

# 希拉穆仁天然草地不同群落土壤分形特征及其影响因素

王瑞东<sup>1</sup>, 高永<sup>1</sup>, 党晓宏<sup>1,2</sup>, 蒙仲举<sup>1</sup>

(1.内蒙古农业大学 沙漠治理学院, 呼和浩特 010018;

2.内蒙古杭锦荒漠生态系统国家定位观测研究站, 内蒙古 鄂尔多斯 017400)

**摘 要:**研究希拉穆仁天然草地围封区内不同群落类型土壤颗粒分形特征及其影响因素,以期为荒漠草原土壤风蚀的减少和草地退化防治提供依据。利用土壤粒径质量分布原理与分形学理论,以围封 16 年荒漠草原的蒙古韭(*Allium mongolicum*)、银灰旋花(*Convolvulus ammannii*)、克氏针茅(*Stipa krylovii*)、羊草(*Leymus chinensis*)、洽草(*Koeleria asiatica*)、短花针茅(*Stipa breviflora*)6 种群落为研究对象,测定和计算土壤颗粒分形维数、粒径组成和水文物理参数,探讨了近自然恢复状态下 0—30 cm 土层不同群落类型的土壤颗粒分形特征及影响因素。结果表明:(1) 决定该地区土壤颗粒分形维数大小的主要是粉砂和极细砂的百分含量,其次为细砂的百分含量,其余粒级土壤颗粒的影响程度较小;土壤颗粒分形维数与土壤总孔隙度、毛管孔隙度、饱和蓄水量和吸持蓄水量呈显著正相关,与土壤容重、非毛管孔隙度、滞留蓄水量的相关性不大。(2) 6 种不同群落土壤颗粒分形维数最大为 2.840,最小值为 2.490。0—30 cm 土层土壤颗粒平均分形维数介于 2.575~2.750,从大到小依次为克氏针茅>短花针茅>洽草>银灰旋花>蒙古韭>羊草。6 种不同群落类型样地上土壤分形维数随土壤采样深度的变化发生不同的波动规律,整体上均呈线性下降趋势。(3) 分形维数可以作为一个衡量土壤结构及草地退化恢复程度的综合性指标。从土壤分形维数及其蓄水性能来看,希拉穆仁天然草地围封区的 6 种群落改良土壤特性及蓄水功能表现为克氏针茅、短花针茅和洽草群落优于其他 3 种群落。

**关键词:**分形维数; 土壤粒径; 荒漠草原; 群落类型

**中图分类号:**S152.3

**文献标识码:**A

**文章编号:**1005-3409(2020)03-0051-06

## Characteristics of Soil Fractals and the Influencing Factors of Different Plant Communities in the Xilamuren Grassland

WANG Ruidong<sup>1</sup>, GAO Yong<sup>1</sup>, DANG Xiaohong<sup>1,2</sup>, MENG Zhongju<sup>1</sup>

(1.College of Desert Control Science and Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China;

2.Inner Mongolia Hangjin Desert Ecological Position Research Station, Ordos, Inner Mongolia 017400, China)

**Abstract:** The fractal characteristics of soil particles and their influencing factors in different community types in the surrounding area of the Xilamuren grassland were studied in order to provide a basis for the reduction of soil wind erosion and grassland degradation in desert steppe. Using the principle of soil particle size mass distribution and fractal theory to of desert steppe, the fractal dimension, particle size composition and hydrophysical parameters of soil particles of six 16-year enclosed communities of *Allium mongolicum*, *Convolvulus ammannii*, *Stipa krylovii*, *Leymus chinensis*, *Koeleria glauca*, *Stipa breviflora* were determined to investigate the fractal characteristics and influencing factors of soil particles in different community types und the near-natural recovery. The results showed that:(1) the fractal dimension of soil particles in this area mainly depended on the percentages of silt and very fine sand, followed by the percentage of fine sand, and the influence of other grain-level soil particles was little; fractal dimension of soil particles was significantly positively correlated with soil total porosity, capillary porosity, saturated water storage capacity and water storage capacity, and had little correlation with soil bulk density, non-capillary porosity, and retained water storage; (2) the maximum fractal dimension of soil particles in 6 different communities was 2.840, and the minimum value was 2.490, the average fractal dimensions of soil particles in 0—30 cm soil laver varied between 2.575 and 2.750, the average fractal dimensions of soil particles decreased in the order: *Stipa krylovii* > *Stipa breviflora* > *Koeleria glauca* > *Convolvulus ammannii* > *Allium*

收稿日期:2019-05-25

修回日期:2019-07-14

资助项目:国家自然科学基金“内蒙古中部荒漠草原微斑块发育与土壤优先响应机制”(51769019)

