

# 豫东平原盐碱地土壤颗粒分形特征

楚纯洁<sup>1</sup>, 刘清臻<sup>2</sup>, 马建华<sup>3</sup>

(1. 平顶山学院 环境与地理科学系, 河南 平顶山 467000; 2. 平顶山教育学院, 河南 平顶山 467000;  
3. 河南大学 资源与环境研究所, 河南 开封 475004)

**摘要:** 运用土壤颗粒分形维数模型, 以河南大学明伦校区土壤为供试材料, 分析了豫东平原盐碱地土壤颗粒的分形维数及其与土壤盐度、肥力指标的关系。结果表明: 土壤颗粒分形维数介于2.5562~2.7963, 平均值为2.7144, 土壤细颗粒物质越多, 土壤颗粒分形维数越高; 土壤盐度与土壤颗粒分形维数呈显著正相关; 土壤颗粒分形维数与土壤阳离子交换量(CEC)呈显著正相关, 与土壤有机质、碱解氮、速效磷、速效钾则均呈负相关。结合盐碱土的土壤性状, 土壤颗粒分形维数可用作分析、评价盐碱土壤退化的定量指标之一。

**关键词:** 盐碱地; 土壤颗粒; 分形维数; 土壤性状; 豫东平原

**中图分类号:** S152.3      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1004-3268(2010)05-0050-05

## Soil Particle Fractal Features of Saline-alkaline Soil in East Henan Plain

CHU Chun-jie<sup>1</sup>, LIU Qing-zhen<sup>2</sup>, MA Jian-hua<sup>3</sup>

(1. Department of Environment and Geography, Pingdingshan University, Pingdingshan 467000, China;  
2. Pingdingshan Education College, Pingdingshan 467000, China;  
3. Institute of Natural Resources and Environment Science, Henan University, Kaifeng 475004, China)

**Abstract:** Taking soil samples in Minglun campus of Henan University as tested materials, a case study on the saline-alkaline soil particle fractal features in east Henan plain was conducted. The fractal dimension of soil particle size distribution as well as the relationships between fractal dimension of soil particle distribution and selected soil properties including soil salinity and soil fertility index were discussed. The results revealed that the saline-alkaline soil has significant fractal features. Its fractal dimension is between 2.5562 and 2.7963, and the average of its fractal dimension is 2.7144. The more the contents of soil fine particles, the higher the fractal dimension. There exists positively remarkable quantitative relationship between fractal dimension and soil properties including soil salinity and CEC. However, there exists negative linear correlation between fractal dimension and soil fertility index including soil organic carbon, hydrolysis-N, available-P and available-K. So the fractal dimension of soil can be used as a quantitative index to evaluate the soil degradation when combined with soil properties of saline-alkaline soil.

**Key words:** Saline-alkaline soil; Soil particle; Fractal dimension; Soil properties; Eastern Henan plain

土壤是由大小、形状不同的固体组分和孔隙以一定的形式连结所形成的多孔介质, 是一个极不规则的几何形体。土壤的固体组分和孔隙在土壤中的排列形式连同它们的大小、形状构成了土壤结构, 决

收稿日期: 2009-12-09

基金项目: 河南省重点科技攻关项目(0721021500); 河南省科技攻关项目(0624440018)

作者简介: 楚纯洁(1978-), 男, 河南平顶山人, 讲师, 硕士, 主要从事自然地理与土壤环境方面的教学与研究。

定着一系列土壤性质的特征和变化<sup>[1,2]</sup>。自从分形理论产生以来,分形、分维在描述复杂几何形状方面的优势越来越显著。土壤作为一种具有自相似结构的多孔介质,具有一定的分形特征<sup>[3]</sup>。研究者可以通过分维来描述、刻画土壤颗粒的粒径及孔隙分布状况,由此可进一步研究土壤的其他物理化学性状及其对周边生态环境的指示意义<sup>[4]</sup>。当前,有不少学者对不同类型或土地利用方式的土壤颗粒分形特征进行研究<sup>[5-11]</sup>,其中有关生态脆弱区土壤分形研究以干旱区沙地居多<sup>[12-18]</sup>。盐碱化土壤在我国也是一种分布广泛的脆弱生态类型。据报道,我国盐渍化土壤面积约 3693.3 万  $\text{hm}^2$ ,残余盐渍化土壤约 4486.7 万  $\text{hm}^2$ ,潜在盐渍化土壤为 1733.3 万  $\text{hm}^2$ ,各类盐碱地面积总计 9913.3 万  $\text{hm}^2$ <sup>[19]</sup>,但有关盐碱化土壤分形的相关研究比较少<sup>[20]</sup>。

