

松嫩平原西部典型盐生景观土壤分形维数及盐碱化特征

白玉锋^{1,2}, 孙 静^{1,2}, 李秀军², 陈国双²,
李晓宇², 鲁新蕊², 文波龙², 张继涛²

(1.中国科学院大学,北京 100049;2.中国科学院东北地理与农业生态研究所,长春 130102)

摘要:为探究松嫩平原西部典型盐生景观土壤颗粒粒度组成及分形特征与土壤盐碱化之间的关系,采用体积分形维数模型计算了 6 种典型盐生景观土壤表层 0—30 cm 颗粒组成及分形维数,结合相关分析法分析了土壤分形维数与质地、盐碱特征之间的相关性。结果表明:(1)6 种典型盐生景观中农田土壤分形维数值最小(2.35),碱蓬群落土壤最大(2.61),分形维数均值为 2.48,分形维数随盐生景观土壤碱化程度增加而增大。(2)土壤质地越粗,砂粒含量越高,分形维数值越小;土壤质地越细,黏粒和粉粒含量越高,分形维数越大。(3)分形维数与盐分含量呈显著正相关($r=0.87, P<0.05$),尤其与盐分组成中 HCO_3^- 含量呈极显著正相关($r=0.89, P<0.01$),与养分中总磷含量呈极显著正相关($r=0.90, P<0.01$)。(4)土壤颗粒组成中砂粒、粉粒和黏粒与盐分、 HCO_3^- 及总磷含量也存在极显著相关性。不同盐生景观土壤分形维数与土壤颗粒组成和土壤盐分之间存在显著的相关性,因此可以用分形维数来反映土壤质地和指示土壤盐碱化特征。

关键词:分形维数;颗粒组成;苏打碱土;碱化度;松嫩平原西部

中图分类号:S152.3

文献标识码:A

文章编号:1009-2242(2021)03-0163-07

DOI:10.13870/j.cnki.stbcxb.2021.03.023

Fractal Dimension and Salinization Characteristics of Typical Halophytic Landscape Soil in Western Songnen Plain

BAI Yufeng^{1,2}, SUN Jing^{1,2}, LI Xiujun², CHEN Guoshuang²,
LI Xiaoyu², LU Xinrui², WEN Bolong², ZHANG Jitao²

(1.University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049;

2.Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130102)

Abstract: The objective of this study was to explore the correlation between characteristics of fractal dimension and soil texture and alkalinity of typical halophytic landscape in the Western Songnen Plain, China. A volume-based fractal model was adopted to calculate the particle-size composition and fractal dimension of the 0—30 cm soil of six typical halophytic landscapes, and the relationships among soil fractal dimension and texture, alkalinity characteristics were analyzed by correlation analysis. The results showed that: (1) Among the six typical halophytic landscapes, the fractal dimension of farmland soil was the smallest (2.35), and that of *Artemisia suaeda* community soil was the largest (2.61), and the average fractal dimension was 2.48. The fractal dimension increased with the increasing of alkalization degree of halophytic landscape soil. (2) The coarser the soil texture was, the higher the sand content was, and the smaller the fractal dimension value was. The finer the soil texture was, the higher the content of clay and silt was, and the larger the fractal dimension was. (3) Fractal dimension was significantly positively correlated with salt content ($r = 0.87, P < 0.05$), especially with HCO_3^- content in salt composition ($r = 0.89, P < 0.01$) and total phosphorus content in nutrients ($r = 0.90, P < 0.01$). (4) There were also significant correlations among particle-size composition, salt content, HCO_3^- content and total phosphorus. The fractal dimension of different halophytic landscape soils were significantly correlated with soil particle size composition and soil salinity, so the fractal dimensions could be used to reflect soil texture and indicate soil salinization features.

收稿日期:2020-12-11

资助项目:中国科学院战略性先导科技专项(XDA23070503);国家自然科学基金项目(41771550,41877124,41971140);吉林省优秀青年人才基金项目(20180520097JH)

第一作者:白玉锋(1988—),男,在读博士研究生,主要从事土壤物理及土壤改良研究。E-mail:byfzy2012@hotmail.com

通信作者:李秀军(1971—),男,研究员,博士生导师,主要从事盐渍土生态及农田生态研究。E-mail:lixijun@iga.ac.cn

Keywords: fractal dimension; particle composition; soda alkaline soil; alkalinity; Western Songnen Plain

土壤颗粒构成了土壤基本组成,其大小和比例影响土壤质地、孔隙分布及结构,从而影响土壤饱和及未饱和状态下水分运动参数、地表径流形成、土壤抗侵蚀能力及土壤养分保持等^[1-3],被认为是土壤最重要的物理性质之一,也是土壤结构研究的主要内容。由于土壤颗粒在组成上具有自相似特性,因而也具有分形特征^[4]。自分形理论被运用到土壤学以后,众多学者^[5-8]围绕土壤颗粒数量、体积、质量进行了土壤颗粒分形特征模型研究。其中 Tayler 等^[6]和王国梁等^[7]提出的基于土壤颗粒体积分形模型因为其数据可以利用激光粒度分析仪快速获取而受到广泛引用。另外,分形理论不仅在土壤颗粒组成上得到广泛运用,而且在定量研究土壤团聚体形态^[9]、土壤孔隙分布特征^[10]等方面也受到关注。