第一作者:王瑞东(1994—),男,内蒙古武川县人,在读博士研究生,主要从事荒漠化防治研究。E-mail:wangruidong0226@163.com

通信作者:高永(1962—),男,内蒙古包头人,教授,博士生导师,主要从事荒漠化防治研究。E-mail:13948815709@163.com

*mongolicum* > *Leymus chimensis*; the fractal dimensions of soil fractals of six different community types varied with the depth of soil sampling, and showed a linear decline trend with increase of soil depth; (3) fractal dimension can be used as a comprehensive index to measure the degree of soil structure and restoration of grassland degradation. According to the fractal dimension of soil particles and its water storage performance, the improved soil characteristics and water storage functions of communities of *Stipa krylovii*, *Stipa brevii* and *Koeleria glauca* are superior to those of the other communities.

**Keywords:** fractal dimension; soil particle-size; desert steppe; vegetation types

草地生态系统作为全球陆地生态系统中分布最广、最重要的组成部分,对全球气候变化具有一定的影响<sup>[1]</sup>。在中国,草地不仅是畜牧业生产的基地,更是构建我国北方生态安全屏障必不可少的资源<sup>[2]</sup>。近 50 a 来,由于自然条件的严峻性、气候条件的波动性和人类社会各种不合理扰动性的相互作用,我国草场面积在持续不断地减少<sup>[3-4]</sup>,尤其位于我国西北部生态环境相对脆弱的地区,草地退化愈来愈严重,使得该地区草地植被的质量和产量下降,土壤有机质含量下降,土壤质地变粗砂化,草地生产力减退,草地覆盖度下降,土壤风蚀加剧,生态环境恶化等一系列现象已对内蒙古西北地区生态环境和可持续发展构成一定的威胁<sup>[5-8]</sup>。

在我国西北干旱、半干旱及亚湿润干旱地区土壤风蚀是导致草场退化的主要过程之一,而土壤质地的差异直接影响土壤风蚀程度的不同<sup>[9]</sup>。近年来,随着学者对分形学的研究和探讨,在定量描述土壤质地方面分形理论的应用已有了新的发展,在一定程度上可以表征风蚀地区土壤沙化演变的定量指标<sup>[10-14]</sup>。与传统方法相比较,分形模型能进一步说明分形维数的物理意义<sup>[15]</sup>。到目前为止,针对希拉穆仁荒漠草原草场退化及土壤风蚀较严重的生态环境特点,国内学者从不同角度进行探讨和分析,取得了大量的研究成果,当地相关部门也进行了一定的封育等管理措施<sup>[16-18]</sup>。然而,运用分形理论对希拉穆仁荒漠草原不同群落土壤粒径的研究报道较少。基于此,本研究以内蒙古阴山北麓中部的希拉穆仁荒漠草原围封 16 a 的不同群落类型为对象,探讨荒漠草原封育措施下不同群落类型土壤颗粒分形特征及其影响因素,阐明其对土壤物理结构的影响,以期对希拉穆仁天然草地生境下的土壤颗粒分形学机制奠定理论基础。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于内蒙古高原中部地带达尔罕茂明安联合旗(简称达茂旗)东南部希拉穆仁草原(111°13'39"E, 41°21'1"N),该区域属低山丘陵类型,地形低缓起伏,平均海拔高度 1 600 m。中温带半干旱大陆性季风气候,

多年平均降水量为 279.40 mm,主要集中在 7—9 月;全年多风,年均风速 4.50 m/s,年大风日数为 63 d,风沙天气主要集中在秋冬两季,以北风和西北风为主。试验地风蚀和水蚀交替作用造成土壤板结和地表颗粒粗化,使希拉穆仁草原生态环境脆弱,该区域地带性土壤主要以栗钙土主,土壤质地较粗糙,多为砂质壤土。希拉穆仁镇地带性植被建群种植物为克氏针茅(*Stipa krylovii*),草地群落主要以羊草(*Leymus chimensis*)×克氏针茅,其他植物种有蒙古韭(*Allium mongolicum*)、银灰旋花(*Convolvulus ammannii*)、洽草(*Koeleria glauca*)、短花针茅(*Stipa brevii*)等多年生旱生草本等为主,呈典型荒漠草原特征<sup>[19]</sup>。

