doi: 10.11720/wtyht.2022.1404

王鹏,赵君,刘拓,等.半干旱区有机质与全氮空间变异的尺度效应特征——以延安市为例[J].物探与化探,2022,46(4):1011-1020.http://doi. org/10.11720/wtyht.2022.1404

Wang P,Zhao J,Liu T, et al.Scale effects of spatial variations in SOM and STN in semi-arid regions: A case study of Yan'an [J].Geophysical and Geochemical Exploration, 2022, 46(4):1011-1020.http://doi.org/10.11720/wtyht.2022.1404

半干旱区有机质与全氮空间变异的尺度效应特征 ——以延安市为例

王鹏1,赵君1,刘拓1,周一凡2,魏锦萍1,王磊1

(1.中国地质调查局 西安地质调查中心西北地质科技创新中心,陕西 西安 710054;2.西安市勘察 测绘院,陕西 西安 710059)

摘要:以高密度采样数据为数据集,经重采样分析,模拟不同尺度的采样空间分布场景,采用莫兰指数、半方差函数值和分形维数 F_D等空间分析方法,探讨土壤有机质和全氮空间变异的尺度效应特征,并分析其影响因素的尺度间转换关系。结果表明:随着尺度增大,空间集聚性降低,有机质和全氮含量空间总变异先增大后趋于稳定,但随机性变异逐渐减少,结构性变异先增大后减少。小尺度产生的空间变异中的随机变异占比较多,结构变异占比较少,而大尺度则相反。不同的影响因素对有机质和全氮空间变异具有不同的区分度,高程的区分度最小;土壤类型、植被指数、年均气温、湿度等影响因素的区分度次之;降水量的区分度最大。有机质和全氮空间变异影响因素 具有尺度特征,随着尺度增大,小尺度因素引起的随机变异逐渐减少,而大尺度因素引起的结构性变异先增大后减弱,直至转换为相对的小尺度因素;各影响因素对土壤有机质和全氮含量的影响协同机制在尺度间差异较大,引起随机变异和结构变异出现尺度间消长,导致空间变异呈现出先减少后趋于平稳的变化规律。

关键词:采样尺度;空间变异;分形维数;半方差函数;有机质;全氮;半干旱区

中图分类号: P632 文献标识码: A 文章编号: 1000-8918(2022)04-1011-10

0 引言

土壤是具有地理空间和属性空间连续性^[1]的 不均匀自然体。土壤形成、发育与演化过程中各成 土因素在不同尺度上的交互作用,以及受到的各种 随机因素(耕作、灌溉、施肥)的影响,使土壤特性空 间分布呈现出不同程度的异质性^[2-4]和相关性^[5], 具有一定的渐变性和模糊性,蕴含着多层次的变 化^[6]。国内外多位学者已针对土壤特性的空间变 异开展了相关研究,研究内容多为土壤养分^[1,7-8]、 重金属污染^[6,9-10]、有机质^[11-12]等特性的空间变异 影响因素分析,研究尺度涉及田块、乡镇、县域等中、 小尺度^[9,13-14],研究方法主要有空间变异理论^[5]、分 形维数^[2,15]、地统计学^[16]等,剖析了土壤特性的空间变异结构组成,定量化表示了结构变异和随机变异占比。总之,土壤特性空间变异(随机变异和结构变异)具有多尺度变异特征^[7-8],尤其是成窄斜带状分布于内蒙古、陕西、甘肃一带的我国半干旱气候区,其气候、植被等成土影响因素在纬向、经向的梯度差异明显,土壤特性具有明显的地带性^[17],但针对该区域土壤特性空间变异的研究较为缺乏,结构性和随机性变异多为单尺度的描述或为少数尺度的对比研究,其在尺度间的变化规律以及主导影响因素转换关系尚不清楚。

由于半干旱气候区土壤中的 K、P 含量处于中 等、较丰富等级,而有机质(SOM)和全氮(STN)的含 量处于缺乏和较缺乏等级^[18],是制约土壤质量提高

通讯作者:赵君(1981-),男,高级工程师,主要从事地球化学调查研究工作。Email:28611635@qq.com

收稿日期: 2021-07-20; 修回日期: 2021-09-29

基金项目:中国地质调查局基础地质调查项目"西北地区自然资源动态监测与风险评估"(DD20211393)和"新疆耕地区土地质量地球化学调查"(DD20190521)

第一作者: 王鹏(1986-),男,河南杞县人,高级工程师,主要从事土地质量地球化学调查方面的研究工作。Email:331559202@qq.com

的限制性因素^[19]。因此,笔者选取土壤有机质和全 氮为指标,以处于半干旱区典型地区的延安市为例, 利用高密度土地质量地球化学调查数据,抽取不同 尺度数据集,模拟不同尺度采样分布场景,采用空间 变异分析的理论与方法来探讨半干旱区的土壤有机 质和全氮空间变异的尺度效应特征,并分析主导影 响因素在尺度间的转换关系,旨在为该区土壤采样 设计,碳、氮储量估算以及尺度转换提供理论依据。

