

封育对天然草地深层土壤粒径分形特征的影响

张翼¹, 李建平^{1,2}, 井乐¹

(1. 宁夏大学 农学院, 银川 750021; 2. 西北退化生态系统恢复与重建国家重点实验室培育基地, 银川 750021)

摘 要:为了明确长期封育对天然草地土壤粒径分形的影响,采用空间序列代替时间序列的方法,试验对比研究了黄土高原宁夏固原云雾山自然保护区封育 30 年草地和放牧草地的深层土壤粒径分形特征。结果表明:(1) 封育 30 年草地土壤中粉粒含量显著低于放牧草地($p<0.05$),分别为 21.1% 和 28.1%。(2) 封育 30 年草地的土壤粒径分形维数明显高于放牧草地($p<0.01$),在 140—500 cm 的土层中表现尤为显著。(3) 土壤粒径分形维数与粉粒和极细沙粒含量呈极显著正相关($p<0.01$),而与细沙粒、中沙粒、粗沙粒呈极显著负相关($p<0.01$)。因此,长期封育草地土壤粒径趋于变大,中细颗粒土壤积累减少,同时长期封育影响深层土壤结构,深层土壤物理结构信息不容忽视。

关键词:封育; 分形维数; 深层土壤; 天然草地; 黄土高原

中图分类号:S152.3

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2018)05-0131-05

Effect of Grazing Enclosure on the Fractal Characteristics of Deep Soil of Grassland on the Loess Plateau

ZHANG Yi¹, LI Jianping^{1,2}, JING Le¹

(1. School of Agriculture, Ningxia University, Yinchuan 750021, China; 2. Breeding Base of State Key Laboratory for Preventing Land Degradation and Ecological Restoration, Ningxia University, Yinchuan 750021, China)

Abstract: In order to clarify the effect of long-term fencing on the fractal dimension of soil particle size in natural grassland, different period fenced grasslands in variety location stand for sequential vegetation restoration, the fractal characteristics of deep soil particle size overgrazing enclosure and grazing grassland in Yunwushan of Guyuan on the Loess Plateau were compared. The results were as follows. (1) The silt content of soil in 30-year grazing enclosure grassland was significantly lower than that of grazing grassland ($p<0.05$), which were 21.1% and 28.1%, respectively. (2) The fractal dimension of soil particle sizes of the grazing enclosure grassland was significantly higher than that of grazing grassland ($p<0.01$), especially in the soil layer of 140—500 cm. (3) The fractal dimension of soil particle sizes had a very significant positive correlation with the contents of extreme fine sand and silt ($p<0.01$), but negatively correlated with fine sand, middle sand and coarse sand ($p<0.01$). Therefore, the soil particle size tends to increase and the accumulation of soil fine and medium particles decreased in long-term grazing enclosure. Meanwhile, the long-term grazing enclosure of grassland affects the structure of deep soil, the physical structure information of deep soil should not be ignored.

Keywords: grazing enclosure; fractal dimension; deep soil; natural grassland; Loess Plateau

草地是世界上分布最广的植被类型之一,也是目前受人类活动影响最为严重的区域^[1]。作为陆地生态系统的重要组分,其覆盖了全球陆地面积的 26%^[2]。在草地退化与重建的过程中,封育已经成为恢复退化草地的一项重要措施,并被广泛使用^[3]。土壤是由不同颗粒组成,具有不规则形状和自相似结构

的多孔介质,且具有一定的分维特征。土壤分形不仅能够反映出土壤颗粒的分布特征,还能反映土壤质地的均一程度^[4],运用分形理论研究不同植被恢复措施下土壤颗粒的分形特征,对实施不同修复措施具有重要的理论和实践意义^[5]。Arya 等^[6]率先提出了土壤颗粒的分形现象及其分形维数的计算方法,但是这些

