

# 关帝山森林土壤有机碳和氮素的空间变异特征

杨秀清, 韩有志\*

(山西农业大学林学院, 山西 太谷 030801)

**摘要:**在庞泉沟自然保护区选择3个生态功能区设置典型样地,运用经典统计学和地统计学方法研究了森林土壤有机碳、全氮及碳氮比的空间变异特征及分布格局。结果表明,随着生态系统由人工林→次生演替早期杨桦阔叶林→次生演替中后期云杉、杨、桦混交林顺向演替,土壤有机碳和全氮平均值先增加后减小,碳氮比平均值呈逐渐减小趋势。3指标变异系数在11.74%~64.71%之间,存在中等强度的变异性;人工林土壤有机碳和全氮的变程相对次生林增大,基台值相对减小,表明人工林土壤有机碳和全氮异质性程度较低,空间分布较次生林更趋于均匀化。人工林土壤有机碳、全氮及碳氮比的结构方差比在0~64.8%之间,变异具有较弱或中等强度的空间自相关性,次生林土壤上述3指标结构方差比均大于75%(云杉、杨、桦混交林中全氮略低为66.8%),表现出强的空间自相关变异,且随顺向演替的进行,各指标结构方差比呈增加趋势;kriging插值结果表明,人工林土壤有机碳、全氮及碳氮比在空间分布上破碎化程度较高,而次生林各指标则呈较规则的斑块状分布。森林土壤有机碳、全氮及碳氮比的空间变异及分布格局特征与森林演替和植被类型、植被受干扰程度及地形等因素有密切关系。

**关键词:**有机碳;氮素;空间变异;森林土壤;关帝山

中图分类号:S714.5

文献标识码:A

## Spatial Variations of Soil Organic Carbon and Nitrogen of Forestland in Guandi Mountain

YANG Xiu-qing, HAN You-zhi

(College of Forestry, Shanxi Agricultural University, Taigu 030801, Shanxi, China)

**Abstracts:** Classical statistics and geo-statistics were used to analyze the spatial variations and distribution pattern of soil organic carbon(SOC), total nitrogen(TN) and C/N ratio of forestland in three ecological areas of Pangquanguo National Nature Reserve in Guandi Mountain of Shanxi Province, China. The results showed that the SOC and TN increased firstly but fell off afterwards, the C/N decreased continually with the succession level from artificial forest to secondary broad-leaved forest composed of *Betula albo-sinensis*, *Betula platyphylla* and *Populus davidiana* in early phase succession, to secondary *Picea*, *Populus*, *Betula* mixed forest in later stage succession. The coefficient of variation of SOC, TN and C/N varied from 11.74% to 64.71% which showed medium variations. The Range of SOC and TN in artificial forest was larger but still smaller than that in secondary forest, this explained a lower variation degree and more homogeneous spatial distribution of SOC and TN in artificial forest than that in secondary forest. The structural variance ratio of SOC, TN and C/N in artificial forest was in the range of 0-64.8%, which meant a weak or medium spatial autocorrelation, while the structural variance ratio of SOC, TN and C/N in secondary forest was more than 75%, appearing high spatial autocorrelation, and structural variance ratio of the narrated above 3 index showed a increasing trend with progressive succession. Kriged maps showed that SOC, TN and C/N in artificial

收稿日期:2010-08-10

基金项目:国家自然科学基金资助项目(30972349);高等学校博士学科点专项科研基金(20091403110005)

作者简介:杨秀清(1976—),女,森林培育学博士,讲师。主要从事森林资源培育与森林生态学研究。

\*通讯作者:hanyouzhi@sxau.edu.cn

forest present a high fragmented distributions but a regular patched distributions. Forest succession, disturbance and topographic condition have important effects on spatial variation and its characteristics of SOC, TN and C/N of forestland.

