

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2023.06.045.

杜丹丹, 高瑞忠, 贾德彬. 吉兰泰盐湖盆地土壤颗粒分形特征与空间变异分析[J]. 水土保持研究, 2023, 30(6): 93-101.

DU Dandan, GAO Ruizhong, JIA Debin. Analysis of Fractal Characteristics and Spatial Variability of Soil Particles in the Jilantai Salt Lake Basin [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(6): 93-101.

吉兰泰盐湖盆地土壤颗粒分形特征与空间变异分析

杜丹丹^{1,2}, 高瑞忠^{1,2}, 贾德彬^{1,2}

(1. 内蒙古农业大学 水利与土木建筑工程学院, 呼和浩特 010018; 2. 内蒙古水资源保护与利用重点实验室, 呼和浩特 010018)

摘 要: [目的] 阐明盐湖盆地流域土壤颗粒分形特征和空间变异特征, 揭示区域土壤环境演变和影响因素的响应规律, 为旱区盐湖流域沙害治理提供数据和理论支持。[方法] 以吉兰泰盐湖盆地流域为研究区, 布设 50 个土壤采样点, 采集表层、50 cm、100 cm 土层 150 个土壤样本, 基于土壤粒径分布和土壤基本理化指标 pH 值、总溶解性固体 TDS、总氮 TN、含水率 θ 的测试数据, 采用多因素相关分析的方法, 分析了土壤分形维数与各粒级含量和土壤基本理化因子的相关性; 应用地统计学方法对土壤剖面分形维数空间变异特征及分布规律开展了研究。[结果] 研究区 0—100 cm 土壤质地以砂土、壤砂土为主, 不同土层深度土壤质地类型基本一致, 土壤颗粒分形维数 D 值为 1.672~2.785。土壤分形维数与黏粒和粉粒呈极显著正相关, 与粗砂、中砂、细砂呈显著负相关, 0.1 mm 粒径是 D 值随土壤粒径变化的分界值。 D 值与含水率、总氮在 3 土层均呈现显著正相关, 而与 pH 值和 TDS 相关性不显著。土壤分形维数具有强烈的空间自相关性, 各层土壤 D 值均呈现出由南向北逐渐增大的条块状镶嵌分布特征, 流域北部的巴音乌拉山和乌兰布和沙漠地区是 D 值的高值区, 西南部边缘的图格力高勒沟台地和东南部边缘的贺兰山地区是全流域 D 值的最低区域, 土壤表层在吉兰泰盐湖附近有带状分布的高值区。[结论] 受气候和人类活动的影响, 吉兰泰盐湖盆地土壤质地发生变化, 表层土壤颗粒风蚀严重, 较深层土壤具有粗粒化现象, 未来应加强土壤侵蚀和退化状况观测研究。

关键词: 分形维数; 空间变异; 土壤理化性质; 吉兰泰盐湖盆地

中图分类号: S152.3

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2023)06-0093-09

Analysis of Fractal Characteristics and Spatial Variability of Soil Particles in the Jilantai Salt Lake Basin

Du Dandan^{1,2}, Gao Ruizhong^{1,2}, Jia Debin^{1,2}

(1. Institute of Water Conservancy and Civil Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China; 2. Inner Mongolia Key Laboratory of Water Resources Protection and Utilization, Hohhot 010018, China)

Abstract: [Objective] The objective of this study is to clarify the fractal characteristics and spatial variation characteristics of soil particles in the salt lake basin, reveal the response laws of regional soil environment evolution and impact factors, and provide data and theoretical support for the control of sand damage in the salt lake basin in the arid area. [Methods] Jilantai Salt Lake Basin was selected as the research area. 50 soil sampling points were set in this basin. 150 soil samples were obtained from 3 layers every 50 cm. According to the soil particle size distribution as well as the basic soil physical and chemical index including pH, total soluble solid (TDS), total nitrogen (TN), and water accommodated fraction (θ), the soil fractal dimension, the content of each particle fraction and the soil physicochemical index were measured and analyzed through a multi-factor correlation analysis method. A geostatistics method was applied to the study spatial variation characteristics and distribution rules of soil profile fractal dimensions. [Results] The soil texture of 0—100 cm in the study area is mainly

收稿日期: 2022-10-24

修回日期: 2022-11-06

资助项目: 国家自然科学基金项目(51969022, 52169004); 内蒙古科技攻关项目(2019GG141)

第一作者: 杜丹丹(1968—), 女, 内蒙古呼和浩特市人, 高级实验师, 硕士, 主要从事土壤、水环境污染物的监测与分析评价的教学与研究。

E-mail: dddpublic@163.com

通信作者: 高瑞忠(1977—), 男, 内蒙古阿拉善人, 教授, 博士, 主要从事水资源评价、生态水文过程模拟研究。E-mail: ruizhonggao@qq.com

<http://stbcj.paperonce.org>

sandy soil and loamy sandy soil, and the soil texture types at different soil depths are basically the same. The fractal dimension of soil (D value) particles in the study area is between 1.672 and 2.785. The D value of soil fractal dimension is significantly positively correlated with clay and silt, and negatively correlated with coarse, medium and fine sand. D value rises with the increase of soil particle content smaller than 0.1 mm particle size and declines with the uplift of soil particle content larger than 0.1 mm particle size. 0.1 mm particle size is the boundary value of D value changing with soil particle size. D value is positively correlated with θ and NT in 3 soil layers, but not significant with pH and TDS. A strong spatial autocorrelation has been shown in the D value of soil fractal dimension. The fractal dimension of soil is strongly spatial self-correlated, the D value of each layer of soil presents a bar-like mosaic distribution characteristic gradually increasing from south to north. D values of the Bayin Ula Mountains and Ulanbuh Desert areas in the north of the basin reach the peak, while D values of the Tugrigol Ditch Land in the southwest edge and the Helan Mountains area in the southeast edge present the lowest D values among the whole basin area. The spatial distribution of D value in surface soil layer is slightly more complicated than that in 50 cm and 100 cm depths due to the influence of human activities, and there is a zonal high value area near Jilantai Salt Lake. [Conclusion] Affected by climate and human activities, the soil texture in Jilantai Salt Lake Basin has changed, the surface soil particles have been seriously eroded by wind, and the deeper soil has been coarse-grained. In the future, the observation and research of soil erosion and degradation should be strengthened.

