

赵守强,迟大群,贾付诚,等. 不同地区盐渍土壤颗粒的分形特征[J]. 江苏农业科学,2021,49(6):203-207.

doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2021.06.036

# 不同地区盐渍土土壤颗粒的分形特征

赵守强,迟大群,贾付诚,邓亚鹏,孙池涛

(山东农业大学水利土木工程学院,山东泰安 271018)

**摘要:**通过野外调查、室内试验、模型分析等方法研究了新疆石河子、新疆阿拉尔、内蒙临河、吉林白城、河北海兴及江苏盐城 6 个地区表层 0~20 cm 土壤颗粒分形维数、土壤质地、粒径组成及盐分含量变化特征。结果表明,各地区土壤质地以壤土为主,土壤颗粒分形维数为 2.59~2.78,且呈自南向北、自东向西递增趋势;土壤颗粒分形维数与黏粒( $<0.002\text{ mm}$ )相对含量呈极显著幂指数关系( $y=2.323\ 2x^{0.058\ 3}, r^2=0.981\ 9, P<0.01$ )。受海拔、气候条件等因素影响,不同地区土壤颗粒分形维数与沙粒(0.05~2 mm)和粉粒(0.002~0.05 mm)相对含量、平均质量半径、土壤盐分之间相关性不同,但总体拟合决定系数低于 0.2。土壤分形维数主要与黏粒相对含量有关,同时受海拔、气候等因素共同影响。

**关键词:**盐渍土;土壤质地;颗粒组成;分形维数

**中图分类号:**S152.3 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2021)06-0203-05

分形理论是描述自然界中不规则空间形体特征的重要工具,分形体内任何一个独立的分形单元在某种程度上都是整体的再现与浓缩<sup>[1]</sup>。土壤是

由大小不同、形状各异的固体颗粒及孔隙所形成的多孔介质,具有一定的分形特性<sup>[2-4]</sup>。分形理论被引用到土壤学研究以来,土壤结构特征实现了量化描述,这为量化土地利用方式对土壤结构的影响、农田土壤荒漠化演变过程、耕层土壤结构特性变化等研究的快速发展提供了可靠的理论支撑<sup>[5-7]</sup>。王艳艳等指出土壤分形结构对其水力学性质具有指示作用,可通过构建相关水力特性参数的分形模型预估土壤水力特性参数<sup>[8]</sup>;张德谦等指出分形维数可作为坡面侵蚀产沙中泥沙粒径分布的重要评价指标<sup>[9]</sup>;杜雅仙等指出荒漠草原微斑块土壤颗粒粒径分形维数与土壤含盐量呈显著正相关,

收稿日期:2020-06-03

基金项目:山东省自然科学基金(编号:ZR2018BEE048);农业部作物需水过程与调控重点实验室开放基金(编号:FIRI202004-0201);山东省重点研发计划(重大科技创新工程)(编号:2019JZZY010727)。

作者简介:赵守强(1998—),男,山东潍坊人,主要从事盐碱地改良及农田水分高效利用。E-mail:1620378443@qq.com。

通信作者:孙池涛,博士,讲师,主要从事盐碱地改良及农田水分高效利用。E-mail:chitaosun@sdau.edu.cn。

[15]邢兰芹,姚众众. 江苏省 1971—2010 年气候生产潜力变化特征[J]. 水土保持通报,2018,38(1):252-255.

[16]王继人,钟昌标,王玲玲,等. 2000—2017 年湖南省土地耕作适宜性、气候生产潜力与 LUCC 过程动态特征[J]. 山地学报,2019,37(2):252-262.

[17]刘丹,李迎春. 气候变化背景下江西省双季晚稻气候生产潜力的时空变化特征[J]. 西南农业学报,2018,31(1):184-191.

[18]Lieth H. Modeling the primary productivity of the world[J]. Soviet Journal of Ecology,1975,5(2):107.

[19]Lieth H. Primary production; terrestrial ecosystems[J]. Human Ecology,1973,1(4):303-332.

[20]陈国南. 用迈阿密模型测算我国生物生产量的初步尝试[J]. 自然资源学报,1987,2(3):270-278.

[21]赵安,赵小敏. FAO-AEZ 法计算气候生产潜力的模型及应用分析[J]. 江西农业大学学报,1998,20(4):120-125.