分形维数在研究土壤颗粒组成和土壤性质及土壤环境问题中起到“桥梁”作用,分形维数值的变化可以指示环境变化信息。土壤颗粒分形维数可以指示土壤荒漠化^[11]、植物入侵^[12]、植被恢复^[13]一系列环境问题。洪明海等^[10]研究发现,随盐分的增加,分形维数先减小后增大;Zhao 等^[14]系统分析了黑河下游硫酸盐型土壤颗粒组成与盐分之间的关系,研究结果表明,分形维数与盐分含量呈显著线性正相关;Zhao 等^[15]对于干旱区土壤盐分和质量分形维数的研究也发现,二者之间存在显著的相关性,并且分形维数对土壤水分含量也有显著影响。上述研究结果表明,土壤颗粒组成及分形维数不仅影响土壤水含量及其分布,而且还会影响土壤盐分含量。以往研究^[14-15]主要涉及 NaCl 型和 Na₂SO₄型盐渍土,而苏打型盐渍土土壤颗粒组成及分形维数与土壤盐分是否也存在这样的关系还尚不明确。探明苏打型盐渍土土壤颗粒组成及分形维数与土壤盐分含量之间的关系,对研究区土壤盐碱化防治具有重要意义。因此,本研究选择松嫩平原西部 6 种典型分布的盐生景观,分析其土壤粒度特征和分形维数与土壤盐碱化之间的关系,以期为区域土壤盐碱化防治、改良和利用提供理论依据及数据支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于中国科学院松嫩平原西部盐碱湿地生态研究站(45°13′—45°16′N,123°15′—123°21′E,图 1),同时也是牛心套保国家湿地公园所在地,整体位置处于吉林省大安市西南部。该区地处霍林河与洮儿河下游,地势低平,海拔高度 120~160 m,总坡降为 1/5000~1/8000。区域地势主要由水力运动产生的河间积水洼地和河漫滩构成^[16]。气候特征为温带半湿

润向半干旱过渡的大陆性季风气候,年平均气温为 4.3℃,年均降水量为 396 mm,降雨主要集中在 6—8 月,占全年降雨量的 73%,年潜在蒸发量为 1 817 mm^[17]。地带性土壤为黑钙土,微地形差异导致土壤分布不同。苏打草甸碱土分布在地势低平地带的高起地貌部位,多与盐碱化草甸土呈复域分布,碱化度≥30%,最高可达 80%~90%,pH 为 9.0~10.0。苏打草甸盐土分布在地势低平地带,呈斑块状复区分布在草甸碱土中,表层含盐量≥0.7%。此外,还有草甸沼泽土、黑砂土和淡黑钙土等^[16]。区域内植被分布受微地形影响明显,地势低平区域主要分布碱蓬—碱蒿群落(*Ass. Artemisia suaeda*),有时还有西伯利亚蓼(*Polygonum sibiribiricum*),少量扫帚草(*Chloris vergata*)等。地势平坦区域主要分布羊草群落或羊草(*Ass. Aneurolepidium. chinense*) + 杂草群落,并且随着水分增多,芦苇(*Phragmites communis*)分布比例增加;有时形成由羊草草原向芦苇沼泽过渡植被。碱斑分布地区往往呈寸草不生的裸露景象^[18]。

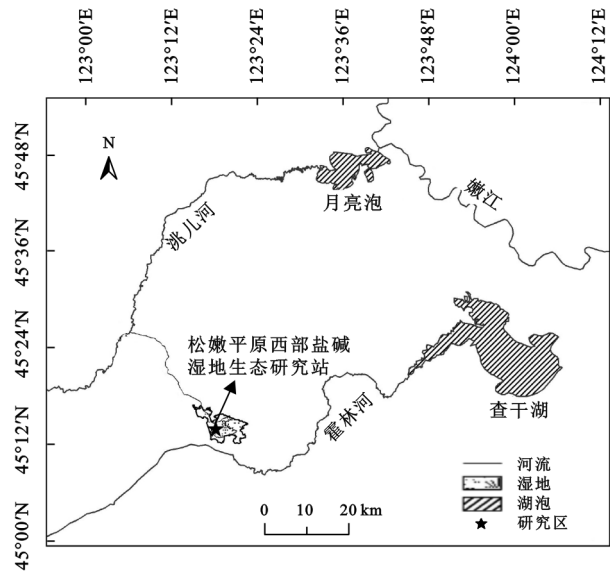


图 1 研究区概况

1.2 样品采集与室内测定

2019 年 8 月于研究区河漫滩选择了 6 种典型盐生景观,分别为农田(玉米地)、羊草群落、芦苇群落、虎尾草群落、碱蓬群落和碱斑裸地,除农田连年耕作受人类活动影响外,其他景观类型不受放牧、刈割等人为影响。除碱斑裸地和农田外,其他盐生景观群落组成单一,羊草群落、虎尾草群落和碱斑裸地呈斑块镶嵌分布。6 种典型盐生景观依次代表不同盐碱程度土壤。分别于每种盐生景观随机选择 3 个典型样点,样点之间距离≥20 m;去除地表枯落物后,用直径为 5 cm 的不锈钢土钻取 0—30 cm 土壤样品,将 3 个样点土壤混合成 1 个土样后,做好记录,带回室内

