

doi:10. 3969/j. issn. 1671-3168. 2024. 01. 030

北京平原地区不同土地利用类型对土壤颗粒组成 及其分形特征的影响

郑桂莲¹, 张月莹¹, 强方方², 李宗伦¹, 盛昌昌²

(1. 国家林业和草原局林草调查规划院, 北京 100714; 2. 北京林业大学 水土保持学院, 北京 100083)

摘要:选取农田、撂荒草地、人工乔木林、人工灌木林和次生林 5 种不同土地利用类型土壤颗粒为研究对象, 采用 Microtrac S3500 激光粒度仪测定土壤样品粒径, 利用土壤分形学理论和方法, 分析不同土地利用类型对土壤颗粒组成及其分形特征的影响。结果表明, 土壤粒径在不同土地利用方式下存在显著差异, 其中撂荒草地以砂粒为主, 农田、人工乔木林、人工灌木林和次生林以粉粒为主; 次生林、人工乔木林黏粒体积分数最大, 且显著大于其他土地利用类型, 撂荒草地最小; 次生林、人工乔木林、人工灌木林粉粒体积分数最大, 且显著大于农田与撂荒草地; 砂粒体积分数则与粉粒相反。土壤分形维数的大小依次为撂荒草地<农田<人工灌木林<次生林<人工乔木林; 土壤分形维数与土壤黏粒含量、粉粒含量均呈显著正相关, 与土壤砂粒含量呈显著负相关。

关键词:土地利用类型; 土壤颗粒; 分形维数; 体积分数

中图分类号: S714. 5; F301. 2 文献标识码: A 文章编号: 1671-3168(2024)01-0172-06

引文格式:郑桂莲, 张月莹, 强方方, 等. 北京平原地区不同土地利用类型对土壤颗粒组成及其分形特征的影响[J]. 林业调查规划, 2024, 49(1): 172-177. doi:10. 3969/j. issn. 1671-3168. 2024. 01. 030

ZHENG Guilian, ZHANG Yueying, QIANG Fangfang, et al. Effects of Different Land Use Types on Soil Particle Distribution and Fractal Dimension in Plain Afforestation Area of Beijing[J]. Forest Inventory and Planning, 2024, 49(1): 172-177.

doi:10. 3969/j. issn. 1671-3168. 2024. 01. 030

Effects of Different Land Use Types on Soil Particle Distribution and Fractal Dimension in Plain Afforestation Area of Beijing

ZHENG Guilian¹, ZHANG Yueying¹, QIANG Fangfang², LI Zonglun¹, SHENG Changchang²

(1. Academy of Forest and Grassland Inventory and Planning, National Forestry and Grassland Administration, Beijing 100714, China; 2. College of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: In order to study the effects of different land use types on soil particle composition, the soil particles of five different land use types were selected, including farmland, abandoned grassland, artificial arbor forest, artificial shrub forest and secondary forest. The particle size of soil samples was measured by Microtrac S3500 laser particle sizer, and fractal characteristics were analyzed by using soil fractal theory and method. The results revealed that there were significant differences in soil particle size among different land use types, in which abandoned grassland was dominated by sand, while farmland, artificial

收稿日期: 2022-08-05.

基金项目: 北京市平原造林工程绿化废弃物资源化利用研究与示范(LC-6-01).

第一作者: 郑桂莲(1984-), 女, 重庆人, 硕士, 高级工程师. 主要从事林业规划设计工作. Email: ZGLian555@126.com

责任作者: 李宗伦(1993-), 男, 辽宁沈阳人, 工程师. 主要从事林草规划设计工作. Email: 1017652026@qq.com

arbor forest, artificial shrub forest and secondary forest was dominated by silt; the clay volume fraction of secondary forest and artificial arbor forest was the highest, which was significantly higher than that of other land use types, and the abandoned grassland was the lowest; the silt volume fraction of secondary forest, artificial arbor forest and artificial shrub forest was the highest, which was significantly higher than that of farmland and abandoned grassland; the sand volume fraction was opposite to the silt volume fraction; the order of soil fractal dimension from high to low was abandoned grassland < farmland < artificial shrub forest < secondary forest < artificial arbor forest; soil fractal dimension was significantly positively correlated with soil clay content and silt content, but significantly negatively correlated with soil sand content.

