

基于信息熵原理的土壤 pH 影响因素空间相关性分析^①

檀满枝^{1,2}, 詹其厚¹, 陈杰^{1*}

(1 土壤与农业可持续发展国家重点实验室(中国科学院南京土壤研究所), 南京 210008; 2 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要: 土壤酸碱度是土壤重要的基本性质之一, 它受特定的生物气候条件、地形、母质来源以及人为活动的影响。本文选取发育于不同母质和不同地形部位, 且土地利用方式多样的丘陵区土壤, 进行高密度土壤剖面样品的采集, 分析获取表层和底层土壤 pH 数据。基于信息熵原理对土壤 pH 与母质、地形和土地利用方式之间的空间相关性进行定量分析, 结果表明表层土壤 pH 主要受土地利用方式的控制, 耕作土壤 pH 值明显小于自然土壤; 而底层土壤 pH 主要受母质的影响, 不同母质上发育的土壤 pH 值从高到低依次排列为紫红色砂页岩风化物、下蜀黄土和砂岩风化物。本文的研究特色是应用联合信息熵算法, 在定性变量和定量变量之间进行定量的空间相关性分析, 这点克服了以前定性变量和定量变量之间相关关系研究的不足。

关键词: 土壤 pH; 母质; 土地利用方式; 联合信息熵

中图分类号: S153.4; S11+3

土壤酸碱度是土壤重要的基本性质之一, 是土壤形成过程和熟化培肥过程的一个指标。土壤酸碱度对土壤中养分存在的形态和有效性, 对土壤的理化性质、微生物活动以及植物生长发育都有很大的影响。土壤的酸碱度同特定的生物气候条件、地形、母质来源以及成土过程的长短等均有密切的关系^[1]。国内外研究一般是采用方差分析和均值比较法来检验土壤 pH 值在不同母质、地形和土地利用类型之间的差异^[2-6]。而定量研究土壤酸碱度和地形、母质和土地利用方式之间的相关性还未见报道。土壤酸碱度与土壤其他肥力要素之间的关系一般是通过皮尔森相关性分析得到^[6-8]。土壤 pH 值时空变化的影响因素研究较多, 主要集中在施肥、植物麦茬和工业活动等外在人为因素影响方面, 所用的方法一般也是方差分析和均值比较法^[7-10]。

针对目前国内外定量化研究土壤酸碱度与母质、地形和土地利用方式之间的相关性较少的情况。本文在南京市郊区的亚热带丘陵区, 选择发育于不同地形部分、母质来源和利用方式下的土壤, 进行高密度土壤剖面样品的采集获取基础数据, 系统分析地形、母质来源和利用方式与土壤 pH 值之间的空间相关性, 取得了较好的研究结果。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于江苏省南京市东郊麒麟镇东流村附

近, 面积约为 1 km²。北纬 32°04'30"~32°05'01", 东经 118°57'00"~118°58'30"。土壤类型复杂, 有新成土、雏形土、淋溶土和人为土发育。主要地貌类型为构造剥蚀低山丘陵, 夹有小面积下蜀黄土岗地(1~2 级阶地), 属于堆积侵蚀阶地^[11]。样区内地形总体上起伏平缓, 高程为 16.1 m~70.5 m, 高差不大, 但岗丘沟谷发育, 微地貌变化大, 母质类型主要为砂岩风化物、紫红色砂页岩风化物和小面积的下蜀黄土及其次生堆积物。

1.2 土壤样品采集与分析

2006 年 12 月通过土壤野外调查, 在不同母质来源、地形部位和土地利用方式下开挖主要土壤剖面 29 个, 根据土壤剖面形态特征的观察(包括颜色、结构、质地、坚实度、孔隙度、湿度、新生体、侵入体和动物孔穴等)进行特征土层的划分^[12]和分层土壤样品的采集, 并进行土壤野外形态特征记载, 同时记录样点位置及景观信息(表 1)。

采集的 29 个土壤剖面发育的母质类型有: 下蜀黄土(14 个剖面)、砂岩风化物(9 个剖面)和紫红色砂页岩风化物(6 个剖面)。土地利用方式为荒地(9 个剖面)、林地(6 个剖面)、耕地(14 个剖面, 其中包括旱地、菜地和水稻田)。地形部位为低丘中上部(6 个剖面)、岗地(4 个剖面)、沟谷(5 个剖面)、低丘坡麓(6 个剖面)和低丘下部(8 个剖面)。

