

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

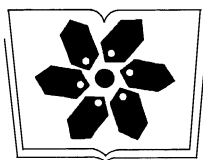
Acta Ecologica Sinica



第 32 卷 第 19 期 Vol.32 No.19 **2012**

中国生态学会
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 32 卷 第 19 期

2012 年 10 月 (半月刊)

目 次

中国野生东北虎数量监测方法有效性评估	张常智, 张明海, 姜广顺 (5943)
城市居民食物氮消费变化及其环境负荷——以厦门市为例	于 洋, 崔胜辉, 赵胜男, 等 (5953)
珠江口水域夏季小型底栖生物群落结构	袁俏君, 苗素英, 李恒翔, 等 (5962)
2010 年夏季雷州半岛海岸带浮游植物群落结构特征及其与主要环境因子的关系	龚玉艳, 张才学, 孙省利, 等 (5972)
阿根廷滑柔鱼两个群体间耳石和角质颞的形态差异	方 舟, 陈新军, 陆化杰, 等 (5986)
黄河三角洲滨海草甸与土壤因子的关系	谭向峰, 杜 宁, 葛秀丽, 等 (5998)
盘锦湿地净初级生产力时空分布特征	王莉雯, 卫亚星 (6006)
菜豆根瘤菌对土壤钾的活化作用	张 亮, 黄建国, 韩玉竹, 等 (6016)
花生植株和土壤水浸液自毒作用研究及土壤中自毒物质检测	黄玉茜, 韩立思, 杨劲峰, 等 (6023)
遮荫对金莲花光合特性和叶片解剖特征的影响	吕晋慧, 王 玄, 冯雁梦, 等 (6033)
火干扰对小兴安岭草丛、灌丛沼泽温室气体短期排放的影响	顾 韩, 牟长城, 张博文, 等 (6044)
古尔班通古特沙漠南部植物多样性及群落分类	张 荣, 刘 彤 (6056)
黄土高原樟子松和落叶松与其他树种枯落叶混合分解对土壤的影响	李 茜, 刘增文, 米彩红 (6067)
长期集约种植对雷竹林土壤氨氧化古菌群落的影响	秦 华, 刘卜榕, 徐秋芳, 等 (6076)
H ₂ O ₂ 参与 AM 真菌与烟草共生过程	刘洪庆, 车永梅, 赵方贵, 等 (6085)
北京山区防护林优势树种分布与环境的关系	邵方丽, 余新晓, 郑江坤, 等 (6092)
旱直播条件下强弱化感潜力水稻根际微生物的群落结构	熊 君, 林辉锋, 李振方, 等 (6100)
不同森林类型根系分布与土壤性质的关系	黄 林, 王 峰, 周立江, 等 (6110)
臭氧胁迫下硅对大豆抗氧化系统、生物量及产量的影响	战丽杰, 郭立月, 宁堂原, 等 (6120)
垃圾填埋场渗滤液灌溉对土壤理化特征和草本花卉生长的影响	王树芹, 赖 娟, 赵秀兰 (6128)
稻麦轮作系统冬小麦农田耕作措施对氧化亚氮排放的影响	郑建初, 张岳芳, 陈留根, 等 (6138)
不同施氮措施对旱作玉米地土壤酶活性及 CO ₂ 排放量的影响	张俊丽, 高明博, 温晚霞, 等 (6147)
北方农牧交错区农业生态系统生产力对气候波动的响应——以准格尔旗为例	孙特生, 李 波, 张新时 (6155)
辽宁省能源消费和碳排放与经济增长的关系	康文星, 姚利辉, 何介南, 等 (6168)
基于 FARSITE 模型的丰林自然保护区潜在林火行为空间分布特征	吴志伟, 贺红士, 梁 宇, 等 (6176)
不同后作生境对玉米地天敌的冬季保育作用	田耀加, 梁广文, 曾 玲, 等 (6187)
云南紫胶虫种群数量对地表蚂蚁多样性的影响	卢志兴, 陈又清, 李 巧, 等 (6195)
阿波罗绢蝶种群数量和垂直分布变化及其对气候变暖的响应	于 非, 王 吟, 王绍坤, 等 (6203)
专论与综述	
海水养殖生态系统健康综合评价: 方法与模式	蒲新明, 傅明珠, 王宗灵, 等 (6210)
海草场生态系统及其修复研究进展	潘金华, 江 鑫, 赛 珊, 等 (6223)
水华蓝藻对鱼类的营养毒理学效应	董桂芳, 解绶启, 朱晓鸣, 等 (6233)
环境胁迫对海草非结构性碳水化合物储存和转移的影响	江志坚, 黄小平, 张景平 (6242)
生态免疫学研究进展	徐德立, 王德华 (6251)
研究简报	
喀斯特峰丛洼地不同森林表层土壤有机质的空间变异及成因	宋 敏, 彭晚霞, 邹冬生, 等 (6259)
准噶尔盆地东南缘梭梭种子雨特征	吕朝燕, 张希明, 刘国军, 等 (6270)



封面图说: 岸边的小白鹭——鹭科白鹭属共有 13 种, 其中有大白鹭、中白鹭、白鹭 (小白鹭)、黄嘴白鹭等, 体羽皆是全白, 世通称白鹭。夏季的白鹭成鸟繁殖时枕部着生两条狭长而软的矛状羽, 状若双辫, 肩和胸着生蓑羽, 冬季时蓑羽常全部脱落, 白鹭虹膜黄色, 嘴黑色, 脚部黑色, 趾呈黄绿色。小白鹭常常栖息于稻田、沼泽、池塘水边, 以及海岸浅滩的红树林里。白天觅食, 好食小鱼、蛙、虾及昆虫等。繁殖期 3—7 月。繁殖时成群, 常和其他鹭类在一起, 雌雄均参加营巢, 次年常到旧巢处重新修葺使用。

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

DOI: 10.5846/stxb201107251094

宋敏,彭晚霞,邹冬生,曾馥平,杜虎,鹿士杨.喀斯特峰丛洼地不同森林表层土壤有机质的空间变异及成因.生态学报,2012,32(19):6259-6269.
Song M, Peng W X, Zou D S, Zeng F P, Du H, Lu S Y. The causes of spatial variability of surface soil organic matter in different forests in depressions between karst hills. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(19): 6259-6269.

喀斯特峰丛洼地不同森林表层土壤 有机质的空间变异及成因

宋 敏^{1,2,3}, 彭晚霞^{1,3,*}, 邹冬生², 曾馥平^{1,3}, 杜 虎^{1,3}, 鹿士杨^{1,3}

(1. 中国科学院亚热带农业生态研究所亚热带农业生态过程重点实验室, 长沙 410125;

2. 湖南农业大学生物科学技术学院, 长沙 410128; 3. 中国科学院环江喀斯特生态系统观测研究站, 环江 547100)

摘要:基于动态监测样地(200 m × 40 m)的网格(10 m × 10 m)取样,以农作区为对照,用地统计学方法研究了喀斯特峰丛洼地人工林、次生林和原生林 3 类典型森林生态系统表层土壤(0—15 cm)有机质的空间变异,通过主成分分析和相关分析,探讨了其生态学过程和机制。结果表明:喀斯特峰丛洼地土壤有机质很高,沿着农作区-人工林-次生林-原生林的恢复梯度,土壤有机质显著提高,变异系数逐步增大;农作区和 3 类森林土壤表层有机质均具有良好的空间自相关性;农作区试验半变异函数 $C_0/(C_0+C)$ 值为 26.5%,呈中等程度的空间相关性;3 类森林的 $C_0/(C_0+C)$ 值为 9.0%—22.6%,呈强烈的空间相关性;农作区和人工林土壤有机质呈单峰分布,次生林呈凹型分布,原生林呈凸型分布;不同森林的主导因子不同,农作区的主导因子为主要土壤养分,人工林为地形和物种多样性,次生林为森林结构和物种多样性,原生林为地形和物种多样性,且同一因子在不同森林与土壤表层有机质的正负作用关系和相关程度也不同。因此,农作区和 3 类森林应根据其土壤表层有机质的空间变异及主要影响因素制定相应的固碳措施。

关键词:有机质;空间变异;影响因子;喀斯特峰丛洼地

The causes of spatial variability of surface soil organic matter in different forests in depressions between karst hills

