

ISSN 1000-0933  
CN 11-2031/Q

# 生态学报

## Acta Ecologica Sinica

景观生态学专辑



第34卷 第12期 Vol.34 No.12 2014

中国生态学学会  
中国科学院生态环境研究中心  
科学出版社

主办  
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

# 生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

第 34 卷 第 12 期      2014 年 6 月 (半月刊)

## 目 次

- 中国景观生态学发展历程与未来研究重点..... 陈利顶,李秀珍,傅伯杰,等 (3129)
- 城市景观格局演变的水环境效应研究综述..... 黄 硕,郭青海 (3142)
- 多功能景观研究进展..... 汤 茜,丁圣彦 (3151)
- 空间形态受限型城市紧凑发展研究——以厦门岛为例 ..... 黄 硕,郭青海,等 (3158)
- 紫金山森林公园降温效应影响因素..... 闫伟姣,孔繁花,尹海伟,等 (3169)
- 城市公园景观空间结构对其热环境效应的影响 ..... 冯悦怡,胡潭高,张力小 (3179)
- 基于 OWA 的低丘缓坡建设开发适宜性评价——以云南大理白族自治州为例 .....  
..... 刘焱序,彭 建,韩忆楠,等 (3188)
- 生态安全条件下土地利用格局优化——以皇甫川流域为例 ..... 喻 锋,李晓兵,王 宏 (3198)
- 新疆玛纳斯河流域 2000—2010 年土地利用/覆盖变化及影响因素..... 刘金巍,靳甜甜,刘国华,等 (3211)
- 基于 GIS 和 RS 的赣江上游流域土地利用动态趋势分析 ..... 鲁燕飞,彭 芳,万 韵,等 (3224)
- 1954—2010 年三江平原土地利用景观格局动态变化及驱动力 ..... 刘吉平,赵丹丹,田学智,等 (3234)
- 基于斑块评价的三峡库区腹地坡耕地优化调控方法与案例研究..... 王永艳,李阳兵,邵景安,等 (3245)
- 贵州省山地-坝地系统土地利用与景观格局时空演变 ..... 李阳兵,姚原温,谢 静,等 (3257)
- 中国西南地区土地覆盖情景的时空模拟 ..... 李 婧,范泽孟,岳天祥 (3266)
- 基于移动窗口法的岷江干旱河谷景观格局梯度分析..... 张玲玲,赵永华,殷 莎,等 (3276)
- 基于植被覆盖度的藏羚羊栖息地时空变化研究..... 赵海迪,刘世梁,董世魁,等 (3285)
- 西南峡谷型喀斯特坡地土壤微生物量 C、N、P 空间变异特征 ..... 范夫静,黄国勤,宋同清,等 (3293)
- 峡谷型喀斯特不同生态系统的土壤微生物数量及生物量特征..... 谭秋锦,宋同清,彭晚霞,等 (3302)
- 长三角地区土地利用时空变化对生态系统服务价值的影响 ..... 刘桂林,张落成,张 倩 (3311)
- 基于视觉廊道的青藏铁路沿线旅游动态景观评价..... 张瑞英,席建超,姚予龙,等 (3320)
- 基于 RS 与 GIS 的农村居民点空间变化特征与景观格局影响研究 ..... 任 平,洪步庭,刘 寅,等 (3331)
- 生态系统保护现状及保护等级评估——以江西省为例..... 樊乃卿,张育新,吕一河,等 (3341)
- 崇明东滩盐沼植被变化对滩涂湿地促淤消浪功能的影响..... 任璘婧,李秀珍,杨世伦,等 (3350)
- 基于气候、地貌、生态系统的景观分类体系——以新疆地区为例..... 师庆东,王 智,贺龙梅,等 (3359)
- 黄土丘陵沟壑区景观格局演变特征——以陕西省延安市为例..... 钟莉娜,赵文武,吕一河,等 (3368)
- 不同干扰背景下农业景观异质性——以巩义市为例 ..... 张晓阳,梁国付,丁圣彦 (3378)
- 山西高原草地景观的数量分类与排序..... 张先平,李志琴,王孟本,等 (3386)

|  |                      |
|--|----------------------|
| 山区夏季地表温度的影响因素——以泰山为例.....                | 孙常峰,孔繁花,尹海伟,等 (3396) |
| 典型岩溶洼地土壤水分的空间分布及影响因素.....                | 张继光,苏以荣,陈洪松,等 (3405) |
| 基于移动窗口法的豫西山地丘陵地区景观异质性分析.....             | 李栋科,丁圣彦,梁国付,等 (3414) |
| 桂西北喀斯特区域植被变化趋势及其对气候和地形的响应.....           | 童晓伟,王克林,岳跃民,等 (3425) |
| 喀斯特与非喀斯特区域植被覆盖变化景观分析——以广西壮族自治区河池市为例..... | 汪明冲,王兮之,梁钊雄,等 (3435) |
| 不同干扰背景下景观指数与物种多样性的多尺度效应——以巩义市为例.....     | 董翠芳,梁国付,丁圣彦,等 (3444) |
| 石栎-青冈常绿阔叶林土壤有机碳和全氮空间变异特征 .....           | 杨 丹,项文化,方 晰,等 (3452) |
| 湘中丘陵区南酸枣阔叶林群落特征及群落更新.....                | 易 好,邓湘雯,项文化,等 (3463) |
| 基于 RBFN 的桂西北喀斯特区植被碳密度空间分布影响因素分析.....     | 张明阳,王克林,邓振华,等 (3472) |

期刊基本参数:CN 11-2031/Q \* 1981 \* m \* 16 \* 352 \* zh \* P \* ¥90.00 \* 1510 \* 36 \* 2014-06



**封面图说:** 空间发展受限城市的厦门——在我国城市化进程中,中小城市在城镇体系建设中处于中间环节,起到了联系大城市和小城镇的作用。但是,每个城市由于发展历史、社会经济结构、自然地理形态等因素的不同,都有其发展的特性,这些问题都必须因地制宜地去把握。例如,厦门岛相对隔离,没有多余的发展空间,该城市以居住功能为主,城市功能较为单一,公共服务功能和商业服务功能比例较小。研究这样紧凑型的城市发展必须要考虑该城市结构转换的承受力,周边社会经济环境以及居民的生活习惯等。

彩图及图说提供: 陈建伟教授 北京林业大学 E-mail: cites.chenjw@163.com

DOI: 10.5846/stxb201401230170

杨丹, 项文化, 方晰, 樊纲惟, 许玉庆, 文丽, 邹丽梅. 石栎-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.  
Yang D, Xiang W H, Fang X, Fan G W, Xu Y Q, Wen L, Zou L M. Spatial heterogeneity of soil organic carbon and total nitrogen concentrations in a *Lithocarpus glaber-Cyclobalanopsis glauca* evergreen broadleaved forest. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(12): 3452-3462.

## 石栎-青冈常绿阔叶林土壤有机碳和 全氮空间变异特征

杨 丹<sup>1,2</sup>, 项文化<sup>1,3,\*</sup>, 方 晰<sup>1,2,3</sup>, 樊纲惟<sup>1,2</sup>, 许玉庆<sup>1,2</sup>, 文 丽<sup>1,2</sup>, 邹丽梅<sup>1,2</sup>

(1. 中南林业科技大学生命科学与技术学院, 长沙 410004; 2. 南方林业生态应用技术国家工程实验室, 长沙 410004;

3. 湖南会同杉木林生态系统国家野外科学观测研究站, 会同 438107)

**摘要:** 在 1hm<sup>2</sup> (100 m×100 m) 石栎 (*Lithocarpus glaber*)-青冈 (*Cyclobalanopsis glauca*) 常绿阔叶林内 100 个 10 m×10 m 小样方的中心位置, 按 0—10 cm、10—20 cm 和 20—30 cm 土层采集土壤样品, 测定土壤有机碳 (C) 和全氮 (N) 含量。基于区域化变量理论和地质统计软件 (GS<sup>+</sup> Version 9) 的空间分析功能, 应用地统计学的半方差函数定量研究该常绿阔叶林土壤有机 C 和全 N 的空间变异特征。结果表明, 该林地土壤有机 C 含量平均值为 18.61 g/kg, 变化范围为 9.53—39.40 g/kg, 全 N 含量平均值为 1.63 g/kg, 变化范围为 0.73—3.32 g/kg。土壤有机 C 半方差函数的理论模型符合球状模型, 全 N 半方差函数的理论模型符合高斯模型。土壤有机 C 和全 N 的空间异质性主要是由结构性因素引起的, 且空间自相关程度均为中等程度。分形维数反映了有机 C 和全 N 空间格局差异及尺度依赖特征, 有机 C 分形维数较大, 空间格局比全 N 略为复杂。采用 Kriging 插值方法, 1hm<sup>2</sup> 森林内土壤有机 C 和全 N 具有相似的空间分布格局, 呈现明显的条带状和斑块状的梯度变化。土壤有机 C 含量与海拔、凹凸度呈负相关, 但相关性不显著, 与林地凋落物量呈极显著正相关。土壤全 N 含量与海拔、凹凸度呈显著负相关, 与林地凋落物量呈正相关, 反映出土壤 N 的淋溶特性。

