

尚白军, 郑博文, 周智彬, 等. 克拉玛依市玛依湖区土壤有机质空间异质性分析[J]. 华南农业大学学报, 2021, 42(1): 72-81.
SHANG Baijun, ZHENG Bowen, ZHOU Zhibin, et al. Spatial heterogeneity of soil organic matter in Mayi lake area of Karamay city[J]. Journal of South China Agricultural University, 2021, 42(1): 72-81.

克拉玛依市玛依湖区土壤有机质空间异质性分析

尚白军^{1,2,3,4}, 郑博文^{1,2,3,4}, 周智彬^{1,2,3}, 王利界⁵

(1 中国科学院 新疆生态与地理研究所/国家荒漠-绿洲生态建设工程技术研究中心, 新疆 乌鲁木齐 830011; 2 中国科学院 新疆生态与地理研究所 莫索湾沙漠研究站, 新疆 石河子 832000; 3 中国科学院 新疆生态与地理研究所 塔克拉玛干沙漠研究站, 新疆 库尔勒 841000; 4 中国科学院大学, 北京 100049; 5 泰州市高港区政府办公室, 江苏 泰州 225321)

摘要:【目的】研究克拉玛依市东部生态屏障的水源地玛依湖区土壤有机质的空间分布规律, 为湖区的生态环境保护提供科学依据和数据支撑。【方法】以玛依湖区为研究对象, 通过野外采样和室内分析, 利用趋势分析法、反距离权重插值法、空间自相关法和半变异函数法分析玛依湖区不同土层深度土壤有机质的空间分布规律。【结果】趋势法分析表明, 玛依湖区土壤有机质含量在 0~20、20~40、40~60 和 60~80 cm 土层的变化速率存在差异, 整体趋势为土壤有机质含量南北方向呈增加趋势、东西方向呈减少趋势。反距离权重插值法 (IDW) 研究表明, 玛依湖区不同土层土壤有机质水平分布差异较大, 局部地区土壤有机质含量存在明显的垂直分布特征, 土壤有机质含量变化趋势同趋势法分析结果高度一致, 整体表现为土壤有机质含量南北方向呈增加趋势、东西方向呈减少趋势。空间自相关法研究表明, 0~20、20~40、40~60 和 60~80 cm 土层的 Moran 指数分别为 0.1643、0.123 6、0.195 5 和 0.246 1, 均在空间上呈现出显著正相关; 4 个土层的 Z 值分别为 3.151 0、2.593 4、3.590 3 和 4.635 5, 底层 (40~60 和 60~80 cm) 的土壤有机质空间正相关较显著、空间聚集程度最高, 表层 (0~20 和 20~40 cm) 空间相关性不显著、空间聚集程度较低。半变异函数分析法表明, 底层 (40~60 和 60~80 cm) 土层的块金效应分别为 0.427 和 0.420, 说明土壤有机质具有一定的空间相关性; 表层 (0~20 和 20~40 cm) 土层的块金效应分别为 0.033 和 0.045, 土壤有机质的空间相关性较弱。【结论】不同土层土壤有机质含量水平差异较大, 南北方向呈增加趋势, 东西方向呈减少趋势, 局部地区存在明显的垂直分布特征。土壤有机质在表层 (0~20 和 20~40 cm) 空间相关性不显著, 空间聚集程度较低; 在底层 (40~60 和 60~80 cm) 空间相关性较显著, 空间聚集程度较高。土壤有机质空间异质性受土壤类型、土壤质地、外围植被类型以及湖区面积变化的影响较大; 在湖区外围生态屏障建设时, 防护林树种、种植深度、种植密度的选择应当结合土壤有机质含量的空间分布状况进行。

关键词: 土壤有机质; 空间自相关; 半变异函数; 趋势分析; 反距离权重插值
中图分类号: X825 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-411X(2021)01-0072-10

Spatial heterogeneity of soil organic matter in Mayi lake area of Karamay city

SHANG Baijun^{1,2,3,4}, ZHENG Bowen^{1,2,3,4}, ZHOU Zhibin^{1,2,3}, WANG Lijie⁵

(1 Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences/National Desert - Oasis Ecological Construction Engineering Technology Research Center, Urumqi 830011, China; 2 Mosuowan Desert Research Station, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Shihezi 832000, China; 3 Taklimakan Desert Research Station, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Korla 841000, China; 4 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 5 Taizhou Gaogang District Government Office, Taizhou 225321, China)

收稿日期: 2020-03-08 网络首发时间: 2020-09-03 07:02:48
网络首发地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/44.1110.S.20200902.1538.004.html>
作者简介: 尚白军 (1995—), 男, 硕士研究生, E-mail: shangbaijun18@mails.ucas.ac.cn; 通信作者: 周智彬 (1969—), 男, 研究员, 博士, E-mail: zhouzb@ms.xjb.ac.cn
基金项目: 中国科学院新疆生态与地理研究所“一三五”规划项目“荒漠和绿洲生态保育及生态屏障建设技术”; 中国科学院战略先导科技专项 (XDA23060203)

Abstract: 【Objective】 To study the spatial distribution of soil organic matter in Mayi lake, the water source of the eastern ecological barrier of Karamay city, and provide scientific basis and data support for the ecological environment protection of the lake area. 【Method】 The study area of this paper was Mayi lake. Through field sampling and indoor analysis, the study used trend analysis method, inverse distance weight interpolation method, spatial autocorrelation method and semi-variogram function method to analyze the spatial distribution law of soil organic matter at different depths of Mayi lake. 【Result】 The trend analysis showed that the change rates of soil organic matter content in Mayi lake were different from 0–20, 20–40, 40–60 and 60–80 cm soil layers, but the overall trend was that soil organic matter content increased in the north-south direction and decreased in the east-west direction. The inverse distance weight interpolation method (IDW) showed that there are large horizontal distribution differences of soil organic matter contents in different soil layers, and regional obvious vertical distribution characteristics of soil organic matter content in Mayi lake. The trends in soil organic matter content change were highly consistent with trend analysis method. The overall performance of the north-south direction of soil organic matter content increased, the east-west direction showed a trend of decrease. The spatial autocorrelation method showed that Moran indexes of four layers were 0.164 3, 0.123 6, 0.195 5 and 0.246 1 respectively, showing a significant positive correlation on the space. The Z values of 0–20, 20–40, 40–60 and 60–80 cm soil layers were 3.151 0, 2.593 4, 3.590 3 and 4.635 5 respectively. The soil organic matter of underlayers (40–60, 60–80 cm) had obvious positive spatial correlation with the highest space aggregation degree. The surface layers (0–20, 20–40 cm) had no significant spatial correlation, and low spatial aggregation degree. The semi-variogram function method showed that the nugget effects of the underlayers (40–60 and 60–80 cm) were 0.427 and 0.420 respectively, indicating spatial correlation of soil organic matter was general. The nugget effects of the surface layers (0–20 and 20–40 cm) were 0.033 and 0.045 respectively, indicating high spatial correlation of soil organic matter. 【Conclusion】 The contents of soil organic matter in different soil layers vary greatly, and the north-south direction tends to increase, while the east-west direction tends to decrease. The spatial correlations of soil organic matter in the surface layers (0–20 and 20–40 cm) are not significant, and the spatial aggregation degrees are low, while the spatial correlations are significant and the spatial aggregation degrees are high in the underlayers (40–60 and 60–80 cm). The spatial heterogeneity of soil organic matter content is greatly affected by soil type, soil texture, vegetation type and the variation of lake area. While constructing ecological barrier in the periphery of lake area, the selection of shelterbelt tree species, planting depth and planting density should be combined with the spatial distribution of soil organic matter content.