方法不便于直接利用常规试验数据进行计算,杨培岭等^[7]将 K_{at} 的计算方法进行改进,使分形维数的计算能直接利用常规试验数据求得。

耕地利用变化显著影响土壤分形特征,分形维数与黏粒呈极强的正相关^[8],土壤分形特征与土壤类型、成土母质、植被类型和地形等因素具有较强的相关性^[9],土壤的粒径分布分维主要受细颗粒物质含量的影响,土地利用类型对土壤粒径分形有显著的影响^[10],种植灌木(欧李)对黄土丘陵沟壑区控制坡耕地黏粒流失,提高土壤有机质含量,优化土壤结构,增强土壤抗蚀能力有显著的促进作用^[11]。草地和林地相对于耕地和农地大颗粒含量明显增多,小颗粒明显减少,土壤颗粒分布的分形维数可以作为表征土壤肥力的状况指标^[12],分形维数与全钾含量和自然含水率都在 $p < 0.05$ 水平呈显著正相关,与土壤有机质、全磷、全氮、土壤容重、总孔隙度的相关性未达到显著水平^[13]。土壤颗粒分布的分形维数不仅能直观地定量表征土壤特性及其相关关系,科学有效地描述土地利用及其空间形态^[14],还可以作为判断土壤质地差异与土壤养分差异的重要指标^[15]。

目前对于长期封育草地深层土壤粒径分形维数的研究尚未见报道,长期封育对深层土壤粒径分形维数与土壤粒级组成及各粒级组成之间关系的研究存在薄弱环节。因此,本文以宁夏固原云雾山放牧草地和封育草地为研究对象,以空间代替时间方法,假设封育草地是放牧草地的正向演替,研究封育对深层土壤粒径分形维数的影响,及土壤粒径分形维数与土壤粒级组成及各粒级组成之间的关系,以期对草地封育措施提供有力的理论依据和技术支持。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验样地位于宁夏固原东北部 45 km 处的云雾山自然保护区(106°21′—106°27′E, 36°10′—36°17′N),海拔 1 700~2 148 m,属于温带半干旱气候区,具有典型半干旱气候特征,年平均降水量 425 mm(1980—2014 年均值),60%~75%的降水集中分布于 7—9 月,土壤类型主要为山地灰褐土和黑垆土,主要靠大气降水补给水资源。主要优势植物有长芒草(*Stipa bungeana*)、大针茅(*Stipa grandis*)、百里香(*Thymus mongolicus*)、铁杆蒿(*Artemisia sacrorum*)、星毛委陵菜(*Potentilla acaulis*)等。自 1980 年至今,该地区采取了严格的封山禁牧措施,具有典型的封育年代梯度。本研究在云雾山自然保护区选取封育 30 年草地和放牧草地各 3 块,样地信息见表 1。

表 1 试验样地信息

封育年限	经度 E	纬度 N	海拔/ m	盖度/ %	坡度/ (°)	坡向
0 年 (放牧)	106°24′13.3″	36°10′03.6″	1761	40	17~19	半阳坡
	106°24′12.8″	36°10′00.7″	1795	30	0~1	阳坡
	106°24′11.1″	36°10′59.8″	1788	38	16~18	半阳坡
30 年	106°22′53.1″	36°10′00.7″	2077	100	0~1	阳坡
	106°23′09.9″	36°10′00.7″	2048	100	13~15	半阳坡
	106°23′14.0″	36°10′00.7″	2112	100	8~10	半阳坡

