

# 河南省土壤有机碳分布空间自相关分析\*

梁 二 王小彬 蔡典雄\*\* 刘 爽 王 燕

(中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 北京 100081)

**摘 要** 运用空间自相关方法,对河南省1958年(第1次土壤普查)和1985年(第2次土壤普查)两个时间段土壤有机碳储量分布状况进行了研究.结果表明:空间自相关指标能够比较清楚地描述河南省2次土壤普查土壤有机碳储量的地理空间变化.1958年和1985年河南省土壤有机碳总储量分别约为 $54.93 \times 10^8$  t和 $69.65 \times 10^8$  t,年均增长率达1%.土壤有机碳密度时空分布总趋势为豫东南角及豫西高于豫东,豫北及豫中介于两者之间;豫东南角单位面积土壤有机碳储量损失较快,最快损失速率达到年均1.57%;豫东单位面积土壤有机碳储量增加较快,最大增长速率达到年均5.27%.河南省单位面积土壤有机碳储量的时空变化与土壤初始含碳量密切相关,土壤初始含碳量越高,有机碳损失越快.

**关键词** 空间自相关 土壤有机碳 土壤普查

**文章编号** 1001-9332(2007)06-1305-06 **中图分类号** S159.2 **文献标识码** A

**Spatial autocorrelation analysis on soil organic carbon distribution in Henan Province.** LI-ANG Er, WANG Xiao-bin, CAI Dian-xiong, LIU Shuang, WANG Yan ( *Institute of Agriculture Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China* ). -*Chin. J. Appl. Ecol.*, 2007, 18(6): 1305-1310.

**Abstract:** With spatial autocorrelation analysis, this paper studied the temporal and spatial variations of soil organic carbon (SOC) storage in Henan Province during the period from the 1st national soil survey (1958) to the 2nd national soil survey (1985). The results showed that spatial autocorrelation indices could better describe the spatiotemporal variation of the SOC storage between the two soil surveys. The total SOC storage was  $54.93 \times 10^8$  t in 1958 and  $69.65 \times 10^8$  t in 1985, with an annual increase of 1%, and the SOC density had a trend of higher in southeast and west Henan, followed by north and central Henan, and east Henan. The SOC storage per unit area decreased more quickly in southeast Henan, with the maximum of 1.57% per year, while increased greater in east Henan, with an average rate of 5.27% per year. The spatiotemporal variation of SOC storage had a close correlation with the original SOC content, *i. e.*, the higher the original SOC content, the more greatly the SOC storage decreased.

**Key words:** spatial autocorrelation; soil organic carbon; soil survey.

## 1 引 言

在地理情形分析中,通常认为一个区域单元上的某种地理现象或某种属性值与邻近区域单元上同一现象或属性值相关.有研究认为,几乎所有空间数据都具有空间依赖或空间自相关特征<sup>[23]</sup>.空间自相关(spatial autocorrelation)分析是测试某空间单元与其周围单元间,就同种特征值,利用统计方法进行空

间自相关性程度的计算,分析这些空间单元空间分布特性的方法.空间自相关自1950年Moran等提出以来,经过许多学者的扩展和完善,形成了一些新的统计方法<sup>[1,5-6,9,13,15-16]</sup>.在处理空间数据时,空间自相关分析具有其独特的优点,已经广泛应用于许多领域的研究<sup>[3-4,8,10,12,17,22,24-25]</sup>.土壤有机碳作为陆地生态系统的重要组成部分之一,备受关注<sup>[2]</sup>.在国内,对土壤有机碳从点位试验到区域调查以及模型模拟等研究均已大量的相关文章发表<sup>[7,18-19,21,26]</sup>,然而应用空间自相关方法进行区域土壤有机碳的研究尚未见报道.研究土壤有机碳储量的变化,不但对农业生产非常重要,而且对阐明

\* 国家自然科学基金项目(40571151)、土壤与农业可持续发展国家重点实验室开放基金项目 and 资源环境与GIS北京市重点实验室开放基金资助项目.

