

# 人工植被恢复荒漠化逆转过程中土壤颗粒分形特征\*

齐雁冰<sup>1</sup> 常庆瑞<sup>1†</sup> 惠泱河<sup>2</sup>

(1 西北农林科技大学资源环境学院, 陕西杨凌 712100)

(2 西北大学城市与资源系, 西安 710069)

## FRACTAL FEATURES OF SOIL PARTICLES IN DESERTIFICATION REVERSING PROCESS BY ARTIFICIAL VEGETATION

Qi Yanbing<sup>1</sup> Chang Qingrui<sup>1†</sup> Hui Yanghe<sup>2</sup>

(1 College of Resources and Environment, Northwest Agri. & For. University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

(2 Department of Urban and Resources, Northwest University, Xi'an 710069, China)

关键词 人工植被恢复; 荒漠化; 分形维数

中图分类号 S152.3 文献标识码 A

土地荒漠化已经逐渐威胁到人类的生存, 是人类共同面对的全球重大环境问题, 也是人类研究的热点问题之一。土壤是由水、空气和粒径不同的各类物质组成的具有不规则形状和自相似性的多孔介质, 具有一定分形特性<sup>[1]</sup>。近年来许多学者运用土壤颗粒的分形维数来综合反映荒漠化土壤的质地、结构及均匀程度, 表征荒漠化的程度, 分形几何已成为定量描述荒漠化土壤特性的新方法<sup>[2~7]</sup>。但目前尚未见到关于在人工植被恢复荒漠化逆转过程中土壤分形特征变化的报道。本文采用已有的分形模型, 对青海省治沙站建站以来人工植被恢复荒漠化逆转过程中土壤颗粒分形维数变化特征进行研究, 为荒漠化逆转特征描述和荒漠化程度的定量化评价提供新的方法。

## 1 研究区域与研究方法

### 1.1 研究区域

青海省沙珠玉治沙站地处青海省共和盆地中西部, 地理位置为北纬  $36^{\circ}03' \sim 36^{\circ}40'$ 、东经  $99^{\circ}45' \sim 100^{\circ}30'$ , 海拔 2 871~ 3 870 m, 属于高原温带干旱气

候区。年平均气温  $2.4^{\circ}\text{C}$ , 昼夜温差大, 气温低而变化剧烈。该区年均降水量 246.3 mm, 季节分配不均, 干湿季非常明显, 大气降水主要集中在 5~ 9 月份, 年蒸发量 1 717 mm, 气候异常干燥。全年大风日数平均 30.6 d, 最多可达 97 d, 年平均风速  $2.7\text{ m s}^{-1}$ 。该区地带性植被主要包括草原、荒漠化草原, 非地带性植被包括沙地半灌木、草甸和沼泽。该区风沙土连片分布, 多呈新月形沙丘链, 风沙土总面积约 41 956  $\text{hm}^2$ 。自 1958 年设站, 经过 40 多年的研究、试验、推广和大规模应用, 通过人工引种结合当地野生物种, 初期利用机械沙障后期应用低矮灌木, 建立了治沙样板区 500 多  $\text{hm}^2$ , 共固定沙丘 1.4 万  $\text{hm}^2$ , 营造农田防护林带 231 条, 营造防风固沙林、薪炭林、用材林 379.8  $\text{hm}^2$ , 四旁植树 8 万余株。形成了一个顺主风向沿沙珠玉河谷, 顺序为封沙育草区、防风固沙造林区和农田防护体系这一沙珠玉沙漠绿洲。

### 1.2 研究方法

1.2.1 样品采集与分析 在青海省治沙站按照“流动沙丘 $\rightarrow$ 半固定沙丘 $\rightarrow$ 固定沙丘 $\rightarrow$ 固定林地 $\rightarrow$ 农田”的序列选择 6 个典型逆转类型样地, 每个样地选择样点 4 个, 每个样点随机采集 10 个 0~ 20 cm 土