### 1.2 样地布设与样品采集

试验于 2018 年 8 月上旬在希拉穆仁荒漠草原水利部水土保持试验中心围封区域内进行,试验选择在坡向相同,地势平坦,坡度在 2.5°~3.5°的围封区,采样区域东西长 1.2 km 南北宽 1.0 km,沿东西布设 4 条长度为 300 m 的样线,每条样线间隔 50 m,利用优势种变化情况及其他植物群落特征,在围封的采样区域设置 35 个样方,各样线布设 3~10 个 1 m×1 m 正方形植物样方。利用双向指示种分析法确定 6 种群落类型样地<sup>[20]</sup>。在取样前一周天气良好,无大风和降水,采样时选取平整地面,在已确定的 6 块不同群落类型样地,利用环刀按照(0—5 cm, 5—10 cm, 10—20 cm, 20—30 cm)土层进行土样采集,将 5 个样点的重复样混合后以四分法取对角线的土样 150 g 装入塑封袋进行室内试验。

### 1.3 室内样品测定方法

土壤样品烘干处理后利用土壤筛去除直径大于 3.50 mm 的粗物质颗粒和植物根系,利用粒度测定分析仪器自带软件的用户分级功能依据美国制土壤粒径分级标准<sup>[21]</sup>,将土壤样品按粒径划分为黏粒(<0.002 mm)、粉粒(0.002~0.05 mm)、极细砂(0.05~0.1 mm)、细砂(0.1~0.25 mm)、中砂(0.25~0.5 mm)、粗砂(0.5~1 mm)、极粗砂(1~0.2 mm)和砂石(>2 mm)。取筛选后的土样(5.00±0.005)g 置于烧杯中,加入 45.00 ml 蒸馏水充分浸没样品,滴入 1~2 滴浓度为 30% H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 溶液。静置 24h 后去除土壤中的有机质,待烧杯中无气泡产时,进行加热,使过剩的 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 完全挥发

反应。冷却后加入纯净水的同时滴入 1 ~ 2 ml 浓度为 10% 的 HCL 溶液,溶解样品中碳酸盐物质,再次静置 24 h,测试样品中的 pH 值,待样品 pH 值呈中性后启动激光粒度分析仪(Mastersizer 3000 型,英国),测定前先进行半小时的预热,加入适量样品于仪器中进行试验测定<sup>[22]</sup>。

1.4 数据处理

土壤颗粒分形维数计算参考杨培岭等<sup>[23]</sup>利用土壤颗粒粒径的不同分布表征的土壤分形模型。即

$$(\overline{d_i}/\overline{d_{\max}})^{3-D}=W(\delta<\overline{d_i})/W_0 \quad (1)$$

式中: $\overline{d_i}$ 为土壤颗粒 $\overline{d_i}$ 与 $d_{i+1}$ 间粒径的平均值; $\overline{d_{\max}}$ 为最大粒级土壤颗粒的平均直径; $D$ 为土壤颗粒分形维数值; $W(\delta<\overline{d_i})$ 为小于 $d_i$ 的累积土粒质量; $W_0$ 为土壤各粒级质量的总和; $\delta$ 为码尺。

以  $\lg(\overline{d_i}/\overline{d_{\max}})$ 、 $\lg[W(\delta<\overline{d_i})/W_0]$  为横、纵坐标后进行线性拟合,拟合后得到的直线的斜率为式中的  $3-D$ ,进而得出土壤分形维数  $D$  值。

土壤总孔隙度、毛管孔隙度、非毛管孔隙度、容重等参数采用环刀法测定,土壤含水量利用烘干法进行

测定<sup>[24]</sup>,并计算一定土层深度内的饱和蓄水量、吸持蓄水量和滞留蓄水量<sup>[25]</sup>。

2 结果与分析

2.1 土壤分形维数与土壤机械组成的关系

通过土壤分形维数的计算得知,分形维数与土壤颗粒各粒级组分间呈一定关系。为确定土壤颗粒分形维数与各粒级含量的关系,对分形维数与黏粒、粉粒、极细砂、细砂、中砂、粗砂、极粗砂和砾石进行相关性分析。由图 1 可知,6 种不同群落的土壤分形维数与各粒级颗粒大小、含量存在一定关系,土壤颗粒分形维数与粉粒、极细砂的百分含量呈极显著正相关关系,其中粉粒的百分含量与土壤颗粒分形维数的相关系数最大,为 0.960,表明粉砂的百分含量对土壤颗粒分形维数的影响极显著,极细砂百分含量与土壤颗粒分形维数的相关系数为 0.555。与细砂的百分含量呈负相关关系,系数为 0.020,与中砂、粗砂和极粗砂的百分含量的相关性不大,说明粉砂和极细砂含量越高,土壤颗粒分形维数越大。