分析土壤盐分和养分等性质。

带回室内土样经去除石砾和植物根系,在室内风干后过 2 mm 筛,用以测定土样理化性质。pH(Five Easy Plus)和 EC(雷磁电导率仪)采用土水比 1 : 5 饱和浸提液测定。不同盐生景观土壤盐分、离子及养分含量根据土壤农化分析中方法^[19]进行测定。土壤碱化度(ESP)和钠吸附比(SAR)是反映土壤碱化程度的 2 个重要指标。根据测定结果计算 ESP 和 SAR:

$$ESP(\%) = 100 \times \frac{ENa^+}{CEC} \tag{1}$$

$$SAR = \frac{Na^+}{\sqrt{\frac{(Ca^{2+} + Mg^{2+})}{2}}} \tag{2}$$

式中:ENa⁺是交换性 Na⁺ 的含量(cmol/kg);CEC 是阳离子交换量(cmol/kg);Na⁺、Ca²⁺ 和 Mg²⁺ 分别是各离子浓度含量(mg/kg)。

土壤砂粒(50~2 000 μm)、粉粒(2~50 μm)和黏粒(<2 μm)含量采用马尔文激光粒度分析仪测定(Mastersize 2000, Ver. 5.61, Malvern Instrument Ltd., England)。为了获取更多数据点来拟合分形维数,参考国内林业行业标准《森林土壤颗粒组成(机械组成)的测定》(LY/T 1225-1999)^[20]分级标准,将上述 3 个粒度区间在软件中细分为 24 个子区间:0~0.1,0.1~0.5,0.5~1,1~2,2~3,3~4,4~5,5~6,6~7,7~10,10~20,20~30,30~50,50~80,80~100,100~150,150~200,200~250,250~300,300~500,500~800,800~1 000,1 000~1 500,1 500~2 000 μm,分别测定其体积含量。

1.3 研究方法

土壤颗粒分形特征采用体积分形维数计算模型^[6-7]:

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

式中:V_{r<R}为颗粒粒径 r<R 的累积百分含量(%);R 为某粒级上下限的算术平均值(μm);V_T为总体积(%);λ_v为某粒级的上限值(μm);D 为分形维数值。

为了进一步分析土壤颗粒组成及分布特征,采用平均粒径(d₀)、标准偏差(σ₀)、偏度(S₀)和峰态值(K₀)4 个参数来表征土壤粒度特征。d₀反映土壤颗粒组成粒度的平均状况,平均粒径越大,表示细颗粒物质含量越大;σ₀反映颗粒组成分布的分散程度,根据值大小可分为 7 个分选等级,分选极好(σ₀≤0.35)、分选好(0.35<σ₀≤0.50)、分选较好(0.50<σ₀≤0.71)、分选中等(0.71<σ₀≤1.00)、分选较差(1.00<σ₀≤2.00)、分选差(2.00<σ₀≤4.00)和分选极差(σ₀>4.00);S₀反映土壤颗粒物粒度粗细分配

的对称性,根据值范围可以分为 5 个等级,极负偏度(-1.0≤S₀<-0.3)、负偏度(-0.3≤S₀<-0.1)、近于对称(-0.1≤S₀<0.1)、正偏度(0.1≤S₀<0.3)和极正偏度(0.3≤S₀≤1.0);K₀反映土壤颗粒物中粒度分布的集中程度,根据取值范围可以分为很宽平(K₀≤0.67)、宽平(0.67<K₀≤0.90)、中等(0.90<K₀≤1.11)、尖窄(1.11<K₀≤1.56)、很尖窄(1.56<K₀≤3.00)和极尖窄(K₀>3.00)。计算公式为:

$$d_0 = \frac{1}{3}(\Phi 16 + \Phi 50 + \Phi 84) \tag{4}$$

$$\sigma_0 = \frac{1}{4}(\Phi 84 - \Phi 16) + \frac{1}{6.6}(\Phi 95 - \Phi 5) \tag{5}$$

$$S_0 = \frac{\Phi 16 + \Phi 84 - 2\Phi 50}{2(\Phi 84 - \Phi 16)} + \frac{\Phi 5 + \Phi 95 - 2\Phi 50}{2(\Phi 95 - \Phi 5)} \tag{6}$$

$$K_0 = \frac{\Phi 95 - \Phi 5}{2.44(\Phi 75 - \Phi 25)} \tag{7}$$

式中:Φ 值是根据克鲁宾(1934)^[21]对数转换法将实际粒径转化而来。

$$\Phi = -\lg d = -\frac{\ln d}{\ln 2} = -3.322 \lg d \tag{8}$$

式中:lg、ln、lg 均为对数函数;d 为土壤颗粒粒径(mm);Φ5、Φ16、Φ25、Φ50、Φ75、Φ84 和 Φ95 分别为土壤颗粒累积曲线上体积分数为 5%,16%,25%,50%,75%,84%,95%对应的土壤颗粒粒径。

1.4 数据处理与分析方法

数据统计分析采用 SPSS 19.0 软件,单因素方差分析用来检验不同盐生景观土壤性质参数之间差异显著性,显著性水平为 α=0.05 或 α=0.01。Person 相关分析用来分析土壤粒度特征与土壤理化性质的相关性。制图采用 Origin Pro 9.0 软件。

