果化示范区土壤 pH 值的空间自相关及其主导因子

尹 辉[1], 李 晖[2,3], 蒋忠诚[3]

(1. 惠州学院 旅游系, 广东 惠州 516007; 2. 广西师范大学 环境与资源学院, 广西 桂林 541004; 3. 中国地质科学院 岩溶地质研究所, 广西 桂林 541004)

摘 要: [目的] 探索空间异质性较大的岩溶区的土壤 pH 值空间自相关尺度及其空间结构,分析影响典型岩溶区土壤 pH 值空间结构的主要环境因子。[方法] 应用经典统计学方法与"3S"技术。[结果] 不同深度土壤 pH 值的空间分布均存在高度的正向全局空间自相关和明显的空间聚集区,各深度土壤 pH 值的空间孤立区分布较少;影响不同深度土壤 pH 值空间分异的环境因子排序为:植被覆盖度>石漠化程度>地质背景。[结论] 土壤 pH 值的空间分异受到了不同植被覆盖条件下酸性物质含量的影响。石漠化程度和地质背景对土壤 pH 值的影响,实质上是典型岩溶环境的综合反映。

关键词: 土壤; pH 值; 空间自相关; 主导因子; 果化示范区

文献标识码: A **文章编号**: 1000-288X(2015)05-0183-06 **中图分类号**: S152.7

DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2015.05.100

Spatial Autocorrelation and Its Dominant Factors of Soil pH Value in Guahua Demonstration Zone

YIN Hui[1], LI Hui[2,3], JIANG Zhongcheng[3]

(1. *Tourism Department, Huizhou University, Huizhou, Guangdong* 516007, *China*; 2. *College of Environment & Resources, Guangxi Normal University, Guilin, Guangxi* 541004, *China*; 3. *Institute of Karst Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Guilin, Guangxi* 541004, *China*);

Abstract: [Objective] This paper aims to demonstrate the spatial autocorrelation and the pattern of soil pH value in order to find the main influencing environmental factors. [Methods] Classical statistics and 3S technology were used. [Results] The spatial distribution of soil pH value in different soil depth showed a highly positive spatial autocorrelation and had obvious spatial clusters, nearly no isolated distribution was found. The factors influencing the spatial distribution of soil pH value in different soil depth ranked as: vegetation coverage, rocky desertification and geological background. [Conclusion] The spatial heterogeneity of soil pH value was affected by the content of acid materials under different vegetation covers, and the influence of rocky desertification and geological background on soil pH value is a comprehensive reflection of typical karst environment.

Keywords: soil; pH value; spatial autocorrelation; dominant factors; Guohua demonstration zone

土壤酸碱度的变化对土壤肥力的效性、各类生物的活性,以及污染物质的毒性等会产生直接或间接的影响[1-2]。位于中国西南典型岩溶峰丛洼地的果化示范区,石漠化较为严重[3-4],生态环境较为脆弱[5-7],农业生产较为落后[8-10]。加强土壤 pH 值及相关理化指标的监测和分析,有助于当地土壤的区划与针对性改良,以及农作物的精细耕作,有利于当地石漠化的综合治理和生态环境恢复[11-13]。可见,作为典型岩溶峰丛洼地土壤酸碱度重要评价因子之一的土壤 pH 值,其自相关及其主导因子的空间研究急待开展。据此,本文基于野外实地监测、Geoda 空间自相关软件和"3S"技术,探讨典型岩溶峰丛洼地果化示范区土壤 pH 值的空间自相关及其主导因子,为指导当地农业生产、保障区域土壤资源的可持续利用提供科学依据。

收稿日期:2014-06-10 **修回日期**:2014-07-23

资助项目:广东省青年创新人才类项目"基于 3S 技术的粤北石漠化地区雨水资源化潜力研究"(2014KQNCX212); 广西自然科学基金项目(2013GXNSFBA019222),(2015A030310275)

第一作者:尹辉(1983—),男(汉族),广西省桂林市人,博士,讲师,主要研究方向为生态恢复、3S 和水土保持。E-mail:yinhui741852963@163.com。

通信作者:李晖(1981—),男(汉族),河南省南阳市人,博士,副教授,主要从事水文水资源与生态环境等方面的研究。E-mail:lh1029@126.com。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