SONG Min^{1,2,3}, PENG Wanxia^{1,3,*}, ZOU Dongsheng², ZENG Fuping^{1,2}, DU Hu^{1,2,3}, LU Shiyang^{1,2,3}

1 Key Laboratory of Agro-ecological Processes in Subtropical Region, Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Changsha 410125, China

2 College of Bioscience and Biotechnology, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China

3 Huanjiang Observation and Research Station of Karst Ecosystem, Chinese Academy of Sciences, Huanjiang, Guangxi Zhuang Autonomous Region, 547100, China

Abstract: The spatial variability of surface soil (0—15 cm) organic matter in plantation, secondary forest, and primary forest in depressions between hills in a karst region was examined using farmland as a control. The ecological processes and mechanisms behind this variability were also discussed. Eighty sample plots of 10 m × 10 m were established in 200 m × 40 m farmland, plantation, secondary forest, and primary forest plots in depressions between karst hills. Geostatistics was used to analyze the spatial pattern of surface soil organic matter in the plots and principal component analysis and correlation

基金项目:中国科学院西部行动计划项目(KZCX2-XB3-10);国家科技支撑计划(2010BAE00739);中国科学院战略性先导科技专项(XDA05050205, XDA05070404);国家自然科学基金项目(31000224, 31070425, 30970508, U1033004 和 31100329);中国科学院“西部之光”人才培养计划

收稿日期:2011-07-25; 修订日期:2012-07-10

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: pengwanxia@yahoo.com.cn

analysis were used to analyze the relationships with other factors. The soil organic matter content in the depressions between karst hills was high. Along the restoration gradient from farmland > plantation > secondary forest > primary forest, the surface soil organic matter content significantly increased and the coefficients of variation also increased. The vegetation in primary forest was well preserved and soil organic matter was up to 118 g/kg, 3.76 times that of farmland. The coefficients of variation of soil organic matter in the farmland and three forest types were 19.4%—48.5%. There was a fine spatial autocorrelation in the surface soil organic matter in the farmland and the three forest types. The farmland and plantation forest were strongly influenced by humans and therefore more balanced. This meant the correlogram range was large and the maximum correlogram coefficient Moran's I was 0.460 in the farmland and 0.780 in the plantation. The natural restoration time of the secondary forest was 22 years. Here there were more, but unevenly distributed, vegetation types meaning the correlogram range was smaller and Moran's I coefficients fluctuated considerably. In the primary forest, however, the disturbance was low and vegetation intact. This meant the correlation was mainly affected by the topography. The best fitting models for semi-variation of secondary forest soil organic matter function in Karst peak-cluster depressions are the exponential model and the Gaussian model. The resulting R^2 values of 0.926—0.971 demonstrate how well they reflected the soil organic matter spatial structure characteristics. The value of $C_0/(C_0+C)$ of the surface soil organic matter in farmland was 26.5%, indicating a medium spatial correlation. The values of $C_0/(C_0+C)$ in the three forest types ranged from 9.0% to 22.6%, suggesting strong spatial correlations. The spatial pattern of surface soil organic matter in farmland and plantation presented a unimodal distribution; in secondary forest it had a concave distribution and in primary forest it had a convex distribution. Soil nutrient content was the largest influencing factor on the variation in the farmland, topography and species diversity were the largest influencing factors in the plantation and primary forest, and forest structure and species diversity were the largest influencing factors in the secondary forest. Even when considering the same factor in the three forest types, the functions and correlations differed. Therefore, the corresponding strategies of fixing carbon should take the spatial variability of surface soil organic matter and its largest influencing factors in farmland and the three forest types into account.

Key Words: soil organic matter; spatial variability; influencing factor; depression between hills in karst region

受人类活动的影响,全球碳循环发生了显著改变,大气 CO_2 等温室气体浓度持续大幅度的增加导致温室效应增强、气候变暖、大气环流发生变化、区域性气候变化加剧等一系列的生态环境问题,减排 CO_2 的呼声日益高涨^[1]。森林生态系统是世界上除海洋之外最大的碳库,其碳储量约为 1146 Pg C,占全球陆地总碳储量的 46%^[2],维持着全球植被碳库的 86% 和土壤碳库的 73%^[3],对全球碳平衡起着十分重要的作用。碳酸盐岩在全球分布面积为 $2.2 \times 10^7 \text{ km}^2$,总含碳量为 10^{14} t ,占全球总碳量的 99.6%,是全球最大的碳库^[4],由于 $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O-CaCO}_3$ 系统活跃的生物过程和化学过程,在全球碳循环中发挥着重要作用^[5],既可是碳汇(碳酸盐溶蚀作用),又可是碳源(碳酸盐沉积中的 CO_2 脱气作用)^[4],总的趋势是汇大于源,且发现了生物圈对岩溶系统碳循环的影响^[6]。但喀斯特区域的碳储量和碳汇功能研究主要侧重于地质方面,植被、土壤的碳储量和碳汇功能研究基本上按同类地区红黄壤方法类推,忽略了该区域的景观高度异质性和特殊性,可能存在着较大的不确定性。

我国西南喀斯特地区位于世界三大连片喀斯特发育区之一的东亚片区中心,面积约 54 万 km^2 ,受地球内动力^[7]、强烈的地质运动^[8]、高温多雨且分布不均^[9]、碳酸盐岩溶蚀性强^[10]、水文二维结构明显^[6] 以及其适生植物具有嗜钙性、耐旱性和石生性^[11] 等限制特点的综合影响,生境和植被具有高度异质性和脆弱性^[12-13],生态系统的稳定性差^[14-15],其顶极群落即非地带性石灰岩常绿落叶阔叶混交林受人类干扰发生了不同程度的退化,出现了各种偏途、不同演替阶段群落的共存格局^[16-17]。峰丛洼地是亚热带喀斯特地区最重要的景观类型,集中分布在我国西南喀斯特南部斜坡地带^[18]。本文以峰丛洼地为景观单元,基于动态监测样地建设,

以农作区为对照,采用地统计学方法分析人工林、次生林、原生林 3 类典型森林表层土壤有机质的空间变异,探讨其生态学过程和机制,为全球气候变化背景下正确评价我国西南喀斯特森林固碳现状和潜力、制定区域森林生态系统碳汇管理对策提供依据和参考。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

研究区选择广西环江毛南族自治县(全国石漠化综合治理县),地理坐标为 107°51′—108°43′E、24°44′—25°33′N,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 月平均气温 10.1℃,7 月平均气温 28℃,历年最低气温-5.2℃,无霜期 290 d,年平均日照时数 1451 h,年平均降水量为 1389.1 mm,集中于 4—9 月,占全年降水量的 70%,平均蒸发量为 1571.1 mm,相对湿度平均为 70%。农作区和 3 类森林的研究区域选择在该县西南部岩溶峰丛洼地集中分布地带,分别为 I:下南陈驿农作区,长期开垦种植玉米、黄豆、红薯等农作物;II:下南古周人工林,1996 年实施生态移民 50%,退耕还林、还草、种果和封山育林等措施;III:大才木连次生林,1985 年撂荒,2003 年建立中国科学院环江喀斯特生态实验站;IV:木论原生林,目前世界上喀斯特地区保存最完好、面积最大的原生林,1996 年建设为国家自然保护区。农作区和 3 类森林土壤均为石灰土,气候、母质、地貌、植被区系等区域自然背景一致,相互距离≤80 km,以便于比较,基本情况见表 1。

表 1 喀斯特峰丛洼地农作区和 3 类森林的基本情况

Table 1 Details about the studied areas in the depressions between hills in karst region

类型 Types	坡度 Slope /(°)	覆盖度 Coverage /%	森林密度 Forest density /(株/m ²)	平均胸径 DBH /cm	科 Families	属 Genera	种 Species	建群种 Dominant species
I	8—25	—	—	—	—	—	—	玉米 <i>Zea mays</i> 、黄豆 <i>Glycine max</i> Merrill、红薯 <i>Ipomoea batatas</i> 等
II	8—25	85	0.34	2.8	26	52	65	柑桔 <i>Citrus reticulata</i> 、板栗 <i>Castanea mollissima</i> 、 任豆树 <i>Zenia insignis</i> 、香椿 <i>Toona sinensis</i> 等
III	8—25	90	0.59	2.4	33	68	100	八角枫 <i>Alangium chinense</i> Harms、黄荆 <i>Vitex negundo</i> 、 红背山麻杆 <i>Alchornea trewioides</i> 等
IV	8—25	90	0.44	19.2	49	91	123	石山松 <i>Pinus calcarea</i> 、单性木兰 <i>Kmeria septentrionalis</i> 、 石山樟 <i>Cinnamomum saxitilis</i> 等