[22]Uchijima Z, Seino H. Agroclimatic evaluation of net primary

productivity of natural vegetations:(1)Chikugo model for evaluating net primary productivity[J]. Journal of Agricultural Meteorology, 1985,40(4):343-352.

[23]Bouman B, van Keulen H, van Laar H H, et al. The ‘school of de wit’ crop growth simulation models: a pedigree and historical overview[J]. Agricultural Systems,1996,52(2):171-198.

[24]徐建华. 现代地理学中的数学方法[M]. 北京:高等教育出版社,1996.

[25]吴宜进,熊安元,杨荆安,等. 湖北的气候生产力与农业持续发展[J]. 长江流域资源与环境,1999,8(4):405-410.

[26]魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术[M]. 北京:气象出版社,1999.

[27]侯西勇. 1951—2000 年中国气候生产潜力时空动态特征[J]. 干旱区地理,2008,31(5):723-730.

[28]褚荣浩,申双和,吕厚茎,等. RegCM3 下 1951—2100 年江苏省热量资源及一季稻气候生产潜力[J]. 江苏农业学报,2015,31(4):779-785.

在一定程度上可反映土壤盐碱化及土壤退化趋势<sup>[10]</sup>。王少博等研究表明,土壤分形维数可作为表征土壤颗粒分布、土壤性质的潜在指标<sup>[11]</sup>。土壤粒径分布分形维数与土壤母质、土壤类型等密切相关,同时还受到海拔、气候等因素的影响<sup>[12-13]</sup>。以往土壤分形研究主要集中于非盐渍土,而有关盐渍土土壤分形维数的报道鲜见。盐渍土作为我国重要的后备耕地资源,开展土壤颗粒分形等相关研究对盐渍土结构特性定量描述及盐渍化程度预测等具有重要意义。基于此,本研究旨在:(1)明确不同地区盐渍土颗粒组成特征;(2)确定不同地区盐渍土分形维数;(3)量化土壤颗粒、盐分含量等与土壤分形维数的关系。

表 1 不同地区取样点基本信息

位置	降水量 (mm)	蒸发量 (mm)	蒸降比	东经	北纬	海拔 (m)
阿拉尔	67.2	2 110	31.4	80°30′38″	40°22′37″	1 009
石河子	155.0	1 800	11.6	85°59′21″	44°19′45″	480
临河	170.0	2 100	12.4	106°59′47″	40°52′26″	1 026
海兴	580.0	1 880	3.2	117°33′52″	38°11′17″	5
盐城	1 023.0	1 500	1.5	120°49′20″	32°59′51″	1
白城	413.0	1 800	4.4	123°53′24″	45°36′47″	142

1.2 室内分析

取回的土壤样品经晾晒、除杂后过 2 mm 标准筛,分为 3 部分。一部分结合斯托克斯(Stokes)定律,利用湿筛-吸管法测定土壤颗粒直径,以美国制土壤粒径分级标准分 6 级测定:0.20~2.00 mm、0.05~0.20 mm、0.02~0.05 mm、0.01~0.02 mm、0.002~0.020 mm、0~0.002 mm,并按美国土壤质地分类制分为沙粒(0.05~2.00 mm),粉粒(0.002~0.050 mm)和黏粒(<0.002 mm),确定土壤质地类型;一部分由残渣烘干法测定土壤全盐含量;另一部分按照 1 g:5 mL 土水比测定土壤 pH 值。

1.3 分形维数与平均质量直径计算

参考杨培岭等提出的用土壤颗粒质量分布代替土壤颗粒数量分布来计算粒径分布的分形维数的方法,粒径( $r$ )小于某一尺度( $R$ )的累积土粒质量  $G(r < R)$  与  $R$  之间的分形关系式<sup>[14]</sup>如下:

$$\left(\frac{\bar{r}_i}{\bar{r}_{\max}}\right)^{3-D} = \frac{G(r < \bar{r}_i)}{G_0}.$$

(1)

式中, $\bar{r}_i$  表示筛分粒级  $r_i$  和  $r_{i+1}$  的平均半径; $\bar{r}_{\max}$  为最大粒径的平均半径; $G(r < \bar{r}_i)$  表示低于粒径  $\bar{r}_i$  的土粒累积质量; $G_0$  表示各粒级土粒质量总和。分别以