1 研究方法

有机质和全氮的空间结构具有多尺度特征,为 揭示其空间尺度结构性、随机性、不规则性、独立性 和相关性的变化规律^[15],采用莫兰指数进行土壤中 有机质和全氮的空间自相关及变异结构分析^[11],显 现研究变量空间集聚性随尺度的变化概况;利用半 方差函数及分形维数来模拟其空间结构随尺度的变 化趋势,以揭示空间随机变异与结构变异的消长规 律。

1.1 空间自相关

莫兰指数是检验某一要素属性值在空间上是否 相关联的最常用统计量,主要用于描述区域性变量 的整体分布状况,以揭示空间区域性变量的结构形 态,其计算公式为^[20]:

$$I = \frac{\sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{n} w_{ij}(x_{i} - \bar{x})(x_{j} - \bar{x})}{S^{2} \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{n} w_{ij}} , \quad (1)$$

$$S^{2} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} (x_{i} - \bar{x})^{2} \quad (2)$$

式中: I 为莫兰指数值; n 为区域空间单元总数; x_i 、 x_j 为在地理单元 i 和 j 上的观察值; \bar{x} 为平均值; S^2 为方差; w_{ij} 为权重矩阵,即相邻之间的权重为 1,不 相邻的权重为 0。

莫兰指数的值域为[-1,1],莫兰指数值大于0, 表明空间正相关,其值越大,空间相关性越明显;莫 兰指数值小于0,表明空间负相关,其值越小,空间 差异性越大;莫兰指数值为0,表明空间随机性。

1.2 空间变异

1.2.1 半方差函数

半方差函数也称空间变异函数,定义为取样间 隔为 h 时的样本值方差数学期望的一半,其计算公

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} \left[Z(x_i) - Z(x_{i+h}) \right]^2 \,_{\circ} \, (3)$$

式中: $\gamma(h)$ 为取样间隔为 h 时的半方差函数值; h 为取样间隔距离; N(h) 为以取样间隔为 h 的所有 观测点成对数目; $Z(x_i)$ 、 $Z(x_{i+h})$ 为取样间隔为 h 的两组实测值。

半方差函数值随取样间隔 h 的增大而增加,当 达到一定距离后,稳定在某极限值附近,可以获得块 金值 C_0 、基台值 C_0 +C、偏基台值 C 和变程 A_0 参数, 以用于衡量变量的空间结构。其中, C_0 为随机变异; C 为结构变异; C_0 +C 为总变异; A_0 表示半方差函数 值达到基台值时的取样间隔距离。块基比 $C_0/(C_0+C)$ 小于 25%,说明变量间为强空间相关;在 25%~ 75%之间,为中等空间相关;大于 75%,弱空间相关。 1.2.2 分形维数

分形维数 F_p 是对事物复杂程度的一种量度^[15],可利用变异函数的双对数关系 $lg\gamma(h) \propto lgh$ 的斜率对其进行定义,以度量土壤变量空间异质性特征,其计算公式为^[2,16,21]:

$$F_D = 2 - H \quad , \tag{4}$$

$$H = \frac{1}{2} \lg \gamma(h) \propto \lg h_{\circ} \tag{5}$$

式中: F_D 为分形维数; H 为斜率; $\gamma(h)$ 为取样间隔 为 h 的半方差函数值; h 为取样间隔距离。

由式(4)、(5)可知, H的值域为[0,1),则 F_D 的值域为(1,2]。 F_D 越小,随机变异占比小,结构变异占比大; F_D 越大,随机变异占比大,结构变异占比小。

2 实例研究

2.1 研究区域

研究区域位于陕西省延安市宝塔区、延川县、延 长县及周边区域(图1),处于东经109°15′21.60"~ 110°30′25.20",北纬36°11′49.20"~37°05′52.80"之 间,属半湿润半干旱大陆性季风气候,年均降水量为 469.58~531.83 mm,年均湿度为58.74%~64.29%,年 均日照时间为2300~2700 h,年均气温为9.23~10. 80 ℃。该区为黄土高原丘陵沟壑区,地势西北高, 东南低,海拔499~2000 m。土壤类型主要为黄绵 土、新积土、红黏土、粗骨土等,土壤质地以轻壤土和 砂壤土为主。