**关键词:** 地统计学; 土壤有机碳; 土壤养分; 空间异质性; 亚热带; 常绿阔叶林

## Spatial heterogeneity of soil organic carbon and total nitrogen concentrations in a *Lithocarpus glaber-Cyclobalanopsis glauca* evergreen broadleaved forest

YANG Dan<sup>1,2</sup>, XIANG Wenhua<sup>1,3,\*</sup>, FANG Xi<sup>1,2,3</sup>, FAN Gangwei<sup>1,2</sup>, XU Yuqing<sup>1,2</sup>, WEN Li<sup>1,2</sup>, ZOU Limei<sup>1,2</sup>

1 Faculty of Life Science and Technology, Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004, China

2 National Engineering Laboratory of Applied Technology for Forestry & Ecology in Southern China, Changsha 410004, China

3 Huitong National Field Station for Scientific Observation and Research of Chinese Fir Plantation Ecosystem in Hunan Province, Huitong 438107, China

**Abstract:** Subtropical evergreen broadleaved forests play an important role in regional carbon balance and sustainable development owing to their highest productivity, diverse ecosystem functions and complex habitat for abundant biological diversity in southern China. Spatial heterogeneity of soil nutrients in subtropical forests can provide useful information for understanding the spatial pattern of plants and for explaining to some extent, coexistence mechanism of diverse tree species. To investigate spatial variations in soil nutrients and the causes of the variations, soil samples at 0—10 cm, 10—20 cm and 20—30 cm depth were collected at the center of each 10 m×10 m quadrat within 1 hectare permanent plot of *Lithocarpus glaber-Cyclobalanopsis glauca* subtropical evergreen broadleaved forest. Soil organic C and total nitrogen (N) concentrations were determined for all samples. Based on regional variable theory and spatial analysis functions of GS<sup>+</sup> Version 9, spatial

基金项目: 国家林业局林业公益性行业专项项目 (201304317); 国家自然科学基金资助项目 (31170426)

收稿日期: 2014-01-23; 修订日期: 2014-04-23

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: xiangwh2005@163.com

heterogeneity of soil organic C and total N concentrations was examined by using semivariogram of geostatistics. The results showed that averaged soil organic C concentration was 18.61 g/kg, ranging from 9.53 to 39.40 g/kg, and the average value of total N concentration was 1.63 g/kg with a range between 0.73 and 3.32 g/kg. Theoretical semivariogram model of soil organic C approached spherical model while the best semivariogram model of total N was close to Gaussian model. The spatial variability of soil nutrient primarily resulted from the structural factors and the spatial heterogeneity degree of those indices was moderate. Fractal dimensions from log-log semivariograms quantitatively described spatial pattern differences and scale dependence of the soil organic C and total N. Fractal dimension was high for soil organic C, so soil organic C spatial structure had strong scale dependence with a complex spatial pattern. Kriging was used to analyze the spatial distribution of soil nutrients. Spatial distribution patterns of soil organic C and total N concentrations similarly revealed an apparent belt-shaped and spot massive gradient change. Within the plot, soil organic C concentration was negatively correlated with topographic factors (i.e. elevation and convexity), but the relationship was not significant. Soil organic C showed very significantly a positive relationship with litter biomass. Total soil N concentration exhibited a significant negative relationship with topographic factors, however, positive relationship was found between total soil N and litter, indicating leaching characteristics of soil N. Spatial variations in soil organic C and total N highlight the importance of vegetation and litter protection in the hilly area of subtropical China.

**Key Words:** geostatistics; soil organic carbon; soil nutrient; spatial heterogeneity; subtropical region; evergreen broadleaved forest

土壤有机碳(C)和氮(N)是陆地生态系统重要养分库,构成地球生物化学循环的关键环节,同时也是生态系统中重要的生态因子,影响植物的生长发育。土壤有机C和N含量与土壤结构密切相关,反应土壤质量<sup>[1]</sup>。由于土壤有机C和N贮量较大,其动态变化在土壤生产力和全球C、N循环中起着十分重要的作用<sup>[2-3]</sup>。因此,对土壤有机C和全N含量变化及影响因子的深入研究可了解区域性森林生态系统的土壤养分、森林C库管理和可持续经营提供科学依据。

土壤养分特性受母质、气候、生物、地形、发育时间和人为活动等多种因素的影响,常表现为缀块性或梯度分布格局,具有高度的空间变异性<sup>[4]</sup>,土壤养分的空间变异性是土壤重要的属性。在一个质地较为均匀的区域,处于同一时间、不同地点的土壤养分,除去采样和测定的误差外,还由于土壤本身特性的变化,导致土壤养分存在明显的差异,这种变化称为土壤的空间异质性或土壤的空间变异性<sup>[5-6]</sup>。土壤空间异质性是多种或多层次结构的叠加<sup>[7]</sup>,在不同尺度上研究土壤养分的空间异质性,对于了解土壤的形成过程、结构和功能、植物与土壤的关系(如植被更新过程、土壤养分和水分对根系的影响以及植物的空间格局等)具有十分重要的理论意义<sup>[8]</sup>,有

利于提高土壤取样观测结果的准确性。

国内外在土壤养分空间异质性方面的研究已取得了一些成果<sup>[9-14]</sup>,并对土壤养分空间异质性的应用地域和研究内容进行了扩展。研究表明,土地利用方式和地形因素对土壤有机C和全N有显著影响<sup>[15]</sup>,植被的不同演替阶段对土壤养分也有较大影响<sup>[16]</sup>。土壤养分的异质性是影响植物群落空间格局的重要因素<sup>[17]</sup>。我国亚热带常绿阔叶林具有生物多样性丰富、生产力较高和生境复杂等特点,在维持区域碳平衡和可持续发展等方面发挥着重要作用<sup>[18]</sup>。石栎-青冈常绿阔叶林是我国南方保存较少的典型地带性植被,多分布在边远山区或丘陵地区。由于其树种组成丰富多样<sup>[19]</sup>,分布区的地形复杂多变,林内土壤养分的空间异质性会更高,但在森林群落尺度上研究土壤养分的空间异质性较少<sup>[20]</sup>。因此,本研究在森林群落尺度上分析石栎-青冈常绿阔叶林土壤有机C和全N的空间变异特征,探讨地形因子(如海拔高程、凸凹度)、树种因素(如凋落物量、株数、物种数)在引起土壤养分空间变异中的作用,为进一步揭示亚热带森林群落物种多样性维持和共存机理、维护土壤肥力以及森林科学经营提供理论依据,也为不同尺度上土壤养分的空间插值、制图和土壤研究取样设计等方法方面提供参考。

## 1 研究区概况

本研究在湖南省长沙县大山冲国有林场(28°23'58"—28°24'58"N, 113°17'46"—113°19'08"E)进行,研究区属中亚热带东南季风气候,气候温和,降水充沛,雨热同期,相对湿度较大。年平均气温为16.6—17.6℃,最冷月(1月)的平均气温为-3.2℃,最热月(7月)的平均气温为39.8℃,年降雨量为1200—1600mm,主要集中在夏初,冬季严寒少雨<sup>[21]</sup>。该林场属幕阜山余脉西部边缘的湘中丘陵地区,土壤为板岩和页岩发育而成红壤土。

## 2 研究方法

### 2.1 样地设置

2013年3—4月在该林场内的石栎-青冈常绿阔叶林选择代表性地段,建立面积为1hm<sup>2</sup>(100m×100m)的固定样地,样地海拔为71—128m,坡向为西北向,坡度为22°,样地分为100个10m×10m的小样方(图1),对样地内胸径大于1cm的所有植物进行挂牌编号,记录植物种类,测定胸径、树高、枝下高

和冠幅,石栎-青冈常绿阔叶林群落的基本特征见表1。

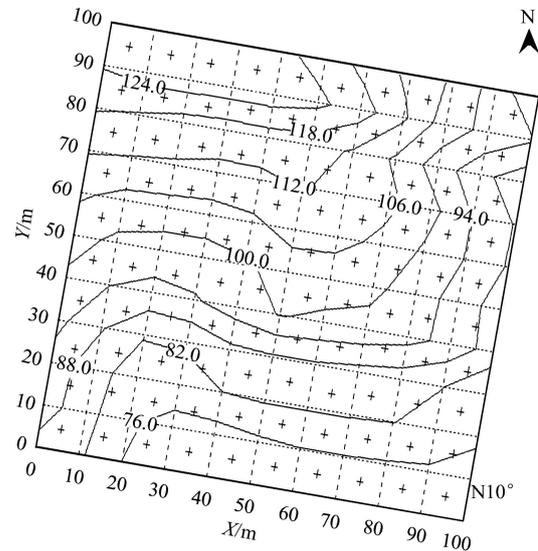


图1 石栎-青冈常绿阔叶林1hm<sup>2</sup>样地的等高线及采样点位置图(样点“+”,总数n=100)

Fig.1 Contour map and samplings location of 1 hectare permanent plot of the *Lithocarpus glaber-Cyclobalanopsis glauca* forest (“+” represents the sampling position, total number=100)