注:封育年限以 2014 年为基准,由固原市原州区草原管理站提供,封育年限会有 1~2 a 误差。

1.2 野外取样和数据测定

首先,选择具有代表性的封育 30 年草地和放牧草地各 3 块,分样地之间的间隔为 10 m,土壤样品采集深度为 0—500 cm。其中,0—40 cm 土层分 0—10 cm,10—20 cm,20—30 cm,30—40 cm 共四层依次取样。40—500 cm,20 cm 作为 1 层,一共 27 层,并用直径为 6 cm 的土钻取样,每个样方 3 次重复,然后将取好的样品按层分装于自封袋中,标记带回实验室备用^[16]。其次,去除混杂的物质之后,将土壤风干后过 2 mm 筛进行土壤团粒结构测定,土壤团粒分级使用 Mastersizer 3000 激光粒度分析仪(英国,马尔文公司),土壤粒径分级采用美国制土壤粒级标准^[17],分为极粗砂粒(1 000~2 000 μm)、粗砂粒(500~1 000 μm)、中砂粒(250~500 μm)、细砂粒(100~250 μm)、极细砂粒(50~100 μm)、粉粒(2~50 μm)和黏粒(<2 μm)。

1.3 分形维数模型

土壤是具有自相似结构的多孔介质,其分形特点是由颗粒大小的分形维数来描述^[18]。分形维数不但能够反映出土壤颗粒的分布特征,而且能体现土壤质地的均一程度,运用分形理论研究不同植被恢复措施土壤颗粒的分形特征,对实施不同修复措施具有重要理论和实践意义。本文使用杨培岭等分形维数 D 的计算方法,计算公式如下^[19]:

$$\frac{v(\delta < \bar{d}_i)}{v_0} = \left[\frac{\bar{d}_i}{\bar{d}_{\max}} \right]^{3-D}$$

对上边公式两边取对数,得:

$$\lg \left[\frac{v(\delta < \bar{d}_i)}{v_0} \right] = (3-D) \lg \left(\frac{\bar{d}_i}{\bar{d}_{\max}} \right)$$

分别以 $\lg \left[\frac{v(\delta < \bar{d}_i)}{v_0} \right]$ 、 $\lg \left(\frac{\bar{d}_i}{\bar{d}_{\max}} \right)$ 为纵、横坐标作图,3

-D 即为 $\lg \left(\frac{\bar{d}_i}{\bar{d}_{\max}} \right)$ 和 $\lg \left[\frac{v(\delta < \bar{d}_i)}{v_0} \right]$ 试验直线的斜率,即可求得土壤 D 值。其中: \bar{d}_i 为两筛分粒级第 d_i 和 d_{i+1} 的平均值($d_i > d_{i+1}$, $i = 1, 2, 3, \dots$),即为 $\bar{d}_i = \frac{d_i}{d_{i+1}}$,

\overline{d}_{\max} 为团聚体最大直径; $v(\delta < \overline{d}_i)$ 表示粒径小于 \overline{d}_i 团聚体的体积分数; $\overline{d}_i = \frac{d_i}{d_{i+1}}$ 为团聚体总体积。

1.4 数据处理

所得试验数据用 Microsoft Excel 和 Origin 8.0 进行数据整理及图表制作,采用 SPSS 21.0 软件进行统计分析。土壤粒径分形维数与土壤粒级组成及各粒级组成之间的关系采用 0.01 水平下的相关分析。

