

王朗自然保护区表层土壤颗粒粒径分布的分形特征*

黎俊¹, 唐春蓉¹, 沈俊剑¹, 鄢红玉², 雷泞菲^{1*}, 庄贺¹

(1. 成都理工大学材料与化学化工学院, 成都 610059; 2. 阿坝藏族羌族自治州林业局, 四川 马尔康 624000)

摘要:以王朗自然保护区7种土壤为对象,运用分形模型研究了该区表层土壤颗粒粒径分布的分形维数,分析了分形维数与土壤理化性质如有机质含量、全氮、全磷、pH及容重的关系。结果表明,王朗自然保护区表层土壤颗粒的分形维数 D_p 为2.679 6~2.741 4;各土壤颗粒粒径与累积重量的对数相关系数 $R^2 > 0.85 (p < 0.05)$;通过逐步多元回归分析,土壤颗粒的分形维数仅与粒径为0.001~0.005 mm和小于0.001 mm土壤颗粒含量呈显著正相关($p < 0.05$);此外,土壤颗粒的分形维数与土壤有机质、全氮、全磷和容重的关系不显著,然而土壤有机质含量与土壤全氮含量呈显著正相关($p < 0.05$)。通过对王朗自然保护区表层土壤颗粒粒径分布的分形维数的探究发现,该区土壤颗粒的分形维数偏低,土壤结构相对松散,易发生水土流失,需要加强该区生态建设。

关键词:分形维数;土壤颗粒粒径;相关性;王朗自然保护区

中图分类号:Q948.113

文献标志码:A

文章编号:1672-6693(2013)03-0047-05

Mandelbrot提出的分形模型被广泛用于研究自然界中复杂而不具规则性的几何体^[1],它具有自相似性和标度不变性的性质^[2]。分形理论在土壤研究中的应用主要涉及土壤物理性质(如容积密度、空隙尺寸分布、空隙表面积、颗粒粒径分布、颗粒形状及其土壤微地貌等)、土壤物理变化过程(如土壤的吸附作用、扩散作用及土壤中水和溶质的转移等)、空间异质性的定量化研究^[3]以及利用分形维数来表征土壤的结构、溶质转移、持水量及土壤浸蚀度等方面^[4-6]。此外,分形理论用于土壤科学研究中主要有土壤颗粒的质量分形、体积分形、表面积分形及土壤孔隙分形等方面的研究^[7]。土壤颗粒粒径分布(Particle size distribution, PSD)是表征土壤质地和结构特征的重要因素,PSD的分形维数可以利用土壤机械组成的数据进行计算^[8]。分形维数不仅受土壤颗粒粒径大小分布的影响^[9],同时还受土壤浸蚀和水土流失等因素的影响^[10-11]。Arya等人^[12]和Turcotte等^[13]均提出的对PSD的分形维数的计算方法是基于土壤颗粒和数量来计算分形维数,但是通过实验得到的数据往往是土壤颗粒的质量分布数据,从而给研究带来不便。杨培岭等人^[14]在Katz研究的基础上,把土壤粒径分布与对应的质量分布联系起来,提出直接利用质量分布代替粒径分布来计算土壤颗粒的分形维数的新思路,即粒径分形可以

通过质量分形来表征。

土壤作为一种复杂的几何体,主要由砂、淤泥、粘土及有机物组成。此外,土壤中的氮和磷是土壤肥力与质量的重要指标,与土壤生产力关系密切^[15-17],分形几何学在土壤中的应用说明土壤是一种具有分形特征的物质,同时也是一种具不规则性和自相似性的多孔介质^[4-5,18],这完全符合分形理论的研究条件。PSD的分形维数是反映土壤的结构和性质的一个重要参数,所以可以通过分析它来定量地了解土壤的分形特征。