**Key words:** organic carbon; nitrogen; spatial variation; forest soil; Guandi Mountain

土壤有机碳(soil organic carbon, SOC)和氮素是土壤养分的重要组成部分。在全球土壤碳储量中,森林土壤有机碳储量占到73%<sup>[1]</sup>,且土壤中有有机碳和全氮(total nitrogen, TN)的比值是森林土壤质量的敏感指标,影响着森林土壤中有有机碳和氮的循环<sup>[2]</sup>,从而成为影响森林生态系统生产力和生态系统稳定性的主要因素<sup>[3]</sup>。由于森林土壤作为森林生态系统的非生物因子,在地域上的分布有其独立性和不规则性,构成时空连续的变体,故其属性因子具有高度的空间异质性<sup>[4]</sup>。研究森林土壤性质的空间变异特征,对生态恢复过程中区域生态系统中植被与土壤间物质能量循环研究、植被多样性保护以及生态系统综合经营管理具有重要意义<sup>[5]</sup>。目前,在大中尺度下对森林土壤理化及生物学空间变异的研究已受到普遍重视<sup>[6]</sup>。国内外对林地利用方式下土壤有机碳和氮素分布特征<sup>[7-9]</sup>和空间变异研究较多<sup>[10-11]</sup>,但以生态功能区域为单元对森林土壤有机碳和氮素进行小尺度上的空间异质性研究甚少。

关帝山自然保护区森林植被类型是华北高海拔地带代表性森林类型。长期的植被—环境相互作用使该地区有着较为丰富的植物资源,形成较为完整的温带亚高山森林生态系统。但也有局部区域由于受不合理采伐、放牧及矿产资源开发等人为干扰造成植被破坏严重。近年来,该保护区已在这些区域上有针对性地开展以人工更新方式促进局部区域上的生态重建工作且卓有成效。尽管如此,与该地区其它区域上森林植被的自然恢复演替相比,其生态系统稳定性仍然较差。本文以人为干扰程度、北温带森林群落演替模式<sup>[12]</sup>及植被特征、地形等为综合评价指标,在关帝山划分出砍伐后人工更新华北落叶松(*Larix principis-rupprechtii* Mayr)林、自然恢复演替早期阶段杨桦(*Populus davidiana* Dode, *Betula platyphylla* Suk.)阔叶林、演替中后期阶段云杉(*Picea wilsonii* Mast., *P. meyeri* Rehd. et Wils.)、杨、桦混交林3个典型生态功能区域,并在其中设置样地;结合经典统计学和地统计学方法,以上述3个生态功能区域为单元分析了关帝山森林土壤有机碳和氮素在小尺度上的空间异质性特征和分布格局,对发现该地区土壤有机碳和氮素的演化过程,揭示该地

区森林演替动态中潜在的生态学规律性,了解该地区土壤与植物的关系、植被的空间格局以及各种生态过程具有重要的参考价值,并为华北地区森林生态系统经营及功能的维护提供一些基础依据。

## 1 研究地点与研究方法

### 1.1 研究地概况

研究地设在山西关帝山庞泉沟国家级自然保护区内(111°22'~111°33' E, 37°45'~37°55' N)。该研究地区属暖温带季风大陆性山地气候,年平均气温4.3℃,1月平均温度-10.2℃,7月平均温度17.5℃。年平均降水量822.6mm,年平均蒸发量1268mm<sup>[13]</sup>。3个生态功能区域分别选择在干扰强度不同、代表不同演替阶段的森林群落的典型分布地带,其中,受砍伐干扰后人工更新的华北落叶松林种植年龄为14年,林分平均高2.3m;次生杨桦阔叶林平均年龄56年,平均高15.2m,次生云杉、杨、桦混交林平均年龄68年,平均高20.2m,两次生林分自1980年该地区建立自然保护区起基本未进行人工干预。各功能区其他基本情况见表1。研究地土壤均为花岗片麻岩质山地棕色森林土。

### 1.2 样地设置

2008年7月上旬,在3个生态功能区域典型地段上各选择1块面积为50m×50m的样地,按照地统计学理论及空间格局分析中小支撑、多样点的取样设计原则<sup>[14-15]</sup>布设样方。首先将面积为50m×50m的样地等距离间隔划分为100个5m×5m的样方,然后沿样地对角线选设2个5m×5m的样方,再按照1m×1m的间隔距离,分别设立25个小样方,由此每个样地共布设148个网格样方。在每个样方左下角网格线交叉点处布设一个土壤取样点,由此每个样地共布设不同尺度(最小距离1m,最大距离70.71m)的取样点148个。然后对每个取样点进行编号,并记录样点的空间坐标值。