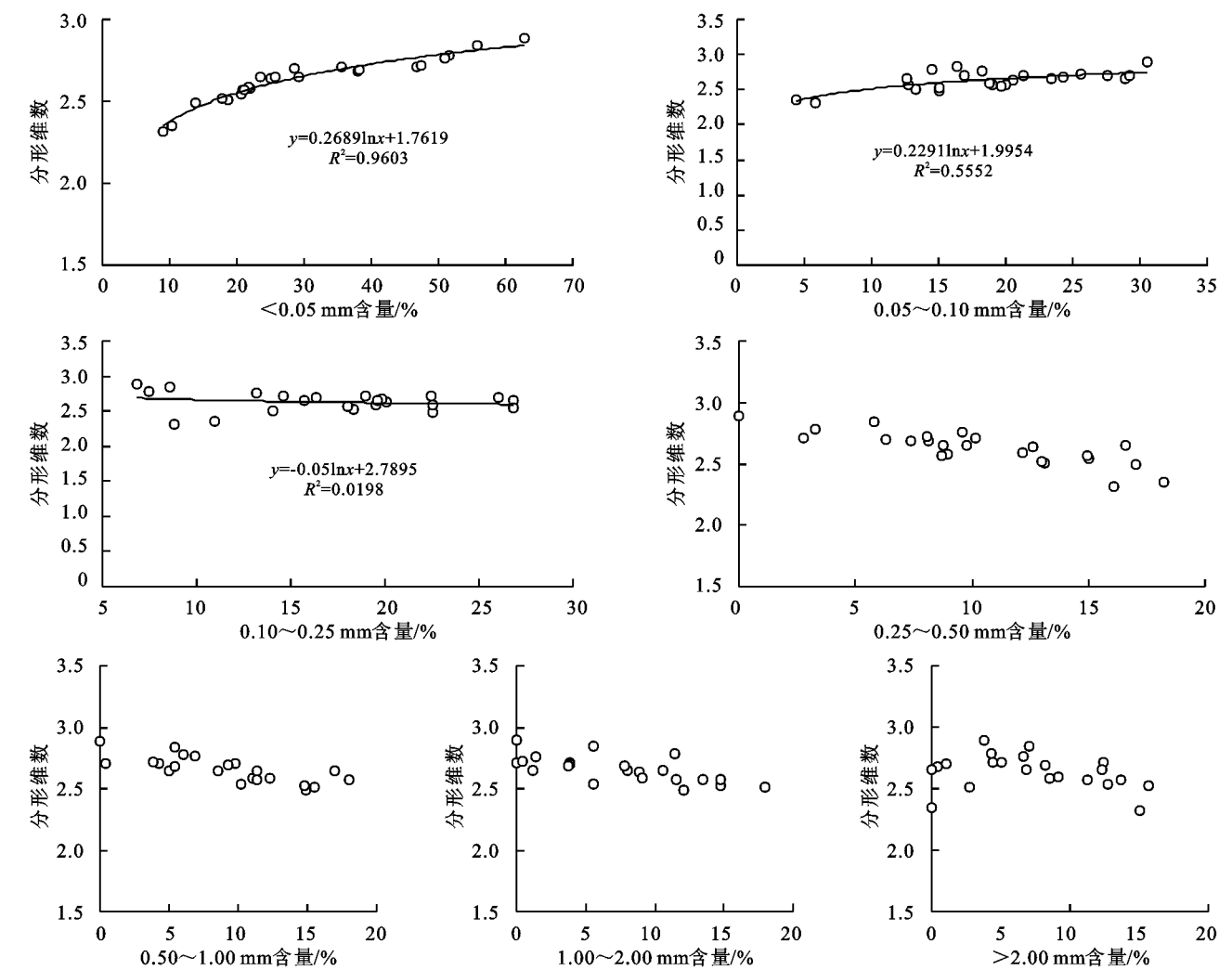


图 1 土壤颗粒分形维数与各粒径土壤颗粒百分含量相关关系

运用 Origin 9.0 软件对粉砂( $X_1$ )、极细砂( $X_2$ )、细砂( $X_3$ )、中砂( $X_4$ )、粗砂( $X_5$ )和极粗砂( $X_6$ )的百分含量与土壤颗粒分形维数进行了多元逐步回归分析,目的是剔除各变量之间共线性的影响,关系式如式(2)所示。

$$D=2.226+0.010X_1+0.001X_2-0.007X_3 \quad (2)$$

经过分析,可以认为决定该地区土壤颗粒分形维数大小的主要是粉砂、极细砂和细砂的百分含量。

2.2 土壤颗粒分形维数与植被类型及采样深度的关系

由表 1 可知,6 种不同群落土壤颗粒分形维数在 0—30 cm 采样深度存在差异,6 种不同群落类型的

表 1 土壤颗粒分形维数与植被类型及采样深度的关系

采样深度/cm	蒙古韭	银灰旋花	克氏针茅	羊草	洽草	短花针茅
0—5	2.64±0.29	2.71±0.09	2.89±0.28	2.52±0.08	2.78±0.15	2.84±0.11
5—10	2.49±0.19	2.65±0.05	2.72±0.06	2.57±0.12	2.71±0.09	2.69±0.06
10—20	2.58±0.24	2.70±0.02	2.71±0.19	2.65±0.15	2.57±0.12	2.65±0.02
20—30	2.59±0.23	2.65±0.15	2.68±0.26	2.54±0.11	2.66±0.05	2.76±0.09
平均值	2.575	2.678	2.750	2.570	2.680	2.735

