

藏北高寒草原土壤粒径分布分形维数特征

曹樱子^{1,2}, 王小丹^{1*}

(中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所, 四川 成都 610041; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要: 基于样带采样方法, 应用土壤颗粒的体积分布计算了藏北高寒草原 44 个土壤样品的粒径分布分形。结果显示, 研究区的土壤质地主要是砂土、壤质砂土和砂质壤土, 其所占比例分别为 29.55%、38.64% 和 27.27%。分形维数介于 1.979 ~ 2.743, 均值为 2.492。随着土壤质地向壤土、粉壤土、砂质壤土、壤质砂土、砂土的变化, 分形维数逐渐减小; 研究区土壤中砂粒、粉粒和粘粒的平均含量为 77.65%, 18.2% 和 4.15%, 粉粒和粘粒变异程度高。土壤粒径分形维数与土壤颗粒含量之间的关系显著, 其与砂粒含量呈负相关, 而与粉粒和粘粒含量呈正相关。研究表明: 土壤粒径分布分形维数可以作为判断藏北高寒草原土壤质地差异的重要指标。

关键词: 土壤粒径分布; 分形维数; 高寒草原; 藏北

中图分类号: S157

文献标志码: A

土壤是一种由固、液和气三相构成的复杂系统, 其中固体部分是由形态和大小各异的土壤颗粒构成的多孔介质。传统的土壤质地和结构, 是以土壤机械组成分析为基础并结合一定的分类标准而确定的。Mandelort^[1] 为了研究自然界中具有自相似性的自然碎片或是不规则结构提出了分形几何学。自 1980 年代以来, Tyler 等^[2] 和杨培岭^[3] 等学者逐步将分形理论应用到土壤科学中, 为土壤形态与性质的定量化描述提供了可靠的方法。有研究表明, 分形维数能反应土壤质地、粒径含量大小和肥力等, 并成为可以模拟和预测土壤水分特征的一项综合性定量指标^[4-7]。

藏北地区海拔高, 气候寒冷干旱, 是青藏高原内生态环境最严酷的自然地域, 大部分为无人区。高寒草原是该区域最主要的生态系统类型, 土壤中富含砾石, 抗侵蚀能力弱, 生态环境十分脆弱。由于藏北高原环境条件的特殊性和复杂性, 国内对其土壤

温度、辐射研究较多, 而理化性质研究较少。本文分析了藏北高寒草原的土壤质地、粒径含量等物理特征, 并对其土壤粒径分布分形维数进行分析, 以期高寒草原土壤其他理化研究提供参数, 并为高寒草原生态环境建设提供基础数据。

1 研究区域与研究方法

1.1 研究区域概况

本研究垂直样带(冈底斯山-申扎-双湖样带)位于藏北那曲地区, 长约 300 km (30°25' ~ 33°9' N, 88°41' ~ 89°27' E)。该地区平均海拔 > 4 500 m, 气候的突出特点是寒冷干燥, 年平均气温在 -2.8 ~ 1.6 °C, 年平均降水量在 247.3 ~ 513.6 mm, 受大气环流和地形的影响, 降水总体表现为由东向西, 由南向北递减。此外, 冬春季受高空西风气流的影响, 地面温度低, 气候干燥晴朗, 多 7 级以上

收稿日期(Received date): 2013 - 02 - 27; 改回日期(Accepted): 2014 - 05 - 06。

基金项目(Foundation item): 中国科学院战略性先导科技专项(XDB03030505)和中科院成都山地所“一三五”项目(sds - 135 - 1203 - 02)资助。

[Supported by “Strategic Priority Research Program” of Chinese Academy of Sciences (XDB03030505) and the 135 Strategic Program of Institute of Mountain Hazards and Environment(sds - 135 - 1203 - 02).]

