



封育对荒漠草原苦豆子群落 土壤粒径分形特征的影响

赵盼盼^{1,2}, 李国旗^{1,2*}, 邵文山^{1,2}, 靳长青^{1,2}

(1 宁夏大学 西北土地退化与生态恢复国家重点实验室培育基地, 银川 750021; 2 宁夏大学 西北退化生态系统恢复与重建教育部重点实验室, 银川 750021)

摘要: 该研究以宁夏盐池荒漠草原区苦豆子(*Sophora alopecuroides*)群落为研究对象, 通过野外采样和实验室分析, 研究了围封对苦豆子群落土壤颗粒分形维数的变化特征以及分形维数与土壤理化性质的关系。结果表明: (1) 与围栏外相比, 围栏处理样地的黏粒($<2\ \mu\text{m}$)体积百分比含量增加, 在 0~10、10~20 和 20~40 cm 土层差异显著; 粉粒(2~50 μm)体积百分比含量在 0~10 cm 土层显著增加; 而砂粒(50~250 μm)体积百分比含量减少, 在 0~10 和 10~20 cm 土层差异显著, 围封可促使土质细粒化。(2) 与围栏外相比, 围栏内土壤有机碳、全 N、全 P、碱解氮、速效磷含量均有所提高, 其中 0~10 cm 土层分别增加了 177.70%、155.70%、60.11%、120.42%、179.40%, 10~20 cm 土层土壤有机碳、全 N、全 P、速效磷含量增加比例分别为 202.80%、36.50%、27.78% 和 37.30%, 20~40 cm 土层土壤养分变化不显著, 说明围栏封育使土壤养分主要富集在 0~20 cm 土层, 其中 0~10 cm 土层富集达到显著水平。(3) 苦豆子群落围栏内的土壤粒径分形维数在 2.64~2.69 之间, 围栏外的分形维数在 2.59~2.64 之间; 与围栏外相比, 围栏内土壤粒径分形维数在 0~10 和 10~20 cm 土层增加显著。(4) 土壤粒径分形维数与土壤粒径分布、土壤有机碳、全 N、全 P、碱解氮、速效 P 含量均呈显著的线性关系, 说明分形维数可以作为一个衡量土壤肥力、土壤结构以及退化土壤恢复程度的综合性指标。

关键词: 苦豆子群落; 荒漠草原; 封育; 分形维数; 土壤理化性质

中图分类号: Q948.113; S152.3

文献标志码: A

Effect of Fencing on the Fractal Characteristics of Soil Particle Size in Desert Steppe

ZHAO Panpan^{1,2}, LI Guoqi^{1,2*}, SHAO Wenshan^{1,2}, JIN Changqing^{1,2}

(1 Breeding Base for State Key Laboratory of Land Degradation and Ecological Restoration in Northwest China, Ningxia University, Yinchuan 750021, China; 2 Key Laboratory for Recovery and Restoration of Degraded Ecosystem in North-western China of Ministry of Education, Ningxia University, Yinchuan 750021, China)

Abstract: In this paper, we set an object of study in the desert steppe in Ningxia, based on the field sampling and laboratory analysis. The characteristics of the fractal dimension of the soil and the relationship between fractal dimension and soil properties were studied. The results showed that: (1) there was more fine grained soil after enclosure. The clay($<2\ \mu\text{m}$)content increased significantly in 0–10 cm, 10–20 cm and 20–40 cm soil layers($P<0.05$). The silt sand(2–50 μm)content increased significantly in 0–10 cm soil layer($P<0.05$). The sand(50–250 μm)content decreased in 0–10 cm, 10–20 cm soil layer($P<0.05$). (2) Soil nutrients accumulated after enclosure. The organic carbon, TN, TP, alkali-hydrolyzable

收稿日期: 2017-03-29; 修改稿收到日期: 2017-05-05

基金项目: 国家自然科学基金(31540007)

作者简介: 赵盼盼(1991–), 女, 硕士研究生, 主要从事植物生态学、土壤生态学研究。E-mail: 1751327789@qq.com

* 通信作者: 李国旗, 博士, 研究员, 主要从事植物生态学等方面的研究。E-mail: guoqilee@163.com

nitrogen, available phosphorus content of soil were higher. In 0—10 cm soil layer, the organic carbon, TN, TP, alkali-hydrolyzable nitrogen, available phosphorus content increased by 177.70%, 155.70%, 60.11%, 120.42%, and 179.40%, respectively. In 10—20 cm soil layer, the soil organic carbon, TN, TP, available phosphorus content increased by 202.80%, 36.50%, 27.78% and 37.30%, respectively. The soil nutrient change is not significant in 20—40 cm soil layer ($P>0.05$). Obviously, enriched nutrients were distributed mainly in the 0—20 cm layer and concentrated in 0—10 cm layer ($P<0.05$). (3) In the enclosed plot, the fractal dimension of soil is of between 2.64—2.69, and the fractal dimension of the outside fence is 2.59—2.64. Compared with outside fence, the fractal dimension of soil in the enclosed plot increased significantly in 0—10 cm and 10—20 cm ($P<0.05$). (4) The soil fractal dimension and soil particle size distribution, the organic carbon, TN, TP, alkali-hydrolyzable nitrogen, available phosphorus content all showed a linear relationship. The results show that fractal dimension can be used as a comprehensive index to measure soil fertility, soil structure and soil restoration.