### 1.3 空间取样及测定

对各样地立地因子、植被状况、干扰强度等基本信息调查记录,并进行地理定位后,在各取样点上取样。土壤取样时,先除去各样点处表层枯枝落叶,然后用直径为7cm的土壤钻钻取15cm深的土芯,随

表1 关帝山3个生态功能典型研究区域森林群落基本情况

区域	海拔/m	地理坐标	坡度	坡向	群落类型	森林起源	演替阶段	干扰强度	灌、草种类*
I	1 700	37°50'N;111°28'E	10°	136°	华北落叶松林	人工林	砍伐后人工更新阶段	较强	土庄绣线菊、山刺玫;苔草、唐松草
II	2 150	37°53'N;111°25'E	45°	113°	杨桦阔叶林	次生林	自然恢复演替早期阶段	弱	蒙古荚蒾、小卫矛;糙苏、鹿蹄草、狭叶柴胡
III	2 050	37°53'N;111°25'E	30°	203°	云杉、杨、桦混交林	次生林	自然恢复演替中后期阶段	弱	小卫矛、蒙古荚蒾、灰栒子、四川忍冬、刺五加;糙苏、鹿蹄草、狭叶柴胡

\* 灌草种类栏中,土庄绣线菊 *Spiraea pubescens* Turcz.; 山刺玫 *Rosa davurica* Pall.; 苔草 *Carex rigescens* (Franch.) V. Krecz; 唐松草 *Thalictrum majus*; 蒙古荚蒾 *Viburnum mongolicum* (Poll.) Rehd.; 小卫矛 *Euonymus nanus* Bieb.; 糙苏 *Phlomis umbrosa* Turcz.; 鹿蹄草 *Pyrola rotundifolia* L.; 狭叶柴胡 *Bupleurum scorzonrifolium* Willd.; 灰栒子 *Cotoneaster acutifolius* Turcz.; 四川忍冬 *Lonicera szechuanica*; 刺五加 *Acanthopanax senticosus* (Rupr. et Maxim.) Harms

即装入封口塑料袋内低温保存备用。为减少其它环境因子的影响,土壤取样工作选择在雨后至少3~4天的晴天进行<sup>[16]</sup>。土壤有机碳采用重铬酸钾容量法—外加热法进行测定;土壤全氮采用全自动开氏定氮法进行测定<sup>[17]</sup>。

#### 1.4 数据分析方法

用SPSS13.0对土壤有机碳、全氮及碳氮比进行描述统计,以评价各指标的平均状况和总变异程度。

用GS+ Win 5进行变异函数计算,根据最优变异函数模型及其主要参数定量分析土壤有机碳、全氮及碳氮比的空间异质性特征。变异函数的计算公式<sup>[15]</sup>如下:

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

式中, $\gamma(h)$ 是变异函数, $Z$ 为区域化随机变量, $Z(x_i)$ 和 $Z(x_i + h)$ 分别为变量 $Z$ 在空间位置 $x_i$ 和 $x_i + h$ 上的取值, $N(h)$ 是取样间隔为 $h$ 时的样本对总数。依据变异函数计算结果,拟合理论模型,模型参数基台值( $C_0 + C$ )用于衡量各变量的空间异质性程度;块金值( $C_0$ )用于估计小于抽样尺度的随机变异和测量误差;结构方差比 $[C/(C_0 + C)]$ 用于衡量空间自相关因素对变量总变异的影响程度;变程( $A$ )用来估计空间自相关特性的尺度变化。

用地统计学中块段克立格(Block kriging)空间局部插值估计、模拟获得土壤有机碳、全氮及碳氮比在空间上的拓扑学分布图,描述其在空间上的分布格局特征。

## 2 结果与讨论

### 2.1 土壤有机碳、全氮和碳氮比的平均状况及总体变异

土壤有机碳、全氮、碳氮比的描述统计分析(表

2)表明,随着生态系统由人工林向次生演替早期杨桦阔叶林,再向次生演替中后期云杉、杨、桦混交林顺向演替,土壤有机碳和全氮平均值呈先增加后减小的趋势。土壤中有有机物质的输入量主要依赖于有机残体归还量的多少及有机残体的腐殖化系数;而氮素的输入量则主要依赖于植物残体的归还量及生物固氮<sup>[18]</sup>。比较3种群落可以认为,华北落叶松人工林样地人为干扰较大,林型相对单一,地表枯落物输入少;而次生林样地受人为干扰少,土壤质量保持良好,且随演替的进行林分树种组成逐渐变得复杂,有机质和养分含量相对丰富,故有机碳和全氮的含量相对人工林较高。在次生林中,杨桦落叶阔叶林中有有机残体归还土壤较云杉、杨、桦常绿—落叶混交林更彻底,所以其林下土壤有机碳和全氮平均含量较混交林更大。