本研究对王朗自然保护区7种土壤类型的表层土壤的PSD的分形维数进行了计算并将之与土壤的有机质、全氮、全磷等理化性质的相关性进行了分析,旨在利用分形维数来表征王朗自然保护区表层土壤的特性,也对该区生态建设具有一定的实际指导意义。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究地区概况

四川王朗国家级自然保护区建于1965年,是全国建立最早的4个以保护大熊猫等珍稀野生动物及其栖息地为主的自然保护区之一。该区位于四川省绵阳市平武县(32°49'~33°02'N,103°55'~104°10'E)境内,总面积322.97 km²,占全县土地面积的5.4%,夏季平均气温12.7℃。区内山高坡陡,土壤垂直分布规律明

* 收稿日期:2012-10-31 修回日期:2012-12-05 网络出版时间:2013-05-20 18:04

资助项目:四川省“十二五”农作物及畜禽攻关项目(No. 2011NZ0098-12-7)

作者简介:黎俊,男,硕士研究生,研究方向为环境生态学,E-mail:grerysky@yahoo.cn;通讯作者:雷泞菲,E-mail:470226504@qq.com

网络出版地址: http://www.cnki.net/kcms/detail/50.1165.N.20130520.1804.201303.47_008.html

显。从低海拔向高海拔过渡依次有山地棕壤(MBS,海拔 2 300~3 500 m)、山地暗棕壤(MDBS,海拔 2 600~3 500 m)、亚高山草甸土(SMS,阳坡海拔 2 300~3 500 m)、高山草甸土(AMS,海拔大于 3 500 m)、高山流石滩荒漠(ALSD,海拔大于 4 000 m)。

1.2 研究方法

本研究涉及的 7 种土壤类型分别是山地棕壤、山地潮棕壤、山地暗棕壤、山地潜育暗棕壤、山地白浆化暗棕壤、山地草甸暗棕壤和亚高山草甸土。在收集有关王朗自然保护区表层土壤机械组成的数据^[19]基础上(表 1),参照 Tyler^[20]等人的方法进行表层土壤的 PSD 的分形维数(D_p)的计算,即粒径 r 小于某一特定测量尺度 R 的累积土粒重量 $W(r < R)$ 与 R 之间的关系式如下

$$\left(\frac{R}{R_{\max}}\right)^{3-D_p} = \frac{W}{W_T}$$

式中, R_{\max} 为最大颗粒的平均粒径大小, W_T 为各粒级重量的总和。在本研究中,土壤的机械组成用质量百分含量表示,此时, $W_T=100$ 。两边取对数得

$$\lg\left(\frac{W}{W_T}\right) = (3-D_p)\lg\left(\frac{R}{R_{\max}}\right)$$

然后以 $\lg\left(\frac{W}{W_T}\right)$ 对 $\lg\left(\frac{R}{R_{\max}}\right)$ 进行线性回归,直线的斜率为 $3-D_p$,从而可以求出 D_p 。

2 结果与分析

2.1 王朗自然保护区表层土壤颗粒的分形特征

根据表层土壤理化性质的测定结果计算粒径分布的 D_p ,结果发现,王朗自然保护区的土壤颗粒的 D_p 值

为 2.679 6~2.741 4,土壤颗粒粒径与颗粒累积含量的相关系数 $R > 0.85$,相关性显著($p < 0.05$),说明该地区土壤颗粒粒径分布具有分形的特征(表 1)。

2.2 D_p 与各粒级含量的相关性

粒径分布是影响土壤质地和结构的重要因素,同时还对土壤肥力有决定作用,也是进行土壤分类的重要标准。图 1 是王朗自然保护区表层土壤颗粒的 D_p 值与各粒级含量相关性的散点图。从图 1 可知, D_p 值与粒径在 0.001~0.005 mm 和小于 0.001 mm 的土壤颗粒含量呈显著正相关,相关系数分别是 $R = 0.985 7, 0.976 2$ ($p < 0.05$)。然而,分形维数 D_p 值与粒径在 0.1~1 mm, 0.01~0.05 mm 和 0.005~0.01 mm 的土壤颗粒含量的关系未达显著水平,因此它们与 D_p 的关系不密切。