1 材料与方法

1.1 样品采集

试验所用土壤样品于 2019 年 4—5 月取自新疆阿拉尔市、新疆石河子市、内蒙古巴彦淖尔市临河区、吉林白城市、河北海兴县和江苏盐城市 6 个地区。取样时,根据地表土壤颜色、植被分布、表层积盐等状况,按照轻度、中度、重度 3 个级别,采用 5 点混合法取样,6 个地区共取样 42 组。取样区的基本信息如表 1 所示,可知 6 个地区海拔以阿拉尔和临河最高,分别为 1 009、1 026 m,江苏盐城海拔最低,为 1 m;6 个地区蒸降比由高到低依次为阿拉尔、临河、石河子、白城、海兴和盐城。

$\lg(\bar{r}_i/\bar{r}_{\max})$  和  $\lg[G(r < \bar{r}_i)/G_0]$  为横、纵坐标作图可知,(3- $D$ ) 为拟合直线的斜率, $D$  即是所求分形维数。

参考团聚体稳定性指标平均质量直径计算方法<sup>[11]</sup>,本研究中平均质量半径(MWR)计算公式如下:

$$MWR = \sum_{i=1}^{n+1} \frac{r_{i+1} + r_i}{2} \times m_i.$$

(2)

式中, $m_i$  为第  $i+1$  个筛子中残留的土壤颗粒质量。

2 结果与分析

2.1 各地区土壤盐分及土壤质地统计值特征

由表 2 可知,6 个地区土壤平均含盐量以阿拉尔地区最高,平均土壤含盐量为 52.07 g/kg,其次是临河,平均含盐量为 21.98 g/kg;各地区土壤 pH 值均高于 8,且以白城和临河两地最高,分别为 8.54 和 8.68。6 个地区的 42 个样本中土壤质地以沙壤土和粉壤土为主,分别占总样本量的 21.0% 和 33.3%;就不同地区而言,阿拉尔和白城两地土壤质地均以沙壤土为主,石河子地区粉壤土和黏壤土比例相对较高,临河地区粉壤土、沙壤土和壤土所占相

表 2 不同地区土壤盐分及质地统计

地区	样本量 (个)	土壤质地类型及数量	pH 值	含盐量(g/kg)			
				平均值	最大值	最小值	中位数
阿拉尔	9	沙壤土 4,粉壤土 2,粉黏土 1,黏壤土 1,壤土 1	8.38	52.07	212.078	0.362	23.396
石河子	7	壤土 1,粉壤土 2,黏壤土 2,沙壤土 1,粉黏土 1	8.35	10.39	38.020	0.930	5.590
临河	7	粉壤土 3,沙壤土 2,壤土 2	8.68	21.98	74.460	0.990	3.620
海兴	7	粉壤土 5,沙壤土 1,壤质细沙土 1	8.18	5.08	10.010	1.050	3.720
盐城	6	粉土 3,粉壤土 2,壤土 1	8.26	3.18	6.010	0.930	2.860
白城	6	沙壤土 5,壤质细沙土 1	8.54	5.38	11.820	0.910	3.380

对比比例相当,海兴以粉壤土为主,盐城以粉土和粉壤土为主。总体而言,各地区盐碱土质地主要为壤土。

2.2 不同区域盐碱土分形维数特征

由表 3 可知,6 个地区平均分形维数为 2.59 ~ 2.78,且各地区相关系数均大于 0.9。其中,新疆石河子和内蒙临河地区土壤样品分形维数相对较高,分别为 2.78 和 2.70;河北海兴、江苏盐城和吉林白

城地区分形维数相对较低,依次为 2.62、2.59 和 2.59。就土壤含盐量而言,新疆阿拉尔地区土壤含盐量最高,为 52.07 g/kg;其次为河北海兴,为 21.98 g/kg;江苏盐城含盐量最低,为 3.18 g/kg。在概率论和数理统计中,变异系数由标准差与平均值的比值确定,它可反映数据的离散程度,通过计算可知,6 个地区变异系数均高于 0.7,属于强变异。