Keywords: fractal dimension; spatial variation; physical and chemical properties of soil; Jilantai Salt Lake Basin

土壤由母质风化而成,土壤的颗粒组成继承了母质的许多特征,分形特征便是其中之一。土壤颗粒分形特征不仅影响土壤的水力状况和肥力特征,而且与土壤侵蚀和退化状况直接相关^[1-2]。土壤特性在空间分布上的非均一性,称为土壤特性的空间变异性。空间变异性是土壤的基本属性,进而产生了其结构功能上的差异。这种差异是自然因素以及人为因素综合作用的结果。对土壤属性空间变异的充分了解,是管理好土壤养分和合理施肥的基础,同时也为土壤质量的恢复和改良、生态环境的修复提供了理论依据^[3-5]。国内外土壤分形分析及土壤空间变异性研究验证了分形理论在分析土壤空间变异中的有效性和应用潜力,分形理论可以成为量化土壤属性空间变异性及尺度转换的重要工具^[6-7]。

位于干旱半干旱阿拉善高原的吉兰泰盐湖,盐矿资源蕴藏丰富,采盐工业历史悠久,水资源与环境状况极大地制约着区域经济发展。随着环境气候演变,盐湖流域干旱状况不断加剧,在人类经济活动的过度干预下,流域草原生态整体退化,荒漠化日益严重。需要对区域内土壤环境质量空间变异性特征及其影响因素充分认知,对区域土壤环境演变和影响因子响应的规律进行研究,以制定可持续发展的工农畜牧业政策,针对性地提出环境治理方案和防护盐湖沙害治理措施。

本文依据分形理论及其在土壤空间变异研究中的应用,计算土壤颗粒分形维数,分析吉兰泰盐湖盆地流域土壤包气带不同土层下土壤质地、土壤基础理

化指标与土壤颗粒分形维数的响应关系;通过 Kriging 插值对土壤颗粒分形维数进行空间变异及分布特征分析,为保护盐湖区生态环境,延长盐湖资源利用寿命,为预测土壤侵蚀和退化状况提供理论支持。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于阿拉善左旗境内的吉兰泰盐湖盆地流域,连接着乌兰布和沙漠和腾格里沙漠。地理坐标位于东经 105°42',北纬 39°45',海拔 1 013~3 159 m,属典型的温带荒漠干旱区,干旱少雨,蒸发强烈,积温高,风沙多。多年平均降水量 108.8 mm、蒸发量 2 983.3 mm、日照时数 3 316 h、气温 8.6℃。年平均昼夜温差 14.6℃。大面积沙漠戈壁,沙丘漫布,植被稀少,主要植被为旱生和超旱生的灌木和小半灌木,植被生长稀疏,群落结构简单,生态环境极其脆弱。所表现的地貌外表形态主要为垄状沙丘、蜂窝状沙丘和平盖沙 3 种。

1.2 采样与检测方法

以吉兰泰盆地流域界限为边界进行全流域普查,研究区总面积为 20 025 km²,确保采集样品具有代表性,设置典型断面布点。共布设了 50 个土壤采样点(图 1)。每个采样点分 3 层采样,分别记为表层,50 cm 层,100 cm 层。每个样品取 3 个平行样。利用 GPS 进行野外定点,记录每个采样点坐标。

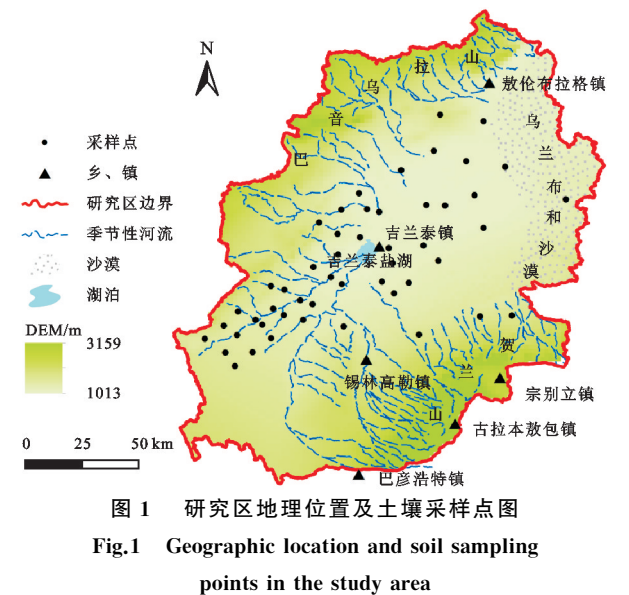


图 1 研究区地理位置及土壤采样点图

Fig.1 Geographic location and soil sampling points in the study area

土壤粒径分布分析采用德国 SYMPATEC RODOS/激光粒度仪测定;全氮(TN)采用 K9840 海能凯氏定氮仪测定;pH 采用赛多利斯 PB-21 pH 计测定(土水质量比 1:5 浸提液);总溶解性固体(TDS)采用 105℃重量法测定(土水质量比 1:5 浸提液);土壤含水率(θ)采用(105±2)℃烘干法测定。均依据土壤检测 NY/T1121-2006 标准进行分析及质量控制。本研究在 2020 年 6—8 月采样,土壤样品的测试在内蒙古农业大学水利与土木工程测试中心完成。

1.3 数据分析方法

依据王国梁等^[8-10]推导的土壤分形模型,计算土壤分形维数 D 。公式如下:

$$\frac{V(r < R)}{V_T} = \left(\frac{R}{\lambda_v}\right)^{3-D} \tag{1}$$

式中: $V(r < R)$ 为所有小于 R 的土粒粒径体积之和; V_T 为土壤颗粒的总体积; R 为某一粒径的特征尺度; λ_v 为土壤粒径分级中最大的粒级值; D 为土壤颗粒的体积分形维数。将公式两边进行对数运算,用采样点土壤粒级系列数据进行线性拟合,获得拟合直线的斜率为 $3-D$,即可以计算出该采样点土壤颗粒分形维数 D 。

