

石羊河尾间水面形成区土壤颗粒的分形特征

刘淑娟, 袁宏波, 刘世增, 刘虎俊, 李发明,
郭树江, 王琪, 郭春秀, 李菁菁, 魏怀东

(甘肃省荒漠化与风沙灾害防治重点实验室/省部共建国家重点实验室培育基地,
甘肃民勤荒漠草地生态系统国家野外科学观测研究站 甘肃省治沙研究所, 甘肃 兰州 730070)

摘要: 青土湖是石羊河的尾间湖, 观测分析了距青土湖水面边缘 0—500 m 范围内的土壤颗粒粒径分布、分形维数及其与土壤颗粒含量的关系。结果表明, 0—20 cm 和 20—40 cm 土层土壤颗粒的分形维数范围分别在 2.370 8~2.879 6 和 2.359 0~2.750 9。在 0~150 m 范围内, 0—20 cm 土层土壤颗粒分形维数与水面间距呈缓慢增加趋势, 在 150 m 处达到最大(2.879 6), 随后逐渐降低; 而 20—40 cm 土层在 0~100 m 范围内呈缓慢增加趋势, 在 100 m 处分形维数达到最大(2.750 9); 土壤颗粒分形维数大小与土壤质地的细粒化有一致的变化趋势, 且与大于 0.05 mm 粒径含量呈极显著负相关关系, 而与黏粒含量、粉粒含量呈极显著正相关关系。小于 0.05 mm 粒径物质含量的增加和 >0.05 mm 粒径物质含量的降低共同导致了土壤颗粒分形维数在水面形成 150 m 范围内的增大, 说明水面形成对土壤粒径的影响范围在 0~150 m。

关键词: 青土湖; 水面形成; 土壤粒径分布; 分形维数

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2013)06-0285-05

中图分类号: S152.3

Characteristics of Soil Particle Fractal Dimension After Formation of Water Area in Tail-streams of Shiyang River

LIU Shu-juan, YUAN Hong-bo, LIU Shi-zen, LIU Hu-jun, LI Fa-ming,
GUO Shu-jiang, WANG Qi, GUO Chun-xiu, LI Jing-jing, WEI Huan-dong
(Gansu Key Laboratory of Desertification Combating, Gansu Minqin National Studies

Station for Desert Steppe Ecosystem, Gansu Desert Control Research Institute, Lanzhou, Gansu 730070, China)

Abstract: Qingtu Lake is the tail-streams of Shiyang River. The soil particle size distribution, the fractal dimension and the relationships between the fractal dimension of soil particle size and fractal dimension within the distance of 0~500 m of the edge of Qingtu Lake's surface were analyzed. The results showed that: the range of fractal dimension of soil particles in 0—20 cm, 20—40 cm soil layer were 2.370 8~2.879 6 and 2.359 0~2.750 9 respectively. Fractal dimension of 0—20 cm soil layer had a slowly increasing trend in the range of 0~150 m and reached the maximum(2.879 6) at 150 m, then it gradually decreased; Fractal dimension of 20—40 cm soil layer was slowly increasing within 100 m and at 100 m reached the maximum(2.750 9); The soil fractal dimension had a significant negative correlation with sand content, and significant positive correlation with proportion content of silt and clay. Both the increase of particle content with diameter < 0.05 mm and decrease of particle content with diameter >0.05 mm caused the increase of fractal dimension of soil particle size after the formation of water area.

Keywords: Qintu Lake; water area formation; soil particle size distribution; fractal dimension

土壤是由形状与大小各异的土壤颗粒组成的多孔介质, 土壤颗粒组成是构成土壤结构体的基本单元。土壤颗粒组成的变化是土地退化过程中最普遍而有代表性的现象, 从土壤颗粒组成的变化和差异特

收稿日期: 2013-05-08

修回日期: 2013-05-13

资助项目: 国家自然科学基金项目“石羊河尾间(青土湖)水面形成的生态效应研究”(31160116), “石羊河流域中下游荒漠河岸植被受损机理研究”(31060080), “人为干预下石羊河下游地下水动态变化及生态效应研究”(1260129), “干旱区内陆河(石羊河)流域水坝建设的生态响应评估”(41061046)

