植物营养与肥料学报 2009,15(5): 1029-1036
Plant Nutrition and Fertilizer Science

喀斯特峰丛洼地土壤有机碳和氮素空间变异特征

吴海勇[1,2,3], 曾馥平[2], 宋同清[2], 彭晚霞[2,4], 黎星辉[1,2*], 欧阳资文[2,4]
(1 南京农业大学茶学研究所,江苏南京 210095; 2 中国科学院亚热带农业生态研究所,湖南长沙 410125;
3 湖南省土壤肥料研究所,湖南长沙 410125; 4 湖南农业大学生物科学技术学院,湖南长沙 410128;)

摘要: 本试验在喀斯特典型峰丛洼地选择3个生态功能区,运用经典统计学和地统计学方法研究了土壤有机碳、全氮及碳氮比的空间变异特征。结果表明,随着生态系统由人工林(Ⅰ)→次生林(Ⅱ)→原生林(Ⅲ)顺向演替,土壤有机碳、全氮和碳氮比平均值均呈现增加趋势,变异系数均在10.40%～80.94%之间,存在中等强度的变异性。人工林和原生林的土壤有机碳和全氮及人工林的碳氮比的块金值/基台值均<25%,具有强烈的空间相关性; 原生林碳氮比和次生林的3个土壤性质指标的块金值/基台值在32.6%～41.7%之间,具有中等的空间相关性; 人工林各指标的变程明显大于次生林和原始林。Kriging插值结果表明,3个区域内有机碳和全氮的空间分布均具有显著的相似性,碳氮比变化则较不规则; 人工林和原生林土壤有机碳、全氮含量呈片状平缓变化分布,次生林土壤有机碳、全氮含量及碳氮比呈支离破碎的斑块状分布。高度异质性的小生境决定了土壤有机碳、全氮和碳氮比的空间结构和格局,而受重度人类活动干扰的人工林和未受干扰的原生林空间异质性较次生林降低。

关键词: 喀斯特; 峰丛洼地; 空间变异; 有机碳; 全氮; 碳氮比
中图分类号: S151.9　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1008-505X(2009)05-1029-08

Spatial variations of soil organic carbon and nitrogen in peak-cluster depression areas of Karst Region

WU Hai-yong[1,2,3], ZENG Fu-ping[2], SONG Tong-qing[2], PENG Wan-xia[2,4], LI Xing-hui[1,2*], OUYANG Zi-wen[2,4]
(*1 Tea Institute, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China;*
2 Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Changsha 410125, China;
3 Soil and Fertilizer Institute of Hunan Province, Changsha 410125, China;
4 College of Bioscience and Biotechnology, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China)

Abstract: Classical statistics and geo-statistics were used to analyze the spatial variations of soil organic carbon (SOC), total nitrogen (TN) and C/N in three ecological areas of a peak-cluster depression with the Karst topography. The results show that SOC, TN and C/N increase with the succession level from artificial forest (I) to secondary forest (II), to primary forest (III). CV. of SOC, TN and C/N vary from 10.40% to 80.94% which show medium variations. Nugget/Sill of SOC and TN in I and III, and Nugget/Sill of C/N in I are less than 25%, which indicates there are high spatial autocorrelation. Nugget/Sill of SOC and TN and C/N in II, and Nugget/Sill of C/N in III are in the range of 32.6% and 41.7%, which implies the medium spatial autocorrelation. The distances of SOC, TN and C/N in I are longer than those in II and III. Kriged maps show that the spatial distribution of SOC is similar to that of TN in the three ecological areas. However, the spatial distribution of C/N seems irregular. There are sliced smooth distributions of SOC and TN in I and III, while there are fragmentized distributions of SOC, TN and C/N in II. The spatial distributions of SOC, TN and C/N are determined by the high heterogeneity of environment, and spatial heterogeneities in human badly disturbed I and non-disturbed III become lower than that in II.

Key words: Karst; peak-cluster depression; spatial variation; soil organic carbon; total nitrogen; C/N

收稿日期: 2008-09-23　　**接受日期**: 2009-03-16
基金项目: 中国科学院西部行动计划项目(KZCX2-XB2-08-02); 国家十一五科技支撑计划(2006BAC01A10); 国家重点基础研究发展计划"973"课题(2006CB403208)资助。
作者简介: 吴海勇(1984—),男,湖南郴州人,硕士研究生,主要从事茶树栽培,恢复生态研究。E-mail: haiyongwu@163.com
*通讯作者 Tel: 025-84395182, E-mail: lxhhqw@126.com