中国盐碱土在空间上主要有西北内陆盐碱区、黄河中游半干旱盐碱区、黄淮海平原干旱半干旱洼地盐碱区、东北半湿润半干旱低洼盐碱区和沿海半湿润盐碱区等 5 个区<sup>[21]</sup>。由于分布区环境因素的差异,不同分布区盐碱土的盐分组成与成因有很大不同。豫东平原为黄淮海平原的一部分,在黄河故道、黄泛区地带分布着较大面积的沙荒盐碱地,其中开封市作为豫东平原盐碱地的典型分布区域,土壤盐碱化严重。为此,采集河南大学明伦校区盐碱土壤为供试材料,探讨该区域盐碱土壤颗粒的分形特征,以期对盐碱地的改良利用,缓解土地压力,加快盐碱化地区生态建设与生产发展提供基础数据。

## 1 材料和方法

### 1.1 研究区概况

豫东平原地势平坦,海拔多在 69~78 m,坡降介于 1/4000~1/2000,属暖温带大陆性季风气候,全年四季分明,冬季盛行东北风,夏季盛行南风。全年最大风速为 18 m/s,平均风速为 2.8~3.7 m/s,年降水量为 627.5~722.9 mm,年均气温在 14.0~14.2℃,日照时数为 2242~2530 h,年日照率 51%~57%,全年无霜期为 207~220 d。该区域地表覆盖层多为黄河多次泛滥堆积的洪冲积物质,地表物质松散,沙源物质丰富,质地多为粉砂质。

河南大学明伦校区建于 1912 年,占地面积 55  $\text{hm}^2$ ,地处豫东平原,位于黄河下游河道背河洼地南侧(开封市东北隅)。校园绿地面积 121696  $\text{m}^2$ ,绿地率为 24.1%。由于地下水位浅,矿化度高,土

壤盐碱化严重,校园内部分草坪斑秃现象严重,许多植物生长不良,老树干枯死亡,新栽树种成活率较低。

### 1.2 样品采集与处理

采样单元主要集中于校园绿地上,在不同规模的绿地上相对均匀地布设采样单元,共布设 21 个采样单元。各采样单元均按蛇形采样法随机布设 30 个左右的采样点,每个采样点采集 100 g 左右的表层(0~15 cm)土壤样品,然后将其充分混合,按四分法舍弃多余土样,保留 1 kg,置于聚乙烯土样袋。土样在实验室避光风干,除去石块、植物枝等非土壤物质,全部通过 2 mm 孔径的土壤筛。然后将 2 mm 粒径的样品充分混合,用四分法分成 2 份,一份用作土壤颗粒组成分析,另一份进一步研磨,使之全部通过 1 mm 土壤筛,以测定土壤养分和阳离子交换量。最后,将 1 mm 粒径的样品充分混合,从中多点取样约 5 g,用玛瑙研钵研磨,使之全部通过 0.149 mm 土壤筛,以测定土壤有机质。

### 1.3 试验方法

土壤机械组成的测定采用吸管法,并采用美国制粒径分级标准对土壤质地进行分类;土壤有机质采用重铬酸钾氧化-外加加热法测定;阳离子交换量采用乙酸铵法测定;碱解氮采用碱解扩散法测定;速效磷采用 0.5 mol/L 碳酸氢钠浸提-硫酸钼锑抗比色法测定;速效钾采用 1 mol/L 乙酸铵浸提-火焰光度计法测定。具体分析方法见文献[22]。

### 1.4 土壤颗粒分形维数模型

土壤颗粒分形维数依据粒径的质量分布进行计算<sup>[23]</sup>。土壤颗粒的质量分布与平均粒径间的分形关系式为:

$$(\bar{R}_i/\bar{R}_{max})^{3-D}=W(r<\bar{R}_i)/W_0,$$

式中, $\bar{R}_i$  为两筛分粒级  $R_i$  与  $R_{i+1}$  间粒径的平均值, $\bar{R}_{max}$  为最大粒级土粒的粒径, $W(r<\bar{R}_i)$  为小于  $\bar{R}_i$  的累积土粒质量, $W_0$  为土壤各粒级质量的总和, $D$  为分形维数。

