

天津市平原土壤微量元素含量的 空间自相关研究*

张朝生** 陶澍 袁贵平 刘水

(北京大学城市与环境学系, 100871)

摘 要

空间自相关是区域化变量的基本属性之一, 而空间自相关统计可用于检测研究区域内变量的分布是否具有空间结构。本研究以天津市平原区土壤微量元素为例, 采用 Moran's I 统计量, 研究了土壤微量元素含量的空间自相关关系、空间自相关的方向性、空间自相关与距离的关系以及不同方向的自相关与距离的关系。结果证实在本研究的采样密度下 (平均约 300 平方公里一点), 天津市平原区多数土壤微量元素含量表现出显著的正空间自相关; 土壤微量元素含量的空间自相关关系在受表生与人为作用影响较大的 A 层最为强烈; 人为活动改变了部分微量元素含量 (汞、镉、铅、锌、砷) 在研究区土壤中, 尤其是表土中原有的空间分布结构特征。

关键词 微量元素, 空间自相关, 方向性, 空间相关图, 空间分布

土壤微量元素含量是由地球内生与表生作用共同决定的, 其空间分布也与这些作用有关。通过对土壤微量元素含量空间分布的研究可以分析这些作用的特点。正因为如此, 土壤微量元素含量空间分布研究日益受到重视。一系列与之有关的方法, 如几何插值、滑动平均、趋势面分析以及统计学技术被用来从不同的角度对其进行研究^[2,4,1]。

空间自相关是区域化变量的基本属性之一, 而空间自相关统计量可用于检测研究区域内变量的分布是否具有结构性。在母质呈斑块状分布的区域内, 土壤微量元素含量往往具有空间自相关特征, 其分布具有空间结构。由于空间自相关特征与样点距离密切相关, 进行空间自相关研究时必须考虑采样密度。

本研究以天津市平原区土壤微量元素为例, 采用空间自相关分析方法, 查明在特定采样密度下该地区土壤微量元素含量是否存在空间自相关关系, 空间分布是否具有方向性特点, 以及空间自相关关系随距离的变化。

一、研究方法

(一) 数据采集

样品采自天津市平原区的 36 个样点。采样密度约为 300 平方公里一点, 采样时尽可能避开污染

* 国家教委青年优秀教师基金资助项目。天津市环境监测中心的沈伟然和张文具同志为本文提供了宝贵的资料, 特此致谢。

** 现工作单位: 中国科学院地理研究所化学地理室, 100101。

1) 陶澍、田宏国、张朝生、沈文新, 1993: 深圳地区土壤微量元素含量的空间结构特征(待发表)。

源,样点分布基本均匀,点对间距离最近为 6.5 公里,最远为 140.4 公里。分析了所有样点 A、B、C 三层的 13 种微量元素(铜、铅、锌、镉、镍、铬、汞、砷、硒、钴、钒、锰和氟)的含量,还分析了土壤有机质(O.M.)、土壤 pH 值和粒度(粒径大于 0.01mm 的以 P1 表示,小于 0.01mm 而大于 0.001mm 的以 P2 表示,小于 0.001mm 以 P3 表示)等理化参数。

(二) 空间自相关研究方法

本研究采用 Moran's I 为指标,并以近似正态为前提对其作标准化,得到指标 Z。标准化时,标准差的期望值采用随机假设条件下的计算式^[3,5]。对研究区内所有点对 i、j,权重值 W_{ij} 取点对 i 与 j 间距离 D_{ij} 的倒数。

除 Moran's I 值外,还研究了空间自相关的方向性、空间自相关与距离的关系以及不同方向的自相关与距离的关系。

方向性研究考虑东西、北东—南西、南北和西北—东南四个方向,其计算方法为:对研究区内所有点对 i、j,如果第 i 点落在第 j 点的计算方向范围内,则权重值 $W_{ij} = 1/D_{ij}$, 否则 $W_{ij} = 0$ 。

