量之间在空间上两两相关。研究结果表明土壤有机质组分在长白山原始阔叶红松林小尺度内存在不同空间异质性和空间关联性, 这为人们更好的理解森林生态系统功能(如土壤养分循环)提供了重要的理论依据。

关键词: 原始阔叶红松林; 土壤有机质; 活性有机质; 空间异质性; 地统计

Small-scale spatial heterogeneity of soil organic matter fractions within an original broad-leaved Korean pine forest in Changbai Mountain, China

JING Sha^{1,2}, TIAN Jing^{2,*}, M. Luke McCormack², WANG Jingyuan², WANG Qiufeng², YANG Guodong¹, GUO Dali², YU Guirui²

1 College of Environment and Resource Science, Shanxi University, Taiyuan 030006, China

2 Key Laboratory of Ecosystem Network Observation and Modeling, Chinese Academy of Sciences (CAS); Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Beijing 100101, China

Abstract: Soil organic matter (SOM) plays an important role in the maintenance of ecosystem productivity. In particular, the fractions, spatial distribution, and spatial dependency of SOM are important factors influencing multiple ecosystem processes including nutrient cycling, retention, and availability for plant growth. In the present study, geostatistical approaches were used to study the spatial variability of total and labile SOM fractions from the soil at a depth of 0—20 cm,

基金项目: 国家自然科学基金委青年项目, 重大和国际合作项目(31400460, 31290221, 31420103917)

收稿日期: 2015-03-31; **网络出版日期:** 2015-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: tianj@igsnrr.ac.cn

in a Broad-Leaved Korean Pine forest in Changbai Mountain, China. Furthermore, the dependency between total SOM and labile organic matter was analyzed by calculating the cross-variogram. The results showed that: (1) The spatial heterogeneity of soil organic carbon (SOC), total nitrogen (TN), particulate organic carbon (POC), and particulate organic nitrogen (PON) was smaller than soil microbial biomass carbon (MBC), microbial biomass nitrogen (MBN), and the dissolved organic carbon (DOC) in the surface horizon (0–10 cm); (2) With increased soil depth, the autocorrelation of SOC, TN, MBC, DOC, POC, and PON increased, but remained unchanged for dissolved organic nitrogen (DON); (3) SOC and TN were positively correlated in space within both the 0–10 cm and 10–20 cm soil layers; (4) SOC and TN were both spatially correlated to MBC, MBN, DOC, DON, and POC, respectively, but were not related to PON; (5) The correlations between labile organic matter varied with soil depth. The labile organic matter fractions were spatially correlated with each other at all depths, except POC and PON on the surface. Our results suggest that the spatial heterogeneity and dependency of SOM fractions are different at small scales in a Broad-Leaved Korean Pine forest in Changbai Mountain, providing an important theoretical basis to understand the ecological function of soil nutrient cycling in forest ecosystems.

Key Words: Broad-leaved Korean pine forest; soil organic matter; labile soil organic matter; spatial heterogeneity; geostatistics

土壤有机质(SOM)通过直接或间接的影响土壤物理、化学和生物学性质,进而对维持长期的土壤作物生产力起着非常重要的作用。受土壤内在变异(如土壤质地和矿物质)和外生因素(如植被、施肥、耕作等)的控制和影响,土壤有机质具有很大的空间变异性^[1-2]。例如在农田、草甸、草原和森林生态系统中曾报道过土壤有机碳(SOC)、全氮(TN)的空间异质性现象^[3-7]。

土壤活性有机质是指在一定的时空条件下,受植物、微生物影响强烈、具有一定溶解性、在土壤中移动比较快、不稳定、易氧化和矿化,其形态和空间位置对植物和微生物来说活性比较高的那一部分有机质^[8]。活性有机质具有瞬时、高度敏感和周转时间短等特点,它对土壤管理实践的变化十分敏感,被认为是土壤有机质变化的早期识别指标^[9]。土壤活性有机质包括土壤微生物量,溶解性有机质(DOM),高锰酸钾氧化碳($\text{KMnO}_4\text{-C}$),颗粒态有机质(POM)等^[9]。一些相关的研究表明微生物量碳(MBC)、微生物量氮(MBN)、溶解性有机碳(DOC)和溶解性有机氮(DON)等具有空间异质性现象^[1,10-13]。但是目前大多数研究多集中在独立探究总SOM的空间变异分布规律,对活性有机质的研究多为单一类型或者是作为一个影响因子进行研究。森林生态系统地上部植物生物量和群落组成具有较大的空间变异性^[14-15],作为土壤SOM输入的重要来源,这在一定程度上可能会造成各有机质组分在森林生态系统内部存在较大的空间变异性^[16-17],但是目前总体上缺乏关于森林生态系统中活性有机质的系统研究。此外,一些学者对不同土壤变量之间的相关性进行研究,发现它们之间相关性各不相同,影响因素也颇多,如土地利用制度、耕种与否以及研究尺度等,而且某些在统计上显著相关的变量在空间上却不一定相关^[1,11,18]。因此,有必要开展森林生态系统中土壤总SOM和不同活性有机质组分的空间异质性研究以及探讨二者间的空间关系。

据此,本文的研究目标在于:(1)采用地统计学方法研究长白山原始阔叶红松林小尺度内土壤总SOM以及活性有机质的空间异质性,掌握其空间变异规律。(2)通过交叉变异函数对任意两个土壤属性变量之间的空间相关性进行分析,探索分析不同组分之间的空间关系,尤其是SOC、TN与活性有机质之间的空间关系。期望借助该研究探讨土壤有机质养分空间分布对该森林生态系统功能(如养分循环)的影响。