2 结果与分析

2.1 不同盐生景观土壤盐碱化及养分特征

由表 1 可知,6 种不同盐生景观土壤 pH 变化范围为 8.68~10.35,均值为 9.80,其中农田土壤最低(8.68±0.06),羊草次之(9.31±0.09),虎尾草群落和碱斑裸地均>10.3,表明供试土壤呈碱性。6 种盐生景观土壤 EC、盐分含量、ESP 和 SAR 均呈依次增大趋势,其中碱蓬群落 EC 最大值(1.99±0.10)是农田土壤最小值(0.09±0)的 22 倍。农田土壤盐分含量最低,为(569.67±16.55)mg/kg;碱蓬群落土壤盐分含量最高,达(14 311.78±143.93)mg/kg。ESP 变化范围为 1.09~65.82%,均值为 32.55%。农田土壤 SAR 最低,仅为 1.24±0.11,其他 5 种土壤 SAR 变化范围为 21.92~115.71,碱蓬群落土壤是农田的 93 倍。当土壤 EC<4 dS/m、SAR≥13 时,土壤为碱土^[22]。因此上述供试土样中除了农田土壤为非盐碱土外,其余 5 种

土壤为碱土。不同盐生景观土壤养分中农田土壤 TK 含量最高((25 954.06±69.59) mg/kg),TN 和 TP 含量最低,分别为(355.82±6.54),(101.83±4.56) mg/kg;碱蓬群落土壤的 TN 和 TP 含量最高,分别为(469.21±14.09),(196.74±10.03) mg/kg。

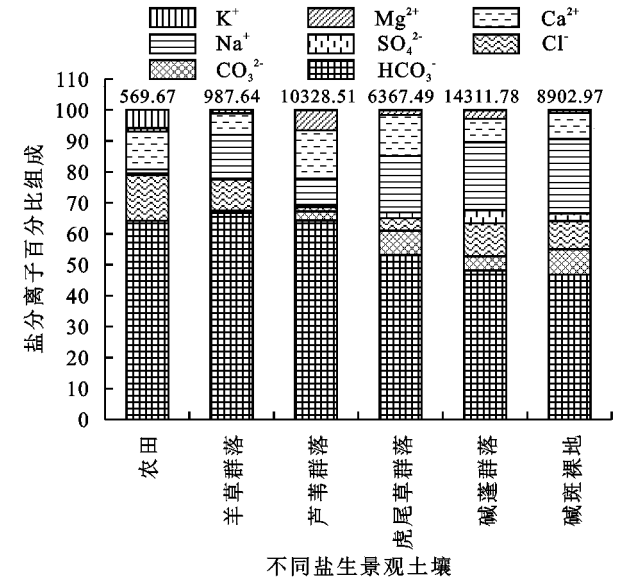
6 种盐生景观土壤盐分含量及阴、阳离子百分比组成见图 2。6 种土壤盐分组成中均以 HCO₃⁻ 占比

例最高,范围为 46.87%~66.71%,均值为 57.24%;Na⁺ 含量次之,变化范围为 1.35%~24.03%,均值为 14.68%;二者含量之和占盐分离子的 64.80%~79.58%,表明土壤盐分组成以苏打(NaHCO₃)为主。Ca²⁺ 平均含量为 10.65%,Cl⁻ 略小于 Ca²⁺,为 8.33%,其他离子百分比含量大小依次为 CO₃²⁻ (4.02%)>Mg²⁺ (2.28%)>SO₄²⁻ (1.68%)>K⁺ (1.11%)。

表 1 不同盐生景观土壤碱化及养分特征

指标	不同盐生景观类型					
	农田(玉米地)	羊草群落	芦苇群落	虎尾草群落	碱蓬群落	碱斑裸地
pH	8.68±0.06A	9.31±0.19B	9.90±0.02C	10.35±0.17D	10.23±0.05D	10.31±0.02D
EC/(dS·m ⁻¹)	0.09±0.00A	0.18±0.03B	0.62±0.01C	0.78±0.01D	1.99±0.10F	1.57±0.04E
盐分含量/(mg·kg ⁻¹)	569.67±16.55A	987.64±20.03A	10328.51±174.35B	6367.49±110.75C	14311.78±143.93D	8902.97±109.56E
交换性钠含量/(mg·kg ⁻¹)	1.61±0.09A	4.83±0.06A	64.86±5.17B	83.03±6.74C	165.83±9.94D	150.88±10.12D
(HCO ₃ ⁻ +Na ⁺)含量/%	64.80±5.27A	79.58±1.43B	72.90±1.23AB	76.34±7.01B	69.31±3.90AB	70.89±0.14AB
碱化度/%	1.09±0.10A	1.61±0.05A	28.01±1.89B	48.86±6.11C	49.88±2.89C	65.82±3.58D
钠吸附比	1.24±0.11A	21.92±1.36B	26.16±3.85B	53.95±1.33C	115.71±8.72D	105.33±4.81D
总氮/(mg·kg ⁻¹)	355.82±6.54C	541.78±1.51F	348.20±2.51C	265.43±17.50B	469.21±14.09D	234.96±9.02A
总磷/(mg·kg ⁻¹)	101.83±4.56A	144.02±4.01B	149.52±5.50B	110.48±10.00A	196.74±10.03C	132.93±2.51B
总钾/(mg·kg ⁻¹)	25954.06±69.59F	24302.37±70.21D	24886.54±51.11E	21185.55±47.92B	19604.04±104.35A	24112.93±66.42C
盐渍土分类	非盐渍土	碱土	碱土	碱土	碱土	碱土