空间自相关与距离的关系以空间相关图表示,空间相关图的计算方法为:对研究区内所有点对 i、j,如果第 j 点与第 i 点间的距离大于选定的尺度值,则取权重值 $W_{ij} = 1/D_{ij}$, 否则 $W_{ij} = 0$ 。所计算的尺度间隔取为 5 公里,计算尺度依次为:5、10、15……120 公里。随着距离尺度的加大,权重值取为非零的样点将会减少。最远距离取为 120 公里是因为此时权重值为非零的样点对已减至 13 对,若再远,则权重值为非零的样点对会更少。本研究采用的距离范围为放射状,这是考虑到样点在空间上呈离散分布且密度不高,若采用带状距离范围,在某些范围内可能无样点或样点对过少。由于权重值与距离有关,放射状的距离范围不会失去空间相关图的意义。

表征方向性自相关与距离关系的方向性—空间相关图的计算方法为:对研究区内所有点对 i、j,如果第 j 点落在第 i 点的计算方向范围内且第 j 点与第 i 点间的距离大于选定的尺度值,则取权重值 $W_{ij} = 1/D_{ij}$, 否则 $W_{ij} = 0$ 。计算的尺度值同前。

二、结果与讨论

(一) 土壤微量元素含量的空间自相关关系

如图 1 所示,在本研究采样密度下,天津市平原区土壤中,尤其是在 A 层,许多微量元素含量表现出显著的正空间自相关(在 $\alpha = 0.10$ 显著性水平下,双侧检验的临界值为: $z > 1.65$ 为正自相关, $z < -1.65$ 为负自相关)。这表明土壤微量元素在该市平原区有较好的空间结构性,且采样密度基本达到了反映空间自相关关系的要求。

不同元素在三个发生层表现出不同的特征。其中铬和锰在三层均显著,而镉和汞在三层均不显著,这表明它们在空间分布上截然不同的特点。有关研究认为,在天津地区土壤中,铬和锰与土壤质地具有显著的相关性,而镉和汞与土壤质地无关,且土壤质地天津市平原区的空间分布具有从西偏北到东偏南由粗变细的结构特点^[11,12]。研究结果证实,土壤粒度多呈现明显的空间自相关,表明在本研究采样密度下,土壤质地的空间结构性得到反映(图 1)。与土壤质地显著相关的元素(如铬和锰)也表现出显著的空间自相关。相比之下,与土壤质地显著相关的元素(如镉和汞)在本研究采样密度下,未发现显著的空间自相关,表明它们不具有与土壤质地相似的空间结构。应指出的是,本研究中未发

1) 天津市环境监测中心,1990:天津市土壤背景值研究(总报告)。七·五国家科技攻关项目:75-60-01-01-28。

现具有空间自相关关系的元素可能与采样密度有关,增加采样密度后有可能揭示出较小尺度的空间结构。由于生物气候条件等表生作用较为一致,有机质在天津市平原区这样一个不大的研究范围内没有较大的区域性差别,故其空间结构较差,不能表现出显著的空间自相关性。

对三个土层中元素的空间自相关指标进行成对数据 Wilcoxon 检验,发现 A 层元素空间自相关指标显著大于 B 层和 C 层,而 B 层和 C 层间无显著差别。C 层的空间自相关性反映了微量元素含量和理化参数在母质中的空间结构特点, A 层则反映在母质的基础上元素和理化参数经过生物气候作用以及人为活动影响而产生的新的空间结构特点。由于研究地区具有基本相似的表生作用条件,表生作用能对土壤微量元素含量的空间分布起均化作用,导致斑块边界处的过渡变得相对平缓,相邻位置间变量的自相关性加强。由于表层土壤受到的表生作用最为强烈, A 层空间自相关指标最大便理所当然。

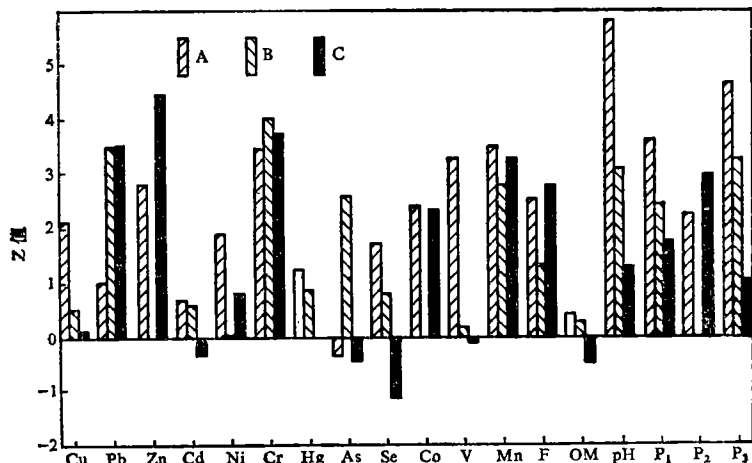


图 1 天津市平原区土壤微量元素含量与理化参数值空间自相关统计量 Z 值(Moran's I 经标准化)