1 材料和方法

1.1 样地概况

研究地点位于中国科学院长白山森林生态系统定位研究站的原始阔叶红松林内,海拔700—800 m。该

区属于典型的大陆性季风气候,年均气温 2.0℃,年均降水量 700 mm。土壤为火山灰母质上发育的暗棕色森林土。

2013 年 9 月我们在原始阔叶红松林样地内靠近长白山通量塔附近选择了一 60×60 m 小区域作为研究样地 (128°28'E, 42°24'N), 该研究样地地势相对平坦和均匀。研究样地的群落为复层异龄的原始林, 平均年龄 > 200 年^[19-20]。林分蓄积量为 331.7 m³ hm⁻²^[21], 胸径 (DBH) ≥ 1 cm 的个体的密度为 2325 ind hm⁻²。经调查发现样地内植被上层乔木主要包括: 红松 (*Pinus koraiensis*)、紫椴 (*Tilia amurensis*)、色木槭 (*Acer mono*)、簇毛槭 (*Acer barbinerve*)、水曲柳 (*Fraxinus mandshurica*)、青楷槭 (*Acer tegmentosum*)、春榆 (*Ulmus japonica*)、蒙古栎 (*Quercus mongolica*) 等; 中层灌木主要有: 毛榛子 (*Corylus mandshurica*)、东北溲疏 (*Deutzia amurensis*)、东北山梅花 (*Philadelphus schrenkii*) 等; 下层草本为: 山茄子 (*Brachybotrys paridiformis*)、透骨草 (*Phryma leptostachya*)、螫麻子 (*Urtica angustifolia*)、水金凤 (*Impatiens nolitangere*) 等。

1.2 样品采集

在研究样地内, 我们采取拉丁超立方体抽样设计法进行取样^[22], 共布设 61 个采样点 (图 1)。其中样点间的最小距离为 0.49 m, 最大距离为 44 m。

取样时, 先除去表层枯枝落叶层, 然后按照图 1 所示, 在全部取样点上用土钻取样, 取样深度为 0—20 cm, 分 0—10 和 10—20 cm 两层进行。将取出的土壤样品装入自封袋, 然后 4℃ 低温保存。回到实验室后, 仔细地将肉眼可见的根去除, 然后土壤过 2 mm 筛。将用于土壤微生物量的样品 4℃ 储存, 并在一周内完成所有的样品微生物量的前提取。而用于土壤有机质和颗粒态有机质分析的样本在室温下风干。

1.3 土壤有机质组分测定

本研究有机质组分划分主要采用化学分组和物理分组方法, 具体测定方法如下:

将过 2 mm 筛后风干土壤样品用球磨机磨碎, 称取适量样品, 用元素分析仪 (ElementarVario EL III) 测定 SOC 和 TN。

微生物量碳和微生物量氮采用氯仿熏蒸浸提法^[23]

提取。首先称取过 2 mm 筛的去过根的相当于 20 g 干土的鲜土两份, 一份氯仿熏蒸 24 h, 用真空泵抽尽氯仿, 加 80 ml 0.5 mol L⁻¹ 的硫酸钾浸提半小时。另一份作为对照, 直接用 80 ml 0.5 mol L⁻¹ 的硫酸钾浸提半小时。浸提后的样品用 Multi 3100 N/C 仪 (Analytik Jena, Germany) 分析测定。

溶解性有机碳和溶解性有机氮测定方法主要依据 Jones 和 Willett 等^[24] 的方法进行: 称取过 2 mm 筛的去过根的鲜土 10 g, 放入 50 ml 离心管并加入 40 ml 0.5 mol L⁻¹ 的硫酸钾浸提液。在往复式振荡器 230 rpm 震荡 1 h, 然后用离心机 4000 rpm 离心 10 min, 再将得到的一部分溶液过 0.45 μm 滤膜, 得到过滤后溶液。溶解性碳和溶解性总氮含量的测定使用 Multi 3100 N/C (Analytik Jena, Germany) 分析仪测定。浸提后的另一部分溶液用流动分析仪分析其 NH₄⁺ 和 NO₃⁻ 含量, DON 的含量就是溶解性总氮与无机氮 (NH₄⁺ 和 NO₃⁻ 之和) 的差值。

颗粒态有机碳 (POC) 和颗粒态有机氮 (PON) 采用 Cambardella 和 Elliott^[25] 介绍的方法测定。取过 20 g 过 2 mm 筛的风干土于三角瓶中, 然后加入 100 ml 5 g L⁻¹ 的六偏磷酸钠, 在 100 rpm 下震荡 18 h, 过 0.053 mm 筛, 将筛上部分用尽量少去离子水反复冲洗收集至表面皿中, 60℃ 烘干, 然后球磨, 用元素分析仪 (ElementarVario EL III) 测定其 C 和 N 含量。

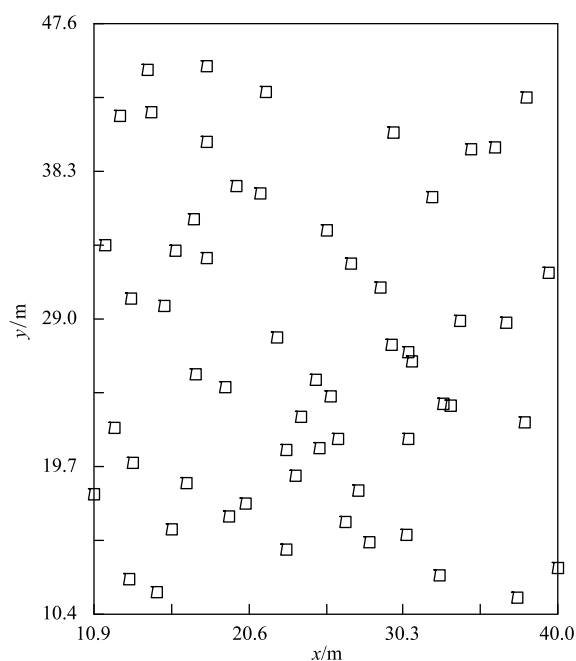


图 1 采样点位置

Fig.1 Location of sampling points

1.4 数据处理分析

通过 SPSS 软件对 0—10 cm 和 10—20 cm 的 SOC、TN 和活性有机质进行描述性统计(最大值、最小值、均值、标准差和变异系数)和 Kolmogorov-Smirnov (K-S) 检验,并对不符合正态分布 ($P < 0.05$) 的变量进行对数转换或平方根转换使之满足半方差统计分析的条件。