作者简介(Biography): 曹樱子(1988 -), 女, 湖南岳阳人, 硕士研究生, 主要从事高寒土壤生态方面的研究。[Cao Yingzi (1988 -), female, Hunan Yueyang person, master student, mainly engaged in research on alpine soil ecology.]

* 通信作者(Author for correspondence): 王小丹(1973 -), 男, 四川西充人, 博士生导师, 研究员, 主要从事高山环境与高寒生态研究。[Wang Xiaodan (1973 -), male, Sichuan Xichong person, Ph D supervisor, Professor, mainly engaged in research on alpine environment and ecology.]

的大风,有时风力可达10~12级^[8]。由于大风多发生在冬、春干旱季节,此时降水稀少,气候干旱,地表缺乏植被覆盖,受风蚀影响十分严重。在藏北地区,高寒草原是面积最大的生态系统^[9],优势种植物为紫花针茅(*Stipa purpurea*)和青藏苔草(*Carex moorcroftii*),同时伴生有火绒草(*Leontopodium leontopodioides*)、棘豆(*Oxytropis alpina*)、早熟禾(*Artemisia spp.*)等。

1.2 研究方法

从冈底斯山脉往北,按纬度梯度每5 km进行土壤样品的采集。由于采样带横穿色林错,湖中间的点平移至湖边,并按每10 km进行采样,一共采集样品44个。样品采集选用50 cm×50 cm的样方框进行随机采集,采样深度为0~15 cm。

土壤有机质含量,全氮和全磷分别采用重铬酸钾氧化-外加热法^[10]、半微量开氏法^[11]和氢氧化钠碱溶-钼锑抗比色法测定^[12]。土壤粒径组成用Mastersizer 2000激光粒度分析仪测定。

土壤粒径分形维数采用下式计算^[2]

$$\frac{V(r < R_i)}{V_T} = \left(\frac{R_i}{\lambda_V}\right)^{3-D}$$

式中 D 为土壤粒径分形维数; $V(r < R_i)$ 是直径小于 R_i 的累积体积; V_T 是总体积; R_i 为相邻粒级平均直径; λ_V 是最大粒级土粒平均直径;其中粒级 $< 2 \mu\text{m}$ 时 R_i 取值为 $1 \mu\text{m}$ 。

采用 Excel 2003 进行数据整理,运用 SPSS 13.0 对数据进行统计分析,图形绘制采用 Origin8.0。

2 结果与分析

2.1 土壤质地类型与土壤分形维数的关系

根据 Tyler 等^[2] 分析维数计算公式,计算得到44个土壤样品的分形维数 D (表1),统计所有土壤样本的分形维数值,结果显示藏北高寒草原土壤粒径分布分形维数分布在1.979~2.743,均值为2.492,标准差为0.135。土壤质地将影响土壤水分和有机质的迁移、分配和利用率。按照美国土壤质地分类三角表,对采至冈底斯山-申扎-双湖样带的44个藏北高寒草原土进行划分,结果表明该区域土壤可以分为五类,分别是砂土、壤质砂土、砂质壤土、壤土和粉壤土(图1,表1),其中砂土、壤质砂土和砂质壤土三种质地类型的土壤所占比例较大(表2),分别是29.55%、38.64%和27.27%,土壤质地

偏粗。这三种质地土壤均具有砂质特征,沙粒占优势,毛管孔隙少,大孔隙居多,因此土壤的整体通气和透水性较强,而保水和蓄水性能较弱。用单因素方差分析法分析砂土、壤质砂土、砂质壤土三种质地土壤分形维数 D 值,结果显示,这三种质地土壤分形维数 D 之间都存在显著性差异。对砂土、壤质砂土和砂质壤土与壤土和粉壤土分形维数 D 的比较采用单一样本 T 检验,结果显示,砂土、壤质砂土和砂质壤土与壤土通过比较 t 值分别为-11.935、-19.541和-7.935,自由度分别为12、16和11,显著值均 < 0.05 ,因此前三种质地土壤与壤土的分形维数 D 值均存在显著性差异。砂土、壤质砂土和砂质壤土与粉壤土通过比较 t 值分别为-10.619、-15.918和-5.589,自由度分别为12、16和11,显著值均为 < 0.05 ,因此前三种质地土壤与粉壤土的分形维数 D 值也存在显著性差异。不同质地的土壤分形维数平均值大小关系为:壤土 $>$ 粉壤土 $>$ 砂质壤土 $>$ 壤质砂土 $>$ 砂土。