了解碳氮比(C/N)的空间变异性,有助于全面阐述森林土壤质量变化的特点<sup>[19]</sup>。表2可得,3个区域内,样地土壤碳氮比均值逐渐减小,且人工林明显高于次生林。以针叶树为主的华北落叶松人工林样地凋落物中多含难以分解的木质素、单宁、树脂和蜡质等物质,且凋落的针叶密集覆盖于土壤表面形成空气不流通的环境,更有利于有机碳的积累;而在次生林中,虽然有机残体较多,但随着凋落物组分发生改变,阔叶树种的介入加速了土壤有机质的分解,土壤腐殖化程度和氮矿化能力增加,故碳氮相对比值下降。另外,凋落物本身C/N变化也是土壤C/N变化的主要原因之一,且不同群落的凋落物C/N由于覆盖率等不同也存在差异。不同生态功能区凋落物与土壤之间的碳氮循环过程和机理有待进一步研究。

变异系数大小反映样本中各观测值之间的变异程度。3个生态功能区土壤有机碳、全氮和碳氮比

变异系数在 11.74%~64.71% 之间(表 2),说明各区域的 3 指标均存在中等强度的变异性。

表 2 土壤有机碳、全氮和碳氮比的描述统计结果和变异函数理论参数

项 目	区域 I			区域 II			区域 III		
	SOC	TN	C/N	SOC	TN	C/N	SOC	TN	C/N
平均	50.22	1.02	56.19	124.76	4.52	29.38	73.51	3.29	27.74
最小值	33.48	0.20	6.93	92.71	1.84	14.95	28.36	0.40	6.90
最大值	79.83	7.45	138.93	205.56	8.80	54.77	157.12	8.78	111.52
变异系数 CV/%	11.74	64.71	36.36	14.04	30.68	23.03	29.89	46.87	60.13
模型	Sph	Lin	Exp	Sph	Exp	Exp	Sph	Sph	Sph
块金值 $C_0$	25.500	0.503	347.00	68.10	0.482	16.50	227.00	0.819	0.100
基台值( $C_0 + C$ )	72.350	0.503	694.10	316.10	1.933	66.37	1 264.90	2.466	296.60
变程 A	144.40	47.25	102.70	9.10	3.20	22.10	121.70	10.90	10.20
空间结构方差比[ $C/(C_0 + C)$ ]	0.648	0.000	0.500	0.785	0.751	0.751	0.821	0.668	1.000
决定系数	0.711	0.736	0.718	0.936	0.866	0.817	0.919	0.861	0.847
样本数	148	148	148	148	148	148	146	146	146

SOC:土壤有机碳,单位以( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )计;TN:全氮,单位以( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )计;C:结构方差;Sph:球状模型;Lin:线性模型;Exp:指数模型

## 2.2 土壤有机碳、全氮和碳氮比的空间异质性分布特征

对各区域样地土壤有机碳、全氮、碳氮比样点数据进行单样本 K-S 检验,不符合正态分布的指标进行对数转换,数据均符合正态分布后,进行地统计学的半变异函数分析。

土壤有机碳、全氮、碳氮比的变异函数分析显示(表 2 及图 1),用理论模型对各指标半变异函数进行拟合的结果很好,决定系数在 0.711~0.936 之间。说明依据这些理论模型可较好地评价 3 个生态功能区研究样地水平上土壤有机碳、全氮、碳氮比的空间结构特征。