土壤作为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,是时空连续的变异体,具有高度的空间异质性[1]。利用地统计学研究土壤性质空间变异特征在大、中尺度下对于区域土壤质量调查、土壤肥力恢复、资源合理利用等方面均具有重要价值。由于土壤性质固有的空间异质性,小尺度或田间尺度下研究土壤的理化及生物学性质也受到普遍重视[2]。土壤有机碳和氮素是土壤养分的重要组成部分,也是生态系统中极其重要的生态因子,它们不仅与土壤肥力和植物营养的生物有效性相关,影响植物的生产力,而且与土壤结构关系密切,反映土壤质量[3]。土壤有机碳与全氮比值是土壤质量的敏感指标,还影响到土壤中有机碳和氮的循环[4]。因此在景观尺度上揭示土壤有机碳、氮素及碳氮比的空间变异特征和掌握其三者分布格局对实现土壤可持续利用和区域可持续发展有着重要意义。

喀斯特峰丛洼地景观是锥状喀斯特景观的典型代表,也是热带亚热带喀斯特地区最重要的景观类型[5]。我国广西省西北喀斯特地处西南喀斯特南部的斜坡过度地带,是典型的峰丛洼地景观单元,面积约9.7万 km^2,水土流失和植被破坏严重,资源短缺,生态系统稳定性差。国内外对林地利用方式下土壤碳氮特征[3,6-7]和空间变异性[8-9]的研究较多,但是对喀斯特峰丛洼地土壤有机碳和氮素的研究甚少;且主要针对不同土地利用方式土壤有机碳和氮素分布特征[10-11],碳分布及其转移[12]研究,以生态功能区域为单元对土壤有机碳和氮素的研究未见有报道。本研究以人为干扰程度、植被特征、社会经济等为综合指标,将喀斯特峰丛洼地划分为自然保护原生林、自然恢复次生林和综合治理人工林3个生态功能区,并选择相应的典型研究区域,结合经典统计学和地统计学方法,分析了喀斯特峰丛洼地区域土壤有机碳和全氮的空间变异性和分布格局;初步探讨了其生态学过程和机制,旨在为喀斯特峰丛洼地土壤综合治理、合理利用提供基础数据,促进该区域复合脆弱生态系统的恢复与重建。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区选择地处云贵高原南部边缘斜坡地带的典型喀斯特峰丛洼地—广西环江毛南族自治县(全国石漠化综合治理县),地处107°51′~108°43′E、24°44′~25°33′N,岩溶峰丛洼地的最高峰为1028.0 m,属亚热带季风气候区。年平均气温15.7℃,1月份平均气温10.1℃,7月份平均气温28℃,历年最低气温-5.2℃,无霜期290 d;年平均日照时数145.1 h,年平均降水量1389.1 mm,集中于4~9月,占全年降水量的70%;平均蒸发量1571.1 mm,相对湿度平均为70%。3个生态功能区相应的典型研究区域选择在该县西南部岩溶峰丛洼地集中分布地带,以典型岩溶峰丛洼地为尺度,分别为下南古周综合治理人工林(I)、大才木连自然恢复次生林(II)(即中国科学院环江喀斯特生态试验站)和木论自然保护原生林(III)(以下均简称人工林、次生林、原生林),相互距离≤80 km。各功能区的基本情况见表1和图1。

表1 喀斯特峰丛洼地3个生态功能典型研究区域其他基本情况

Table 1 More details about karst depressions-among-hills in the three kinds of ecological areas

区域 Aera	干扰强度 Disturbance intensity	土壤类型 Soil type	植被类型 Vegetation type	植被盖度 Vegetation coverage	优势建群种 Constructive species
I	较强 Strong	石灰土 Limestone	人工林 Man-made forest	15%~40%	柑桔(*Citrus reticulata*)、板栗(*Castanea mollissima*)、任豆(*Zenia insignis*)、香椿(*Toona sinensis*)、灰毛浆果楝(*Cipadessa cinerascens*)、莱豆树(*Rad ermachera sinica*)
II	较弱 Weak	石灰土 Limestone	次生林 Secondary forest	40%~85%	八角枫(*Alangium chinense*)、黄荆(*Vitex negundo*)、乌桕(*Sapium sehiferum*)、红背山麻杆(*Alchornea trewioides*)、火棘(*Pyracantha fortuneana*)、老虎刺(*Pterolobium punctatum*)
III	弱 Weaker	石灰土 Limestone	原生林 Primary forest	≥85%	石山松(*Pinus calcarea*)、单性木兰(*Kmeria septentrionalis*)、石山樟(*Cinnamomum saxitilis*)、伊桐(*Itoa orientalis*)、假苹婆(*Sterculia laceolata*)、青冈栎(*Cyclobalanopsis glauca*)