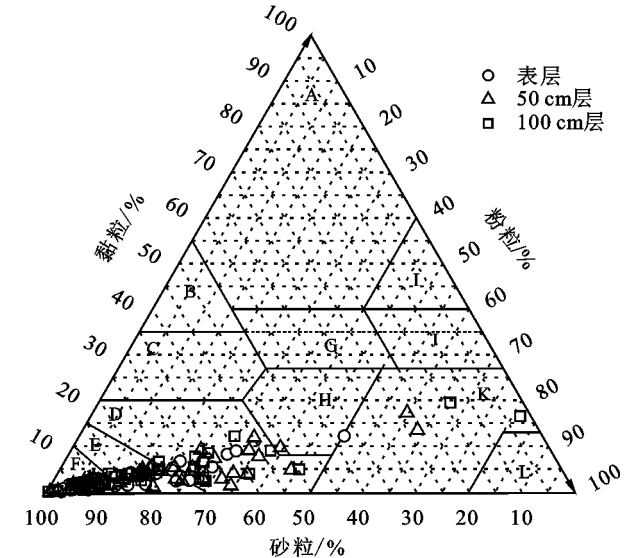
统计学特征分析、相关性检验分析和 K-S 检验分析采用 SPSS 软件完成,半变异函数分析通过 GS+9.0 软件完成,应用 ArcGIS 10.5 进行 Kriging 插值分析,利用 Origin 进行绘图。

2 结果与分析

2.1 土壤的质地分类

基于研究区 50 个采样点表层,50 cm,100 cm 土层深度的土壤颗粒分形试验数据,按照美国制土壤质地分类制砂粒(2~0.05 mm)、粉粒(0.05~0.002 mm)和

黏粒(<0.002 mm),确定土壤质地分类^[11](图 2)。如图可知,各层土壤样本点都集中在砂土、壤砂土、砂壤土 3 种土壤质地类型区域,只有极少数样本点在粉壤土、壤土土壤质地类型区。表层、50 cm,100 cm 土层土壤质地类型所占比重见图 3,其中表层土壤质地属于砂土、壤砂土、砂壤土和粉壤土的样本所占百分比分别为 48%,30%,20%,2%;50 cm 层土壤属于砂土、壤砂土、砂壤土、粉壤土、壤土的样本占比分别为 36%,28%,30%,4%,2%;100 cm 层土壤属于砂土、壤砂土、砂壤土、粉壤土的样本比例分别为 52%,22%,22%,4%。总体分析可知,研究区 0—100 cm 土壤质地以砂土、壤砂土为主,不同土层深度土壤质地基本一致。其主要成因是研究区内风成沙大面积普遍分布,并多以平盖沙为主,其中有互不连续的沙丘分布,厚度 2~5 m,岩性为细、中、粗砂,分选较好。



注:A 为重黏土;B 为砂黏土;C 为砂黏壤土;D 为砂质壤;E 为壤砂土;F 为砂土;G 为黏壤土;H 为壤土;I 为粉黏土;J 为粉质黏壤土;K 为粉壤土;L 为粉砂土。

图 2 研究区土壤质地分类图

Fig. 2 Texture classification of the soil in the study area

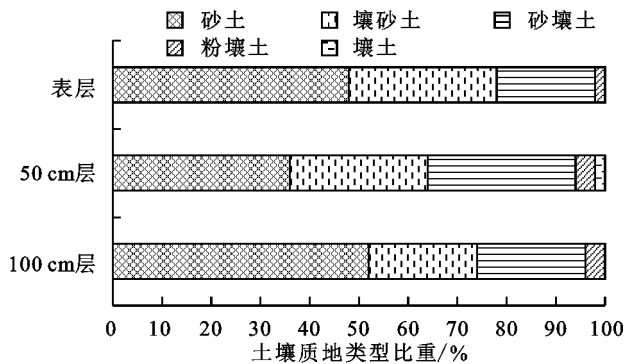


图 3 研究区土壤质地类型比重

Fig. 3 Proportion of soil texture types in the study area

2.2 土壤粒级分布及分形维数统计特征

研究区包气带 0—100 cm 间土壤粒级分布特征

见表 1。对比分析数据可知,表层,50 cm,100 cm 土层深度的土壤粒级结构相似,各级颗粒含量比例范围近似一致。其中细砂含量最高,表层,50 cm,100 cm 土层平均值分别为 47.32%,40.29%,41.51%。其次是粉粒、粗砂、极细砂和中砂,颗粒含量的均值范围分别为 12.53%~18.80%,10.84%~14.77%,10.58%~12.62%和 9.86%~12.43%。黏粒和砾石含量最低,平均值为 2.72%~3.89%和 1.53%~2.07%。整个研究区的土壤粒级分布从平面来说,是西北部较东南部粗;从沙丘本身来说,迎风坡较背风坡粗,下部较上部粗。

依据公式(1)计算出研究区 50 个样本表层,50 cm,100 cm 土层的体积分形维数,其统计学特征见表 2。3 土层土壤样本分形维数值分别为 1.672~

2.716,2.006~2.766,1.963~2.785;样本分形维数平均值分别为 2.416,2.476,2.444,均小于 2.5。各土层分形维数值的峰度分别为 5.759,1.488,0.598,偏度为 -1.802, -0.829, -0.373,变异系数为 7.258,6.155,6.713,说明各土层样本数据均呈现非离散的左偏分散分布。

综合分析表明,研究区深层土壤分形维数比表层有增大趋势,其主要与表层土壤受风蚀影响大,细颗粒物不宜沉积有关。表层土壤分形维数的峰度、偏度绝对值随土层加深呈现减小趋势,变异系数表层大于 50 cm,100 cm 土层,这是因为较深层土壤风成沉积的分选性较好,导致分形维数数据的变异性减弱,数据分布较表层均衡。