\*\* 通讯作者. E-mail: dxcai@caas.ac.cn

2006-04-10 收稿,2006-03-15 接受.

区域土壤固碳潜力有着重要意义. 本文以河南省第1次和第2次土壤普查的土壤有机碳分布为例, 进行空间自相关分析, 以期探讨其时空演变规律及其形成原因.

## 2 研究地区与研究方法

### 2.1 自然概况

河南省位于黄河中、下游, 地处我国北亚热带与暖温带两个生物气候带的过渡地区, 年均温在  $12\text{ }^{\circ}\text{C}$  ~  $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; 年降水量约为  $800\text{ } \sim\text{ } 1\ 100\text{ mm}$ , 自北向南, 由西向东递增. 生物气候条件及土壤风化发育程度具有我国南北方的过渡特征, 母质类型和土壤类型多样. 土壤母质多为残坡积物、洪积物、冲积物以及黄土母质与红土; 土壤类型主要有黄棕壤、棕壤、褐土、潮土、砂姜黑土、盐碱土和水稻土 7 种<sup>[14]</sup>.

### 2.2 研究方法

**2.2.1 数据来源** 1958 年第 1 次土壤普查数据来源于河南省土壤普查资料以及河南省土种志, 根据各土壤类型的土壤有机碳密度及其在河南省的分布, 计算河南省 1 m 深土壤有机碳储量 ( $C_1$ ). 1985 年第 2 次土壤普查资料来源于中国地球系统科学数据共享网, 根据黄河流域数据分中心 ([www.henu.geodata.cn](http://www.henu.geodata.cn)) 提供的河南省土壤有机质含量分布图, 计算河南省 1 m 深土壤有机碳储量 ( $C_2$ ). 由于空间自相关分析要进行显著性检验, 因此本文对两时段土壤有机碳数据进行开平方处理, 使其接近正态分布.  $C_1$  和  $C_2$  的开平方处理分别表示为  $\text{SQRT}(C_1)$  和  $\text{SQRT}(C_2)$ .

**2.2.2 使用工具** 河南省数字图采用 ArcGIS 9.0 和 Geoda 9i 进行栅格化 (格子边长为  $10\text{ km}$ ); 数据统计处理使用 EXCEL、SPSS (Version 11.5) 和 SAS 6.0 软件; 空间自相关系数图以及局域空间自相关 Getis 用 LPC (Laboratory of Paleoclimatology and Climatology at the Department of Geography, University of Ottawa) 开发的 ROOKCASE 处理, 结果用 ArcGIS 9.0 地图显示.

**2.2.3 空间自相关方法** 计算空间自相关的方法有许多种, 最为常用的有 Moran's I、Geary's C、Getis、Join count 等. 这些方法各有功用, 同时也各有其优缺点. 一般分为全域型 (global spatial autocorrelation) 和区域型 (local spatial autocorrelation) 两大类. 具体公式参见相关文献<sup>[1,5]</sup>. 本文利用区域空间自相关指标结合 Moran 散点图, 将河南省土壤有机碳储量的空间格局可视化, 以便进一步研究其空间分布规

律. 依据 Geoda 生成的 Moran 散点图, 将  $(C_2 - C_1) / C_1$  划分为如下 5 种不同空间类型:

1) HH: 单元格自身与周边单元格的土壤有机碳储量均显著增高, 二者之间的空间差异程度较小.

2) LH: 单元格自身土壤有机碳储量显著降低, 而周边单元格土壤有机碳储量显著增高, 二者的空间差异程度较大.

3) LL: 单元格自身和周边单元格的土壤有机碳储量均显著降低, 二者之间的空间差异程度较小.

4) HL: 单元格自身土壤有机碳储量显著增高, 而周边单元格土壤有机碳储量显著降低, 二者的空间差异程度较大.

5) NN: 单元格自身与周边单元格的土壤有机碳储量增减不显著, 二者空间差异不显著.