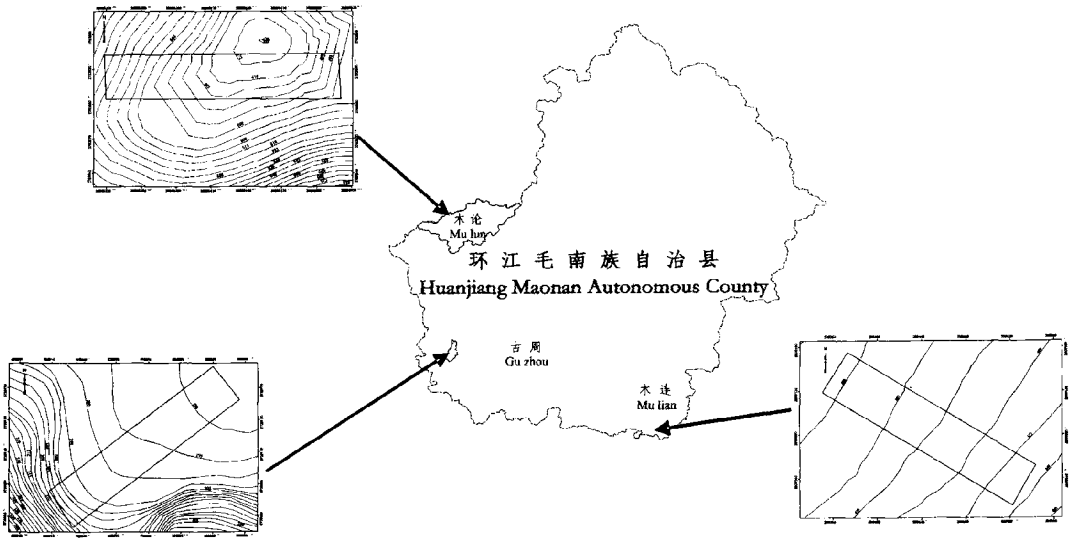

图1　研究区域图及样地等高线图

Fig.1　Map of the study area and the topography maps of the sample plots

1.2　试验方法

2007年11月，在3个生态功能区的典型峰丛洼地各选择一个较规则的坡面（整体坡度均为35°～40°），从洼地向坡顶设置一块投影面积为200 m×40 m的样地，建立200 m×40 m标准样带，划分成80个10 m×10 m网格，采样时在10 m×10 m范围内随机采取5个样本，混合后代表该样点土样。每个样本采取0—15 cm的表层土壤，坡地样点记录立地因子、植被状况、人为干扰等信息，并用手持GPS定位。土壤风干过筛备用。有机碳采用重络酸钾氧化—外加热法测定，全氮用半微量开氏法测定。

1.3　数据处理

土壤有机碳和全氮的平均值、方差和变异系数等描述性统计分析采用统计软件SPSS13.0计算。地统计学涉及的半方差函数和半方差函数模型参照文献[13]。地统计学参数采用GS+软件计算，Kriging插值图件采用Arcgis 9.2软件绘制。

2　结果与讨论

2.1　土壤有机碳、全氮和碳氮比的经典统计描述

土壤有机碳、全氮、碳氮比的描述性统计（表2）表明，有机碳和全氮的平均值随着生态系统由人工林→次生林→原生林顺向演替呈递增的趋势，这可能和3个区域的植被覆盖率直接相关。土壤中有机质及全氮的含量变化取决于有机物质及氮素的输入和输出量的相对大小，天然土壤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[14]。3个区域内，人工林人为干扰最大，林型相对单一，地表枯落物输入少；原始林是无人为干扰的顶极森林生态系统，土壤质量保持良好，基本无退化，林下土壤肥沃，有机质和养分含量十分丰富[15]，即随着植被种类和植被覆盖率的增加，生物量积累增大，归还土壤的有机残体多，有机碳和全氮的含量增加。土壤中的大量氮素以有机氮的形式存于土壤有机质库中，二者变化紧密联系[16]。相关分析表明，3个区域中的有机炭含量和全氮含量均极显著正相关（$r_{人工林SOC/TN}=0.951$；$r_{次生林SOC/TN}=0.929$；$r_{原生林SOC/TN}=0.833$）。