地统计学中的半方差函数是应用广泛的空间格局描述工具^[26],其计算公式如下:

$$r(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2$$

式中, $r(h)$ 为变异函数; h 为分离距离; x_i 是采样点的空间位置; $N(h)$ 是间隔距离为 h 的点对的数量。 $Z(x_i)$ 和 $Z(x_i + h)$ 为变量 Z 在 x_i 和 $x_i + h$ 处的取值。

半方差函数可基于区域化变量理论对地理现象分布中的空间依赖性与空间异质性进行分析,主要参数包括:块金值、基台值和变程。块金值(C_0)是空间距离为 0 时的半方差值,表示随机部分的空间变异,空间结构方差(C)表示空间自相关部分引起的空间变异。所以基台值($C_0 + C$)表示系统内最大的空间变异,是半方差值随着空间距离的增加逐渐趋于稳定时的值;变程(A_0)则给出了随机变量在空间上自相关的尺度。块金值与基台值之比 $C_0/(C_0 + C)$ 反映了随机部分引起的空间异质性占总空间异质性的比重,结构方差与基台值之比 $C/(C_0 + C)$ 则反映了结构因素对总空间异质性的贡献程度。其中 $C/(C_0 + C) \geq 75\%$ 表明具有强烈的空间自相关性; $25\% - 75\%$ 表明具有中等的空间自相关性; $\leq 25\%$ 表明空间自相关性很弱^[1]。用 GS+ 软件计算半方差函数值,进行理论曲线拟合,并使用决定系数 R^2 筛选最优理论模型。为了估算模拟土壤属性的空间分布特征,半方差分析后,用 Kriging 插值法对没有测量的地区进行插值,绘制空间分布格局图。

交叉变异函数可以用来分析两个属性变量间关系的相关范围大小和方向差异等问题。交叉变异函数的计算公式为:

$$r_{AB}(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z_A(x_i) - Z_A(x_i + h)] \cdot [Z_B(x_i) - Z_B(x_i + h)]$$

式中, $r_{AB}(h)$ 是变量 Z_A 和 Z_B 的交叉半变异函数; Z_A 是主变量; Z_B 是协变量。当交叉变异函数随着间隔距离的增大而增大并在距离 h 超过某一数值后,达到一个基台值时,就认为交叉相关关系是存在的,当 $r_{AB}(h)$ 值不随距离 h 的增加而改变,或只是随机的改变,则表示两变量间不存在相关关系^[1,27]。

2 结果与分析

2.1 SOC、TN 和活性有机质描述统计

表层(0—10 cm)SOC 含量的变异范围为 4.04—18.4 g/kg 之间,变异系数为 32.4%;而随着土壤深度的增加,SOC 含量降低,变异系数增加(表 1)。TN 呈现和 SOC 相似的空间变异规律,但是含量平均仅为 SOC 含量的 8.11%。MBC 和 MBN 的平均值在表层分别为 2359 和 320 mg/kg,下层(10—20 cm)平均值分别为 788 和 127 mg/kg;MBC 和 MBN 二者变异系数均随着土壤深度增加而变大。DOC 平均含量在表层占到 SOC 含量的 1.93%,在下层为 2.87%;DON 平均含量在表层占到 TN 含量的 3.13%,在下层为 3.42%。POC 平均含量在表层和下层分别占到 SOC 的 47.6%和 44.3%;PON 平均含量在表层和下层分别占到 TN 的 23.1%和 21.7%。样区内除土壤表层的 DON 和下层的 SOC 和 DOC 外其余土壤有机质组分均符合正态分布。

2.2 SOC、TN 和活性有机质空间异质性

半方差分析结果显示,SOC、TN 和活性有机质具有不同的空间异质性特征(表 2)。在土壤表层,SOC、TN、MBC、MBN 和 DON 最优理论模型都为球状模型,DOC 最优理论模型为指数模型,而 PON 和 POC 则为纯块金模型。在土壤下层,SOC、MBN、DOC 和 POC 最优理论模型为指数模型;TN、DON 和 PON 符合高斯模型;MBC 符合球状模型。通过基台值的比较发现 SOC、TN、POC 和 PON 空间异质性较小,而 MBC、MBN 和表层 DOC 的空间异质性较大。根据结构方差比(表 2),表层 TN、MBC、MBN 和 DON 在变程 4.02,4.27,3.74 和 3.