Key words: soil organic matter; spatial autocorrelation; semi-variogram; trend analysis; inverse distance weight interpolation

土壤有机质是土壤养分的重要组成部分, 有机质不但能够增加土壤的抗风蚀能力^[1], 而且能够改善土壤的物理和化学性质^[2], 能够促进土壤良好发育, 并提高土壤肥力^[3], 同时土壤有机质也能促进植物生长^[4], 是各种植物生长的营养来源^[5]。土壤有机质空间异质性受到很多因素的影响^[6], 这些因素是生态系统碳氮循环的重要组成部分^[7], 对全球碳循环也有重要意义^[8]。由于土壤特性具有一定的空间分布特点^[9], 因此某一种空间结构特征在一定采样尺度下才能表现出来^[10], 并且由于成土环境、条件

不同, 大多数土壤理化性质都存在较大差异^[11-12]。现有研究表明, 土壤有机质的空间变异性与土壤类型、取样尺度、取样方法^[13]有关。土壤有机质的空间异质性研究方法最初主要是传统统计学方法, 该方法只能描述土壤全局性的变化特征^[14], 不能精准描述土壤空间变异的特性^[15]。近几年, 地统计学方法广泛应用于土壤学^[16]、气象学^[17]和生态学^[18]等领域, 目前最常用的是 GIS 与地统计学相结合的方法^[14], 但是已有的研究侧重于用单一的地统计学方法研究土壤有机质表层的空间分布特征, 对研究区不同

土壤剖面的研究相对较少^[19]。此外,各种方法的研究结果迥异,单一的地统计学方法并不能准确描述土壤理化性质的变化规律。因此,本研究拟运用 4 种地统计学方法揭示玛依湖区不同土壤剖面有机质的空间分布规律,其中,趋势分析法能够根据采样点土壤有机质含量的高低,直观反映出湖区土壤有机质在东西、南北方向的空间变化规律;反距离权重插值法根据已有采样点数据,插值出湖区土壤有机质整体的分布状况;空间自相关法可以反映出湖区土壤有机质在空间上的聚集程度和空间差异性;半变异函数分析法能够定量描述土壤有机质的空间变异特征。

玛依湖是新疆克拉玛依市重要的生态屏障,湖区的生态环境关乎克拉玛依市主城区的生态安全,近年来,由于上游补水量变化较大,对玛依湖区湿地植被群落产生极大影响。此外,湖区周围存在大量的油气资源,油气资源的合理开发与生态屏障保护之间的协调发展变得十分重要。本文以新疆克拉玛依市玛依湖区为研究区域,以湖区周围的典型土壤为研究对象,运用趋势法、空间插值法、空间自相关法和半变异函数分析法 4 种地统计学方法分析上、中、下湖区和不同土层深度土壤有机质的分布状况,探讨影响土壤有机质空间异质性的因素,以便为湖区生态恢复、防护林选种、育种以及合理的资源开发利用提供科学依据和理论支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

玛依湖区 (85°7′~85°26′E, 45°14′~45°35′N), 位于克拉玛依市东南部、玛纳斯河下游古河道区, 东部濒临古尔班通古特沙漠^[20]。该区域位于中纬度内陆地区, 属于典型的温带大陆性气候。多年平均气温为 8.6℃, 1 月为最冷月, 多年月平均气温-15.4℃, 极端低温-40.5℃, 7 月为最热月, 多年月平均气温 27.9℃, 极端高温 46.2℃; 多年平均降水量 108.9 mm, 年潜在蒸发量高达 1 492.0 mm, 是同期降水量的 13.7 倍; 全年日照 2 704.0 h, 7 月最多, 达 302.5 h, 12 月最少, 仅 99.8 h, 无霜期 232.3 d, 年平均风速为 3.2 m·s⁻¹。湖区内梭梭 *Haloxylon ammodendron*、怪柳 *Tamarix chinensis*、西伯利亚白刺 *Nitraria sibirica* 等荒漠植物生长茂盛, 土壤类型以灰漠土、草甸土和沼泽土为主。

1.2 样品采集与处理

2017 年 11 月, 围绕整个玛依湖区进行随机取样, 采样距离、采样范围适用于所使用的地统计学方法。利用 GPS 定位, 在选定点挖取近百个土壤剖

面, 并最终筛选出 60 个具有代表性的土壤剖面进行采样, 并按照土壤层次的取样原则, 在 0~20、20~40、40~60 和 60~80 cm 土层对每个采样点进行采样, 共计 240 个土壤样品, 将土壤样品带回实验室, 用重铬酸钾容量-外加热法测定土壤有机质。

1.3 地统计学方法

趋势分析法和反距离权重插值 (Inverse distance weight, IDW) 法可以反映研究区土壤理化性质的分布状况和变化规律, 均在 Arcgis 10.2 相应模块中进行。

空间自相关法可以反映某一属性在空间上的聚集程度和空间差异性^[21-22], 其计算公式如下:

$$I = \frac{n \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij}(x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{\left(\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij} \right) \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}, \tag{1}$$

式中, I 为莫兰 (Moran) 指数, n 为空间数据的个数, x_i 和 x_j 分别为 i 区和 j 区的属性值, $\bar{x}$ 为所有要素的平均值, W_{ij} 为空间权重矩阵。 $I>0$ 表示空间正相关, $I=0$ 表示不相关, $I<0$ 表示空间负相关, I 值越大, 空间相关性越明显^[22]。