表 1 土壤粒级分布统计

Table 1 Statistics of soil particle size distribution

层位	统计项目	粒度分布/% (美国农业部 USDA)						
		砾石 >2 mm	粗砂 2~0.5 mm	中砂 0.5~0.25 mm	细砂 0.25~0.1 mm	极细砂 0.1~0.05 mm	粉粒 0.05~0.002 mm	黏粒 <0.002 mm
表层	最大值	12.21	51.36	37.85	69.65	25.85	30.95	8.80
	最小值	0.00	0.18	0.71	23.15	1.82	1.34	0.01
	平均值	1.53	10.84	12.43	47.32	12.62	12.53	2.72
50 cm	最大值	20.93	71.91	41.19	78.83	27.41	63.25	17.18
	最小值	0.00	0.29	0.00	0.00	0.00	0.54	0.00
	平均值	1.98	13.12	9.86	40.29	12.08	18.80	3.89
100 cm	最大值	17.14	56.93	52.30	72.03	26.63	80.80	19.52
	最小值	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.29	0.00
	平均值	2.07	14.77	11.76	41.51	10.58	15.74	3.57

表 2 不同深度土壤分形维数统计学特征

Table 2 Statistical characteristics of soil fractal dimension at different depths

层位	样本数	最小值	最大值	平均值	峰度	偏度	CV/%	K-S 检验
表层	50	1.672	2.716	2.416	5.759	-0.998	7.258	0.186
50 cm 层	50	2.006	2.766	2.476	1.488	-0.829	6.155	0.119
100 cm 层	50	1.963	2.785	2.484	0.598	-0.373	6.713	0.062

2.3 分形维数与土壤理化特性的关系

根据杨培岭等^[12-13]的研究,土壤分形维数的大小可以表征土壤结构的紧实度、通透性以及单一粒级分布的集中度。因此,为进一步量化分析分形维数与土壤性状的关系,本文将研究区 3 层土壤采样点的分形维数 D 值与土壤粒径分布、土壤基本理化指标 pH 值、总溶解性固体 TDS、总氮 TN、含水率 θ 做相关性分析,并绘制土壤分形维数 D 与土壤粒级分布相关性图(图 4)。

2.3.1 分形维数与土壤粒径分布的关系 分析研究区表层、50 cm 层、100 cm 层土壤分形维数 D 值与各粒级含量百分数间的相关系数(表 3,图 4)可以看出,分形维数与黏粒和粉粒为极显著正相关($p < 0.01$ 显

著水平),相关系数分别为 0.738,0.815,0.813,0.658,0.781,0.768。粗砂、中砂、细砂与土壤分形维数 D 值呈现负相关。与中砂在 3 土层均表现为显著负相关($p < 0.01$ 显著水平),且相关系数分别为 -0.437, -0.487, -0.519。整体相关分析可以得出, D 值随着小于 0.1 mm 粒径土壤颗粒含量的升高而增大,随着大于 0.1 mm 粒径土壤颗粒含量的升高而减小,0.1 mm 粒径是 D 值随土壤粒径变化的分界值。这与姚娇转等^[14]科尔沁沙地分形特征的研究结果相一致,可能是因为研究区都是内蒙古境内的寒旱区沙地,土壤质地结构相似,均为风成沙土,砂粒含量比例较大,而黏粒和粉粒含量比例较低。

由此可见,土壤颗粒分形维数随土壤粒径含量变

化而变化,黏粒含量与分形维数的相关性最好,黏粒粉粒含量越高分形维数越大,砂粒含量越高分形维数越小,所以土壤分形维数可以作为表征土壤质地结构的指标。

表 3 不同深度土壤分形维数 D 与土壤粒级分布相关系数

Table 3 Correlation coefficient between soil fractal dimension D and soil particle size distribution at different depths							
分形维数 (层位 cm)	砾石 >2 mm	粗砂 2~0.5 mm	中砂 0.5~0.25 mm	细砂 0.25~0.1 mm	极细砂 0.1~0.05 mm	粉粒 0.05~0.002 mm	黏粒 <0.002 mm
D (表层)	0.227	-0.322*	-0.437**	-0.262	0.225	0.658**	0.738**
D (50)	-0.050	-0.372*	-0.487**	-0.290*	0.187	0.781**	0.815**
D (100)	0.112	-0.185	-0.519**	-0.425**	0.023	0.768**	0.813**

注: ** 表示 $p<0.01$ 显著水平; * 表示 $p<0.05$ 显著水平。

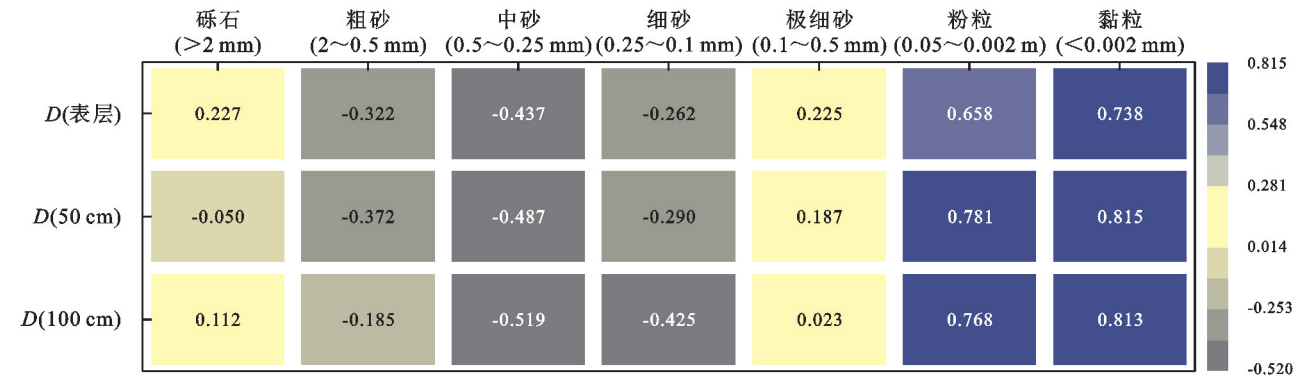


图 4 土壤分形维数 D 与土壤粒级分布相关性

Fig. 4 Correlation between soil fractal dimension D and soil particle size distribution