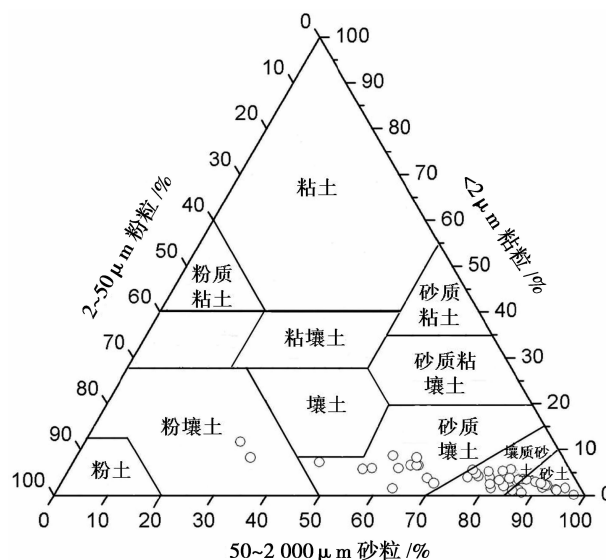


图1 采样点土壤质地

Fig. 1 Texture of analyzed soil samples

2.2 土壤粒径分布分形维数与土壤颗粒含量之间的关系

根据 FAO/USDA 分类系统,将土壤颗粒有效球面直径 $> 50 \mu\text{m}$ 、 $50 \sim 2 \mu\text{m}$ 和 $< 2 \mu\text{m}$ 的分别划分为砂粒、粉粒和粘粒。由表3可知,砂粒、粉粒和粘粒的平均含量为77.65%、18.2%和4.15%,这表明砂粒是本研究区域内土壤的主要组成部分。这主要是由于该区域为大风多发区,而大风引起的风蚀对