2.3 土壤颗粒分形维数与土壤容重、孔隙度的关系

土壤颗粒分形维数与土壤总孔隙度( $r=0.731$ ,  $p<0.01$ )、毛管孔隙度( $r=0.788$ ,  $p<0.01$ )、均呈显著正相关,与土壤容重呈负相关( $p<0.01$ ),相关系数为 0.163(图 2)。表明土壤颗粒分形维数与土壤容重、孔隙度状况存在一定关系,其中土壤总孔隙度、毛管孔隙度与土壤分形维数的关系最明显,其次是土壤容重,但土壤颗粒分形维数对非毛管孔隙度大小的反映程度不高。表明 6 种不同群落类型下土壤总孔隙度、毛管孔隙度越大,土壤颗粒分形维数越大。在垂直结构上总体土壤孔隙度呈现随土层深度增加而减小的趋势。

2.4 土壤颗粒分形维数与土壤蓄水性能的关系

由图 3 可知,土壤颗粒分形维数与土壤饱和蓄水量、吸持蓄水量呈显著正相关( $p<0.01$ ),相关系数为 0.812,0.846,与滞留蓄水量的性关性不显著( $r=0.346$ ,  $p>0.05$ )。可见土壤颗粒分形维数对土壤蓄水状况的反映程度存在差异,其中反映程度最大的是吸持蓄水量,其次是饱和蓄水量。表明吸持蓄水量和饱和蓄水量越大,土壤颗粒分形维数越大,但土壤颗粒分形维数难以反映滞留蓄水量的大小。

3 讨论

3.1 土壤颗粒分形维数与土壤机械组成的关系

土壤颗粒机械组成与分形维数的关系,不仅与其成土母质、土壤质地、物理化学风化过程等有关,不同植被类型、土地利用方式对土壤颗粒分形维数也存在一定影

土壤分形维数以克氏针茅类型样地 0—5 cm 土层 2.890 为最大值,以克氏针茅类型样地 20—30 cm 土层 2.329 为最小值。在垂直结构上,土壤颗粒分形维数随采样深度的变化整体呈不同程度的线性下降趋势,变幅分别为:蒙古韭(0.150)、银灰旋花(0.060)、克氏针茅(0.210)、羊草(0.130)、洽草(0.210)、短花针茅(0.190)。地表(0—30 cm)的平均土壤分形维数介于 2.518~2.780,土壤平均分形维数依次表现为:克氏针茅(2.750)>短花针茅(2.735)>洽草(2.680)>银灰旋花(2.678)>蒙古韭(2.575)>羊草(2.570)。

响<sup>[26-27]</sup>。通过土壤颗粒分形维数与各粒径土壤颗粒百分含量相关性分析与回归分析(图 1)可知,研究区土壤颗粒分形维数  $D$  值与粉砂、极细砂的百分含量呈极显著正相关关系( $p<0.01$ ),其中土壤颗粒分形维数与粉砂的百分含量之间相关系数最大,为 0.960。与细砂的百分含量呈负相关关系,相关系数为 -0.020,与中砂、粗砂和极粗砂的百分含量的相关关系不显著。这表明粉砂、极细砂含量越高,土壤颗粒的分形维数值越大,反之越小。这一研究结果与众多研究土壤分形维数与粉砂含量关系的结果相一致<sup>[28]</sup>,而与部分研究关于土壤分形维数与粉砂关系的结果有所不同<sup>[29]</sup>。根据土壤颗粒分形维数计算过程得知,分形维数在 6 种不同群落的线性拟合分析方程的  $R^2$  为 0.019 8~0.960 3,说明分形维数拟合效果能反映土壤粒径分布情况。根据学者对土壤细颗粒含量与土壤退化的关系的研究,结合本研究土壤颗粒分形维数与土壤颗粒机械组成之间相关性,也能说明土壤颗粒分形维数可作为指示土壤退化的一个重要指标。