半变异函数是地统计学中研究土壤变异性的关键函数, 它能够定量描述土壤属性的空间变异规律^[23], 其计算公式如下:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i+h)]^2, \tag{2}$$

式中, $\gamma(h)$ 是样点间距的半方差, 该值随着 h 的增加而增加, $Z(x_i)$ 、 $Z(x_i+h)$ 表示在 x_i 和 x_i+h 时的土壤属性观测值, $N(h)$ 是间距为 h 的计算对数。半变异函数分析的结果主要由块金值 (C_0)、基台值 (C_0+C) 和块金效应 [$C_0/(C_0+C)$] 体现, 一般 $C_0/(C_0+C)$ 越大, 表明相应物理量空间分布越分散, 相关性越弱。

1.4 数据分析

在 SPSS 21 中对数据进行描述性统计分析、正态分布检验和多重比较分析; 在 Arcgis 10.2 中对整个流域 4 个土层的土壤有机质进行趋势分析和 IDW 值计算; 在 Geoda 软件中对土壤有机质进行空间自相关分析; 在 GS+9.0 中构建土壤有机质半变异函数。

2 结果与分析

2.1 不同土层土壤有机质含量描述性统计

通过 SPSS 21 中 Kolmogorov-Smirnow 对玛依湖区由浅到深 4 个土层的有机质含量进行非参数检验, P 值分别为 0.168、0.341、0.837 和 0.646, 均大

于 0.05, 因此可以认为, 整个流域不同土层的土壤有机质含量均符合正态分布, 可进行描述性统计分析, 但是其只能描述土壤有机质全局性特征, 不能精准描述土壤有机质空间变化规律, 故需要地统计学方法进行相应分析。由表 1 可以看出, 玛依湖区不同土层土壤有机质平均含量以 0~20 cm 土层最多, 其平均质量分数为 8.72 g·kg⁻¹, 其次为 20~40 cm

土层, 平均质量分数为 6.36 g·kg⁻¹, 40~60 cm 土层的土壤有机质含量最少, 平均质量分数为 5.12 g·kg⁻¹。当土壤有机质含量变异系数 (CV)<10% 时, 为弱变异; 当 10%≤CV<100% 时, 为中等变异; 当 CV≥100% 时为强变异^[24], 而玛依湖湖区各个土层的有机质含量变异系数分别为 72.39%、77.84%、62.11% 和 63.93%, 均呈中等程度变异。

表 1 不同土层土壤有机质含量统计特征值

Table 1 Statistical characteristic values of soil organic matter content at different soil layers

土层/cm Soil layer	w(有机质)/(g·kg ⁻¹) Organic matter content				统计特征值 Statistical characteristic value				
	最小值 Min.	最大值 Max.	平均值 Average	标准差 Standard deviation	方差 Variance	变异系数/% Coefficient of variation	偏度 Skewness	峰度 Kurtosis	P
0~20	0.41	35.15	8.72	6.31	39.87	72.39	1.50	3.88	0.168
20~40	0.28	25.68	6.36	4.95	24.51	77.84	1.54	3.71	0.341
40~60	0.19	13.20	5.12	3.18	10.10	62.11	0.58	-0.17	0.837
60~80	0.33	15.23	5.30	3.39	11.48	63.93	0.77	0.73	0.646

2.2 不同土层土壤有机质含量趋势法分析

通过 Arcgis10.2 中的趋势分析模块, 可以得到不同土层土壤有机质含量的空间分布特征及其异向性分布特征参数, 能为变异函数模型的获取和插值图的绘制提供基础, 进而更准确地描述研究区土壤有机质含量的空间变异规律。

图 1 是所有采样点不同土层在南北、东西方向上的土壤有机质含量变化趋势。从图 1 中可以看出, 0~20 cm 土层中, 土壤有机质含量在南北方向是逐渐增加的, 而在东西方向是凸线, 呈现先增加后

减少的趋势; 20~40 cm 土层中, 南北方向和东西方向都是凸线, 南北方向的土壤有机质含量的增加速度逐渐缓慢, 东西方向呈现先缓慢增加后快速减少的趋势; 40~60 cm 土层中, 南北方向的土壤有机质含量呈现直线式快速增加, 东西方向呈现先缓慢增加, 后急速减少的趋势; 60~80 cm 土层中, 南北方向的土壤有机质含量呈先快速增加后缓慢增加的趋势, 东西方向呈快速减少的趋势, 由趋势分析法可以看出, 玛依湖湖区土壤有机质含量在 0~20、20~40、40~60 和 60~80 cm 土层变化速率虽然存在

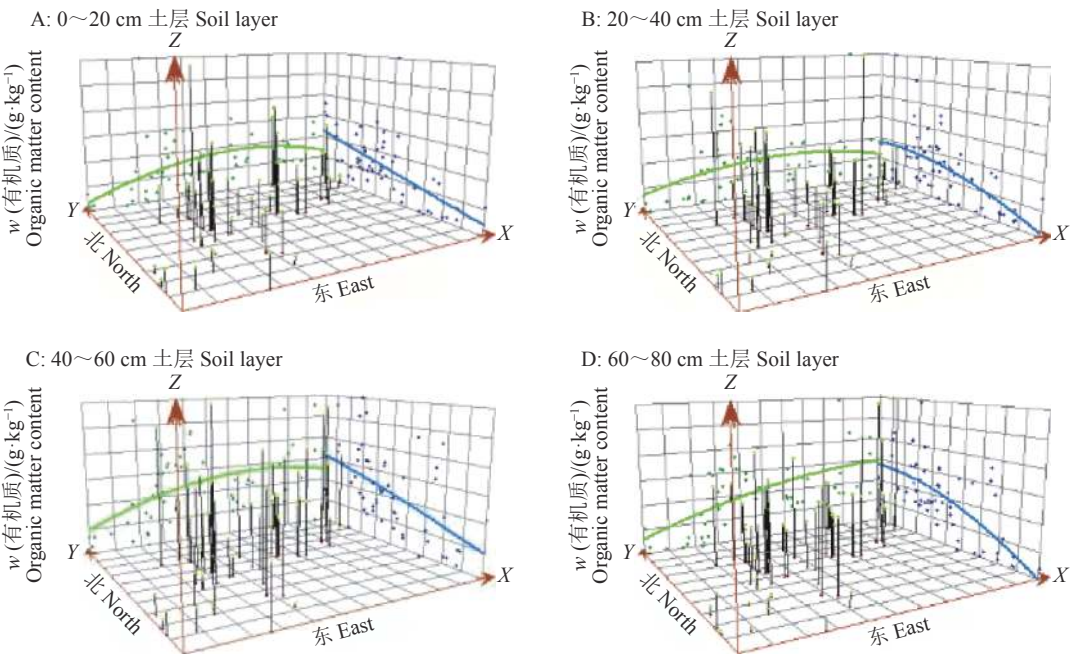


图 1 不同土层土壤的有机质含量变化趋势

Fig. 1 The variation trend of soil organic matter content at different soil layers