表1 石栎-青冈常绿阔叶林群落特征

Table 1 Stand characteristics of the *Lithocarpus glaber-Cyclobalanopsis glauca* forest

| 序号<br>No. | 种名<br>Tree species                  | 密度<br>Density/<br>(株/hm <sup>2</sup> ) | 平均胸径<br>Average diameter<br>at breast height<br>(DBH)/cm | 平均树高<br>Average<br>height/<br>m | 重要值<br>Important<br>value |
|-----------|-------------------------------------|--|--|---------------------------------|---------------------------|
| 1         | 石栎 <i>Lithocarpus glaber</i>        | 1802                                   | 10.4   | 9.6                             | 25.60                     |
| 2         | 青冈 <i>Cyclobalanopsis glauca</i>    | 473                                    | 12.8   | 10.5                            | 11.22                     |
| 3         | 马尾松 <i>Pinus massoniana</i>         | 146                                    | 18.1   | 14.2                            | 7.31                      |
| 4         | 红淡比 <i>Cleyera japonica</i>         | 529                                    | 5.9  | 5.8                             | 6.69                      |
| 5         | 杉木 <i>Cunninghamia lanceolata</i>   | 303                                    | 8.9  | 8.6                             | 5.89                      |
| 6         | 南酸枣 <i>Choerospondias axillaris</i> | 83                                     | 19.3   | 13.5                            | 5.36                      |
|           | 林分总计 Whole stand                    | 4797                                   | 12.6   | 10.4                            | 100                       |

### 2.2 土壤样品采集及化学分析

2013年9—10月,用土壤钻(内径5cm,高10cm)在1hm<sup>2</sup>固定样地内的每个小样方(10m×10m)的中心按0—10cm、10—20cm和20—30cm土层采集土壤样品,同时在中心附近设置50cm×50cm小样方,分未分解、半分解和已分解层采集样方内所有的凋落物,称重后取1kg的凋落物样品装入布袋,带回实验室进行分析。如果中心位置有树木或大的石块,采样点进行适当移动,记录采样的空间坐标

(图1)。在100个小样方内的3个土层共采集300个土壤样品,带回实验室风干、研磨,过100目筛后进行化学分析。凋落物样品放入烘箱于80℃烘箱内烘干至恒重,取出后称其干重,用于干重推算单位面积林地凋落物的生物量(kg/m<sup>2</sup>)。土壤有机C用浓硫酸-重铬酸钾水合加热容量法测定,全N用半微量凯氏法测定<sup>[22]</sup>。

### 2.3 数据统计分析和插值

计算固定样地内土壤有机C和全N含量的最大

值、最小值、平均值、误差值和变异系数,用 PAWS Statistics 18 软件对数据进行 K-S 正态分布检验。用半方差函数分析土壤有机 C 和全 N 含量的空间变异特征。通过半方差函数得到函数值随样本滞后距增加而变化的散点图,对散点图采用球状模型、指数模型、高斯模型和线性模型等理论模型进行拟合<sup>[6]</sup>。根据残差平方和(RSS)来判断散点图最适合的理论模型,残差平方和越小,模型拟合精度越高<sup>[23]</sup>。模型拟合能获取 3 个评价空间变异程度的重要参数:块金值( $C_0$ )、基台值( $C_0+C$ )和变程( $A_0$ )。变程( $A_0$ )表示空间变异的尺度。在变程内表示变量具有空间自相关性,反之则不存在空间相关性。

特异值也称为异常值,对变异函数的影响很大,尤其是在变程  $A_0$  范围内的异常值将影响变异函数理论模型的精度。本研究用域法来识别特异值<sup>[24]</sup>。域法即样本平均值加减 3 倍标准差  $s$ ,在此区间( $\bar{x} \pm 3s$ )之外的数据为特异值。

半方差函数计算公式:

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

式中, $\gamma(h)$ 为半方差函数值, $N(h)$ 为间距为向量  $h$  的点对总数; $Z(x_i)$ 为系统某属性  $Z$  在空间位置  $x_i$  处的值, $Z(x_i + h)$ 是在  $(x_i + h)$  处值的一个区域化变量<sup>[25]</sup>。半方差函数中的  $h$  和  $\gamma(h)$  在双对数坐标的回归曲线,可以确定土壤养分空间分维数  $D$ 。分维数是一个无量纲数,计算公式为:

$$D = 2 - m/2 \quad (2)$$

式中, $m$ 是变异函数值相应取样间距的双对数线性回归方程的斜率<sup>[11]</sup>。 $m$ 越大,分形维数越小,双对数半方差图的直线越陡,空间格局的空间依赖性越强,结构性越好,空间格局相对简单。因此,分形维数可以反映土壤有机 C 和全 N 含量空间格局的尺度及层次性和空间异质性在不同尺度上的相互关系等信息,分析不同尺度上生态因子场的差异<sup>[11,26-27]</sup>。

本研究根据地统计学分析中得到表达土壤养分空间异质性特征的最适合模型类型及其相应参数(块金值、基台值和变程等),用 Kriging 插值法<sup>[23]</sup>对土壤有机 C 和全 N 进行空间插值。半方差函数拟合和空间插值的软件为 GS+ Version 9 (Gamma Design Software, 2008),设定插值结果的空间分辨率为 10m × 10m。

选取海拔和凹凸度作为地形因子,各小样方的海拔为小样方 4 个角海拔的平均值,凹凸度为小样方海拔减去该样地相邻的 8 个小样方海拔的平均值,处于样地边缘的小样地凹凸度为小样方中心的海拔减去 4 个顶点海拔的平均值,若凹凸度为正值,说明该样方海拔比周围样方海拔高,反之则低<sup>[28]</sup>。通过相关分析,分析各 10m × 10m 小样方的地形因子、凋落物量对各层土壤有机 C 和全 N 含量的影响,统计分析在 JMP 统计软件中进行。

### 3 结果与分析

#### 3.1 土壤有机 C 和全 N 含量统计特征及正态性检验

石栎-青冈常绿阔叶林 0—30cm 层土壤有机 C 含量平均值为 18.61 g/kg,均值范围为 9.53—39.40 g/kg,其中 0—10cm 层为 9.63—62.09 g/kg,10—20cm 层为 9.66—39.67 g/kg,20—30cm 层为 7.33—32.62 g/kg。0—30cm 层土壤全 N 含量平均值为 1.63 g/kg,均值范围为 0.73—3.32 g/kg,其中 0—10cm 层的为 0.65—4.29g/kg,10—20cm 层为 0.74—3.37g/kg,20—30cm 层为 0.36—2.87g/kg(表 2)。0—30cm 层土壤有机 C 和全 N 含量的变异系数分别为 30.68% 和 29.45%,均达到了中等强度变异。土壤有机 C 的变异系数随着土层深度增加而减小,全 N 的变异系数在 10—20cm 层最小(表 2)。

K-S 正态性检验结果表明,20—30cm 层和 0—30cm 层的土壤有机 C 含量数据为非正态分布,全 N 含量为正态分布。经域法检验,土壤有机 C (0—30cm)样本中没有特异值,全 N (0—30cm)中有一个特异值,用正常最大值 3.00g/kg 代替。0—10cm 层有机 C 样本中有 1 个特异值,用正常最大值 43.05g/kg 代替;10—20cm 层有机 C 样本中有 1 个特异值,用正常最大值 33.51 g/kg;20—30cm 层有机 C 样本中有 2 个特异值,用正常最大值 29.31 g/kg 代替。0—10cm 层全 N 的样本中有 1 个特异值,用正常最大值 3.81g/kg 代替;10—20cm 样本中有 1 个特异值,用正常最大值 3.02 g/kg;20—30cm 样本中有 2 个特异值,用正常最大值 2.74 g/kg 代替。对数转换后,土壤有机 C 数据服从正态分布(表 2),可进行空间变异的地统计分析。

表 2 土壤有机 C 和全 N 含量的统计特征 (n = 100)

Table 2 Descriptive statistical characteristics of soil organic C (SOC) and total N concentrations (n = 100)

| 土层/km<br>Soil depth | 指标<br>Items        | 最小值<br>Minimum | 最大值<br>Maximum | 平均值<br>Average | 标准差<br>Standard deviation | 变异系数/%<br>Variance coefficient | K-S 检验<br>P 值<br>P value of<br>K-S test | 转换后<br>Data<br>transformation |
|---------------------|--------------------|----------------|----------------|----------------|---------------------------|--------------------------------|---|-------------------------------|
| 0—10                | 土壤有机 C (SOC)       | 9.63           | 62.09          | 23.98          | 8.49                      | 35.40                          | 0.25                                    |                               |
|                     | 全 N Total N/(g/kg) | 0.65           | 4.29           | 1.98           | 0.63                      | 31.82                          | 0.10                                    |                               |
| 10—20m              | 土壤有机 C (SOC)       | 9.66           | 39.67          | 16.94          | 5.83                      | 34.42                          | 0.16                                    |                               |
|                     | 全 N Total N/(g/kg) | 0.74           | 3.37           | 1.61           | 0.48                      | 29.81                          | 0.24                                    |                               |
| 20—30               | 土壤有机 C (SOC)       | 7.33           | 32.62          | 14.87          | 5.02                      | 33.76                          | 0.03                                    | 0.45                          |
|                     | 全 N Total N/(g/kg) | 0.36           | 2.87           | 1.31           | 0.48                      | 36.64                          | 0.07                                    |                               |
| 平均                  | 土壤有机 C (SOC)       | 9.53           | 39.40          | 18.61          | 5.71                      | 30.68                          | 0.04                                    | 0.61                          |
| Average             | 全 N Total N/(g/kg) | 0.73           | 3.32           | 1.63           | 0.48                      | 29.45                          | 0.08                                    |                               |