图 1 研究区域位置 Fig.1 Location of the study area

2.2 数据来源与处理

2.2.1 数据来源

利用延安市宝塔区、延川县、延长县等地 2018 年土地质量地球化学调查成果,获得了 8 462 个采 样点的有机质和全氮分析数据、GPS 横纵坐标和海 拔数据。采样密度为 1 个点/km²,单样按梅花法取 3~5 个点,并遵从代表性、均匀性、合理性和多点混 合的原则,取 0~20 cm 土层的土样,每个样品质量 1 000 g 左右。同时,采样时注重避开粪堆、新近堆 积土等点状污染物,并去掉植物根系和岩石碎块,自 然风干后,过 20 目尼龙筛,由自然资源部安徽地质 测试实验室进行测试,其中,有机质采用硫酸亚铁铵 容量法(VOL)分析,全氮采用凯氏丹蒸馏酸碱滴定 (VOL)分析,分析质量均符合《地质矿产实验室测 试质量管理规范》(DZ0130.1~130.13-94)要求。

降雨量、气温、湿度等气象数据来源于中国气象数据服务中心 2018 年连续数年和连续数天的数据 集,插值得到研究区分辨率为 30 m×30 m 的气象要 素网格数据层。植被指数数据来源于 lpdaac(land process distributed active archive center)提供的 16 天 mod13q1 数据产品,分辨率为 250 m×250 m。土壤 类型数据来源于《1:100万中国土壤数据库》。

2.2.2 重抽样及数据处理

采样点数量对揭示有机质和全氮含量的空间分 布特征存在较大影响^[22],采样尺度可通过影响采样 点的数量及其空间布局改变空间变异分析的结 果^[7]。土地质量地球化学调查为网格采样,其原始 数据为高密度数据集,可以依据不同采样距离对其 进行重抽样分析,提取 10 个子数据集(表 1),来模 拟不同采样尺度的采样点位空间分布(图 2)场 景^[23],以反映空间尺度的变化^[6]。

为避免半方差函数产生畸变,出现比例效 应^[6,11,19],降低拟合精度,需要针对各采样尺度数据 集采用 x ±3δ法剔除特异值(x 为数据平均值,δ为 标准差),并经非参数检验法(D 检验或 W 检验)检 验。检验后发现本次数据均不符合正态分布(P< 0.05),但经对数转换后,各尺度有机质、全氮的数据 集符合或近似正态分布(P>0.05),可进行空间结构 分析。

同时,依据采样点的重采样距离,分别对降雨 量、气温、湿度以及植被指数等栅格数据进行重采 样,以确保数据尺度统一。

表1 重采样后不同间距尺度对应关系

Table 1 Relationship of different spacing after resampling analysis

尺度	S-0	S-1	S-2	S-3	S-4	S-5	S-6	S-7	S-8	S-9	S-10
指定距离/m		500	1000	1500	2000	2500	3000	3500	4000	4500	5000
样点数	8462	8037	4062	2301	1463	936	666	486	380	302	249



图 2 不同尺度采样分布 Fig.2 Sampling distribution at different scales

3 结果与讨论

3.1 空间分析结果

3.1.1 统计分析结果

变异系数和均值均可反映变量数据的总体变异 程度^[11]。各尺度有机质、全氮含量的均值分别处于 (0.455 3~0.490 3)×10⁻³、(0.4869~0.5127)×10⁻³ (图 3a),依据《土地质量地球化学评价规范》(DZ/T 0295—2016),均为五等,属于缺乏水平。各尺度有机 质、全氮的含量变异系数较为集中,分别处于 39.36%~ 51.24%、28.93%~35.99%,属于中等变异^[20-21](图 3b), 但是有机质的变异系数高于全氮。随着尺度增大, 有机质和全氮含量的均值和变异系数具有相似的变 化趋势,呈现出先增大后趋于稳定的变化规律。

无论均值还是变异系数,尺度 S-0、S-1 处为低值,尺度 S-6、S-7、S-8 处为高值,经独立样本 Kruskal-Wallis 非参数检验(所有成对比较)发现, 两项参数均具有显著差异(P<0.05),但其他尺度间 差异不显著。





3.1.2 空间自相关结果

将各尺度有机质、全氮的含量进行全局莫兰指数计算,经标准化,Z值得分均超过临界值1.65,显著性强(P<0.01),且有机质和全氮的莫兰指数处于0.68~0.87(图4),为强空间相关。但随采样尺度增大,有机质和全氮的空间聚集性先变弱后趋于稳定。同时,在尺度S-0~S-7下,全氮具有更强的空间相关性;而在尺度S-8~S-10下,有机质的空间相关性较强。

3.1.3 空间变异结果

各尺度的有机质和全氮含量半方差函数在各方向上均具有内蕴平稳性,如:以采样距离为0和5000m为例,计算有机质和全氮的含量在0°、45°、90°和135°四个方向上的半方差函数值(表2), C_0 、 C_0+C 和 $C_0/(C_0+C)$ 在各方向上的差距均较小,半方差结构在各方向上基本相同,各向同性,并类推至

其他尺度,得出相同结果。

各尺度的最佳理论模型均为高斯模型,决定系数最大,残差最小(表3),拟合精度高(P<0.05),有确定的块金值、基台值和变程,客观地反映了有机质和全氮的空间变异结构特征。