差异,但是所有土层土壤有机质含量均表现为:南北方向呈增加趋势,东西方向呈减少趋势。

2.3 不同土层土壤有机质含量反距离权重插值法分析

在 Arcgis 10.2 的空间插值模块中对土壤有机质含量进行反距离权重插值分析,从图 2 中可以看出,在 0~20 cm 土层中,土壤有机质含量反距离权重极小值出现在上湖,有机质含量在上湖较少,中湖和下湖均存在极大值,有机质含量整体水平较上湖有明显的增加;在 20~40 cm 土层中,有机质含量上湖较低,极大值出现在中湖和下湖,中湖

的整体有机质含量高于上湖和下湖;在 40~60 cm 土层中,有机质含量极小值主要出现在上湖,极大值主要出现在中湖和下湖,中湖和下湖的有机质含量整体高于上湖;在 60~80 cm 土层中:有机质含量极小值主要出现在上湖,极大值主要出现在中湖和下湖,中湖和下湖的有机质含量整体高于上湖。此外,从图 2 中还可以看出,各土层中,土壤有机质含量在南北方向是逐渐增加的,而在东西方向呈现减少的趋势。此结果与趋势法分析结果基本一致。

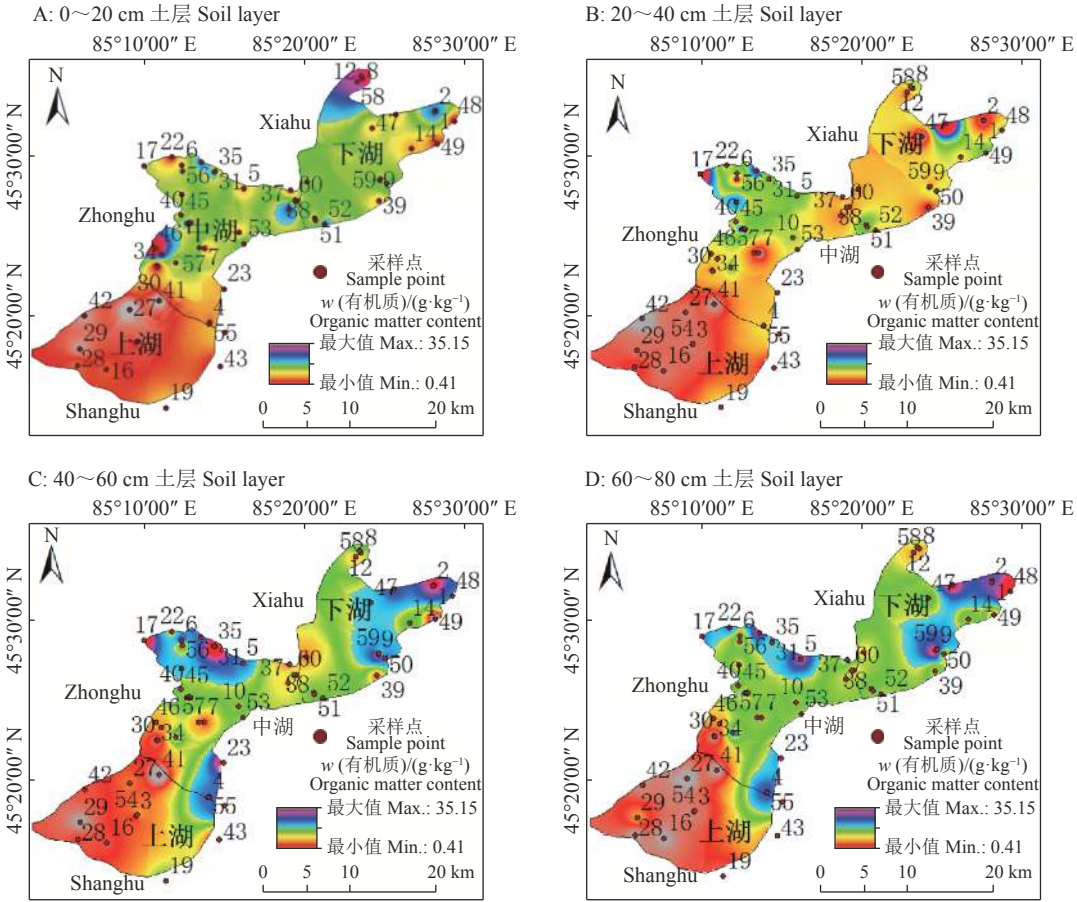


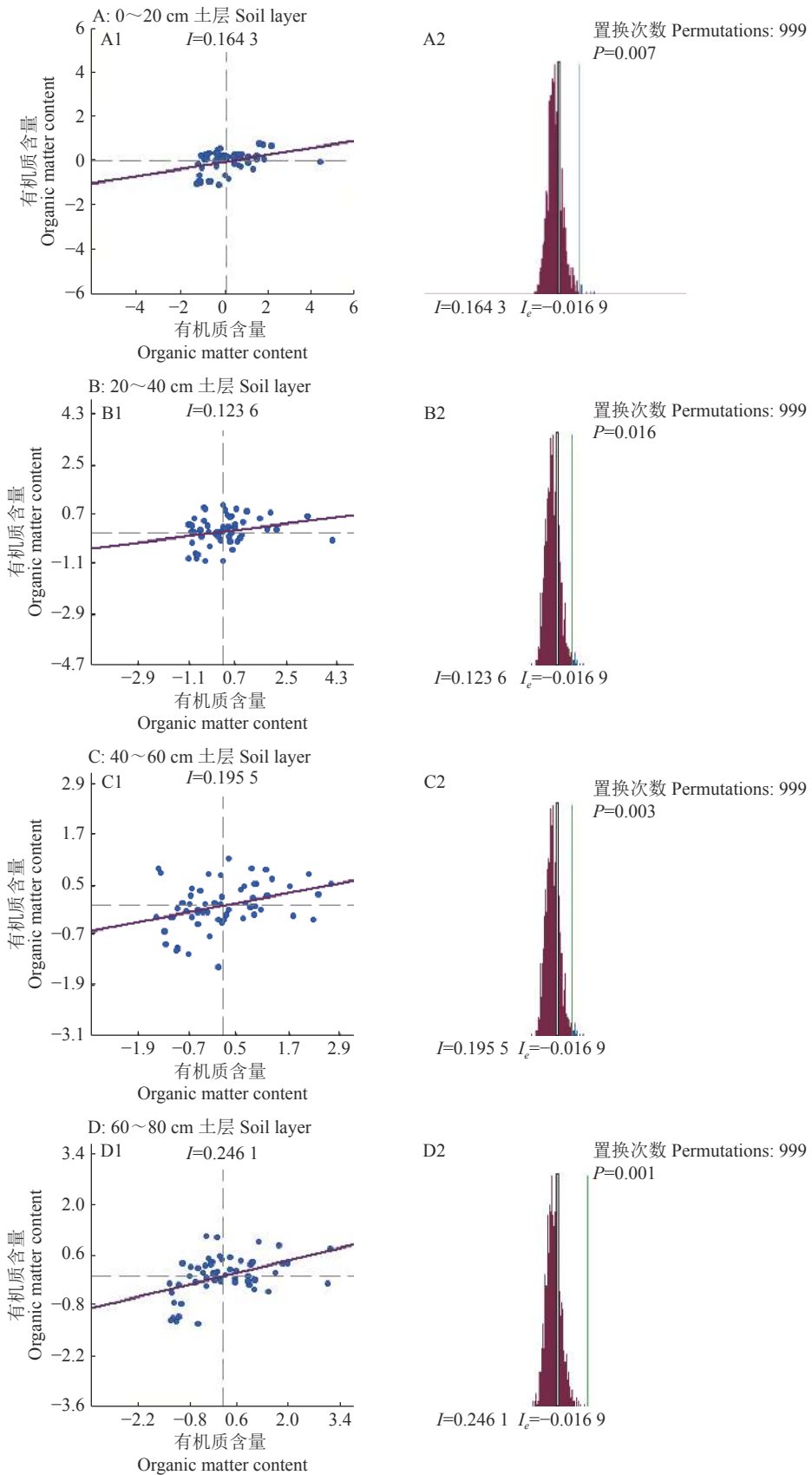
图 2 不同土层土壤有机质含量的反距离权重插值 (IDW)

Fig. 2 Inverse distance weight(IDW) interpolation method of soil organic matter content at different soil layers

2.4 不同土层土壤有机质含量的空间自相关法分析

在 GeoDa 软件中对玛依湖区各土层的土壤有机质含量进行空间自相关分析,结果如图 3。由图 3 可以看出:整个湖区由浅到深各土层土壤有机质含量的 Moran 指数 (I) 均大于 0,分别为 0.1643、0.1236、0.1955 和 0.2461,均在空间上呈现正相关;随后对 4 个土层的 Moran 指数采用蒙特卡洛模拟的方法进行检验,在 $\alpha=0.05$ 水平下,4 个土层对应的 P 值分别为 0.007、0.016、0.003 和 0.001,表明 4 个土层土壤有机质含量的空间自相关是显著的,具有良好的

空间结构。图 3 中 I_e 为 I 的期望值,通过 I_e 值计算出 4 个土层的 Z 值 (Z 值能反映空间正相关或者负相关) 分别为 3.1510、2.5934、3.5903 和 4.6355,说明了 60~80 cm 土层土壤的有机质含量空间正相关最显著,空间聚集程度最高,40~60 cm 土层次之,20~40 cm 土层的 Z 值最小。分析图 3 可以看出,在 0~20、20~40 和 40~60 cm 土层,采样点主要分布在第 1、第 2 和第 3 象限,表明土壤有机质含量的高值区域分布较广,研究区土壤有机质含量的空间分布受高值分布影响较大;60~80 cm 土层的采样点主要



A1、B1、C1 和 D1 显示各土层莫兰指数 (I)；A2、B2、C2 和 D2 显示各土层莫兰指数经置换后对应的期望值 (I_e)