2.3.2 分形维数与土壤理化指标的关系 由 3 土层土壤基本理化指标与分形维数 D 值的相关性分析(表 4)可知, D 值与含水率在 3 土层均呈现极显著正相关($p<0.01$ 显著水平), 相关系数分别为 0.453, 0.483, 0.573。在表层和 100 cm 层与土壤总氮表现为极显著正相关($p<0.01$ 显著水平), 50 cm 层为显著正相关($p<0.05$ 显著水平)。而与 pH 值负相关, 与 TDS 正相关但相关性不显著。与含水率和总氮相比 pH 值和 TDS 对 D 值的影响较小。一方面黏粒粒级含量高的土壤具有较好的团聚体结构, 毛管孔隙增多单位表面积增大, 因此土壤的吸水 and 持水能力增强, 且土壤黏粒含量、 D 值、含水率相关关系一致。另一方面土壤总氮随 D 值正向相关的规律, 说明总氮在土壤中的固定可能与黏粒含量有关, 土壤分形维数 D 值越大, 黏粒含量比例越高, 土壤的比表面积越大, 对氮素的吸附能力越强, 这与苏永中等^[15]的研究结论相一致。

表 4 不同深度土壤分形维数 D 与土壤理化指标相关系数

Table 4 Correlation coefficient between soil fractal dimension D and soil physical and chemical indicators at different depths				
分形维数 (层位)	pH 值	总溶解性固体/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	总氮/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	含水率/ %
D (表层)	-0.070	0.090	0.389**	0.453**
D (50 cm)	-0.260	0.199	0.358*	0.483**
D (100 cm)	-0.179	0.108	0.493**	0.573**

注: * * $p<0.01$ 显著水平 * $p<0.05$ 显著水平。

2.4 土壤分形维数的空间分布特征

干旱区土壤的体积分形维数空间变异性研究对于评价土壤质地、宜耕状况、退化程度等具有重要意义, 有利于因地制宜地进行科学化农牧业土地利用管理。本文应用地统计学方法研究了吉兰泰盆地流域不同剖面层次土壤分形维数空间变异特征。依据统计学特征(表 2)研究区各层土壤分形维数 D 值的偏度在区间 $[-1, 1]$ 内^[16], 接近正态分布。将原始数据进行对数转换, 应用 K-S 检验, 结果显示经对数转换后各层土壤 D 值数据均服从正态分布。

应用 GS+9.0 对研究区各层土壤 D 值数据进行半方差函数分析计算, 结果见(表 5)。不同土层 D 值的最佳拟合模型不同, 表层、100 cm 层的拟合模型是高斯模型, 50 cm 层的拟合模型是球状模型。由上到下各层模型拟合度分别为 0.998, 0.872, 0.924, 表明所选择模型均能反映分析样本的空间分布特征。由表 5 结果可知, 各土层拟合模型的块基比数值为 0.114%, 0.687% 和 0.316%, 均 $<25\%$, 表明研究区土壤 D 值具有强烈的空间自相关性^[17-18], 相关性分别表现在 11.414 km, 10.2 km 和 7.188 km 的变程范围之内。说明土壤母质、气候环境等自然因素在土壤形成过程是主要影响因素, 风成沙土壤的分形特征由自然沉积环境起主导作用, 因此干旱区土壤的分形维数可作为一个衡量土壤演变的综合指标^[19-20]。

表 5 不同深度土壤分形维数 D 值的半方差函数模型与参数

Table 5 Semi variance function model and parameters of soil fractal dimension D at different depth

层位	拟合模型	块金值 C_0	基台值 $C_0 + C$	块金值/基台值 $(C_0 / C_0 + C) / \%$	变程/ km	决定系数 R^2	残差平方 RSS
表层	高斯模型	0.001	0.878	0.114	11.414	0.998	4.937 E-08
50 cm 层	球状模型	0.002	0.291	0.687	10.200	0.872	9.137 E-08
100 cm 层	高斯模型	0.001	0.316	0.316	7.188	0.924	1.514 E-07

应用 Kriging 插值绘制研究区土壤分形维数 D 值的空间分布图(图 5)。由不同土层对比分析可知,各层土壤 D 值具有相似的空间分布特征, D 值的高值区主要分布于巴音乌拉山以及乌兰布和沙漠北部地区,低值区主要分布在西南部图格力高勒沟台地和东南部贺兰山地区,中部锡林高勒镇及以南区域表现为块状的中值区。表层土壤在吉兰泰盐湖附近有 D 值呈带状分布的高值区,50 cm,100 cm 深度土层吉

兰泰盐湖附近未出现 D 值分布的高值区,盐湖周围区域 D 值随土层深度增加而减小。总体上,研究区土壤分形维数 D 值呈现出由南向北逐渐增大的条块状分布特征。50 cm,100 cm 土层 D 值分布近乎一致,而与表层 D 值变化特征差异明显,说明表层土壤因频繁受到人类活动的影响,土壤质地发生变化。研究区南部区域地貌类型多为低山台地和流动沙丘,植被覆盖稀少,风蚀严重, D 值普遍较小。