模型参数块金值( $C_0$ )、基台值( $C_0 + C$ )和变程(A)用来衡量各指标的空间变异强度。基台值越小,变程越大,空间异质性程度则越低,表明上述各指标在土壤中的空间分布越趋于均匀化。人工林土壤有机碳和全氮的变程分析结果相对次生林增大,但其基台值却相对减小,可见该功能区土壤有机碳和全氮的空间异质性程度较低,空间分布较次生林更趋于均匀化。碳氮比变异强度的分析结果为次生云杉、杨、桦混交林>华北落叶松人工林>次生杨桦阔叶林。由于人工林受干扰程度较大,土壤运移频繁,导致各取样点土壤有机碳和全氮含量变幅相对较小,因而异质性程度较低,空间分布更趋于均匀

化;而次生林在自然恢复过程中,由于受母质、水热、立地条件等因素的影响,植被呈由简单到复杂多样化的顺向演替,生物量水平差异显著<sup>[20]</sup>;土壤肥力和植被状况相互作用,形成不同水平物质和能量的小生境,土壤质量水平存在极大差异<sup>[6]</sup>,从而增加了土壤性质的空间异质性。

空间结构方差比[ $C/(C_0 + C)$ ]反映了各指标的空间异质性组成和变异的自相关性。比值大于 75% 时,表示空间相关性强;在 25%~75% 之间,空间相关性中等;小于 25% 时空间相关性弱;比值接近零时,则说明变量在整个尺度上具有随机性变异<sup>[21]</sup>。人工林土壤有机碳、全氮及碳氮比的结构方差比在 0~64.8% 之间,变异具有较弱或中等强度的空间自相关性,次生林土壤上述 3 指标结构方差比除云杉、杨、桦混交林中全氮略低为 66.8% 外,其余均大于 75%,表现出强的空间自相关变异,且随顺向演替的进行,各指标结构方差比呈增加趋势。这说明次生林中,结构性因素对有机碳、全氮及碳氮比分布的影响起主要作用,且随着进展演替的进行,结构性因素引起的变异占总变异的比增加,表明系统的物质、能量动态更趋于平衡;而人工林在人为干扰后,环境退化到一个低水平层次,物质、能量动态平衡状态,随机因素对有机碳、全氮及碳氮比分布的影响还将起主要作用。