果化示范区是中国“十五”科技攻关课题“喀斯特峰丛洼地生态重建技术与示范”和“十一五”科技支撑计划课题“喀斯特峰丛山地脆弱生态系统重建技术研究”的石漠化治理与生态重建，以及立体农业生态模式综合示范区。果化示范区始建于 2001 年，位于广西平果县果化镇。示范区属典型亚热带季风性峰丛洼地，地质以二叠系下统栖霞组(P_1q)、石炭系上统(C_3)和二叠系下统茅口组(P_1m)为主，海拔 176.4～535.0 m(图 1)。土壤以棕色或黄棕色石质石灰土为主，土壤质地较黏重，团粒结构和小核状结构较多。土壤厚度受地形因素影响较大，一般而言，洼地土层较厚，峰丛坡中、坡顶土壤较为浅薄且不均一，局部地段基岩裸露于地表。土地利用类型以种植玉米、黄豆的旱作坡耕地为主，植被类型主要为稀疏林地、灌丛和低矮灌草，绝大多数植物是阳生灌木和草本种类，如红背山麻杆(*Alchornea trewioides*)、黄荆条(*Vitex negundo*)、灰毛浆果楝(*Cipadessa baccifera*)、类芦(*Neyraudia reynaudiana*)、青香茅(*Cgmbupogon caesius*)、蔓生秀竹(*Microstegium fasciculatum*)等。

1.2 图件来源与处理

本研究区的行政区、地形图、alos 遥感影像等图件主要来源于中国地质科学院岩溶与石漠化研究室，本研究的前期工作是将行政区划图、地形图导入 ArcGIS 软件进行空间参考的赋值和空间坐标的几何校正，在 ENVI 软件平台下完成遥感影像的遥感预处理，包括空间定标、校正大气、校正水平和垂直误差图件进行空间校正，并将融合、裁剪、增强后的影像用于空间样点的布设，为实地监测样点的选取提供依据。

1.3 样点选取与实地监测

本研究的空间样点选取原则为：以果化示范区行政区划图为调研路线选择的依据，同时与前期预处理好的遥感影像相结合，在图像上进行基于网格的空间布点，并导出各待监测样点的经纬度。2011 年 9 月，将待调研的样点坐标导入 GPS，将 GPS 的空间参考与计算机相匹配(本研究选择投影坐标系下高斯克吕格 3 度带 36 带的空间投影)，完成土壤样点的空间导航。实地监测时，考虑到土壤空间环境的相似性与差异性，同时兼顾峰丛洼地的地形、交通可达性、人类活动等因素，对部分土壤样点进行空间调整并记录实际监测点的空间坐标，最终得到图 1 所示的 191 个有效监测样点(各样点的平均间距约为 120 m，样点密度约为 70 个/km^2)。每个土壤样点均挖取土壤剖面，量测 0—5，5—10，10—20 和 20—30 cm 不同土层的土壤深度，用校正后的土壤三参数仪监测各土层的土壤 pH 值(各土层均测量 3 次)，以各监测点不同深度的土壤 pH 值均值作为示范区空间自相关分析的基础数据源。