作者简介: 刘淑娟(1979—), 女(汉族), 湖南省衡阳市人, 硕士, 助理研究员, 研究方向为荒漠化防治。E-mail: crisbe1210@163.com。

通信作者: 袁宏波(1978—), 男(汉族), 甘肃省庆阳市人, 硕士, 助理研究员, 研究方向为水土保持与荒漠化防治。E-mail: piceayhb@163.com。

征,可以用来判断土地退化的强弱和发展强度^[1-3]。土壤分形维数能够表征土壤粒径大小组成,且反映质地均一程度^[4]。Tyler^[5]、杨培岭^[4]等用极限法推导出土壤颗粒的重量与粒径分布分形维数的关系式。研究表明^[6]砂粒组成中的细沙越多,其分形维数越大;在干旱区植被恢复过程中,分形维数与土壤质地的细粒化变化一致,且随着恢复时间延长有增大的趋势^[7]。土壤颗粒分形维数 D 能够很好地表征土壤的结构性状,且土壤颗粒分形维数与沙质荒漠化的土壤有机质含量以及指示植物的重要值显著相关,其数值随着沙漠化程度的加剧而降低^[8-10]。因此,研究土壤颗粒组成的变化对了解土壤、植被等环境特征的演变都具有重要意义^[3]。

石羊河尾间——青土湖,位于腾格里沙漠西北缘,是古瀕野泽湖群的一部分^[11]。北魏后期,古瀕野泽分化解体为休屠泽(西海,青土湖前身)和瀕野泽(东海,今白碱湖)两个互不连接的水域。20 世纪初期,青土湖(即现今的“湖区”)水域面积大约 120 km²。随着流域人口的增长和灌溉农业的发展,青土湖水域面积逐渐萎缩。20 世纪 40 年代末,水域面积尚有约 70 km²,20 世纪 50 年代中后期,湖泊开始萎缩,1959 年完全干涸,仅残留有东平湖、野麻湖、叶绿草湖、西硝池和东硝池等盐碱滩地或沼泽性草滩,大部分已被流沙覆盖或垦殖^[11-12]。青土湖作为石羊河的终端,又是民勤绿洲与两大沙漠(腾格里沙漠和巴丹吉林沙漠)之间的一个生态屏障,其重要性显而易见。为尽快遏制流域生态恶化态势,2007 年底国务院审批通过了《石羊河流域重点治理规划》,投资 47 亿元推进石羊河流域的重点治理。根据《石羊河流域重点治理规划》,从 2010 年 9 月开始由政府主导,以渠道输送的形式向青土湖注入生态用水,截至 2012 年 11 月 4 日,在青土湖形成了 15 km² 水面。青土湖注水和形成水面的预期是促进湖区植被恢复,延缓区域生态系统退化,减缓沙漠化的不断推进,推动石羊河流域乃至整个区域环境整治和生态恢复。但是,由于地理空间和气候特异性,青土湖区域处于极度干旱地区,年平均降雨量在 100 mm 以下,生态系统恢复具有其特殊性。因此,水面形成后该区地下水、植被、土壤、气候、风沙活动等生态因子响应如何,水面形成对周边生态系统的影响究竟有多大,其作用过程和机理如何等问题,就成为当前急需研究和探讨的研究课题。为此,本研究以土壤颗粒特征分析为着眼点,通过分形特征分析距水面边缘不同距离的土壤粒径变化及其分形特征,以期合理、定量地评价水面形成对生态环境的影响提供科学依据。