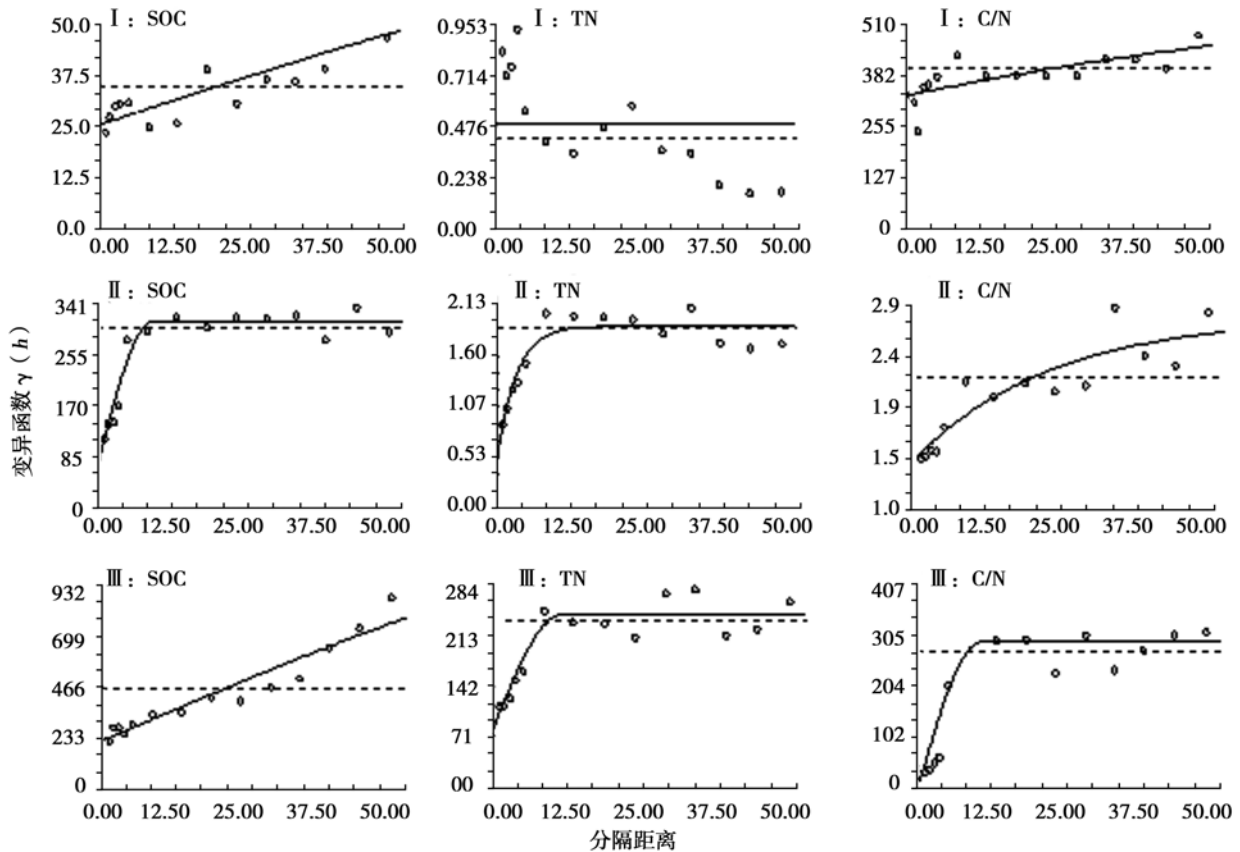


图1 土壤有机碳、全氮和碳氮比的变异函数

### 2.3 土壤有机碳、全氮和碳氮比的空间异质性分布格局

基于半方差函数的建立,应用 kriging 局部插值估计并绘制土壤有机碳、全氮和碳氮比的空间分布图(图2),更深刻、全面、直观地反映各区域土壤有机碳、全氮和碳氮比在空间上的分布特征。由图2可见,人工林土壤有机碳、全氮及碳氮比在空间分布上破碎化程度较高,而次生林各指标则呈较规则的斑块状分布。土壤是一形态和演化过程都十分复杂的自然综合体,受成土母质、地形、气候、植被等成土因素及人为干扰活动的影响,具有复杂性和空间变异性<sup>[22]</sup>。本次试验基于对关帝山森林土壤的研究,所选择的3个生态功能区域土壤均为花岗片麻岩质山地棕色森林土,但其代表了不同演替阶段、不同受干扰程度下的森林土壤。人工林受相对重度干扰,土壤性质趋于均一,因此有机碳、全氮及碳氮比的空间变异性相对较小且呈明显的破碎化。而天然的次生林受人为破坏少,且随着演替的进行,植被类型及其物种组成趋向于复杂化并逐渐向稳定的顶极群落过渡,森林植被的这些变化同时又影响着土壤的形成、分布和理化特性,改变着

水、热分配和转移<sup>[23]</sup>。其共同的因素密切联系,相互影响,使土壤环境具有高度的异质性,并处于稳定的系统动态平衡状态下。因此,次生林土壤有机碳、全氮及碳氮比在空间上呈较规则的斑块状分布。

另外,地形差异也是引起土壤有机碳、全氮及碳氮比空间异质性的重要原因。本研究中,3个生态功能区样地间坡度、坡向都有较大差异,这些差异通过影响水热条件和成土物质的再分配而影响土壤性质的空间分布。有关地形因素对森林土壤有机碳、全氮及碳氮比空间异质性的影响有待更详细地进一步取样研究。

### 3 结语

(1) 干扰和植被类型影响土壤有机碳、全氮含量及碳氮比,其平均值随生态系统由人工林→次生演替早期杨桦阔叶林→次生演替中后期云杉、杨、桦混交林顺向演替,土壤有机碳和全氮平均值先增加后减小,碳氮比平均值呈逐渐减小趋势。3指标变异系数在11.74%~64.71%之间,均存在一定程度的变异性。