I:农作区;II:人工林;III:次生林;IV:原生林

1.2 研究方法

1.2.1 样地设置

通过勘查,在喀斯特峰丛洼地农作区和 3 类森林研究区域内各选择一个较规则的坡面和洼地连续体,按 CTFS(Centre for Tropical Forest Science)标准^[19]从洼地向坡顶建立一块投影面积为 200 m×40 m 的动态监测样地,其中坡面为 160 m×40 m,洼地为 40 m×40 m。用全站仪将整个样地划分为 20 个 20 m×20 m 样方,每个 20 m×20 m 样方用插值法细分为 4 个 10 m×10 m 和 16 个 5 m×5 m 样方。

1.2.2 表层土壤碳与影响因子调查分析

土壤表层碳的实际含量与气候、母质、土壤类型、植被、地形、土壤理化指标等影响因素密切相关。在 4 个动态监测样地的气候、母质、土壤类型等区域自然背景一致的基础上,选择与土壤表层碳关系较大的 9 个植被指标、4 个地形指标和 10 个土壤理化指标。

1.2.3 表层土壤碳与土壤理化指标

在 10 m×10 m 的样方中心 0.5 m 范围内按 S 型采取 15 个样本(0—15 cm)混合组成待测土样。有机质用重铬酸钾容量法-外加热法;pH 值用 1:2.5 土液比水提,酸度计测定;全 N 用半微量开氏法;全 P 用 NaOH 熔融-钼锑抗比色法;全 K 用 NaOH 熔融-火焰光度法;碱解氮用扩散吸收法;速效 P 用 NaHCO₃ 提取-钼锑抗比色法;速效 K 用中性醋酸铵提取-火焰光度法测定;根系含量和石砾含量在制样时实测。同时用烘干法测定表

层(0—15 cm)土壤水分。

1.2.4 植被指标

9 个植被因子中结构性指标设置为密度(株/m²)、平均冠幅(m²/株)、盖度(% ,即所有林木树冠的椭圆形面积之和占地面面积的比例)、平均胸径(cm/株)、平均高度(m/株)等 5 个,群落多样性采用 4 个指标,计算方法为^[20]:丰富度 $R=S$,Shannon-Wiener 指数 $H = - \sum_{i=1}^S P_i \log P_i$,均匀度 $E = H/\ln S$,Simpson 优势度指数 $D = \sum_{i=1}^S P_i^2$,式中 S 为物种数目, P_i 为种 i 的相对重要值,即 $P_i=N_i/N$, N_i 为第 i 个物种的重要值, N 为所有重要值之和,重要值= $RDE+RDO+RFE$,式中, RDE 为相对密度, RDO 为相对优势度(胸高断面积), RFE 为相对频度。农业耕作区作物已收获完毕,无植被指标数据。

1.2.5 地形因子

10 m × 10 m 样方地形因子调查包括:海拔基于原点海拔(GPS map 60 测定)用三角函数计算求得;坡度用全站仪实测;坡位目测;岩石裸露率用分成 20 cm × 20 cm 网格的 100 cm × 100 cm 的框架按对角线 5 点覆盖测定;坡位非数值指标进行编码^[21-22],赋值为:1 洼地、2 下坡、3 中坡、4 上坡。

1.2.6 数据处理与分析

经典统计学分析采用 SPSS13.0 软件(for Windows),空间自相关分析(采用 Moran's I 系数法)、试验半变异函数分析、模型优化模拟和分形维数 D 的计算均在专业地统计软件 GS⁺中完成,Kriging 等值线图绘制采用 ArcGIS 9.2 软件,地统计学有关方法及原理详见参考文献^[23-25]。

2 结果与分析

2.1 经典统计描述

由表 2 可以看出,喀斯特峰丛洼地土壤有机质含量较高,农作区土壤有机质含量为 31.30 g/kg,3 类森林则高达 66.91—118.0 g/kg,且随人工林、次生林和原生林的逐步恢复梯度不断上升,经多重比较分析,达到了显著性水平,其中原生林的植被保存完好,有机质含量高达 118.0 g/kg,是农作区的 3.76 倍。农作区和 3 类森林土壤有机质的变异系数在 19.4%—48.5%,农作区由于人类影响的均衡性使其变异系数较小,随着干扰的减弱,植物多样性的增加,空间异质性不断加强,变异系数迅速增加,原生林达到了 48.5%,有必要进一步用地统计学分析其空间变异性。通过对偏度、峰度的观察和 K-S 法进行非参数检验,在 5% 的检验水平下,喀斯特峰丛洼地农作区和 3 类森林土壤有机质含量均服从正态分布。

表 2 土壤有机质的描述性统计分析及正态分布检验结果
Table 2 Results of soil organic matter for descriptive statistics and K-S test

类型 Types	样本数 No. of samples	最小值 Minimum /(g/kg)	最大值 Maximum /(g/kg)	均值 Mean /(g/kg)	标准差 Standard variance	变异系数 Variance /%	偏度 Skew	峰度 Kurtosis	K-S 值 Value of K-S test	分布类型 Distribution types
I	80	18.00	44.44	31.30d	6.084	0.194	0.163	-0.395	0.505	N
II	80	22.22	114.7	66.91c	24.41	0.365	0.043	-0.905	0.926	N
III	80	41.70	205.9	90.74b	21.62	0.238	1.054	2.438	0.219	N
IV	80	55.28	356.3	118.0a	56.57	0.485	1.622	2.693	0.051	N

N 表示正态分布; 同列数字后不同小写字母表示差异达到显著水平($\alpha<0.05$)

2.2 空间变化

2.2.1 自相关分析

由图 1 可以看出,喀斯特峰丛洼地土壤有机质均呈现一定的结构性,农作区和 3 类森林土壤有机质的自相关函数变化趋势一致,即随着滞后距离的增大,由正相关方向逐渐向负方向发展,正、负空间自相关的距离大致反映了两大斑块的平均半径。但农作区及 3 类森林土壤有机质的自相关的状态和变化程度不同,农作区

和人工林人类影响强烈且比较均衡,自相关范围较大,拐点均在 80 m 左右,农作区自相关系数 Moran's I 最大为 0.460,性质不同的两大斑块反映了岩石裸露状况(坡位上升到 80 m 之后岩石裸露率明显增加);人工林自相关系数 Moran's I 最大达 0.780,且变化规则,性质不同的两大斑块主要受人类干扰的影响,下半部斑块处于洼地和坡下部,坡度相对平缓,人为干扰强烈,80 m 之后人为干扰急剧减弱,林下植被增加,枯枝落叶层增厚,有机质含量增加,形成了另一约 120 m 的斑块;次生林自然恢复的时间为 22 a,植被类型较多且分布不均,自相关范围较小,拐点约在 30 m, Moran's I 系数波动很大;原生林人为破坏较小,植被保存完好,自相关性主要受地形的影响,性质不同的两大斑块的拐点正好是洼地和坡地的交界处(40 m)。

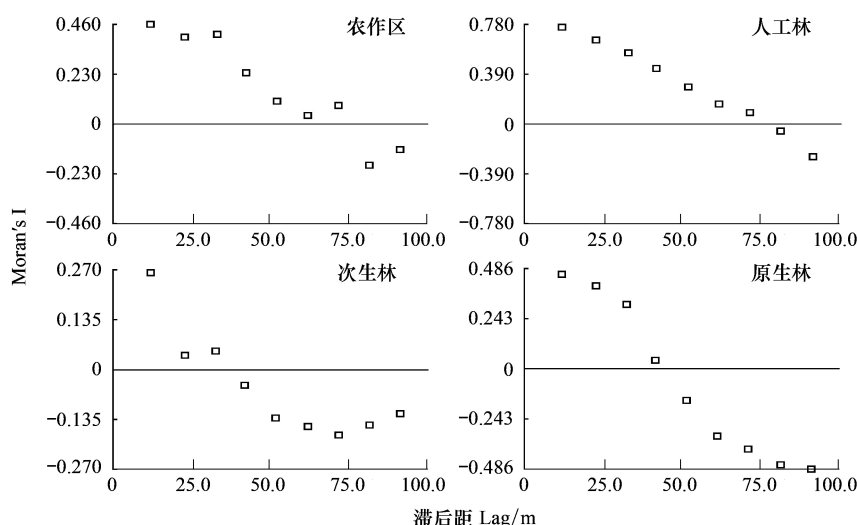


图1 土壤有机质空间自相关图

Fig. 1 Spatial correlograms of soil organic matter in the studied areas

2.2.2 空间变异与分布特征

由表 3 可知,喀斯特峰丛洼地次生林土壤有机质试验半变异函数的最佳拟合模型为指数模型,其他均为高斯模型, R^2 在 0.926—0.971,能很好地反映土壤有机质的空间结构特征(图 2)。农作区土壤有机质半变异