1 研究方法

1.1 研究区概况

研究区地处腾格里沙漠西北缘,甘肃省民勤县城东北 70 km 处,属于石羊河下游干三角洲,海拔高度约为 1 292~1 310 m。该区年平均气温 7.8 °C,大于 10 °C 的有效积温 3 289.1 °C;年降水量 110 mm 左右,且降水多集中于 7—9 月,占全年降水量 73%,蒸发量达 2 600 mm 以上;无霜期 168 d,光照 3 181 h,太阳辐射 630 kJ/cm²;全年盛行西北、西北偏西风,夏秋季东风也比较盛行。主要害风为西北风,风势强烈,年均风速 4.1 m/s;属典型温带大陆性干旱荒漠气候。区域地形地貌以湖相沉积基质上分布 3~10 m 高低不等的流动、半固定、固定沙丘与丘间低地相互交错分布的地貌类型。研究区主要以湖相沉积物的砂土及壤质砂土为主;植被类型为典型的荒漠植被,自然植被整体稀疏、种类较少,白刺、芦苇群落是研究区的主要植被类型,白刺沙堆呈斑块状分布,面积相对较大,芦苇群落主要分布在水面边缘区域或地下水位较浅区域,同时有苏枸杞、盐爪爪为主要伴生灌木;草本植物种类相对较丰富,主要有驼蹄瓣(*Zygophyllum fabago*),戟叶鹅绒藤(*Cynanchum sibiricum*),刺沙蓬(*Salsola ruthenica*),猪毛菜(*Salsola collina*),砂引草(*Messerschmidia sibirica*),沙蓬(*Agriophyllum squarrosum*),碟果虫实(*Corispermum patelliforme*),砂蓝刺头(*Echinops gmelini*)等。

1.2 样地选择和样品采集

根据研究区地貌特征、植被和土地利用状况,以典型性和代表性为原则,选择垂直水面边缘东北方向每隔 50 m 挖取土壤剖面在每个剖面采集土层深度分别为 0—20 cm,20—40 cm 土样各 3 份,将所取土样带回室内风干,过 2 mm 筛,去根,备用。

1.3 样品分析测试

称取土样 0.5 g,加 30%过氧化氢,在 72 °C 下去除有机质,加盐酸去除碳酸盐,加超纯水稀释,静置后,除上清液以除酸,反复静置除酸直至 pH 值为 6.5~7.0,然后加入六偏磷酸钠(NaHMP),超声 30 s 后用英国马尔文 MS2000 激光粒度仪测定土壤粒径的质量百分比。

1.4 粒度分级

本研究土壤粒度分级采用 1978 年《中国土壤》中的土壤质地分类方法。细黏粒(<0.001 mm),粗黏粒(0.001~0.005 mm),细粉粒(0.005~0.01 mm),粗粉粒(0.01~0.05 mm),细砂粒(0.05~0.25 mm)和粗砂粒(0.25~2.0 mm)。

1.5 分形维数

土壤是具有分形特征的系统,运用分形理论建立土壤团粒结构的分形模型^[4,13],计算土壤颗粒的分形维数。土壤颗粒的重量分布与平均粒径间的分形关系式为:

$$D=3-\frac{\lg(m_i/m_0)}{\lg(d_i/d_{\max})}$$

式中: D ——土壤颗粒分形维数; d_i ——两相邻粒级 d_i 与 d_{i+1} 间土粒平均直径(mm); d_{\max} ——最大粒级土粒平均直径(mm); m_i ——直径小于 d_i 的累积质量(g); m_0 ——土壤样品总质量(g)。具体应用时,首先求出土壤样品不同粒径 d_i 的 $\lg(d_i/d_{\max})$ 和 $\lg(m_i/m_0)$ 值,并将二者进行线性拟合,分析求得斜率 K ,则土壤分形维数为 $D=3-K$ 。试验数据运用Excel和SPSS 18.0软件进行统计分析。

2 结果与讨论

2.1 不同水面边缘距离及不同土层深度土壤粒径分布

表1为不同水面边缘距离与不同土层深度粒径范围土壤颗粒质量的关系。由表1可以看出,在

0—20 cm土层0.05~0.25 mm的细砂粒含量最高,距水面边缘不同距离土壤粒径介于57.19%~87.91%,平均值为79.68%;同样在20—40 cm土层的细砂粒含量最高,土壤粒径介于56.98%~89.75%,均值小于0—20 cm土层的粒径含量,为74.53%;再次为粗砂粒(0.25~2.0 mm),在0—20 cm土层介于2.18%~12.79%,均值7.80%,而在20—40 cm土层粗砂粒介于0.54%~29.72%,均值大于0—20 cm土层粒径含量,为9.24%;在青土湖水面边缘周边细砂粒的含量明显大于其他粒径的含量。由于1959年湖泊完全干涸,该区域被流沙覆盖。从表1可以看出,0—20 cm和20—40 cm土层的不同水面边缘距离粒度百分比,距水面边缘0~150 m,粗粉粒(0.01~0.05 mm)、细粉粒(0.005~0.01 mm)和粗黏粒(0.001~0.005 mm)含量明显增加,均在150 m处达到最大。分析可知在距水面边缘150 m内土壤粒径表现为细砂粒含量减少,黏粒、细粉粒和粗粉粒成分增加趋势,土壤向黏质化、紧密化发展,随后因受水面形成影响较小,细砂粒和粗砂粒含量增多,土壤再次向砂质化、疏松化发展。