\* 国家自然科学基金项目(30571527)、国家重点基础研究发展计划(2007CB407203)资助

† 通讯作者: 常庆瑞(1959~), 男, 陕西子洲人, 教授, 博士生导师。E-mail: changqr@nwsuaf.edu.cn

作者简介: 齐雁冰(1976~), 男, 河南周口人, 博士, 主要从事资源环境与信息技术的研究。E-mail: yanbing\_qi@sina.com

收稿日期: 2005-12-21; 收到修改稿日期: 2006-06-18

样, 去除枯枝落叶均匀混合后装袋带回实验室进行分析。其中流动沙丘上分布有盖度低于 5% 的沙米; 半固定沙丘为设置沙障 8~ 10 a 的沙地, 其上有盖度大于 15% 的沙蒿和柠条; 固定 15 a 的固定沙丘为设置沙障约 25 a 的沙地, 其上有盖度小于 35% 的沙蒿、柠条、沙柳等; 固定 40 a 的固定沙丘设置沙障已经接近 50 a, 其后经过人工灌溉, 植被生长较好, 已经有成片的林木出现, 其上的植被为柠条、沙柳及杨树等, 其盖度超过 50%; 林地为固定已超过 80 a, 现在已经用作防护林的沙地, 植被为杨树, 树龄超过 20 a; 农田已经固定超过 100 a, 处于防护林的包围之中, 其上作物为小麦、油菜和青稞等。

室内理化分析主要根据文献[8]~[10]介绍的方法进行, 具体分析项目及所采用方法为: 土壤机械组成分析采用吸管法, 土壤有机质测定采用重铬酸钾氧化—外加加热法, 全氮采用凯氏法, 土壤全磷采用碳酸钠熔融法。

**1.2.2 土壤颗粒分形维数的计算** 本研究采用以不同级别颗粒的质量分布表征的土壤分形模型数<sup>[1~7, 11~13]</sup>。土壤颗粒质量分布与平均粒径的分形关系式为:

$$(\bar{R}_i/\bar{R}_{\max})^{3-D} = M(r < \bar{R}_i)/M_0 \quad (1)$$

式中,  $\bar{R}_i$  表示两筛分粒级  $R_i$  与  $R_{i+1}$  间粒径的平均值,  $\bar{R}_{\max}$  为最大粒级土粒的平均直径,  $M(r < \bar{R}_i)$  为小于  $\bar{R}_i$  的累积土粒质量,  $M_0$  为土壤各粒级质量的总和。由式(1)可知式中各土壤颗粒的粒径及小于某一粒径土壤质量可通过土壤的机械分析确定, 然后分别以  $\lg(M_i/M_0)$ 、 $\lg(\bar{R}_i/\bar{R}_{\max})$  为纵、横坐标,  $(3-D)$  为线性拟合方程的斜率,  $D$  为土壤颗粒分形维数。

## 2 结果与分析

### 2.1 土壤理化特征

人工植被恢复防治荒漠化的核心是通过人工植被干预, 阻止因风蚀而引起的细颗粒和营养物质的吹蚀, 并逐渐在沙丘表层形成生物结皮层, 使植物能够在沙丘表面生长, 经过长时间发育, 土壤转化为能够被人类利用, 在其上种植作物的过程。简言之, 就是通过人工植被恢复的方法使荒漠化土壤发生逆转的过程, 这一过程必然对土壤理化性状产生深刻的影响。表 1 是荒漠化土壤人工植被恢复过程中土壤