74m 之内具有强烈的空间自相关,并且空间自相关引起的空间异质性占总空间异质性的 99.8%,88.2%,92.5%和 97.4%。SOC 和 DOC 呈现中等程度的空间自相关,变程分别为 4.50 和 8.52 m,由随机因素引起的误差分别占总空间异质性的 38.2%和 50%。而下层 SOC、TN 和活性有机质组分都表现出强空间相关性。随着土壤深度的增加,SOC、TN、MBC、DOC、POC 和 PON 自相关性增加,DON 的空间自相关性随深度的增加变化不大,而 MBN 自相关降低。

表 1 0—10 cm 和 10—20 cm 土壤有机碳(SOC)、总氮(TN)和活性有机质统计描述($n=61$)

Table 1 Summary statistics of soil organic carbon (SOC)、total nitrogen (TN) and labile soil organic matter in the 0—10 cm and 10—20 cm layers ($n=61$)

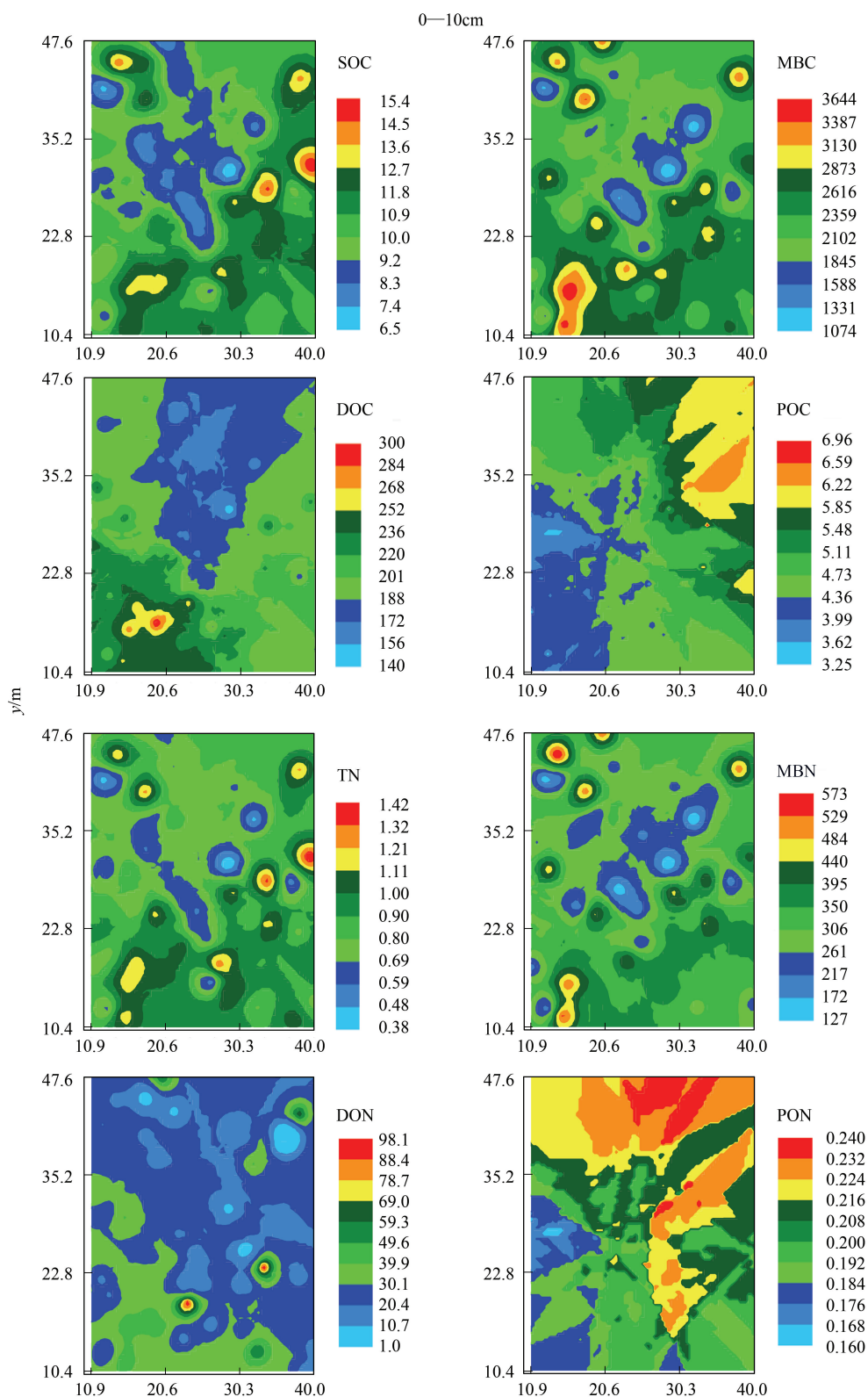
土壤属性 Soil property	深度/cm Depths	平均值 Mean	最大值 Max	最小值 Min	标准差 SD	变异系数 CV	偏度 Skewness	峰度 Kurtosis	K-S(P)
有机碳 SOC/(g/kg)	0—10	10.58	18.39	4.035	3.432	32.43	0.397	-0.641	0.355
	10—20	3.978	16.15	0.894	2.298	57.77	2.978	13.42	0.031
总氮 TN/(g/kg)	0—10	0.859	1.468	0.355	0.256	29.85	0.305	-0.677	0.375
	10—20	0.391	1.318	0.101	0.191	48.86	2.042	8.195	0.313
微生物量碳 MBC/(mg/kg)	0—10	2359	3864	896.0	741.5	31.42	0.165	-0.723	0.675
	10—20	787.7	1619	177.2	317.9	40.37	0.163	-0.338	0.996
微生物量氮 MBN/(mg/kg)	0—10	320.3	618.5	102.61	126.3	39.42	0.471	-0.499	0.340
	10—20	127.1	323.6	26.14	57.35	45.13	0.654	1.106	0.871
溶解性有机碳 DOC/(mg/kg)	0—10	204.5	395.0	84.14	60.24	29.46	0.822	0.580	0.265
	10—20	114.1	256.9	54.89	35.38	31.01	1.660	5.081	0.044
溶解性有机氮 DON/(mg/kg)	0—10	26.91	112.7	0.805	21.14	78.56	2.298	6.203	0.007
	10—20	13.38	32.99	3.018	6.240	46.65	1.028	1.313	0.356
颗粒态有机碳 POC/(g/kg)	0—10	5.039	15.30	1.705	2.397	47.57	1.731	5.124	0.099
	10—20	1.762	6.976	0.013	0.991	56.22	2.452	11.99	0.229
颗粒态有机氮 PON/(g/kg)	0—10	0.198	0.600	0.063	0.095	48.03	1.525	4.264	0.570
	10—20	0.085	0.191	0.001	0.039	45.71	0.602	0.990	0.619