表1 不同土层深度和距水面边缘不同距离的土壤粒径分布及其分形维数

土壤深度/cm	离水面边缘距离/m	土壤粒径分布/%						分形维数	相关系数
		<0.001 mm	0.001~0.005 mm	0.005~0.01 mm	0.01~0.05 mm	0.05~0.25 mm	0.25~2 mm		
0—20	0	0.24	1.96	0.86	1.85	87.91	7.18	2.464 0	0.965 5
	50	0.77	3.42	2.70	6.95	81.23	4.93	2.649 8	0.914 8
	100	1.05	4.35	2.93	7.82	78.85	5.00	2.691 5	0.968 9
	150	1.94	7.53	5.91	25.25	57.19	2.18	2.879 6	0.964 9
	200	0.55	2.63	1.54	2.81	82.18	10.29	2.528 4	0.990 8
	250	0.67	2.74	1.96	5.88	77.02	11.72	2.535 3	0.945 6
	300	0.88	2.69	2.13	5.61	80.53	8.15	2.421 0	0.912 9
	350	0.40	1.96	1.36	3.24	84.69	8.36	2.498 2	0.901 2
	400	0.40	2.03	1.70	4.99	78.08	12.79	2.461 6	0.900 6
	450	0.15	1.70	0.95	2.39	83.77	11.05	2.370 8	0.979 6
20—40	500	0.41	2.01	1.11	2.29	87.05	7.13	2.517 3	0.945 3
	0	0.96	3.45	1.87	2.89	61.10	29.72	2.504 3	0.934 6
	50	1.11	4.16	2.74	9.58	75.23	7.18	2.655 7	0.967 3
	100	1.48	5.63	4.08	14.91	69.27	4.62	2.750 9	0.986 5
	150	2.34	8.40	6.42	28.30	54.00	0.54	2.673 2	0.945 9
	200	0.25	2.02	1.12	2.09	81.39	13.14	2.414 0	0.973 4
	250	0.30	1.68	1.93	6.08	80.40	9.60	2.453 6	0.970 9
	300	0.53	2.38	1.13	3.32	82.98	9.67	2.359 0	0.908 6
	350	0.43	2.23	1.41	3.20	83.73	8.99	2.5064	0.8999
	400	0.49	2.45	1.81	4.52	82.26	8.47	2.5318	0.9906
450	0.37	2.30	1.35	2.89	85.66	7.43	2.5138	0.9701	
500	0.00	0.92	0.68	2.34	89.75	6.31	2.3975	0.9679	

2.2 不同深度及不同水面距离土壤颗粒分形特征

粒径分布是表征土壤物理性质的重要参数之一,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,分形维数也越高^[14-18]。运用回归分析法,由公式(1)计算出距水面边缘不同距离 0—20 cm 和 20—40 cm 土层土壤颗粒的分形维数,回归分析所得相关系数均在 0.8 以上,线性相关显著(表 1)。将距水面边缘不同距离不同土壤深度的土壤粒径分形维数求平均值,0—20 cm,20—40 cm 土层范围分别在 2.370 8~2.879 6,2.359 0~2.750 9 之间,不同土层分形维数差异不显著($p>0.05$)。从图 1 可以看出,0—20 cm 土层在 0~150 m 土壤粒径分形维数呈缓慢增加趋势,在 150 m 处达到最大 2.879 6,随后逐渐降低;而 20—40 cm 土层在 0~100 m 呈缓慢增加趋势,在 100 m 处达到最大 2.750 9,随后降低。综合分析可知,水面形成对 0—20 cm 土层土壤粒径的影响范围在 0~150 m,而 20—40 cm 土层土壤粒径的影响范围 100 m。水面的形成增加土壤黏粒、细粉粒和粗粉粒质量含量的作用,土壤颗粒分形维数被提高;而超过一定距离水面的影响变小,细砂粒和粗砂粒含量增加,因此,其土壤颗粒分形维数相差不大。