Fig. 1 The Z values of trace element contents and physicochemical properties of the soil in Tianjin plain area (based on Moran's I)

(二) 土壤微量元素含量空间自相关的方向性

从表 1 可见,在天津平原区,除铅、锌、镉、汞和砷以外,其他元素多在南北向呈显著正自相关,而在别的方向上则表现出更多的随机性特点, A、B、C 三层均如此,尤其以 A 层突出。土壤理化参数中,有机质在三层中各方向均无显著自相关, pH 值在 A、B 两层表现为东西向显著正自相关,在 C 层无显著自相关的方向;土壤三级粒度几乎均表现为南北向显著正自相关。

土壤微量元素含量的分布主要决定于母质。在天津市平原区,母质的差异主要表现在土壤质地上。微量元素含量与土壤粒度空间自相关的方向性在天津市平原区表现出的一致性也证明了这一点。土壤粒度在天津市平原区的分布自西偏北向东偏南,由粗到细,大多数土壤微量元素的含量在西部洪积、冲积平原区含量较低,而在东部冲积、海积平原

表 1 天津市平原区土壤微量元素含量与理化参数值空间自相关方向性
统计量 Z 值 (Moran's I 经标准化)

Table 1 The directional Z values of trace element contents and physicochemical properties of the soil in Tianjin plain area (based on Moran's I)

土层 Horizon	方向 Direction	Cu	Pb	Zn	Cd	Ni	Cr	Hg	As	Se
A	东西	1.6	1.1	2.0	0.2	0.0	0.2	2.0	-2.5	1.1
	北东—南西	-0.7	0.7	1.2	2.6	-0.1	-0.5	-1.2	2.1	-0.8
	南北	1.8	0.3	0.9	-0.9	2.7	4.6	0.1	-0.3	1.3
	北西—南东	-0.2	-1.0	-0.8	-1.1	-0.1	0.2	0.4	0.9	0.4
B	东西	1.1	0.2	1.3	0.2	0.3	1.4	0.6	2.2	1.7
	北东—南西	-1.3	1.8	-0.2	-1.7	-1.3	-0.9	0.4	0.2	-1.3
	南北	0.9	2.9	1.4	1.8	1.6	4.1	-0.8	-0.2	0.3
	北西—南东	-0.3	-0.3	-0.7	0.5	-0.6	0.5	0.9	0.8	0.0
C	东西	0.2	1.1	1.4	-0.9	0.5	-1.0	0.0	-0.9	-1.2
	北东—南西	-0.3	2.5	1.0	-0.1	0.2	0.4	0.6	0.1	-0.1
	南北	0.4	0.5	2.9	0.8	0.9	4.3	1.3	-0.2	-0.1
	北西—南东	-0.2	0.2	0.2	0.0	-0.7	0.9	-2.2	0.5	0.1
土层 Horizon	方向 Direction	Co	V	Mn	F	OM	pH	P ₁	P ₂	P ₃
A	东西	0.7	-0.2	-0.7	-0.9	0.3	3.5	-0.9	-0.8	-0.6
	北东—南西	0.9	0.1	-0.1	1.9	-1.0	0.8	-1.3	1.4	0.8
	南北	1.9	3.6	5.5	3.1	0.5	0.8	4.0	1.9	5.2
	北西—南东	-0.4	0.9	0.4	-0.5	0.7	1.9	0.9	1.1	1.0
B	东西	1.0	0.8	0.7	-1.4	1.0	1.8	1.5	-0.6	-0.4
	北东—南西	0.4	-0.8	1.6	1.6	-0.9	0.3	1.5	-0.0	1.5
	南北	0.9	0.2	1.9	2.8	0.8	0.1	0.5	2.2	3.6
	北西—南东	1.2	-0.1	-0.6	-0.9	-1.1	1.6	0.4	0.9	-0.3
C	东西	0.8	-1.1	-0.5	-0.9	-0.4	0.1	0.5	0.2	-0.4
	北东—南西	1.9	-0.7	2.0	3.1	0.3	1.0	-0.1	1.3	0.2
	南北	0.8	1.8	3.2	1.7	0.1	-0.3	0.9	2.3	1.7
	北西—南东	-0.6	0.1	-0.5	-0.2	-0.4	0.9	0.8	0.0	-0.2