2 结果与分析

2.1 不同封育年限对草地土壤粒径分布的影响

封育 30 年草地和放牧草地在 0—100 cm 的土层中不含黏粒($<2\ \mu\text{m}$),在 100—500 cm 的土层中不含黏粒($<2\ \mu\text{m}$)、粗砂粒($500\sim1\ 000\ \mu\text{m}$)、极粗砂粒($1\ 000\sim2\ 000\ \mu\text{m}$)(图 1)。在 0—100 cm 的土层中,封育 30 年草地中的粉粒($2\sim50\ \mu\text{m}$)、极细沙粒($50\sim100\ \mu\text{m}$)含量低于放牧草地,而中砂粒($250\sim500\ \mu\text{m}$)、粗砂粒($500\sim1\ 000\ \mu\text{m}$)、极粗沙粒($1\ 000\sim2\ 000\ \mu\text{m}$)含量高于放牧草地。且在每个土壤粒径等级下,封育 30 年草地与放牧草地中土壤粒径含量差异显著($p<0.05$)(图 1A)。在 100—200 cm 的土层中,封育 30 年草地中的粉粒($2\sim50\ \mu\text{m}$)含量低于放牧草地,而极细沙粒($50\sim100\ \mu\text{m}$)、中砂粒($250\sim500\ \mu\text{m}$)含量高于放牧草地。且在每个土壤粒径等级下,封育 30 年草地与放牧草地中土壤粒径含量差异显著($p<0.05$)(图 1B)。在 200—300 cm 的土层中,封育 30 年草地中的粉粒($2\sim50\ \mu\text{m}$)含量低于放牧草地,而极细沙粒($50\sim100\ \mu\text{m}$)、中砂粒($250\sim500\ \mu\text{m}$)含量高于放牧草地。且除了中砂粒($250\sim500\ \mu\text{m}$),在其他土壤粒径等级下,封育 30 年草地与放牧草地中土壤粒径含量差异显著($p<0.05$)(图 1C)。300—400 cm 的土层中,封育 30 年草地中的粉粒($2\sim50\ \mu\text{m}$)含量低于放牧草地,而极细沙粒($50\sim100\ \mu\text{m}$)、中砂粒($250\sim500\ \mu\text{m}$)含量高于放牧草地。其中粉粒($2\sim50\ \mu\text{m}$)、极细沙粒($50\sim100\ \mu\text{m}$)含量差异显著($p<0.05$),而中砂粒($250\sim500\ \mu\text{m}$)、粗砂粒($500\sim1\ 000\ \mu\text{m}$)含量差异不显著($p<0.05$)(图 1D 和图 1E)。

2.2 不同封育年限对草地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 在 0—100 cm 的土层,放牧草地的土壤粒径分形维数值高于封育 30 年草地,其中在 120—140 cm, 240—260 cm, 320—340 cm, 400—420 cm, 460—480 cm 时的分形维数值较高。而放牧草地在 60—80 cm, 340—360 cm 时的分形维数值较高。