注:大写字母表示在 0.01 水平显著。



注:图柱上方数据为盐分含量(mg/kg)。

图 2 不同盐生景观土壤盐分离子组成及盐分含量

2.2 不同盐生景观土壤粒度及分形特征

由表 2 和图 3 可知,6 种不同盐生景观土壤颗粒组成以砂粒为主,砂粒含量变化范围为 55.09%~86.94%,均值为 73.93%。粉粒含量次之,平均含量为 20.44%,其中农田土壤粉粒含量最低(10.66%),碱蓬群落粉粒含量最高(34.23%),二者粉粒含量与砂粒含量趋势相反。黏粒含量最低,仅为 2.40%~10.68%,均值为 5.90%。根据美国农业部制土壤质地分类方法,将供试土样分为 3 种质地:农田土壤为砂土,羊草群落和虎尾草群落土

壤为壤砂土,芦苇群落、碱蓬群落和碱斑裸地群落为砂壤土,其中碱蓬群落土壤中细粒含量占比大,为细砂壤土。土壤颗粒平均直径变化范围为 2.79~4.70,其中农田砂土平均粒径值最大,碱蓬群落细砂壤土最小;平均粒径越大,表明土壤中细颗粒组分比例越高。6 种不同盐生景观土壤的标准偏差均<0,表明分选性极好。6 种土壤的偏度值都在-1.0~-0.3,属于极度负偏,表示土壤颗粒频率分布曲线中峰偏向细颗粒一侧,说明土壤颗粒组成中细粒部分比例高。峰态值变化范围为 3.56~4.58,均>3,表示土壤粒度频率分布曲线表现为极尖窄,说明颗粒粒径分布较为均匀,集中程度高。

运用线性回归分析计算了供试土样体积分形维数值。由图 4 可知,线性回归拟合结果中决定系数(R²)均>0.9,6 种供试土样分形维数值变化范围为 2.35~2.61,均值为 2.48,农田和碱蓬群落土壤分别具有最小值和最大值。为了进一步分析分形维数值和土壤颗粒组成的关系,对分形维数与砂粒、粉粒和黏粒含量进行了回归分析。由图 5 可知,分形维数与土壤颗粒组成之间存在显著的相关性。分形维数与砂粒呈极显著负相关(R²=0.92,P<0.01),即土壤中砂粒含量越高,分形维数值越小;分形维数与粉粒和黏粒分别呈极显著正相关(R²=0.90,P<0.01;R²=0.95,P<0.01),表明土壤中细颗粒物越多,分形维数值越大。

表 2 不同盐生景观土壤质地分类及粒度特征

不同盐生 景观土壤	土壤颗粒分布/%			质地分类	平均粒径 d_0/Φ	标准偏差 σ_0	偏度 S_0	峰态值 K_0
	砂粒 (2~0.05mm)	粉粒 (0.05~0.002 mm)	黏粒 (<0.002 mm)					
农田(玉米地)	86.94±0.18F	10.66±0.15A	2.40±0.13A	砂土	2.79±0A	-1.45±0E	-0.65±0.01C	4.21±0.01C
羊草群落	76.50±0.19D	18.92±0.22C	4.58±0.21C	壤砂土	3.47±0.01C	-1.78±0.02D	-0.75±0.02B	4.25±0.05C
芦苇群落	67.95±0.14B	24.09±1.17E	7.96±0.82E	砂壤土	4.13±0.04E	-2.46±0.01B	-0.81±0A	4.00±0.02B
虎尾草群落	82.75±0.53E	13.52±0.35B	3.73±0.11B	壤砂土	3.20±0.05B	-1.46±0.01E	-0.75±0.01B	4.54±0.08D
碱蓬群落	55.09±0.62A	34.23±0.60F	10.68±0.32F	细砂壤土	4.70±0.05F	-2.57±0.03A	-0.77±0.01B	3.56±0.03A
碱斑裸地	74.32±0.33C	21.23±0.29D	6.02±0.10D	砂壤土	4.01±0.02D	-2.18±0.02C	-0.83±0A	4.58±0.05D