A1, B1, C1 和 D1 show Moran index (I) values at different soil layers; A2, B2, C2 和 D2 show the expected values (I_e) of Moran index after iteration at different soil layers

图 3 不同土层土壤有机质含量的空间自相关分析

Fig. 3 Spatial autocorrelation analysis of soil organic matter content at different soil layers

分布在第 1、第 2 和第 4 象限,表明土壤有机质含量的
的高低值区域分布较为均匀,土壤有机质含量的空
间自相关性受高值和低值共同影响^[22]。

2.5 不同土层土壤有机质含量的半变异函数法分析

利用 GS+9.0 软件对玛依湖区各个土层土壤的
有机质含量构建半变异函数并进行相关分析,得到
半变异函数模型 (图 4) 及模型相关参数 (表 2),可
以看出,0~20 和 20~40 cm 土层土壤有机质含量的
变异函数模型均为球状模型,40~60 和 60~80 cm 土
层土壤有机质含量的变异函数模型分别为高斯模型
和指数模型,且 40~60 cm 土层土壤有机质含量
高斯模型的决定系数最高, R^2 为 0.661,拟合效果较
好,0~20、20~40 和 60~80 cm 土层土壤有机质含量
模型的拟合效果较差。块金效应 [$C_0/(C_0+C)$] 反映
了土壤有机质含量的空间依赖性,块金效应的大小
反映了土壤物理变量空间相关性的强弱,一般
 $C_0/(C_0+C)$ 越大,表明相应物理量空间分布越分散,

相关性越弱。从表 2 可以看出, $C_0/(C_0+C)$ 随着土层
深度的增加迅速增加,0~20 和 20~40 cm 的土层中,
 $C_0/(C_0+C)$ 分别为 0.033 和 0.045,表明土壤有机质
含量的空间相关性较强,40~60 和 60~80 cm 土层
中, $C_0/(C_0+C)$ 分别为 0.427 和 0.420,表明土壤有机
质含量具有一定的空间相关性,但会受到随机因素
的影响;4 个土层的块金值 (C_0) 分别为 1.30、1.08、
4.23 和 5.32,说明存在由采样和试验引起的误差,
并且 40~60 和 60~80 cm 土层中误差较大;4 个土层
的基台值 (C_0+C) 分别为 38.96、24.22、9.91 和
12.68,表明 40~60 cm 土层系统内随机性变异和结
构性变异的总和较小,而 0~20、20~40 和 60~80 cm
土层中,随机性变异和结构性变异的总和较大;由
浅到深 4 个土层的变程分别为 1 510.00、1 250.00、
7 170.69 和 39 660.00 m,表明土壤有机质含量在该
范围内具有空间相关性,60~80 cm 土层的变程最
大,20~40 cm 土层的变程最小,表明研究区 4 个土