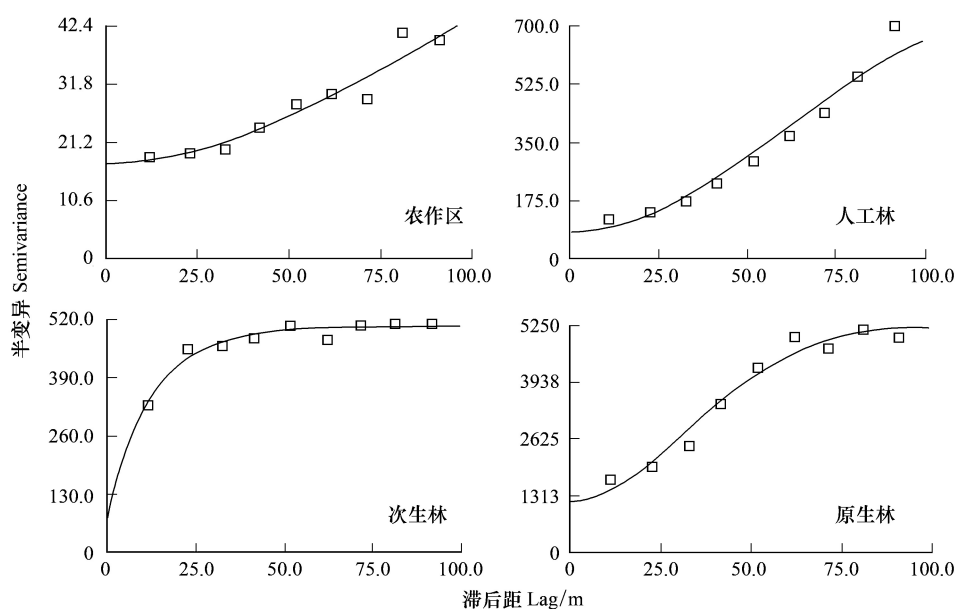


图2 土壤有机质试验半变异函数

Fig. 2 Semi-variograms of soil organic matter in the studied areas

函数的 $C_0/(C_0+C)$ 为 26.5%, 自相关范围和 D 值均较大, 分别为 193.6 m 和 1.800, 呈中等程度的空间自相关, 由人为干扰引起的随机变异较大; 3 类森林的 $C_0/(C_0+C)$ 值在 9.0%—22.6% 之间, 变程 a 和分形维数 D 值明显变小, 有强烈的空间自相关和格局, 其空间异质性主要是由系统变异引起的。Kriging 等值线图(图 3) 从不同位置和方向更深刻、全面和直观地揭示了喀斯特峰丛洼地农作区和 3 类森林土壤有机质的空间分布格局。其中农作区和人工林土壤有机质呈单峰分布, 随地形升高而增加; 次生林呈凹形分布, 中间低两头高; 原生林呈凸形分布, 中间高两头低。

表 3 土壤有机质的试验半变异函数模型类型及参数

Table 3 Models and parameters of semi-variogram for soil organic matter in the studied areas								
地型 Types	样本数 Samples	模型 Theory models	C_0	C_0+C	$C_0/(C_0+C)$	$a(m)$	R^2	分形维数 Fractal
I	80	Gaussian	17.29	65.23	0.265	193.64	0.926	1.800
II	80	Gaussian	78.00	866.9	0.090	149.80	0.964	1.556
III	80	Exponential	67.00	504.9	0.133	38.10	0.940	1.603
IV	80	Gaussian	1180.0	5231.0	0.226	78.64	0.971	1.683

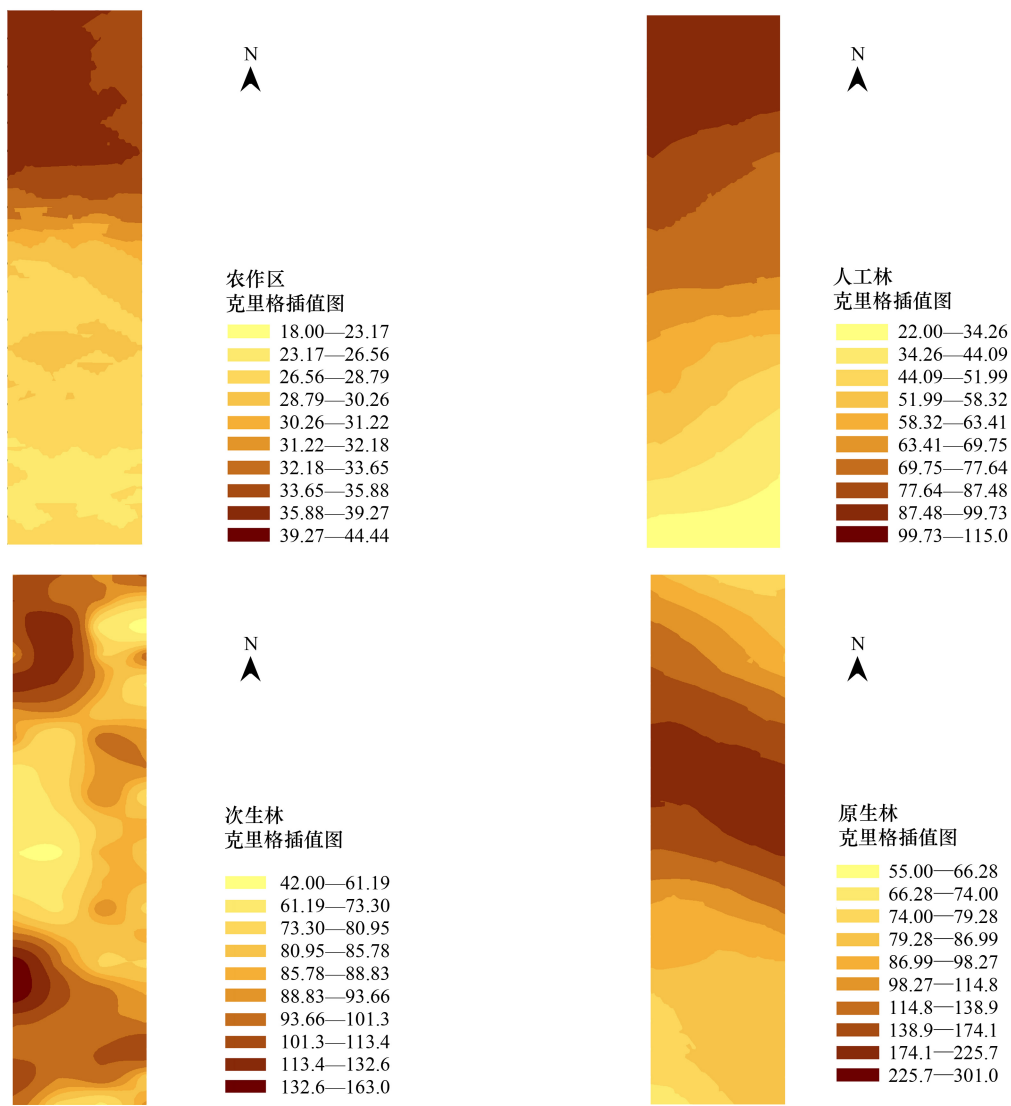


图 3 土壤有机质空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of soil organic matter in the studied areas