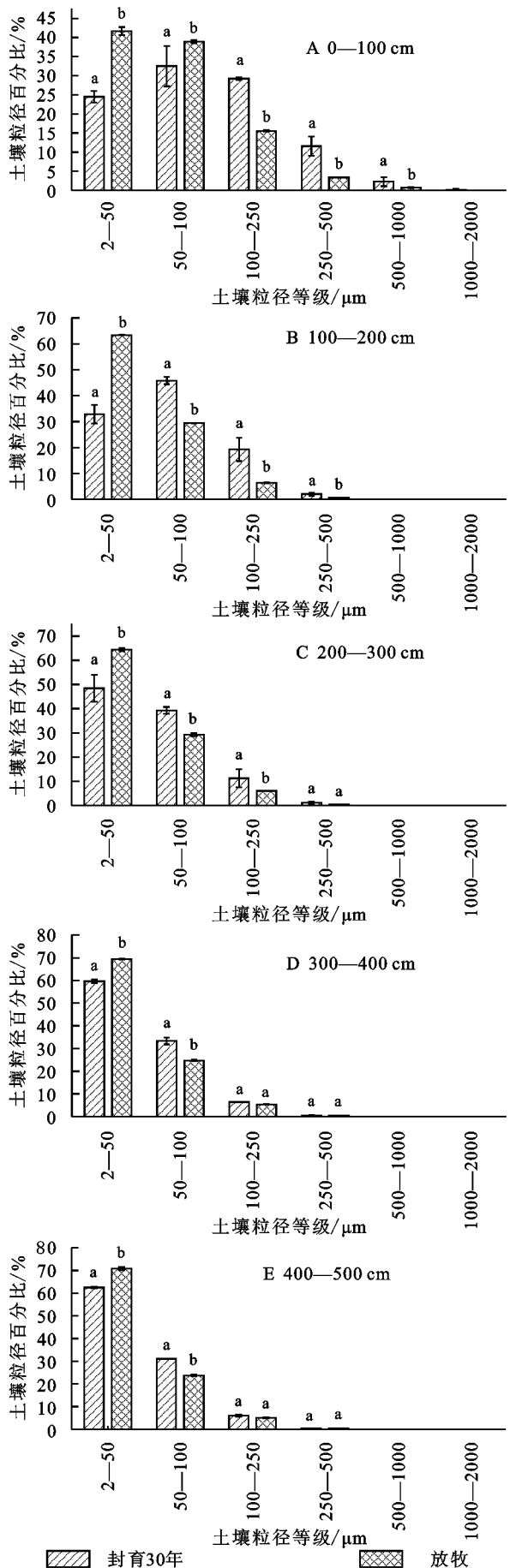


图 1 不同封育年限土壤粒径百分比含量

封育 30 年草地的土壤粒径分形维数在土层深度为 120—140 cm 时最大,而在 420—440 cm 时最小。通过单因素方差分析比较可知,土壤粒径在土层深度为 120—140 cm 时的分形维数与在 340—360 cm, 360—380 cm, 420—440 cm, 440—460 cm, 480—500 cm 时的分形维数相比,差异极显著($p<0.01$)。放牧地区土壤粒径分形维数在土层深度为 60—80 cm 时最大,而在 220—240 cm 时最小。通过单因素方差分析比较可知,土壤粒径在土层深度为 60—80 cm 时的分形维数与在 80—140 cm 的各分样土层的分形维数相比,差异显著($p<0.05$),与在 140—500 cm 的各分样土层相比,差异极显著($p<0.01$)。由 T 测验可知,在土层深度为 60—80 cm, 120—140 cm, 320—340 cm, 340—360 cm, 400—420 cm, 460—480 cm 时,封育 30 年和放牧地的土壤分形维数差异显著($p<0.05$)(表 2)。

2.2.2 土壤粒径分形维数与土壤粒级组成及各粒级组成之间的关系 土壤分形维数与粉粒和极细沙粒呈显著正相关,相关系数分别为 0.824, 0.511。而与细沙粒、中沙粒、粗沙粒呈显著负相关,相关系数分别为 -0.851, -0.735, -0.636。粉粒与极细沙粒、细沙粒、中沙粒、粗沙粒呈显著负相关,相关系数分别为 -0.692, -0.989, -0.871, -0.778。而除粉粒之外的其余 4 种沙粒之间均呈显著正相关(表 3)。

表 2 封育不同年限土壤分形维数的比较

土层 深度/cm	封育 30 年 (均值)	放牧草地 (均值)	T-test
0—10	1.72±0.06ABab	1.81±0.17ABabc	
10—20	1.82±0.04ABab	1.88±0.14ABabc	
20—30	1.86±0.16ABab	1.92±0.09ABab	
30—40	1.89±0.06ABab	1.89±0.04ABabc	
40—60	1.97±0.08ABab	1.90±0.11ABabc	
60—80	1.8±0.03ABab	2.09±0.57Aa	*
80—100	1.68±0ABab	1.68±0.21ABbc	
100—120	1.63±0.11ABab	1.66±0.05Bbc	
120—140	2.15±0.65Aa	1.58±0.08cB	*
140—160	1.55±0.09Bb	1.57±0.08cB	
160—180	1.67±0.04ABab	1.62±0.18Bbc	
180—200	1.53±0.06Bb	1.71±0.04ABabc	
200—220	1.51±0b	1.59±0.13Bc	
220—240	1.52±0.13Bb	1.55±0.08Bc	
240—260	1.78±0.13ABab	1.62±0.04Bbc	
260—280	1.53±0.07Bb	1.67±0.11ABbc	
280—300	1.57±0.03Bb	1.59±0Bc	
300—320	1.71±0.23ABab	1.61±0.01Bbc	
320—340	1.99±0.70ABab	1.63±0.01Bbc	*
340—360	1.54±0.01Bb	1.92±0.33ABab	*
360—380	1.54±0.07Bb	1.59±0.07Bc	
380—400	1.65±0.19ABab	1.62±0Bbc	
400—420	2.04±0.69ABab	1.66±0.04Bbc	*
420—440	1.51±0Bb	1.56±0.08Bc	
440—460	1.56±0.01Bb	1.58±0.08Bc	
460—480	2.01±0.64ABab	1.67±0.06ABbc	*
480—500	1.59±0.08Bb	1.65±0.06Bbc	