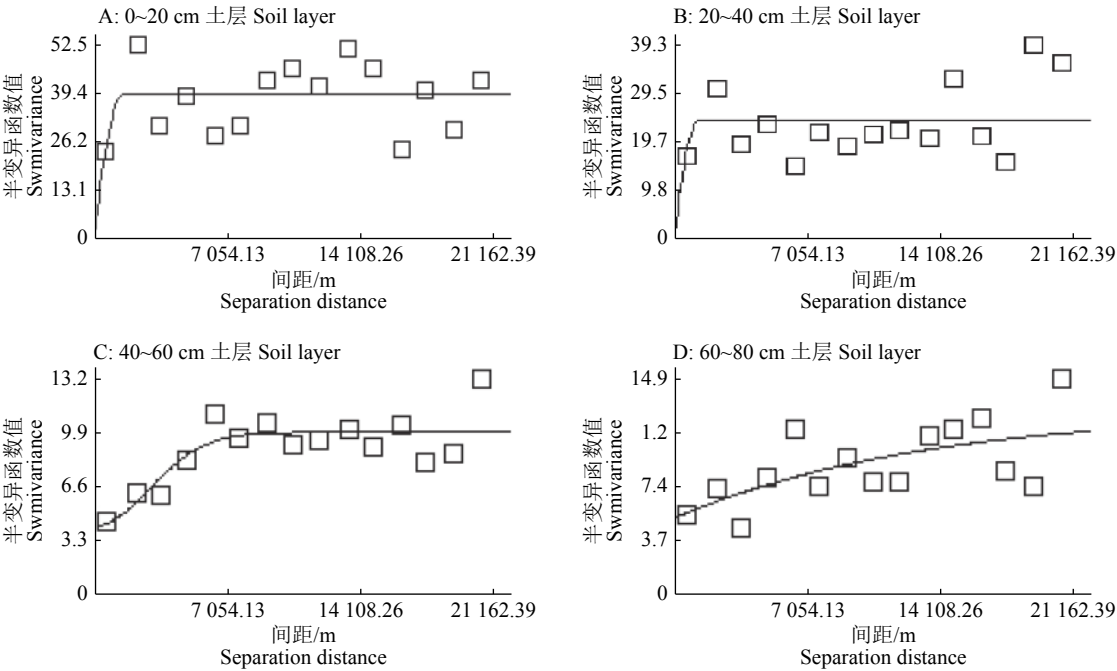


图 4 不同土层土壤有机质含量的变异函数模拟模型

Fig. 4 Variogram model of soil organic matter content at different soil layers

表 2 各土层土壤有机质含量变异函数模型参数

Table 2 Variogram model parameters of soil organic matter content at different soil layers

土层/cm Soil layer	变异函数模型类型 Variogram model	块金值(C_0) Nugget	基台值(C_0+C) Sill	变程/m Range	$C_0/(C_0+C)$ Nugget/Sill	决定系数(R^2) Coefficient of determination
0~20	球状模型 Spherical model	1.30	38.96	1 510.00	0.033	0.177
20~40	球状模型 Spherical model	1.08	24.22	1 250.00	0.045	0.061
40~60	高斯模型 Gaussian model	4.23	9.91	7 170.69	0.427	0.661
60~80	指数模型 Exponential model	5.32	12.68	39 660.00	0.420	0.413

层的空间变异尺度具有一定的差异。

2.6 土壤有机质含量的垂直分布特征

从图 5 可以看出, 不同土层土壤有机质含量的垂直分布无明显规律, 只有在极个别点才有明显的垂直分布特征, 比如 8、12、21、33、35、52 和 58 号采样点, 均是 0~20 cm 土层的土壤有机质含量较高, 质量分数分别为 21.23、18.82、16.83、19.21、17.14、14.77 和 17.69 g·kg⁻¹, 20~40、40~60 和 60~80 cm 土层的土壤有机质含量较低; 46 号采样点的 0~20 cm 土层的土壤有机质含量是一个极大值, 质量分数高达 35.15 g·kg⁻¹, 而该采样点 20~40、40~60 和 60~80 cm 土层的土壤有机质含量较低, 质量分数仅为 6.44、3.21 和 3.71 g·kg⁻¹; 28、29、30 和 31 号采样点, 所有土层的土壤有机质含量均较低。由此可见, 不同土层土壤有机质不存在明显的垂直分布规律, 但是不同采样点的不同土层土壤有机质含量存在明显差异。因此可以得出, 玛依湖区不同土层土壤有机质含量的空间分布以水平差异性为主, 在水平差异性存在的情况下, 局部地区土壤有机质含量存在明显的垂直分布特征。

为了探究玛依湖区土壤有机质垂直分布特征, 进一步对上湖、中湖和下湖不同土层的土壤有机质含量做了显著性分析 (图 6), 结果表明 (在 0.05 的显著性水平下): 上湖各土层的土壤有机质含量无显著性差异, 有机质含量垂直分布特征不明显; 中湖

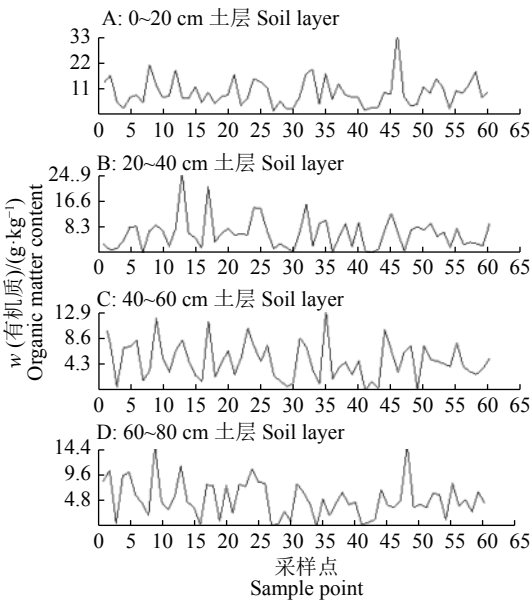
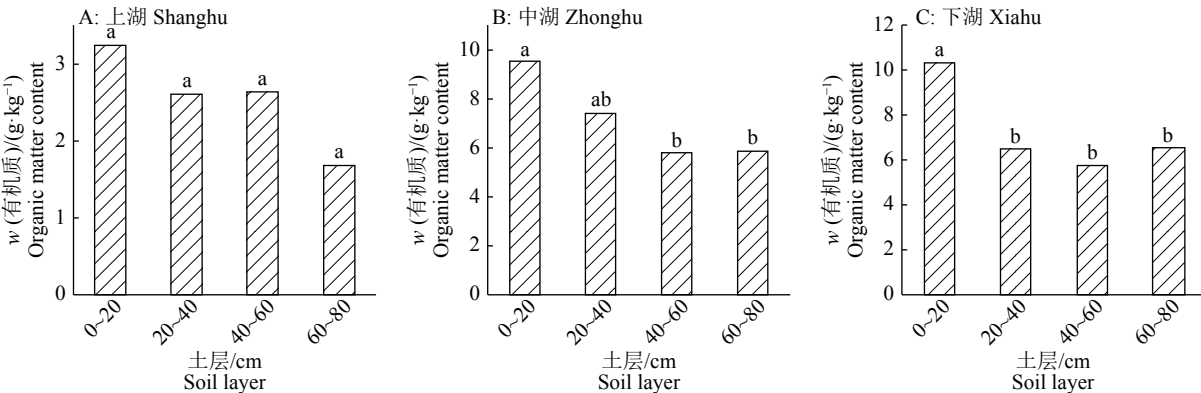