## 2 结果与分析

### 2.1 土壤颗粒组成与分形维数的关系

供试土壤颗粒组成的分形维数统计特征如表 1。由表 1 可知,研究区土壤颗粒的分形维数介于 2.5562~2.7963,分形维数的标准差和变异系数均较小,说明研究区土壤分形特征具有弱变异性。

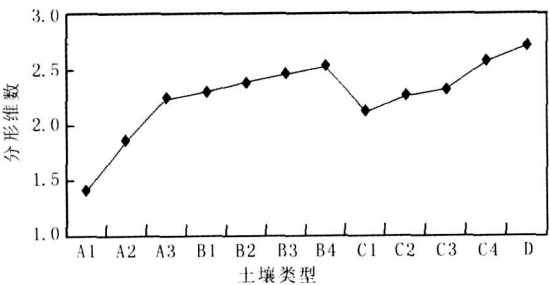
表 1 供试土壤颗粒组成的分形维数统计特征

| 项目     | 分形维数              | 不同质地土壤颗粒分形维数      |                   | 土壤颗粒含量/%             |                           |                     |
|--------|-------------------|-------------------|-------------------|----------------------|---------------------------|---------------------|
|        |                   | 粉砂壤土<br>(n= 18 *) | 砂壤土<br>(n= 3)     | 砂粒<br>(0. 05 ~ 2 mm) | 粉粒<br>(0. 002 ~ 0. 05 mm) | 黏粒<br>(< 0. 002 mm) |
| 平均值    | 2. 7144           | 2. 7273           | 2. 6365           | 32. 27               | 57. 71                    | 10. 02              |
| 变幅     | 2. 5562 ~ 2. 7963 | 2. 6242 ~ 2. 7963 | 2. 5562 ~ 2. 6959 | 11. 32 ~ 55. 23      | 36. 810 ~ 74. 52          | 3. 640 ~ 16. 58     |
| 标准差    | 0. 062            | 0. 051            | 0. 072            | 12. 55               | 10. 31                    | 3. 65               |
| 变异系数/% | 2. 28             | 1. 87             | 7. 73             | 38. 89               | 17. 87                    | 36. 43              |

注: n 为样品个数

为了分析土壤质地与分形维数的关系, 对照美国土壤质地分类标准<sup>[24]</sup>对土壤样品进行质地划分, 按照质地类型统计土壤颗粒分布的分形维数, 结果见表 1。研究区土壤质地有 2 种类型, 最主要为粉砂壤土, 占全部土壤样品的 85. 7%; 另外一种类型为砂壤土, 在全部 21 个土壤样品中仅有 3 个。2 种质地的土壤颗粒分形维数变幅、标准差和变异系数均不大, 对这 2 种类型的质地的土壤颗粒分形维数进行 K-S 检验, 相伴概率为 0. 044, 小于显著性水平 (0. 047), 因此可认为这 2 种质地的土壤颗粒分形维数平均值存在显著差异。2 种质地的土壤颗粒分形维数平均值大小为: 粉砂壤土>砂壤土, 结合其他相关研究<sup>[11]</sup>, 说明土壤质地越粗, 土壤颗粒分形维数就越小。通过回归分析(图 1)可知, 土壤颗粒分形维数与土壤砂粒含量呈显著负相关(相关系数为 -0. 729 8), 与粉粒含量和黏粒含量呈显著正相关(相关系数分别为 0. 615 1、0. 770 1), 且都通过了 99. 9% 的显著性检验。两者的关系呈现出黏粒含量越高, 土壤颗粒分形维数越高, 土壤砂粒含量越高, 则土壤颗粒的分形维数越低的特点。由于砂壤土中黏粒含量较少(均值为 7. 00%, 变幅为 3. 63% ~ 10. 04%), 而粉砂壤土中黏粒含量相对较高(均值为 10. 52%, 变幅为 4. 76% ~ 16. 58%), 因此, 粉砂壤土的颗粒分形维数较高。以上分析说明, 土壤颗粒分形维数可以作为土壤质地判定的指标之一。