3.2 土壤有机 C 和全 N 含量的空间异质性分析

半方差分析中样本间距  $h$  为最大采样间距的 1/2 或 1/3 内才具有统计意义,同时步长要求不小于最小采样间距<sup>[26]</sup>。本研究中样本间距  $h$  的变化范围取最大间距的 1/2,为 63.71m,步长取最小间距,为 7.8m。10—20cm 层、0—30cm 层的有机 C 含量的半方差函数符合球状模型,0—10cm 层和 20—30cm

层有机 C 符合指数模型(图 2)。全 N 含量的半方差函数各土层均符合高斯模型(图 3)。不同土层的土壤有机 C 和全 N 的空间自相关范围差异较大(表 3),变程为 89.720—365.700m。土壤有机 C 比全 N 具有较大的空间异质性尺度,可能是因为阔叶林内树种较多(如阔叶树、针叶树和竹林),在小尺度范围内影响土壤有机 C 和全 N 的分布。

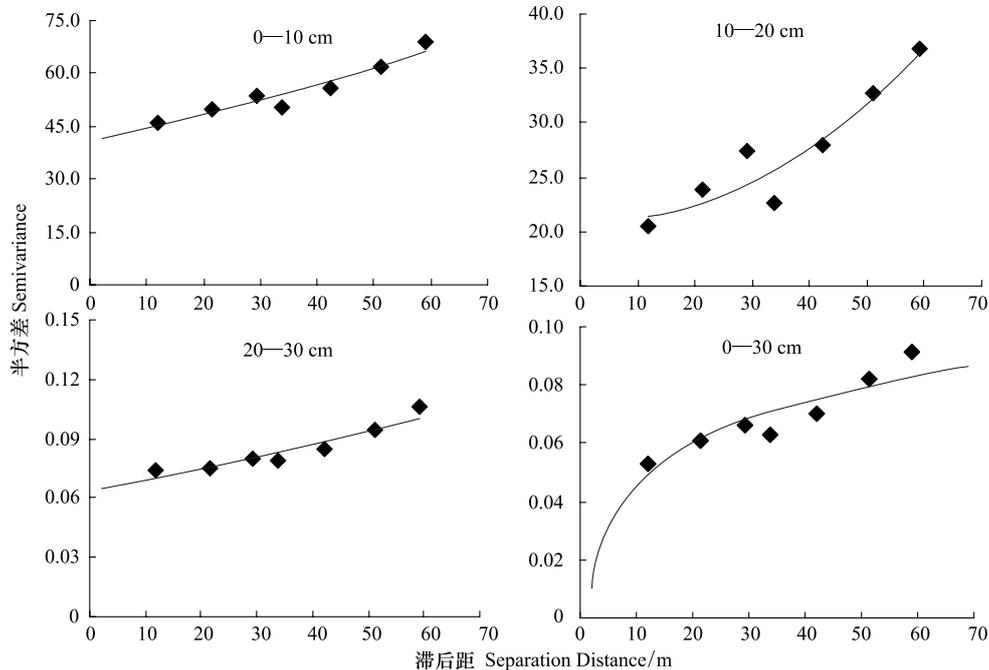


图 2 土壤有机 C 半方差函数理论模型

Fig.2 Semivariograms models of soil organic C concentrations

空间异质性由结构方差  $C$  和块金方差  $C_0$  组成。土壤有机 C 块金值与基台值的比值为 0.300—0.417 (表 3),表明土壤有机 C 由随机因素引起的空间异质性占总空间异质性的 30.0%—41.7%,主要表现在

7.8m 以下的小尺度上;由空间自相关引起的空间异质性占总空间异质性的 58.3%—70.0%,主要表现在 7.8—365.700m 的中尺度范围内。全 N 块金值与基台值的比值为 0.342—0.441(表 3),表明全 N 由随机

因素引起的空间异质性占总空间异质性的 34.2%—44.1%,主要表现在 7.8m 以下的小尺度上;由空间自相关引起的空间异质性占总空间异质性的 55.9%—

65.8%,主要表现在 7.8—110.678 的中尺度范围内。石栎-青冈常绿阔叶林土壤有机 C 和全 N 含量具有中等程度的空间自相关性(表 3)。

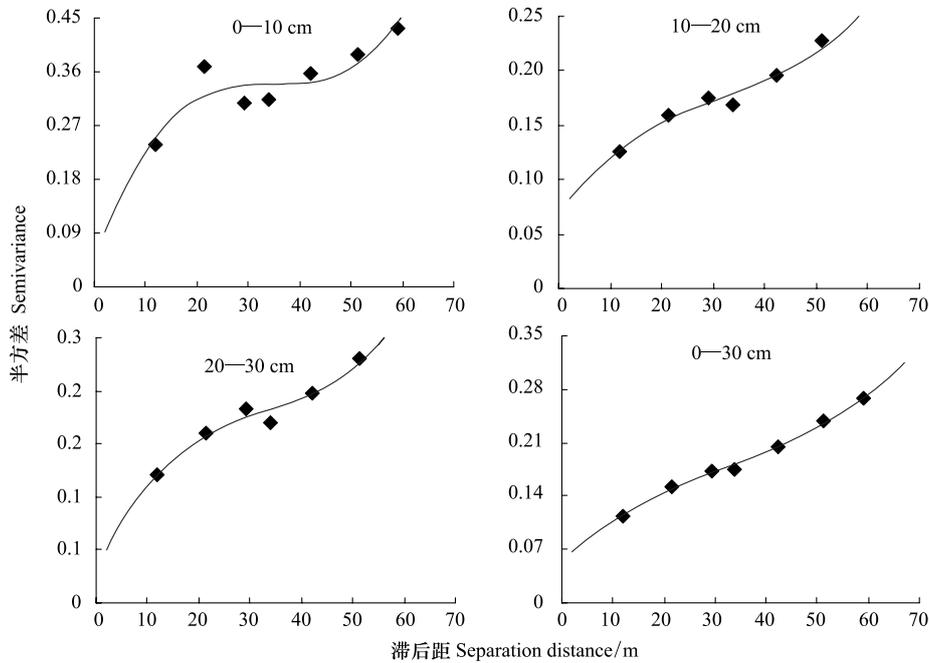


图 3 土壤全 N 半方差函数理论模型

Fig.3 Semivariograms models of total soil N concentrations

表 3 土壤有机 C 和全 N 的半方差函数的模型类型及参数

Table 3 Semivariogram theoretical models and parameters for soil organic C (SOC) and total N

| 土层/cm<br>Soil depth | 指标<br>Items | 模型<br>Model            | 块金值<br>Nugget<br>( $C_0$ ) | 基台值<br>Sill<br>( $C_0+C$ ) | 块金值/<br>基台值<br>( $C_0$ )/<br>( $C_0+C$ ) | 变程/m<br>Range<br>( $A_0$ ) | $R^2$ | 残差<br>平方和<br>(RSS)     | 分维数<br>Fractal<br>dimension<br>( $D$ ) |
|---------------------|-------------|------------------------|----------------------------|----------------------------|--|----------------------------|-------|------------------------|--|
| 0—10                | 土壤有机 C(SOC) | 指数模型 Exponential model | 37.300                     | 109.210                    | 0.342                                    | 365.700                    | 0.874 | 47.100                 | 1.887                                  |
|                     | 全 N Total N | 高斯模型 Gaussian model    | 0.227                      | 0.515                      | 0.441                                    | 94.397                     | 0.993 | $2.065 \times 10^{-4}$ | 1.816                                  |
| 10—20               | 土壤有机 C(SOC) | 球状模型                   | 15.700                     | 56.080                     | 0.300                                    | 181.200                    | 0.847 | 30.600                 | 1.835                                  |
|                     | 全 N Total N | 高斯模型                   | 0.125                      | 0.319                      | 0.392                                    | 102.711                    | 0.963 | $4.015 \times 10^{-4}$ | 1.795                                  |
| 20—30               | 土壤有机 C(SOC) | 指数模型                   | 0.058                      | 0.139                      | 0.417                                    | 258.900                    | 0.838 | $1.355 \times 10^{-4}$ | 1.895                                  |
|                     | 全 N Total N | 高斯模型                   | 0.123                      | 0.360                      | 0.342                                    | 110.678                    | 0.942 | $8.152 \times 10^{-4}$ | 1.772                                  |
| 平均 Average          | 土壤有机 C(SOC) | 球状模型                   | 0.042                      | 0.132                      | 0.318                                    | 170.500                    | 0.922 | $7.975 \times 10^{-4}$ | 1.846                                  |
|                     | 全 N Total N | 高斯模型                   | 0.109                      | 0.318                      | 0.343                                    | 89.720                     | 0.982 | $2.897 \times 10^{-4}$ | 1.744                                  |

在半方差函数分析的基础上,各向同性的分维数分析结果表明,石栎-青冈常绿阔叶林土壤有机 C 和全 N 含量具有很好的分形特征(表 3)。土壤指标抽样分隔距离和变异函数值的双对数曲线具有较高的线性关系。土壤有机 C 的分形维数为 1.835—1.895,土壤全 N 的分维数为 1.744—1.816,土壤有机 C 的分维数均比全 N 的分维数大,表明土壤有机 C 的空间依赖性强,具有良好的结构性。两者空间