碳氮比（C/N）是土壤质量的敏感指标，影响土壤中有机碳和氮的循环，了解其空间变异性，有助于全面阐述土壤质量变化的特点[17]。表2看出，3个区域的土壤碳氮比均值介于9～18之间，相对较低，说明3个区域腐殖化程度较高，氮矿化能力较强。3个区域的碳氮比平均值变化趋势与有机碳、全氮平均值变化趋势一致。原生林碳氮比均值最高，可能是由于该区域有机残体较多，土壤被枯枝落叶覆盖，空气不流通的环境更利于有机碳的积累，同时也可能存在森林土壤中的“氮饱和”现象[18]。由于土壤有机碳和氮的输入主要来源于枯枝落叶及植物残体，凋落物本身的C/N变化也是土壤C/N变化的主要原因之一。但不同群落的凋落物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。

表2 土壤有机碳、全氮和碳氮比的描述性统计

Table 2 Descriptive statistics of organic carbon, total nitrogen and C/N ratio of soil

指标 Item	区域 Area	样本数 Sample No.	最小值 Min. (g/kg)	最大值 Max. (g/kg)	均值 Mean (g/kg)	方差 Variance (g^2/kg^2)	标准差 SD (g/kg)	变异系数 CV (%)	K-S检验 K-S test
有机碳 SOC	I	80	12.89	66.55	38.81	200.41	14.156	36.48	0.925
	II	80	24.19	119.46	53.04	192.99	13.89	26.19	0.103
	III	80	32.06	206.66	68.54	1254.91	35.42	51.68	0.037
	III*	80	32.06	174.81	67.90	1072.91	32.76	48.31	0.048
	III**	80	1.15	2.31	1.79	0.03	0.19	10.40	0.521
全氮 TN	I	80	1.95	7.29	4.06	1.45	1.20	29.60	0.607
	II	80	2.69	8.98	4.89	1.35	1.16	23.78	0.134
	III	80	2.26	19.28	5.61	10.43	3.23	57.56	0.055
碳氮比 C/N	I	80	6.22	12.24	9.36	1.76	1.33	14.18	0.740
	II	80	5.59	19.10	10.93	1.58	1.57	14.41	0.060
	III	80	2.54	64.19	17.24	193.21	13.90	80.94	0.191

注(Note): * 为3s法处理后数据数据描述性统计 Descriptive statistics of data which are processed using the 3s method; ** 为3s法后再取对数的数据描述性统计 Descriptive statistics of data which are processed using the 3s method and Log transformations

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、全氮和碳氮比的变异系数在10.40%~80.94%之间(表2),说明各区域的3指标都存在中等强度的变异性。原生林裸岩率大、无数的小凹槽聚集成的坡面微地形[11],土壤有机碳和全氮的积累不一,取样点有机碳和全氮含量极差最大,故而有较大的变异系数。而人工林、次生林干扰较大,土壤运移频繁,各取样点土壤有机碳和全氮含量变幅相对小,因而变异系数较小,说明人工林和次生林的土壤有机碳和全氮的分布比原始林均匀一些。

对土壤有机碳、全氮和碳氮比数据进行单样本K-S检验,除原生林的土壤有机碳外,其它均符合正态分布(检验结果均超过5%显著水平)。因此只需对原生林的土壤有机碳通过"3S法"(即以样本的均值μ与均方差σ的倍数之和$\mu \pm 3\sigma$为门槛值进行剔除)剔除离群值,然后经对数转换(表2),数据符合正态分布后,即可进行地统计学分析。