图 4 不同采样尺度 Moran's *I* 指数与尺度的散点分布 Fig.4 Scatter diagramof Moran's *I* at different scales

	采样距离/m	方向/(°)	拟合模型	C_0	$C_0 + C$	$\left[C_0/(C_0+C) \right] / \%$
		0	G	0.0368	0.1286	0.2862
	0	45	G	0.0366	0.1287	0.2845
	0	90	G	0.0368	0.1287	0.2859
古坦氏		135	G	0.0365	0.1286	0.2839
有机应		0	G	0.0254	0.1178	0.2156
	5000	45	G	0.0253	0.1177	0.2149
	5000	90	G	0.0255	0.1178	0.2164
		135	G	0.0256	0.1183	0.2164
		0	G	0.0197	0.0698	0.2822
	0	45	G	0.0196	0.0696	0.2816
	0	90	G	0.0198	0.0698	0.2837
公司		135	G	0.0199	0.0699	0.2847
主须		0	G	0.0125	0.0768	0.1628
	5000	45	G	0.0126	0.0769	0.1640
	5000	90	G	0.0126	0.0769	0.1642
		135	G	0.0126	0.0769	0.1633

Table 2	Somivariogram	hotorogonaity	analycic	of SOM	and	STN
	Schuvariogram		anaiysis	U DOM	anu	DIT

		Table 5	Senn-variogi			Ji bom anu	Silv at uniti	cht scales	
项目	采样 距离/m	拟合 模型	C ₀	C_0 + C	$[C_0/(C_0+C)]/\%$	变程/m	决定 系数 R ²	残差 RSS	分形 维数 F _D
	0	G	0.0337	0.1114	30.25	45400	0.975	1.52×10^{-4}	1.759
	500	G	0.0338	0.1116	30.29	45000	0.977	1.18×10^{-3}	1.758
	1000	G	0.0321	0.1242	25.85	46900	0.981	1.49×10^{-4}	1.730
	1500	G	0.0301	0.1362	22.10	49400	0.985	1.49×10^{-4}	1.705
	2000	G	0.0277	0.1314	21.08	47500	0.986	1.42×10^{-4}	1.690
有机质	2500	G	0.0271	0.1342	20.19	47700	0.987	1.32×10^{-4}	1.676
	3000	G	0.025	0.1250	20.00	47200	0.985	1.38×10^{-4}	1.673
	3500	G	0.026	0.1410	18.44	50300	0.991	9.64×10 ⁻⁵	1.669
	4000	G	0.0218	0.1106	19.71	44400	0.988	9.80×10^{-5}	1.649
	4500	G	0.0236	0.1112	21.22	46000	0.992	6.39×10^{-5}	1.677
	5000	G	0.0254	0.1178	21.56	49900	0.989	8.25×10^{-5}	1.660
	0	G	0.0197	0.0698	28.22	46100	0.98	4.64×10 ⁻⁵	1.747
	500	G	0.0196	0.0701	27.96	45800	0.982	4.44×10^{-5}	1.744
	1000	G	0.019	0.0767	24.77	46200	0.985	4.66×10^{-5}	1.721
	1500	G	0.0175	0.0825	21.21	48400	0.994	9.30×10 ⁻⁵	1.694
	2000	G	0.0164	0.0800	20.50	45900	0.986	8.36×10^{-5}	1.683
全氮	2500	G	0.0157	0.0832	18.87	47000	0.990	4.34×10^{-5}	1.660
	3000	G	0.0141	0.0775	18.19	47100	0.989	4.10×10^{-5}	1.653
	3500	G	0.0146	0.0877	16.65	48900	0.991	1.46×10^{-5}	1.637
	4000	G	0.0121	0.0726	16.67	44700	0.992	2.79×10^{-5}	1.620
	4500	G	0.0137	0.0738	18.56	47100	0.992	2.56×10^{-5}	1.650
	5000	G	0.0125	0.0768	16.28	50900	0.990	3.38×10^{-5}	1.623

表 3 不同尺度有机质和全氮的半方差函数及分形维数

Table 3 Semi-variogram and fractal dimension of SOM and STN at different scales

注:在进行半方差函数拟合及分形维数计算时,不同尺度有机质最大步长距离 50 300 m,间隔距离 6 000 m;不同尺度全氮的最大步长距离 50 900 m,间隔距离 6 000 m;拟合模型 G 为高斯模型。

随着尺度变大,变程始终处于 45 000~50 000 m 区间范围,表明采样点位具有空间相关性的距离是 恒定的,不随尺度而变化。但采样尺度的变化对其 空间结构的表征存在很大影响^[9],各尺度的有机质 和全氮含量均具有中、强度空间相关性,空间结构差 异较大。随着采样尺度增大,随机变异先减少后趋 于稳定,结构变异先增加后降低,块基比 C₀/(C₀+ C)呈现出先减小后趋于稳定的变化规律(图 5a)。 但在各尺度下,有机质的块基比值均较全氮大,表明