Key words: *Sophora alopecuroides* community; desert steppe; fencing; fractal dimension; soil physico-chemical properties

荒漠草原介于沙漠与草原之间,是旱生性最强的一类草原生态系统^[1]。其处于干旱半干旱的农牧交错区,植被稀疏,且多呈斑块状分布,导致该区环境极其脆弱,土地风蚀严重,土壤贫瘠且基质稳定性差^[2]。再加上近年来人类的过度放牧等干扰,致使原本脆弱的荒漠草原区日益呈现出草地退化、土地沙化和土壤退化等问题,并不断向裸露化或荒漠化方向发展^[3]。在退化生态系统恢复与重建的过程中,围栏封育已成为退化土地恢复的重要举措之一^[4],被世界广泛采用。苦豆子(*S. alopecuroides*)群落作为荒漠草原常见的植物群落之一,它不仅有极好的固沙作用,而且在生态平衡的维护、土地沙漠化的防制以及水土流失的防治过程中起着独特的有益作用^[5]。因此,研究该区域围栏封育对荒漠草原区土壤特性的变化规律,对于该地区环境保护和生态建设具有重要的指示意义。

土壤是一种具有不规则形状和自相似结构的多孔介质,由不同颗粒组成,且有一定的分形特征^[6-9]。土壤粒径分形维数不但可以表征土壤颗粒大小,而且能反映土壤质地的均匀程度^[10-11]。有研究表明,土壤质地越细,土壤粒径分形维数越大^[10]。也有研究发现,土壤粒径分形维数与土地沙漠化程度、土壤养分以及土壤结构之间存在着显著线性关系^[12-14]。苏永中、伏耀龙、党亚爱等^[12,14-16]在前人土壤粒径分形维数与土壤有机碳、全 N、全 P、速效 P、碱解 N 及速效 K 有一定的相关关系的基础上,进一步证实了土壤粒径分形维数对土壤肥力有一定影响。表明土壤粒径分形维数可以作为评估土壤肥力和土地退化程度的指标^[6,12,14,17-19]。以往的研究中关于封育对土壤粒径分形维数、土壤粒径分形维数与土壤养分之间的相关研究还没有涉及。鉴于此,本文以采集

于宁夏荒漠草原苦豆子群落的土壤为研究对象,分析了围封对苦豆子群落土壤颗粒分形维数的变化特征以及分形维数与土壤性状的关系。旨在为荒漠草原的生态恢复与重建提供一定的参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验区位于宁夏东部盐池县(E 106°30'10"~107°48', N 37°04'~38°10')沙边子,位于毛乌素沙地西南部半干旱农牧交错区,是黄土高原向鄂尔多斯台地过渡地带,自然条件较为恶劣,属于典型的中温带大陆性季风气候,年均温 7.1℃,1 月平均气温 -8.8℃;年日照为 2 864 h,年降水量 250~300 mm,且大部分集中在 6~9 月,年蒸发量在 2 600 mm 左右,年无霜期 165 d,气候特征是生长期短、干旱少雨、风沙大^[20]。土壤类型主要为灰钙土、风沙土、黄绵土和盐碱土,土壤质地为沙壤和粉沙壤^[21],土壤结构疏松、肥力差。试验区位于中国温带草原的过渡地带,属于欧亚草原区,群落表现出旱生植物与典型草原建群种多年生禾草的镶嵌式分布格局。研究区植被主要有苦豆子、白刺(*Nitraria tangutorum*)、披针叶野决明(*Thermopsis lanceolata*)、长芒草(*Stipa bungeana*)、芨芨草(*Achnatherum splendens*)和油蒿(*Artemisia ordosica*)等。

1.2 采样点设置与调查取样方法

在宁夏盐池县沙边子选取实施围栏封育的以苦豆子为优势种的草地(总覆盖度为 85%~90%)类型为研究对象,以其围栏外的苦豆子群落(总覆盖度为 30%~40%)作为对照。于 2016 年 7 月底,植物生长最旺盛时期,在两样地内沿着对角线随机选取 6 个 5 m × 5 m 的大样方,在大样方中采取 5 点采

样法,各设 5 个 1 m × 1 m 的小样方,分别按 0~10 cm、10~20 cm、20~40 cm 取土,将同一大样方中 5 个小样方的同层土样混合,装入塑料袋,两样地总计 36 个土样带回实验室。

1.3 试验方法

土样自然风干,过 2 mm 筛,并去除树根等杂物,使用英国马尔文公司的利用 Mastersizer 3 000 激光衍射粒度分析仪进行土壤粒径分布(PSD)的测定,粒度分析的粒径范围 0.01~3 500 μm,土壤粒径分级采用美国制土壤粒级标准^[22-23],分为黏粒(<2 μm)、粉粒(2~50 μm)、极细砂粒(50~100 μm)、细砂粒(100~250 μm)、中砂粒(250~500 μm)、粗砂粒(500~1 000 μm)、极粗砂粒(1 000~2 000 μm)和石砾(2 000~3 000 μm)。

土壤化学性状的测定均采用常规分析法^[24],土壤有机碳测定用重铬酸钾容量法—外加热法;全氮用半微量凯氏定氮法;全磷用钼锑抗比色法;土壤碱解氮采用碱解扩散法;土壤速效磷采用 0.5 mol/L NaHCO₃ 法。