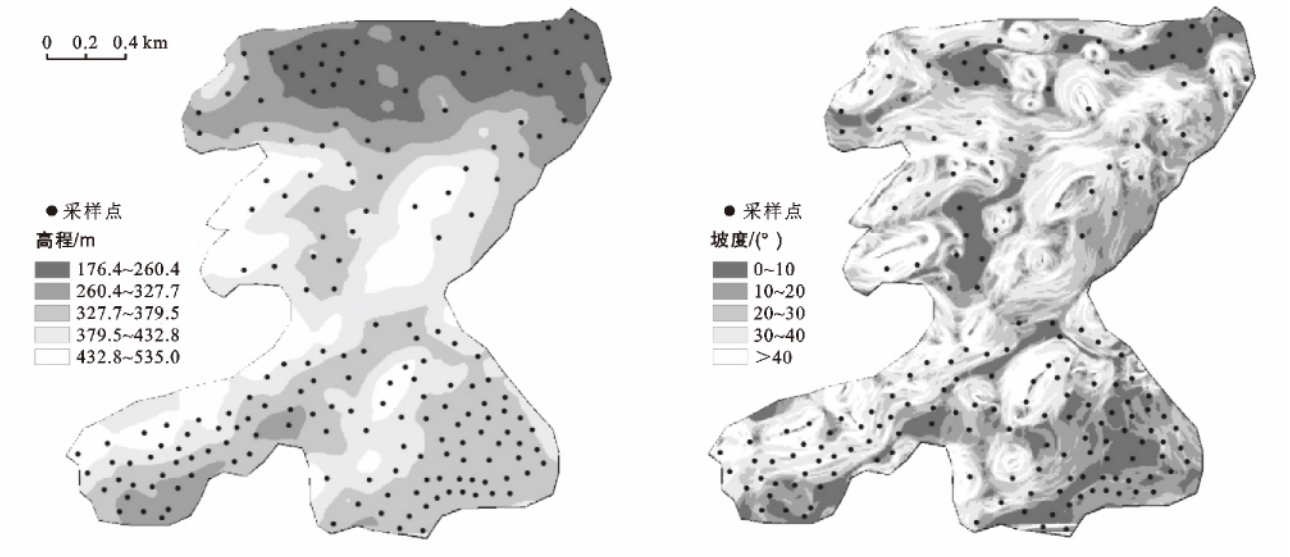


图 1 果化示范区土壤样点布设

1.4 数据处理

1.4.1 基于 RS 的植被覆盖度提取 运用 Envi 4.8 软件对 alos 影像近红外波段和红光波段进行处理，得到 NDVI 植被指数，进而换算出植被覆盖度[14]，计算公式如下：

$$NDVI=\frac{NIR-R}{NIR+R} \quad (1)$$

式中：NDVI——归一化植被指数；NIR——近红外

波段反射率(%);R——红光波段反射率(%)。

$$FVC=\frac{NDVI-NDVI_{min}}{NDVI_{max}-NDVI_{min}}\times 100\% \quad (2)$$

式中:FVC——植被覆盖度(%);NDVI——归一化植被指数;$NDVI_{max}$,$NDVI_{min}$——像元所在地类的转换系数,转换系数为影像中不同植被 DNVI 的最大值和裸地 NDVI 的最小值所在像元空间范围内的 NDVI 平均值。

1.4.2　基于 RS 的石漠化信息提取　石漠化遥感信息的提取模型决定了石漠化信息提取的精度,参考已有的研究[15],选取增强型植被指数法建立示范区石漠化信息提取模型:

$$D_i=DN_R\cdot M_G/(DN_G\cdot M_R) \quad (3)$$

式中:D_i——第 i 个像元的石漠化指数;DN_R 和 DN_G——红光和绿光波段的像元亮度值;M_R 和 M_G——红光和绿光波段的平均像元亮度值。

提取石漠化信息后,本文选用基岩裸露度遥感模型来表征石漠化指数,计算式如下[16]:

$$G_{gi}=\frac{D_i-D_{min}}{D_{max}-D_{min}}\times 100\% \quad (4)$$

式中:D_{gi}——第 i 个像元的岩石裸露率(%);D_i——第 i 个像元的石漠化指数;D_{max},D_{min}——示范区石漠化指数的最大值和最小值。

基于 Envi 4.8 和 ArcGIS 9.3 平台,参照式(3)、式(4)所示的石漠化提取方法和水利部制定的"岩溶地区水土流失综合治理技术标准"(中华人民共和国水利行业标准 SL461—2009)中关于岩溶区石漠化程度分级标准,按基岩裸露率将示范区划分为无明显石漠化/潜在石漠化(<30%)、轻度石漠化(30%~50%)、中度石漠化(50%~70%)和重度石漠化(>70%)4 大类。

1.4.3　空间自相关分析与分类统计　运用空间自相关软件 Geoda 9.2 完成不同深度土壤 pH 值空间权重矩阵、Moran'I 指数和空间自相关性的计算,并运用 ArcGIS 9.3 进行相关图件的绘制。将示范区各深度土壤样点与地质背景、样点高程、样点坡度、土壤厚度、植被覆盖度和石漠化程度在 ArcGIS 9.3 完成空间叠加,以统计示范区不同环境背景下各深度土壤的 pH 值。