图 5 不同土层土壤有机质含量的垂直分布特征
Fig. 5 Vertical distribution characteristics of soil organic matter content at different soil layers

0~20 cm 与 20~40 cm 土层的有机质含量无显著差异, 40~60 cm 与 60~80 cm 土层土壤有机质含量无显著差异, 0~20 cm 与 40~60 和 60~80 cm 土层的土壤有机质含量有显著差异; 下湖中 0~20 cm 与 20~40、40~60 和 60~80 cm 土层的土壤有机质含量有显著差异, 20~40、40~60 和 60~80 cm 土层的土壤有机质含量无显著差异。



各图中, 柱子上的不同小写字母表示差异显著 ($P<0.05$, Duncan's 法)
In each figure, different lowercase letters on bars indicate significant differences ($P<0.05$, Duncan's test)

图 6 不同湖区不同土层土壤有机质含量多重比较分析

Fig. 6 Multiple comparative analysis of soil organic matter content at different soil layers of different lake areas

3 讨论与结论

玛依湖位于克拉玛依市的东南部, 是克拉玛依市东部重要的生态屏障, 近几年由于强烈的人为活动和自然因素的干扰, 使得湖区生态环境发生了退化, 进而改变了土壤属性, 而目前关于玛依湖区土

壤属性分布特征、影响因素的研究基本空白。周倩倩等^[25] 研究发现有机质的分布受土地利用类型、土壤颗粒组成、土壤质地的影响。此外, 张海鸥等^[26] 研究发现, 不同种植年限下土壤有机质与全氮含量呈显著正相关。张枝枝等^[3] 研究表明, 高程因子与土壤有机质表现为显著相关。袁晓宇等^[1] 研究了土

壤有机质含量对抗风蚀的作用。这些研究都为玛依湖区土壤属性的进一步研究提供了思路。

土壤有机质含量、空间分布受诸多因素的影响。鲍丽然等^[27] 研究显示, 渝西北的土壤有机质空间变异主要受地形坡度、土壤类型、土地利用类型和耕作措施的影响, 玛依湖区地势平坦, 大部分区域的坡度在 0~2°之间, 土壤有机质空间变异受坡度的影响较小, 土壤类型主要有草甸土、灰漠土、风沙土、灰棕漠土、盐土和沼泽土, 土壤有机质的空间分布受土壤类型的影响较大。杜佩颖等^[28] 研究显示, 平原丘陵过渡区土壤有机质的空间分布与黏粒含量密切相关, 黏粒含量越高, 土壤对有机质的吸附作用越强, 有利于有机质的积累, 砂粒含量越高, 有机质矿化速率越快, 不利于有机质的积累, 玛依湖区不同土层土壤粒径分布差异较大, 土壤主要由粉粒组成, 黏粒和粉粒含量自上湖到下湖不断增加, 砂粒含量不断减少, 而有机质含量自上湖到下湖逐渐增加, 有机质的分布受黏粒、砂粒含量影响, 这与杜佩颖等^[28] 的研究相一致。董莉丽等^[29] 研究显示, 陕西省土壤有机质空间分布与地形、植被类型、气候和土壤其他属性有关, 并且发现坡向不同的地方, 植被生长环境不同, 植被覆盖也不同, 导致表层土壤养分含量和分布状况的异质性, 而玛依湖区由于地势平坦, 坡向对有机质的影响较小, 但是湖区外围不同的植被类型, 如落叶阔叶林、荒漠、灌丛、草甸、沼泽等接受到的太阳辐射不同, 地下生物种类、数量不同, 地下生物量不同, 对有机质的分布特征产生的影响也不同; 此外, 玛依湖湖水受上游补水量的影响较大, 湖区面积在不断变化, 湖区面积的扩张与收缩对有机质的空间分布也会产生影响。

不同的研究方法由于假设前提、参数、模型结构不同而有细微差别。趋势分析和反距离权重插值分析能够直观地反映出土壤有机质含量的空间变异规律, 但是无法准确定量描述差异的大小, 趋势分析法和反距离权重插值可以相互验证, 在本研究中, 这 2 种方法分析的玛依湖区不同土层土壤有机质含量的变化趋势基本保持一致, 均表现为南北方向的土壤有机质含量呈增加趋势, 东西方向呈减少趋势, 趋势法能够反映出土壤有机质变化趋势的快慢 (通过趋势线的斜率), 反距离权重插值能够更加直观地反映整个研究区土壤有机质含量的变化趋势, 2 种方法相辅相成; 半变异函数受到采样点分布、研究区大小的影响, 存在随机误差; 空间自相关性分析中, 空间权重矩阵的构建受到人为因素的影响较大, 半变异函数和空间自相关法可以相互验

证, 在本研究中, 空间自相关法分析出 0~20、20~40、40~60 和 60~80 cm 土层的 Z 值分别为 3.1510、2.5934、3.5903 和 4.6355, 半变异函数分析出的块金效应分别为 0.033、0.045、0.427 和 0.420, 表明研究区不同土层土壤有机质含量在表层 (0~20 和 20~40 cm) 空间相关性较弱, 空间聚集程度较低, 在底层 (40~60 和 60~80 cm) 空间相关性较强, 空间聚集程度较高。此外, 土壤属性垂直分布规律没有更好的方法去描述。本文采用不同的方法、多角度分析了克拉玛依市玛依湖流域不同土层土壤有机质的空间分布规律, 多种方法相互印证, 揭示了研究区不同土层土壤有机质的空间分布规律。