对土壤表层(最上层)和底层(紧靠母质 C 层)的 pH 值采用室内风干土电位法测定, 水土比为 2.5:1。

①基金项目: 国家自然科学基金项目(40571065、40701070)资助。

* 通讯作者(jchen@issas.ac.cn)

作者简介: 檀满枝(1978—), 女, 安徽望江人, 助理研究员, 博士研究生, 主要从事土壤资源演变、土壤空间预测及土壤调查制图研究。E-mail: mzhtan@issas.ac.cn

表 1 各采样剖面点基本情况

Table 1 General description of soil profile samples

剖面编号	地理位置		地形	母质	利用方式
	东经	北纬			
1	118°57'44"	32°4'49"	低丘下部	砂岩风化物	荒地
2	118°57'46"	32°4'50"	低丘下部	砂岩风化物	荒地
3	118°57'51"	32°4'53"	低丘坡麓	下蜀黄土	旱地
4	118°57'55"	32°4'55"	低丘下部	紫红色砂页岩风化物	旱地
5	118°57'50"	32°4'54"	低丘坡麓	下蜀黄土	旱地
6	118°57'58"	32°4'55"	低丘中上部	紫红色砂页岩风化物	林地
7	118°57'59"	32°4'55"	低丘中上部	砂岩风化物	林地
8	118°57'52"	32°4'41"	黄土岗地	下蜀黄土	林地
9	118°57'55"	32°4'43"	低丘坡麓	下蜀黄土	旱地
10	118°57'60"	32°4'44"	低丘中上部	紫红色砂页岩风化物	林地
11	118°57'57"	32°4'43"	低丘下部	紫红色砂页岩风化物	林地
12	118°57'40"	32°4'48"	低丘下部	砂岩风化物	林地
13	118°57'44"	32°4'42"	低丘坡麓	下蜀黄土	菜地
14	118°57'40"	32°4'40"	沟谷	下蜀黄土	旱地
15	118°57'43"	32°4'36"	黄土岗地	下蜀黄土	荒地
16	118°57'37"	32°4'34"	沟谷	下蜀黄土	菜地
17	118°57'31"	32°4'41"	低丘中上部	砂岩风化物	荒地
18	118°57'32"	32°4'42"	低丘中上部	砂岩风化物	荒地
19	118°57'37"	32°4'39"	黄土岗地	下蜀黄土	旱地
20	118°57'34"	32°4'39"	低丘下部	砂岩风化物	荒地
21	118°57'48"	32°4'35"	低丘坡麓	下蜀黄土	旱地
22	118°57'51"	32°4'36"	黄土岗地	下蜀黄土	荒地
23	118°57'55"	32°4'46"	低丘中上部	砂岩风化物	荒地
24	118°57'44"	32°4'54"	沟谷	下蜀黄土	水稻田
25	118°57'48"	32°4'51"	沟谷	下蜀黄土	水稻田
26	118°57'50"	32°4'59"	低丘下部	紫红色砂页岩风化物	旱地
27	118°57'53"	32°4'59"	低丘下部	砂岩风化堆积物	荒地
28	118°57'45"	32°5'0"	沟谷	紫红色砂页岩沟谷堆积物	水稻田
29	118°57'41"	32°4'51"	低丘坡麓	下蜀黄土	旱地

1.3 信息熵基本算法

熵作为一个随机变量的不确定性或信息量的度量,熵函数可以用来计算空间离散面状分布变量之间的相关性强度。信息熵为:

$$H(x) = -\sum_{i=1}^n p(x_i) \log_2 P(x_i) \quad (1)$$

式中, $p(x_i)$ 为发生事件 x_i 的概率, n 为可能发生的事件(状态)总数。

当 x, y 构成二维随机变量时,其联合分布概率为 $P(x_i, y_j)$ ($i=1,2,\dots,n, j=1,2,\dots,m$), 则 x, y 的联合熵^[13]为:

$$H(x, y) = -\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m p(x_i, y_j) \log_2 p(x_i, y_j) \quad (2)$$