Key words: land use type; soil particle size; fractal dimension; volume fraction

土壤的结构和性质与土壤颗粒的组成密切相关,土壤颗粒又间接影响土壤水分、土壤养分、土壤抗蚀性等多个方面,从而进一步改变土地利用方式^[1]。同时,土地利用方式又对土壤颗粒组成与分布特征具有重要影响。研究表明,土地利用方式反映了人类与大自然之间的相互关系。人们通过对不同的土地利用方式,不同程度地干扰着土壤肥力、水分状况等理化性质,对土壤结构稳定性等产生一定影响^[12];不同土地利用方式下土壤颗粒特征是开展土地管理相关研究的主要内容。随着科学技术的不断提升,激光衍射技术可以快捷精准地得到土壤颗粒的体积分布特征,为科研工作人员分析不同土地利用方式下土壤颗粒分布特征提供了先进的技术方法,从而更好地开展对土壤理化性质、发育状况等更深入的研究^[2,13]。前人对土壤颗粒组成已开展了大量研究。其中,杨培岭^[3]和 TYLER^[4]开创性地利用土壤颗粒的重量分布计算分形维数,对土壤结构特征进行定量分析;王国梁等^[5]在此基础上,将重量分布改为体积分布来计算分形维数,如今已被学者广泛采纳和应用。此外,土壤分形维数值可以用来判定土壤颗粒的粗细程度^[6]。大量科研人员基于分形理论对土壤母质^[7]、植被类型^[8]、土地利用类型^[9-11]等多方面的土壤粒径分布与变化特征开展了研究,证明了土壤分形理论适用于土壤粒径分布研究。然而,针对北京平原造林地区的土壤颗粒分布和分形特征的报道较为稀少。本研究采用激光粒度仪获得土壤粒径分布数据,基于分形理论,对北京市房山区5种不同土地利用类型的土壤颗粒分形特征开展研究,并建立土壤分形维数与砂粒、粉粒、黏粒等不同粒级间的回归关系,揭示该区域土壤颗粒组成、土壤颗粒分形维数特征和变化规律,旨在为该区域今后土壤质量评价与土地利用提供理论指导与数据支撑,为该区域平原造林工程的实施提供科学依据。

1 研究区概况

北京市房山区位于华北平原和太行山交界地带,地理坐标为 115°25'~116°15'E, 39°30'~39°55'N。海拔-8~2 014 m,平均海拔 381.92 m。房山区属暖温带半湿润大陆性季风气候,春季干旱,夏季多雨,年均温 11.7℃,年均降水量 582.8 mm。房山区土壤类型以褐土为主,土壤质地多为壤质,轻壤质、中壤质和砂壤质分别占全区总面积的 76.80%、6.14%和 9.42%。土地利用类型主要以农用地为主,占全区总面积的 58.49%;其中,农用地中又以林地为主,占农用地总面积的 63.24%。

2 研究方法

2.1 样方设置与采样调查

项目组通过前期的调研与考察,于 2020 年 9—11 月在研究区内选取农田、撂荒草地、人工乔木林、人工灌木林和次生林地等 5 种具有典型性和代表性的土地利用类型作为研究样地,采用样方法对样地内植被、土壤进行全面调查与采样。每种土地利用类型样地随机设置 3 个样方,其中人工乔木林和次生林采用 20 m×20 m 样方、人工灌木林采用 10 m×10 m 样方、撂荒草地和农田采用 1 m×1 m 样方进行取样调查。同时,运用手持 GPS 记录每个样地的经纬度、海拔等地理信息,运用坡度仪测量坡度,利用数码照相机估算植被盖度等,并记录各项数据,各样地基本概况如表 1 所示。

2.2 土壤样品采集

每种土地利用类型的调查样方各设置 1 个土壤剖面,每个土壤剖面按 0~10 cm、10~20 cm、20~40 cm、40~60 cm 土层设置 3 个重复进行土壤样品采集,共挖取 15 个土壤剖面,180 袋土壤样品,装入自封袋中,带回实验室风干,风干后去除地表枯落物、