1.4 数据处理

分形维数的计算:
土壤是具有分形特征的系统,运用分形理论建立土壤颗粒结构的分形模型^[25],利用土壤颗粒体积与平均粒径间的关系,计算土壤颗粒的分形维数。公式如下:

$$\frac{V(r < R_i)}{V_T} = \left(\frac{R_i}{R_{\max}}\right)^3 - D$$

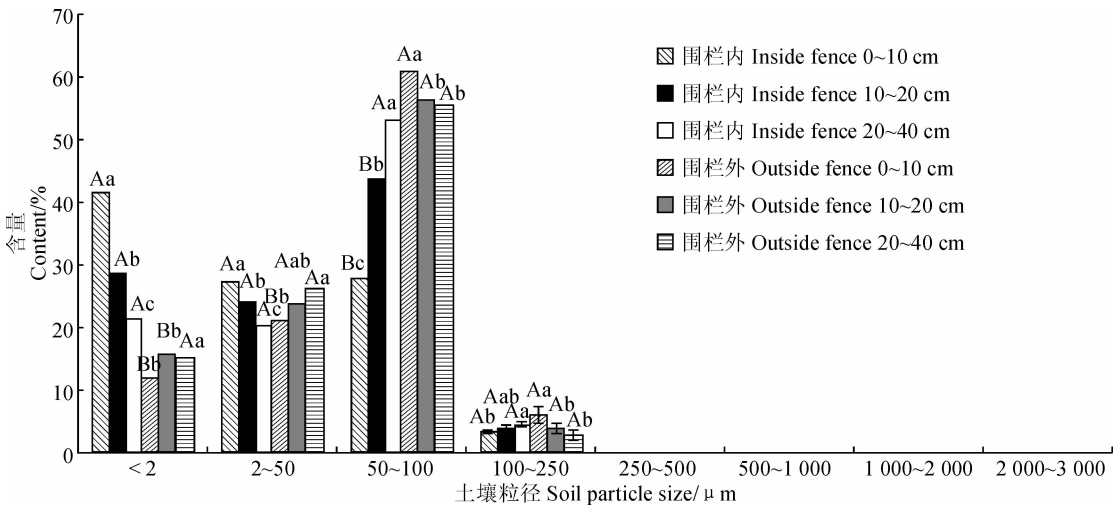
式中: D 为土壤颗粒分形维数; r 为土壤粒径/μm; R_i 为粒径等级 i 的土壤粒径(μm); V_T 为土壤颗粒总体积(%); R_{\max} 为土壤粒径的极大值(μm); V 为土壤粒径小于 R_i 的土壤体积百分量。

所得试验数据用 Excel 2010 进行数据整理及图表制作,采用 SPSS17.0 软件进行统计分析。其中围栏内外数据差异采用配对 T 检验分析比较,同样地不同土层间的差异采用单因素方差分析和最小显著差异法(LSD)进行分析比较。所有数据均为 3 次重复的平均值。

2 结果与分析

2.1 围栏封育对苦豆子群落土壤理化性质的影响

2.1.1 土壤粒级组成及其变化 由图 1 可见,苦豆子群落土壤主要组成有黏粒(<2 μm)、粉粒(2~50 μm)、极细砂粒(50~100 μm)和细砂粒(100~250 μm)。明显地,围栏内外均是极细砂粒含量所占比例较大,细砂粒(100~250 μm)含量所占比例非常小,甚至粒径>250 μm 的土壤颗粒几乎没有。苦豆子群落围栏内,0~10 cm 土层表现为黏粒含量最多,平均值为 41.59%,10~20 和 20~40 cm 土层均是极细砂粒含量最多,平均值分别为 43.71% 和 53.37%;黏粒、粉粒含量随土层深度的加深表现为降低趋势,且在 0~10 cm、10~20 cm、20~40 cm 土层间存在显著差异($P<0.05$),而极细砂粒和细砂粒含量随土层的加深而增加,极细砂粒的变化在各土层间差异显著,细砂粒含量的变化在 0~10 与 20



不同大写字母表示两样地同一土层间的差异显著($P<0.05$),不同小写字母表示同一块地不同土层间的差异显著($P<0.05$);下同
图 1 苦豆子群落围栏内外土壤粒径含量分布
Different capital letters indicate the significant difference in same soil layer between two sample plots($P<0.05$); The different normal letters indicate the significant difference in same sample plot among different soil layers($P<0.05$); The same as below
Fig. 1 Distribution of soil particle size inside and outside the fence of *S. alopecuroides* community

~40 cm 土层差异显著。苦豆子群落围栏外,在不同土层均表现为极细砂粒含量最高,其在 0~10 cm、10~20 cm、20~40 cm 土层平均值依次为 60.89%、56.38%、55.64%;随土层加深,黏粒含量表现为先增后降的变化趋势,0~10 与 10~20、20~40 cm 土层间存在显著差异,而 10~20 与 20~40 cm 土层差异不显著,粉粒含量是随着土层的加深而增加的,在 0~10 与 20~40 cm 间存在显著差异($P<0.05$),极细砂粒和细砂粒含量随土层加深而降低,均表现为在 0~10 与 10~20、20~40 cm 土层间存在显著差异,而 10~20 与 20~40 cm 土层差异不显著($P>0.05$)。与围栏外相比,围栏内 0~10 cm 土层的黏粒、粉粒含量分别增加了 29.67%、6.02%,差异显著,极细砂粒和细砂粒含量分别减少了 32.94%、2.75%,极细砂粒含量变化差异显著,10~20 cm 土层黏粒含量增加了 12.69%,极细砂粒含量减少了 12.68%,均有显著差异,粉粒、细砂粒含量有小幅度的变化,差异不显著,20~40 cm 土层土壤颗粒含量均有微小的波动,差异均不显著。