2.3 主要影响因子分析

2.3.1 主成分分析

喀斯特峰丛洼地农作区和 3 类森林土壤有机质的总体特征、空间变异不同,其影响因子也不同,且各因素之间相互影响,为筛选出主要因子群,对影响土壤有机质的 23 个植被、土壤、地形指标进行了主成分分析(表 4)。结果发现,农作区的第一主成分的特征向量以全氮、全钾、碱解氮、速效钾较大,它们是影响土壤有机质的主导因子,第二、三主成分的特征向量以速效磷、海拔、坡位和土壤水分较大,为次要因子,其中速效磷为限制因子;人工林的第一主成分以全氮、坡位、坡度、岩石裸露率、丰富度和 Shannon 指数的特征向量较大,是影响土壤有机质的主要因子,第二、三主成分的特征向量均比较小,次要因子不明显;次生林的第一主成分以速效钾、坡位、丰富度、Shannon 指数、均匀度、冠幅和树高等的特征向量较高,第二主成分的特征向量以全氮较大,表明次生林区土壤有机质主要由植被因子决定,这也是该区域坡中植被恢复最好而土壤有机质含量最低、呈凹型分布的原因;原生林的第一主成分的特征向量以海拔、坡位、坡度、丰富度、Shannon 指数较大,第二主成分是全磷、碱解氮和速效钾,表明地形和物种多样性是影响有机质的主导因子。

表 4 土壤有机质影响因子主成分分析

Table 4 Principal component analysis of the factors to soil organic matter in the studied areas

项目 Items	I			II		
	PC1	PC2	PC3	PC1	PC2	PC3
水分 Water Content	-0.2307	0.2454	0.8889	0.7909	-0.0389	0.1724
石砾含量 Gravel Content	-0.0688	0.0517	0.0665	-0.0433	-0.0387	0.1059
根系含量 Root Content	-0.0115	0.4136	-0.7615	0.3913	0.3197	-0.3918
pH	0.3293	-0.0555	0.0124	-0.388	0.1692	0.2215
全氮 Total N	0.9513	0.0526	-0.0987	0.8102	-0.1838	0.1296
全磷 Total P	0.7762	-0.5423	-0.1848	-0.4621	0.4043	0.1672
全钾 Total K	0.8676	-0.2959	-0.2743	0.1161	0.6015	-0.385
碱解氮 Available N	0.9466	0.1528	-0.1179	0.6763	-0.2543	-0.0561
速效磷 Available P	-0.0119	-0.9058	-0.0234	-0.3883	-0.5193	0.5129
速效钾 Available K	0.9039	0.1742	0.0004	0.5137	0.0295	0.088
海拔 Elevation	-0.1613	0.9465	-0.0078	0.7423	-0.3424	0.0761
坡位 Slope position	0.1512	0.9195	-0.0191	0.9046	-0.223	-0.0317
坡度 Slope angle	0.6216	0.7153	-0.0441	0.9576	0.0833	-0.0981
岩石裸露率 Rock Covered Percentage	0.7713	0.1576	0.1438	0.8988	0.236	-0.0792
丰富度 Abundance				0.8902	-0.1378	0.0805
Shannon 指数 Shannon index				0.9356	0.0423	-0.0054
丰富度 Evenness				0.7136	0.4651	-0.175
Simpson 指数 Simpson index				0.1206	-0.4341	0.2026
密度 Density				0.7923	-0.1131	0.0292
冠幅 Breadth of Crown				0.0943	0.1324	-0.072
盖度 Coverage				0.5744	-0.0787	0.1564
胸径 DBH				0.2535	0.5809	0.7185
树高 Height				0.2679	0.4975	0.744
特征值 Eigenvalue	5.1703	3.7737	1.5313	9.0749	2.3047	1.9117
累计贡献率 Cumulative contribution	0.3693	0.6389	0.7482	0.3946	0.4948	0.5779
项目 Items	III			IV		
	PC1	PC2	PC3	PC1	PC2	PC3
水分 Water Content	-0.2703	0.681	-0.039	-0.1469	0.6669	-0.2068
石砾含量 Gravel Content	0.3361	-0.218	-0.2104	-0.475	0.0702	0.1597
根系含量 Root Content	-0.4665	0.2274	0.263	-0.0591	0.2998	-0.285
pH	-0.2357	-0.109	-0.3445	-0.6917	-0.4281	-0.1499
全氮 Total N	-0.0141	0.8344	0.4052	-0.4708	-0.5166	0.3409
全磷 Total P	0.033	0.6783	0.5539	-0.0963	0.8874	-0.1843
全钾 Total K	0.3277	-0.306	0.3206	-0.3137	0.3711	-0.3549
碱解氮 Available N	-0.2528	0.6732	0.6022	0.2394	0.867	-0.1734

续表

项目 Items	Ⅲ			Ⅳ		
	PC1	PC2	PC3	PC1	PC2	PC3
速效磷 Available P	0.1988	0.0265	0.6459	0.079	0.681	0.1131
速效钾 Available K	0.8365	0.1047	0.2074	0.0261	0.9008	-0.1585
海拔 Elevation	0.5593	0.5366	-0.2692	0.883	-0.1773	0.228
坡位 Slope position	0.8614	0.3115	-0.1861	0.8616	0.1011	0.1743
坡度 Slope angle	0.7571	0.4519	-0.3896	0.8676	0.2894	0.1505
岩石裸露率 Rock Covered Percentage	0.6011	0.4781	-0.3559	0.7009	0.3337	-0.2433
丰富度 Abundance	0.8263	-0.157	0.1924	0.8553	-0.327	0.0359
Shannon 指数 Shannon index	0.9027	0.1002	0.03	0.8999	-0.1722	-0.1133
丰富度 Evenness	0.9046	0.0532	-0.0119	0.2008	0.0641	-0.4146
Simpson 指数 Simpson index	-0.0947	0.6778	-0.1829	0.789	-0.0893	-0.277
密度 Density	0.2999	-0.658	0.4498	0.6904	-0.2979	0.0953
冠幅 Breadth of Crown	0.8718	-0.159	0.0569	-0.0922	0.4717	0.6993
盖度 Coverage	0.6106	-0.405	0.3575	0.683	0.0748	0.5078
胸径 DBH	0.6591	0.1862	-0.041	-0.2822	0.3735	0.5366
树高 Height	0.9114	-0.194	0.094	-0.1942	0.4786	0.7316
特征值 Eigenvalue	8.1729	4.2991	2.4312	7.162	5.0127	2.5222
累计贡献率 Cumulative contribution	0.3553	0.5423	0.648	0.3114	0.5293	0.639

2.3.2 相关性分析

在 23 个植被、土壤和地形因子中,为去掉冗余信息提高分析的直观性和准确性,选择第一、二、三主成分特征向量较大的因子作为主要因子群,进一步分析了它们与土壤有机质的关联程度。由表 5 可知,农作区和 3 类森林土壤有机质与其他因子的正负作用关系和相关程度不同。在农作区,土壤有机质与海拔、坡位呈极显著正相关,随海拔和坡位的升高土壤有机质含量增加,与速效磷、全钾呈显著负相关,人工施肥越多,干扰越严重,有机质含量越低;人工林土壤有机质与第一主成分的主导因子均呈极显著正相关,其中以全氮的关系最密切,相关系数为 0.95,随地形和物种多样性的升高,土壤有机质增加,验证和补充了主成分分析的结果;次生林土壤有机质仅与全氮的相关性极显著;原生林土壤有机质与全磷、碱解氮、速效钾、坡位、坡度的关系极显著,其中与土壤养分的相关性最密切。

表 5 有机质与植被、土壤、地形因子的一对多相关

Table 5 Correlations between vegetation, soil and topographical factors for soil organic matter

农作区 Farmland	水分 Water content	全氮 Total N	全钾 Total K	碱解氮 Available N	速效磷 Available P	速效钾 Available K	海拔 Elevation	坡位 Slope position
全氮 Total N	-0.29							
全钾 Total K	-0.53 *	0.86 **						
碱解氮 Available N	-0.28	0.98 **	0.81 **					
速效磷 Available P	-0.18	-0.02	0.23	-0.08				
速效钾 Available K	-0.16	0.97 **	0.76 **	0.94 **	-0.12			
海拔 Elevation	0.24	-0.09	-0.41	0.04	-0.80 **	0.03		
坡位 Slope position	0.17	0.21	-0.14	0.35	-0.74 **	0.3	0.91 **	
有机质 Organic M	0.26	-0.21	-0.48 *	-0.12	-0.62 **	-0.06	0.78 **	0.66 **
人工林 Plantation	全氮 Total N	坡位 Slope position	坡度 Slope angle	岩石裸露率 Rock Cover Percentage	丰富度 Abundance	香农指数 Shannon index	均匀度 Evenness	
坡位 Slope position	0.77 **							
坡度 Slope angle	0.75 **	0.87 **						
岩石裸露率 Rock CP	0.69 **	0.74 **	0.94 **					
丰富度 Abundance	0.65 **	0.86 **	0.82 **	0.72 **				
Shannon 指数 Shannon index	0.68 **	0.86 **	0.90 **	0.82 **	0.93 **			
均匀度 Evenness	0.49 **	0.51 **	0.73 **	0.76 **	0.54 **	0.75 **		
有机质 Organic M	0.95 **	0.84 **	0.80 **	0.72 **	0.74 **	0.75 **	0.51 **	