表 1 样地基本信息

Tab. 1 Basic information of the study sites

土地利用类型	地理位置	坡度 / (°)	海拔 / m	主要植物种类	植被盖度 / %
农田 (FL)	116°0'13" E 39°44'25" N	0~5	100	向日葵、红薯、艾蒿、狗尾巴草、苍耳等	50
撂荒草地 (AG)	116°0'14" E 39°44'20" N	0~5	90	青蒿、狗娃花、狗尾巴草等	40
人工乔木林 (AAF)	116°12'55" E 39°46'7" N	0~5	50	毛白杨、落叶松等	80
人工灌木林 (ASF)	116°12'60" E 39°46'7" N	0~5	50	皂荚、美人梅等	60
次生林 (SF)	116°0'6" E 39°44'27" N	0~5	90	毛白杨、黄荆子等	90

细根及其他杂物并过 2 mm 筛供土壤颗粒分析。土壤颗粒组成采用 Microtrac S3500 激光粒度仪测定。

2.3 土壤颗粒分形维数计算方法

利用激光粒度仪可以准确、快速地获得土壤颗粒体积分布 (PSD) 数据。根据测得的颗粒平均横截面积计算等效圆直径,进而得到不同粒径级颗粒的体积百分比,计算简单分形维数^[14]。土壤 PSD 简单分形维数可量化表征土壤颗粒组成性质,即反映土壤颗粒的大小及其比例关系和土壤质地的粗细程度。分形维数由小到大,可表征土壤质地由粗到细或由疏松到紧实变化。文中采用土壤颗粒体积分形模型计算土壤颗粒体积分形维数 (D),排除不同土壤粒径下土壤密度的干扰因素,方法更加严谨,结论更具说服力^[5]。计算公式为:

$$\frac{V(r < R_i)}{V_T} = \left(\frac{R_i}{R_{\max}} \right)^{3-D} \quad (1)$$

式中: r 为土壤颗粒粒径 (mm); R_i 为某一区间的代表粒径,即该区间上下限的算术平均值; $V(r < R)$ 为粒径小于 R 的累计体积; V_T 为土壤颗粒总体积; $R_{\max}$ 为所有粒径的上限,即最大粒径值; $V(r < R_i)/V_T$ 为粒径小于 R 的累积体积百分比; D 为粒径分布的体积分形维数。

计算土壤分形维数时,首先需要将左右两边取对数,然后进行绘点。绘点时,横坐标为 $\lg(R_i/R_{\max})$,纵坐标为 $\lg(V(r < R_i)/V_T)$ 。最后,对所绘制的点进行线性回归分析。得到拟合直线的斜率为 $(3-D)$,从而得到土壤颗粒分形维数值 D 。

2.4 统计分析方法

采用 Excel 2010 和 SPSS Statistic 21 软件对实验数据进行统计分析,通过单因素方差分析 (One-way ANOVA) 的最小显著差异 (LSD) 对研究区不同土地利用类型的土壤粒度组成与粒度参数进行差异显著性检验,并采用 origin 软件制图。