## 3 结果与分析

### 3.1 土壤有机碳全域空间自相关性

利用 ArcGIS 9.0 空间统计模块 (采用固定距离带为  $10\text{ km}$ ), 对  $\text{SQRT}(C_1)$  和  $\text{SQRT}(C_2)$  进行了全域空间自相关分析. 结果表明,  $\text{SQRT}(C_1)$  的 Moran's I = 0.69, Moran's I 的统计检验值  $Z(I) = 12.01$ ;  $\text{SQRT}(C_2)$  的 Moran's I = 0.71,  $Z(I) = 12.51$ . 两时段 ( $C_1$  和  $C_2$ ) 土壤有机碳分布空间自相关性均达到显著水平 ( $P < 0.05$ ), 并非服从随机分布.

尽管全域型的功能在于描述某现象的整体分布状况, 判断此现象的空间分布是否存在聚集特性, 但不能确切地指出聚集在哪些地区. 若将全域型不同的空间间隔 (spatial lag) 的空间自相关统计量依序排列, 进一步绘制空间自相关系数图 (spatial autocorrelation coefficient correlogram), 则可分析该现象在空间上是否有结构性分布. 通过观察空间自相关系数图曲线走向, 可以得出空间自相关的效应尺度, 并据此推测研究区域内变量分布的空间结构. 若研究区域内空间事物聚集在单一区域, 或者说只在某一尺度内呈现自相关, 则空间自相关图只有一个波峰; 若空间事物聚集在一个以上区域, 或者说在不同尺度上呈现自相关, 则空间自相关图会出现一个以上的波峰.

河南省土壤有机碳储量的空间自相关趋势为: 距离较近的空间单元格之间空间自相关性显著 ( $P < 0.05$ ); 随着距离的增大, 自相关系数向负方向增大, 逐渐达到显著的负空间自相关 ( $P < 0.05$ ); 最后, 自相关系数再次增至正值, 具有明显的 V 型结构 (图 1). 该趋势表明, 河南省土壤有机碳储量分布

具有多个高储量核心区。

$SQRT(C_1)$  和  $SQRT(C_2)$  在微观尺度(空间间隔为 19)上均存在显著的空间自相关性( $P < 0.05$ ), 表明  $SQRT(C_1)$  和  $SQRT(C_2)$  在区域范围内的单元格土壤有机碳储量与 190 km 范围内的单元格土壤有机碳储量均有显著相关性;在中观以及宏观尺度(空间间隔大于 19)上,  $SQRT(C_1)$  没有显著空间正自相关性, 而  $SQRT(C_2)$  在空间间隔 35~40 和 48~50 间呈现正相关。  $SQRT(C_1)$  的波动摆幅比较大, 波峰波谷明显突出, 数量少, 表明其区域空间土壤有机碳高储量核心区少, 半径大, 结构简单; 而  $SQRT(C_2)$  趋于平缓, 峰值小, 数量多, 认为其区域空间土壤有机碳高储量核心区多, 而半径小, 结构相对复杂。从两时间段对比来看, 河南省土壤有机碳空间变异性逐渐变小, 高储量核心区有相互靠近的趋势。

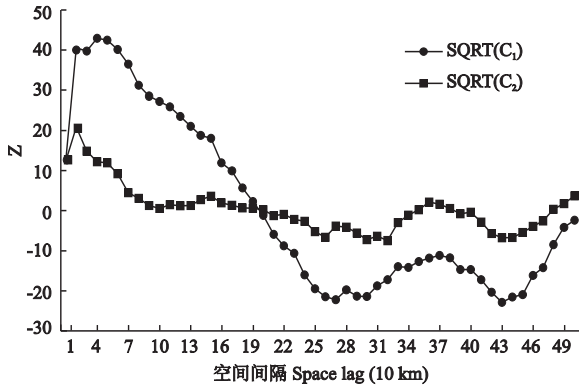


图 1 土壤有机碳空间自相关系数

Fig. 1 Spatial autocorrelation coefficient of SOC content in Henan Province.

50 空间间隔 Based on Moran's I, 50 lags.