2　结果与分析

2.1　植被覆盖度和石漠化程度遥感解译结果

以式(1)—(4)所示的植被覆盖度和石漠化遥感解译方法为依据,得到 2009 年 9 月的果化示范区植被覆盖度和石漠化程度遥感解译结果(如表 1—2 所示)。

表 1　果化示范区植被覆盖度解译结果

植被覆盖度/%	<20%	20%~40%	40%~60%	60%~80%	>80%
面积/m^2	34 372.80	243 660.23	1 169 990.60	1 212 872.80	44 871.84
比 例/%	1.27	9.01	43.24	44.83	1.66

表 2　果化示范区石漠化解译结果

石漠化等级划分数据源	无石漠化		轻度石漠化		中度石漠化		重度石漠化	
	面积/m^2	比例/%	面积/m^2	比例/%	面积/m^2	比例/%	面积/m^2	比例/%
alos 影像	1 713 431.58	63.33	781 147.06	28.87	169 529.05	6.27	41 660.64	1.53

2.2　土壤 pH 值的空间结构

图 2 表明,不同深度土壤 pH 值呈现正向的全局空间自相关:各深度土壤 pH 值并未呈现出空间的随机分布特征,而是表现出一定的集聚效应:多数分别位于"高—高"集聚和"低—低"集聚类型的第 1 象限和第 3 象限内;少数土壤 pH 值分别位于"低—高"集聚和"高—低"集聚类型的第 2 象限和第 4 象限内。其中,10 cm 土壤 pH 值的高、低值分布相对集中;而 5,20 和 30 cm 土壤 pH 值的高、低值分布较为分散。图 3 表明,5 和 30 cm 深度的土壤 pH 值空间自相关尺度分别为 2 200 和 2 000 m;10 和 20 cm 深度的土壤 pH 值空间自相关尺度均为 1 600 m。

果化示范区局部自相关分析表明,土壤 pH 值以空间集聚分布为主,空间孤立分布较少(图 4)。其中,"高—低"空间孤立区主要在"低一低"空间集聚区附近;"低—高"空间孤立区多在"高一高"空间集聚区分布。

土壤 pH 值的空间集聚还随土壤深度的变化而有少许变化,主要表现为:较其他深度土壤 pH 值而言,20 cm深度龙何耕作区北部的"高—高"空间集聚规模较小;5 cm 深度布尧耕作区集聚了较大规模的"低—低"土壤 pH 值空间分布,其集聚程度随土壤深度的递增而渐趋不显著;陇尧屯土壤 pH 值的"低—低"和"高—低"空间分布也随土壤深度的递增而有所变化。