表 1 土壤样本的粒径分布及分形维数
Table 1 The particle size distribution and Fractal Dimension

样地 号	土壤 质地	粒径组成/%							形维数
		2 ~ 1 mm	1 ~ 0.5 mm	0.5 ~ 0.25 mm	0.05 ~ 0.25 mm	0.02 ~ 0.05 mm	0.002 ~ 0.02 mm	< 0.002 mm	
1	C	3.213	12.783	17.817	36.344	15.591	12.579	1.673	2.444
2	A	2.689	21.446	36.610	27.333	3.671	7.137	1.114	2.364
3	A	6.999	22.289	25.873	31.807	4.843	7.136	1.053	2.363
4	C	1.905	10.271	18.090	42.805	8.492	14.388	4.049	2.548
5	A	11.472	24.904	23.860	28.216	5.110	5.828	0.610	2.297
6	C	2.838	14.900	18.212	28.102	8.071	21.262	6.615	2.633
7	A	1.032	20.279	37.467	39.044	0.283	1.803	0.092	1.979
8	B	0.000	2.178	23.718	56.858	6.056	9.567	1.623	2.408
9	B	7.796	17.973	18.955	34.679	5.235	11.068	4.294	2.553
10	B	0.112	1.110	18.211	61.807	4.940	9.811	4.009	2.517
11	C	0.000	0.000	7.073	47.892	13.341	23.181	8.513	2.657
12	A	0.000	0.000	5.765	87.898	0.857	4.174	1.306	2.323
13	C	1.317	1.910	6.388	63.371	7.548	16.731	2.735	2.5
14	B	0.000	0.273	22.143	63.157	3.486	7.830	3.111	2.473
15	C	0.000	2.018	8.612	50.308	11.485	21.234	6.343	2.616
16	A	0.665	8.033	24.658	57.383	2.947	4.593	1.721	2.377
17	C	0.000	0.000	8.455	57.092	9.299	18.890	6.264	2.607
18	B	0.000	0.917	17.442	62.644	7.245	9.256	2.496	2.457
19	B	0.000	2.567	15.763	65.040	8.827	5.753	2.050	2.413
20	A	1.161	6.087	21.497	61.561	1.641	5.648	2.405	2.425
21	B	0.068	4.797	17.570	53.853	7.527	12.215	3.970	2.531
22	B	0.000	1.215	15.334	66.218	1.868	9.697	5.668	2.558
23	B	3.285	4.571	13.135	64.845	2.500	8.129	3.535	2.494
24	A	0.559	8.489	29.771	49.617	2.815	5.803	2.946	2.458
25	B	0.000	2.119	20.956	63.375	3.060	7.110	3.380	2.479
26	A	0.018	5.041	26.386	59.543	2.191	4.693	2.128	2.401
27	A	0.030	0.156	8.509	86.259	0.464	2.988	1.594	2.331
28	B	0.032	1.127	4.230	77.442	5.723	7.781	3.665	2.494
29	B	0.197	4.259	9.310	67.270	6.194	9.530	3.240	2.491
30	C	0.006	1.573	6.138	58.454	11.123	16.148	6.558	2.607
31	D	0.000	0.000	0.652	35.540	14.667	34.697	14.444	2.743
32	B	2.376	4.794	8.873	61.984	6.156	10.688	5.129	2.557
33	E	0.000	0.486	3.911	34.831	13.251	37.714	9.807	2.699
34	B	0.000	1.225	13.912	60.561	7.217	12.365	4.720	2.551
35	C	0.000	0.944	9.052	54.121	10.571	18.751	6.561	2.613
36	C	0.000	1.363	7.570	56.013	11.382	17.205	6.467	2.608
37	B	0.000	1.009	13.636	59.843	7.424	12.652	5.436	2.57
38	C	0.000	0.055	5.595	58.259	9.305	18.637	8.149	2.639
39	A	0.354	0.709	14.452	74.331	2.643	5.289	2.222	2.409
40	A	0.000	0.000	14.070	74.646	2.352	6.352	2.580	2.435
41	B	0.000	0.024	19.449	64.093	2.519	10.583	3.332	2.494
42	A	0.218	3.695	21.714	66.994	2.107	4.188	1.084	2.309
43	C	0.192	4.536	13.725	40.634	10.339	21.999	8.575	2.658
44	B	0.000	0.153	19.336	59.984	3.381	12.011	5.135	2.557

注:A 为砂土,B 为壤质砂土,C 为砂质壤土,D 为壤土,E 为粉壤土。

土壤颗粒进行筛选,将细颗粒物质带走而留下相对较粗颗粒,形成粗质地土壤^[13]。变异系数可以用来确定空间变异的强度,当 $CV < 10\%$ 时变异强度为弱;当 $10\% < CV < 100\%$ 时,变异强度为中等;当 $CV > 100\%$ 时变异程度较强^[14]。在本研究中,砂粒、粘粒和粉粒的变异强度都为中等,而粘粒和粉粒的变异系数大于砂粒,这表明在此样带上粘粒和粉粒的变异性明显高于砂粒。这主要是因为大风对粘粒和粉粒的搬运分配作用大于砂粒,使粘粒和粉粒的空间分布的异质性高。

表2 不同质地土壤分形维数统计结果

Table 2 The statistic of different soil texture Fractal Dimension

土壤质地	样本数	最小值	最大值	平均值	标准差
砂土	13	1.979	2.458	2.344	0.121
壤质砂土	17	2.408	2.570	2.506	0.050
砂质壤土	12	2.444	2.658	2.594	0.064
粉壤土	1	2.699	2.699	2.699	
壤土	1	2.743	2.743	2.743	