续表

次生林 Secondary forest	全氮 Total N	速效钾 Available K	坡位 Slope position	丰富度 Abundance	香农指数 Shannon index	均匀度 Evenness	冠幅 Breadth of Crown	树高 Height
速效钾 Available K	0.15							
坡位 Slope position	0.17	0.76 **						
丰富度 Abundance	-0.07	0.67 **	0.58 **					
Shannon 指数 Shannon index	0.06	0.72 **	0.71 **	0.87 **				
均匀度 Evenness	0.01	0.74 **	0.72 **	0.76 **	0.96 **			
冠幅 Breadth of Crown	-0.12	0.63 **	0.66 **	0.67 **	0.74 **	0.78 **		
高度 Height	-0.11	0.71 **	0.68 **	0.75 **	0.79 **	0.83 **	0.93 **	
有机质 Organic M	0.49 **	0.07	0.08	0	0.01	-0.01	0.05	0.04
原生林 Primary forest	全磷 Total P	碱解氮 Available N	速效钾 Available K	海拔 Elevation	坡位 Slope position	坡度 Slope angle	丰富度 Abundance	香农指数 Shannon index
碱解氮 Available N	0.82 **							
速效钾 Available K	0.80 **	0.85 **						
海拔 Elevation	-0.31 **	-0.02	-0.18					
坡位 Slope position	-0.06	0.26 *	0.07	0.85 **				
坡度 Slope angle	0.12	0.44 **	0.22 *	0.76 **	0.88 **			
丰富度 Abundance	-0.35 **	-0.07	-0.25 *	0.83 **	0.72 **	0.62 **		
Shannon 指数 Shannon index	-0.17	0.09	-0.12	0.77 **	0.72 **	0.67 **	0.92 **	
有机质 Organic M	0.73 **	0.85 **	0.78 **	0.08	0.30 **	0.46 **	0	0.16

* $P<0.05$, ** $P<0.01$

3 讨论

3.1 喀斯特峰丛洼地不同森林土壤有机质的总体特征

喀斯特地区生态环境脆弱,系统稳定性差,植被大都生长在石灰岩石块上、缝隙中或环境恶劣区,在人为干扰下极易退化,难以恢复,形成非地带性顶极群落即亚热带石灰岩常绿落叶阔叶混交林少则几十年,多则数百年甚至上千年^[26]。喀斯特峰丛洼地的人地矛盾异常突出^[27],为了生存人类对本来脆弱的喀斯特生态环境进行不断的干扰和破坏,绝大部分森林基本退化成灌丛和草坡,水土流失严重,固碳能力下降。80 年代中期环境保护阶段之后,人为干扰显著减少,植被得到了人为、自然或两者相结合的不同方式的缓慢恢复,沿干扰梯度形成了石漠化、农作区、草丛、灌丛和森林等不同程度的生态景观类型,其中森林主要有人工林、次生林和原生林 3 种类型。喀斯特峰丛洼地属亚热带季风气候,温湿条件优越,极有利于生物的繁衍和生长,土壤“自肥”作用十分强烈,有旺盛的生物累积作用,岩石溶蚀过程形成的可溶性碳酸盐与土壤腐殖质结合、凝聚、形成稳定的腐殖酸钙^[28],使得土壤有机质含量较高,即使是农作区表层土壤有机质也达到了 31.30 g/kg,沿人工林、次生林、原生林的恢复梯度,土壤有机质含量显著提高(66.91—118.0 g/kg),且变异幅度较大(19.4%—48.5%),但均服从正态分布。

3.2 喀斯特峰丛洼地不同森林土壤有机质的空间变异和格局

与其他地区一样,喀斯特峰丛洼地土壤有机质在不同尺度均具有空间异质^[29-30]。空间自相关分析表明,喀斯特峰丛洼地农作区和 3 类森林土壤有机质均呈一定的结构性,农作区和人工林区系统处于低能量的匀质状态,自相关范围较大,前者主要受地形的影响,后者主要受人为干扰的制约;次生林区的自然恢复的时间长达 22 a,植被类型多且分布不均,生境破碎,自相关范围和 Moran's I 均较小,拐点约为 30 m,且变化不规则;原生林区的森林保存完好,系统处于高能量的匀质状态,自相关性主要受微地貌的影响,其拐点正好是洼地和坡地的交界处(40 m)。农作区土壤有机质呈中等程度的空间相关,受人为干扰等随机因素影响较大,而 3 类森林土壤有机质半变异函数呈强烈的空间相关。空间异质性导致空间格局的存在,农作区和 3 类森林土壤有机质的空间变异不同,其分布也不同。农作区和人工林土壤有机质呈单峰分布,随地形升高而增加;次生林呈凹形分布,中间低两头高;原生林呈凸形分布,中间高两头低。

3.3 喀斯特峰丛洼地不同森林土壤有机质的主要影响因子及相互关系

有机质是土壤中最活跃的物质组成部分。影响土壤有机质的因子很多,气候、母质、土壤类型、地貌、植被区系等在较大范围内影响土壤有机质的分解和积累。喀斯特峰丛洼地区域自然背景一致的情况下,植被特性、土壤质地和微地形在局部范围内影响土壤有机质的含量和分布,农作区和3类森林的主导因子不同:农作区的主导因子为全氮、全钾、碱解氮、速效钾等主要土壤养分,人为管理措施影响和决定着土壤有机质的含量和分布;人工林为地形和物种多样性,次生林为森林群落结构和物种多样性,原生林为地形和物种多样性;同一因子在农作区和3类森林土壤有机质与其他因子的正负作用关系和相关程度不同:农作区,土壤有机质与海拔、坡位呈极显著正相关,与速效磷、全钾呈显著负相关;人工林与第一主成分的所有主导因子均呈极显著正相关;次生林仅与全氮的相关性极显著;原生林与全磷、碱解氮、速效钾、坡位、坡度的关系极显著。因此,农作区和3类森林应制订与之相适宜的基于提高固碳服务功能的管理策略。

References:

- [1] Ding Z L, Fu B J, Han X G, Ge Q S. Brief introduction to a cluster of projects of "Research in key issues of international negotiation with regard to coping with climate change" by CAS. *Bulletin of the Chinese Academy of Sciences*, 2009, 24(1): 8-17.
- [2] Pan Y D, Birdsey R A, Fang J Y, Houghton R, Kauppi P E, Kurz W A, Phillips O L, Shvidenko A, Lewis S L, Canadell J G, Ciais P, Jackson R B, Pacala S W, McGuire A D, Piao S L, Rautiainen A, Sitch S, Hayes D. A large and persistent carbon sink in the world's forests. *Science*, 2011, 333(6045): 988-993.
- [3] Woodwell G M, Whittaker R H, Reiners W A, Likens G E, Delwiche C C, Botkin D B. The biota and the world carbon budget. *Science*, 1978, 199(4325): 141-146.
- [4] Yuan D X. Modern karstology and global change study. *Earth Science Frontiers*, 1997, 4(1/2): 17-25.
- [5] Liu C Q, Lang Y C, Li S L, Pu H C, Tu C L, Liu T Z, Zhang W, Zhu S F. Researches on biogeochemical processes and nutrient cycling in karstic ecological systems, southwest China: a review. *Earth Science Frontiers*, 2009, 16(6): 1-12.
- [6] Yuan D X. Progress in the study on karst processes and carbon cycle. *Advance in Earth Science*, 1999, 14(5): 425-432.
- [7] Zhang D F, Wang S J, Zhou D Q, Li R L. Intrinsic driving mechanism of land rocky desertification in karst regions of Guizhou Province. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2001, 21(4): 1-5.
- [8] Weng J T. The effect of carbonate rocks on global carbon cycle. *Advance in Earth Sciences*, 1995, 10(2): 154-158.
- [9] Zhou Y Y, Jiang Z C, Wei Z L. Rational study on the drought and the cause of drought in central Guangxi karst agricultural area. *Carsologica Sinica*, 2003, 22(2): 144-149.
- [10] Yuan D X. Study on karst and global change. *Advance in Earth Sciences*, 1995, 10(5): 471-474.
- [11] Yang H K. Discussion on variation of karst environmental quality // Xie Y H, Yang M D, eds. *Human Activity and Karst Environment*. Beijing: Beijing Science and Technology Press, 1994: 1-7.
- [12] Song T Q, Peng W X, Zeng F P, Ouyang Z W, Wu H Y. Spatial heterogeneity of surface soil moisture content in dry season in Mulun Natural Reserve in karst area. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2009, 20(1): 98-104.
- [13] Song T Q, Peng W X, Zeng F P, Wang K L, Qin W G, Tan W N, Liu L, Du H, Lu S Y. Spatial pattern of forest communities and environmental interpretation in Mulun National Nature Reserve, karst cluster-peak depression region. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2010, 34(3): 298-308.
- [14] Peng W X, Wang K, Song T Q, Zeng F P, Wang J R. Controlling and restoration models of complex degradation of vulnerable karst ecosystem. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(2): 811-820.
- [15] Lan A J, Zhang B P, Xiong K N, An Y L. Spatial pattern of the fragile karst environment in southwest Guizhou Province. *Geographical Research*, 2003, 22(6): 733-741.
- [16] Song T Q, Peng W X, Zeng F P, Wang K L, Ouyang Z W. Vegetation succession rule and regeneration strategies in disturbed karst area, northwest Guangxi. *Journal of Mountain Science*, 2008, 26(5): 597-604.
- [17] Song T Q, Peng W X, Zeng F P, Liu L, Du H, Lu S Y, Yin Q C. Spatial heterogeneity of soil moisture under different vegetation types in peak-cluster depression—a case study in southwest cluster peak depressions region of Maonan Autonomous County, Guangxi. *Carsologica Sinica*, 2010, 29(1): 6-11.
- [18] Academic Divisions of Chinese Academy of Sciences. Some propositions on advancing the comprehensive control of karst mountain areas in southeast China. *Advance in Earth Sciences*, 2003, 18(4): 489-492.
- [19] Condit R. Research in large, long-term tropical forest plots. *Trends in Ecology and Evolution*, 1995, 10(1): 18-22.
- [20] Ma K P, Huang J H, Yu S L, Chen L Z. Plant community diversity in Dongling Mountain Beijing, China II. Species richness, evenness and species diversity. *Acta Ecologica Sinica*, 1995, 15(3): 268-277.

- [21] Zhang F, Zhang J T, Zhang F. Pattern of forest vegetation and its environmental interpretation in Zhuweigou, Lishan Mountain Nature Reserve. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(3): 421-427.
- [22] Qiu Y, Zhang J T. The ordination axes clustering based on detrended canonical correspondence analysis ordination and its application of the ecological gradients of plant communities. *Acta Ecologica Sinica*, 2000, 20(2): 199-206.
- [23] Goovaerts P. Geostatistical tools for characterizing the spatial variability of microbiological and physico-chemical soil properties. *Biology and Fertility of Soils*, 1998, 27(4): 315-324.
- [24] Wang Z Q. *Geostatistics and Its Application in Ecology*. Beijing: Science Press, 1999.
- [25] Liu F C, Shi X Z, Yu D S, Pan X Z. Characteristics of spatial variability of total soil nitrogen in the typical area of Taihu Lake basin. *Geographical Research*, 2004, 23(1): 63-70.
- [26] Zeng F P, Peng W X, Song T Q, Wang K L, Wu H Y, Song X J, Zeng Z X. Changes in vegetation after 22 years' natural restoration in the karst disturbed area in Northwest Guangxi. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(12): 5110-5119.
- [27] Zheng Y W. *Introduction to Mulun Karst Forest Region*. Beijing: Science Press, 1999.
- [28] Jiang Z C, Li X K, Zeng F P. *Ecological Restoration in the Karst Cluster-Peak-Depression Area*. Beijing: Geological Press, 2007.
- [29] Famiglietti J S, Rudnicki J W, Rodell M. Variability in surface moisture content along a hillslope transect: Rattlesnake Hill, Texas. *Journal of Hydrology*, 1998, 210(1/4): 259-281.
- [30] Moore I D, Burch G J, Mackenzie D H. Topographic effects on the distribution of surface soil water and the location of ephemeral gullies. *Transaction of the American Society of Agricultural and Biological Engineer*, 1988, 31: 1098-1107.

参考文献:

- [1] 丁仲礼, 傅伯杰, 韩兴国, 葛全胜. 中国科学院“应对气候变化国际谈判的关键科学问题”项目群简介. *中国科学院院刊*, 2009, 24(1): 8-17.
- [4] 袁道先. 现代岩溶学和全球变化研究. *地学前缘*, 1997, 4(1/2): 17-25.
- [5] 刘丛强, 郎赞超, 李思亮, 朴何春, 涂成龙, 刘涛泽, 张伟, 朱书法. 喀斯特生态系统生物地球化学过程与物质循环研究: 重要性、现状与趋势. *地学前缘*, 2009, 16(6): 1-12.
- [6] 袁道先. “岩溶作用与碳循环”研究进展. *地球科学进展*, 1999, 14(5): 425-432.
- [7] 张殿发, 王世杰, 周德全, 李瑞玲. 贵州省喀斯特地区土地石漠化的内动力作用机制. *水土保持通报*, 2001, 21(4): 1-5.
- [8] 翁金桃. 碳酸盐岩在全球碳循环过程中的作用. *地球科学进展*, 1995, 10(2): 154-158.
- [9] 周游游, 蒋忠诚, 韦珍莲. 广西中部喀斯特干旱农业区的干旱程度及干旱成因分析. *中国岩溶*, 2003, 22(2): 144-149.
- [10] 袁道先. 岩溶与全球变化研究. *地球科学进展*, 1995, 10(5): 471-474.
- [11] 杨汉奎. 论喀斯特环境质量变异 // 谢云鹤, 杨明德. 人类活动与岩溶环境. 北京: 北京科学技术出版社, 1994: 1-7.
- [12] 宋同清, 彭晚霞, 曾馥平, 欧阳资文, 吴海勇. 喀斯特木论自然保护区旱季土壤水分的空间异质性. *应用生态学报*, 2009, 20(1): 98-104.
- [13] 宋同清, 彭晚霞, 曾馥平, 王克林, 覃文更, 谭卫宁, 刘璐, 杜虎, 鹿士杨. 木论喀斯特峰丛洼地森林群落空间格局及环境解释. *植物生态学报*, 2010, 34(3): 298-308.
- [14] 彭晚霞, 宋同清, 王克林, 曾馥平, 王久荣. 喀斯特脆弱生态系统复合退化控制与重建模式. *生态学报*, 2008, 28(2): 811-820.
- [15] 兰安军, 张百平, 熊康宁, 安裕伦. 黔西南脆弱喀斯特生态环境空间格局分析. *地理研究*, 2003, 22(6): 733-741.
- [16] 宋同清, 彭晚霞, 曾馥平, 王克林, 欧阳资文. 桂西北喀斯特人为干扰区植被的演替规律与更新策略. *山地学报*, 2008, 26(5): 597-604.
- [17] 宋同清, 彭晚霞, 曾馥平, 刘璐, 杜虎, 鹿士杨, 殷庆仓. 喀斯特峰丛洼地不同植被类型土壤水分的空间异质性分析——以广西环江毛南族自治县西南峰丛洼地地区为例. *中国岩溶*, 2010, 29(1): 6-11.
- [18] 中国科学院学部. 关于推进西南岩溶地区石漠化综合治理的若干建议. *地球科学进展*, 2003, 18(4): 489-492.
- [20] 马克平, 黄建辉, 于顺利, 陈灵芝. 北京东灵山地区植物群落多样性的研究 II. 丰富度、均匀度和物种多样性研究. *生态学报*, 1995, 15(3): 268-277.
- [21] 张峰, 张金屯, 张峰. 历山自然保护区猪尾沟森林群落植被格局及环境解释. *生态学报*, 2003, 23(3): 421-427.
- [22] 邱扬, 张金屯. DCCA 排序轴分类及其在关帝山八水沟植物群落生态梯度分析中的应用. *生态学报*, 2000, 20(2): 199-206.
- [24] 王政权. *地统计学及在生态学中的应用*. 北京: 科学出版社, 1999.
- [25] 刘付程, 史学正, 于东升, 潘贤章. 太湖流域典型地区土壤全氮的空间变异特征. *地理研究*, 2004, 23(1): 63-70.
- [26] 曾馥平, 彭晚霞, 宋同清, 王克林, 吴海勇, 宋希娟, 曾昭霞. 桂西北喀斯特人为干扰区植被自然恢复 22 年后群落特征. *生态学报*, 2007, 27(12): 5110-5119.
- [27] 郑颖吾. *木论喀斯特林区概论*. 北京: 科学出版社, 1999.
- [28] 蒋忠诚, 李先琨, 曾馥平. *岩溶峰丛洼地生态重建*. 北京: 地质出版社, 2007.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 32, No. 19 October, 2012 (Semimonthly)