注:表中数据为平均值±标准误;同列不同大写字母表示显著性在 0.01 水平差异显著。

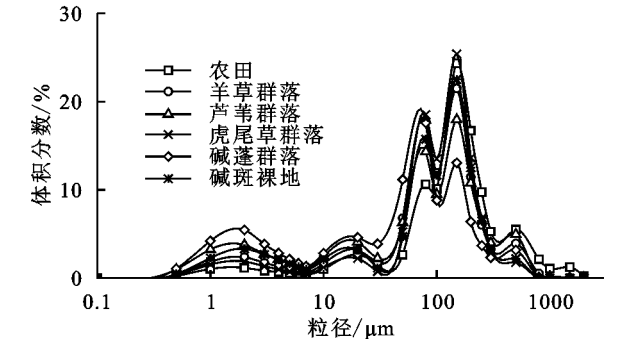


图 3 不同盐生景观土壤颗粒组成分布曲线

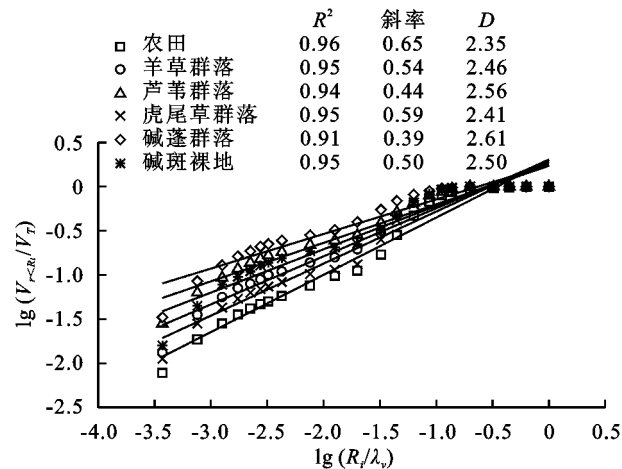


图 4 不同盐生景观土壤分形维数计算

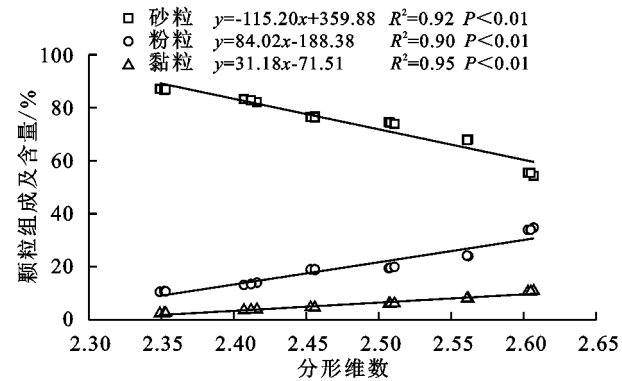


图 5 分形维数与砂粒、粉粒和黏粒含量关系

2.3 不同盐生景观土壤分形维数与盐碱化及养分特征关系

由表 3 可知,6 种典型盐生景观土壤颗粒组成、分形维数、土壤盐碱和养分特征之间存在显著相关

性。分形维数(D)与土壤盐分含量(SC)呈显著正相关($r=0.87, P<0.05$),尤其与土壤盐分中碳酸氢根含量(HCO_3^-)呈极显著正相关($r=0.89, P<0.01$),与土壤养分中总磷(TP)含量亦呈极显著正相关($r=0.90, P<0.01$),表明随分形维数值增大,土壤中盐分、碳酸氢根含量及总磷含量也会增加。土壤颗粒组成也表现出相同的规律性,其中砂粒含量与 SC 、 HCO_3^- 分别呈显著负相关($r=-0.84, P<0.05$; $r=-0.83, P<0.05$),粉粒与 SC 、 HCO_3^- 分别呈显著正相关($r=0.82, P<0.05$; $r=0.72, P<0.05$),黏粒与 SC 、 HCO_3^- 分别呈极显著正相关($r=0.88, P<0.01$; $r=0.89, P<0.01$);总磷与砂粒含量呈极显著负相关($r=-0.98, P<0.01$),而与粉粒和黏粒含量分别呈极显著正相关($r=0.98, P<0.01$; $r=0.94, P<0.01$),表明土壤中砂粒含量越大, SC 、 HCO_3^- 和总磷含量越低;土壤中细颗粒含量越大,三者含量越高。

3 讨论

土壤颗粒组成是重要的土壤物理性质之一,常被用来描述和判定土壤质地^[23]。质地不同,因而分形维数差异也很大^[24]。本研究 6 种不同盐生植物群落土壤为河漫滩沉积物,土样中砂粒比例高,6 种土壤的碱化程度从农田到碱斑裸地依次增强,质地也由粗变细,分形维数亦呈规律性变化。其中农田为砂土,属非碱土,分形维数最小(2.35),碱蓬群落土壤质地最细,碱化度略小于碱斑裸地,其分形维数最大(2.61)。从土壤质地和分形维数变化规律来看,泥石流、冰碛物等沉积物的分形维数值在 2.6 左右,而河床、潮滩等的明显 <2.6 ^[25],质地由粗变细过程中分形维数逐渐变大^[21],本文研究结果与前人^[24-25]结论一致。从分形维数反映的土壤性质来看,细质地、高肥力土壤的分形维数为 2.60~2.80,而无结构和粗质地土壤的分形维数值为 1.83~2.64^[6,24],本研究中苏打碱土属于结构性极差的障碍性土壤^[26],分形维数均值为 2.48,结果与之相符。分形维数是根据土壤颗粒组成计算而来,因此与土壤砂、粉、黏粒含量密切

相关。本研究中不同盐生景观土壤分形维数与砂粒($r=-0.96, P<0.01$)、粉粒($r=0.95, P<0.01$)和黏粒($r=0.97, P<0.01$)呈极显著相关,表明土壤质地越粗,分形维数值越小;土壤中细颗粒物质含量越

高,分形维数值越大。众多学者^[11,27]研究结果也一致表明,土壤分形维数与土壤中砂粒含量呈负相关,与黏粒和粉粒呈正相关。因此,分形维数大小可以反映土壤质地状况。