表 2 0—10 cm 和 10—20 cm SOC、TN 和活性有机质的理论变异函数模型

Table 2 Parameters of variogram models for the measured soil properties in the 0—10 cm and 10—20 cm layers

土壤属性 Soil property	深度 Depths/cm	变异函数模型 Variogram model	块金值 Nugget(C_0)	基台值 Sill($C+C_0$)	变程 Range(A_0)/m	$C/(C_0+C)$	r^2
有机碳 SOC	0—10	Spherical	4.390	11.43	4.500	0.616	0.480
	10—20	Exponential	0.039	0.264	10.56	0.854	0.558
总氮 TN	0—10	Spherical	0.000	0.064	4.020	0.998	0.686
	10—20	Gaussian	0.000	0.031	2.027	1.000	0.254
微生物量碳 MBC	0—10	Spherical	63000	532000	4.270	0.882	0.788
	10—20	Spherical	100.0	94700	2.860	0.999	0.702
微生物量氮 MBN	0—10	Spherical	1100	14690	3.740	0.925	0.685
	10—20	Exponential	805.0	3217	7.440	0.750	0.792
溶解性有机碳 DOC	0—10	Exponential	1910	3821	8.520	0.500	0.302
	10—20	Exponential	0.000	0.083	11.55	0.999	0.783
溶解性有机氮 DON	0—10	Spherical	0.079	3.004	3.740	0.974	0.345
	10—20	Gaussian	1.700	37.68	5.369	0.955	0.836
颗粒态有机碳 POC	0—10	Linear	6.211	6.211	20.40	0.000	0.007
	10—20	Exponential	0.412	2.178	105.8	0.811	0.579
颗粒态有机氮 PON	0—10	Linear	0.010	0.010	20.40	0.000	0.046
	10—20	Gaussian	0.000	0.001	3.135	0.999	0.623

用克里格插值法对有机质组分的空间分布进行预测,结果表明,表层 SOC、TN、MBC、MBN、DOC 和 DON 都呈斑块状分布,而且 SOC、TN 与 MBC、MBN 的斑块形状和空间分布相似,与 POC 和 PON 有明显的差别(图 2)。在下层,有机质组分斑块密度相对表层变小,SOC、TN 与活性有机质组分斑块大小、形状和空间分布各不相同。