表3 砂粒、粉粒和粘粒的统计结果

Table 3 Statistical features for sand, silt and clay of soil along the Gandise Mountain – Shenzha – Shuanghu Transect

类别	最小值	最大值	平均值	标准差	变异系数
砂粒	36.12	97.82	77.65	13.84	0.18
粉粒	2.09	50.96	18.20	11.30	0.62
粘粒	0.09	14.44	4.15	2.85	0.69

分形维数与土壤各粒级土壤含量的回归关系见图2和图3。可以看出,分形维数与不同粒级土粒含量的相关性有所不同。分形维数与粘粒和粉粒含量呈明显的正相关(图2A、图2B)。分形维数与粉粒、粘粒含量回归方程的 R^2 分别为 0.834 3 ($P < 0.001$) 和 0.980 7 ($P < 0.001$)。说明分形维数与粉粒、粘粒含量的相关性都达到了极显著水平。分形维数与砂粒含量呈明显负相关(图3),回归方程的 R^2 和 P 值分布为 0.877 4 和 0.000,同样达到极显著水平。这表明粘粒和粉粒含量越高,土壤粒径分布的分形维数越高;土壤砂粒含量越高,其分形维数越低。同时,由于细颗粒物质的损失导致土壤的退化,且土壤分形维数与土壤细颗粒物质存在显著的相关性,因此可以用 D 值作为土壤退化的一个标志^[15]。土壤分形维数与粉粒、粘粒和砂粒含量的关

系均为曲线,而以往研究^[16-17]也表明土壤分形维数与土壤颗粒含量之间为曲线关系,曲线模型能更好描述分形维数与土壤颗粒含量之间的关系。

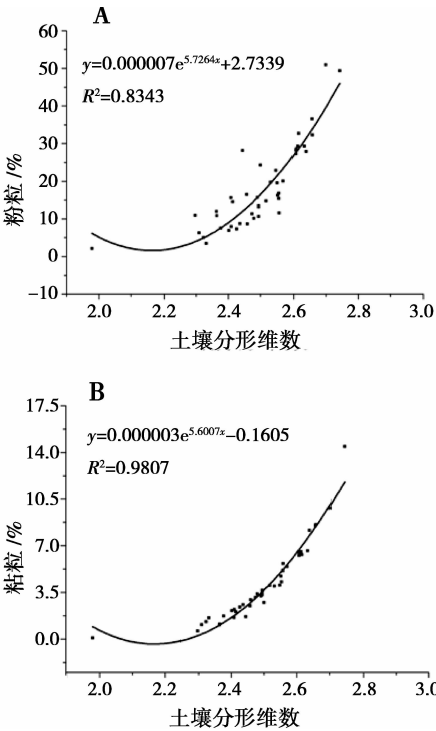


图2 土壤分形维数和粉粒(A)、粘粒含量(B)的关系
Fig. 2 The relationship of silt (A), clay (B) content and fractal dimension

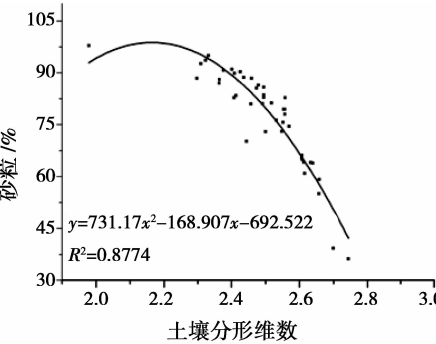


图3 土壤分形维数和砂粒含量的关系
Fig. 3 The relationship of sand content and fractal dimension

2.3 土壤肥力与土壤分形维数的关系

土壤肥力是表征土壤生产力的重要指标,土壤通过提供植物生长所必须的氮素和磷素来维持植物的生长。通过相关系分析表明,土壤全氮和全磷含量与分形维数存在显著正相关($P < 0.05$)。这表明随着分形维数的增大,土壤颗粒变细,土壤中氮和磷