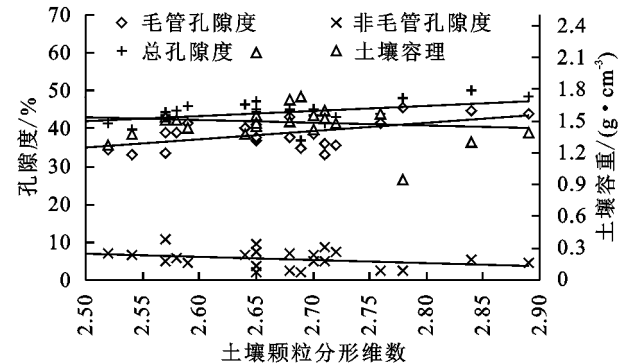


图 2 土壤颗粒分形维数与土壤容重、孔隙度的相关性



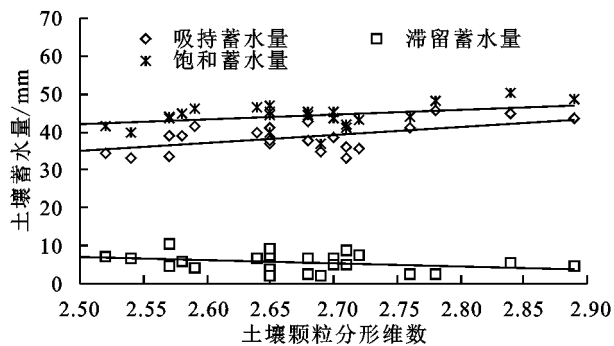


图3 土壤颗粒分形维数与土壤蓄水量的相关性

另外6种不同群落的土壤分形维数随采样深度增加呈现不同程度的波动,整体呈线性下降趋势,原因是由于该样地在实施封育措施后,易形成良好的土壤结构,植被恢复程度逐年加大,植被盖度也随之增加,地表土壤细颗粒物逐渐增多,对应的土壤分形维数有增大趋势,在0—10 cm土层中改善作用较明显。另一原因由于草地上80%以上生长的是草本植物,其根系主要分布在相对较浅的土层中,由于植物根系能够有效的增加下层土壤团聚体的含量,使土壤分形维数相应减小。本研究对6种不同群落土壤颗粒分形维数计算发现,希拉穆仁天然草地不同群落类型下土壤颗粒分形维数为2.518~2.780,平均值2.649,说明研究区土壤质地比较均一。根据刘云鹏采用分形模型研究表明<sup>[30]</sup>,分形维数应在2.75左右土壤其粒径结构较良好。进一步分析发现克氏针茅、短花针茅群落土壤分形维数最接近2.75,说明该群落样地土壤结构状况最好,能够较好的保肥保水。而蒙古韭、银灰旋花、羊草群落分形维数较低,土壤结构较差,这一规律与植被盖度高和枯枝落叶层较厚易增加地表土壤养分含量和粉黏粒含量有一定关系。

### 3.2 土壤颗粒分形维数与土壤物理参数的关系

结构较为良好的土壤容重通常为1.25~1.35 g/cm<sup>3</sup>,相应的土壤总孔隙度一般为40%~50%<sup>[31]</sup>。该地区土壤容重在1.28~2.14 g/cm<sup>3</sup>,总孔隙度为34.63%~50.17%。一般来讲,土壤颗粒分形维数越高,土壤质地细颗粒物越多,通透性越差,分形维数值越低,则土壤结构越松散<sup>[32]</sup>。但在近自然恢复状态下围封的荒漠草原区域内呈现相反的规律,土壤颗粒分形维数与总孔隙度、毛管孔隙度呈显著正相关,与土壤容重呈负相关,与非毛管孔隙度相关性不显著。表明围封区内,土壤孔隙度越大,通气透水性能越好,对应分形维数越高,规律不一致主要与该地区土壤中粗颗粒物较细颗粒物相对较高、分形维数总体相对较低有关,即土壤颗粒分形维数随土壤颗粒机械组成、粒径含量的不同与土壤的松散程度、通气性表现出阈值效应<sup>[25]</sup>。

### 3.3 土壤颗粒分形维数与土壤蓄水性能的关系

土壤颗粒分形维数在某种程度上可以表明土壤

的蓄水性能,其中饱和蓄水量为吸持蓄水量和滞留蓄水量的总和,可以较好地反映植被减少地表径流和防止土壤发生侵蚀的功能,而吸持蓄水量又称为毛管持水量,滞留蓄水程为非毛管蓄水,主要反映植被的水源涵养功能<sup>[24-25]</sup>。土壤蓄水性能的差异主要与土壤孔隙的大小有关,近自然恢复状态下荒漠草原的土壤颗粒分形维数与饱和蓄水量、吸持蓄水量呈显著正相关( $p < 0.01$ ),与滞留蓄水量相关性不显著。表明群落类型不同,土壤颗粒分形维数对土壤蓄水性能表现出一定的差异。土壤颗粒中粉砂、极细砂含量越高的分形维数相对较高,粉砂、极细砂含量高的土壤在改善土壤通气、透水性能的同时,增强土壤毛管孔隙度利于土壤团聚体的形成,提高水分子的吸附力,进而增强土壤的蓄水性能。从土壤颗粒分形及其蓄水性能特征来看,该地区6种群落改良土壤特性及蓄水功能表现为克氏针茅、短花针茅和洽草群落优于其他3种群落。