一般有: $H(x, y) \leq H(x) + H(y)$, 如果 x, y 相互独立,

则: $H(x, y) = H(x) + H(y)$ 。显然, $H(x, y)/(H(x) + H(y))$ 反映了 x 与 y 之间的相关性, 为了使用方便, 常用

$$K = 1 - \frac{H(x, y)}{H(x) + H(y)}$$

来描述 x, y 之间的相关程度^[14]。

因 $H(x, y) \leq H(x) + H(y)$, 故 K 的取值为 $[0, 1]$ 。 $K=0$ 时表示 x, y 不相关; K 越大则说明二者之间的相关程度越高。

2 结果与讨论

2.1 土壤 pH 值描述性统计分析

在不同土地利用方式下, 样区表层土壤 pH 平均值耕地 (5.6) < 林地 = 荒地 (7.2), 即耕作土壤表层 pH 值 < 自然土壤 pH 值, 人为耕种、施肥等活动使

得土壤表层 pH 值下降。样区底层土壤 pH 平均值耕地 (6.9) > 林地 (6.7) > 荒地 (5.6), 说明底层土壤受人为活动影响小, 母质来源的影响凸现出来。底层土壤 pH 平均值符合来源母质的酸碱性强弱规律, 砂岩风化物 (5.1) < 黄土母质 (6.8) < 紫红色砂页岩风化物 (7.3)。而发育于不同母质上的表层土壤 pH 平均值砂岩风化物 (7.2) > 紫红色砂页岩 (6.6) > 黄土

母质 (5.8), 表明发育于砂岩风化物上土壤表层的 pH 平均值升高, 而黄土母质上土壤表层 pH 平均值降低。自然土壤 pH 值规律被打破, 是因为黄土母质上发育的土壤地形部位较好, 都是耕作土壤, 易受人为活动影响, 所以土壤 pH 值降低; 而砂岩风化物上发育的土壤基本上是自然土壤, 砂岩风化物本身 pH 值偏低^[11]。

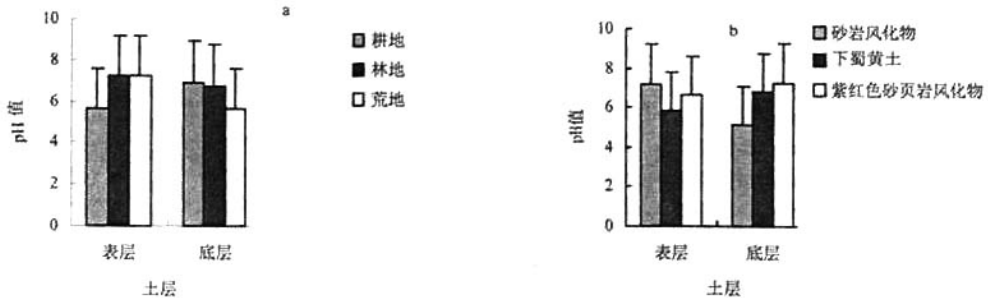


图 1 不同土地利用方式 (a) 和母质来源 (b) 下土壤表层、底层 pH 均值柱状图

Fig. 1 Histograms of mean pH value of topsoil and bottom soil under different land-use pattern (a) and parent material(b)

2.2 表层土壤 pH 与母质、地形和土地利用方式联合熵分析结果

按照土壤酸碱度分级法分为以下几种情况^[11]: 强酸性, pH < 4.5; 酸性, pH 为 4.5 ~ 5.5; 微酸性, pH 为 5.5 ~ 6.5; 中性土, pH 为 6.5 ~ 7.5; 微碱性土, pH 为 7.5 ~ 8.5。根据信息熵算法模型, 为了获得表层土壤 pH 值与土地利用方式联合熵值, 首先必须计算出表层土壤 pH 值分布概率 $P(x_i)$, 土地利用方式分布概率 $P(y_j)$ 以及它们之间的联合分布概率 $P(x_i, y_j)$ (表 2)。然后根据公式 (1) 计算得到表层土壤 pH 值熵值 $H(x)$ 为 1.96, 土地利用方式的熵值 $H(y)$ 为 1.50。根据公式 (2) 计算出表层土壤 pH 值与土地利用方式之间的联合熵为 2.90。采用同样的方法获得表层土壤 pH