3 结果与分析

3.1 土壤粒径分布特征

土壤粒径分布体积分数如图 1 所示。

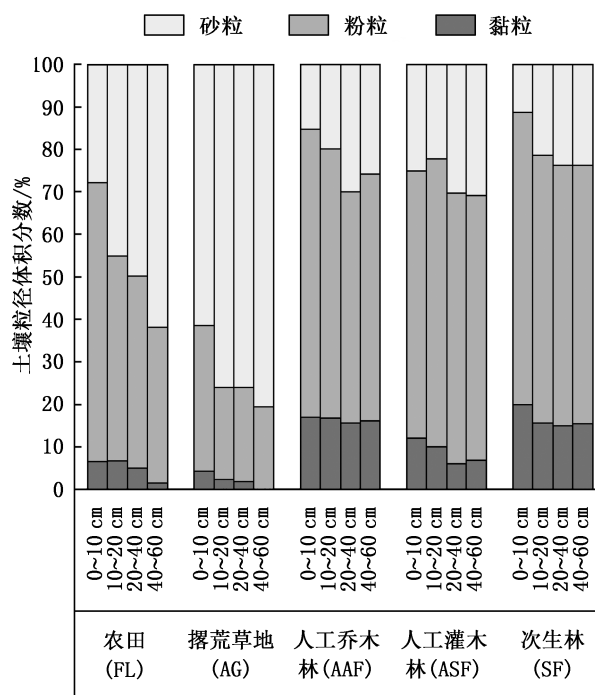


图 1 土壤粒径分布体积分数

Fig. 1 Volume fraction of soil particle-size distribution

由图 1 可知,在 0~60 cm 土层深度范围内,同一土地利用类型样地土壤黏粒、粉粒的体积分数总体均呈随土层深度的增加含量逐渐减少的趋势,砂粒的体积分数分布特征则与之相反,总体上表现为随土层深度增加而增加的趋势。同一土地利用类型样地的黏粒、粉粒和砂粒的体积分数在不同土层深度无显著差异 ($P > 0.05$)。

不同土地利用类型土壤颗粒组成及其存在的显著性见表 2。

由表 2 可知,不同土地利用类型的土壤颗粒结构存在显著差异。撂荒草地中,土壤粒径分布规律为:黏粒 (2.14%) < 粉粒 (24.31%) < 砂粒 (73.56%);

表 2 不同土地利用类型土壤颗粒组成及其显著性
Tab. 2 Soil particle composition and significance of different land use types

土地 利用 类型	土壤粒级/mm							
	黏粒 <0.002	粉粒 0.002~0.05	砂粒					合计 0.05~2
			极细砂粒 0.05~0.1	细砂粒 0.1~0.25	中砂粒 0.25~0.5	粗砂粒 0.5~1	极粗砂粒 1~2	
FL	4.86±1.21c	48.92±6.09b	23.25±3.01a	19.17±5.51a	3.04±0.46b	0.78±0.38b	—	46.23±7.05b
AG	2.14±0.87c	24.31±3.32c	13.95±1.47b	17.50±1.78ab	35.37±1.75a	5.71±1.50a	1.03±0.40a	73.56±4.12a
AAF	16.34±0.34a	60.94±2.88a	7.02±1.21c	6.65±1.03c	6.41±2.23b	2.65±1.10ab	—	22.72±3.21c
ASF	8.75±1.41b	64.10±1.20a	9.05±1.42bc	9.99±1.01bc	5.81±1.80b	2.30±1.55ab	—	27.16±2.04c
SF	16.48±1.19a	63.52±1.79a	8.70±1.03bc	6.00±0.95c	4.50±1.10b	0.80±0.19b	—	20.01±2.96c

注:小写字母表示不同样地类型间差异显著性($P<0.05$)。

除撂荒草地外,不同土地利用类型,样地土壤粒径分布表现为黏粒含量最少,粉粒含量最多。具体来看,黏粒体积分数变化范围为 4.86%~16.48%,粉粒为 48.92%~64.10%,砂粒为 20.01%~46.23%。人工乔木林和次生林的黏粒体积分数显著大于人工灌木林、农田和撂荒草地($P<0.05$);人工乔木林、人工灌

木林和次生林的粉粒体积分数显著大于农田和撂荒草地($P<0.05$);撂荒草地的砂粒体积分数显著大于其他土地利用类型($P<0.05$)。

3.2 不同土地利用类型与土壤粒径分形维数的关系
不同土地利用类型土壤质地与 PSD 简单分形维数(D)见表 3。

表 3 不同土地利用类型土壤质地与 PSD 简单分形维数(D)
Tab. 3 Fractal dimension (D) and soil texture of different land use types

土地利用类型	D 最大值	D 最小值	D	拟合方程	R^2	F	Sig
FL	2.582	2.249	2.489±0.079bc	$y=0.50x+2.254$	0.800	84.184	0.000<0.01
AG	2.563	1.944	2.354±0.139c	$y=0.65x+2.355$	0.757	81.011	0.000<0.01
AAF	2.732	2.720	2.727±0.003a	$y=0.27x+2.148$	0.854	128.724	0.000<0.01
ASF	2.654	2.537	2.600±0.0226ab	$y=0.40x+2.202$	0.847	110.873	0.000<0.01
SF	2.757	2.710	2.726±0.011a	$y=0.27x+2.160$	0.837	113.215	0.000<0.01