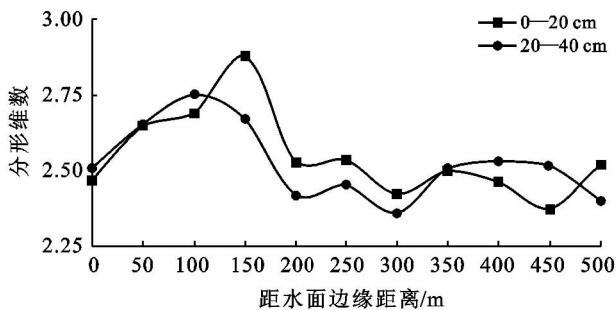


图 1 不同土壤深度砂粒粒径的分形维数

2.3 分形维数与土壤粒径分布的关系

由土壤分形维数的计算可知,分形维数与土壤颗粒含量从小到大的累计含量有关。对 6 个粒径含量和分形维数进行多元线性逐步回归分析。由表 2 可知,分形维数与土壤颗粒大小密切相关,在 0—20 cm 土层,分形维数与 <0.05 mm 粒径含量呈极显著正相关关系,与其它粒径含量呈极显著负相关关系。在 20—40 cm 土层,分形维数与 <0.05 mm 粒径含量呈极显著正相关关系,与 $0.05\sim 0.25$ mm 粒径含量呈极显著负相关关系,这表明土壤颗粒分形维数对各个土壤粒径分布含量的反映程度不同,其中反映程度最大的是细黏粒含量,相关系数分别为 0.939 5, 0.944 2($p<0.01$),其次是粗黏粒、细粉粒、粗粉粒

含量,即在 0—20 cm 土层,土壤颗粒分形维数越大,土壤中细黏粒、粗黏粒、细粉粒、粗粉粒含量越高,细砂粒、粗砂粒含量越低;在 20—40 cm 土层,土壤颗粒分形维数越大,土壤中细黏粒、粗黏粒、细粉粒、粗粉粒含量越高,细砂粒含量越低。

表 2 分形维数 D 与土壤粒级含量的线性关系

土层深度/cm	粒径范围/mm	相关系数	显著水平
0—20	<0.001	0.939 5	0.000
	0.001~0.005	0.912 1	0.000
	0.005~0.01	0.903 9	0.000
	0.01~0.05	0.784 5	0.000
	0.05~0.25	0.631 6	0.002
	0.25~2	0.684 6	0.003
20—40	<0.001	0.944 2	0.000
	0.001~0.005	0.953 9	0.000
	0.005~0.01	0.878 0	0.000
	0.01~0.05	0.893 3	0.000
	0.05~0.25	0.631 9	0.003
	0.25~2	0.242 2	0.124

3 结论

(1) 研究区砂粒粒径分布主要以 >0.05 mm 的砂粒为主,其次为黏粒。距水面边缘 150 m 内表现细砂粒含量减少,黏粒、细粉粒和粗粉粒成分增加趋势。

(2) 粒径分布是表征土壤物理性质的重要参数之一,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,分形维数也越高^[15-18]。距水面边缘距离不同、土层深度不同,土壤的粒径分布有所差异,具有不同的分形特征,其分形维数介于 2.370 8~2.879 6。综合分析可知,水面对 0—20 cm 土层土壤粒径的影响范围在 0~150 m,而 20—40 cm 土层土壤粒径的影响范围为 100 m。水面的形成增加土壤黏粒、细粉粒和粗粉粒质量含量的作用,土壤颗粒分形维数被提高;而超过一定距离水面的影响变小,细砂粒和粗砂粒含量增加,因此,其土壤颗粒分形维数相差不大。