### 3.2 土壤有机碳区域空间自相关性

空间自相关系数图说明  $C_1$  和  $C_2$  有 1 个以上土壤有机碳高储量核心区, 因此用区域空间自相关方法可以计算出其在研究区域内的核心区位置。在 5% 显著水平下,  $Z(G_i^*)$  值呈正相关( $> 1.96$ ) 的区域主要有豫西和豫东南角两大核心区。其中,  $Z(G^*) > 1.96$  的个数,  $C_1$  为 433 个,  $C_2$  为 318 个。若以  $C_1 > 1.96$  的  $Z(G^*)$  值的第 3 位数 2.27 为基准, 分别取  $C_1$  和  $C_2$  正相关值最高的 25%, 绘制  $C_1$  和  $C_2$  的  $Z(G^*)$  值, 得到  $> Z(G^*)$  值的所有核心区(图 2)。  $C_1$  中, 豫西的核心区为 72 个, 豫东南角为 216 个; 而在  $C_2$  中, 豫西的核心区个数增加到 145 个, 豫东南角的核心区个数减少到 94 个。从  $C_1$  的最高核心区向  $C_2$  的最高核心区移动来看, 豫东南角地区有向中心收缩的趋势; 而豫西地区, B 区移动方向为东

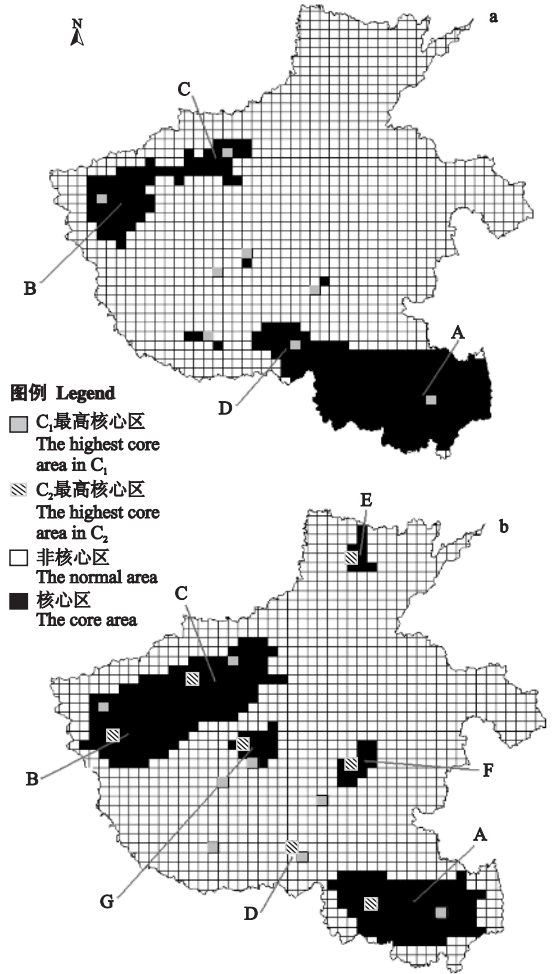


图 2  $C_1$  和  $C_2$  的核心区分布

Fig. 2 Distribution of core areas in  $C_1$  and  $C_2$ .

a)  $C_1$  核心区  $C_1$  core area; b)  $C_2$  核心区  $C_2$  core area.

南方向, C 区为西南方向, E、F 和 G 区异军突起, 逐渐扩大, 而 D 区逐渐消失。以上数据说明, 豫西的核心区有向南方向扩张的趋势; 豫东南角的核心区有向核心收缩的趋势; 豫中和豫北异军突起, 有逐渐扩大的趋势。