2.2 土壤有机碳、全氮和碳氮比的空间结构特征分析

运用GS+软件对3个生态功能区的土壤有机碳、全氮和碳氮比进行了半变异函数分析(表3);用理论模型对各指标半变异函数进行拟合。除原生林碳氮比外,拟合出的最佳模型的决定系数均很高,说明理论模型能较好地反映3个区域各土壤性质指标的空间特征。C_0为块金方差(块金值),表示块金效应。3个土壤指标的块金效应均为正值,说明存在着由采样误差、短距离的变异、随机和固有变异引起的各种正基底效应[13]。C为结构方差,表示由土壤母质、地形、气候等非人为区域因素引起的变异;(C_0+C)为基台值,表示系统内总的变异。块金值/基台值$[C_0/(C_0+C)]$表示空间异质性程度,<25%时变量具有强烈的空间自相关性;在25%~75%之间,变量具有中等的空间自相关性;>75%时,变量空间自相关性很弱,如该比值接近1,则说明该变量在整个尺度上具有恒定的变异[13]。表3可知,有机碳、全氮和碳氮比的$C_0/(C_0+C)$均为次生林>原生林>人工林。人工林和原生林有机碳和全氮及人工林碳氮比的$C_0/(C_0+C)$均<25%,具有强烈的空间自相关性;原生林碳氮比和次生林的3个土壤性质指标$C_0/(C_0+C)$在32.6%~41.7%之间,具有中等的空间自相关性。说明在人工林和原生林,结构性因素对有机碳和全氮分布的影响起了主要作用;而原生林块金值相对人工林较大,使得空间自相关性相对较弱,可能与"石缝"和"凹槽"地形有关。首先石块多而分布不均,取样困难,造成取样间隔内较大误差;同时石块本身通过影响周围水分等因素,使得最小取样间隔内的自然过程造成的变异增大[19]。次生林各指标的$C_0/(C_0+C)$最大,空间自相关性最弱,原因可能是该区域在人为干扰后,环境退化到一个低水平层次的物质、能量动态平衡状态。自然恢复过程中,受母质、水热、立地条件等因素的影响,植被呈草丛→草灌丛→灌丛→顶级群落的顺向演替,植被变得多样化,生物量水平差异显著[20];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[2]，明显地增加了该区域的土壤性质的空间异质性。变程表示具有相似性质的斑块的空间连续性的范围，变程以内的空间变量具有空间自相关性，变程以外则不存在空间自相关。人工林土壤有机碳、全氮和碳氮比均有较大的变程，分别为 175.28、200.23 和 226.03；而次生林却基本上相反，分别为 35.40、147.70（较原生林高）和 43.5。可见，3 个区域内土壤有机碳、全氮和碳氮比具有的空间连续性大小为：人工林 > 原生林 > 次生林。

表 3　土壤有机碳、全氮和碳氮比的半变异函数理论模型的相关参数

Table 3　Parameters of theoretical variogram models for organic carbon, total nitrogen and C/N ratio of soil

指标 Item	区域 Area	模型 Model	变程 Range (m)	块金值 Nugget C_0	基台值 Sill $C_0 + C$	块金值值/基台值 Nugget/Sill (%)	残差 Residual	决定系数 R^2	分形维数 D_0
有机碳 SOC	I	Gaussian	175.28	26.000	362.900	7.2	805.00	0.978	1.551
	II	Spherical	35.40	82.200	202.100	41.7	329.00	0.908	1.927
	III	Gaussian	83.83	0.012	0.057	21.0	2.91E-05	0.984	1.660
全氮 TN	I	Gaussian	200.23	0.433	2.876	15.1	0.0428	0.968	1.705
	II	Spherical	147.70	0.694	2.069	33.5	2.56E-03	0.997	1.813
	III	Gaussian	80.37	3.200	17.130	18.7	5.72	0.969	1.645
碳氮比 C/N	I	Gaussian	226.03	0.734	3.478	21.1	0.0513	0.952	1.797
	II	Exponential	43.50	0.968	2.505	38.6	0.89	0.459	1.924
	III	Spherical	136.80	2.980	9.148	32.6	1.59	0.898	1.842

2.3　土壤有机碳、全氮和碳氮比空间变异的 Kriging 插值

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[21]。基于半方差函数的建立，应用 Arcgis 软件中 Kriging 插值法绘制土壤有机碳、全氮和碳氮比的空间等值分布图，更深刻、全面和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。图 2 可见，3 个区域内有机碳和全氮的空间分布均具有显著的相似性，而由于腐殖化程度和氮矿化能力的不同，碳氮比的空间分布趋势与有机碳和全氮的分布趋势差异较大。人工林有机碳、全氮和碳氮比的含量随着坡度的增加而呈片状上升趋势分布，在坡顶出现峰值；原生林有机碳和全氮呈凸型片状分布，坡中含量较高，坡下和坡上位含量较低，碳氮比则呈相反的凹型零星斑块状分布趋势；次生林有机碳和全氮的空间分布趋势基本上呈凹型分布，而碳氮比则基本呈相反的分布趋势，且 3 个指标均呈零星斑块状分布趋势。图 2 还看出，各区域的土壤性质都有一定的连续性，但次生林土壤性质指标呈支离破碎的斑块状分布趋势，而人工林和原生林有机碳和全氮的空间格局变化较平缓而规则，直观地反映出了次生林的土壤性质的空间变异性大于人工林和原生林。