2.1.2 土壤化学性质的变化特征 由表 1 可知,苦豆子群落围栏内,土壤有机碳、全氮、全磷、碱解氮、速效磷均在 0~10 cm 土层含量最高,分别为 10.87 g/kg、0.76 g/kg、0.55 g/kg、40.56 mg/kg 和 15.57 mg/kg,各土壤养分随土层的加深而减少,除碱解氮含量的变化在 10~20 cm 与 20~40 cm 土层间差异不显著($P>0.05$)外,土壤有机碳、全氮、全磷、速效磷含量的变化在 0~10、10~20 与 20~40 cm 土层间均存在显著差异($P<0.05$);苦豆子群落围栏外,土壤有机碳、全氮、碱解氮、速效磷含量的变化趋势与围栏内相同,随土层的加深而减少,且在 0~10、10~20 与 20~40 cm 土层间均存在显著差异,而全磷含量随土层加深呈先增后降的变化趋势,10~20 与 20~40 cm 土层间存在显著差异;与围栏外比较,围

栏内 0~10 cm 土层的土壤有机碳、全氮、全磷、碱解氮、速效磷含量均显著增加,增加比例依次为 177.70%、155.70%、60.11%、120.42% 和 179.40%;10~20 cm 土层土壤有机碳、全氮、全磷、速效磷含量有所增加,分别增加了 202.80%、36.50%、27.78% 和 37.30%,有机碳、全氮、全磷、速效磷含量的增加差异显著,碱解氮含量有小幅度的降低趋势,二者差异不显著;20~40 cm 土层,土壤有机碳、全氮、全磷、碱解氮、速效磷含量均有微小的增加趋势,土壤有机碳、全氮含量的变化存在显著差异,其他土壤养分的变化差异均不显著。

2.2 围栏封育对苦豆子群落土壤粒径分形维数特征的影响

2.2.1 土壤粒径分形维数的变化 由表 2 可知,苦豆子群落土壤粒径分形维数变化于 2.59~2.69 之间。苦豆子群落围栏内,0~10、10~20 和 20~40 cm 土层的土壤粒径分形维数依次为 2.69、2.66 和 2.64,其随着土层的加深呈减小的趋势,且不同土层间存在显著差异($P<0.05$);围栏外,0~10、10~20 和 20~40 cm 土层的土壤粒径分形维数分别为 2.59、2.62 和 2.64,土壤粒径分形维数随土层加深逐渐增大,且不同土层间差异显著;通过配对 T 检验,围栏

表 2 苦豆子群落围栏内外土壤粒径分形维数的变化

Table 2 The fractal dimension of soil particle size inside and outside the fence of *S. alopecuroides* community

样地 Sample	土层深度 Soil depth/ cm	分形维数 Fractal dimension
围栏内 Inside fence	0~10	2.69±0.0005Aa
	10~20	2.66±0.0069Ab
	20~40	2.64±0.0023Ac
围栏外 Outside fence	0~10	2.59±0.0025Bc
	10~20	2.62±0.0060Bb
	20~40	2.64±0.0032Aa

表 1 苦豆子群落围栏内外土壤养分的变化

Table 1 Changes of soil nutrients inside and outside the fence of *S. alopecuroides* community

样地 Sample	土层深度 Soil depth / cm	有机碳 Organic carbon /(g/kg)	全氮 Total nitrogen /(g/kg)	全磷 Total phosphorus /(g/kg)	碱解氮 Alkali hydrolyzable nitrogen content /(mg/kg)	速效磷 Available phosphorus content /(mg/kg)
围栏内 Inside fence	0~10	10.87±0.14Aa	0.76±0.02Aa	0.55±0.01Aa	40.56±3.15Aa	15.57±0.46Aa
	10~20	6.08±0.21Ab	0.38±0.01Ab	0.47±0.01Ab	15.37±1.36Ab	3.75±0.43Ab
	20~40	2.47±0.42Ac	0.26±0.00Ac	0.33±0.01Ac	13.04±1.04Ab	1.61±0.43Ac
围栏外 Outside fence	0~10	3.91±0.28Ba	0.30±0.00Ba	0.34±0.02Bab	18.40±0.43Ba	5.57±0.18Ba
	10~20	2.00±0.24Bb	0.27±0.01Bb	0.36±0.02Ba	16.04±1.26Ab	2.48±0.45Bb
	20~40	1.57±0.07Bc	0.18±0.01Bc	0.32±0.01Ab	12.28±1.04Ac	1.46±0.14Ac

封育样地 0~10 和 10~20 cm 土层的土壤粒径分形维数均显著增加,而 20~40 cm 土层的土壤粒径分形维数的变化无显著差异($P>0.05$)。

2.2.2 土壤粒径分形维数与土壤粒级组成的关系

由图 2 可知,土壤粒径分形维数与土壤中各粒级均呈显著线性相关,其中土壤分形维数与黏粒($<2\text{ }\mu\text{m}$)、粉粒($2\sim50\text{ }\mu\text{m}$)含量呈正相关关系,相关系数分别为 0.889($P<0.001$)和 0.515($P<0.05$),而与极细砂粒($50\sim100\text{ }\mu\text{m}$)、细砂粒($100\sim250\text{ }\mu\text{m}$)含

量呈极显著的负相关关系,相关系数分别为 -0.880 ($P<0.001$)和 -0.615 ($P<0.01$)。土壤粒径分形维数与黏粒含量相关性最好,其次是极细砂粒。这表明土壤粒径分形维数随着黏粒、粉粒含量的增多而不断增大,随着极细砂粒与细砂粒含量的增多而不断减小。