值与母质和地形之间的联合熵分别为 3.15 和 3.70。

2.3 底层土壤 pH 与母质、地形和土地利用方式联合熵分析结果

与以上方法步骤相同, 为了获得底层土壤 pH 值与母质联合熵值, 首先计算出底层土壤 pH 值分布概率 $P(x_i)$, 母质分布概率 $P(y_j)$ 以及它们之间的联合分布概率 $P(x_i, y_j)$ (表 3)。然后计算得到底层土壤 pH 值熵值为 1.20, 母质的熵值为 1.54, 底层土壤 pH 值与母质之间的联合熵值 1.98。另外, 底层土壤 pH 值与地形和土地利用方式之间的联合熵值分别为 3.01 和 2.41。从结果中可以看出表层土壤熵值 (1.96) 大于底层土壤熵值 (1.20), 表明表层土壤 pH 信息不确定性大, 易受到人为和其他外在不确定性因素的影响。

表 2 表层土壤 pH 值与土地利用方式之间的联合分布概率矩阵

Table 2 Unite distributing probability matrix between topsoil pH and land use pattern

利用方式	$P(x_i, y_j)$					$P(y_j)$
	强酸性土	酸性土	微酸性土	中性土	微碱性土	
耕地	2/29	4/29	5/29	3/29	0	14/29
林地	0	0	0	6/29	0	6/29
荒地	0	0	3/29	4/29	2/29	9/29
$P(x_i)$	2/29	4/29	8/29	13/29	2/29	

注: $P(x_i)$ 为 $P(x_i, y_j)$ 中每列之和, $P(y_j)$ 为 $P(x_i, y_j)$ 中每行之和, 下同。

表 3 底层土壤 pH 值与母质来源之间的联合分布概率矩阵

Table 3 Unite distributing probability matrix between bottom soil pH and parent material

母质	$P(x_i, y_j)$					$P(y_j)$
	强酸性土	酸性土	微酸性土	中性土	微碱性土	
下蜀黄土	0	0	1/29	12/29	0	13/29
紫红色砂页岩风化物	0	0	0	8/29	0	8/29
砂岩风化物	0	5/29	3/29	0	0	8/29
$P(x_i)$	0	5/29	4/29	20/29	0	

2.4 表层土壤和底层土壤 pH 值与母质、地形和土地利用方式之间的空间相关性分析结果

根据相关性 K 值计算公式计算出表层土壤和底层土壤 pH 值与母质、地形和土地利用方式之间的空间相关性 K 值。

表层土壤 pH 值与母质、地形、土地利用方式之间的空间相关性顺序为：土地利用方式 > 地形 > 母质。底层土壤与母质、地形、土地利用方式之间的空间相关性顺序为：母质 > 地形 > 土地利用方式（表 4）。底层土壤的 pH 值主要受来源母质特性的影响，这点符合实际情况；但是到表层，土地利用方式起到主导作用。研究表明，在同一研究区内，不论发育于何种母质上的土壤，耕作土壤的 pH 值小于自然土壤。地形与表层土壤和底层土壤 pH 相关性相对稳定，相关程度始终处于母质和地形与土壤 pH 值相关性之间。

表 4 土壤表层和底层 pH 值与母质、地形和土地利用方式之间的相关性 K 值

Table 4 Spatial relationship of K value between topsoil pH, bottom soil pH and parent material, terrain as well as land use pattern

	母质来源	地形部位	利用方式
表层 pH	0.10	0.12	0.16
底层 pH	0.28	0.13	0.11

3 结论

表层土壤 pH 与土地利用方式之间空间相关性最大，在母质、地形和土地利用方式三者之间，表层土壤 pH 主要受土地利用方式的影响。耕作土壤 pH 的平均值明显小于自然土壤（包括荒地和林地），土地利用方式直接影响土壤过程以及土壤与外界环境的物质能量交换，进而对土壤性状及肥力质量产生重要影响^[2]。

底层土壤 pH 与母质之间空间相关性最大，在母质、地形和土地利用方式三者之间，底层土壤 pH 主要受母质的影响。不同母质上发育的底层土壤 pH 值从高到低依次排列为紫红色砂页岩风化物、下蜀黄土和砂