3 个区域的土壤有机碳、全氮和碳氮比在喀斯特峰丛洼地的成土母质、植被状况、地形地貌及人为干扰等因素相互作用下形成了其独特的空间格局。喀斯特峰丛洼地土壤造壤能力差，土层浅薄且不连续，以碱性或中性土及粗骨土为主。土壤贫瘠，岩石裸露率高，地形地貌复杂多变等特征[22]，使得区域内很小的范围内就可能形成大量的不同的微生境。生境异质性在大小不同的尺度上存在，影响着土壤的形成、分布和理化特性，改变水、热分配和转移[23]，造就了植被的类型及其物种组成的复杂变化。其共同的因素密切联系，相互影响，使土壤环境具有高度异质性。原生林植被未遭受人为破坏，为落叶阔叶混交林顶级群落，林下的土壤肥沃，有机质和养分含量十分丰富，同时也较好地保持了喀斯特原始林区的异质性。如图 2 所示，该区域土壤有机碳和全氮的变化趋势较为平缓，可能与取样尺度有较大关系，有待更小尺度的取样研究，但碳氮比的变化却是很不规则，体现出了土壤性质间比例高度的变异性。人工林重度的干扰使得土壤性质趋向于均一，各指标空间变异性相对较小且规则变化。结合研究区域植被种群及生长状况及地形地貌分析，人工林坡下主要小密度种植柑桔和板栗，凋落物少，且

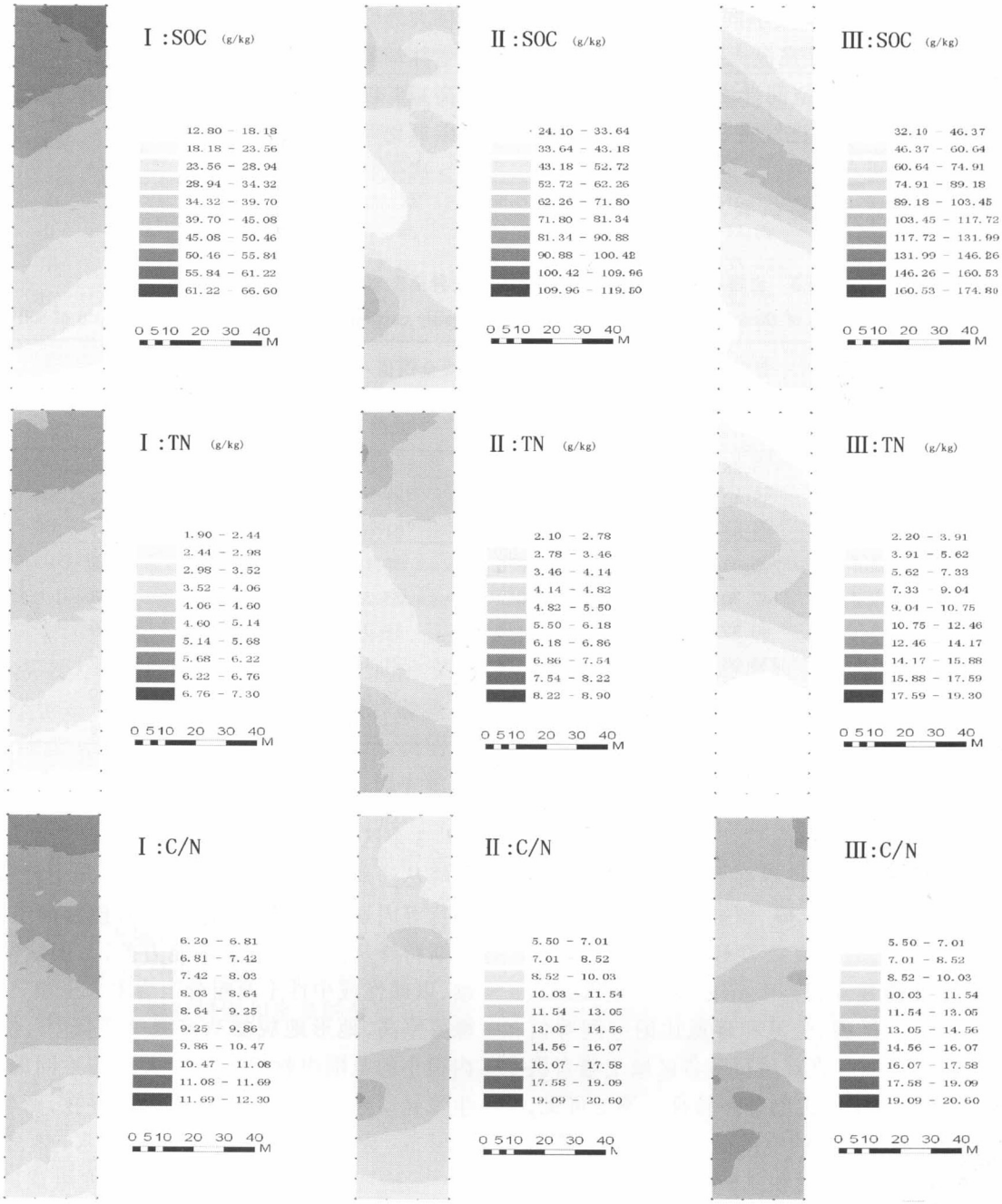

图2 土壤有机碳、全氮及碳氮比的等值线图

Fig.2 Spatial distributions of soil organic carbon, total nitrogen and C/N ratio of soil