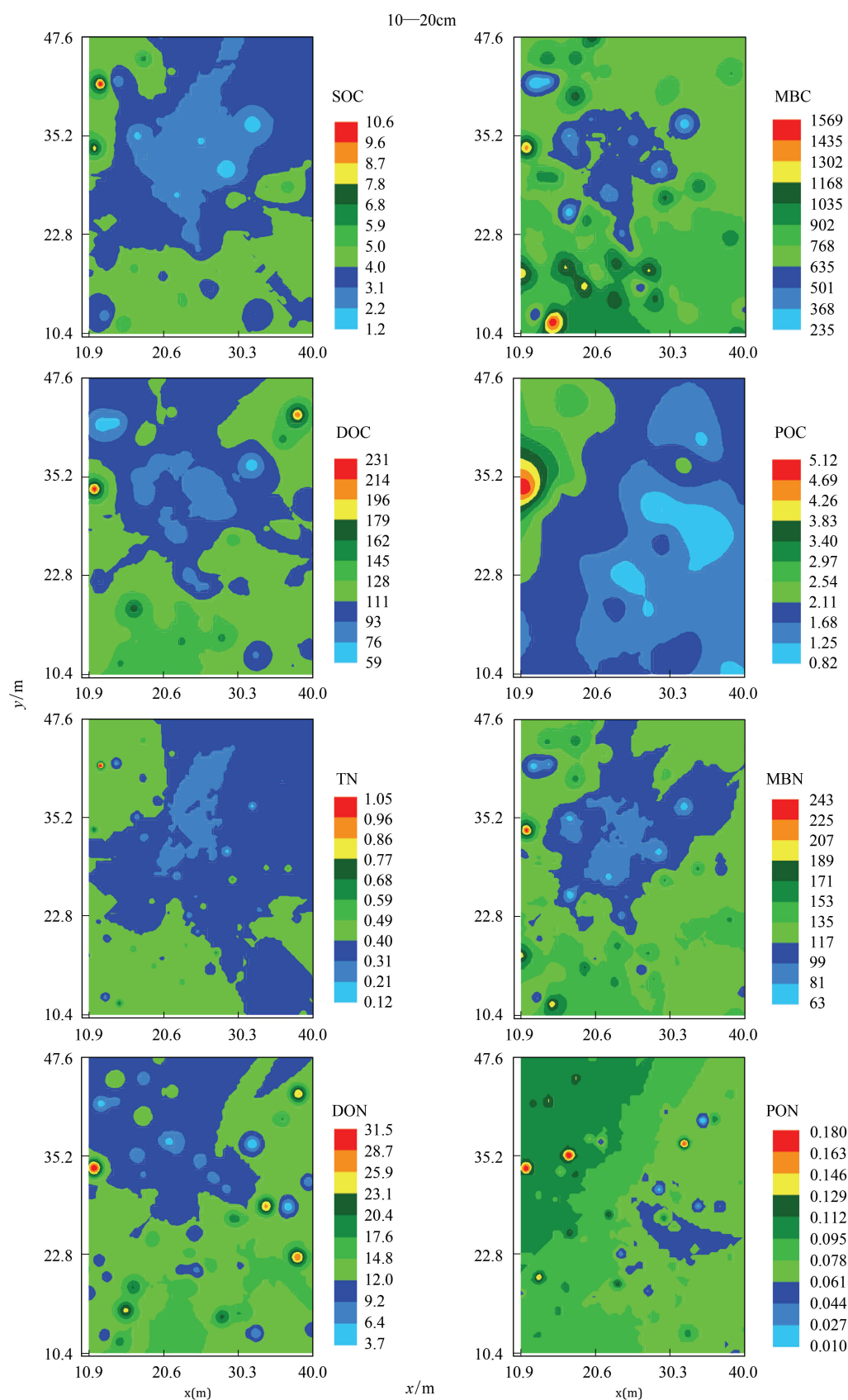


图2 0—10 cm 和 10—20 cm SOC、TN 和活性有机质克里格插值图

Fig.2 Kriging of SOC、TN and labile soil organic matter in the 0—10 cm and 10—20 cm layers

2.3 有机质组分之间的空间相关关系

交差半方差分析结果显示, SOC 与 TN 在表层和下层均呈现出空间正相关关系(图 3, 图 4)。SOC 与 MBC、MBN、DOC、DON 和 POC 在上层和下层均呈现空间相关性, SOC 与 PON 在土壤表层空间上不相关。在下层, SOC 与 PON 的交叉半方差值随着步长的增加正负交叉出现, 呈不规则波动, 这表明在某些样点 SOC 与 PON 负相关。而 TN 与活性有机质组分之间的相关关系与 SOC 一致(图 3, 图 4)。

活性有机质组分之间的交差半方差分析结果显示, 在表层(图 3), MBC、MBN、DOC 和 DON 在空间上两两相关, 而 POC 和 PON 与其他土壤活性有机质之间相关关系较差, 只与 DON 呈现出一定的空间相关性, POC 与 PON 也没有空间相关关系。在下层(图 4), 各活性有机质组分之间在空间上两两相关, 其中 PON 与 MBC、MBN、DOC 和 DON 的交叉半方差值都出现负值, PON 与 MBC 和 MBN 在空间上负相关。随着深度的增加颗粒态有机质与其他活性有机质之间的相关关系增强。

3 讨论

3.1 土壤有机质组分的空间异质性

土壤在空间上是连续分布的, 但是受土壤内在的变异和外在因素的控制和影响, 土壤理化性质在不同尺度上都呈现出明显的空间异质性, 森林土壤尤其如此。本研究结果显示长白山原始阔叶红松林小尺度范围中, SOC 和 TN 呈现一定的空间异质性, 其中, 表层 SOC 和 TN 由空间自相关引起的空间异质性分别占总空间异质性的 61.8% 和 99.8%, 下层分别为 85.4% 和 100% (表 2)。这说明 TN 具有强烈的空间自相关性, 主要受结构因素影响, 表层 SOC 的空间异质性更容易受随机因素影响。以往研究也发现土壤 SOC 在森林生态系统内部存在一定的空间变异性^[16-17]。森林生态系统地上部植物生物量和群落组成具有较大的空间变异性^[14-15], 这可能会影响地表凋落物或者根系在土壤空间上的分布, 作为土壤有机质输入的重要来源, 进一步可能引起表层土壤有机质在空间上的异质性。我们的结果也证实随机性因素对 SOC 空间异质性的影响随着土层深度的增加而降低(表 2)。而这种土壤有机质养分的空间异质性可能会进一步影响该生态系统地表植物多样性, 进而影响生态系统的生产力状况^[28]。

土壤活性有机质是极易变动的, 森林植被类型、演替过程以及由此造成的凋落物输入类型、数量、质量和季节、温湿度、pH 等变化等都会对其产生影响, 尤其是表层土壤。有研究发现天山北部和古尔班通古特沙漠南部边缘干旱灌木丛的 MBC 表现出高度的空间自相关, 相关分析表明 MBC 的空间变异可能是由土壤水分引起的^[29]。中国亚热带丘陵红壤地区 MBC 和 MBN 表现出中等空间相关性, 但是消除趋势高程的影响后, MBN 则表现出强烈空间自相关^[11]。我们的研究结果与之相似(表 2): 长白山原始阔叶红松林样地土壤活性有机质组分(MBC、MBN 和 DON)在小尺度内呈现强空间自相关性。但是表层土壤 DOC 中度空间自相关, 尤其是 POC 和 PON 则呈纯块金模型, 主要受到随机因素的影响。在森林土壤中, 枯枝凋落物和根系分泌物含有一些小分子物质如单糖类, 而这些物质是 DOC 产生的重要来源^[30-31]。颗粒态有机质形成于植物分解过程, 主要包括一部分土壤微生物和植物残体分解形成的腐殖质, 细根对颗粒态有机质形成与分布至关重要。此外, 王树堂等^[19]研究也证实长白山阔叶红松林表层土壤木本植物细根生物量均存在异质性现象, 而且细根生物量的 75% 以上都集中在上层(0—10 cm)土壤中, 并且以活根为主。因此, 森林生态系统中地上植被组成、地下的根生物量和根际资源, 如根系分泌物的高度异质性有可能是导致土壤中 DOC 和颗粒态有机质高度变异的重要原因^[32-33]。