表 3 不同盐生景观土壤粒度与盐碱特征相关性分析

土壤性质参数	<i>D</i>	Na ⁺ / (mg·kg ⁻¹)	ENa ⁺ / (cmol·kg ⁻¹)	Ca ²⁺ / (mg·kg ⁻¹)	CO ₃ ²⁻ / (mg·kg ⁻¹)	HCO ₃ ⁻ / (mg·kg ⁻¹)	SC / (mg·kg ⁻¹)	CEC / (cmol·kg ⁻¹)	ESP / %	SAR	砂粒 / %	粉粒 / %	黏粒 / %
<i>D</i>	1.00	0.66	0.70	0.67	0.42	0.89 * *	0.87 *	0.75	0.49	0.37	-0.96 * *	0.95 * *	0.97 * *
Na ⁺ / (mg·kg ⁻¹)		1.00	0.94 * *	0.24	0.90 * *	0.70	0.86 *	0.34	0.87 *	0.86 *	-0.70	0.67	0.67
ENa ⁺ / (cmol·kg ⁻¹)			1.00	0.43	0.79 *	0.75	0.89 * *	0.34	0.93 * *	0.68	-0.66	0.65	0.69
Ca ²⁺ / (mg·kg ⁻¹)				1.00	0.07	0.87 *	0.69	0.25	0.34	-0.12	-0.58	0.54	0.67
CO ₃ ²⁻ / (mg·kg ⁻¹)					1.00	0.48	0.69	0.02	0.89 * *	0.96 * *	-0.35	0.35	0.36
HCO ₃ ⁻ / (mg·kg ⁻¹)						1.00	0.96 * *	0.42	0.63	0.34	-0.83 *	0.80 *	0.89 * *
SC / (mg·kg ⁻¹)							1.00	0.42	0.77 *	0.57	-0.84 *	0.82 *	0.88 * *
CEC / (cmol·kg ⁻¹)								1.00	0.06	0.08	-0.82	0.83	0.85
ESP / %									1.00	0.74	-0.39	0.38	0.35
SAR										1.00	-0.34	0.35	0.32
TN / (mg·kg ⁻¹)	0.13										-0.28	0.31	0.21
TP / (mg·kg ⁻¹)	0.90 * *										-0.98 * *	0.98 * *	0.94 * *
TK / (mg·kg ⁻¹)	-0.38										0.50	-0.50	-0.49

注: * 和 * * 分别表示在 0.05 和 0.01 水平上显著相关。

本研究发现,不同盐生群落土壤分形维数与土壤盐分、HCO₃⁻ 含量,以及土壤养分之间显著相关。其中,分形维数分别与土壤盐分($r=0.87, P<0.05$)、HCO₃⁻ 含量($r=0.89, P<0.01$)呈极显著正相关,即土壤分形维数越大,土壤盐分和 HCO₃⁻ 含量越高。但是二者在机制上不存在直接关系。分形维数越大,相应的土壤颗粒组成中粉粒和黏粒含量越大,砂粒含量越小,质地越黏重。质地越黏重,从而土壤渗透性就差,不利于水分向深层土壤运动过程中对盐分的淋洗。不同盐生景观土壤颗粒组成中砂粒含量与土壤盐分($r=-0.84, P<0.05$)、HCO₃⁻ 含量($r=-0.83, P<0.05$)也表现出显著负相关,由表 3 可知,粉粒和黏粒亦分别与土壤盐分和 HCO₃⁻ 含量呈显著负相关,即土壤颗粒越粗,土壤盐分含量越低。因此,分形维数与土壤盐分、HCO₃⁻ 含量之间相关性是土壤质地通过影响土壤水分而影响土壤盐分的。黑河下游以硫酸盐为主的土壤分形维数和盐分之间关系研究^[14]中也发现,土壤盐分随分形维数的增大而增加,并且分形维数、颗粒组成(砂、粉、黏粒比例)和养分中总磷也存在显著相关性,与本文研究结果一致。土壤中养分和盐分离子更倾向于吸附在细颗粒物质(粉粒和黏粒)而不是砂粒上^[15],其影响机制可能在于细颗粒物质(粉粒和黏粒)含量越多,比表面积越大,因而吸附能力更强^[28]。但本研究中不同盐生景观土壤中典型离子,如 Na⁺ 和交换性 Na⁺ 含量与

分形特征、土壤颗粒组成之间无显著相关性。

本研究发现,分形维数与土壤盐分含量之间存在显著相关性,但是在影响机制上二者之间并没有直接关系。就盐渍土而言,水和盐的变化密切相关,土壤质地不同导致土壤水分运移参数(如保水性、透水性)差异显著,而这些水分运动参数的大小直接影响土壤种盐分的变化。因此,在以后的试验中可以进一步研究不同土壤质地(分形维数)下土壤水分和盐分运移的变化规律。

4 结 论

松嫩平原西部 6 种典型盐生景观中农田土壤分形维数最小(2.35),碱蓬群落土壤分形维数最大(2.61),分形维数均值为 2.48,分形维数值随盐生景观土壤碱化程度增加而增大。分形维数与土壤颗粒组成中砂粒含量呈极显著负相关($r=-0.96, P<0.01$),与粉粒和黏粒含量呈极显著正相关($r=0.95, P<0.01; r=0.97, P<0.01$),土壤质地越粗,分形维数越小。分形维数与盐分含量呈显著正相关($r=0.87, P<0.05$),尤其与 HCO₃⁻ 含量呈极显著正相关($r=0.89, P<0.01$)。土壤颗粒组成中砂粒、粉粒和黏粒与盐分、HCO₃⁻ 及总磷含量也存在极显著相关性。盐生景观土壤分形维数与土壤颗粒组成和土壤盐分之间存在显著相关性,因此,可以用分形维数来反映土壤质地和指示土壤盐碱化特征。