区含量较高,表现出西高东低的特点¹⁾。本研究各方向采样密度比较均匀,而南北向为大多数土壤微量元素含量变化较缓慢的方向,相邻样点间相关较强,故其空间自相关指标较大,表现为显著的空间自相关。

并不是所有微量元素含量均具有与粒度相同的空间自相关方向特点。在 A 层中,铅、锌、镉、汞、砷等元素便表现出与粒度不相同的方向性特点。铅、锌、汞在东西向正空间自相关最强,砷、镉则在北东—南西向最强,砷甚至在东西向表现出显著的负空间自相关。少数元素表现出的与粒度不一致的方向性并非偶然。比如,在天津市农村曾施用的赛力散和西力生,为天津市土壤提供了范围广、数量多的汞;曾施用过的信石,又提供了锌的来源。

1) 同前 1)。

除农药之外,天津农业的传统习惯——施用污泥又为天津市土壤提供了大量汞、镉、铅、锌、砷¹⁾。这些人为增加的元素在土壤中残留下来,由于其施用量较大,足以改变这些元素的空间分布结构特点,从而在空间自相关的方向性上表现出与背景条件下不同的特点来。

在不同层次中,土壤受人为影响的程度不同: A层受到人为影响的程度最深, C层则最小。铅含量的空间自相关方向性统计量在 A层以东西向为最大,而在 B层和 C层向南北向靠近,为北东—南西向;锌和镉在 A层为东西向,而在 B、C 两层中均以南北向为最大;汞在 A层为东西向,在 C层则以南北向为最大。

(三) 土壤微量元素含量空间自相关与距离的关系

天津市平原区土壤微量元素含量的空间相关图表现简单,趋势明显,图 2 为具有代表性的锰的空间相关图。研究区内土壤微量元素含量空间相关图的一般趋势为: 距离较近的点间呈显著的空间自相关。随距离增大,自相关指标逐渐向负方向增长,达到显著的负空间自相关。最后,自相关指标再次增至正值。近距离的正空间自相关大致反映了斑块的平均半径,负空间自相关则反映了性质相反(如高与低)的斑块间的平均距离,而远距离的正空间自相关反映了相同性质斑块间的平均距离。本研究空间相关图的这种变化趋势说明天津市平原区土壤微量元素含量空间分布的结构较简单,块状结构的数量少,半径大。大多数元素与锰相似,近距离显著正相关的尺度为 15 公里左右(图 2)。参加前四个距离段计算的点对数分别为 630(所有 36 个样点的组合数)、625、596、568,即样点对间距离小于 15 公里的点对数共有 34 对,近距离的空间自相关主要由这些对决定。

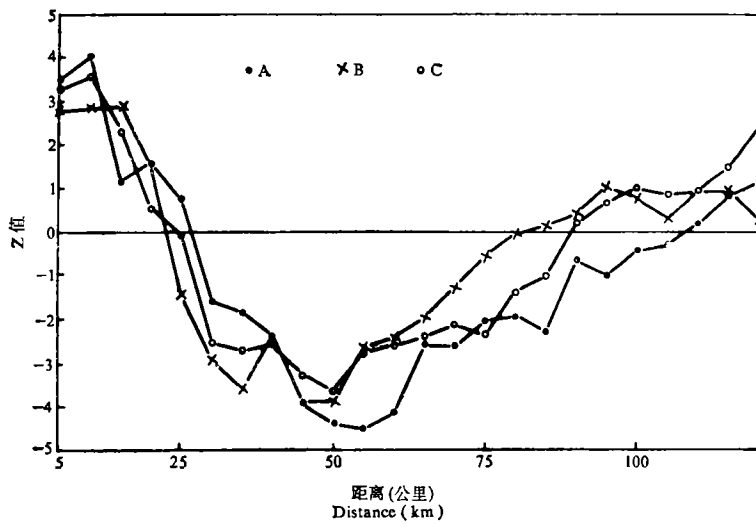


图 2 天津市平原区土壤锰含量空间相关图 (Moran's I 经标准化)