为进一步分析土壤颗粒组成与土壤颗粒分形维数的关系, 对比前人研究, 对几种典型的生态脆弱地带土壤颗粒分形维数特征进行比较, 结果见图 2。由图 2 可知, 土壤颗粒分形维数最小的为流动沙地, 并从流动沙丘、半固定沙丘到固定沙丘土壤颗粒分形维数依次增大, 说明随着沙丘的固定, 植被不仅能有效地阻止沙地细颗粒物质的进一步损失, 而且还可能促进细颗粒物质的沉积, 增加细颗粒物质的含量, 继而增加土壤的分形维数<sup>[12]</sup>。而对于科尔沁沙地农田和贵州喀斯特山区, 分别随着沙化或石漠化程度的减轻, 土壤颗粒分形维数随之增大。豫东平原盐碱地与沙地或石漠化土壤相比, 土壤颗粒分形维数较高, 主要是因为盐碱地土壤粉粒、黏粒等细颗粒物质含量相对较高。由此进一步表明, 随着土壤细颗粒物质的增加, 土壤颗粒分形维数呈现出递增的趋势。



A1—A3 分别为流动沙地、半固定沙地、固定沙地, 数据引自文献[12]; B1—B4 分别为科尔沁沙地农田极严重沙化、严重沙化、中度沙化以及轻度沙化类型, 数据引自文献[13]; C1—C4 分别为贵州喀斯特山区极严重石漠化、严重石漠化、中度石漠化、轻度石漠化等土壤类型, 数据引自文献[15]; D 为本研究豫东平原盐碱地

图 2 几种典型生态脆弱地土壤颗粒分形维数比较

2.2 土壤盐度与土壤颗粒分形维数的关系

根据前期的研究, 研究区土壤平均含盐量 1. 7 g/kg, 属于碳酸氢钠—氯化钙型盐土, 轻度盐土的样点占总样点数的 61. 90%, 中度盐土的样点占总样点数的 28. 57%<sup>[25]</sup>。从土壤全盐含量与土壤颗粒分形维数的关系图(图 3a)可以看出, 土壤全盐含量与土壤颗粒分形维数没有显著关联, 这主要是因为土壤发生盐碱化的原因不仅仅与土壤颗粒组成有关, 而且也主要与地下水位、水质以及气候等有关。

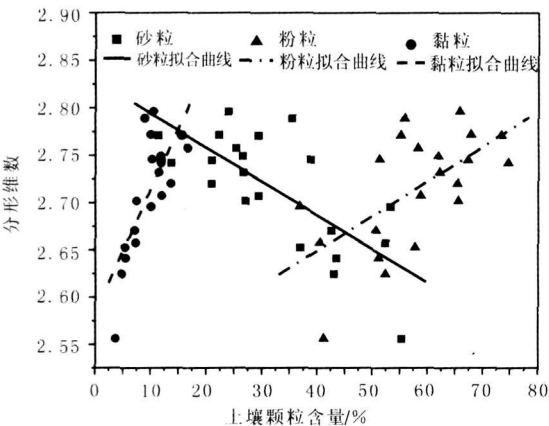


图 1 土壤颗粒组成与分形维数的相关性

由于研究区尺度较小,受地下水位深浅不等以及地下水水质矿化度不同的影响,各样点土壤颗粒分形维数与土壤盐度没有明显关系。为排除不同样点的影响,对所有样点土壤全盐含量和土壤颗粒分形维数均按升序重新排列,进行回归分析得到,回归方程: $D=0.1556\ln x+2.9959$ ,相关系数为 0.9681。由图 3b 可知,随着土壤盐度( $x$ )的增加,土壤颗粒

分形维数( $D$ )也相应增大,两者呈显著正相关,其原因主要与土壤的颗粒组成有关。由于豫东平原土壤质地多为粉砂壤土,这种土壤质地的毛管孔隙数量虽不及黏土,但比砂土要多,在这种特殊自然条件下,碱性地下水沿土壤毛管孔隙上升可以到达土壤表层,水分蒸发后,可溶性盐分则残留在土壤表层,引起盐渍化。因此,土壤粉粒、黏粒含量越高,相应地土壤颗粒