有机质的随机变异占比较多,结构变异占比较少。

各尺度有机质和全氮含量的 *F*_D值有微小变化, 表明采样尺度对其空间变异性具有一定的影响^[15]。 随着采样尺度增大,有机质、全氮的 *F*_D值均出现先 减小后趋于稳定的变化规律(图 5b),小尺度的变异 特征(人为因子引起的随机变异)^[3]比例逐渐减少, 大尺度的变异特征(结构因子引起的结构变异)比 例先增大后趋于稳定。但在各采样尺度下,有机质 的 *F*_D值均高于全氮,全氮的结构变异占比较高。





Fig.5 Scatter diagram of Nugget-Sill ratio(a) and fractal dimension(b) of SOM and STN at different scales

3.2 讨论

3.2.1 有机质和全氮含量的空间分布规律

土壤属性的空间变异是尺度的函数^[6]。不同 采样尺度得到的有机质和全氮含量空间分布格局基 本一致(图6),但由于其采样尺度不同,采样点的空 间布局不同^[7],有机质和全氮含量变化细部特征的 表征也会出现尺度间差异。随着尺度增大,采样点 数量减少,采样点的间距增大,部分区域的有机质和 全氮信息丢失,细部特征的表征越来越粗略,而宏观 的纬向地域分异规律越加明显。



图 6 有机质和全氮的含量在 S-0、S-5、S-10 尺度的空间分布

Fig.6 Spatial distribution of SOM and STN contentsat S-0,S-5,S-10 scales

3.2.2 影响因素的区分度

气候、植被、高程、土壤类型是影响有机质和全 氮含量的因素^[24]。采用基于熵理论的区分度模 型^[25-26]来计算各影响因素对有机质和全氮含量的 区分度(图7),发现不同的影响因素具有不同的区 分度,其中高程的区分度最小,土壤类型、植被指数、 年均气温、湿度等影响因素次之,降水量的区分度最 大。在半干旱区,有机质和全氮含量的生长过程 (植物生长)和破坏过程(微生物分解)速率对降水 量的响应是积极的^[12],对其空间变异具有重要的作 用^[12],而其他因素的作用则与自身差异程度具有正相 关。经分析,研究区的温度(10℃)和湿度(60.91%)普



遍偏低,降水量空间分布(469.58~531.83 mm)不均 匀,在降水量充沛区域,植物生长高于分解,有机质 和全氮含量积累;反之,含量消耗。而其他因素,由 于其自身差异程度小(如采样点多分布于耕地较为 集中的坝地和塬面,高程差异较小;植被多为农作 物、经济作物,植被指数差异小;土壤类型多为黄土 或次生黄土,成土母质均为风成砂),对有机质和全 氮的尺度间分异贡献微乎其微。

3.2.3 有机质和全氮含量空间变异的尺度效应

各种影响因素引起有机质和全氮含量出现全部 显著差异的尺度不同,如降水量、湿度在尺度 S-4 能引起全部显著差异(表4),海拔则在尺度 S-2,而 土壤类型、植被指数、年均气温则需更小尺度才可以 引起差异。在同一尺度下,各影响因素引起的空间 变异也是不同的,如在尺度 S-7,降水量、湿度引起 的有机质和全氮含量差异显著比(差异显著对数/ 所有成对数)最大,年均气温、植被指数次之,海拔 最小,而土壤类型则差异不显著。且随着尺度增大, 有机质和全氮含量的差异显著比均由显著逐渐衰 减,但不同的影响因素衰减速率不同,如降水量因素 从尺度 S-0 到 S-10,有机质含量差异显著比逐渐降 低,由 6/6 降到 4/6,衰减速率较慢,而海拔的差异 显著比则由 6/6 降到 1/6,衰减速率较快。

表 4 不同尺度间的 SOM、STN 在不同影响因素下的显著性差异统计 Table 4 Statistical significance of SOM and STN at different scales and different levels of influencing factors