格局存在局部变异,土壤有机 C 的空间格局比全 N 略为复杂。

### 3.3 土壤有机 C 和全 N 的空间分布格局

基于 Kriging 插值法得到石栎-青冈常绿阔叶林土壤有机 C(图 4)和全 N 的空间分布格局(图 5)。土壤有机 C 和全 N 呈明显的条带状和斑块状的梯度变化,在一些小样地内为相似的空间分布格局,说明在某些小尺度下两者的空间关联性较好。土壤有机

C 和全 N 的高值均出现在海拔较低的沟谷及小洼地,低值则出现在山脊地带。

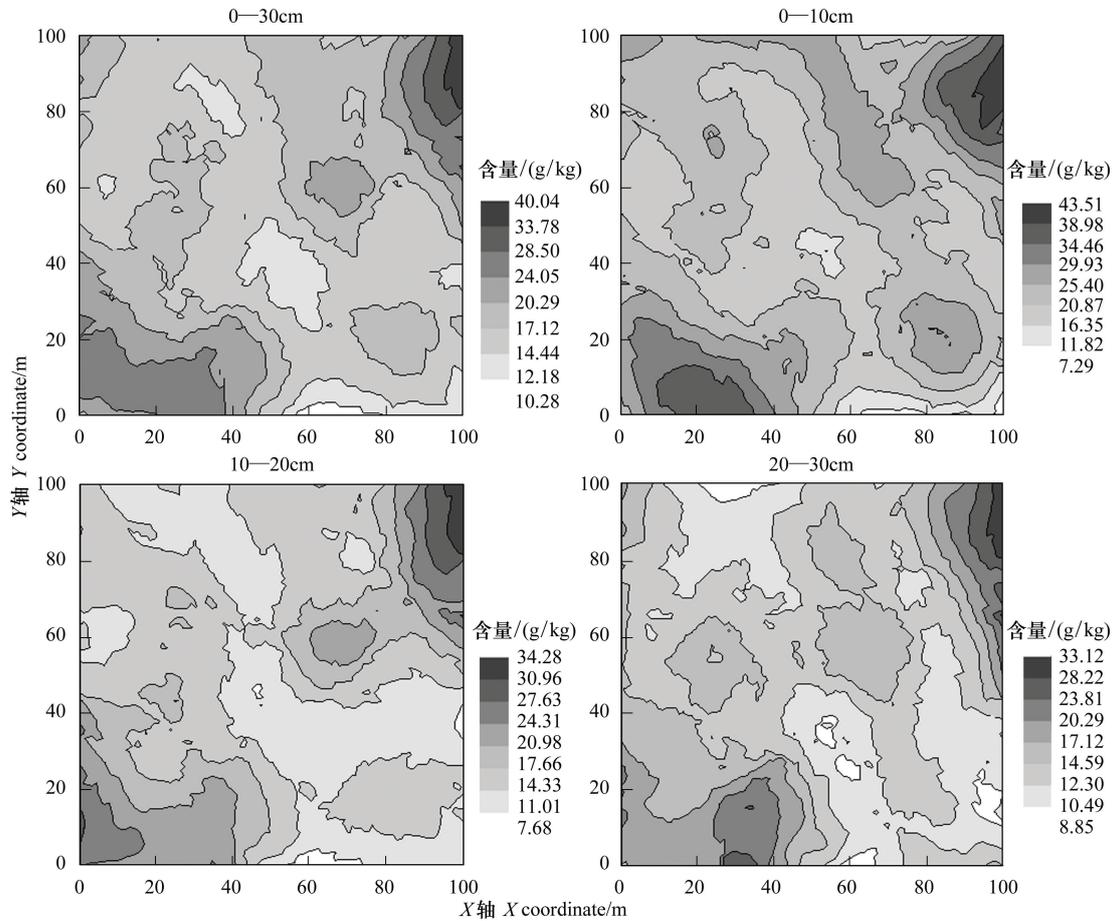


图 4 石栎-青冈常绿阔叶林土壤有机 C 含量的空间分布格局

Fig.4 Spatial distribution of soil organic C in the *Lithocarpus glaber-Cyclobalanopsis glauca* forest

3.4 土壤有机 C 和全 N 含量变异的影响因素

土壤有机 C 含量与海拔、凸凹度呈负相关,但未达到显著水平(表 4)。土壤全 N 含量与海拔呈负相关,10—20cm 层达到极显著水平,其它土层相关性不显著;土壤全 N 含量与凸凹度呈负相关,0—10cm

层和 0—30cm 层均值达到显著水平(表 4)。表明低海拔、洼地土壤有机 C 和全 N 含量较高,与 Kriging 插值的空间分布格局一致。土壤各层有机 C 含量与凋落物量均呈极显著正相关(表 4)。土壤全 N 含量与凋落物量呈正相关,10—20cm 层及 20—30cm 层

表 4 土壤有机 C、全 N 含量与地形因子、凋落物量及植物因子之间的相关系数

Table 4 Correlation soil organic C (SOC) and total N concentrations with topographic factors, stand factors

| 指标<br>Items  | 土层/cm<br>Soil depth | 海拔<br>Elevation | 凸凹度<br>Convexity | 凋落物量<br>Litter biomass | 株数<br>Numbers | 物种数<br>Species |
|--------------|---------------------|-----------------|------------------|------------------------|---------------|----------------|
| 土壤有机 C (SOC) | 0—10                | -0.124          | -0.100           | 0.341 **               | -0.105        | -0.173         |
|              | 10—20               | -0.166          | -0.055           | 0.386 **               | -0.114        | -0.218 *       |
|              | 20—30               | -0.182          | -0.132           | 0.301 **               | -0.085        | -0.153         |
|              | 0—30                | -0.171          | -0.107           | 0.388 **               | -0.116        | -0.205 *       |
| 全 N Total N  | 0—10                | -0.127          | -0.256 *         | 0.118                  | -0.096        | -0.134         |
|              | 10—20               | -0.262 **       | -0.146           | 0.217 *                | -0.168        | -0.180         |
|              | 20—30               | -0.121          | -0.191           | 0.208 *                | -0.069        | -0.096         |
|              | 0—30                | -0.180          | -0.222 *         | 0.191                  | -0.120        | -0.150         |

\* 表示影响显著 (P<0.05), \*\* 极显著 (P<0.01)

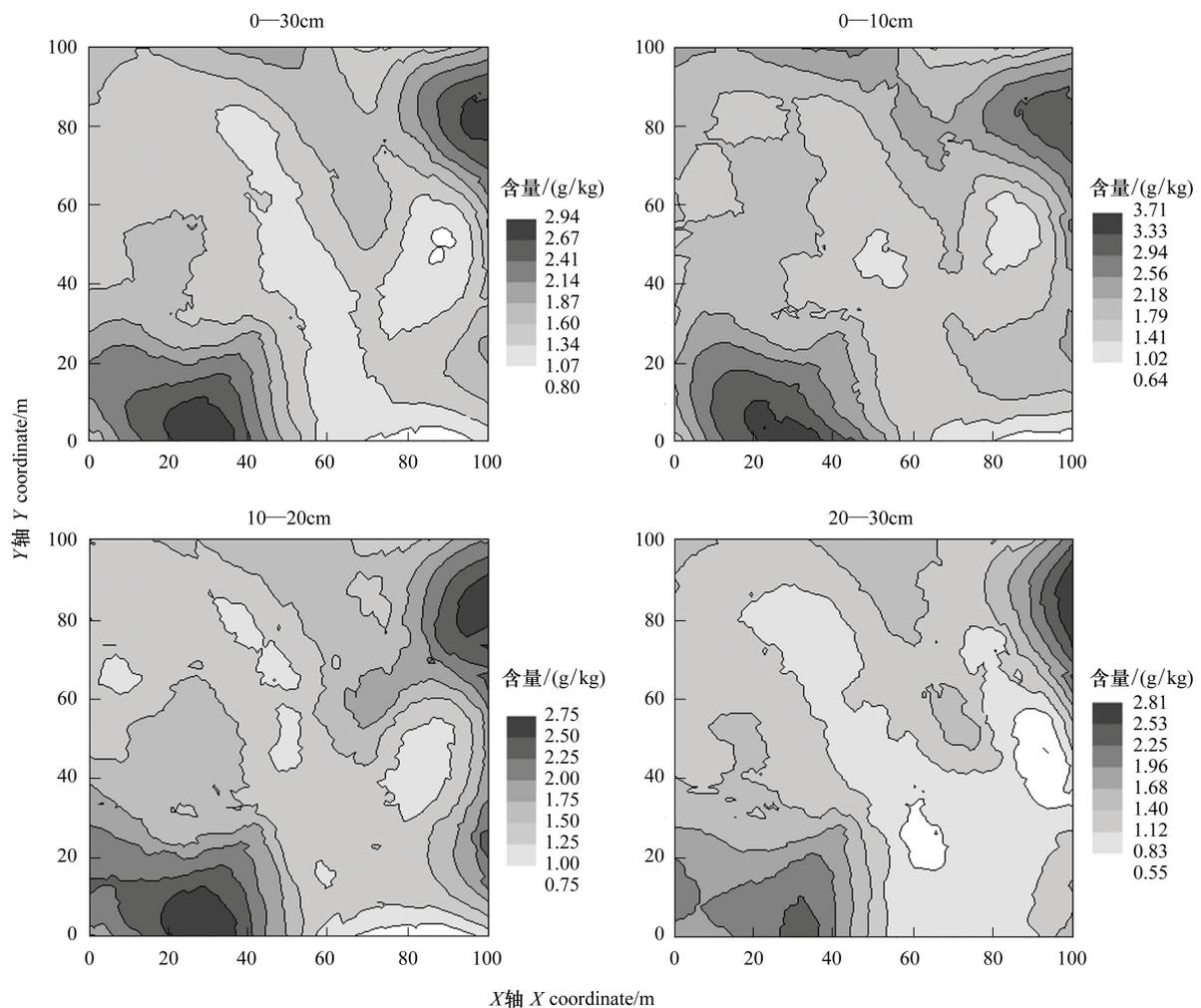


图5 石栎-青冈常绿阔叶林土壤全N含量的空间分布格局

Fig.5 Spatial distribution of total soil N in the *Lithocarpus glaber-Cyclobalanopsis glauca* forest