### 3.3 土壤有机碳储量分布及其动态变化特征

根据河南省两次土壤普查资料, 用 GIS 技术估算的  $C_1$  和  $C_2$  分别约为  $54.93 \times 10^8$  和  $69.65 \times 10^8$  t。27 年间河南省土壤有机碳总共增加了  $14.57 \times 10^8$  t, 平均每年增加  $0.54 \times 10^8$  t, 年均增长速率达到 1%。河南省土壤碳密度时空分布的特点是: 豫东南角及豫西高于豫东, 豫北及豫中介于两者之间(图 3)。土壤碳密度高的豫东南角及豫西土壤有机碳损失较快, 损失最快的单元格土壤有机碳储量从  $16.51 \times 10^5$  t 损失到  $10.77 \times 10^5$  t, 损失百分数达到 34.7%, 年均损失速率为 1.57%。土壤碳密度较低的豫东土壤有机碳储量增加较快, 增加最快的单元

格土壤有机碳储量从  $6.1 \times 10^5$  t 增加到  $24.4 \times 10^5$  t, 27年间增长了 301.82%, 年均增长速率为 5.27% (图 4)。豫东南角土壤有机碳储量分布属于 LL 类型, 该地区土壤有机碳储量显著减少, 而且单元格之间空间自相关性越大, 土壤有机碳储量损失的趋势越明显; 豫东地区土壤有机碳储量的分布属于 HH 类型, 该地区土壤有机碳储量显著增加, 而且单元格之间空间自相关性越大, 土壤有机碳储量增加的趋势越明显(图 4)。

河南省土壤有机碳时空分布形成上述格局的主要原因是土壤初始含碳量、土壤母质及土壤类型分布的复杂性, 以及不同地区农业生产水平、土壤利用

方式和培肥程度不同所致<sup>[11,20]</sup>。豫西主要为山地丘陵, 土壤母质多为黄土, 森林和草灌植被生长茂密, 植被覆盖程度较高, 而且随着海拔高度的增加, 植被覆盖度增高, 枯枝落叶增加。在温度较低、湿度较大的条件下, 好气微生物活动能力较弱, 有利于土壤有机质的累积, 土壤表层有较厚的腐殖质层与较高的有机质含量, 因此, 该地区单位面积土壤有机碳储量相对较高。豫东南角在海拔 500 m 以上的山区分布的是黄棕壤, 500 m 以下的浅山丘陵分布的是黄褐土, 山谷中部、丘陵中下部以及河流两岸多为水稻土。水稻土多处于地势低洼、土质偏粘的地区, 封闭地形有利于养分的汇集, 水热条件也有利于有机质

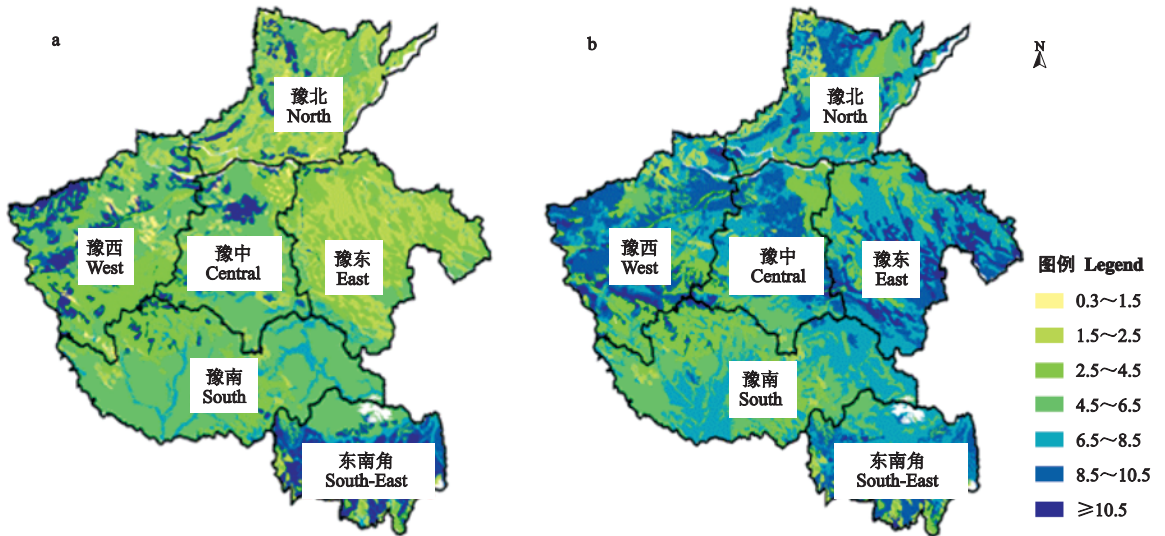


图 3 河南省两次土壤普查的碳密度分布

Fig. 3 Carbon density distribution in the two soil surveys of Henan Province ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$ ). a) 第 1 次土壤普查 The first soil survey; b) 第 2 次土壤普查 The second soil survey.