注:小写字母表示不同样地类型间差异显著($P<0.05$)。

由表 3 可知,不同土地利用类型其土壤 PSD 的分形维数(D)在 2.354~2.727 范围。

农田的拟合方程为:

$$y = 0.50x + 2.254 \tag{2}$$

式中: $R^2=0.800$;Sig<0.01。

撂荒草地的拟合方程为:

$$y = 0.65x + 2.355 \tag{3}$$

式中: $R^2=0.757$;Sig<0.01。

人工乔木林的拟合方程为:

$$y = 0.27x + 2.148 \tag{4}$$

式中: $R^2=0.854$;Sig<0.01。

人工灌木林的拟合方程为:

$$y = 0.40x + 2.202 \tag{5}$$

式中: $R^2=0.847$;Sig<0.01。

次生林的拟合方程为:

$$y = 0.27x + 2.160 \tag{6}$$

式中: $R^2=0.837$;Sig<0.01。

结果显示,人工乔木林(2.727)、次生林(2.726)的分形维数显著大于农田(2.489)和撂荒草地(2.354),但与人工灌木林(2.600)的差异不显著。

3.3 土壤颗粒组成与分形维数的关系

土壤 PSD 分形维数与土壤颗粒组成相关性分析见表 4。

由表 4 可知,各样地中黏粒含量、粉粒含量与分形维数呈极显著正相关,相关系数分别为 0.780 和 0.750;砂粒含量与分形维数呈极显著负相关,相关系数为-0.795。撂荒草地中土壤黏粒、粉粒体积分数较低,砂粒体积分数较高,导致其土壤分形维数较低和粗粒化程度较高。

表 4 土壤 PSD 分形维数与土壤颗粒组成相关性分析

Tab. 4 Correlation analysis between soil particle composition and fractal dimension

参数	黏粒	粉粒	砂粒	<i>D</i>
黏粒	1			
粉粒	0.772 **	1		
砂粒	-0.875 **	-0.983 **	1	
<i>D</i>	0.780 **	0.750 **	-0.795 **	1

4 讨 论

土壤结构与土壤质量密切相关,土壤颗粒又是土壤结构的物质基础^[15]。影响土壤粒径分布特征的主要因素包括侵蚀以及其他成土因素^[9,16]。本研究北京市房山区土壤颗粒组成以粉粒、砂粒为主,与郭中领^[17]研究的北京地区表层土壤分形特征以及徐佳佳^[18]在房山区蒲洼小流域研究结果一致。在 0~60 cm 土层范围内,同种土地利用类型的土壤黏粒、粉粒和砂粒总含量的体积分数在不同土层深度无显著差异,与李松阳^[19]在云南省昆明市蒋家沟流域研究的不同土地利用类型土壤粒径分布特征、周学峰^[20]研究的围垦后不同土地利用方式对土壤粒径分布的研究结果一致,但与孟婷婷^[21]对废弃宅基地复垦杨树林地土壤粒径分形特征的研究、沙国良^[22]在黄土高原研究的典型植物群落土壤粒径分布特征研究结果不同,可能是由于同一土地利用类型的不同深度土壤剖面土壤母质来源和质地较为相似,并且植被恢复对不同深度土壤质地的影响是一个缓慢的过程,需要较长的时间^[19]。

土地利用类型是土壤粒径分布产生差异的重要因素之一。本研究中,撂荒草地黏粒的体积分数显著低于其他土地利用类型,砂粒体积分数显著高于其他土地利用类型。前人研究表明,植被覆盖是侵蚀程度的主要影响因素,裸露土壤更易受到侵蚀的影响。不同颗粒中,黏粒受土壤侵蚀的影响最大,土壤中的黏粒含量越少,表明该地区水土流失越严重^[9,16,23]。撂荒草地植被覆盖度较低,在风蚀以及降雨、径流的共同作用下,土壤中细粒含量逐渐减少。此外,草地根系较浅,生物量和凋落物量较少,土壤自然恢复过程缓慢,对土壤结构的改善作用不显著。农田受到的人工扰动因素复杂,例如耕作、浇水、施肥等,使农田土壤中较大的颗粒被粉碎、细化,因此,农田的粉粒体积分数高于撂荒草地,而砂粒体积分数低于撂荒草地^[11,24-25]。人工乔木林、人工灌