(3) 无论是 0—20 cm 还是 20—40 cm 土层,分形维数与砂粒含量呈极显著的负相关关系,而与黏粒、粉粒含量(<0.05 mm)呈极显著的正相关关系。表明土壤颗粒分形维数是反映土壤质地的一个较好指标,土壤颗粒分形维数主要反映了土壤黏粒、粉粒的含量,这与许多研究结果一致。土壤颗粒分形维数大小与土壤质地的细粒化有一致的变化趋势,许多研究表明土壤质地越细,土壤颗粒大小的分形维数越高^[19]即土壤颗粒直径越小,细粒物质(黏粒、粉粒)含

量越高,对空间的填充能力越强,土壤分形维数就越大。 $>0.05\text{ mm}$ 粒径是决定作为土壤各粒径含量的综合指标土壤分形维数的临界粒径, $<0.05\text{ mm}$ 粒径物质含量的增加和 $>0.05\text{ mm}$ 粒径物质含量的降低共同导致了土壤颗粒分形维数增大。青土湖区域土壤分形维数与细粒物质含量呈正相关关系,与其它粒径含量呈负相关的重要原因。也可以说,在青土湖区域,水面的形成能通过改变土壤中细粒物质含量而改变土壤分形维数的大小,也是其改善土壤物理结构、发挥水土保持功能的分形学机制。在强劲的风力吹蚀下,水面的形成不仅降低砂粒的风蚀,而且水面可阻截更多过境的细粒物质($<0.05\text{ mm}$)并使其在水面及水面周边聚集,导致细粒物质成分增加, $>0.05\text{ mm}$ 的砂粒含量降低,分形维数相应升高。而超过一定距离,水面的截存作用减小,分形维数相应降低。在极度干旱地区,应急输水后青土湖水面形成使得部分植被植被恢复,土壤粉粒、黏粒含量的增加和沙粒含量降低共同导致土壤质地细粒化,也使得在影响区域范围内土壤颗粒分形维数增大。

(4) 众多研究表明,土壤颗粒分形维数能较好地反映土壤物理性状,土壤颗粒分形维数和土壤总孔隙度呈较明显正相关关系^[10,15],且不同土壤粒径含量的组合构成不同的土壤质地类型,进而在一定程度上影响土壤性状和土壤有机质的转化^[18]。青土湖水面形成是否也影响了土壤养分状况和物理性状,将做进一步研究。

[参 考 文 献]

- [1] 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.
- [2] 胡亚林,曾德慧,范志平,等. 半干旱区沙质退化草地造林对土壤质量的影响[J]. 应用生态学报,2007,18(11):2391-2397.
- [3] 周斌,徐海量,熊黑钢. 河水漫溢对塔里木河下游土壤颗粒组成的影响[J]. 水土保持学报,2010,24(4):177-181.
- [4] 杨培岭. 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.
- [5] Tyler S W, Wheatcraft S W. Fractal scaling of soil particle-size distribution analysis and limitations [J]. Soil Sci. Soc. Am. J., 1992, 56(9):362-369.
- [6] 武生智,魏春玲. 沙粒粗糙度和粒径分布的分形特性[J]. 兰州大学学报:自然科学版,1999, 35(1): 53-56.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 吴尧,姚健,吴永波,等. 岷江上游典型植被下土壤分形特征及对水分入渗的影响[J]. 水土保持通报,2012,32(2):12-16.
- [11] 赵强,王乃昂,程弘毅,等. 青土湖沉积物粒度特征及其古环境意义[J]. 干旱区地理,2003,26(1):1-5.
- [12] 王乃昂,李吉均,曹继秀,等. 青土湖近 6000 年来沉积气候记录研究:兼论四五世纪气候回暖[J]. 地理科学,1999,19(2):119-124.
- [13] Rieu M, Sposito G. Fractal fragmentation, soil porosity and soil water properties: Application [J]. Soil Sci. Am. J., 1991,55(3):1231-1238.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 文海燕,傅华,赵哈林. 退化沙质草地开垦和围封过程中的土壤颗粒分形特征[J]. 应用生态学报,2006,17(1):55-59.
- [18] 谢贤健,韦方强. 泥石流频发区不同盖度草地土壤颗粒的分形特征[J]. 水土保持学报,2011,25(4):202-206.
- [19] 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.