2.3 D_p 与土壤有机质、全氮、全磷、pH 值和容重的相关性

从图 2 可知,分形维数 D_p 与土壤有机质、全氮、全磷、pH 值和容重的线性关系不显著,它们与土壤颗粒的关系不密切。

2.4 土壤有机质含量、全氮、全磷、pH 值和容重之间的相关性

将土壤有机质含量(OM)、全氮(TN)、全磷(TP)、pH 值和容重进行多元回归相关分析。结果发现,OM 仅与 TN 呈显著正相关,关系式为 $OM = 0.030 4TN + 0.189 4$ ($R = 0.962 4, p < 0.05$)(图 2)。这也说明了土壤肥力主要体现在土壤有机质含量上,而有机质是土壤氮的主要载体,因而土壤全氮含量可以间接说明土壤的肥力及松散度。

表 1 王朗自然保护区表层土壤颗粒的机械组成及其土壤分形维数

Tab. 1 The mechanical composition of the soil and its the fractal dimensions in Wanglang nature reserve

土壤类型	不同粒径的粒级含量/%						发育层次	有机质含量/%	全氮含量/%	全磷含量/%	pH	容重/(g/cm ³)	分形维数(D_p)	相关系数(R)
	0.1~1 mm	0.05~0.1 mm	0.01~0.05 mm	0.005~0.01 mm	0.001~0.005 mm	小于 0.001 mm								
BS	4.76	19.08	41.91	11.90	9.31	8.50	A	16.50	0.658	0.199	5.90	0.64	2.679 6	0.941 5
TB	0.13	9.36	38.98	13.00	17.22	21.22	A	18.98	0.735	0.215	6.04	0.60	2.736 2	0.920 5
DB	0.55	8.99	30.23	21.59	20.58	17.06	A	18.38	0.808	0.214	5.00	0.85	2.736 4	0.892 5
GD	4.77	14.08	24.30	11.63	17.96	24.26	A	8.72	0.454	0.196	5.20	1.24	2.741 4	0.940 2
WS	6.25	8.26	24.40	19.09	19.09	22.91	A	10.62	0.541	0.203	6.00	1.08	2.739 3	0.916 2
MD	1.48	14.47	27.69	18.03	18.04	20.79	A	11.64	0.523	0.150	6.10	0.64	2.734 1	0.919 2
SM	0.78	11.78	33.80	14.78	16.90	21.96	A	11.36	0.527	0.213	6.10	0.68	2.736 3	0.923 4

注:BS:山地棕壤;TB:山地潮棕壤;DB:山地暗棕壤;GD:山地潜育暗棕壤;WS:山地白浆化暗棕壤;MD:山地草甸暗棕壤;SM:亚高山草甸土;发育层次“A”代表表层土壤,土层厚度约为 0~30 cm;pH 值为水土体积比为 1:1 时的情况;相关系数 R 指土壤颗粒粒径与颗粒累积含量的相关系数。

3 讨论

PSD 是土壤重要的物理性质之一,它对土壤质地结构、持水量、土壤生产力及土壤的侵蚀有巨大影响。杨培岭等人^[14]认为 $D_p > 2.88$, 表征土壤结构紧实、通透性较差。同时,Rieu 等人^[21]也认为分形维数越低,土壤颗粒的稳定性越低,易被退化或者流失,分形维数可能是反映土壤侵蚀度的一个重要指标。在本研究中,该区土壤颗粒的分形维数的变化范围是 2.679 6~2.741 4, D_p 相对较低。因此,该区土壤可能具有相对松散的土质结构,容易产生水土流失。因而增加该区