注:同列不同大写字母表示差异极显著($p<0.01$),同列不同小写字母表示差异显著($p<0.05$),*表示同一土层封育草地间差异显著($p<0.05$)。

表 3 土壤粒径分形维数与土壤粒级组成及各粒级组成之间的相关系数

项目	分形维数	粉粒	极细沙粒	细沙粒	中沙粒	粗沙粒
分形维数	1.000					
粉粒	0.824**	1.000				
极细沙粒	0.511**	-0.692**	1.000			
细沙粒	-0.851**	-0.989**	0.600**	1.000		
中沙粒	-0.735**	-0.871**	0.257	0.910**	1.000	
粗沙粒	-0.636**	-0.778**	0.135	0.820**	0.955**	1.000

注:**在 0.01 水平(双侧)上显著相关。

3 讨论与结论

土壤粒径分布特征是影响土壤物理性质的最重要的因素之一,它不仅和土体结构、成土过程密切相关,而且对土壤侵蚀、土壤水分运动、土壤肥力状况等具有明显的影响^[20]。前人研究表明,围封促使土质向细粒化方向发展。围封后黏粒(<2 μm)、粉粒(2~5 μm)体积百分比含量在 0—10 cm 均显著增加,而砂粒(50~250 μm)体积百分比含量在 0—10 cm, 10—20 cm 土层显著减少($p<0.05$)^[21]。但本试验结果与前人研究结果有所不同。本试验中,放牧草地在 0—10 cm, 10—20 cm, 20—30 cm, 30—40 cm 的土

层中,极细沙粒所占比例最高,平均值分别为 39.13%, 43.69%, 40.79%, 38.97%, 比封育 30 年的草地含量分别增加了 15.62%, 18.63%, 12.14%, 7.01%。且放牧草地的土壤中粉粒含量也高于封育 30 年草地。说明封育年限过长并不一定能够有效促进中细颗粒土壤的积累。原因可能是对草地封育年限过长,地上植被种类减少,从而增加了土壤风蚀以及土壤黏粉粒等细小颗粒的迁移损失,同时降低了集尘作用以及土壤黏粉粒含量。同时地表枯枝落叶覆盖度的增加不仅对表层土壤保护作用减弱,还减少了土壤微生物群落的能量来源,降低了微生物活动活化土壤结构的作用,从而减弱了细化土壤颗粒组成的能力。

土壤粒径分形维数是反映土壤结构几何形状的一种重要参数^[22]。本研究表明,封育30年草地的土壤粒径分形维数在0—100 cm的浅层土壤中低于放牧草地,在100—300 cm的中层土壤中与放牧草地接近,而在300—500 cm的深层土壤中高于放牧草地。这说明封育年限过长不利于提升浅层土壤性状,但会提升深层土壤性状。

土壤粒径分形维数不仅能准确地表示土壤颗粒大小组成,还可以反映质地的均一程度,是评价土壤质地差异的重要指标之一^[23-24]。本研究表明,土壤分形维数与粉粒和极细沙粒呈极显著正相关,而与细沙粒、中沙粒、粗沙粒呈极显著负相关,粉粒与极细沙粒、细沙粒、中沙粒、粗沙粒呈极显著负相关,而除粉粒之外的其余4种沙粒之间均呈极显著正相关。说明土壤粒径分形维数随着粉粒和极细沙粒含量的增多而不断增大,随着细沙粒、中沙粒、粗沙粒含量的增多而不断减小。即土壤粒径越小,分形维数值越高。这与前人的研究结果相一致^[25-28]。

参考文献:

- [1] 李建平,谢应忠.封育对黄土高原天然草地深层土壤碳、氮储量的影响[J].草业科学,2016,33(10):1981-1988.
- [2] 阎欣,安慧.宁夏荒漠草原沙漠化过程中土壤粒径分形特征[J].应用生态学报,2017,28(10):3243-3250.
- [3] 刘志强,高吉喜,田美荣,等.生态修复区植物群落土壤粒径的分形特征[J].生态学杂志,2017,36(2):303-308.
- [4] 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.
- [5] Tyler S W, Wheatcraft S W. Application of fractal mathematics to soil water retention estimation[J]. Soil Sci. Soc. Am. J., 1989, 53(4): 987-996.
- [6] Arya LM, Paris JF. A physicoempirical model to predict the soil moisture characteristic from particle-size distribution and bulk density data[J]. Soil Science Society of America Journal, 1981, 45(6): 1023-1031.
- [7] 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.
- [8] 曾宪勤,刘和平,路炳军,等.北京山区土壤粒径分布分形维数特征[J].山地学报,2008,26(1):65-70.
- [9] 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.
- [10] 胡云锋,刘纪远,庄大方,等.不同土地利用/土地覆盖下土壤粒径分布的分形特征[J].土壤学报,2005,42(2):336-339.
- [11] 李金峰,刘林,薛丽萍,等.黄土丘陵沟壑区欧李人工林

对坡面土壤分形特征及可蚀性的影响[J].水土保持通报,2017,37(2):21-26.

- [12] 张海廷,时延庆.山东省不同土地利用方式土壤颗粒组成及其分形维数特征[J].水土保持研究,2018,25(1):126-138.
- [13] 肖冬冬,史正涛,刘新有,等.西双版纳橡胶林土壤颗粒体积分形维数特征[J].热带作物学报,2017,38(5):817-823.
- [14] 张佳瑞,王金满,等.分形理论在土壤学应用中的研究进展[J].土壤通报,2017,48(1):221-228.
- [15] 张彩红,茹豪,武秀娟,等.庞泉沟流域土壤粒径分形维数特征[J].东北林业大学学报,2017,45(11):83-88.
- [16] 李建平,陈婧,谢应忠,等.封育对草地深层土壤碳储量及其固持速率的影响[J].水土保持研究,2016,23(6):1-8.
- [17] 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.
- [18] 董莉丽,郑粉莉.陕北黄土丘陵沟壑区土壤粒径分形特征[J].中国水土保持科学,2009,7(2):35-41.
- [19] 管孝艳,杨培岭,吕焯.基于多重分形的土壤粒径分布与土壤物理特性关系[J].农业机械学报,2011,42(3):44-50.
- [20] 李强,李志伟,王全,等.云南陆良植烟土壤粒径分布及其分形维数空间变异研究[J].山地学报,2017,35(1):23-31.
- [21] 赵盼盼,李国旗,邵文山,等.封育对荒漠草原苦豆子群落土壤粒径分形特征的影响[J].西北植物学报,2017,37(6):1234-1241.
- [22] 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.
- [23] 白一茹,汪有科.黄土丘陵沟壑区土壤粒径分布单重分形和多重分形特征[J].农业机械学报,2012,43(5):43-48.
- [24] 王德,傅伯杰,陈利顶,等.不同土地利用类型下土壤粒径分形分析:以黄土丘陵沟壑区为例[J].生态学报,2007,27(7):3081-3089.
- [25] 甘凤玲,王涛,何丙辉,等.汶川震区不同植被下土壤组成及其分形特征[J].水土保持研究,2018,25(1):84-91.
- [26] 周萍,文安邦,严冬春,等.紫色土坡耕地不同坡位不同高度地埂土壤颗粒组成及分形特征[J].水土保持研究,2017,24(2):84-88.
- [27] 茹豪,张建军,李玉婷,等.黄土高原土壤粒径分形特征及其对土壤侵蚀的影响[J].农业机械学报,2015,46(4):176-182.
- [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.