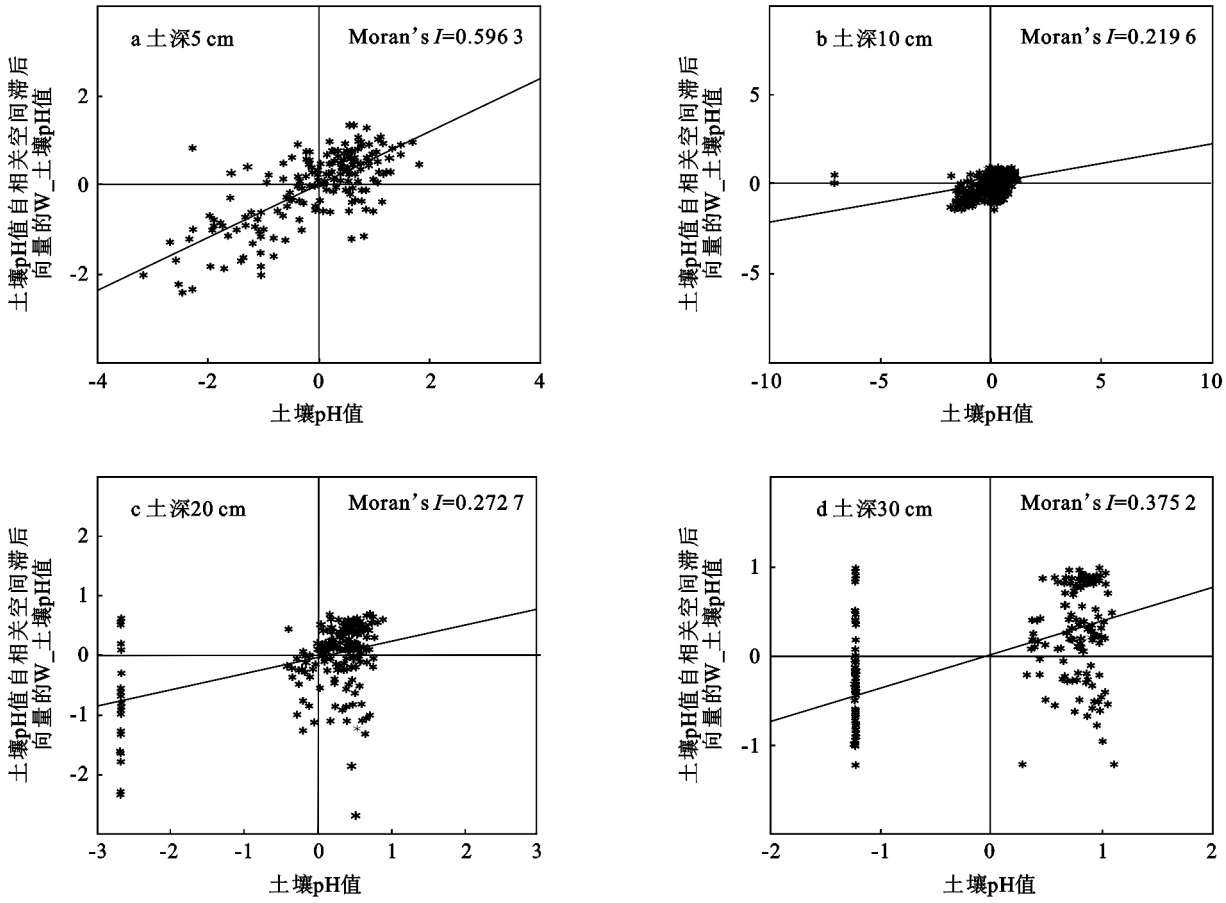


图 2 土壤 pH 值的 Moran'*I* 散点图

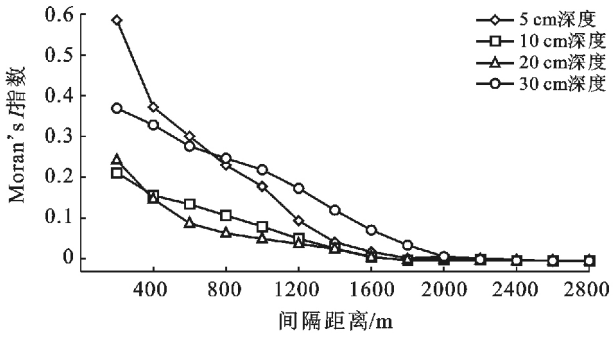


图 3 土壤 pH 值的间隔距离与 Moran's *I* 指数

2.3 土壤 pH 值空间变异的影响因素

从表 3 可以看出，地质背景为二叠系下统的土壤 pH 值均值在总体上略高于石炭系上统；不同深度土壤 pH 值在总体上随高程、坡度和植被覆盖度的递增而有所减小，却随石漠化程度的递增而有所增加；不同深度土壤 pH 值随土壤厚度的影响较为明显，但未呈现出明显的变化规律。

本文基于 SPSS 18.0 的方差分析模块，计算不同环境背景下各深度土壤 pH 值的方差值，以此来判别各环境因子对土壤 pH 值的影响程度排序。从表 4 可见，植被覆盖度、石漠化程度、地质背景是影响土壤 pH 值空间分布的主导因子。