植被、加强该区水土流失的治理很有必要。

李德成等人^[22]认为土壤的分形维数除跟土壤机械组成有关外,还受土壤类型、土壤的形成过程等因素的影响。从表 1 还可以看出,不同类型的土壤的分形维数存在差异,按 D_p 从大到小排列所研究土壤的顺序,依次是:山地潜育暗棕壤、山地白浆化暗棕壤、山地暗棕壤、亚高山草甸土、山地潮棕壤、山地草甸暗棕壤、山地棕壤。由此可见,土壤分形维数跟土壤类型有关,这与李德成的观点一致。由于山地棕壤处于较低海拔,土壤肥力相对较高,土壤相对松散,因而分形维数较其它土壤低。

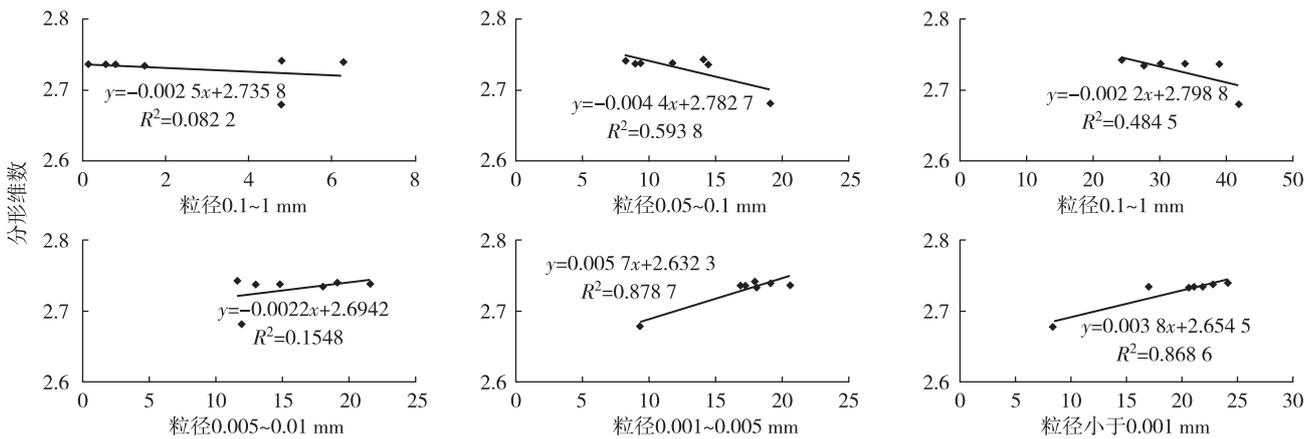


图 1 土壤分形维数与各粒级含量的相关性

Fig. 1 Correlation between soil particle content and soil fractal dimensions

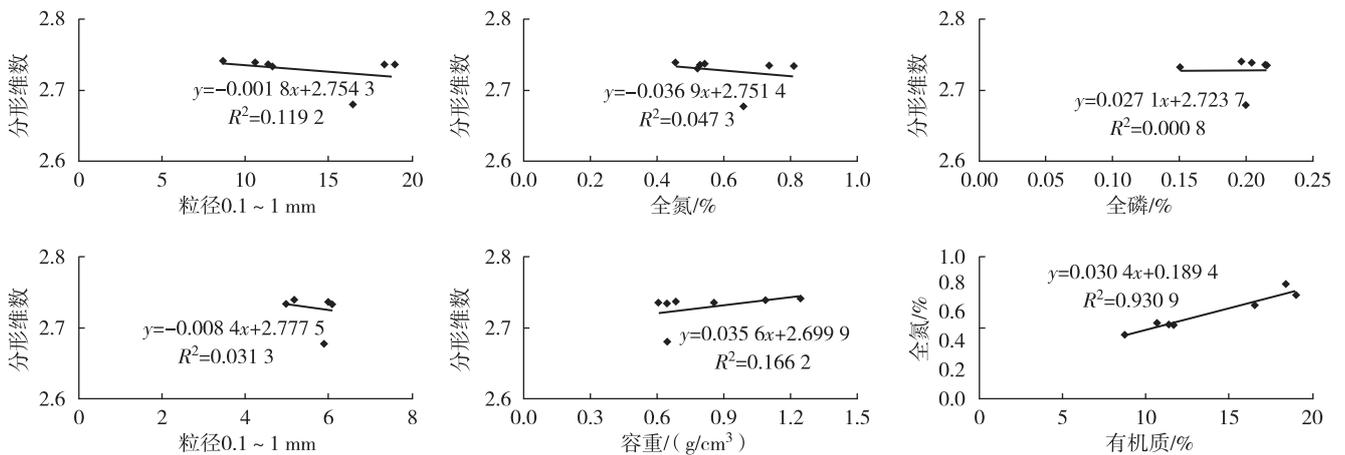


图 2 土壤分形维数与有机质含量、全氮、全磷、pH 和容重的相关性以及土壤有机质含量与全氮的相关性

Fig. 2 Correlations between organic matter, total nitrogen, total phosphorus, pH, density and soil fractal dimension and correlation between organic matter and total nitrogen

土壤有机质含量能够很好地反映土壤肥力状况,它与颗粒分形维数的关系很密切。程先富等人^[23]研究发现,随土壤颗粒分形维数的增加,土壤有机质含量减少;张世熔等人^[24]却发现,随土壤颗粒分形维数的增加,土壤有机质含量增加。在本研究中,土壤颗粒分形维数与土壤有机质含量的相关性不显著,缪持远等

人^[25]对黑土表面颗粒的研究也得出相同结果,此外,他们还得出分形维数与全磷、全氮、pH 也无相关性,而本研究也得出同样结论。因而,分形维数与土壤颗粒理化性质的关系可能与研究地区复杂的地理环境和土壤结构类型有关,此外,可能还受土壤采样地点林地覆盖状况等因素影响。同时,这也意味着用土壤颗粒

粒径分布的分形维数来表征土壤养分状况可能具有很强的空间异质性,未来进一步对此进行研究是非常必要的。