达到显著水平(表4)。可见,土壤有机C量受凋落物量的影响较大,明显受林分树种组成的影响,而土壤全N含量受地形因子影响较大,表现出淋溶的特性。土壤有机C和全N含量与样地内的树木株数呈负相关,但不显著;10—20cm土壤有机C含量与物种数呈显著负相关,0—30cm土壤有机C含量与物种数呈显著负相关。全N含量与物种数呈负相关关系,但不显著(表4)。

#### 4 讨论

土壤养分的空间变异无论是区域尺度还是中小尺度,都普遍存在<sup>[29]</sup>。本研究中,石栎-青冈常绿阔叶林土壤有机C和全N含量均为中等程度变异,随着土壤深度的增加而呈现出减小的趋势,土壤表层的变异比下层更加明显。土壤有机C的空间变异程

度较大,大于全N的变异程度。本研究样地中的土壤有机C含量平均值(18.61 g/kg),低于亚热带平原湖区(25.10 g/kg)<sup>[30]</sup>,但略高于亚热带红壤低山地区(17.75 g/kg)。土壤全N含量平均值(1.63g/kg)略低于浙江天童山(3.21 g/kg)<sup>[31]</sup>以及古田山(2.04 g/kg)<sup>[32]</sup>。本研究对象为常绿阔叶林,但在丘陵区微地形及某些小生境内有针叶树种、落叶树种和竹类多种植物,多种植物的不均匀分布引起土壤养分含量空间变异。这与天童山常绿阔叶林<sup>[31]</sup>、帽儿山水曲柳人工林<sup>[11]</sup>和喀斯特森林<sup>[9,33]</sup>土壤养分变异性的研究结果较为一致。本研究中,土壤有机C和全N含量的空间变异性,可能对森林群落的树种组成及其相关的生态功能过程产生一定的影响<sup>[32]</sup>。

土壤有机C半方差函数模型为球状模型和指数模型,变程为170.500—365.700m,全N半方差函数

模型为高斯模型,变程为 89.720—110.678m,较好反映了土壤养分的空间分布特征。有机 C 的空间自相关范围大于全 N 的空间自相关范围,说明石栎-青冈常绿阔叶林土壤养分空间变异特征是结构性和随机性因素共同作用于有机 C 和全 N 的结果<sup>[9,33]</sup>,包括小尺度的空间变异、树种组成和凋落物养分归还量对土壤养分的影响<sup>[29]</sup>。本研究林分内土壤有机 C 和全 N 的空间分布特征均表现出中等程度的空间自相关性。土壤养分有效性各异的斑块在空间上呈镶嵌分布,随着时间的变化,从而影响植物之间的相互作用和物种共存<sup>[9]</sup>。土壤养分的空间异质性受地形因子和群落树种组成的影响<sup>[33]</sup>。本研究中,海拔与土壤有机 C、全 N 呈负相关,凹凸度与全 N 含量呈显著负相关,凋落物量与土壤有机 C 呈极显著正相关,与全 N 含量相关性未达到显著水平,物种数与有机 C 呈显著负相关关系。说明影响土壤有机 C 和全 N 空间分布的因素较为复杂<sup>[15,31-33]</sup>。海拔和凹凸度调控光照、降水的空间再分配、土层厚度及局部小气候<sup>[34]</sup>,本研究样地中,土壤全 N 受凹凸度的影响较大,且同一海拔梯度洼地的全 N 含量明显高于山脊,因为地形影响地表径流,进而对养分起到淋溶和汇聚作用,山脊和坡面的养分(N)容易被淋失带走,因此土壤 N 的空间异质性反映了 N 的淋溶特征。一些研究表明土壤有机 C 含量与凹凸度有关<sup>[32]</sup>,但本研究中土壤有机 C 含量与海拔、凹凸度呈负相关,但未达到显著水平,可能是因为林下凋落物积累有利于土壤有机质形成,维持了土壤有机 C 含量。石栎-青冈常绿阔叶林的林分密度大,树种组成丰富,地上凋落物和地下细根周转在林分空间尺度上存在异质性,导致土壤有机 C 的空间变异,随着土壤深度增加,土壤有机 C 含量变异性减少,更说明了凋落物是影响土壤有机 C 的重要因素。

亚热带常绿阔叶林生产力高,植物生物作用强烈,旺盛的生物积累过程是土壤养分形成和维持的基础,而土壤养分的空间变异反过来又会作用于植物的生长发育及空间分布<sup>[33]</sup>。研究亚热带常绿阔叶林的土壤养分空间变异特征,对于维持区域 C 平衡和提高 C 汇功能有着积极作用。结合土壤养分与树种之间相互作用机理,揭示植物空间分布格局和物种共存机理将是今后的重点研究方向。

## References:

- [ 1 ] 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. *Journal of Plant Ecology*, 2007, 31(1): 66-74.
- [ 2 ] Fang J Y. *Global Ecology*. Beijing: Higher Education Press, 2000.
- [ 3 ] Biederbeck V O, Janzen H H, Campbell C A, Zentner R P. Labile soil organic matter as influenced by cropping practices in an arid environment. *Soil Biology and Biochemistry*, 1994, 26(12): 1647-1656.
- [ 4 ] Critchley C N R, Chambers B J, Fowbert J A, Sanderson R A, Bhogal A, Rose S C. Association between lowland grassland plant communities and soil properties. *Biological Conservation*, 2002, 105(2): 199-215.
- [ 5 ] Zhang S J, He Y, Fang H. Spatial variability of soil properties in the field based on GPS and GIS. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2003, 19(2): 39-44.
- [ 6 ] Wang Z Q. *Geostatistics and Its Application in Ecology*. Beijing: Science Press, 1999.
- [ 7 ] Li Z Z, Gong Y S. Spatial variability of soil water content and electrical conductivity in field for different sampling scales and their nested models. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2001, 7(3): 255-261.
- [ 8 ] Schlesinger W H, Raikes J A, Hartley A E, Cross A F. On the spatial pattern of soil nutrients in desert ecosystems. *Ecology*, 1996, 77(2): 364-374.
- [ 9 ] Liu L, Zeng F P, Song T Q, Peng W X, Wang K L, Qin W G, Tan W N. Spatial heterogeneity of soil nutrients in Krast area's Mulun National Nature Reserve. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, 21(7): 1667-1673.
- [ 10 ] Wang J, Fu B J, Qin Y, Chen L D, Yu L. Spatial heterogeneity of soil nutrients in a small catchment of the Loess Plateau. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, 22(8): 1173-1178.
- [ 11 ] Sun Z H, Wang Q C. Study on spatial heterogeneity of topsoil nutrient in *Fraxinus Mandshurica* plantation. *Journal of soil and Water Conservation*, 2007, 21(2): 81-84.
- [ 12 ] Guo X D, Fu B J, Ma K M, Chen L D, Yang F L. Spatial variability of soil nutrients based on geostatistics combined with GIS—A case study in Zunhua City of Hebei Province. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2000, 11(4): 557-563.
- [ 13 ] Yang X Q, Han Y Z, Li L, Chen X, You J. The effect of heterogeneous spatial distribution of soil nitrogen on regeneration of *Larix principis-rupprechtii* seedlings in typical naturally-regenerated montane forests of Northern China. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(9): 4656-4664.
- [ 14 ] Li J R, Okin G S, Alvarez L, Epstein H. Effects of wind erosion on the spatial heterogeneity of soil nutrients in two desert