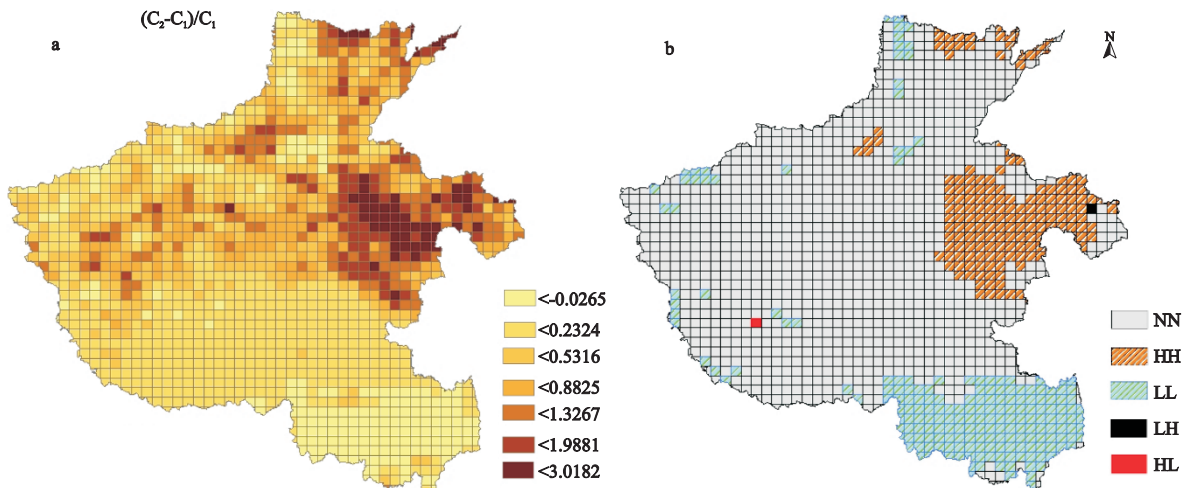


图 4 土壤有机碳分布储量变化 (a) 及其散点图 (b)

Fig. 4 Distribution changes of SOC storage (a) and its scatter diagram (b).

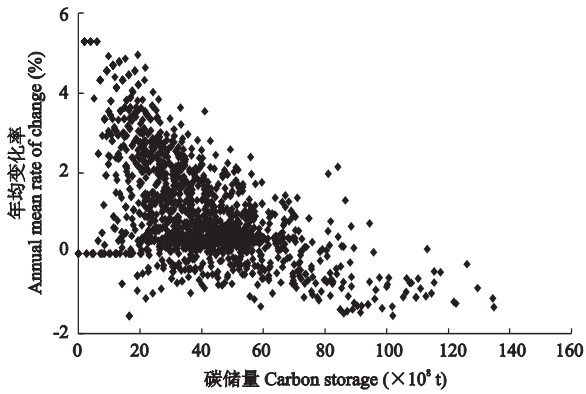


图5 单元格初始碳储量及其年均变化速率

Fig. 5 Original carbon storage in cell and its annual mean rate of changes.

的积累,种植期间长期淹水又在一定程度上加强了这种作用,所以该地区单位面积土壤有机碳储量也相对较高.由图5可以看出,土壤初始含碳量越高,土壤碳降低越快. Bellamy 等<sup>[2]</sup>研究表明,英格兰和威尔士的土壤有机碳也有上述趋势. 豫西以及豫东南角地区土壤有机碳呈降低的趋势;豫东地区土壤初始含碳量虽然较低,但该地区主要为冲积平原和河谷平原,农业生产条件相对较好,灌溉面积大,有机肥施用量(特别是秸秆还田量)逐年增加,属于高投入高产出地区,因此土壤有机碳储量呈增加的趋势.