影响因素	指标	S-0	S-1	S-2	S-3	S-4	S-5	S-6	S-7	S-8	S-9	S-10
土壤类型	有机质	13/21	12/21	10/21	9/21	5/21	3/21	1/21	0/21	0/21	0/21	0/21
	全氮	8/21	8/21	7/21	6/21	5/21	2/21 *	2/21	0/21*	0/21	0/21	0/21
植被指数	有机质	6/6**	6/6**	6/6***	5/6***	5/6***	4/6***	4/6***	4/6***	3/6***	3/6***	3/6***
	全氮	5/6**	5/6**	5/6**	5/6**	5/6***	5/6***	5/6***	5/6***	3/6***	4/6***	3/6***
年均气温	有机质	5/6	5/6	5/6	4/6	4/6	3/6	2/6	3/6	1/6	1/6	1/6
	全氮	3/6	3/6	3/6	2/6	3/6	2/6	0/6	0/6	0/6	0/6	0/6
欧 水县	有机质	6/6**	6/6**	6/6**	6/6**	5/6**	5/6**	5/6***	5/6**	4/6***	4/6***	4/6***
阿小里	全氮	6/6**	6/6**	6/6**	6/6**	6/6**	5/6**	5/6**	4/6***	4/6**	4/6**	3/6***
泪中	有机质	6/6**	6/6**	6/6**	6/6**	6/6**	6/6**	5/6**	5/6**	5/6**	4/6**	4/6**
並度	全氮	6/6**	6/6**	6/6**	6/6**	6/6**	5/6**	5/6**	4/6**	5/6**	4/6**	4/6**
海北	有机质	6/6	6/6	6/6	4/6	4/6	3/6	3/6	2/6	2/6	2/6	1/6
酉 坂	全氮	5/6	5/6	3/6	3/6	2/6	2/6	1/6	1/6	0/6	1/6	0/6

注:用上四分位、中位、下四分位3个节点将影响因素划分为4个水平;用独立样本 Kruskal-Wallis 非参数检验对各因素、不同水平下 SOM、 STN 的数据集进行检验,其显著差异的对数为分子,所有成对数为分母;****"表示强相关性,***"表示中等相关性,其余表示无相关性。

综上所述,随着尺度增大,采样距离增大,数据 集空间自相关性降低,变异系数变大,空间变异先增 大后趋于平稳,但随机性变异逐渐减少,而结构性变 异则先增加后降低,这主要是由于在小尺度时,大尺 度的结构变异比较微弱又作为"随机变异"被忽视 或降维扣除^[8,27-28],在大尺度时,小尺度因素引起的 结构特征被掩盖^[2],所以随着尺度变大,随机变异 逐渐减少。而大尺度因素随着尺度增大影响作用逐 渐突显,结构变异逐渐增加,同时随着尺度的增大, 点位间的空间相关性逐渐减弱,达到一定尺度后,大 尺度的结构因素转换为相对的小尺度因素,其影响 作用逐渐减弱,所以随着尺度变大,结构性变异先增 大后减小。

另外,由于有机质和全氮固有性质和当地政策 的不同,间接影响了其空间变异,如延安地区退耕还 林还草空间分布不均,进入土壤各采样点位的有机 质差异较大^[12],而氮由于在土壤中转化、损失途径 多,残留少,与自然成土过程中氮的空间分布相 似^[8],引起有机质的含量差异显著比均高于全氮, 从而造成有机质具有较大的空间变异。

4 结论

变异系数、莫兰指数,半方差函数值和分形维数 F_D等空间分析方法的灵敏性较高,能从数据统计、 空间集聚性以及变异结构等不同角度反映出有机质 和全氮含量空间变异的随机性和结构性,三者结合 能较好地反映空间变异的尺度效应特征。随着尺度 增大,空间集聚性降低,有机质和全氮含量空间总变 异先增大后趋于稳定,但随机性变异逐渐减少,结构 性变异先增大后减少;相比大尺度而言,小尺度的随 机变异占比较多,结构变异占比较少。

小尺度因素引起随机性变异,大尺度因素引起 结构性变异,但不同结构影响因素对有机质和全氮 含量的空间变异具有不同的区分度,高程的区分度 最小,土壤类型、植被指数、年均气温、湿度等影响因 素的区分度次之,降水量的区分度最大。各影响因 素对有机质和全氮空间变异的影响具有尺度特征, 随着尺度增大,小尺度因素引起的随机变异逐渐减 少,而大尺度因素引起的结构性变异先增大后减弱, 直至转换为相对的小尺度因素。

不同尺度上,影响因素对有机质和全氮的含量 具有不同的相互协同机制,引起尺度间的随机变异 和结构变异消长,造成各尺度空间总变异具有不同 的结构组成,呈现出先减少后趋于稳定的变化趋势。

参考文献(References):

- [1] 齐雁冰,常庆瑞,刘梦云,等.县域农田土壤养分空间变异及合理样点数确定[J].土壤通报, 2014, 45(3):556-561.
 Qi Y B, Chang Q R, Liu M Y, et al. County-scale spatial variability of soil nutrient distribution and determination of reasonable sampling density[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2014, 45 (3):556-561.
- [2] 张法升,刘作新.分形理论及其在土壤空间变异研究中的应用
 [J].应用生态学报,2011,22(5):1351-1358.
 Zhang F S, Liu Z X. Fractal theory and its application in the analysis of soil spatial variability: A review[J].Chinese Journal of Applied Ecology,2011,22(5): 1351-1358.
- [3] Heuvelink GBM, Webster R. Modelling soil variation: Past, present and future[J].Geoderma, 2001, 100: 269-301.
- [4] Jenny H. Factors of soil formation: A system of quantitative pedology [M].New York: Dover Publications, 1994.
- [5] 姜秋香,付强,王子龙.空间变异理论在土壤特性分析中的应用研究进展[J].水土保持研究,2007,14(4):413-415. Jiang Q X, Fu Q, Wang Z L. Research progress of the spatial vari-

ability theory in application to soil characteristic analysis [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2007, 14(4): 413-415.