- grassland communities. *Biogeochemistry*, 2008, 88(1): 73-88.
- [15] Zhang W, Chen H S, Wang K L, Su Y R, Zhang J G, Yi A J. The heterogeneity of soil nutrients and their influencing factors in peak-cluster depression areas of Karst region. *Scientia Agricultura Sinica*, 2006, 39(9): 1828-1835.
- [16] Lu X, Xiang W H, Liu C. Storage and distribution of soil organic carbon and nitrogen in four subtropical forests in central southern china. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2012, 26(3): 169-173.
- [17] Chen Y F, Song M H, Dong M. Spatial pattern of the plant community alone a sand-covered hillslope in Ordos plateau of China. *Acta Phytocological Sinica*, 2002, 26(4): 501-505.
- [18] Tang M P, Zhou G M, Shi Y J, Chen Y G, Wu Y Q, Zhao M S. Study of dominant plant populations and their spatial patterns in evergreen broadleaved forest in Tianmu Mountain, China. *Journal of Plant Ecology*, 2006, 30(5): 743-752.
- [19] Zhao L J, Xiang W H, Li J X, Deng X W, Liu C. Floristic competition, structure and phytogeographic characteristics in a *Lithocarpus glaber-Cyclobalanopsis glauca* forest community in the subtropical region. *Scientia Silvae Sinicae*, 2013, 49(12): 10-17.
- [20] Su S J, Liu J F, He Z S, Hong W, Zhang J B. The spatial heterogeneity of soil nutrients in a mid-subtropical *Castanopsis kawakamii* natural forest. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(18): 5673-5682.
- [21] Deng J, Deng X W, Huang Z H, Chen H, Xiang W H, Peng C H, Zhang L Y. Surface N<sub>2</sub>O flux from 4 different typical forest stands in growing season in subtropical south China. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2012, 28(13): 6-13.
- [22] Bao S D. *Soil and Agricultural Chemistry Analysis*. Beijing: China Agriculture Press, 2000.
- [23] Robertson G P. *GS+: GS+ Guide Version9. Geostatistics for the environmental sciences*. Gamma Design Software, Plainwell, Michigan USA. 2008.
- [24] Zhang C S, Zhang S, He J B. Spatial distribution characteristics of heavy metals in the sediments of Changjiang River system—geostatistics method. *Acta Geographica Sinica*, 1997, 52(2): 184-192.
- [25] Rossi R E, Mulla D J, Journel Á G, Franz E H. Geostatistical tools for modeling and interpreting ecological spatial dependence. *Ecological Monographs*, 1992, 62(2): 277-314.
- [26] Zhao B, Cai Q H. An application of geostatistical analysis in freshwater ecosystem. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2000, 24(5): 514-520.
- [27] Wu J G. *Landscape Ecology: Pattern, Process, Scale and Hierarchy*. Beijing: Higher Education Press, 2000.
- [28] Valencia A, Foster R B, Villa G, Condit R, Svenning J C, Hernandez C, Ratya K, Losos E, Magård E, Balslev H. Tree species distributions and local habitat variation in the Amazon large forest plot in eastern Ecuador. *Journal of Ecology*, 2004, 92(2): 214-229.
- [29] Yan E R, Wang X H, Chen X Y. Impacts of evergreen broadleaved forest degradation on soil nutrients and carbon pools in Tiantong, Zhejiang Province. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(4): 1646-1655.
- [30] Tang G Y, Wu J S, Su Y R, Zheng H, Li K. Content and density characteristics of soil organic carbon in typical landscapes of subtropical region. *Environmental Science*, 2009, 30(7): 2047-2052.
- [31] Zhang N, Wang X H, Zheng Z M, Ma Z P, Yang Q S, Fang X F, Xie Y B. Spatial heterogeneity of soil properties and its relationships with terrain factors in broadleaved forest in Tiantong of Zhejiang Province, East China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2012, 23(6): 2361-2369.
- [32] Ding J, Wu Q, Yan H, Zhang S R. Effects of topographic variations and soil characteristics on plant functional traits in a subtropical evergreen broad-leaved forest. *Biodiversity Science*, 2011, 19(2): 158-167.
- [33] Zhang Z H, Hu G, Zhu J D, Ni J. Spatial heterogeneity of soil nutrients and its impact on tree species distribution in a Karsts forest of southwest China. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2011, 35(10): 1038-1049.
- [34] Tateno R, Hishi T, Takeda H. Above-and belowground biomass and net primary production in a cool-temperate deciduous forest in relation to topographical changes in soil nitrogen. *Forest Ecology and Management*, 2004, 193(3): 297-306.

#### 参考文献:

- [1] 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. *植物生态学报*, 2007, 31(1): 66-74.
- [2] 方精云. *全球生态学*. 北京: 高等教育出版社, 2000.
- [5] 张淑娟, 何勇, 方慧. 基于 GPS 和 GIS 的田间土壤养分空间变异性的研究. *农业工程学报*, 2003, 19(2): 39-44.
- [6] 王政权. *地统计学及其在生态学中的应用*. 北京: 科学出版社, 1999.
- [7] 李子忠, 龚元石. 不同尺度下田间土壤水分和混合电导率空间变异性与套台结构模型. *植物营养与肥科学报*, 2001, 7(3): 255-261.
- [9] 刘璐, 曾馥平, 宋同清, 彭晚霞, 王克林, 覃文更, 谭卫宁. 喀斯特木论自然保护区土壤养分的空间变异特征. *应用生态学报*, 2010, 21(7): 1667-1673.
- [10] 王军, 傅伯杰, 邱扬, 陈利顶, 余莉. 黄土高原小流域土壤养分的空间异质性. *生态学报*, 2002, 22(8): 1173-1178.
- [11] 孙志虎, 王庆成. 水曲柳人工林土壤养分的空间异质性研究. *水土保持学报*, 2007, 21(2): 81-84.
- [12] 郭旭东, 傅伯杰, 马克明, 陈利顶, 杨福林. 基于 GIS 和地统计学的土壤养分空间变异特征研究——以河北省遵化市为例. *应用生态学报*, 2000, 11(4): 557-563.

- [13] 杨秀清, 韩有志, 李乐, 陈欣, 游静. 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. 生态学报, 2009, 29(9): 4656-4664.
- [15] 张伟, 陈洪松, 王克林, 苏以荣, 张继光, 易爱军. 喀斯特峰丛洼地土壤养分空间分异特征及影响因子分析. 中国农业科学, 2006, 39(9): 1828-1835.
- [16] 路翔, 项文化, 刘聪. 中亚热带4种森林类型土壤有机碳氮贮量及分布特征. 水土保持学报, 2012, 26(3): 169-173.
- [17] 陈玉福, 宋明华, 董鸣. 鄂尔多斯高原覆沙坡地植物群落格局. 植物生态学报, 2002, 26(4): 501-505.
- [18] 汤孟平, 周国模, 施拥军, 陈永刚, 吴亚琪, 赵明水. 天目山常绿阔叶林优势树种及其空间分布格局. 植物生态学报, 2006, 30(5): 743-752.
- [19] 赵丽娟, 项文化, 李家湘, 邓湘雯, 刘聪. 中亚热带石栎—青冈群落物种组成、结构及区系特征. 林业科学, 2013, 49(12): 10-17.
- [20] 苏松锦, 刘金福, 何中声, 洪伟, 张金彪. 格氏栲天然林土壤养分空间异质性. 生态学报, 2012, 32(18): 5673-5682.
- [21] 邓杰, 邓湘雯, 黄志宏, 陈槐, 项文化, 彭长辉, 张丽云. 4种典型亚热带森林生态系统生长季地表  $N_2O$  通量特征. 中国农学通报, 2012, 28(13): 6-13.
- [22] 鲍士旦. 土壤农化分析. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [24] 张朝生, 章申, 何建邦. 长江水系河流沉积物重金属含量空间分布特征研究—地统计学方法. 地理学报, 1997, 52(2): 184-192.
- [26] 赵斌, 蔡庆华. 地统计学分析方法在水生态系统研究中的应用. 水生生物学报, 2000, 24(5): 514-520.
- [27] 邬建国. 景观生态学: 格局、过程、尺度与等级. 北京: 高等教育出版社, 2000.
- [29] 阎恩荣, 王希华, 陈小勇. 浙江天童地区常绿阔叶林退化对土壤养分库和碳库的影响. 生态学报, 2007, 27(4): 1646-1655.
- [31] 张娜, 王希华, 郑泽梅, 马遵平, 杨庆松, 方晓峰, 谢玉彬. 浙江天童常绿阔叶林土壤的空间异质性及其与地形的关系. 应用生态学报, 2012, 23(9): 2361-2369.
- [32] 丁佳, 吴茜, 闫慧, 张守仁. 地形和土壤特性对亚热带常绿阔叶林内植物功能性状的影响. 生物多样性, 2011, 19(2): 158-167.
- [33] 张忠华, 胡刚, 祝介东, 倪健. 喀斯特森林土壤养分的空间异质性及其对树种分布的影响. 植物生态学报, 2011, 35(10): 1038-1049.