#### 4 结 论

1)河南省土壤有机碳储量的空间分布具有显著的空间自相关性,并非服从随机分布,在微观尺度上呈显著正相关,具有“V”型结构,多个高储量核心区有相互靠近的趋势. 豫西的核心区有向南方向扩张的趋势,豫东南角的核心区有向核心收缩的趋势,同时豫中和豫北异军突起,有逐渐扩大的趋势.

2)根据两次土壤普查结果计算的河南省土壤有机碳总储量分别约为  $54.93 \times 10^8$  和  $69.65 \times 10^8$  t. 第2次普查的土壤有机碳储量比第1次增长26.8%,年均增长速率达到1%. 河南省土壤有机碳密度时空分布特点是:豫东南角及豫西高于豫东,豫北及豫中介于两者之间. 豫东单位面积土壤有机碳储量增加较快,最大增长速率达到年均5.27%,且该地区单位面积土壤有机碳储量的空间自相关性越大,土壤有机碳增加的趋势越明显;而豫东南角土壤有机碳损失较快,最快损失速率达到年均1.57%,且该地区单位面积土壤有机碳储量的空间自相关性越大,土壤有机碳损失的趋势越突出.

3)河南省土壤有机碳含量的分布在时间和空间上的差异不但与该地区不同的土壤母质、土壤类型、植被覆盖以及土地利用方式有关,而且与其土壤初始含碳量密切相关. 土壤初始含碳量越高,有机碳损失越快.

#### 参考文献

- [1] Anselin L. 1995. Local indicators of spatial association-LISA. *Geographical Analysis*, **27**: 93-115
- [2] Bellamy PH, Loveland PJ, Bradley RL, et al. 2005. Carbon losses from all soils across England and Wales 1978-2003. *Nature*, **437**: 245-248
- [3] Chen F, Du DS. 2002. Application of the integration of spatial statistical analysis with GIS to the analysis of regional economy. *Geo-Spatial Information Science*, **7**: 262-267
- [4] Chen X-Y (陈小勇), Lin P (林鹏). 2000. Spatial autocorrelation analysis on the distribution of Mangrove in China. *Journal of East China Normal University* (华东师范大学学报), (3): 104-109 (in Chinese)
- [5] Cliff AD, Ord K. 1970. Spatial autocorrelation: A review of existing and new measures with applications. *Economic Geography*, **46**: 269-292
- [6] Dall'erba S. 2005. Distribution of regional income and regional funds in Europe 1989-1999: An exploratory spatial data analysis. *Annals of Regional Science*, **39**: 121-148
- [7] Gan H-H (甘海华), Wu S-H (吴顺辉), Fan X-D (范秀丹). 2003. Reserves and spatial distribution characteristics of soil organic carbon in Guangdong Province. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), **14**(9): 1499-1502 (in Chinese)
- [8] Ge Y (葛莹), Yao S-M (姚士谋), Pu Y-X (蒲英霞), et al. 2005. Application of spatial autocorrelation for the spatial patterns of urbanization and localization economy. *Human Geography* (人文地理), **20**(3): 21-25 (in Chinese)
- [9] Haining R, Stephen Wise S, Ma JS. 1998. Exploratory spatial data analysis in a geographic information system environment. *The Statistician*, **47**: 457-469
- [10] Han B (韩冰), Wang X-K (王效科), Ouyang Z-Y (欧阳志云), et al. 2004. Distribution and change of agro-ecosystem carbon pool in the Northeast of China. *Chinese Journal of Soil Science* (土壤通报), **35**(4): 401-407 (in Chinese)
- [11] Jing J-J (荆建军), Wang X-L (王小琳), Tan M (谭梅). 1999. The nutrient status of soils in Henan Province and its fertilization. *Gansu Agricultural Science and Technology* (甘肃农业科技), (9): 40-41 (in Chinese)
- [12] Le Gallo J, Ertur C. 2003. Exploratory spatial data analysis of the distribution of regional per capita GDP in Europe, 1980-1995. *Papers in Regional Science*, **82**: 175-201
- [13] Legendre P. 1993. Spatial autocorrelation: Trouble or