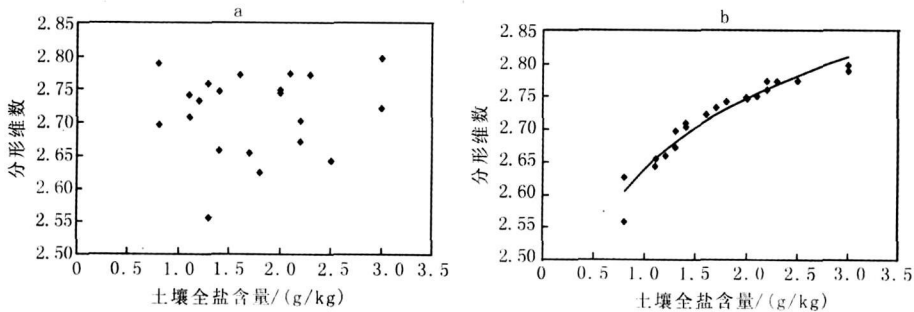


图 3 土壤盐分与土壤颗粒分形维数的相关性

分形维数就越大,则土壤盐碱化程度越大。

2.3 盐碱地土壤肥力与土壤颗粒分形维数的关系

由表 2 可看出,虽然研究区空间尺度较小,但各土壤肥力指标存在明显变异,其中速效磷含量呈现高

度变异(61.18%),其他指标含量为中等变异,这说明土壤肥力受外界影响不均一,具有一定的空间分异,而这种空间分异很大程度上缘于生活垃圾、生活污水等的排放以及校园绿化过程中的肥料投入。

表 2 研究区土壤肥力指标统计特征

| 项目     | 有机质/<br>(g/kg) | 阳离子交换量/<br>(cmol(+)/kg) | 碱解氮/<br>(mg/kg) | 速效磷/<br>(mg/kg) | 速效钾/<br>(mg/kg) |
|--------|----------------|-------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 平均值    | 15.90          | 7.83                    | 72.75           | 14.40           | 142.13          |
| 变幅     | 11.04~24.14    | 3.90~10.64              | 46.24~95.96     | 5.70~36.37      | 98.41~280.44    |
| 标准差    | 3.76           | 1.62                    | 14.15           | 8.81            | 46.57           |
| 变异系数/% | 23.65          | 20.69                   | 19.45           | 61.18           | 32.77           |

对土壤肥力指标和土壤颗粒分形维数进行回归分析,结果表明(表 3),各肥力指标与土壤颗粒分形维数存在显著的相关性。其中阳离子交换量(CEC)作为表征土壤吸收性能、保肥能力的一项重要指标,与土壤颗粒分形维数存在极显著正相关。这是因为,土壤黏粒是产生各种吸收能力的基本物质,而在一定范围内分形维数又能很好地反映土壤中黏粒的含量<sup>[29]</sup>。但土壤颗粒分形维数与土壤有机质、速效磷均呈极显著负相关,与土壤速效钾呈显著的负相关,与土壤速效氮具有一定的负相关性,也即随着土壤颗粒分形维数的增大,这 4 种土壤肥力指标含量反而下降,似乎与 CEC 的保肥作用相矛盾,也与前人的某些研究成果相左<sup>[14,26]</sup>。究其原因,主要还在于豫东平原土壤盐碱化的特性所决定的。根据前述分析,随着土壤盐度的增大,土壤颗粒分形维数也增大,相应地土壤粉粒、黏粒含量也就越高,虽然土壤 CEC 也增大,即土壤保肥能力增强,但土壤粉粒、黏粒含量过高又

容易使盐分表聚、土壤板结,土壤的透水、通气能力下降,这样不仅会降低土壤有效养分含量,而且直接导致植物“生理性干旱”,致使许多绿化植被出现生长不良等问题。因此,运用土壤颗粒分形维数表征土壤肥力状况时,应针对不同类型土壤的性状进行分析,这也印证了土壤颗粒分形维数在作为土壤肥力诊断指标等方面具有很好的应用潜力<sup>[17]</sup>。

表 3 研究区土壤肥力指标与土壤颗粒分形维数的关系

| 项目     | 拟合回归方程           | 相关系数     |
|--------|------------------|----------|
| 有机质    | $D=2.897-0.011x$ | -0.690** |
| 阳离子交换量 | $D=2.446+0.034x$ | 0.886**  |
| 碱解氮    | $D=2.810-0.001x$ | -0.288   |
| 速效磷    | $D=2.776-0.004x$ | -0.618** |
| 速效钾    | $D=2.799-0.001x$ | -0.463*  |