元素含量增加,保肥能力增强。反之,随着分形维数变小,土壤变粗,土壤中氮磷元素含量减少。这主要是由于土壤细颗粒物质的化学组成中含有较多的植物营养元素,其中一部分能缓慢释放成为植物可以利用的形态^[18],因此土壤分形维数与土壤细颗粒物呈正相关。许多研究都表明,土壤有机碳与土壤分形维数之间存在正相关性^[15,18],而本研究中未发现此相关性,可能是由于藏北高寒草原土壤侵蚀严重,有机碳含量较低,因此其与土壤分形维数相关性不显著。

3 结 论

本研究计算分析 44 个藏北高寒草原土壤样品的土壤类型及其粒径分布分形维数。结果表明,研究区土壤质地主要为砂土、壤质砂土、砂质壤土、粉壤土和壤土,其中砂土、壤质砂土和砂质壤土所占比例较大。土壤分形维数分布在 1.979 ~ 2.743,均值为 2.492,标准差为 0.135。随着土壤质地由砂土,壤质砂土,砂质壤土,粉壤土,壤土的变化,土壤分形维数逐渐增大。因此,土壤分形维数可以作为反映土壤质地的一个指标。

藏北高寒草原土壤中砂粒是本研究区域内土壤的主要组成部分,其平均含量为 77.65%。砂粒、粘粒和粉粒的变异强度都为中等,由于大风对细颗粒物质的搬运作用,使粘粒和粉粒的变异性明显高于砂粒。土壤分形维数与土壤粉粒和粘粒含量呈显著正相关,而与砂粒含量呈显著负相关。当土壤退化时,其细颗粒物质含量减少,分形维数随粉粒和粘粒的含量的减少而减小,土壤分形维数与土壤全氮和全磷含量存在显著正相关性。因此,土壤分形维数可以在一定程度上反应土壤退化状况。

参考文献 (References)