**ACTA ECOLOGICA SINICA Vol.34, No.12 June, 2014 (Semimonthly)**  
**CONTENTS**

|   |   |
|---|---|
| Development history and future research priorities of landscape ecology in China .....  | CHEN Liding, LI Xiuzhen, FU Bojie, et al (3129)       |
| Research review on effects of urban landscape pattern changes on water environment .....  | HUANG Shuo, GUO Qinghai (3142)                        |
| A review of multifunctional landscape .....   | TANG Qian, DING Shengyan (3151)                       |
| Compact development of space-limited city: a case study of Xiamen Island .....  | HUANG Shuo, GUO Qinghai, TANG Lina (3158)             |
| Analysis of factors contributing to the cooling effects of Purple Mountain Forest Park .....  | YAN Weijiao, KONG Fanhua, YIN Haiwei, et al (3169)    |
| Impacts of structure characteristics on the thermal environment effect of city parks .....  | FENG Yueyi, HU Tangao, ZHANG Lixiao (3179)            |
| Suitability assessment for building land consolidation on gentle hillside based on OWA operator: a case in Dali Bai Nationality<br>Borough in Yunnan, China ..... | LIU Yanxu, PENG Jian, HAN Yinan, et al (3188)         |
| Optimization of land use pattern based on eco-security: a case study in the Huangfuchuan watershed .....  | YU Feng, LI Xiaobing, WANG Hong (3198)                |
| Analysis of land use/cover change from 2000 to 2010 and its driving forces in Manas River Basin, Xinjiang .....   | LIU Jinwei, JIN Tiantian, LIU Guohua, et al (3211)    |
| Dynamic trend analysis of land use change in the Ganjiang upstream watershed by using RS and GIS techniques .....   | LU Yanfei, PENG Fang, WAN Yun, et al (3224)           |
| Landscape pattern dynamics and driving forces analysis in the Sanjiang Plain from 1954 to 2010 .....  | LIU Jiping, ZHAO Dandan, TIAN Xuezhi, et al (3234)    |
| Optimizing theory and case studies of cultivated slope land in the center of three gorges reservoir area based on patch-scale land<br>evaluation .....            | WANG Yongyan, LI Yangbing, SHAO Jingan, et al (3245)  |
| Spatial-temporal evolution of land use and landscape pattern of the mountain-basin system in Guizhou Province .....   | LI Yangbing, YAO Yuanwen, XIE Jing, et al (3257)      |
| Spatio-temporal simulation of land cover scenarios in southwestern of China .....   | LI Jing, FAN Zemeng, YUE Tianxiang (3266)             |
| Gradient analysis of dry valley of Minjiang River landscape pattern, based on moving window method .....  | ZHANG Lingling, ZHAO Yonghua, YIN Sha, et al (3276)   |
| Study on spatio-temporal change of Tibetan Antelope's habitat based on vegetation coverage .....  | ZHAO Haidi, LIU Shiliang, DONG Shikui, et al (3285)   |
| Spatial heterogeneity of soil microbial biomass carbon, nitrogen, and phosphorus in sloping field in a grove Karst region,<br>Southwest China .....               | FAN Fujing, HUANG Guoqin, SONG Tongqing, et al (3293) |
| Characteristics of soil microbial populations and biomass under different ecosystems in a canyon karst region .....   | TAN Qiujin, SONG Tongqing, PENG Wanxia, et al (3302)  |
| Spatial and temporal dynamics of land use and its influence on ecosystem service value in Yangtze River Delta .....   | LIU Guilin, ZHANG Luocheng, ZHANG Qian (3311)         |
| Evaluation of tourism dynamic landscape along Qinghai-Tibet railway based on the visual corridor .....  | ZHANG Ruiying, XI Jianchao, YAO Yulong, et al (3320)  |
| A study of spatial evolution characteristics of rural settlements and influences of landscape patterns on their distribution using GIS<br>and RS .....            | REN Ping, HONG Buting, LIU Yin, et al (3331)          |

- Assessing the ecosystem conservation status and priority: a case study from Jiangxi Province, China ..... FAN Naiqing, ZHANG Yuxin, LÜ Yihe, et al (3341)
- The impact of salt marsh change on sediment accumulation and wave attenuation at the East Chongming Island ..... REN Linjing, LI Xiuzhen, YANG Shilun, et al (3350)
- Landscape classification system based on climate, landform, ecosystem; a case study of Xinjiang area ..... SHI Qingdong, WANG Zhi, HE Longmei, et al (3359)
- Analysis of landscape pattern evolution characteristic in the hilly and gully area of loess plateau; a case study in Yan'an City, Shaanxi Province ..... ZHONG Lina, ZHAO Wenwu, LV Yihe, et al (3368)
- Analysis of the characteristics of agro-landscape heterogeneity under the different disturbances; a case study of Gongyi City ..... ZHANG Xiaoyang, LIANG Guofu, DING Shengyan (3378)
- Classification and ordination of grassland landscape in the Shanxi Plateau ..... ZHANG Xianping, LI Zhiqin, WANG Mengben, et al (3386)
- Analysis of factors affecting mountainous land surface temperature in the summer; a case study over Mount Tai ..... SUN Changfeng, KONG Fanhua, YIN Haiwei, et al (3396)
- Research on spatial distribution and influencing factor of soil moisture in typical depression area of karst region ..... ZHANG Jiguang, SU Yirong, CHEN Hongsong, et al (3405)
- Landscape heterogeneity of mountainous and hilly area in the western Henan Province based on moving window method ..... LI Dongke, DING Shengyan, LIANG Guofu, et al (3414)
- Trends in vegetation and their responses to climate and topography in northwest Guangxi ..... TONG Xiaowei, WANG Kelin, YUE Yuemin, et al (3425)
- Landscape pattern analysis on change of fractional vegetation cover between karst and no-karst areas; a case study in Hechi District, Guangxi Zhuang Autonomous Region ..... WANG Mingchong, WANG Xizhi, LIANG Zhaoxiong, et al (3435)
- Multi-scale effects for landscape metrics and species diversity under the different disturbance; a case study of Gongyi City ..... DONG Cuifang, LIANG Guofu, DING Shengyan, et al (3444)
- Spatial heterogeneity of soil organic carbon and total nitrogen concentrations in a *Lithocarpus glaber-Cyclobalanopsis glauca* evergreen broadleaved forest ..... YANG Dan, XIANG Wenhua, FANG Xi, et al (3452)
- The characteristics and regeneration of the *Choerospondias axillaries* broad-leaved community in the hilly region of central Hunan Province, China ..... YI Hao, DENG Xiangwen, XIANG Wenhua, et al (3463)
- Factors influencing the spatial distribution of vegetation carbon density in karst landscapes of Northwest Guangxi; a case study based on radial basis function network model ..... ZHANG Mingyang, WANG Kelin, DENG Zhenhua, et al (3472)

# 《生态学报》2014 年征订启事

《生态学报》是由中国科学技术协会主管,中国生态学学会、中国科学院生态环境研究中心主办的生态学高级专业学术期刊,创刊于 1981 年,报道生态学领域前沿理论和原始创新性研究成果。坚持“百花齐放,百家争鸣”的方针,依靠和团结广大生态学科工作者,探索生态学奥秘,为生态学基础理论研究搭建交流平台,促进生态学研究深入发展,为我国培养和造就生态学科人才和知识创新服务、为国民经济建设和发展服务。

《生态学报》主要报道生态学及各分支学科的重要基础理论和应用研究的原始创新性科研成果。特别欢迎能反映现代生态学发展方向的优秀综述性文章;研究简报;生态学新理论、新方法、新技术介绍;新书评价和学术、科研动态及开放实验室介绍等。

《生态学报》为半月刊,大 16 开本,280 页,国内定价 90 元/册,全年定价 2160 元。

国内邮发代号:82-7,国外邮发代号:M670

标准刊号:ISSN 1000-0933 CN 11-2031/Q

全国各地邮局均可订阅,也可直接与编辑部联系购买。欢迎广大科技工作者、科研单位、高等院校、图书馆等订阅。

通讯地址:100085 北京海淀区双清路 18 号 电 话:(010)62941099; 62843362

E-mail: shengtaixuebao@rcees.ac.cn 网 址: www.ecologica.cn

编辑部主任 孔红梅 执行编辑 刘天星 段 靖

生 态 学 报

(SHENGTAI XUEBAO)

(半月刊 1981 年 3 月创刊)

第 34 卷 第 12 期 (2014 年 6 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 34 No. 12 (June, 2014)

编 辑 《生态学报》编辑部  
地址:北京海淀区双清路 18 号  
邮政编码:100085  
电话:(010)62941099  
www.ecologica.cn  
shengtaixuebao@rcees.ac.cn

主 编 王如松  
主 管 中国科学技术协会  
主 办 中国生态学学会  
中国科学院生态环境研究中心  
地址:北京海淀区双清路 18 号  
邮政编码:100085

出 版 科 学 出 版 社  
地址:北京东黄城根北街 16 号  
邮政编码:100717

印 刷 北京北林印刷厂  
发 行 科 学 出 版 社  
地址:东黄城根北街 16 号  
邮政编码:100717  
电话:(010)64034563  
E-mail: journal@cspg.net

订 购 全国各地邮局  
国外发行 中国国际图书贸易总公司  
地址:北京 399 信箱  
邮政编码:100044

广告经营 京海工商广字第 8013 号  
许 可 证

Edited by Editorial board of  
ACTA ECOLOGICA SINICA  
Add: 18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China  
Tel: (010)62941099  
www.ecologica.cn  
shengtaixuebao@rcees.ac.cn

Editor-in-chief WANG Rusong  
Supervised by China Association for Science and Technology  
Sponsored by Ecological Society of China  
Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS  
Add: 18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China

Published by Science Press  
Add: 16 Donghuangchenggen North Street,  
Beijing 100717, China

Printed by Beijing Bei Lin Printing House,  
Beijing 100083, China

Distributed by Science Press  
Add: 16 Donghuangchenggen North  
Street, Beijing 100717, China  
Tel: (010)64034563  
E-mail: journal@cspg.net

Domestic All Local Post Offices in China  
Foreign China International Book Trading  
Corporation  
Add: P.O.Box 399 Beijing 100044, China



ISSN 1000-0933  
CN 11-2031/Q

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 90.00 元