## 4 结论

(1) 决定该地区土壤颗粒分形维数大小的主要是粉砂(30.59%)和极细砂(18.7%)的百分含量,其次细砂的百分含量,其余粒级土壤颗粒的影响程度较小;土壤颗粒分形维数与土壤总孔隙度、毛管孔隙度、饱和蓄水量和吸持蓄水量呈正显著相关关系,与土壤容重、非毛管孔隙度、滞留蓄水量的相关性不大。

(2) 6种不同群落类型下土壤颗粒分形维数最大为2.840,最小值为2.490。0—30 cm土层土壤颗粒平均分形维数介于2.575~2.750,从大到小依次为:克氏针茅(2.750)>短花针茅(2.735)>洽草(2.680)>银灰旋花(2.678)>蒙古韭(2.575)>羊草(2.570)。6种不同群落类型样地上土壤分形维数随土壤采样深度的变化发生不同的波动规律,整体上均呈线性下降趋势。

(3) 从土壤分形维数及其蓄水性能来看,希拉穆仁荒漠草原近自然恢复状态下围封区的6种群落改良土壤特性及蓄水功能表现为克氏针茅、短花针茅和洽草群落优于其他3种群落。

### 参考文献:

- [1] 朴世龙,方精云,贺金生,等.中国草地植被生物量及其空间分布格局[J].植物生态学报,2004,28(4):491-498.
- [2] 刘合满,曹丽花.退化草地碳动态及固碳潜力[J].中国农学通报,2011,27(22):11-15.
- [3] 刘洪霞,冯益明,曹晓明,等.荒漠生态系统大数据资源平台建设与服务[J].干旱区资源与环境,2018,32(9):126-131.
- [4] 魏卫东,刘育红,马辉,等.三江源区高寒草甸土壤与草地退化关系冗余分析[J].生态科学,2018,37(3):35-43.
- [5] 潘庆民,薛建国,陶金,等.中国北方草原退化现状与恢复技术[J].科学通报,2018,63(17):1642-1650.