- [1] Mandelbrot B B. The fractal geometry of nature[M]. San Francisco: Freeman, 1982.
- [2] Tyler S W, Wheatcraft S W. Fractal scaling of soil particle-size distribution; analysis and limitation[J]. Soil Science of American Journal, 1992, 56:360-369
- [3] Yang Peiling, Luo Yuanpei, Shi Yuanchun. Field experimental study of contaminant transport in sewage irrigation and treatment system [J]. Chinese Science Bulletin, 1993, 38(20): 1896-1899 [杨培岭, 罗远培, 石元春. 用粒径的重量分布特征的土壤分形特征 [J]. 科学通报, 1993, 38(20): 1896-1899]
- [4] Liu Meiling, Ye Yong, Cao Qing, et al. Fractal characteristics and related affecting factors of particle size distribution in mangrove soils in Dongzhai Harbor of Hainan [J]. Chinese Journal of Ecology, 2008, 27(9): 1557-1561 [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]. 生态学报, 2008, 27(9): 1557-1561]
- [5] Huang Guanhua, Zhan Weihua. Fractal property of soil particle size distribution and its application [J]. Acta Pedologica Sinica, 2002, 39(4): 490-497 [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]
- [6] Su Yongzhong, Zhao Halin. Fractal features of soil particle size distribution in the desertification process of the farmland in Horqin Sandy Land [J]. Acta Ecologica Sinica, 2004, 24(1): 71-74 [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]
- [7] Wu Chengzhen, Hong Wei. Study on fractal features of soil aggregate structure under different management patterns [J]. Acta Pedologica Sinica, 1999, 36(2): 162-167 [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]
- [8] Liu Xuesong, Ma Yucai, La Ba, et al. Climatic regionalization of the animal husbandry of Nagqu region [M]. Beijing: China Meteorological Press, 2003. [刘雪松, 马玉才, 拉巴, 等. 那曲地区牧业气候区划 [M]. 北京: 气象出版社, 2003.]
- [9] Gao Qingzhu, Li Yu'e, Lin Erda, et al. Temporal and spatial distribution of grassland degradation in Northern Tibet [J]. Acta Geographica Sinica, 2005, 60(6): 965-973 [高青竹, 李玉娥, 林而达, 等. 藏北地区草地退化的时空分布特征 [J]. 地理学报, 2005, 60(6): 965-973]
- [10] Nelson, D, L Sommers. A rapid and accurate method for estimating organic carbon in soil [J]. Proceedings of the Indiana Academy of Science, 1975, 84: 456-462
- [11] Page A C, Miller R H, Keeney D R. Methods of soil analysis: part 2. Chemical and Microbiological properties [M]. Madison, WI: American Society of Agronomy, 1982.
- [12] Institute of Soil Academia Sinica. Analysis of soil physics and chemistry [M]. Shanghai: Science and Technology of Publications, 1978. [中科院南京土壤研究所. 土壤理化性质分析 [M]. 上海: 科学技术出版社, 1978.]
- [13] Lobe I, W Amelung, C Du Preez. Losses of carbon and nitrogen with prolonged arable cropping from sandy soils of the South African Highveld [J]. European Journal of Soil Science 2001, 52: 93-101
- [14] Nielsen D, J Bouma. Soil Spatial Variability. Proceedings of a Workshop of the ISSS and the SSSA [M]. Las Vegas, Pudoc, Wageningen, Netherlands, 1985.
- [15] Su Y Z, H L Zhao, W Z Zhao, et al. Fractal features of soil particle size distribution and the implication for indicating desertification [J]. Geoderma, 2004, 122: 43-49
- [16] Zhao P, M Shao, J Zhuang. Fractal features of particle size redistributions of deposited soils on the dam farmlands [J]. Soil Science, 2009, 174: 403
- [17] Wang Y Q, M A Shao, L Gao. Spatial variability of soil particle

- size distribution and fractal features in water-wind erosion crisscross region on the Loess Plateau of China[J]. *Soil Science*, 2010, 175: 579–585
- [18] Lü Yizhong, Li Baoguo. *Pedology* [M]. Beijing: Science Press, 2006. [吕贻忠, 李保国. 土壤学 [M]. 北京: 科学出版社, 2006.]
- [19] Jia Xiaohong, Li Xinrong, Li Yuanshou. Fractal dimension of soil particle size distribution during the process of vegetation restoration in aridsanddune area[J]. 2007, 26(3): 518–525 [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]

Fractal Dimension of Soil Particle-size Distribution Characteristic in the Alpine Steppe of the Northern Tibet

CAOYingzi^{1,2}, WANG Xiaodan¹

(1. *Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610014, China;*

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: In present study, we investigated soil texture and soil fractal dimension with the soil particle size distribution at 44 sites along a 300 km transect across the alpine grassland of northern Tibet, China. The aim of this research is to explore the special characteristic of soil fractal dimension in the northern Tibet. The results showed that the main soil textures in the study area were sand, loamy sand and sandy loam. The fractal dimension ranged from 1.979 to 2.743, and the mean value was 2.492. The fractal dimension was significantly different among soil textures. The fractal dimension value decreased with the coarser soil texture. Sand, silt and clay content of the soil was 77.65%, 18.2% and 4.15%, respectively. For the soil of alpine steppe in the northern Tibet, the fractal dimension of soil PSD was decreased significantly with sand content, but increased with silt and clay content. The result indicated that the fractal dimension of soil particle-size distribution could be used as an important index of soil texture in the northern Tibet.

Key words: particle-size distribution; fractal dimension; alpine steppe; northern Tibet