3 讨 论

植被覆盖度是影响土壤 pH 值空间分布的第 1 主导因子，主要体现在：植被覆盖度较大，植被群落下的动植物生长较快，各种生物死亡后的残体所分泌的酸性物质较多，随着酸性物质在土壤中的不断富集，导致碱性母质风化而成的土壤逐渐酸化，最终形成 pH 值相对较低的偏酸性土壤；石漠化程度是影响土壤 pH 值空间分布的第 2 主导因子，主要体现在：石漠化程度越高，基岩的裸露程度会相应增加。由于岩溶区的基岩主要为偏碱性、易风化的石灰岩，该类岩石风化后的残留物能在一定程度上中和土壤酸化过程中所产生的酸性物质，从而达到中和酸性土壤的作用，使得重度石漠化程度背景下，土壤 pH 值基本接近于中性值 7；地质背景是影响土壤 pH 值空间分布的第 3 主导因子，主要体现在：土壤的组成与土壤母质的风化残留物质成分密切相关，土壤的酸碱性会受到地质背景中基岩母质风化成分的较大影响。以夹硅质岩和燧石灰岩分布为主的石炭系上统，硅酸盐物质常以胶体形式存在，易于淋失而富集于土壤之中，土壤盐基离子略偏酸性，从而降低了土壤 pH 值；而以泥质灰岩和中—厚层层状灰岩分布为主的二叠系下统，基岩皆

以偏碱性盐基离子为主,从而增加了其分布区的土壤 pH 值。然而,以泥质灰岩和层状灰岩为主的二叠系下统,其岩层在淋溶程度上,比起硅酸盐胶体而言要小得多,其偏碱性盐基离子富集于土壤的含量也相对较少,从而不会较大程度地提高土壤的碱性。

4　结 论

本文基于室内外布点与监测手段,运用"3S"技术与自相关分析方法,对果化示范区的土壤 pH 值空间自相关特征及其环境背景进行了分析,得到如下结论:(1) 全局自相关分析表明各深度土壤 pH 值呈现正向的全局空间自相关;(2) 局部自相关分析表明土壤 pH 值以空间集聚分布为主,空间孤立分布较少;(3) 土壤 pH 值的主导因子排序为:植被覆盖度>石漠化程度>地质背景>坡度>高程>土壤厚度。

表 3　不同环境条件下的土壤 pH 均值

影响因子		不同土层深度土壤 pH 值			
		5 cm	10 cm	20 cm	30 cm
地质背景	C_3(石炭系上统)	6.29^{Aa}	6.25^{Aa}	6.08^{Aa}	6.11^{Aa}
	P_1q(二叠系下统)	6.78^{Ab}	6.57^{Ab}	6.56^{Ab}	6.55^{Ab}
高程/m	176.4～260.5	6.87^{Aa}	6.80^{Aa}	6.30^{Ba}	6.48^{Ba}
	260.5～327.7	6.57^{Ab}	6.48^{Ab}	6.25^{Aa}	6.50^{Aa}
	327.7～379.5	6.55^{Ab}	6.41^{Ab}	6.37^{Aa}	6.30^{Aa}
	379.5～432.8	6.40^{Ab}	6.17^{Ac}	6.22^{Aa}	6.17^{Ab}
	432.8～535.0	6.45^{Ab}	6.45^{Ab}	6.30^{Aa}	6.41^{Aa}
坡度/°	0～10	6.66^{Aa}	6.57^{Aa}	6.05^{Ba}	6.18^{Ba}
	10～20	6.60^{Aa}	6.53^{Aa}	5.59^{Bb}	6.51^{Aa}
	20～30	6.54^{Aa}	6.24^{Aa}	5.69^{Bb}	6.30^{Aa}
	30～40	6.54^{Aa}	6.33^{Aa}	5.36^{Bb}	6.25^{Aa}
	>40	6.44^{Aa}	6.48^{Aa}	5.38^{Bb}	6.35^{Aa}
厚度/cm	0～15	6.45^{Aa}	6.39^{Aa}	—	—
	15～30	6.57^{Aa}	6.44^{Aa}	6.45^{Aa}	—
	30～45	6.49^{Aa}	6.49^{Aa}	6.27^{Aa}	6.24^{Aa}
	>45	6.74^{Aa}	6.65^{Aa}	6.38^{Aa}	6.40^{Aa}
植被覆盖率/%	0～20	7.19^{Aa}	7.23^{Aa}	7.03^{Aa}	—
	20～40	6.57^{Ab}	6.53^{Ab}	6.36^{Ab}	6.57^{Aa}
	40～60	6.71^{Ab}	6.65^{Ab}	6.47^{Ab}	6.48^{Aa}
	60～80	6.39^{Ab}	6.31^{Ac}	6.20^{Ab}	6.16^{Ab}
	80～100	6.30^{Ab}	6.07^{Ac}	5.90^{Bc}	5.78^{Bc}
石漠化程度/%	无石漠化	6.48^{Aa}	6.34^{Aa}	6.22^{Aa}	6.15^{Aa}
	轻度石漠化	6.64^{Aa}	6.51^{Aa}	6.40^{Aa}	6.43^{Aa}
	中度石漠化	6.71^{Aa}	6.61^{Aa}	6.45^{Aa}	6.66^{Ab}
	重度石漠化	7.09^{Ab}	7.14^{Ab}	6.99^{Ab}	6.92^{Ab}