参考文献:

- [1] 姜瑞瑞,费良军,金世杰,等.浑水含沙率和泥沙粒度组成对膜孔灌入渗特性的影响[J].水土保持学报,2018,32(1):157-161.
- [2] Zhang X, Zhao W W, Wang L X, et al. Relationship between soil water content and soil particle size on typical slopes of the Loess Plateau during a drought year[J]. Science of the Total Environment, 2019, 648: 943-954.
- [3] 苑依笑,王仁德,常春平,等.风蚀作用下农田土壤细颗粒的粒度损失特征及其对土壤性质的影响[J].水土保持学报,2018,32(2):104-109,119.
- [4] Mandelbrot B B. The fractal geometry of nature[M]. San Francisco Freeman and Co., 1982: 460.
- [5] Crawford J W, Sleemant B D, Young I. On the relation between number-size distribution and the fractal dimension of aggregates[J]. European Journal of Soil Science, 1993, 44(4): 555-565.
- [6] Tyler S W, Wheatcraft S W. Fractal scaling of soil particle-size distributions: Analysis and limitations[J]. Soil Science Society of American Journal, 1992, 56: 362-369.
- [7] 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.
- [8] 杨培玲,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.
- [9] 蔺芳,邢金鑫,任思敏,等.鸡粪与化肥配施对饲用小黑麦/玉米轮作土壤团聚体分形特征与碳库管理指数的影响[J].水土保持学报,2018,32(5):183-189,196.
- [10] 洪明海,徐驰,曾文治,等.盐渍土孔隙结构及分形特征研究[J].中国农村水利水电,2017(7):54-58.
- [11] Feng X, Qu J J, Tan L H, et al. Fractal features of sandy soil particle-size distributions during the rangeland desertification process on the eastern Qinghai-Tibet Plateau[J]. Journal of Soils and Sediments, 2020, 20: 472-485.
- [12] Li K, Yang H X, Han X, et al. Fractal features of soil particle size distribution and their potential as an indicator of *Robiia pseudoacacia* invasion[J]. Scientific Reports, 2018, 8: e7075.
- [13] 马成忠,邓继峰,丁国栋,等.不同初植密度樟子松人工林对毛乌素沙地南缘土壤粒度特征的影响[J].水土保持学报,2018,32(1):230-235.
- [14] Zhao Y, Feng Q, Yang H D. Soil salinity distribution and its relationship with soil particle size in the lower reaches of Heihe River, Northwestern China[J]. Environmental Earth Science, 2016, 75: 810-829.
- [15] Zhao W J, Cui Z, Ma H. Fractal features of soil particle-size distributions and their relationships with soil properties in gravel-mulched fields[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2017, 10(9): 211-218.
- [16] 赵兰坡,王宇,冯君,等.松嫩平原盐碱地改良利用:理论与技术[M].北京:科学技术出版社,2013:3-35.
- [17] 裘善文,李风华,洮、霍两河下游地区土地沙漠化成因及其治理模式研究[J].中国沙漠,2002(1):52-58.
- [18] 杨富亿,李秀军,刘兴土.沼泽湿地生物弹回扩增与碳汇型生态农业利用模式[J].农业工程学报,2012, 28(19):156-162.
- [19] 鲍士旦.土壤农化分析[M].3版.北京:中国农业出版社,2000.
- [20] 国家林业局.LY/T 1225—1999.森林土壤颗粒组成(机械组成)的测定[S].北京:中国标准出版社,1999.
- [21] 杨金玲,李德成,张甘霖,等.土壤颗粒粒径分布质量分形维数的对比[J].土壤学报,2008,45(3):413-419.
- [22] Qadir M, Ghafoor A, Murtaza G. Amelioration strategies for saline soils: A review[J]. Land Degradation and Development, 2001, 12(4): 357-386.
- [23] 邵明安,王全九,黄明斌.土壤物理学[M].北京:高等教育出版社,2006:2-37.
- [24] 李德林,张桃林.中国土壤颗粒组分的分形特征研究[J].土壤与环境,2000,9(4):263-265.
- [25] 柏春广,穆桂金,王建.艾比湖湖相沉积物粒度的分维特征与环境意义[J].干旱区地理,2002,25(4):336-341.
- [26] Gangwar P, Singh R, Trivedi M, et al. Sodic Soil: Management and reclamation strategies[M]. Springer Singapore Shukla V, Kumar N (eds) Environmental Concerns and Sustainable Development, 2020: 175-191.
- [27] 雷娜,韩霁昌,穆兴民.汉中荒草地整治后耕作层土壤颗粒分形特征[J].水土保持学报,2016,30(6):296-299.
- [28] Acosta J A, Cano A F, Arocena J M, et al. Distribution of metals in soil particle size fractions and its implication to risk assessment of playgrounds in Murcia City (Spain)[J]. Geoderma, 2009, 149: 101-109.