- [6] 陆敬山. 内蒙古自治区土地资源退化与防治措施[J]. 吉林农业:学术版, 2012(5):42-42.
- [7] 杨浩, 赵云, 张德罡. 高寒地区多年生人工草地土壤有机质含量的研究[J]. 中国草食动物科学, 2013, 33(6):52-55.
- [8] 娜日斯. 内蒙古地区自然生态环境建设与可持续发展[J]. 前沿, 2010, 03(11):144-146.
- [9] 南岭, 杜灵通, 展秀丽. 土壤风蚀可蚀性研究进展[J]. 土壤, 2014, 46(2):204-211.
- [10] 常海涛, 刘任涛, 刘佳楠, 等. 草方格造林固砂过程中土壤性质变化及分形特征:以腾格里沙漠东南缘为例[J]. 水土保持学报, 2018, 32(6):58-65, 165.
- [11] 王铁浩, 耿养会, 黄仲华. 三峡库区紫色土植被恢复过程的土壤团粒组成及分形特征[J]. 生态学报, 2013, 33(18):5493-5499.
- [12] 张超, 刘国彬, 薛莲, 等. 黄土丘陵区不同群落类型根际土壤微团聚体及颗粒分形特征[J]. 中国农业科学, 2011, 44(3):507-515.
- [13] 王佩将, 戴全厚, 丁贵杰, 等. 喀斯特植被恢复过程中的土壤分形特征[J]. 水土保持学报, 2012, 26(4):178-182, 230.
- [14] 管光玉, 范燕敏, 武红旗, 等. 不同利用方式土壤颗粒分形特征及其与土壤有机碳库稳定性的关系[J]. 草地学报, 2016, 24(2):258-262.
- [15] 陶高粱, 张季如, 庄心善, 等. 描述黏粒含量对土—水特征曲线影响规律的分形模型[J]. 水利学报, 2014, 45(4):490-496.
- [16] 张晓娜, 蒙仲举, 杨振奇. 不同封育措施下希拉穆仁荒漠草原土壤质量评价[J]. 土壤通报, 2018, 49(4):788-793.
- [17] 王则宇, 蒙仲举, 崔向新, 等. 希拉穆仁天然草地不同群落土壤入渗特征[J]. 水土保持学报, 2017, 31(3):112-117.
- [18] 李永强, 李治国, 董智, 等. 内蒙古荒漠草原放牧强度对风沙通量和沉积物粒径的影响[J]. 植物生态学报, 2016, 40(10):1003-1014.
- [19] 黄昕, 蒙仲举, 汪季, 等. 希拉穆仁草原退化评价及地表风蚀颗粒表征[J]. 水土保持研究, 2016, 23(5):141-146, 151.
- [20] 席小康, 朱仲元, 郝祥云. 锡林河流域草原植物群落分类及其多样性分析[J]. 生态环境学报, 2016, 25(8):1320-1326.
- [21] 朱瑜, 张卓栋, 刘畅, 等. 激光粒度仪与吸管法测定土壤机械组成的比较研究:以不同退化程度栗钙土为例[J]. 水土保持研究, 2018, 25(3):62-67.
- [22] 丁延龙, 高永, 蒙仲举, 等. 希拉穆仁荒漠草原风蚀地表颗粒粒度特征[J]. 土壤, 2016, 48(4):803-812.
- [23] 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.
- [24] 袁久坤, 周英. 利用取土钻改进环刀法准确测定土壤容重和孔隙度[J]. 中国园艺文摘, 2014, 30(3):25-26.
- [25] 夏江宝, 谢文军, 陆兆华, 等. 再生水浇灌方式对芦苇地土壤水文生态特性的影响[J]. 生态学报, 2010, 30(15):4137-4143.
- [26] 梁博, 林田苗, 任德智, 等. 土地利用方式对雅江中游土壤理化性质及颗粒分形特征的影响[J]. 土壤, 2018, 50(3):613-621.
- [27] 高广磊, 丁国栋, 赵媛媛, 等. 4 种粒径分级制度对土壤体积分形维数测定的影响[J]. 应用基础与工程科学学报, 2014, 22(6):1060-1068.
- [28] 赵明月, 赵文武, 刘源鑫. 不同尺度下土壤粒径分布特征及其影响因子:以黄土丘陵沟壑区为例[J]. 生态学报, 2015, 35(14):4625-4632.
- [29] 高君亮, 李玉宝, 虞毅, 等. 毛乌素沙地不同土地利用类型土壤分形特征[J]. 水土保持研究, 2010, 17(6):220-223.
- [30] 刘云鹏, 王国栋, 张社奇, 等. 陕西 4 种土壤粒径分布的分形特征研究[J]. 西北农林科技大学学报:自然科学版, 2003, 31(2):92-94.
- [31] 许景伟, 李传荣, 夏江宝, 等. 黄河三角洲滩地不同林分类型的土壤水文特性[J]. 水土保持报, 2009, 23(1):173-176.
- [32] 黄冠华, 詹卫华. 土壤颗粒的分形特征及其应用[J]. 土壤学报, 2002, 39(4):490-497.

(上接第 50 页)

- [15] 黄婷, 于德永, 乔建民, 等. 内蒙古锡林郭勒盟景观格局变化对土壤保持能力的影响[J]. 资源科学, 2018, 40(6):1256-1266.
- [16] 郭思琪, 韩磊, 赵永华, 等. 秦岭地区土壤侵蚀时空变化及景观格局[J]. 生态学杂志, 2019, 38(7):2167-2176.
- [17] 赵亮, 刘宇. 耦合景观破碎化和土壤侵蚀的“源”“汇”边界指数[J]. 地理与地理信息科学, 2018, 34(1):98-104.
- [18] 王金花, 李占斌, 张荣刚, 等. 水蚀风蚀交错区流域景观格局变化及水沙响应关系[J]. 中国水土保持科学, 2016, 14(3):68-75.
- [19] Ouyang W, Hao F, Skidmore K, et al. Soil erosion and sediment yield and their relationships with vegetation cover in upper stream of the yellow river[J]. Science of the Total Environment, 2010, 409(2):396-403.
- [20] Xu Y, Tang H, Wang B, et al. Effects of landscape patterns on soil erosion processes in a mountain-basin system in the north china[J]. Natural Hazards, 2017, 87(3):1567-1585.
- [21] 姚雄, 余坤勇, 刘健, 等. 南方水土流失严重区的生态脆弱性时空演变[J]. 应用生态学报, 2016, 27(3):735-745.
- [22] 闫玮明, 孙冰, 裴男才, 等. 粤北阔叶人工林和次生林植物多样性与土壤理化性质相关性研究[J]. 生态环境学报, 2019, 28(5):898-907.