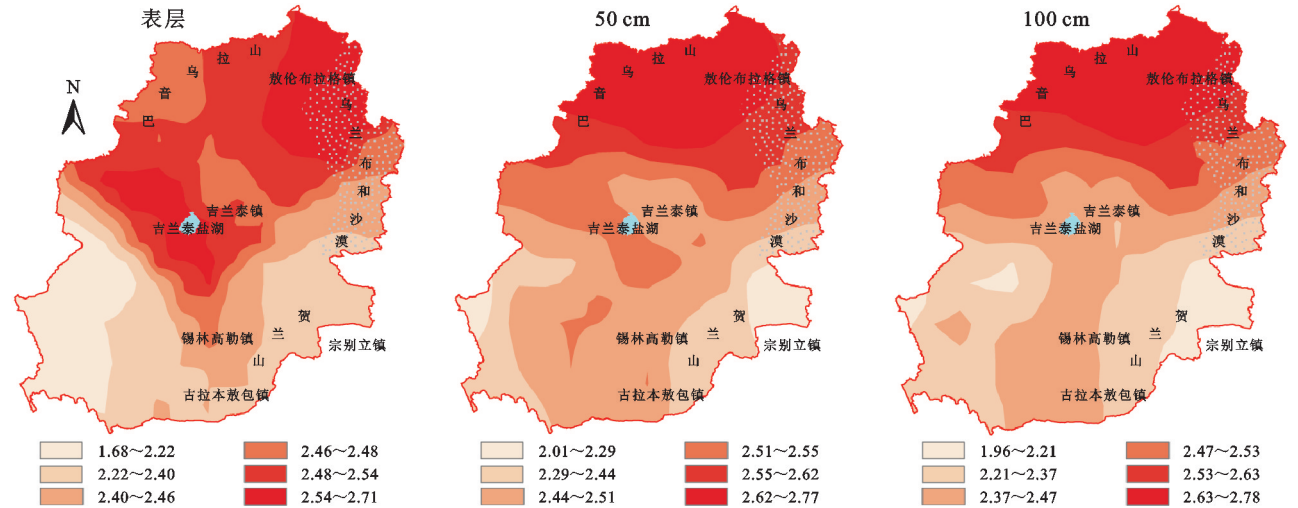


图 5 研究区不同深度土壤分形维数 D 值的空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of soil fractal dimension D at different depth in the study area

2.5 讨论

研究区土壤颗粒主要分布在 0.1~0.25,0.25~0.5 mm 范围内,<0.002 mm 和 >2 mm 的颗粒比重很小,且土壤质地类型砂土、壤砂土占比 72%。分析原因在于研究区属干旱荒漠气候,植被稀疏,土壤以风成沙土和流动沙丘为主^[21-22]。同时从土壤颗粒分布来看,表层粉粒(0.05~0.002 mm)和黏粒(<0.002 mm)均小于深层土层,说明表层土壤颗粒受风蚀作用明显,土壤质地较深层土壤具有粗粒化现象。研究区土壤分形维数与黏粒和粉粒为显著正相关,与粗砂、中砂、细砂呈显著负相关,分形维数随小于 0.1 mm 粒径土壤颗粒含量的升高而增大,随大于 0.1 mm 粒径土壤颗粒含量的升高而减小;可见,土壤颗粒分形维数越大,土壤越细粒化。同时随土层加深土壤分形维数逐渐增大,而变异系数逐渐减小,说明表

层土壤颗粒遭吹蚀严重,改变了土壤粒级的分布,进而潜移默化地改变了土壤结构^[23-24]。土壤分形维数能表征土壤对沙漠环境变化的响应特征和土壤的演变趋势^[6,25],可以作为一项评价沙漠土壤质量演变的定量指标^[26]。

土壤分形维数值是由土壤质地类型和土壤颗粒分布决定的,因此,分形维数能够表征土壤的结构和性质^[27-28]。土壤质地类型决定着土壤养分元素的供应能力,土壤颗粒分布影响着养分、水分的亲和、离子交换以及生物活动。研究区土壤分形维数与土壤含水率、总氮均表现为极显著正相关,且随土层深度增加,相关性增强。这充分说明与土壤分形维数显著正相关的物理性黏粒、粉粒以及较细砂粒是构成土壤肥力水平的重要组成部分^[29-30]。黏粒、粉粒使土壤的吸水 and 持水能力增强,并与土壤中的有机养分黏结,为

改善土壤环境质量提供充足的动力^[26],因此土壤分形维数可以作为土壤肥力特性的量化指标^[27]。

吉兰泰盐湖盆地流域土壤 pH 值与土壤颗粒分形维数相关性不显著,这与姚姣转等^[14]在科尔沁沙地、罗雅曦等^[24]在腾格里沙漠的研究结果一致。而本研究土壤 TDS 与土壤颗粒分形维数相关性不显著,则与姚姣转等、罗雅曦等的土壤颗粒分形维数与土壤电导率呈显著正相关的研究结果不一致。由于吉兰泰地区土壤包气带呈弱碱性氧化环境,pH 值整体较高为 7.58~10.44,且 TDS 含量普遍偏高,是区域干热气候和水文地球化学过程中,土体淋溶、蒸发浓缩等综合作用下形成于土壤中,可以认为气候因素对土壤质地和理化性质均起着决定性的作用^[31]。旱区风成沙土壤 pH 值、TDS 与土壤颗粒分形维数相关性及其内在机理还有待于进一步研究。

不同土层分形维数的空间分布图对比分析可知,研究区表层分形维数值分布变化特征差异明显,说明表层土壤因频繁受到气候和人类活动的影响,土壤质地发生变化,风蚀严重。

3 结论

(1) 吉兰泰盐湖盆地流域土壤 0—100 cm 质地类型以砂土、壤砂土为主。研究区土壤颗粒分形维数在 1.672~2.785。 D 值与黏粒和粉粒呈现极显著正相关,与粗砂、中砂、细砂为显著负相关;0.1 mm 粒径是 D 值随土壤粒径变化的分界值。

(2) 吉兰泰盐湖盆地流域土壤表层、50 cm 层和 100 cm 层分形维数 D 值对各理化指标的响应具有相同的规律, D 值与含水率、总氮在 3 土层均呈现显著正相关,而与 pH 值和 TDS 相关性不显著。

(3) 吉兰泰盐湖盆地流域土壤分形维数 D 值具有强烈的空间自相关性,风成沙土壤的分形特征由自然沉积环境起主导作用。

(4) 吉兰泰盐湖盆地流域各层土壤 D 值具有相似的空间分布规律,均呈现出由南向北逐渐增大的条块状分布特征。巴音乌拉山北部和乌兰布和沙漠北部地区是 D 值的高值区,图格力高勒沟台地和贺兰山地区有全流域 D 值的最低区域。

参考文献:

[1] 石占飞,王力,王建国.陕北神木矿区土壤颗粒体积分形特征及意义[J].干旱区研究,2011,28(3):394-400.
Shi Z F, Wang L, Wang J G. Volume fractal characteristics and significance of soil particles in the Shenmu

Colliery in North Shaanxi Province [J]. Arid Zone Research, 2011, 28(3): 394-400.

[2] Tyler S W, Wheatcraft S W. Application of fractal mathematics to soil water retention estimation[J]. Soil Science Society of America Journal, 1989, 53(4): 987-996.