- [6] 霍霄妮,李红,张微微,等.北京耕作土壤重金属多尺度空间结构[J].农业工程学报,2009,25(3):223-229.
 Huo X N, Li H, Zhang W W, et al. Multi-S spatial structure of heavy metals in Beijing cultivated soils [J]. Transactions of the
- CSAE, 2009, 25(3): 223-229.
 [7] 潘瑜春,刘巧芹,阎波杰,等.采样尺度对土壤养分空间变异分析的影响[J].土壤通报,2010,41(2):257-262.
 Pan Y C,Liu Q Q,Yan B J,et al.Effects of sampling S on soil nutrition spatial variability analysis[J].Chinese Journal of Soil Science,2010,41(2): 257-262.
- [8] 雷咏雯,危常州,李俊华,等.不同尺度下土壤养分空间变异特征的研究[J].土壤,2004,36(4):376-381.

Lei Y W, Wei C Z, Li J H, et al. Characters of soil nutrient spatial variability in different S[J]. Soil, 2004, 36(4): 376–381.

[9] 刘伟,部允兵,周艳兵,等.农田土壤重金属空间变异多尺度分析——以北京顺义土壤 Cd 为例[J].农业环境科学学报, 2019,38(1):87-94.

Liu W, Gao Y B, Zhou Y B, et al. Multi-S analysis of spatial variability of heavy metals in farmland soils: Case study of soil Cd in Shunyi District of Beijing, China[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2019, 38(1): 87–94.

- [10] 郑袁明,陈煌,陈同斌,等.北京市土壤中 Cr、Ni 含量的空间结构与分布特征[J].第四纪研究,2003,23(4):436-445.
 Zheng Y M, Chen H, Chen T B, et al. Spatialdistribution patterns of Cr and Ni in soils of beijing[J].Quaternary Sciences, 2003, 23 (4): 436-445.
- [11] 陈涛,常庆瑞,刘钊,等.耕地土壤有机质与全氮空间变异性对 粒度的响应研究[J].农业机械学报,2013,44(10):122-129.
 Chen T, Chang Q R, Liu Z, et al. Spatial variability response of farmland soil organic matter and total nitrogen to sampling grain size[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(10):122-129.
- [12] 王鹏,刘拓,邱德明.基于局部惩罚型变权的建设用地生态适宜 性空间模糊评价——以陕西延安宝塔区为例[J].西北地质, 2021,54(1):232-241.

Wang P, Liu T, Qiu D M. Spatial fuzzy assessment of ecological suitability for urban land based on local penalty variable weights: A case study of Baota district [J]. Northwestern Geogloy, 2021, 54 (1):232-241.

- [13] 杨奇勇,杨劲松,刘广明.土壤速效养分空间变异的尺度效应
 [J].应用生态学报,2011,22(2):431-436.
 Yang Q Y, Yang J S, Liu G M. S-dependency of spatial variability of soil available nutrients[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2011, 22(2): 431-436.
- [14] Antonio P M. Spatial variability patterns of phosphorus and potassium in no-tilled soils for two sampling scales [J]. Soil Science Society of America Journal, 1996, 60(5): 1473-1481.
- [15] 李小昱, 雷廷武, 王为.农田土壤特性的空间变异性及分形特征
 [J].干旱地区农业研究, 2000, 18(4): 61-65.
 Li X Y, Lei T W, Wang W. Spatial variablelity and fractal dimension of soil property in field[J]. Agricultural Research in the Arid

Areas, 2000, 18(4): 61-65.

- [16] 沈思源.土壤空间变异研究中地统计学的应用及其展望[J].土 壤学进展,1989,17(3):11-25.
 Shen S Y. Application and prospect of geostatistics in soil spatial variability research [J]. Advances in Soil Science, 1989, 17 (3): 11-25.
- [17] 盛建东,肖华,武红旗,等.不同取样间距农田土壤全量养分空 间变异特征研究[J].土壤通报,2006,37(6):1062-1065.
 Sheng J D, Xiao H, Wu H Q, et al. Spatial variability of total nutrients in arable soil as affected by different sampling distances[J].
 Chinese Journal of Soil Science,2006,37(6): 1062-1065.
- [18] 李雅琦,田均良,刘普灵.黄土高原土壤元素含量地域分异规律
 [J].西北农业学报,2000,9(3):63-66.
 Li Y Q,Tian J L,Liu P L.A Study on laws of regional variance of soil element in loess plateau through trend surface analysis method
 [J].Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica,2000,9(3):63-66.
- [19] 王鹏,段星星,赵禹,等.治沟造地新增耕地的土壤质量评价——延安宝塔区为例[J].土地开发工程研究,2019,4(1):
 41-45.