本文运用 4 种地统计学方法揭示了玛依湖区土壤有机质的空间异质性, 趋势分析法和反距离权重插值法表明, 玛依湖区不同土层土壤有机质水平分布差异较大, 局部地区土壤有机质含量存在明显的垂直分布特征, 土壤有机质含量南北方向呈增加趋势, 东西方向呈减少趋势。空间自相关法和半变异函数分析法表明, 表层 (0~20 和 20~40 cm 土层) 土壤有机质空间相关性不显著, 空间聚集程度较低, 底层 (40~60 和 60~80 cm 土层) 土壤有机质空间正相关较显著, 空间聚集程度最高。玛依湖区土壤有机质含量的空间变化特征受土壤类型、土壤质地、外围植被类型以及湖区面积变化的影响较大, 此外, 土壤有机质是土壤养分的重要组成部分, 是各种植物生长的营养来源, 在湖区外围生态屏障建设时, 防护林树种、种植深度、种植密度的选择应当结合土壤有机质的空间变化规律进行, 如在南部和西部有机质含量较低的区域, 种植对有机质含量要求较低的乡土树种, 并适当减小种植密度, 增加种植深度。

参考文献:

[1] 袁晓宇, 海春兴, 刘广通. 阴山北麓不同用地土壤有机质含量对抗风蚀的作用研究[J]. 水土保持研究, 2007, 14(6): 302-304.

[2] 毛丽, 苏志珠, 王国玲, 等. 毛乌素沙地不同土地利用类型的土壤粒度及有机质特征[J]. 干旱区研究, 2019, 36(3): 589-598.

[3] 张枝枝, 张福平, 燕玉超, 等. 渭河两岸缓冲带的土壤有机质含量分布特征及其影响因子[J]. 土壤, 2017, 49(2): 393-399.

[4] 曹智, 闵庆文, 刘某承, 等. 基于生态系统服务的生态承载力: 概念、内涵与评估模型及应用[J]. 自然资源学报, 2015, 30(1): 1-11.

[5] 陈春燕, 杜兴瑞, 李晓莉, 等. 基于 GIS 的九寨沟县域土壤养分空间变异特征[J]. 湖北农业科学, 2015, 54(21): 5277-5280.

[6] 赵明松, 张甘霖, 李德成, 等. 江苏省土壤有机质变异及其主要影响因素[J]. 生态学报, 2013, 33(16): 5058-5066.

[7] 乔蕪强, 程文仕, 程东林, 等. 基于 DPSIR 模型的土地整治规划环境影响评价[J]. 水土保持通报, 2017, 37(2): 308-312.

[8] 徐小锋, 宋长春. 全球碳循环研究中“碳汇”研究进展[J]. 中国科学院研究生院学报, 2004, 21(2): 145-152.

[9] 李晓燕, 张树文, 王宗明, 等. 吉林省德惠市土壤特性空间变异特征与格局[J]. 地理学报, 2004, 59(6): 989-997.

[10] 徐英, 陈亚新, 史海滨, 等. 土壤水盐空间变异尺度效应的研究[J]. 农业工程学报, 2004, 20(2): 1-5.

[11] 邵明安, 王全九, 黄明斌. 土壤物理学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.

[12] 张娜, 张栋良, 屈忠义, 等. 不同尺度下内蒙古河套灌区有机质空间变异[J]. 生态学杂志, 2016, 35(3): 630-640.

[13] 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.

[14] 郭安廷, 崔锦霞, 许鑫, 等. 基于 GIS 与地统计的土壤养分空间变异研究[J]. 中国农学通报, 2018, 34(23): 72-79.

[15] 李慧芳, 杨虎德, 郑隆举. 基于 GIS 技术的土壤养分时空变异研究[J]. 北方农业学报, 2016, 44(2): 77-80.

[16] 马亚平, 魏永霞. 基于 Matlab 和地统计学的土壤有机质空间变异研究[J]. 东北农业大学学报, 2010, 41(2): 70-72.

[17] 孙强, 曾维华, 沈珍瑶, 等. 基于地统计学方法的泾河流域降水空间变异规律研究[J]. 干旱区资源与环境, 2004, 18(5): 47-51.

[18] 王政权. 地质统计学及在生态学中的应用[M]. 北京: 科学出版社, 1999.

[19] 王合玲, 张辉国, 秦璐, 等. 新疆艾比湖流域土壤有机质的空间分布特征及其影响因素[J]. 生态学报, 2012, 32(16): 4969-4980.

[20] 王述潮, 马鸣. 新疆克拉玛依市玛依湖区的鸟类多样性[J]. 湿地科学, 2019, 17(2): 172-178.

[21] 赵雲泰, 黄贤金, 钟太洋, 等. 1999—2007 年中国能源消费碳排放强度空间演变特征[J]. 环境科学, 2011, 32(11): 3145-3152.

[22] 陈思明, 王宁, 秦艳芳, 等. 河口湿地不同土层有机质的水平异质性与自相关性[J]. 生态学杂志, 2019, 38(9): 2805-2812.

[23] 刘迁迁, 苏里坦, 刘广明, 等. 伊犁河谷察南灌区土壤盐分空间变异研究[J]. 干旱区研究, 2017, 34(5): 980-985.

[24] 焦德志, 于欣宇, 王昱深, 等. 扎龙湿地芦苇分株生态可塑性及其对土壤因子的响应[J]. 生态学报, 2019, 39(11): 4149-4157.

[25] 周倩倩, 丁建丽, 唐梦迎, 等. 干旱区典型绿洲土壤有机质的反演及影响因素研究[J]. 土壤学报, 2018, 55(2): 313-324.

[26] 张海欧, 王欢元, 孙婴婴. 毛乌素沙地玉米不同种植年限砒砂岩与沙复配土壤有机质与全氮的关系[J]. 水土保持通报, 2019, 39(2): 242-245.

[27] 鲍丽然, 周皎, 李瑜, 等. 渝西北土壤有机质空间变异及影响因素分析[J]. 西南农业学报, 2017, 30(11): 2541-2547.

[28] 杜佩颖, 张海涛, 郭龙, 等. 平原丘陵过渡区土壤有机质空间变异及其影响因素[J]. 土壤学报, 2018, 55(5): 1286-1295.

[29] 董莉丽, 杨波, 李晓华, 等. 陕西省土壤有机质含量及其与影响因素的关系[J]. 水土保持通报, 2017, 37(4): 85-91.

【责任编辑 李晓卉】