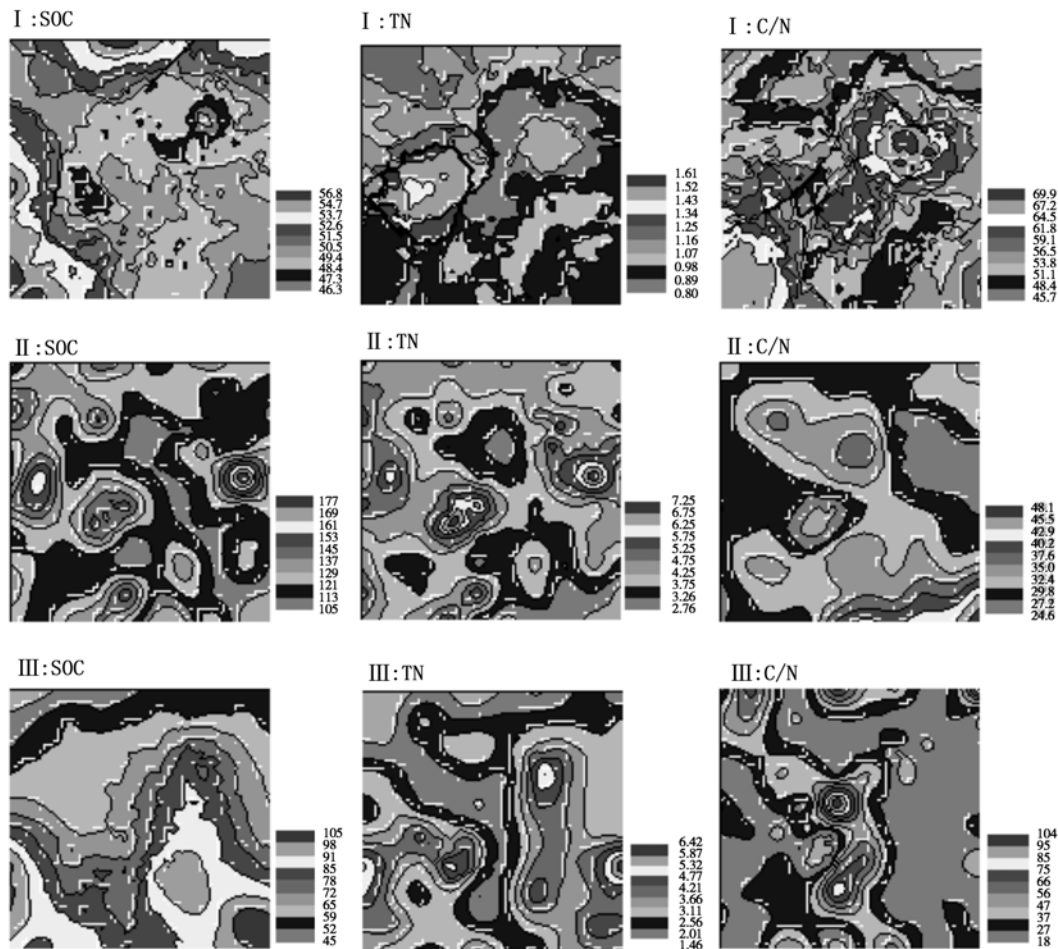


图2 土壤有机碳、全氮和碳氮比的空间分布格局

(2)人工林土壤有机碳和全氮的变程相对次生林增大,基台值相对减小,表明人工林土壤有机碳和全氮异质性程度较低,空间分布较次生林更趋于均匀化。人工林土壤有机碳、全氮及碳氮比的结构方差比在0~64.8%之间,变异具有较弱或中等强度的空间自相关性,次生林土壤上述3指标结构方差比均大于75%(云杉、杨、桦混交林中全氮略低为66.8%),表现出强的空间自相关变异,且随顺向演替的进行,各指标结构方差比呈增加趋势。

(3)kriging插值结果表明,人工林土壤有机碳、全氮及碳氮比在空间分布上破碎化程度较高,而次生林各指标则呈较规则的斑块状分布。

(4)本次研究初步说明森林土壤有机碳、全氮及碳氮比的空间变异及分布格局特征与森林演替和植被类型、植被受干扰程度及地形等因素有密切关系。但由于本次试验并没有做试验区上的重复处理,且土壤取样深度仅为表层15 cm,对土壤垂直结构上有机碳和氮素的空间变异没有做更多探讨,也

未能对地区森林土壤有机碳和氮素空间变异的季节动态特征做出全面的阐述,进一步的工作有待继续完成,因此要全面深入地研究关帝山森林土壤有机碳和氮素的时空异质性特征及其影响因素,还需要进行长期的定位研究和进一步的补充说明。