3.2 有机质组分之间的空间相关关系

SOC 与 TN 在不同土层均呈现空间正相关关系(图 3, 图 4)。这与以往众多学者发现的 SOC、TN 通常呈现极显著正相关关系结论一致^[34-35]。土壤总有机质和活性有机质都对土壤质量具有不同指示作用, 了解 SOC、TN 与活性有机质之间的相关关系, 可以更好地了解 SOM 降解及迁移转化过程, 指示土壤化学、物理和生物性质, 把握土壤质量动态变化, 为人类活动和决策提供依据。本研究结果显示除 PON 外, SOM 与 MBC、



图 3 0—10 cm SOC、TN 和活性有机质之间的交叉变异函数图
Fig. 3 Cross-variograms of SOC, TN and labile soil organic matter in the 0—10 cm layer



图 4 10—20 cm SOC、TN 和活性有机质之间的交叉变异函数图
Fig. 4 Cross-variograms of SOC, TN and labile soil organic matter in the 10–20 cm layer

MBN、DOC、DON 和 POC 在上层和下层都呈现正相关(图 3,图 4)。该结果表明总土壤有机质含量是活性有机质主要的决定因素^[36]。

活性有机质之间存在着必然的联系,但我们的研究结果表明,不同深度的土壤活性有机质之间的相关关系存在差异:表层 MBC、MBN、DOC 和 DON 在空间上两两相关(图 3,图 4)。以往的研究结果发现活性有机质组分之间往往呈现正相关关系^[37-38],这正好与我们的研究结果相印证。表层 POC、PON 与其他有机质组分空间相关性较差(图 3),可能是表层颗粒态有机质的较大空间异质性,影响了其与其他有机质组分之间的关系。随着土壤深度增加,所有活性有机质变量之间在空间上两两相关。下层 PON 与 MBC、MBN 在空间上负相关,只与 POC 在空间上正相关(图 4)。这说明在枯枝落叶、根系及根系分泌物等来源减少的情况下,POM 可能成为微生物量和溶解性有机质的一个重要的碳源库,在活性有机质组分转化中起着重要的作用^[9]。

综上所述,本研究证实长白山土壤有机质和活性有机质组分在长白山原始阔叶红松林小尺度内水平和垂直方向上存在不同空间异质性和关联性等特征,这对研究土壤的形成过程、结构和功能具有重要的意义,也为更好的理解森林生态系统功能(土壤养分循环)提供重要的理论依据。但是这种高度的空间变异性受自然环境(如树种和根系空间分布等)和人为干扰等因素共同作用的影响,因此下一步需要对各环境因子与土壤有机质的空间异质性和关联性进行更为深入的研究。

致谢:感谢长白山森林生态系统国家野外科学观测研究站长和工程师戴冠华和叶吉助研等对野外试验分别给予的帮助。感谢杜峰副研究员和 Eirini Katsalirou 博士对数据处理过程中遇到的问题进行帮助和解答。

参考文献 (References):

- [1] Katsalirou E, Deng S P, Nofziger D L, Gerakis A, Fuhlendorf S D. Spatial structure of microbial biomass and activity in prairie soil ecosystems. *European Journal of Soil Biology*, 2010, 46(3/4): 181-189.
- [2] 李志斌. 基于地统计学方法和 Scorpan 模型的土壤有机质空间模拟研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2010.
- [3] 武小钢, 郭晋平, 田旭平, 杨秀云. 芦芽山亚高山草甸、云杉林土壤有机碳、全氮含量的小尺度空间异质性. *生态学报*, 2013, 33(24): 7756-7764.
- [4] 乌云娜, 雒文涛, 霍光伟, 李海山, 胡高娃. 草原群落退化演替过程中微斑块土壤碳氮的空间异质动态. *生态学报*, 2014, 34(19): 5549-5557.
- [5] 马渝欣, 李徐生, 李德成, 韩志勇, 张甘霖, 李贤胜, 杨平, 何小卫, 赵燕洲, 李若清, 奎秀. 安徽省皖南山区农田表层土壤有机碳空间变异及其影响因素——以宣州区为例. *土壤通报*, 2014, 45(6): 1424-1429.
- [6] Schöning I, Totsche K U, Kögel-Knabner I. Small scale spatial variability of organic carbon stocks in litter and solum of a forested Luvisol. *Geoderma*, 2006, 136(3/4): 631-642.
- [7] 杨丹, 项文化, 方晰, 樊纲惟, 许玉庆, 文丽, 邹丽梅. 石砾-青冈常绿阔叶林土壤有机碳和全氮空间变异特征. *生态学报*, 2014, 34(12): 3452-3462.
- [8] McLauchlan K K, Hobbie S E. Comparison of labile soil organic matter fractionation techniques. *Soil Science Society of America Journal*, 2004, 68(5): 1616-1625.
- [9] Haynes R J. Labile organic matter fractions as central components of the quality of agricultural soils: an overview. *Advances in Agronomy*, 2005, 85: 221-268.
- [10] Peigné J, Vian J F, Cannavacciuolo M, Bottollier B, Chaussod R. Soil sampling based on field spatial variability of soil microbial indicators. *European Journal of Soil Biology*, 2009, 45(5/6): 488-495.
- [11] Liu S L, Li Y, Wu J S, Huang D Y, Su Y R, Wei W X. Spatial variability of soil microbial biomass carbon, nitrogen and phosphorus in a hilly red soil landscape in subtropical China. *Soil Science & Plant Nutrition*, 2010, 56(5): 693-704.
- [12] Zhao X, Wang Q, Kakubari Y. Stand-scale spatial patterns of soil microbial biomass in natural cold-temperate beech forests along an elevation gradient. *Soil Biology and Biochemistry*, 2009, 41(7): 1466-1474.
- [13] Rodríguez A, Durán J, Covelo F, Fernández-Palacios J M, Gallardo A. Spatial pattern and variability in soil N and P availability under the influence of two dominant species in a pine forest. *Plant and Soil*, 2011, 345(1/2): 211-221.
- [14] 彭晚霞. 喀斯特峰丛洼地森林植被分布格局及其维持机制研究[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2009.