粒级分布、有机质和养分的变化状况。可以看出, 沙地土壤颗粒组成主要集中于 1~ 0.25 mm 和 0.25~ 0.05 mm 的砂粒两个粒级, 粉粒和粘粒的含量之和不超过  $150 \text{ g kg}^{-1}$ 。随着人工植被恢复到可利用农田阶段, 1~ 0.25 mm 组分明显降低, 但降低的幅度并不大; 而 0.25~ 0.05 mm 砂粒组分则先升高后降低, 这是由于在人工植被恢复初期, 流沙被固定以后, 土壤逐渐开始发育, 1~ 0.25 mm 砂粒逐渐向 0.25~ 0.05 mm 砂粒转化; 相应的粉粒和粘粒组分含量则升高, 但幅度也不大。由此表明, 由流动沙丘向农田的演变, 土壤的各个粒级都在发生不同程度的变化, 但主要表现在砂粒的变化上。6 个样点平均, 人工植被恢复过程中由流沙向农田的演替, 耕层土壤沙粒含量由  $847.7 \text{ g kg}^{-1}$  降低为  $327.4 \text{ g kg}^{-1}$ , 已经接近正常土壤的水平; 相应地, 粉粒和粘粒含量逐渐升高, 农田和流沙相比, 粉粒含量提高 16.87 倍, 粘粒提高仅 1.69 倍。由此表明, 荒漠化土壤转变为正常土壤的机械组成, 需要相当长的时间。据张登山<sup>(1)</sup>的研究, 该地区流动沙丘发育成正常土壤需要 260 a 以上的时间。总而言之, 在人工植被恢复土壤逆转的过程中, 荒漠化土壤机械组成的变化是稳定而缓慢的过程。

表 1 也反映出, 伴随着流动沙丘固定程度的加强, 土壤有机质和养分含量也逐渐升高。在早期, 由于表层土壤生物结皮的逐渐发育, 有机质和养分含量迅速升高, 如流动沙丘有机质和全氮平均含量分别为  $0.905 \text{ g kg}^{-1}$  和  $0.09 \text{ g kg}^{-1}$ , 而到固定 40 a 之后, 含量已经达到  $8.570 \text{ g kg}^{-1}$  和  $0.905 \text{ g kg}^{-1}$ , 较流动沙丘提高了 8.47 倍和 9.01 倍。而当进行植树造林和用作农田之后, 由于表层生物结皮的破坏, 有机物质的来源和转化条件变差, 有机质和全氮的含量较生物结皮时有所降低。而土壤全磷虽然也基本是随固定程度增强含量逐渐提高, 与有机质和全氮具有大致相近的规律, 但其变化幅度却很小, 这是由于研究区土壤全磷含量较高的缘故。可以看出, 在人工植被恢复土壤逆转的过程中, 荒漠化土壤有机质和养分的变化较迅速且随利用方式不同存在差异。

### 2.2 土壤颗粒分形特征及演变规律

土壤作为一个多孔介质, 其结构性具有统计学上的自相似性, 表现出明显的分形特征, 土壤质地越粗, 越难形成很好的结构, 质地越细, 形成的微小孔隙越多, 结构也更复杂, 分形维数越高<sup>[4~7, 11~14]</sup>。

(1) 张登山. 青海沙珠玉高寒区风沙土的分布形成、分类与改良利用研究. 西北农林科技大学硕士学位论文, 1996

运用回归分析法,由式(1)计算出24个沙漠化样点土壤颗粒的分形维数,回归分析所得相关系数均在0.85以上,线性相关极显著( $p < 0.01$ ),结果见表1。由于荒漠化土壤粗颗粒占绝对优势,而细颗粒含量相对较低,分形维数均在2.75以下,平均值仅为2.46,处于较低的水平。表1还可以看出,6个取样单元的土壤颗粒分维值大小顺序为:流动沙丘 < 半固定沙丘 < 固定15a沙丘 < 固定40a沙丘 < 固定

林地 < 耕地,表明荒漠化土壤的人工植被恢复过程中,随表层植被盖度提高,有机质含量逐渐提高,明显降低沙丘的风蚀,使沙丘逐渐得以固定,同时在表层形成结皮层,表层土壤逐渐发育,细物质含量逐渐升高,质地均一程度越来越差,细物质填充大颗粒孔隙,分形维数亦越来越高。其中流动沙丘平均值为2.37,半流动沙丘为2.41,固定15a沙丘为2.44,固定40a沙丘为2.47,固定林地为2.51,耕地为2.60。