2.2.3 土壤粒径分布分形维数与土壤养分的关系

由表 3 可知,土壤粒径分形维数与土壤有机碳、全氮、全磷含量均达到了极显著正相关,相关系数分别

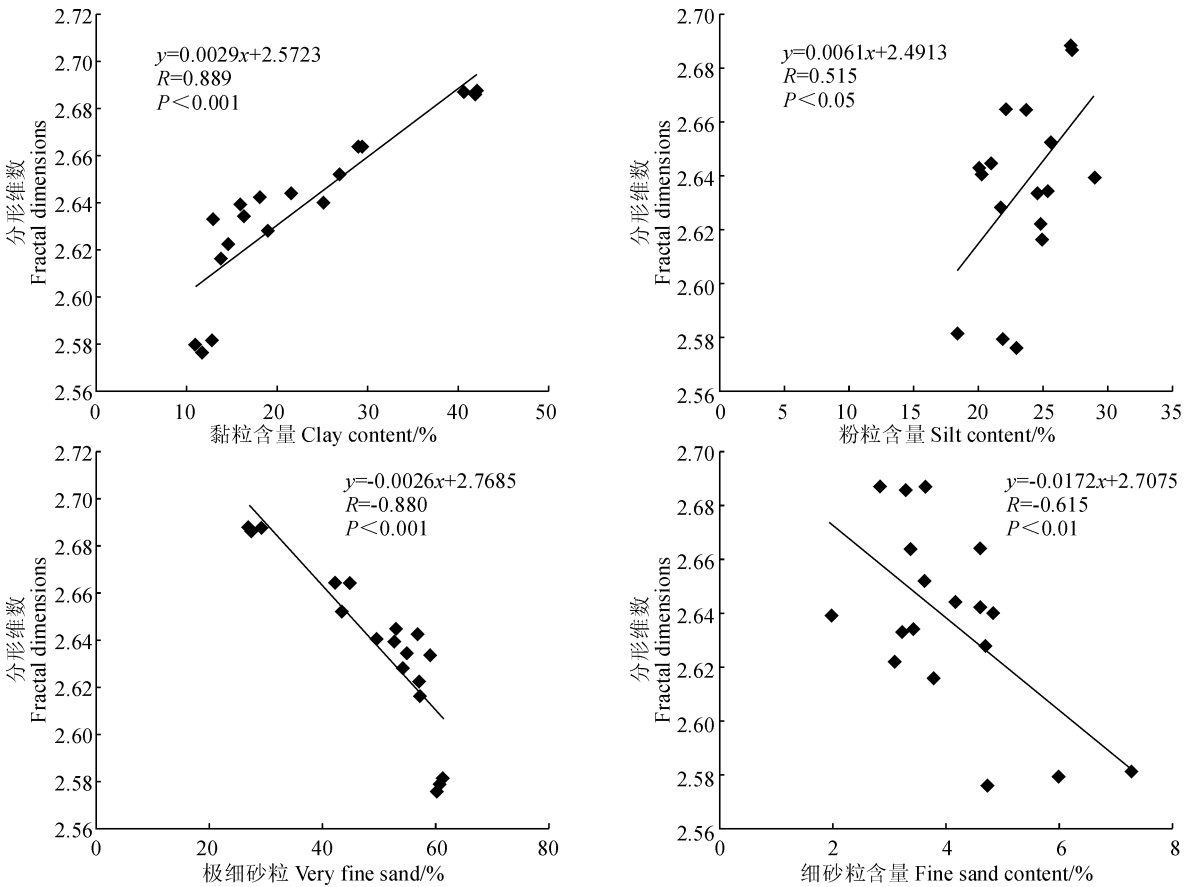


图 2 土壤颗粒分形维数与土壤各粒级含量的关系

Fig. 2 Relationship between fractal dimensions of soil particle and contents of particle fractions

表 3 土壤颗粒分形维数与土壤养分含量回归分析拟和结果

Table 3 Regression analysis results of fractal dimension of soil particle size and soil nutrient content

土壤养分 Soil nutrient content	回归方程 Regression equation	相关系数 Correlation coefficient	显著水平 Significant level
有机碳 Organic carbon /(g/kg)	$y=0.006x=2.607$	0.646	0.002
全氮 Total nitrogen /(g/kg)	$y=0.117x=2.595$	0.659	0.001
全磷 Total phosphorus /(g/kg)	$y=0.295x=2.520$	0.742	0.000
碱解氮 Alkali hydrolyzable nitrogen content /(mg/kg)	$y=0.001x=2.602$	0.528	0.012
速效磷 Available phosphorus content /(mg/kg)	$y=0.003x=2.620$	0.487	0.020

注: y 为土壤粒径分形维数, x 为土壤养分
Note: y is the fractal dimension of soil particle size, x is the soil nutrient

为 0.646($P<0.01$)、0.659($P<0.01$)、0.742($P<0.001$),与碱解氮、速效磷含量呈显著线性正相关关系,相关系数分别为 0.528($P<0.05$)、0.487($P<0.05$),说明土壤粒径分形维数是随土壤养分含量增大而增大的。

3 讨 论

3.1 围栏封育对苦豆子群落土壤理化性质的影响

土壤的粒径分布作为土壤重要的物理属性之一,不仅可以反映土壤颗粒组成及大小,对土壤的水肥状况及土壤侵蚀等有明显的影响^[26-27]。本研究中,围栏内的黏粒($<2\ \mu\text{m}$)、粉粒($2\sim50\ \mu\text{m}$)含量随土层的加深显著降低,而极细砂粒($50\sim100\ \mu\text{m}$)含量随土层加深显著增加,围栏外土壤颗粒以极细砂粒为主,其次是粉粒,0~10 cm 层极细砂粒含量最高,黏粒含量最低;较围栏外,围栏封育样地 0~10 和 10~20 cm 土层的黏粒、粉粒含量显著增加,极细砂粒含量显著降低,而深层(20~40 cm)土的土壤各颗粒组成含量基本不受影响,说明围栏封育可以有效促使细颗粒土壤的积累。这与前人^[14,28-29]在其它关于退化土地逆向演替的研究结果相一致。究其原因,主要是因为对苦豆子群落实施围栏封育后,地上植被覆盖度大大提高,同时土壤结皮的形成,有效减小了风沙活动,使大气中的粉尘得以在降尘、降雨等过程中储存下来;另外,风蚀的减少有利于细颗粒物沉积,进而改变了土壤粒径分布^[30]。