- [15] 邵方丽, 余新晓, 杨志坚, 郑江坤. 北京山区典型森林土壤的养分空间变异与环境因子的关系. 应用基础与工程科学学报, 2012, 20(4): 581-591.
- [16] 杜洪业, 徐程扬, 张添咏. 阔叶红松林土壤养分空间异质地统计学分析. 东北林业大学学报, 2013, 41(10): 98-102.
- [17] 王红丽, 肖春玲, 李朝君, 李艳丽, 张文俊, 付小花, 乐毅全, 王磊. 崇明东滩湿地土壤有机碳空间分异特征及影响因素. 农业环境科学学报, 2009, 28(7): 1522-1528.
- [18] Ritz K, McNicol J W, Nunan N, Grayston S, Millard P, Atkinson D, Gollotte A, Habeshaw D, Boag B, Clegg C D, Griffiths B S, Wheatley R E, Glover L A, McCaig A E, Prosser J I. Spatial structure in soil chemical and microbiological properties in an upland grassland. FEMS Microbiology Ecology, 2004, 49(2): 191-205.
- [19] 王树堂, 韩士杰, 张军辉, 王存国, 徐媛, 李雪峰, 王树起. 长白山阔叶红松林表层土壤木本植物细根生物量及其空间分布. 应用生态学报, 2010, 21(3): 583-589.
- [20] 杨丽韞, 罗天祥, 吴松涛. 长白山原始阔叶红松林不同演替阶段地下生物量与碳、氮贮量的比较. 应用生态学报, 2005, 16(7): 1195-1199.
- [21] 夏富才, 潘春芳, 赵秀海, 何海燕, 周海城. 长白山原始阔叶红松林林下草本植物多样性格局及其影响因素. 西北植物学报, 2012, 32(2): 370-376.
- [22] Xu C G, He H S, Hu Y M, Chang Y, Li X Z, Bu R C. Latin hypercube sampling and geostatistical modeling of spatial uncertainty in a spatially explicit forest landscape model simulation. Ecological Modelling, 2005, 185(2/4): 255-269.
- [23] Wu J, Brookes P C, Jenkinson D S. Evidence for the use of a control in the fumigation-incubation method for measuring microbial biomass carbon in soil. Soil Biology and Biochemistry, 1996, 28(4/5): 511-518.
- [24] Jones D L, Willett V B. Experimental evaluation of methods to quantify dissolved organic nitrogen (DON) and dissolved organic carbon (DOC) in soil. Soil Biology and Biochemistry, 2006, 38(5): 991-999.
- [25] Cambardella C A, Elliott E T. Particulate soil organic-matter changes across a grassland cultivation sequence. Soil Science Society of America Journal, 1992, 56(3): 777-783.
- [26] 王政权. 地统计学及在生态学中的应用. 北京: 科学出版社, 1999.
- [27] Rossi R E, Mulla D J, Journel A G, Franz E H. Geostatistical tools for modeling and interpreting ecological spatial dependence. Ecological Monographs, 1992, 62(2): 277-314.
- [28] 董磊, 徐力刚, 许加星, 徐进, 王晓龙, 张奇. 鄱阳湖典型洲滩湿地土壤环境因子对植被分布影响研究. 土壤学报, 2014, 51(3): 618-626.
- [29] Wang Y G, Zhu H, Li Y. Spatial heterogeneity of soil moisture, microbial biomass carbon and soil respiration at stand scale of an arid scrubland. Environmental Earth Sciences, 2013, 70(7): 3217-3224.
- [30] Casals P, Romanyà J, Cortina J, Fons J, Bode M, Vallejo V R. Nitrogen supply rate in Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) forests of contrasting slope aspect. Plant and Soil, 1995, 62: 67-73.
- [31] Kalbitz K, Solinger S, Park J H, Michalzik B, Matzner E. Controls on the dynamics of dissolved organic matter in soils: a review. Soil Science, 2000, 165(4): 277-304.
- [32] Saetre P. Spatial patterns of ground vegetation, soil microbial biomass and activity in a mixed spruce-birch stand. Ecography, 1999, 22(2): 183-192.
- [33] McIntosh A C S, Macdonald S E, Quideau S A. Linkages between the forest floor microbial community and resource heterogeneity within mature lodgepole pine forests. Soil Biology and Biochemistry, 2013, 63: 61-72.
- [34] 张景, 蒋新革, 何介南, 吴立潮, 邓艳林, 钟杰, 肖毅峰. 森林土壤有机碳含量与不同形态氮含量的相关性. 中南林业科技大学学报, 2013, 33(7): 114-118.
- [35] 张亚茹, 欧阳旭, 褚国伟, 张倩媚, 刘世忠, 张德强, 李跃林. 鼎湖山季风常绿阔叶林土壤有机碳和全氮的空间分布. 应用生态学报, 2014, 25(1): 19-23.
- [36] Haynes R J. Labile organic matter as an indicator of organic matter quality in arable and pastoral soils in New Zealand. Soil Biology and Biochemistry, 2000, 32(2): 211-219.
- [37] Rudrappa L, Purakayastha T J, Singh D, Bhadraray S. Long-term manuring and fertilization effects on soil organic carbon pools in a Typic Haplustept of semi-arid sub-tropical India. Soil and Tillage Research, 2006, 88(1/2): 180-192.
- [38] Tian J, Lu S H, Fan M S, Li X L, Kuzyakov Y. Integrated management systems and N fertilization: effect on soil organic matter in rice-rapeseed rotation. Plant and Soil, 2013, 372(1/2): 53-63.