- new paradigm? *Ecology*, **74**: 1659–1673
- [ 14 ] Mao L-X (毛留喜), Zhang J-X (张建新), Wang L-W (王利文). 2000. Analysis on nature resources and agricultural managements system in Henan Province. *Tillage and Cultivation* (耕作与栽培), (4): 3–4 (in Chinese)
- [ 15 ] Ord JK, Getis A. 1992. Local spatial autocorrelation statistics: Distributional issues and an application. *Geographical Analysis*, **27**: 286–306
- [ 16 ] Unwin A, Unwin D. 1998. Exploratory spatial data analysis with local statistics. *The Statistician*, **47**: 415–421
- [ 17 ] Wang HQ, Hall CA, Cornell JD, et al. 2002. Spatial dependence and the relationship of soil organic carbon and soil moisture in the Luquillo Experimental Forest, Puerto Rico. *Landscape Ecology*, **17**: 671–684
- [ 18 ] Wang S-Q (王绍强), Zhou C-H (周成虎), Liu J-Y (刘纪远), et al. 2001. Simulation analyses of terrestrial carbon cycle balance model in northeast China. *Acta Geographica Sinica* (地理学报), **56**(4): 390–400 (in Chinese)
- [ 19 ] Wang XB, Cai DX, Hoogmoed WB, et al. 2005. A scenario analysis of tillage, residue, and fertilization management effects on soil organic carbon dynamics. *Pedosphere*, **15**: 473–483
- [ 20 ] Wu K-N (吴克宁), Zheng Y (郑义), Kang Y-Y (康鸳鸯). Investigation and evaluation on cultivated land fertility of Henan Province. *Henan Agricultural Science* (河南农业科学), (9): 49–52 (in Chinese)
- [ 21 ] Xie X-L (解宪丽), Sun B (孙波), Zhou H-Z (周慧珍), et al. 2004. Organic carbon density and storage in soils of China and spatial analysis. *Acta Pedologica Sinica* (土壤学报), **41**(1): 35–43 (in Chinese)
- [ 22 ] Zhang A-B (张爱兵), Tan S-J (谭声江), Chen J (陈建), et al. 2002. Spatial molecular ecology: A new cross-discipline between molecular ecology and spatial ecology. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), **22**(5): 752–769 (in Chinese)
- [ 23 ] Zhang CS, McGrath D. 2004. Geostatistical and GIS analyses on soil organic carbon concentrations in grassland of southeastern Ireland from two different periods. *Geoderma*, **119**: 261–275
- [ 24 ] Zhang C-S (张朝生), Tao S (陶澍), Yuan G-P (袁贵平), et al. 1995. Spatial autocorrelation analysis of trace element contents of soil in Tianjin plain area. *Acta Pedologica Sinica* (土壤学报), **32**(1): 50–57 (in Chinese)
- [ 25 ] Zhang C-S (张朝生), Zhang S (章申), He J-B (何建邦). 1998. Spatial distribution characteristics of heavy metals in the sediments of Changjiang River system: Spatial autocorrelation and fractal methods. *Acta Geographica Sinica* (地理学报), **53**(1): 87–95 (in Chinese)
- [ 26 ] Zhang L-J (章力建), Cai D-X (蔡典雄), Wang X-B (王小彬). 2005. The study of carbon and nitrogen chain in agricultural tridimension pollution. *Review of China Agricultural Science and Technology* (中国农业科技导报), **7**(1): 7–12 (in Chinese)

---

作者简介 梁二,男,1979年生,硕士研究生.主要从事土壤管理与3S技术应用研究. E-mail: secondluong@sina.com

责任编辑 梁仁禄

---