表 3 不同地区土壤含盐量、分形维数及粒径特征

地区	土壤含盐量 (g/kg)	分形维数	$\lg(\bar{r}_i/\bar{r}_{\max})$ 与 $\lg[G(r<\bar{r}_i)/G_0]$ 的相关系数	MWR (mm)	黏粒(<0.002 mm) 含量(%)	粉粒(0.002 ~ 0.050 mm) 含量(%)	沙粒(0.05 ~ 2.00 mm) 含量(%)
新疆阿拉尔	52.07 ± 73.32	2.63 ± 0.15	0.94 ± 0.06	0.08 ± 0.03	11.52 ± 10.11	42.31 ± 11.79	46.16 ± 17.73
新疆石河子	10.39 ± 12.84	2.78 ± 0.09	0.92 ± 0.06	0.05 ± 0.03	23.98 ± 12.12	48.22 ± 9.76	27.80 ± 17.05
河北海兴	21.98 ± 33.63	2.62 ± 0.14	0.93 ± 0.03	0.07 ± 0.03	10.75 ± 6.11	54.92 ± 21.89	34.32 ± 23.73
内蒙临河	5.08 ± 3.70	2.70 ± 0.03	0.96 ± 0.02	0.08 ± 0.01	13.22 ± 2.76	43.78 ± 11.87	43.00 ± 10.87
江苏盐城	3.18 ± 2.32	2.59 ± 0.06	0.91 ± 0.04	0.06 ± 0.02	7.06 ± 1.72	73.09 ± 15.48	19.85 ± 14.63
吉林白城	5.38 ± 5.02	2.59 ± 0.09	0.97 ± 0.02	0.12 ± 0.03	6.72 ± 4.28	26.45 ± 11.37	66.82 ± 9.90