Wang P, Duan X X, Zhao Y, et al. The evaluation of soil nutrient status in newly reclaimed land from trench construction: Taking Baota district of Yan'an city as example[J].Land Development and Engineering Research, 2019,4(1):41-45.

- [20] 陈云坪,王秀,马伟,等.小麦多年产量空间变异与空间关联分析[J].农业机械学报,2010,41(10):180-184.
 Chen Y P, Wang X, Ma W, et al. Spatial autocorrelation analysis of wheat yield over five years[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(10): 180-184.
- [21] Burrough P A. Multiscale sources of spatial variation in soil. I. The application of fractal concepts to nested levelsof soil variation [J]. European Journal of Soil Science, 1983, 34: 577–597.
- [22] 张忠启.采样点布设与区域土壤有机碳变异性研究[M].北京: 科学出版社,2019:110-128.
 Zhang Z Q.Sampling site arrangement and regional soil organic carbon variability[M]. Beijing: Science Press, 2019:110-128.
- [23] Lei G, Shao M A.The interpolation accuracy for seven soil properties at various sampling Ss on the Loess Plateau, China[J]. Journal of Soils and Sediments, 2012, 12(2): 128-142.
- [24] Daniels, Lee W.The Nature and Properties of Soils, 15th Edition
 [J]. Soil Science Society of America Journal, 2016, 80(5): 1428.
- [25] 李元年. 基于熵理论的指标体系区分度测算与权重设计[D]. 南京:南京航空航天大学,2008.
 Li Y N. Evaluation and weight design of index system based on entropy theory[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2008.
- [26] 王鹏,刘拓,段星星,等.基于熵权的土壤养分地球化学多级模 糊综合评判——以陕西省关中地区为例[J].水土保持通报, 2019,39(6):136-141.

Wang P, Liu T, Duan X X, et al. Multi-stage fuzzy comprehensive evaluation of soil nutrient geochemistry based on entropy weight: Take Guanzhong region for example[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2019, 39(6):136-141.

[27] 金继运,白山路.精准农业与土壤养分管理[M].北京:中国大地出版社,2001;51-57.
 Jin J Y, Bai S L. Precision agriculture and soil nutrient manage-

ment[M]. Beijing: China Dadi Publishing House, 2001:51-57.

ation of soil nutrients in Baota District of Yan'an City[J]. Geophysical and Geochemical Exploration,2020,44(4):847–854.

Scale effects of spatial variations in SOM and STN in semi-arid regions: A case study of Yan'an

WANG Peng¹, ZHAO Jun¹, LIU Tuo¹, ZHOU Yi-Fan², WEI Jin-Ping¹, WANG Lei¹

(1.Xi'an Center of China Geological Survey Northwest China Center for Geoscience Innovation, Xi'an 710054, China; 2.Xi'an Institute of Prespecting and Mapping, Xi'an 710059, China)

Abstract: Taking high-density sampling data as a dataset, the sampling spatial distribution scenarios on different scales were simulated through resampling analysis. Spatial analysis methods, such as Moran's I index, semi-variance function value, and fractal dimension FD, were used to explore the scale effects of spatial variations in soil organic matter (SOM) and soil total nitrogen (STN) and to analyze the conversion of influencing factors between different scales. The results are as follows. With an increase in scale, the spatial agglomeration decreased, and the spatial variation of SOM and STN in general increased first and then tended to be stable. By contrast, the random variation decreased gradually and the structural variation increased first and then decreased as the scales increased. The spatial variation generated on small scales consisted of a large proportion of random variation and a small proportion of structural variation, while the opposite is true on large scales. Different influencing factors bad different distinguishing degrees for the spatial variations in SOM and STN. Their distinguishing degrees were in the order of height<factors such as soil type, vegetation index, annual average temperature, and humidity<pre>precipitation. The influencing factors of the spatial variations in SOM and STN had scale effects. Specifically, with an increase in scale, the random variation caused by small-scale factors decreased gradually, while the structural variation caused by large-scale factors increased first and then weakened until the large-scale factors were transformed into relatively small-scale factors. The coordination mechanism of the effects of each factor on the SOM and STN contents was quite different between different scales, causing the random and structural variations to fluctuate between different scales. As a result, the spatial variations showed the law of decreasing first and then tending to stabilize.

Key words: sampling scale; spatial variation; fractal dimension; semi-variance function; SOM; STN; semi-arid regions

(本文编辑:蒋实)

 ^[28] 王鹏,刘拓.延安市宝塔区土壤养分地球化学评价中的变权效
 果[J].物探与化探,2020,44(4):847-854.
 Wang P,Liu T. Variational weight effect in the geochemical evalu-