[3] 方萍,吕成文,朱艾莉.分形方法在土壤特性空间变异研究中的应用[J].土壤,2011,43(5):710-713.
Fang P, Lv C W, Zhu A L. Applied studies of fractal theory on spatial variability of soil properties: A review [J]. Soils, 2011, 43(5): 710-713.

[4] Berendse F, Ruijven J V, Jongejans E, et al. Loss of plant species diversity reduces soil erosion resistance[J]. Ecosystems, 2015, 18(5): 881-888.

[5] Wang X D, Li M H, Liu S Z, et al. Fractal characteristics of soils under different land-use patterns in the arid and semiarid regions of the Tibetan Plateau, China[J]. Geoderma, 2005, 134(1/2): 56-61.

[6] 贾晓红,李新荣,张景光,等.沙冬青灌丛地的土壤颗粒大小分形维数空间变异性分析[J].生态学报,2006,26(9):2827-2833.
Jia X H, Li X R, Zhang J G, et al. Spatial heterogeneity analysis of fractal dimension of soil particle for *Ammodendron mongolicum* Shrub [J]. Acta Ecologica, 2006, 26(9): 2827-2833.

[7] Yu Y, Wei W, Chen L D, et al. Land preparation and vegetation type jointly determine soil conditions after long-term land stabilization measures in a typical hilly catchment, Loess Plateau of China[J]. Journal of Soils and Sediments, 2017, 17(1): 144-156.

[8] 王国梁,周生路,赵其国.土壤颗粒的体积分形维数及其在土地利用中的应用[J].土壤学报,2005,42(4):545-550.
Wang G L, Zhou S L, Zhao Q G. Volume fractal dimension of soil particles and its applications to land use [J]. Acta Pedologica Sinica, 2005, 42(4): 545-550.

[9] 孟婷婷.详述土壤颗粒体积单重分形理论模型计算过程[J].科技与创新,2021,8(2):64-65.
Meng T T. A discussion about the calculation process of single fractal theoretical model of soil particle volume [J]. Science and Technology & Innovation, 2021, 8(2): 64-65.

[10] 伏耀龙,张兴昌,王金贵.岷江上游干旱河谷土壤粒径分布分形维数特征[J].农业工程学报,2012,28(5):120-125.
Fu Y L, Zhang X C, Wang J G. Fractal dimension of soil particle-size distribution characteristics in dry valley of upper Minjiang River [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural, 2012, 28(5): 120-125.

- [11] 卓志清,刘永兵,赵从举,等.河塘底泥与岸边土壤粒径分形维数及其性状关系:以海南岛南渡江下游塘柳塘为例[J].土壤通报,2015,46(1):62-67.
Zhuo Z Q, Liu Y B, Zhao C J, et al. Fractal dimension and characteristics of soil particle size in pond sediment and farmland soil: An example of tangliu pond at the lower reach of Nandu River, Hainan Island [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2015, 46(1): 62-67.
- [12] 杨培岭,罗远培,石元春.用粒径的重量分布表征的土壤分形特征[J].科学通报,1993,38(20):1896-1899.
Yang P L, Luo Y P, Shi Y C. Fractal features of soils characterized by grain size weight distribution [J]. Chinese Science Bulletin, 1993, 38(20): 1896-1899.
- [13] 张季如,朱瑞庚,祝文化.用粒径的数量分布表征的土壤分形特征[J].水利学报,2004,35(4):67-71,79.
Zhang J R, Zhu R G, Zhu W H. Fractal features of soils characterized by grain size distribution [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2004, 35(4): 67-71, 79.
- [14] 姚姣转,刘廷玺,童新,等.科尔沁沙地沙丘—草甸相间地土壤颗粒的分形特征[J].中国沙漠,2016,36(2):433-440.
Yao J Z, Liu T X, Tong X, et al. Soil particle fractal dimension in the dune-meadow ecotone of the Horqin Sandy Land [J]. Journal of Desert Research, 2016, 36(2): 433-440.
- [15] 苏永中,赵哈林.科尔沁沙地农田沙漠化演变中土壤颗粒分形特征[J].生态学报,2004,24(1):71-74.
Su Y Z, Zhao H L. Fractal features of soil particle size distribution in the desertification process of the farmland in Horqin Sandy Land [J]. Acta Ecologica Sinica, 2004, 24(1): 71-74.
- [16] Alemi M H, Azari A B, Nielsen D R. Kriging and univariate modeling of a spatial correlated data [J]. Soil Technology, 1988, 1(2): 117-132.
- [17] 孙波,赵其国,闫国年.低丘红壤肥力的时空变异[J].土壤学报,2002,39(2):190-198.
Sun B, Zhao Q G, Lu G N. Spatio-Temporal Variability of Red Soil Fertility in Low Hill Region [J]. Acta Pedologica Sinica, 2002, 39(2): 190-198.
- [18] 席小康,朱仲元,郝祥云.锡林河流域土壤有机碳空间变异分析[J].水土保持研究,2017,24(6):97-104.
Xi X K, Zhu Z Y, Hao X Y. Spatial variability of soil organic carbon in Xilin River Basin [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2017, 24(6): 97-104.
- [19] 郝伟华,刘任涛,赵娟,等.干旱风沙区路域柠条灌丛林地土壤重金属分布及其与土壤分形维数的关系[J].水土保持研究,2018,25(6):196-202.
Xi W H, Liu R T, Zhao J, et al. Distribution of soil heavy metal contents in *Caragana korshinskii* Shrub Habitats on the proximity of expressway and its relationship with soil fractal dimension in deserted region [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2018, 25(6): 196-202.
- [20] 刘涛,庞奖励,黄春长,等.湖北郧县黄坪村黄土—古土壤序列体积分形维数特征及其环境意义[J].山东农业科学,2018,50(4):73-78.
Liu T, Pang J L, Huang C C, et al. Volumetric fractal dimension characteristics of loess-paleosol sequence and its environmental significance in Huangping Village, Yunxian County, Hubei Province [J]. Shandong Agricultural Sciences, 2018, 50(4): 73-78.
- [21] 施明,王锐,孙权,等.腾格里沙漠边缘区植被恢复与土壤养分变化研究[J].水土保持通报,2013,33(6):107-111.
Shi M, Wang R, Sun Q, et al. Vegetation restoration and soil nutrient changes in edge of tengger desert [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2013, 33(6): 107-111.
- [22] Rosell R A, Galantini J A, Suñer L G. Long-Term crop rotation effects on organic carbon, nitrogen, and phosphorus in haplustoll soil fractions [J]. Arid Soil Research and Rehabilitation, 2000, 14(4): 309-315.
- [23] 王国玲,苏志珠,毛丽,等.中国北方农牧交错带鄂尔多斯高原段土壤表层粒度特征[J].中国沙漠,2019,39(3):183-190.
Wang G L, Su Z Z, Mao L, et al. Characteristics of soil surface grain size in ordos plateau along the agro-pastoral ecotone of north China [J]. Journal of Desert Research, 2019, 39(3): 183-190.
- [24] 罗雅曦,刘任涛,张静,等.腾格里沙漠草方格固沙林土壤颗粒组成、分形维数及其对土壤性质的影响[J].应用生态学报,2019,30(2):525-535.
Luo Y X, Liu R T, Zhang J, et al. Soil particle composition, fractal dimension and their effects on soil properties following sand-binding revegetation within straw checkerboard in Tengger Desert, China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2019, 30(2): 525-535.
- [25] 蔺芳,刘晓静,张家洋.人工草地种植模式对沙化土壤团聚体及有机质含量的影响[J].中国沙漠,2018,38(6):1219-1229.
Lin F, Liu X J, Zhang J Y. Effects of planting patterns on soil aggregates and organic matter characteristics of sandy soil [J]. Journal of Desert Research, 2018, 38(6): 1219-1229.
- [26] 李学斌,张义凡,陈林,等.荒漠草原典型群落土壤粒径