表1 人工植被恢复逆转过程中土壤机械组成、化学性状及土壤颗粒的分形维数

取样单元	样号	机械组成( $\text{g kg}^{-1}$ )							分形维数	相关系数	有机质( $\text{g kg}^{-1}$ )	全氮( $\text{g kg}^{-1}$ )	全磷( $\text{g kg}^{-1}$ )
		1~ 0.25 mm	0.25~ 0.05 mm	0.05~ 0.02 mm	0.02~ 0.01 mm	0.01~ 0.005 mm	0.005~ 0.002 mm	< 0.002 mm					
流动沙丘	1	176.1	667.5	12.87	0.95	0.41	6.50	56.88	2.3269	0.8970	0.87	0.07	0.78
	2	61.57	730.4	13.80	8.91	10.05	6.76	72.33	2.3674	0.9356	0.77	0.08	0.80
	3	156.2	699.5	21.68	6.95	0.00	8.43	29.56	2.3813	0.9077	1.14	0.10	0.58
	4	58.44	768.1	24.70	1.94	4.69	1.81	62.46	2.3996	0.9025	0.84	0.11	1.44
半固定沙丘	5	80.37	780.6	8.31	15.01	1.74	5.63	34.04	2.4011	0.9037	1.76	0.15	0.69
	6	32.32	515.5	111.6	68.10	44.28	43.74	90.30	2.4086	0.9656	4.08	0.49	1.18
	7	201.0	660.3	8.77	0.00	3.78	9.31	40.76	2.4119	0.8814	3.10	0.31	0.58
	8	252.8	569.1	17.07	4.07	9.76	14.02	55.08	2.4166	0.8946	1.36	0.14	0.76
固定15a	9	145.2	716.2	5.09	1.07	0.60	3.55	40.04	2.4291	0.9106	2.61	0.23	0.62
	10	86.94	693.4	67.31	12.96	2.63	20.93	35.78	2.4305	0.9050	1.06	0.14	0.75
	11	289.5	574.0	6.36	0.00	12.12	0.00	38.84	2.4335	0.9083	1.76	0.20	0.69
	12	84.53	575.9	62.84	41.27	19.01	16.78	86.46	2.4469	0.9559	6.20	0.74	1.21
固定40a	13	148.1	739.2	0.14	0.00	0.00	5.14	40.27	2.4602	0.9082	8.29	0.78	0.74
	14	293.0	573.5	2.41	2.21	6.49	0.00	42.72	2.4616	0.9070	10.41	0.95	1.31
	15	97.22	672.1	44.97	11.01	6.31	12.62	52.35	2.4630	0.9469	3.31	0.38	1.12
	16	150.3	553.1	39.21	53.10	38.51	8.50	116.7	2.4772	0.9514	12.27	1.51	1.44
固定林地	17	276.9	597.2	1.01	4.62	3.01	0.00	34.82	2.4893	0.9102	1.03	0.14	0.75
	18	34.84	524.7	204.0	32.48	15.97	15.16	69.78	2.5059	0.9325	1.12	0.09	1.17
	19	49.51	565.0	124.1	53.38	18.86	14.91	76.01	2.5127	0.9719	3.25	0.40	0.97
	20	7.07	182.2	230.8	135.1	83.58	65.81	246.6	2.5175	0.9751	2.71	0.37	0.86
耕地	21	101.2	255.3	10.84	56.26	51.21	0.00	148.0	2.5364	0.9181	0.91	0.14	0.61
	22	8.08	133.5	85.35	96.01	124.6	115.1	281.7	2.5407	0.9784	9.57	1.12	1.39
	23	2.94	22.01	117.3	169.3	312.2	0.00	201.9	2.6021	0.9842	9.49	1.10	1.44
	24	67.30	325.4	180.3	78.16	73.54	6.8	183.8	2.7214	0.9734	4.51	0.59	0.90