Fig. 2 The spatial correlogram of Mn content of the soil in Tianjin plain area (Z based on Moran's I)

在本研究中,近距离尺度具有显著正空间自相关的元素和理化参数,在 A层有 15 个, B层 10 个, C层 8 个。这一现象与前述全方位的自相关关系相似。

1) 同前 1)。

(四) 土壤微量元素含量空间自相关方向性与距离的关系

空间相关图是从全方位考虑自相关，由于存在着空间自相关统计量在各方向上的互相抵消，从而掩盖了某些重要信息。因此，有必要将方向性与空间相关图结合起来研究。

图 3 为具有代表性的 A 层 Mn 的方向性-空间相关图。从图 3 可见，大部分土壤微量元素南北向的显著正自相关延伸尺度最长，而其它方向甚至无显著正自相关。这显然是由于在天津市平原区土壤微量元素含量的分布决定于土壤粒度，而粒度在南北方向变化缓慢，在其他方向上变化剧烈。

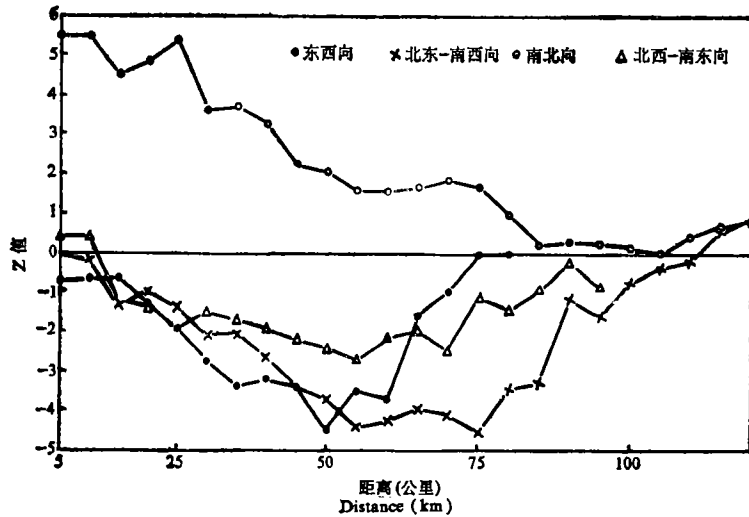


图 3 天津市平原区 A 层土壤锰的方向性-空间相关图 (Moran's I 经标准化)
Fig. 3 The directional spatial correlogram of Mn in surface soil of Tianjin plain area (Z based on Moran's I)

由于排除了其他方向的影响，天津市平原区土壤微量元素含量南北向空间自相关近距离范围明显比全方位长。与锰相似，非污染元素和土壤粒度含量南北向空间自相关显著的近距离范围大约达 70—80 公里 (图 3)。污染元素在南北向基本无近距离正空间自相关，表明它们具有与大多数土壤微量元素不同的空间分布特点。

由于相邻空间尺度的空间自相关性之间必然存在着某种相似性，即这些尺度的空间自相关统计量之间必然存在着重叠信息。对三个土层中的南北向空间相关图进行主成分分析。A 层结果表明：第一主成分代表 35—100 公里距离段的信息，为空间自相关正负交错区段。第二主成分代表 5—60 公里距离段的信息，为显著正空间自相关区段。第三主成分代表 105—120 公里距离段的信息，为不显著正空间自相关区段。可见，前三个主成分已包含了所有距离段的空间自相关信息。A、B、C 三个土层结果相似，前三个主成分累积方差贡献分别为 93.7%、88.4%、92.6%。

在主成分分析的基础上，取出能反映空间相关图主要信息的前三个主成分，再分别对三个土层南北向空间相关图以夹角余弦为相似性度量进行聚类分析。仅以 A 层结果为例 (图 4)，不难看出，土壤微量元素与理化参数可明显地分为两大类：非污染元素的空间特