(Ⅰ：人工林 Artificial forest；Ⅱ：次生林 Secondary forest；Ⅲ：原始林 Primary forest)

土壤裸露使有机质在阳光下分解率高，因而坡下土壤养分含量较低；随着坡度上升，植被覆盖率及种群增加，土壤养分含量也随之增加。次生林坡中原来破坏太严重，植被仍处于草灌丛阶段，坡下破坏虽也严重，但因立地条件相对较好，已形成了以八角枫为建群种的次生林群落；坡上由于地形陡峭，原来的破坏较小，以石山榕、老虎刺、藤漆为主的藤刺灌丛发育较好，所以土壤有机碳和全氮的含量随群落类型和覆盖度的变化而呈凹型分布。地形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，原始林研究区地形图可看出中间区域中坡位坡度开始平缓，土壤养分随水土迁移在此累积，且此部位大石块多而密集，石缝中土壤养分高度富集，故坡中间土壤有机碳和全氮含量较高。对人工林和次生林研究区土壤养分空间分布也存在着同样的影响，但由于植被、地貌等因素不同，影响程度相对

较小。

3 结论

1）植被覆盖率和人为干扰直接影响着土壤有机碳和全氮含量及碳氮比值，其平均值随着生态系统由人工林→次生林→原生林顺向演替呈现递增的趋势；土壤有机碳含量和全氮含量均达极显著正相关。3 个区域土壤性质指标具有的空间变异性，大小次序为次生林 > 原生林 > 人工林；中等强度的人为干扰提高了土壤性质的空间变异性。

2）喀斯特峰丛洼地的植被种类和覆盖率、地形地貌，人为干扰等因素共同决定了 3 个生态功能区有机碳和全氮及碳氮比的空间分布。人工林区有机碳、全氮含量和碳氮比值的含量随着坡度的增加而呈片状上升趋势，在坡顶出现峰值，变化较平缓；原生林有机碳和全氮呈凸型片状分布，在坡中含量较高，坡下和坡上含量较低，碳氮比则呈相反的凹型零星斑块状分布趋势；次生林有机碳和全氮的空间分布趋势基本上呈凹型分布，而碳氮比则呈基本相反的分布趋势，且 3 个指标均呈支离破碎的斑块状分布。

3）喀斯特峰丛洼地区域小生境的存在，增加了土壤空间异质性。生态恢复重建过程中可以在更小尺度上研究其生态过程及作用机理，这对区域生态系统中植被与土壤间物质能量循环研究、植被多样性保护和水土综合管理有着重大的意义。

参 考 文 献：

[1] 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.
Fan Y N, Dang R J, Li S Q *et al*. Spatial variability of soil organic carbon and total nitrogen in Yunwu mountains grassland in Locss Plateau[J]. Res. Soil Water Conserv., 2007, 14(4): 82-86.

[2] 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.
Song T Q, Peng W X, Zeng F P *et al*. Vegetation succession rule andregeneration stratigies in disturbed Karst Area, Northwest Guangxi [J]. J. Mount. Sci., 2008, 26(5): 597-604.

[3] 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.
Jia X H, Li X R, LI Y S. Soil organic carbon and nitrogen dynamics during the re-vegetation process in the arid desert region [J]. J. Pant Ecol., 2007, 31(1): 66-74.

[4] 任书杰，曹明奎，陶波．陆地生态系统氮状态对碳循环的限制作用研究进展[J]．地理科学进展，2006，25(4)：58-67.
Ren S J, Cao M K, Tao B. The effect of nitrogen limitation on terrestrial ecosystem carbon cycle: a review[J]. Prog. Geog., 2006, 25 (4): 58-67.

[5] 杨明德，梁红．峰丛洼地形成动力过程与水资源开发利用[J]．中国岩溶，2002，19(1)：44-51.
Yang M D, Liang H. The process of evolution dynamic of cone Karsrt and the exploitation of the water resource[J]. Carsol. Sin., 2002, 19 (1): 44-51.

[6] Delcourt H R, Harris W F. Carbon budget of the south - eastern US biota, analysis of historical change in trend from source to sink [J]. Sci., 1980, 210: 321-323.

[7] Solomon D, Lehman J, Zeeh W. Land use effects on soil organic matter properties of chromic lavishly in semi arid northern Tanzania carbon, nitrogen, lignin and carbon ydrates[J]. Agric., Ecosyst. Environ., 2000, 78: 203-213.