土壤养分是植物生长发育的必要条件之一,对植被具有重要的意义。本研究结果表明,总体上群落围栏内外土壤养分均随土层的加深而呈现降低趋势,较围栏外,围栏封育显著提高了 0~10 和 10~20 cm 层土壤全磷、碱解氮、速效磷含量,而土壤有机碳和土壤全氮含量在 0~10、10~20 和 20~40 cm 土层均显著提高,说明围栏可以改善土壤肥力。这与黄蓉等^[31-32]的研究结果相一致。这种结果出现的原因,首先是围栏封育后在相对稳定的环境中,植被得以恢复,有效减小了水土流失,截留了部分富含养分的土壤^[31];其次是围封后植被盖度的提高,造成大量凋落物和立枯的积累^[33],促使土壤养分含

量显著提高;另外,围封后全氮含量增加显著也可能与豆科固氮作用密切相关。

3.2 围栏封育对苦豆子群落土壤粒径分形维数特征的影响

土壤粒径分形维数是反映土壤结构几何形状的一种参数^[12]。关于围封对土壤粒径分形维数的研究报道较少,文海燕等^[29]对退化沙质草围封过程中的土壤颗粒分形特征进行了研究,结果显示:围封后,0~15 cm 层土壤粒径分形维数增大,而 15~30 cm 层土壤粒径分形维数无显著变化。本研究发现,与围栏外比较,围栏封育样地 0~20 cm 土层的土壤粒径分形维数提高,而 20~40 cm 土层的土壤粒径分形维数基本不变,说明围封可以显著提高浅层土壤分形维数。这也进一步印证了文海燕等的研究结果。

本研究发现,土壤粒径分形维数与土壤黏粒($<2\ \mu\text{m}$)、粉粒($2\sim50\ \mu\text{m}$)等细颗粒含量呈正相关关系,与极细砂粒($50\sim100\ \mu\text{m}$)、细砂粒($100\sim250\ \mu\text{m}$)含量呈负相关关系,其中与黏粒、极细砂粒、细砂粒含量达到了极显著相关关系。说明作为具有自相似性的一种多孔介质,土壤分形特征明显,土壤颗粒越小,土壤粒径分形维数就越高,土壤颗粒越大,土壤粒径分形维数越小。前人^[13,18,29,34]在其他研究中得到的结果与本研究的结果相一致。土壤粒径分形维数很好地表征土壤颗粒大小组成,而且还可以反映质地的均一程度,可以作为评价土壤质地差异的重要指标之一^[35-37]。

本研究中,回归分析表明,土壤粒径分形维数与土壤养分之间均存在显著相关关系,其中土壤粒径分形维数与有机碳、全氮、全磷含量达到了极显著正相关关系。前人^[6,38-39]在其他研究中得出了与本研究相似的结果。说明土壤养分与土壤粒径分形维数值关系密切,土壤粒径分形维数可以用来反映土壤肥力状况^[40]。也有研究认为,土壤粒径分形维数可以表征退化土壤结构状况和退化程度^[34,41],所以,土壤粒径分形维数能作为一种评价退化土壤结构的综合性指标。

参考文献:

[1] 吕桂芬,吴永胜,李 浩,等. 荒漠草原不同退化阶段土壤微生物、土壤养分及酶活性的研究[J]. 中国沙漠, 2010,30(1):

104-109.
LÜ G F, WU Y S, LI H, *et al.* Microorganisms, soil nutrient and enzyme activity changing with the proceeding of desert steppe degradation in Inner Mongolia[J]. *Journal of Desert*