岩风化物，与不同母质本身酸碱性强弱相一致。

表层土壤 pH 熵值大于底层土壤，表明表层土壤 pH 信息不确定性大，易受到人为和其他外在不确定性因素的影响。与母质和土地利用方式比较，地形与表层土壤和底层土壤 pH 的空间相关性均处于三者的中间位置，对土壤 pH 的影响相对稳定。

根据变量不同状态的发生概率来进行不确定性和空间相关性分析，把该方法应用到土壤学中定性变量和定量变量，以及定性变量之间空间相关性分析，有较好的应用前景。

参考文献：

- [1] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业科技出版社, 2000
- [2] 黄辉, 檀满枝, 张学雷, 陈杰. 南通市城市边缘带土壤肥力时空特征分析. 土壤, 2006, 38(3): 276-281
- [3] 郭荣发, 杨杰文. 成土母质和种植制度对土壤 pH 和交换性铝的影响. 生态学报, 2004, 24(5): 984-990
- [4] 李婷, 张世熔, 干文芝. 成都平原土壤 pH 的时空分布特征及影响因素研究. 四川农业大学学报, 2006, 24(3): 313-318
- [5] 赵庚星, 李秀娟, 李涛, 岳玉德, 张如水. 耕地不同利用方式下的土壤养分状况分析. 农业工程学报, 2005, 21(10): 55-59
- [6] Paz-González A, Vieira SR, Taboada CMT. The effect of cultivation on the spatial variability of selected properties of an umbric horizon. Geoderma, 2000, 97: 273-292
- [7] Ohno T, Fernandez IJ, Hiraide S, Sherman JF. Effects of soil acidification and forest type on water soluble soil organic matter properties. Geoderma, 2007, 140: 176-187
- [8] Borůvka L, Mládková L, Penížek V, Drábek O. Forest soil acidification assessment using principal component analysis and geostatistics/Pedometrics. Frontiers in Pedometrics. Program and Abstract Book. Naples, Florida, USA: University of Florida, 2005: 5-6
- [9] 李志安, 邹碧, 丁永桢, 谭万能, 夏汉平, 沈承德, 孙彦敏. 植物残茬对土壤酸度的影响及其作用机理. 生态学报, 2005,

- 25(9): 2382-2388
- [10] 高中贵, 彭补拙, 喻建华, 濮励杰, 张露. 经济发达地区土地利用变化对土壤性质的影响—以江苏省昆山市为例. 自然资源学报, 2005, 20(1): 44-51
- [11] 江宁县土壤普查办公室, 南京市土壤普查办公室, 江苏省土壤普查办公室. 江苏省江宁县土壤志. 1985
- [12] 杜国华, 张甘霖, 龚子同. 论特征土层与土系划分. 土壤, 2001, 33(1): 1-6
- [13] 盛骤, 谢式千, 潘承毅. 概率论与数理统计. 3版. 北京: 高等教育出版社, 2004
- [14] Meyer WB, Turner BL. Change in land use and land cover: A global perspective. II. London: Cambridge University Press, 1994: 12-15

Spatial Similarity Analysis of Soil pH'S Influence Factor Based on Information Entropy Theory

TAN Man-zhi^{1,2}, ZHAN Qi-hou¹, CHEN Jie¹

(¹ State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture (Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences), Nanjing 210008, China;

² Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Acidity and alkalinity is a basic property of soil, which is influenced by biology, climate, landform, parent material and artificial activity. This paper selected the soils developed from different parent material and landform positions and land use types in a hill section. The data of pH value of topsoil and bottom soil were got by digging soil profile and experimental analysis. Spatial similarity was analyzed between soil pH and parent material, landform, land use pattern respectively by information entropy theory. The results showed that topsoil pH was mainly influenced by land use pattern, pH value of cultivate soil was lower than natural soil. And the bottom soil pH was mostly influenced by parent material, pH-value of soil developed from sandstone rotten material was the lowest, then the Xiashu loess, the maximal one was sandstones and fuchsia shale material. This paper was characterized by a quantitative spatial relativity analysis between the qualitative and quantitative variables based on unite entropy theory, it could overcome the deficiency existed in the previous studies.

Key words: Soil pH, Parent material, Land use pattern, Unite information entropy