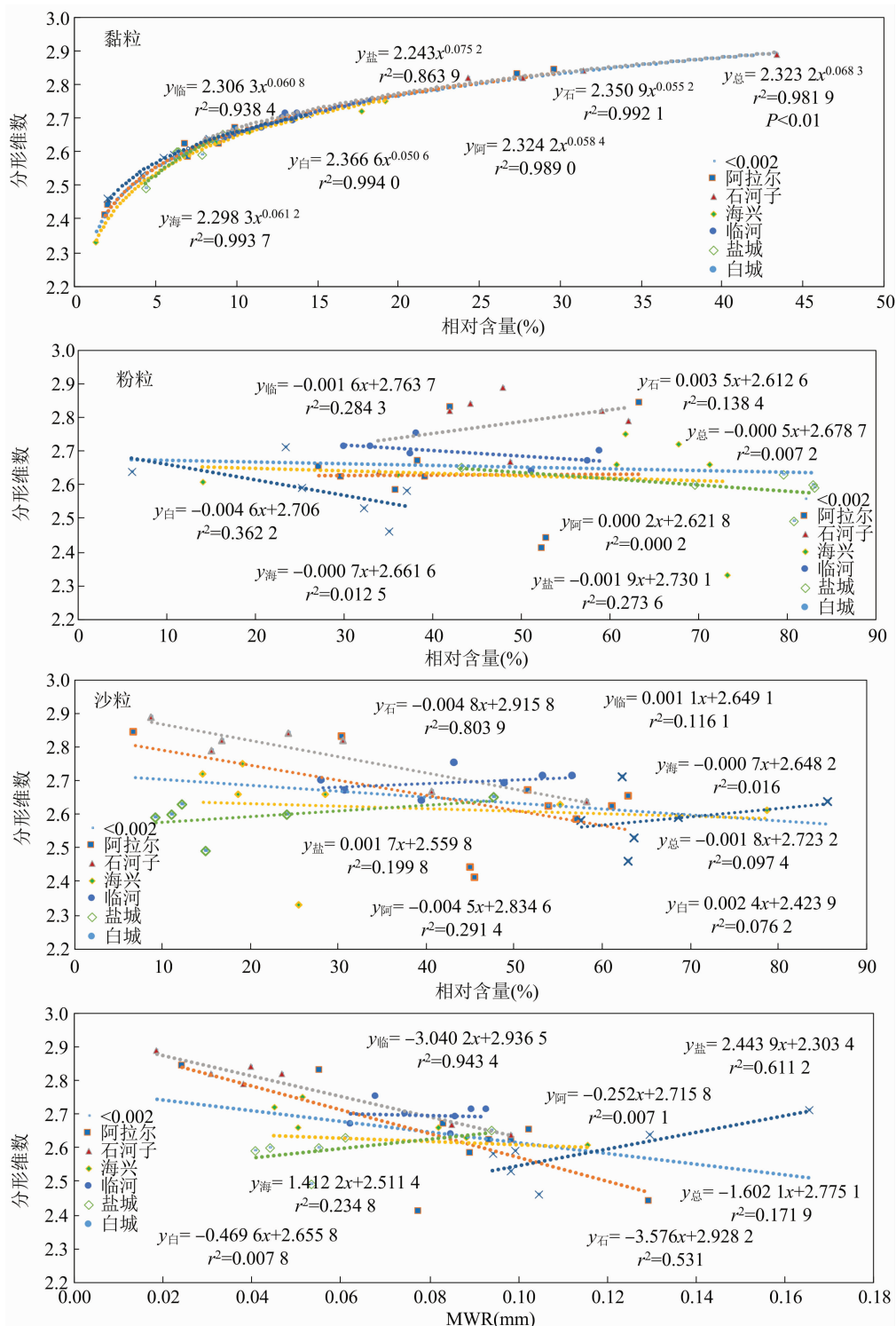
2.3 土壤颗粒及平均质量半径与分形维数的关系

由图 1 可知,6 个地区土壤黏粒相对含量与土壤分形维数总体呈极显著幂指数关系( $P<0.01$ ),决定系数  $r^2$  为 0.981 9;且就任意 1 个地区而言,土壤黏粒相对含量均与分形维数呈较好的幂指数关系,决定系数均高于 0.86。土壤分形维数随着粉粒和沙粒含量的增加而呈降低趋势,回归分析结果表明,拟合直线斜率分别为 -0.000 5 和 -0.001 8,决定系数分别为 0.007 2 和 0.097 4,决定系数接近于 0,可知土壤分形维数与粉粒和沙粒相对含量的拟合关系较差。不同地区之间,土壤分形维数与粉粒和沙粒的关系也不相同:就粉粒而言,阿拉尔和石河子地区土壤分形维数均随粉粒的增加呈递增趋势,其余 4 个地区则呈递减趋势;就沙粒而言,临河、盐城和白城 3 个地区的土壤分形维数随沙粒含量的增加呈增加趋势,其余 3 个地区则呈递减趋势。结合土壤平均半径与分形维数之间的关系可知,6 个地

区分形维数随土壤平均半径的增加总体呈降低趋势,线性拟合后决定系数为 0.171 9;不同地区间,土壤分形维数与土壤平均半径的关系不同:盐城和海兴两地土壤分形维数随土壤平均粒径的增加而增加,其余 4 个地区则随土壤平均粒径的增加而降低。综上可知,本研究中土壤分形维数与主要与黏粒相对含量具有较好的幂指数关系。

2.4 土壤盐分含量与分形维数的关系

根据图 2 可知,土壤分形维数随着土壤含盐量的增加而缓慢增加,增长速率为 0.000 4,对应的决定系数为 0.020 3;但不同地区间土壤含盐量与分形维数之间变化关系不同:海兴、白城和盐城 3 个地区土壤含盐量与分析维数拟合直线的斜率为负值,即分形维数随含盐量的增加呈降低趋势,拟合直线的决定系数分别为 0.505 0、0.052 5 和 0.635 9;石河子、阿拉尔和临河 3 个区域的土壤分形维数则随土壤含盐量的增加呈增加趋势,拟合直线的决定系数



图中彩色虚线表示对应的拟合方程曲线

图1 分形维数与土壤颗粒的关系

分别为 0.014 1、0.428 6 和 0.031 8。

### 3 讨论与结论

土壤颗粒分形维数可定量表达土壤结构特征,反映土壤质地等特征<sup>[2,15]</sup>。本研究的盐渍土按质地

共分为 8 类:粉黏土、粉黏壤土、黏壤土、壤土、粉壤土、壤细沙土、沙壤土和粉土,其分形维数依次为 2.89、2.84、2.83、2.69、2.63、2.62 和 2.56;结合平均质量半径及黏粒 (<0.002 mm) 相对含量结果可知,盐渍土分形维数随着平均质量半径的增大