- Research, 2010, **30**(1):104-109.
- [2] 刘任涛, 杨新国, 宋乃平, 等. 荒漠草原区固沙人工柠条林生长过程中土壤性质演变规律[J]. 水土保持学报, 2012, **26**(4): 108-112.
LIU R T, YANG X G, SONG N P, *et al.* Soil properties following growing process of artificial forests (*Caragana korshinskii*) in desert steppe[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2012, **26**(4):108-112.
 - [3] 蒋 齐, 李生宝, 潘占兵, 等. 人工柠条灌木林营造对退化沙地改良效果的评价[J]. 水土保持学报, 2006, **20**(4):23-27.
JIANG Q, LI S B, PAN Z B, *et al.* Evaluations on construction of artificial *Caragana intermedia* to improved effects of degenerated sand land[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2006, **20**(4):23-27.
 - [4] SHIRATO, YASUHITO, ZHANG, *et al.* Changes in topographical features and soil properties after enclosure combined with sand-fixing measures in Horqin Sandy land, Northern China[J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2005, **51**(1): 61-68.
 - [5] 高晓原, 贝盏临, 雷 茜, 等. 宁夏苦豆子资源基本情况及综合开发现状[J]. 中国野生植物资源, 2009, **28**(2):17-20.
GAO X Y, BAI Z L, LEI Q, *et al.* *Sophora alopecuroides* L. resources in Ningxia and its comprehensive utilization[J]. *Chinese Wild Plant Resources*, 2009, **28**(2):17-20.
 - [6] 贾晓红, 李新荣, 李元寿. 干旱沙区植被恢复过程中土壤颗粒分形特征[J]. 地理研究, 2007, **26**(3):518-525.
JIA X H, LI X R, LI Y S. Fractal dimension of soil particle size distribution during the process of vegetation restoration in arid sand dune area[J]. *Geographical Research*, 2007, **26**(3): 518-525.
 - [7] 张世熔, 邓良基, 周 倩, 等. 耕层土壤颗粒表面的分形维数及其与主要土壤特性的关系[J]. 土壤学报, 2002, **39**(2): 221-226.
ZHANG S R, DENG L J, ZHOU Q, *et al.* Fractal dimensions of particle surface in the plowed layers and their relationships with main soil properties[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2002, **39**(2):221-226.
 - [8] RIEU, MICHEL, SPOSITO, *et al.* Fractal fragmentation, soil porosity, and soil water properties: I. theory[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1991, **55**(5): 1 239-1 244.
 - [9] 李保国. 分形理论在土壤科学中的应用及其展望[J]. 土壤学进展, 1994, **22**(1):1-10.
LI B G. Application and prospect of fractal theory in soil science[J]. *Progress in Soil Science*, 1994, **22**(1):1-10.
 - [10] 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): 2 827-2 833.
JIA X H, LI X R, ZHANG J G, *et al.* Spatial heterogeneity analysis of fractal dimension of soil particle for *Ammopiptanthus mongolicus* shrub[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, **26**(9):2 827-2 833.
 - [11] 刘美龄, 叶 勇, 曹长青, 等. 海南东寨港红树林土壤粒径分布的分形特征及其影响因素[J]. 生态学报, 2008, **27**(9): 1 557-1 561.
LIU M L, YE Y, CAO C Q, *et al.* Fractal characteristics and related affecting factors of particle size distribution in man-grove soils in Dongzhai Harbor of Hainan[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2008, **27**(9):1 557-1 561.
 - [12] 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.
 - [13] 郑子成, 何淑勤, 王永东, 等. 不同土地利用方式下土壤团聚体中养分的分布特征[J]. 水土保持学报, 2010, **24**(3): 170-174.
ZHENG Z C, HE S Q, WANG Y D, *et al.* Distribution feature of soil nutrients in aggregate under different land use[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2010, **24**(3): 170-174.
 - [14] 陈小红, 段争虎, 谭明亮, 等. 沙漠化逆转过程中土壤颗粒分形维数的变化特征——以宁夏盐池县为例[J]. 干旱区研究, 2010, **27**(2):297-302.
CHEN X H, DUAN Z H, TAN M L, *et al.* Changes in fractal dimension of soil particle during reversal of desertification—A case study in Yanchi County, Ningxia Hui Autonomous Region[J]. *Arid Zone Research*, 2010, **27**(2):297-302.
 - [15] 党亚爱, 李世清, 王国栋, 等. 黄土高原典型土壤剖面土壤颗粒组成分形特征[J]. 农业工程学报, 2009, **25**(9):74-78.
DANG Y A, LI S Q, WANG G D, *et al.* Fractal characteristics of soil particle composition for typical types of soil profile on Loess Plateau[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2009, **25**(9):74-78.
 - [16] 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, *et al.* Fractal dimension of soil particle-size distribution characteristics in dry valley of upper Minjiang River[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, **28**(5):120-125.
 - [17] TYLER, SCOTT W, WHEATCRAFT, *et al.* Application of fractal mathematics to soil water retention estimation[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1989, **53**(4): 987-996.
 - [18] 丁文峰, 丁登山. 黄土高原植被破坏前后土壤团聚结构分形特征[J]. 地理研究, 2002, **21**(6):700-706.
DING W F, DING D S. The fractal features of soil granule structure before and after vegetation destruction on Loess Plateau[J]. *Geographical Research*, 2002, **21**(6):700-706.
 - [19] 刘金福, 洪 伟, 吴承祯. 中亚热带几种珍贵树种林分土壤团聚结构的分维特征[J]. 生态学报, 2002, **22**(2):197-205.
LIU J F, HONG W, WU C Z, *et al.* Fractal features of soil clusters under some precious hardwood stands in the central subtropical region, China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, **22**(2):197-205.
 - [20] 宋炳奎. 宁夏盐池县沙边子研究基地沙漠化土地的整治和效益[J]. 中国沙漠, 1989, **9**(2):1-13.
SONG B K. Rehabilitation and benefit of desertified land in Shabianzi research base, Yanchi County, Ningxia[J]. *Journal of Desert Research*, 1989, **9**(2):4-16.
 - [21] 邵文山, 李国旗, 陈科元, 等. 荒漠草原 4 种常见植物群落土壤酶活性比较[J]. 西北植物学报, 2016, **36**(3):579-587.
SHAO W S, LI G Q, CHEN K Y, *et al.* Comparative stud-

ies on soil enzymic activities of four kinds of common plant communities in desert steppe[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2016, **36**(3):579-587.

[22] 慈 恩, 杨林章, 程月琴, 等. 不同耕作年限水稻土土壤颗粒的体积分形特征研究[J]. 土壤, 2009, **41**(3):396-401.

CI E, YANG L Z, CHENG Y Q, *et al.* Volume fractal property of soil particle size distribution of paddy soils cultivated for different years[J]. *Soils*, 2009, **41**(3):396-401.