- 和养分的分布特征及其关系研究[J]. 西北植物学报, 2017, 37(8): 1635-1644.
- Li X B, Zhang Y F, Chen L, et al. Relationship between soil particle size distribution and soil nutrient distribution characteristics in typical communities of desert grassland[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2017, 37(8): 1635-1644.
- [27] 吕圣桥. 黄河三角洲滩地土壤颗粒分形特征及其与土壤性质的相关性研究[D]. 山东农业大学, 2012.
- Lv S Q. Study on Fractal Characteristics of Soil Particles and Their Correlation with Soil Properties In Lowlands of The Yellow River Delta[D]. Shandong Agricultural University, 2012.
- [28] 韩旭娇, 张国明, 刘连友, 等. 呼伦湖西南部咸水湖干涸湖滨带沉积物粒度特征[J]. 中国沙漠, 2019, 39(2): 158-165.
- Han X J, Zhang G M, Liu L Y, et al. Grain size characteristics of sediments in the dry lakeside of salt lake in the southwest of Hulun Lake[J]. Journal of Desert Research, 2019, 39(2): 158-165.
- [29] 杨文斌, 李卫, 党宏忠, 等. 低覆盖度治沙原理、模式与效果[M]. 北京: 科学出版社, 2016.
- Yang W B, Li W, Dang H Z, et al. Desertification Control with Low Coverage Vegetation[M]. Beijing: Science Press, 2016.
- [30] 孙传龙, 张卓栋, 邱倩倩, 等. 锡林郭勒草地表层土壤粒度分形特征及其与风蚀的关系[J]. 中国沙漠, 2017, 37(5): 978-985.
- Sun C L, Zhang Z D, Qiu Q Q, et al. Fractal characteristics of surface soils in the Xilinguole grassland landscape system and its relationship to wind erosion[J]. Journal of Desert Research, 2017, 37(5): 978-985.
- [31] 高瑞忠, 张阿龙, 张生, 等. 西北内陆盐湖盆地土壤重金属 Cr, Hg, As 空间分布特征及潜在生态风险评价[J]. 生态学报, 2019, 39(7): 2532-2544.
- Gao R Z, Zhang A L, Zhang S, et al. Spatial distribution characteristics and potential ecological risk assessment of Cr, Hg, and As in soils of the salt lake basin in Northwest China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(7): 2532-2544.
- ~~~~~
- (上接第 92 页)
- [26] 季芳, 范林峰, 匡星星, 等. 青藏高原多年冻土退化对蒸散发的影响[J]. 水科学进展, 2022, 33(3): 390-400.
- Ji F, Fan L F, Kuang X X, et al. Impact of permafrost degradation on evapotranspiration in the Qinghai-Tibet Plateau[J]. Advances in Water Science, 2022, 33(3): 390-400.
- [27] 孙倩. 无定河流域水沙变化归因分析[D]. 西安: 西安理工大学, 2018.
- Sun Q. Attribution Analysis of Water and Sediment Changes in the Wuding River Basin[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2018.
- [28] 孙龙, 张光辉, 王兵, 等. 黄土高原不同退耕年限刺槐林地土壤侵蚀阻力[J]. 农业工程学报, 2017, 33(10): 191-197.
- Sun L, Zhang G H, Wang B, et al. Soil erosion resistance of *Robinia pseudoacacia* plantations with different years of cropland abandonment in the Loess Plateau [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(10): 191-197.
- [29] 赵阳, 胡春宏, 张晓明, 等. 近 70 年黄河流域水沙情势及其成因分析[J]. 农业工程学报, 2018, 34(21): 112-119.
- Zhao Y, Hu C H, Zhang X M, et al. Water-sediment situation and its causative analysis in the Yellow River Basin over the past 70 years[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34(21): 112-119.
- [30] 邵全忠, 杨丹, 刘华, 等. 秦岭华北落叶松人工林耗水规律与环境因子关系研究[J]. 中国农村水利水电, 2019(3): 66-72.
- Shao Q Z, Yang D, Liu H, et al. Study on the water consumption characteristics of *Larix principis-rupprechtii* plantations in the Qinling Mountains and their relationship with environmental factors [J]. China Rural Water and Hydropower, 2019(3): 66-72.
- [31] Liang W, Bai D, Wang F, et al. Quantifying the impacts of climate change and ecological restoration on streamflow changes based on a Budyko hydrological model in China's Loess Plateau[J]. Water Resources Research, 2015, 51(8): 6500-6519.