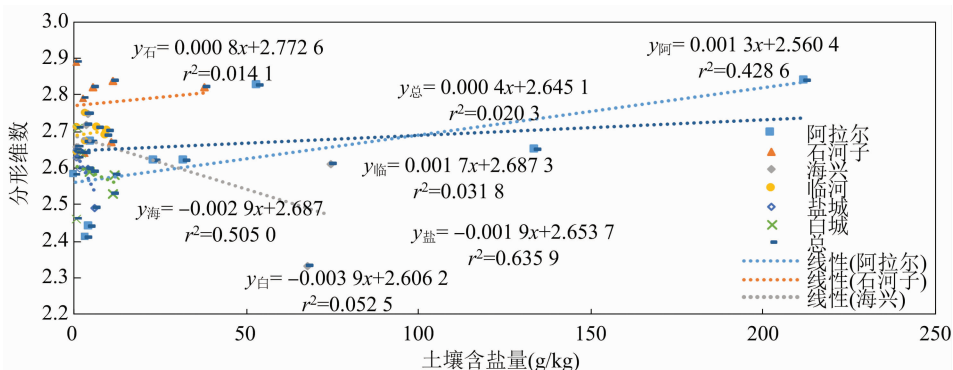


图2 分形维数与土壤含盐量的关系

而减小(拟合方程:  $y = -1.6021x + 2.7751$ ,  $r^2 = 0.1719$ ),随着黏粒相对含量的增加而增加(拟合方程:  $y = 2.3232x^{0.0683}$ ,  $r^2 = 0.9819$ )。本研究结果与杜雅仙等<sup>[10]</sup>、王德等<sup>[16]</sup>基本一致。本研究中沙粒和粉粒相对含量与分形维数总体呈线性负相关,且线性拟合的决定系数较低;但就地区而言,有的地区沙粒、粉粒相对含量与分形维数呈正相关,有的地区呈负相关。这可能与地区间的成土母质、气候类型等因素有关<sup>[17]</sup>。

盐城和海兴2个地区土壤均属于滨海盐渍土,海兴的土壤盐分含量和分形维数均高于盐城。白城、临河、石河子、阿拉尔4个地区均属于内陆盐渍土,地理位置上为自西向东依次分布,且4个地区土壤盐分含量和分形维数总体呈增加趋势。这与李德成等研究报道<sup>[17]</sup>基本一致。此外,就6个地区总体而言,土壤分形维数总体随盐分的增加而增加;但盐城、海兴、白城3个区域土壤分形维数随盐分的增加而降低,阿拉尔、石河子和临河3地区土壤分形维数随盐分的增加而增加,其原因可能与研究区海拔、气候条件等因素有关。

本研究结果表明,调查区内盐渍土土壤质地主要以壤土为主,土壤分形维数主要受黏粒相对含量影响,且随着黏粒含量的增加而增加。土壤分形维数受土壤粉粒、沙粒以及盐分含量的影响相对较小。自南向北、自东向西我国盐渍土分形维数和盐分含量总体呈递增趋势。由于本研究中所选地区及取样点数量有限,有关不同区域盐渍土分形维数特征及其与盐分含量、气候条件、成土母质之间的关系有待于进一步研究。

#### 参考文献:

[1] 王美荣,金志琳. 分形理论及其应用[J]. 菏泽师范专科学校学

报,2005,26(2):59-63.

[2] 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.

[3] 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.

[4] 张佳瑞,王金满,祝宇成,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.

[5] 陈文媛,徐学选,华瑞,等. 黄土丘陵区林草退耕年限对土壤团聚体特征的影响[J]. 环境科学学报,2017,37(4):1486-1492.

[6] 常海涛,刘任涛,刘佳楠,等. 草方格造林固沙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.

[7] 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):181-189.

[8] 王艳艳,何雨江. 土壤分形结构对其水力性质的指示作用[J]. 地学前缘,2019,26(6):66-74.

[9] 张德谦,倪世民,王军光,等. 不同侵蚀程度花岗岩红壤坡面侵蚀泥沙颗粒特征研究[J]. 土壤学报,2020,57(6):1-13.

[10] 杜雅仙,樊瑾,李诗瑶,等. 荒漠草原不同植被微斑块土壤粒径分布分形特征与养分的关系[J]. 应用生态学报,2019,30(11):3716-3724.

[11] 王少博,曹亚倩,冯倩倩,等. 保护性耕作对棕壤粒径分形特征及碳氮比分布的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2019,25(5):792-804.

[12] 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素——以黄土丘陵沟壑区为例[J]. 生态学报,2015,35(14):4625-4632.

[13] 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.

[14] 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):54-58.

[15] 张毅,由哈杨,马艳飞,等. 黄河三角洲地区典型土壤颗粒的分形特征[J]. 江苏农业科学,2019,47(19):280-284.

[16] 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.

[17] 李德成,张桃林. 中国土壤颗粒组成的分形特征研究[J]. 土壤与环境,2000,9(4):263-265.