[8] 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.

[9] 姜勇，张玉革，梁文举，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)：1673-167.
Jiang Y, Zhang Y G, Lang W G *et al*. Spatial variability of soil nutrients in cultivated surface soil of Sujiatun district, Shenyang city [J]. Chin. J. Appl. Ecol., 2003, 14(10): 1673-1676.

[10] 张伟，陈洪松，王克林．喀斯特峰丛洼地土壤养分空间分异特征及影响因子分析[J]．中国农业科学，2006，39(9)：1828-1835.
Zhang W, Chen H S, Wang K L. The heterogeneity of soil nutrients and their influencing factors in peak-cluster depression areas of Karst region [J]. Sci. Agric. Sin., 2006, 39(9): 1828-1835.

[11] 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.
Yuan H W, Su Y R, Zhen H. Distribution characteristics of soil organic carbon and nitrogen in peak-duster depression landuse of Karst Region[J]. Chin. J. Ecol., 2007, 26(10): 1579-1584.

[12] 潘根兴，孙玉华，滕永忠，等．湿润亚热带峰丛洼地岩溶土壤系统中碳分布及其转移[J]．应用生态报，2000，11(1)：69-72.
Pan G X, Sun Y H, Teng Y Z *et al*. Distribution and transferring of carbon in Karst soil system of peak forest depression in hamld subtropical region [J]. Chin. J. Appl. Ecol., 2000, 11(1): 69-72.

[13] 王政权．地统计学及其在生态学中的应用[M]．北京：科学出版社，1999．135-149.
Wang Z Q. Geostatistics and its application to ecology [M]. Beijing: Sci. Press, 1999. 135-149.

[14] 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.
Xiong H F, Wang Y H. Spatial variability of soil nutrients in wetland of Liangzi Lake[J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2005, 11(5): 584-589.

[15] 赵中秋，后立胜，蔡运龙．西南喀斯特地区土壤退化过程与机理探讨[J]．地学前缘，2006，13(3)：185-189.
Zhao Z Q, Hou L S, Cai Y L. The process and mechanism of soil degradation in Karst area in Southwest China [J]. Earth Sci. Front., 2006, 13(3): 185-189.

[16] 陆琦,马克明,张浩瑜,等. 三江平原退化湿地和农田土壤养分的比较研究[J]. 生态与农村环境学报,2007,23(2): 23-28.
Lu Q, Ma K M, Zhang H Y *et al*. Soil nutrients of degraded wetland and farmland in Sanjiang Plain[J]. J. Ecol. Rur. Environ., 2007, 23(2): 23-28.

[17] 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.
Qi Y B, Huang B, Gu Z Q *et al*. Spatial and temporal variation of C/N ratios of agricultural soils in typical area of Yangtze Delta Region and its environmental significance [J]. Bull. Miner., Petrol. Geochem., 2008, 27(1): 50-56.

[18] Aber J D, Nadelhoffer K J, Steudler P *et al*. Nitrogen saturation in northern forest ecosystems [J]. Bioscience, 1989, 39(6): 378-386.

[19] 张伟,陈洪松,王克林. 喀斯特地区典型峰丛洼地旱季表层土壤水分空间变异性初探[J]. 土壤学报,2006,43(4): 554-563.
Zhang W, Cheng H S, Wang K L. Spatial variability of surface soil water in typical depressions between hills in Karst region in dry season [J]. Acta Pedol. Sin., 2006, 43(4): 554-563.

[20] 曾馥平,彭晚霞,宋同清,等. 桂西北喀斯特人为干扰区植自然恢复22年后群落特征[J]. 生态学报,2007,27(12): 5110-5119.
Zeng F P, Peng W X, Song T Q *et al*. Vegetation succession rule and regegeneration strategies in disturbed Karst area, Northwest Guangxi[J]. Acta Ecol. Sin., 2007, 27(12): 5110-5119.

[21] 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.
Wang W M. Utilization of geo-statistic with GIS in soil sciences [J]. Chin. Agric. Sci. Bull., 2007, 23(5): 404-408.

[22] 袁道先. 论喀斯特环境系统[J]. 中国溶岩,1988,7(3): 179-186.
Yuan D X. Review of the Karst environmental system [J]. Carsol. Sin., 1988, 7(3): 179-186.

[23] 蒋忠诚. 岩溶峰丛洼地生态重建[M]. 北京: 地质出版社, 2007.
Jiang Z C. Ecological reconstruction of Peak-Cluster depression areas of Karst region [M]. Beijing: Geological Press, 2007.