木林以及次生林植物的根系比草地更发达,植被对土壤的改良作用更强。植物根系在生长过程中分泌的物质促进土壤粉粒、黏粒增加,砂粒减少,导致土壤质地细化,进而影响土壤养分状况和其他理化性质^[26]。前人的研究认为,灌木林和乔木林较草地具有更强的减沙能力^[23],本研究中人工灌木林的黏粒体积分数显著低于人工乔木林和次生林,而砂粒体积分数则偏大,可能是因为本研究中人工乔木林的植被盖度大于人工灌木林,且人工乔木林植被冠幅也更大。人工乔木林的冠层对降雨的截留能力大于人工灌木林,因此,雨滴击溅侵蚀和径流侵蚀在人工乔木林中明显减弱,最终使得人工乔木林的黏粒体积分数大于人工灌木林,砂粒、黏粒体积分数为人工乔木林小于人工灌木林;人工乔木林与天然林土壤颗粒组成无显著差异,可能因其乔木物种均以毛白杨为主,且均为成熟林,生态系统相对稳定^[16]。

研究表明,土地利用类型对分形维数具有显著影响。土壤颗粒分形维数值与土壤质地关系紧密,表现为土壤质地越粗分形维数(*D*)值越小,土壤质地越细分形维数(*D*)值越大。本研究与贾晓红^[27]等研究结果一致,即土壤分形维数与黏粒、粉粒含量呈正相关,黏粒、粉粒含量越高,分形维数就越大;而砂粒含量越高,土壤分形维数则越低。已有研究表明,土壤质地和性能较好时 PSD 的体积分形维数(*D*)值范围为 2.55~2.80^[24],桂东伟等^[28]研究结果表明,土壤分形维数大于 2.21 时,土壤颗粒分布相对较好。本研究区人工乔木林、人工灌木林和次生林的 *D* 与其比较接近,农田、撂荒草地的 *D* 明显较低,说明植被覆盖度较低,表层土壤干燥,风沙活动频繁,则土壤表层细颗粒物质损失较为严重,因为细小的颗粒物质更容易随气流飘动。而土壤中细颗粒物质的损失又使得表层土壤粗粒化程度加剧,导致土壤分形维数减小^[16]。因此,土壤分形维数既可以很好地反映土壤中不同粒径的颗粒损失状况,同时也体现出不同土地利用类型对土壤的影响。胡云峰^[10]等研究发现,土壤粒径分形维数随土地利用类型的不同而发生规律性改变,具体表现为植被覆盖度高的区域,土壤颗粒分形维数有所增加。

5 结 论

1) 不同土地利用类型对土壤颗粒分布的影响差异显著。总体表现为人工乔木林、人工灌木林以及次生林以粉粒为主,体积分数分别为 60.94%、64.10% 和 63.52%;农田以粉粒(48.92%)、砂粒

(46.23%)为主;撂荒草地以砂粒(73.56%)为主。

2)不同土地利用类型的黏粒体积分数特征为:次生林、人工乔木林显著大于人工灌木林,人工灌木林显著大于农田和撂荒草地;粉粒体积分数特征为:次生林、人工乔木林、人工灌木林显著大于农田,农田显著大于撂荒草地,砂粒体积分数特征与粉粒相反。

3)土壤分形维数可以作为衡量土壤粗细程度的指标,分形维数越大,土壤越细腻;分形维数越小,土壤越粗糙。土壤分形维数与黏粒、粉粒含量呈显著正相关,与砂粒含量呈显著负相关。

参考文献:

- [1] HUANG G, ZHANG R. Evaluation of soil water retention curve with the pore-solid fractal model [J]. *Geoderma*, 2005, 127(1-2): 52-61.
- [2] 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.
- [3] 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): 1896-1896.
- [4] TYLER S W, WHEATCRAFT S W. Fractal scaling of soil particle-size distributions: Analysis and limitations [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1992, 56(2): 362-369.
- [5] 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.
- [6] 吴承祯, 洪伟. 不同经营模式土壤团粒结构的分形特征研究[J]. *土壤学报*, 1999, 36(2): 162-167.
- [7] 李红丽, 万玲玲, 董智, 等. 沙柳沙障对沙丘土壤颗粒粒径及分形维数的影响[J]. *土壤通报*, 2012, 43(3): 540-545.
- [8] 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维特征[J]. *生态学杂志*, 2017, 36(2): 303-308.
- [9] 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.
- [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维特征[J]. *土壤学报*, 2005, 42(2): 336-339.
- [11] 郭士维, 钟斌, 许文年, 等. 不同土地利用方式下粉壤土粒径分形特征——以鄂西典型小流域下牢溪为例[J]. *中国水土保持科学(中英文)*, 2022, 20(1): 25-32.
- [12] 李民义, 张建军, 王春香, 等. 晋西黄土区不同土地利用方式对土壤物理性质的影响[J]. *水土保持学报*, 2013, 27(3): 125-130, 137.
- [13] 桂东伟, 雷加强, 曾凡江, 等. 绿洲边缘不同土地利用方式下土壤粒径分布特征[J]. *林业科学*, 2011, 47(1): 22-28.
- [14] 白雪, 杨扬, 黄婷婷, 等. 激光衍射法与湿筛-吸管法测定中国3种典型土壤粒径分布的差异分析[J]. *水土保持研究*, 2021, 28(4): 84-90.
- [15] 肖巍. 不同土地利用类型表层土壤粒度特征[J]. *温带林业研究*, 2020, 3(3): 55-59.
- [16] 陈宇轩, 张飞岳, 高广磊, 等. 科尔沁沙地樟子松人工林土壤粒径分布特征[J]. *干旱区地理*, 2020, 43(4): 1051-1058.
- [17] 郭中领, 符素华, 王向亮, 等. 北京地区表层土壤分形特征研究[J]. *水土保持通报*, 2010, 30(2): 154-158.
- [18] 徐佳佳, 于占成, 史隗俊, 等. 北京石质山区不同水土保持措施对土壤物理性质及抗冲性的影响——以房山区蒲洼小流域为例[J]. *中国水土保持科学*, 2017, 15(2): 107-114.
- [19] 李松阳, 林静远, 潘佳虹, 等. 泥石流频发区不同土地利用类型土壤粒径分布多重分形特征[J]. *应用与环境生物学报*, 2021, 27(4): 893-900.
- [20] 周学峰, 赵睿, 李媛媛, 等. 围垦后不同土地利用方式对长江口滩地土壤粒径分布的影响[J]. *生态学报*, 2009, 29(10): 5544-5551.
- [21] 孟婷婷, 刘泽鑫, 刘峰, 等. 不同管理模式对废弃宅基地复垦杨树林地土壤的粒径分形特征的影响[J]. *土壤通报*, 2021, 52(6): 1299-1307.
- [22] 沙国良, 魏天兴, 陈宇轩, 等. 黄土高原丘陵区典型植物群落土壤粒径分布特征[J]. *干旱区地理*, 2022(4): 1212-1223.
- [23] 艾宁, 魏天兴, 朱清科. 陕北黄土高原不同植被类型下降雨对坡面径流侵蚀产沙的影响[J]. *水土保持学报*, 2013, 27(2): 26-30, 35.
- [24] 方肖晨, 王春红, 张荣华, 等. 伏牛山区迎河小流域不同土地利用类型的土壤粒径分布特征[J]. *中国水土保持科学*, 2017, 15(3): 9-16.
- [25] 任婷婷, 王瑄, 孙雪彤, 等. 不同土地利用方式土壤物理性质特征分析[J]. *水土保持学报*, 2014, 28(2): 123-126.
- [26] 郑永林, 王海燕, 解雅麟, 等. 北京平原地区造林树种对土壤肥力质量的影响[J]. *中国水土保持科学*, 2018, 16(6): 89-98.
- [27] 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.
- [28] 桂东伟, 雷加强, 曾凡江, 等. 绿洲农田不同深度土壤粒径分布特性及其影响因素——以策勒绿洲为例[J]. *干旱区研究*, 2011, 28(4): 622-629.

责任编辑: 许易琦