征与土壤粒度相似,污染元素与 pH 值组成另一类。在 A 层,镉、汞、砷、铅、锌和 pH 为一类,这包括本研究涉及的主要污染元素。在 B 层,汞、硒、砷、pH 值和大于 0.01mm 粒度为一类。在 C 层,仅铅、汞和 pH 值为一类。由此可见,人为活动的强度随土层的加深而减弱。

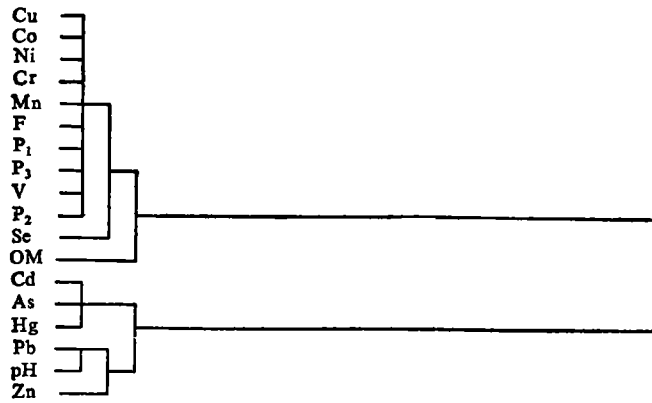


图 4 天津市平原区 A 层土壤微量元素含量与参数值聚类图
(以南北向空间相关图前四个主成分为变量)

Fig. 4 The cluster tree of trace element contents and physicochemical properties of the soil in Tianjin plain area (based on the first four principal components of north-south spacial correlograms)

三、结 论

1. 在本研究特定的采样密度条件下(平均约 300 平方公里一点),天津市平原区大多数土壤微量元素含量表现出显著的正空间自相关。这一采样密度基本能反映该地区土壤微量元素含量的空间结构性。

2. 天津市平原区土壤微量元素含量的空间自相关关系在受表生与人为作用影响较大的 A 层为最明显。

3. 人为活动改变了部分微量元素含量(汞、镉、铅、锌、砷)在天津市平原区土壤中,尤其是表土中原有的空间分布结构特点。

4. 在本研究采样密度下,天津市平原区土壤中大多数微量元素含量近距离正空间自相关显著的尺度达 15 公里左右。未污染的土壤微量元素含量在南北向表现出显著的正空间自相关,且其尺度达 70—80 公里,在其他方向基本无显著的正空间自相关。

参 考 文 献

1. 蒋德勤,1990: 天津土种志. 天津科学技术出版社.
2. 王心枢,李廷芳,1985: 北京市平原地区土壤铜背景图的计算机绘制. 环境科学学报,第 5 卷 4 期,439—447 页.
3. Cliff, A. D. and J. K. Ord, 1981: *Spatial Processes: Models and Applications*. Pion, London.
4. Davies, B. E. 1980: *Applied Soil Trace Elements*. John Wiley, Chichester.
5. Upton, G. J. G. and Fingleton, B., 1985: *Spatial Data Analysis by Example*. John Wiley, New York.

SPATIAL AUTOCORRELATION ANALYSIS OF TRACE ELEMENT CONTENTS OF SOIL IN TIANJIN PLAIN AREA

Zhang Chaosheng, Tao Shu, Yuan Guiping and Liu Shui

(*Department of Urban and Environment Science, Peking University, Beijing, 100871*)

Summary

Spatial autocorrelation is one of the basic characteristics of regionalized variable, and statistics based on spatial autocorrelation can be used to test if the distribution of a variable in a two-dimensional space follows a certain pattern or at random. Values of Moran's I of trace element contents in soil of Tianjin plain area were calculated. The spatial autocorrelation characteristics, the directional characteristics of spatial autocorrelation, the relationship between spatial autocorrelation and lag of sampling and the relationship between spatial autocorrelation in different directions and lag of sampling were investigated.

Under the sampling density of 300 km² per sample, significant by positive spatial autocorrelations were detected for most trace elements studied. The most significant spatial autocorrelation was found in horizon A where the original distribution of the elements had been modified remarkably by natural forces and human activities. The spatial structure characteristics of Hg, Cd, Pb, Zn, and As contents in surface soil were further altered by pollution and agricultural practice.

Key words Trace element, Spatial autocorrelation, Directional characteristics, Spatial correlogram, Spatial distribution