CONTENTS

Assessment of monitoring methods for population abundance of Amur tiger in Northeast China	5943
..... ZHANG Changzhi, ZHANG Minghai, JIANG Guangshun (5943)	
Changes of residents nitrogen consumption and its environmental loading from food in Xiamen	5953
..... YU Yang, CUI Shenghui, ZHAO Shengnan, et al (5953)	
Analysis of the meiobenthic community in the Pearl River Estuary in summer	5962
..... YUAN Qiaojun, MIAO Suying, LI Hengxiang, et al (5962)	
Community characteristics of phytoplankton in the coastal area of Leizhou Peninsula and their relationships with primary environmental factors in the summer of 2010	5972
..... GONG Yuyan, ZHANG Caixue, SUN Xingli, et al (5972)	
Morphological differences in statolith and beak between two spawning stocks for <i>Illex argentinus</i>	5986
..... FANG Zhou, CHEN Xinjun, LU Huajie, et al (5986)	
Relationships between coastal meadow distribution and soil characteristics in the Yellow River Delta	5998
..... TAN Xiangfeng, DU Ning, GE Xiuli, et al (5998)	
Variation analysis about net primary productivity of the wetland in Panjin region	6006
..... WANG Liwen, WEI Yaxing (6006)	
Mobilization of potassium from Soils by <i>rhizobium phaseoli</i>	6016
..... ZHANG Liang, HUANG Jianguo, HAN Yuzhu, et al (6016)	
Autotoxicity of aqueous extracts from plant, soil of peanut and identification of autotoxic substances in rhizospheric soil	6023
..... HUANG Yuqian, HAN Lisi, YANG Jinfeng, et al (6023)	
Effects of shading on the photosynthetic characteristics and anatomical structure of <i>Trollius chinensis</i> Bunge	6033
..... LV Jinhui, WANG Xuan, FENG Yanmeng, et al (6033)	
Short-term effects of fire disturbance on greenhouse gases emission from sedge and shrubs forested wetland in Lesser Xing'an Mountains, Northeast China	6044
..... GU Han, MU Changcheng, ZHANG Bowen, et al (6044)	
Plant species diversity and community classification in the southern Gurbantunggut Desert	6056
..... ZHANG Rong, LIU Tong (6056)	
Effects of mixing leaf litter from <i>Pinus sylvestris</i> var. <i>mongolica</i> and <i>Larix principis-rupprechtii</i> with that of other trees on soil properties in the Loess Plateau	6067
..... LI Qian, LIU Zengwen, MI Caihong (6067)	
Effects of long-term intensive management on soil ammonia oxidizing archaea community under <i>Phyllostachys praecox</i> stands	6076
..... QIN Hua, LIU Borong, XU Qiufang, et al (6076)	
Hydrogen peroxide participates symbiosis between AM fungi and tobacco plants	6085
..... LIU Hongqing, CHE Yongmei, ZHAO Fanggui, et al (6085)	
Relationships between dominant arbor species distribution and environmental factors of shelter forests in the Beijing mountain area	6092
..... SHAO Fangli, YU Xinxiao, ZHENG Jiangkun, et al (6092)	
Analysis of rhizosphere microbial community structure of weak and strong allelopathic rice varieties under dry paddy field	6100
..... XIONG Jun, LIN Huifeng, LI Zhenfang, et al (6100)	
Root distribution in the different forest types and their relationship to soil properties	6110
..... HUANG Lin, WANG Feng, ZHOU Lijiang, et al (6110)	
Effect of silicon application on antioxidant system, biomass and yield of soybean under ozone pollution	6120
..... ZHAN Lijie, GUO Liye, NING Tangyuan, et al (6120)	
Effect of landfill leachate irrigation on soil physiochemical properties and the growth of two herbaceous flowers	6128
..... WANG Shuqin, LAI Juan, ZHAO Xiulan (6128)	
Nitrous oxide emissions affected by tillage measures in winter wheat under a rice-wheat rotation system	6138
..... ZHENG Jianchu, ZHANG Yuefang, CHEN Liugen, et al (6138)	
Effects of different fertilizers on soil enzyme activities and CO ₂ emission in dry-land of maize	6147
..... ZHANG Junli, GAO Mingbo, WEN Xiaoxia, et al (6147)	
The response of agro-ecosystem productivity to climatic fluctuations in the farming-pastoral ecotone of northern China: a case study in Zhunger County	6155
..... SUN Tesheng, LI Bo, ZHANG Xinshi (6155)	
The relationship between energy consumption and carbon emission with economic growth in Liaoning Province	6168
..... KANG Wenxing, YAO Lihui, HE Jienan, et al (6168)	
Spatial distribution characteristics of potential fire behavior in Fenglin Nature Reserve based on FARSITE Model	6176
..... WU Zhiwei, HE Hongshi, LIANG Yu, et al (6176)	
Chill conservation of natural enemies in maize field with different post-crop habitats	6187
..... TIAN Yaojia, LIANG Guangwen, ZENG Ling, et al (6187)	
Effect of population of <i>Kerria yunnanensis</i> on diversity of ground-dwelling ant	6195
..... LU Zhixing, CHEN Youqing, LI Qiao, et al (6195)	
Response of <i>Parnassius apollo</i> population and vertical distribution to climate warming	6203
..... YU Fei, WANG Han, WANG Shaokun, et al (6203)	
Review and Monograph	
Integrated assessment of marine aquaculture ecosystem health: framework and method	6210
..... PU Xinming, FU Mingzhu, WANG Zongling, et al (6210)	
Seagrass meadow ecosystem and its restoration: a review	6223
..... PAN Jinhua, JIANG Xin, SAI Shan, et al (6223)	
Nutri-toxicological effects of cyanobacteria on fish	6233
..... DONG Guifang, XIE Shouqi, ZHU Xiaoming, et al (6233)	
Effect of environmental stress on non-structural carbohydrates reserves and transfer in seagrasses	6242
..... JIANG Zhijian, HUANG Xiaoping, ZHANG Jingping (6242)	
Advances in ecological immunology	6251
..... XU Deli, WANG Dehua (6251)	
Scientific Note	
The causes of spatial variability of surface soil organic matter in different forests in depressions between karst hills	6259
..... SONG Min, PENG Wanxia, ZOU Dongsheng, et al (6259)	
Characteristics of seed rain of <i>Haloxylon ammodendron</i> in southeastern edge of Junggar Basin	6270
..... LÜ Chaoyan, ZHANG Ximing, LIU Guojun, et al (6270)	

《生态学报》2013 年征订启事

《生态学报》是中国生态学学会主办的生态学专业性高级学术期刊,创刊于 1981 年。主要报道生态学研究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;新书评介和学术、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,300 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 32 卷 第 19 期 (2012 年 10 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 32 No. 19 (October, 2012)

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	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
主 编	冯宗炜	Editor-in-chief	FENG Zong-Wei
主 管	中国科学技术协会	Supervised by	China Association for Science and Technology
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	Sponsored by	Ecological Society of China Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
出 版	科 学 出 版 社 地址:北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:1000717	Published by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷	北京北林印刷厂	Printed by	Beijing Bei Lin Printing House, Beijing 100083, China
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	Distributed by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net
订 购	全国各地邮局	Domestic	All Local Post Offices in China
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	Foreign	China International Book Trading Corporation Add:P. O. Box 399 Beijing 100044, China
广告经营 许 可 证	京海工商广字第 8013 号		



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 70.00 元