注:行内相同小写字母表示同一深度土壤在不同环境条件下的 pH 值均值差异不显著;列中相同大写字母表示同一环境条件下不同深度土壤的 pH 值均值差异不显著($\alpha=0.05$)。

表 4　不同环境背景下各深度土壤 pH 值的方差值及排序

土壤深度/cm	环境背景					
	地质	高程	坡度	厚度	植被	石漠化
5	0.120	0.033	0.007	0.016	0.123	0.067
10	0.051	0.051	0.020	0.013	0.190	0.119
20	0.115	0.003	0.079	0.008	0.173	0.110
30	0.097	0.019	0.015	0.013	0.128	0.108
各深度方差均值	0.096	0.027	0.030	0.013	0.154	0.101
均值大小排序	3	5	4	6	1	2

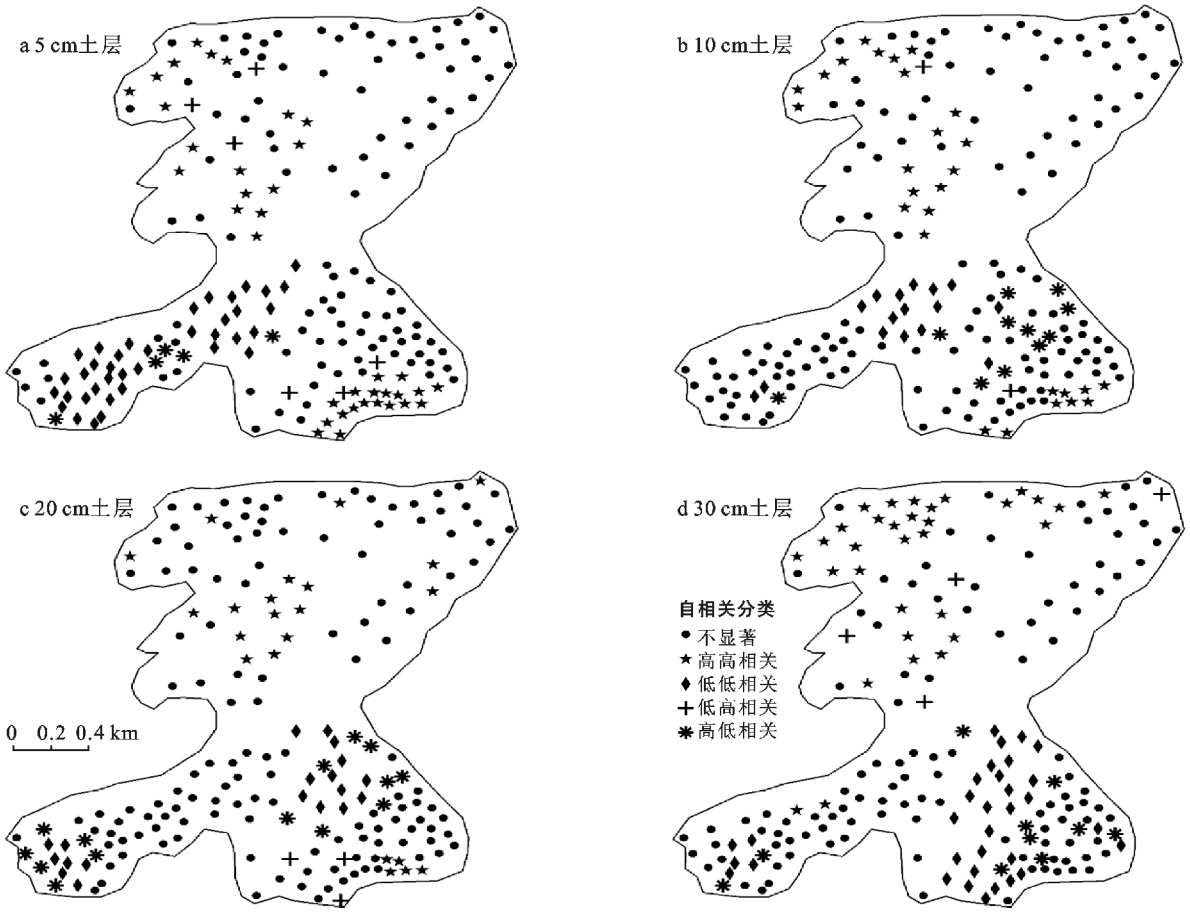


图 4 5,10,20,30 cm 深度土壤各 pH 值自相关空间分布

[参 考 文 献]

[1] 孙小茗,汪晓丽,司江英,等. 低钾条件下 pH 值和 NH_4^+ 对作物幼苗 K^+ 吸收的影响[J]. 扬州大学学报:农业与生命科学版,2006,27(4):74-77.

[2] 司江英,汪晓丽,陈冬梅,等. 不同 pH 值和氮素形态对作物幼苗生长的影响[J]. 扬州大学学报:农业与生命科学版,2007,28(3):68-71.

[3] 李晖,尹辉,蒋忠诚,等. 典型岩溶区石漠化和土壤侵蚀遥感解译与关键问题[J]. 广西师范大学学报:自然科学版,2013,31(2):133-139.

[4] 尹辉,王魁,蒋忠诚,等. 广西岩溶区水土保持示范区模式比较研究[J]. 中国水土保持,2012,(3):10-12,52.