### 2.3 土壤理化性状与土壤颗粒分形维数的关系

在荒漠化土壤人工植被恢复过程中,各土壤理化性状与土壤颗粒分形维数的关系如图1和图2。图1表明,土壤颗粒分形维数与土壤粉粒和粘粒均

呈极显著正相关,与砂粒呈极显著负相关。大多数学者的研究表明,土壤颗粒分形维数与土壤有机质和全氮含量均呈显著或极显著正相关关系,土壤分形维数可以表征土壤养分状况<sup>[4-7]</sup>。而在本次研究中,土

壤颗粒分形维数与土壤有机质、全氮和全磷的相关性未达到显著水平(图 2a、图 2b、图 2c), 这是由于人工

植被恢复可以在较短的时间内提高土壤表层养分的含量, 但却不能迅速改变土壤的机械组成性状。

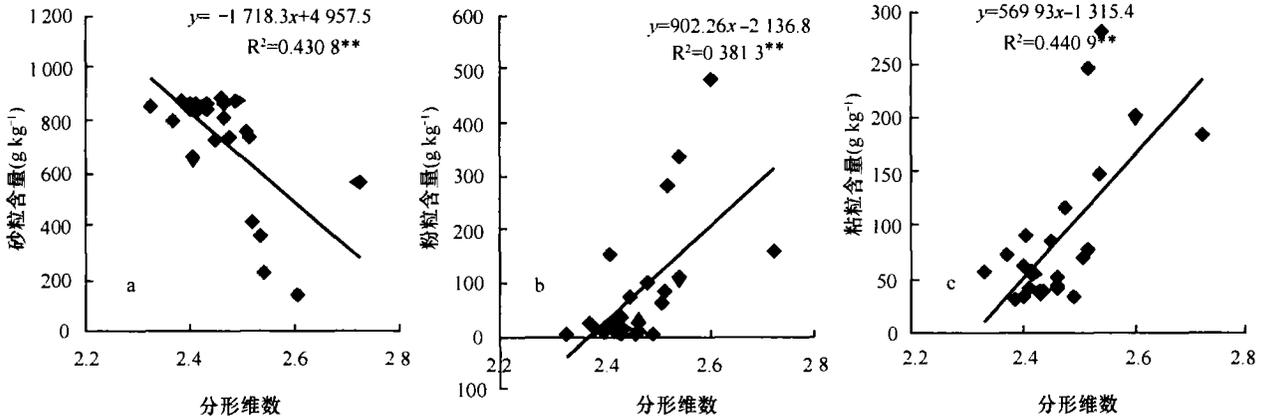


图 1 土壤颗粒分形维数与土壤砂粒、粉粒和粘粒的关系

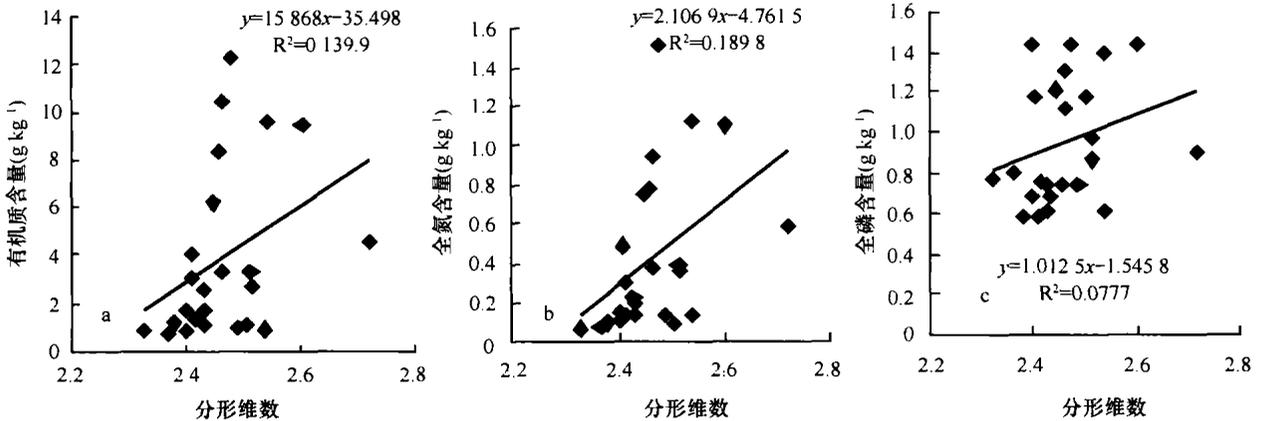


图 2 土壤颗粒分形维数与土壤有机质、全氮和全磷的关系

### 3 结 论

1) 研究区 6 个取样单元 24 个荒漠化土样的土壤颗粒分形维数介于 2.326 9~ 2.721 4 之间, 平均为 2.464, 均处于较低水平。

2) 在人工植被恢复过程中, 随表层植被盖度提高, 有机质含量逐渐提高, 明显降低沙丘的风蚀, 使沙丘逐渐得以固定, 同时在表层形成结皮层, 表层土壤逐渐发育, 细物质含量逐渐升高, 质地均一程度越来越差, 土壤颗粒分形维数逐渐提高。

3) 土壤颗粒分形维数与土壤砂粒含量呈极显著负相关, 与土壤粉粒和粘粒含量呈极显著正相关, 而与土壤有机质、全氮和全磷等养分未达到显著相关水平。

4) 荒漠化土壤的人工植被恢复逆转过程中, 土

壤分形特征能够反映土壤的结构性状, 可以表征土壤结构的变化, 但却不能表征土壤肥力水平的变化。

### 参 考 文 献

- [1] 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. 科学通报, 1993, 38(20): 1896~ 1899
- [2] 刘金福, 洪伟, 吴承祯. 中亚热带几种珍贵树种林分土壤团粒结构的分形特征. 生态学报, 2002, 22(2): 197~ 205