[23] 许婷婷, 董 智, 李红丽, 等. 不同设障年限沙丘土壤粒径和有机碳分布特征[J]. 环境科学研究, 2014, **27**(6):628-634.

XU T T, DONG Z, LI H L, *et al.* Distributions of soil particle size and soil organic carbon in dunes of checkerboard barriers with different setting years[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2014, **27**(6):628-634.

[24] 鲍士旦. 土壤农化分析:(第 3 版)[M]. 北京:中国农业出版社, 2000: 30-81.

[25] 杨金玲, 李德成, 张甘霖, 等. 土壤颗粒粒径分布质量分形维数和体积分形维数的对比[J]. 土壤学报, 2008, **45**(3):413-419.

YANG J L, LI D C, ZHANG G L, *et al.* Comparison of mass and volume fractal dimensions of soil particle size distributions[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2008, **45**(3):413-419.

[26] MONTERO, ELOÍSA. Rényi dimensions analysis of soil particle-size distributions[J]. *Ecological Modelling*, 2005, **182**(3-4):305-315.

[27] 桂东伟, 雷加强, 曾凡江, 等. 绿洲农田土壤粒径分布特征及其影响因素分析——以策勒绿洲为例[J]. 土壤, 2011, **43**(3):411-417.

GUI D W, LEI J Q, ZENG F J, *et al.* Characterizing soil particle-size distribution and its variation in farmland of oasis——a case study of Cele Oasis[J]. *Soils*, 2011, **43**(3):411-417.

[28] 赵文智, 刘志民, 程国栋. 土地沙质荒漠化过程的土壤分形特征[J]. 土壤学报, 2002, **39**(6):877-881.

ZHAO W Z, LIU Z M, CHENG G D. Fractal dimension of soil particle for sand desertification[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2002, **39**(6):877-881.

[29] 文海燕, 傅 华, 赵哈林. 退化沙质草地开垦和围封过程中的土壤颗粒分形特征[J]. 应用生态学报, 2006, **17**(1):55-59.

WEN H Y, FU H, ZHAO H L. Fractal features of soil particle size distribution in degraded sandy grassland during reclamation and enclosure[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2006, **17**(1):55-59.

[30] 谭明亮, 段争虎, 陈小红. 流沙地恢复过程中土壤特性演变研究[J]. 中国沙漠, 2008, **28**(4):685-689.

TAN M L, DUAN Z H, CHEN X H. Study on soil property evolution in recovery process of moving sand land[J]. *Journal of Desert Research*, 2008, **28**(4):685-689.

[31] 黄 蓉, 王 辉, 王 蕙, 等. 围封年限对沙质草地土壤理化性质的影响[J]. 水土保持学报, 2014, **28**(1):183-188.

HUANG R, WANG H, WANG H, *et al.* Effects of enclosure year on soil physicochemical properties of sandy grassland[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2014, **28**(1):183-188.

[32] 单贵莲, 初晓辉, 田青松, 等. 典型草原恢复演替过程中土壤性状动态变化研究[J]. 草业学报, 2012, **21**(4):1-9.

SHAN G L, CHU X H, TIAN Q S, *et al.* Research on the dynamic changes of soil properties of typical steppe in the restoring process[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2012, **21**(4):1-9.

[33] 闫玉春, 唐海萍, 辛晓平, 等. 围封对草地的影响研究进展[J]. 生态学报, 2009, **29**(9):5 039-5 046.

YAN Y C, TANG H P, XIN X P, *et al.* Advances in research on the effects of enclosure on grasslands[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, **29**(9):5 039-5 046.

[34] 宫阿都, 何毓蓉. 金沙江干热河谷区退化土壤结构的分形特征研究[J]. 水土保持学报, 2001, **15**(3):112-115.

GONG A D, HE Y R. Study on fractal features of soil structure of degraded soil in dry and hot valley region of Jinsha River[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2001, **15**(3):112-115.

[35] 杨培岭, 罗远培. 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):1 896-1 896.

YANG P L, LUO Y P. Fractal characteristics of soil using particle size distribution[J]. *Chinese Science Bulletin*, 1993, **38**(20):1 896-1 896.

[36] 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.

HUANG G H, ZHAN W H. Fractal property of soil particle size distribution and its application[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2002, **39**(4):490-497.

[37] 徐 冰, 陈亚新, 郭克贞. 草地土壤粒径分形维数与空间变异性分析[J]. 水利学报, 2007, (S1):696-700.

XU B, CHEN Y X, GUO K Z. Spatial variability of fractal dimension for soil particle[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2007, (S1):696-700.

[38] 姜 坤, 秦海龙, 卢 瑛, 等. 广东省不同母质发育土壤颗粒分布的分形维数特征[J]. 水土保持学报, 2016, **30**(6):319-324.

JIANG K, QIN H L, LU Y, *et al.* Fractal dimension of particle-size distribution for soils derived from different parent materials in Guangdong Province[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2016, **30**(6):319-324.

[39] LIU X, LI Z, LI P. Particle fractal dimension and total phosphorus of soil in a typical watershed of Yangtze River, China[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2015, **73**(10):6 091-6 099.

[40] WU C Z, HONG W. Study on fractal features of soil aggregate structure under different management patterns[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1999, **36**(2):162-167.

[41] 刘 毅, 李世清, 李生秀. 黄土高原不同生境土壤结构体分形维数研究[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2008, **36**(1):86-92.

LIU Y, LI S Q, LI S X. Fractal dimensions of soil aggregates under different environments in the Loess Plateau[J]. *Journal of Northwest A & F University*(Nat. Sci. Edi.), 2008, **36**(1):86-92.

(编辑:潘新社)