注: \*表示  $P<0.05$ ; \*\*表示  $P<0.01$

3 结论

1) 以豫东平原盐碱地作为研究对象,以河南大

学明伦校区土壤作为供试材料, 研究豫东平原盐碱地土壤颗粒的分形特征, 结果表明, 研究区主要的土壤质地类型为粉砂壤土和砂壤土, 其中以粉砂壤土所占比例最大, 土壤颗粒分形维数介于 2.5562 ~ 2.7963, 平均值为 2.7144, 且 2 种质地的土壤颗粒分形维数平均值大小为粉砂壤土 > 砂壤土。土壤颗粒分形维数与土壤质地的粗细有直接关系, 随着土壤细颗粒物质的增加, 土壤颗粒分形维数递增。因此, 可将土壤颗粒分形维数作为判定土壤质地差异的指标之一。

2) 土壤盐碱化不仅与土壤颗粒组成有关, 而且与地下水位、水质以及气候等因素有关。只考虑土壤颗粒组成因素时, 土壤盐度与土壤颗粒分形维数呈显著正相关, 即随着土壤盐度的增加, 土壤颗粒分形维数也相应增大。

3) 研究区土壤颗粒分形维数与土壤阳离子交换量呈显著正相关, 与土壤有机质、碱解氮、速效磷、速效钾含量则均呈负相关, 具有与某些土壤类型不同的特点, 表明将土壤颗粒分形维数用于表征土壤肥力状况时, 应针对不同类型土壤的性状进行分析。

#### 参考文献:

- [1] 王玉杰, 王云琦, 夏一平, 等. 重庆缙云山典型林分土壤结构分形特征[J]. 中国水土保持科学, 2006, 4(4): 39-46.
- [2] Globus A M. Fractal character of some physical parameters of soils[J]. Eurasian Soil Science, 2006, 39(10): 1116-1126.
- [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] 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.
- [5] 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.
- [6] Wang X D, Liu S Z, Liu G C. Fractal characteristics of soil under different land-use patterns in the arid and semi-arid region of the western Tibet Plateau, China [J]. Wuhan University Journal of Natural Sciences, 2005, 10(4): 785-790.
- [7] 缪驰远, 汪亚峰, 魏欣, 等. 黑土表层土壤颗粒的分形特征[J]. 应用生态学报, 2007, 18(9): 1987-1993.
- [8] 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.
- [9] 龚伟, 胡庭兴, 王景燕, 等. 川南天然常绿阔叶林人工更新后土壤团粒结构的分形特征[J]. 植物生态学报, 2007, 31(1): 56-65.
- [10] 高鹏, 李增嘉, 杨慧玲, 等. 渗灌与漫灌条件下果园土壤物理性质异质性及其分形特征[J]. 水土保持学报, 2008, 22(2): 155-158.
- [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]. 生态学杂志, 2008, 27(9): 1557-1561.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 章予舒, 王立新, 张红旗, 等. 塔里木河下游沙漠化土壤性质及分形特征[J]. 资源科学, 2004, 26(5): 11-17.
- [15] 龙健, 李娟, 邓启琼, 等. 贵州喀斯特山区石漠化土壤理化性质及分形特征研究[J]. 土壤通报, 2006, 37(4): 635-639.
- [16] 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): 2827-2833.
- [17] 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.
- [18] 苏里坦, 宋郁东, 陶辉. 不同风沙土壤颗粒的分形特征[J]. 土壤通报, 2008, 39(2): 244-248.
- [19] 张建锋. 盐碱地的生态修复研究[J]. 水土保持研究, 2008, 15(4): 74-78.
- [20] 叶雅杰, 罗金明, 许林书. 松嫩平原盐碱地土壤颗粒分形维数研究及其应用[J]. 长春师范学院学报: 自然科学版, 2005, 24(3): 103-106.
- [21] 王遵亲, 祝寿泉, 俞仁培, 等. 中国盐渍土[M]. 北京: 科学出版社, 1993.
- [22] 中国科学院南京土壤研究所. 土壤理化分析[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1978.
- [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] 朱鹤健, 何宜庚. 土壤地理学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1992: 50-77.
- [25] 马建华. 河南大学明伦校区盐碱土的特性及其改良[J]. 河南大学学报: 自然科学版, 2007, 37(3): 271-275.
- [26] 赵来, 吕成文. 土壤分形特征与土壤肥力关系研究——以皖南地区水稻土为例[J]. 土壤肥料, 2005(6): 7-11.