- [3] 李德成, 张桃林. 中国土壤颗粒组成的分形特征研究. 土壤与环境, 2000, 9(4): 263~ 265
- [4] 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. 土壤学报, 2002, 39(2): 221~ 226
- [5] 刘松玉, 张继文. 土中孔隙分布的分形特征研究. 东南大学学报, 1997, 27(3): 127~ 130
- [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. 土壤学报, 1999, 36(2): 163~ 167
- [7] 苏永中. 科尔沁沙地农田沙漠化演变中土壤颗粒分形特征. 生态学报, 2004, 24(1): 71~ 74

- [ 8 ] 中国科学院南京土壤研究所. 土壤理化分析. 上海: 上海科学技术出版社, 1978
- [ 9 ] 南京农业大学主编. 土壤农化分析. 北京: 农业出版社, 1987
- [ 10 ] 鲍士旦主编. 土壤农化分析. 第 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000
- [ 11 ] 朱晓华, 杨秀春, 蔡运龙. 中国土壤空间分布的分形与分维. 土壤学报. 2005, 42( 6 ): 881~ 888
- [ 12 ] 杨秀春, 刘连友, 严平. 土壤短期吹蚀的粒度分维特征. 土壤学报, 2004, 41( 2 ): 176~ 182
- [ 13 ] 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. 土壤学报, 2005, 42( 2 ): 336~ 339
- [ 14 ] Millan H, Gonzalez Posada M, Benito R.M. Fragmentation fractal dimensions of Vertisol samples: Influence of sieving time and soil pretreatment. Geoderma, 2002, 109( 1/2 ): 75~ 83