[5] 尹辉,李晖,蒋忠诚,等. 基于 3S 的广西典型岩溶区土壤厚度空间格局研究[J]. 水土保持研究,2014,21(6):25-29.

[6] 刘艳,尹辉,刘炀,等. 典型岩溶坡面土壤水分的空间变异研究[J]. 广东农业科学,2013,40(13):156-160.

[7] 尹辉,李晖,蒋忠诚,等. 基于空间技术的果化示范区土壤电导率空间自相关研究[J]. 浙江农业学报,2014,26(5):1290-1296.

[8] 尹辉. 我国西南典型喀斯特峰丛洼地土壤理化特征研究[D]. 北京:中国地质科学院,2012.

[9] 尹辉,李晖,蒋忠诚,等. 典型岩溶区土壤水分的空间异质性研究[J]. 江苏农业科学,2013,41(7):332-336.

[10] 尹辉,李晖,蒋忠诚,等. 典型岩溶峰丛洼地土壤温度的空间异质性[J]. 湖北农业科学,2015,54(8):1825-1828.

[11] 尹辉,蒋忠诚,杨奇勇,等. 典型岩溶区土壤 pH 值的空间异质性研究[J]. 广东农业科学,2013,40(11):48-51,237.

[12] 尹辉,李晖,蒋忠诚,等. 广西果化岩溶区土壤电导率的空间异质性[J]. 中国沙漠,2014,34(3):786-794.

[13] 尹辉,李晖,蒋忠诚,等. 环境因子对广西典型岩溶区土壤温度空间结构的影响[J]. 水土保持通报,2015,35(2):116-120.

[14] 师庆东,吕光辉,韦如意. 利用 FVC 和 DEM 对中国新疆南部植被的分类研究[J]. 新疆大学学报:自然科学版,2003,20(3):280-284.

[15] 杨奇勇,蒋忠诚,马祖陆,等. 基于地统计学和遥感的岩溶区石漠化空间变异特征[J]. 农业工程学报,2012,28(4):243-247.

[16] 周欣,吴虹,党宇宁. 基于 EOS-MODIS 的广西全境石漠化信息提取方法研究[J]. 化工矿产地质,2008,30(4):219-223.