#### 参考文献:

- [1] 郭然,王效科,刘康,等. 樟子松林下土壤有机碳和全氮储量研究[J]. 土壤, 2004, 36(2): 192-196
- [2] 任书杰,曹明奎,陶波. 陆地生态系统氮状态对碳环境的限制作用研究进展[J]. 地理科学进展, 2006, 25(4): 58-67
- [3] 吴海云,曾馥平,宋同清,等. 喀斯特峰丛洼地土壤有机碳和氮素空间变异特征[J]. 植物营养与肥料学报, 2009, 15(5): 1029-1036
- [4] 范亚宁,党蕊娟,李世清,等. 云雾山草地土壤氮素及有机碳空间变异特征[J]. 水土保持研究, 2007, 14(4): 82-86
- [5] 雷能忠,蒋锦刚,黄大鹏. 杭埠河流域土壤全氮和有机质的空间变异特征[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 2008, 47(2): 300-304
- [6] 宋同清,彭晚霞,曾馥平,等. 桂西北喀斯特人为干扰区植被的演

- 替规律与更新策略[J]. 山地学报, 2008, 26 (5): 597 - 604
- [7] 袁海伟, 苏以荣, 郑 华. 喀斯特峰丛洼地不同土地利用类型土壤有机碳和氮素分布特征[J]. 生态学杂志, 2007, 26 (10): 1579 - 1584
- [8] 贾晓红, 李新荣, 李元寿. 干旱沙区植被恢复中土壤碳氮变化规律[J]. 植物生态学报, 2007, 31 (1): 66 - 74
- [9] Solomon D, Lehmann J, Zech W. Land use effects on soil organic matter properties of chromic latosols in semi arid northern Tanzania carbon, nitrogen, lignin and carbohydrates [J]. *Agriculture, Ecosystems&Environment*, 2000, 78: 203 - 213
- [10] Lopez-Granados F, Jurado-Exposito M, Atenciano S, *et al.* Spatial variability of agricultural soil properties in southern Spain[J]. *Plant Soil*, 2002, 246: 97 - 105
- [11] 姜 勇, 张玉革, 梁玉举, 等. 沈阳市苏家屯区耕层土壤养分空间变异性研究[J]. *应用生态学报*, 2003, 14 (10): 1673 - 1676
- [12] 高润梅, 郭晋平. 文峪河上游河岸林的演替分析与预测[J]. *生态学报*, 2010, 30 (6): 1564 - 1572
- [13] 杨秀清, 韩有志, 李 乐, 等. 华北山地典型天然次生林土壤氮素空间异质性对落叶松幼苗更新的影响[J]. *生态学报*, 2009, 29 (9): 4656 - 4664
- [14] 孙志虎, 王庆成. 水曲柳人工林土壤养分的空间异质性研究[J]. *水土保持学报*, 2007, 21 (2): 81 - 84
- [15] 王政权. 地统计学及在生态学中的应用[M]. 北京: 科学出版社, 1999
- [16] 谷加存, 王政权, 韩有志. 采伐干扰对帽儿山天然次生林土壤表层水分空间异质性的影响[J]. *生态学报*, 2005, 25 (8): 2001 - 2009
- [17] 崔晓阳. 森林土壤现代试验分析技术[M]. 哈尔滨: 东北林业大学出版社, 1998
- [18] 熊汉锋, 王运华. 梁子湖湿地土壤养分的空间异质性 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2005, 11(5): 584 - 589
- [19] 齐雁冰, 黄 标, 顾志权, 等. 长江三角洲典型区农田土壤碳氮比值的演变趋势及其环境意义[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2008, 27 (1): 50 - 56
- [20] 曾馥平, 彭晚霞, 宋同清, 等. 桂西北喀斯特人为干扰区自然恢复22年后群落特征[J]. *生态学报*, 2007, 27 (12): 5110 - 5119
- [21] Robertson G P. Soil resources, microbial activity, and primary production across an agricultural ecosystem [J]. *Ecological Application*, 1997, 7: 158 - 170
- [22] 王炜明. 基于 GIS 的地统计学方法在土壤科学中的应用[J]. *中国农学通报*, 2007, 23 (5): 404 - 408
- [23] 蒋忠诚. 岩溶峰丛洼地生态重建[M]. 北京: 地质出版社, 2007