土壤容重也是表征土壤理化性质的重要参数之一,它与土质结构的关系十分密切。曾宪勤等人^[26]研究发现,土壤颗粒的分形维数与容重呈负相关关系;而张世榕等人^[24]在对耕层土壤颗粒的研究时发现,土壤颗粒的分形维数与容重呈正相关关系。在本研究中,土壤容重跟土壤颗粒分形维数没有相关性,郭中领等人^[27]也得出类似结论,这说明利用分形维数来表征土壤理化性质可能存在某些不足,需作进一步研究。此外,土壤容重越大,土壤松散度越低^[28];土壤容重越小,表明土壤结构相对松散,孔隙率高^[29]。对该区土壤容重的研究表明,该区土壤容重普遍较低,因而该区可能具有相对松散的土质结构,这与利用分形维数表征该区土壤特征的结果一致。

总之,分形维数与土壤理化性质的关系方面需要进一步研究,未来相关研究对分形维数内涵的深刻理解和利用分形维数来反映土壤理化性质、结构方面具有重要意义。

参考文献:

- [1] 梁士楚,董鸣,王伯荪,等. 英罗港红树林土壤粒径分布的分形特征[J]. 应用生态学报,2003,14(1):11-14.
Liang S C, Dong M, Wang B S, et al. Fractal characteristics of particle size distributions of mangroves soil in Yingluo Bay[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2003,14(1): 11-14.
- [2] 王美荣,金志琳. 分形理论及其应用[J]. 菏泽师专学报,2004,26(4):51-56.
Wang M R, Jin Z L. Fractal theory and its applications[J]. Journal of Heze Teachers College,2004,26(4):51-56.
- [3] Perfect E, Kay B. Applications of fractals in soil and tillage research: a review[J]. Soil and Tillage Research, 1995, 36(1):1-20.
- [4] Tyler S W, Wheatcraft S W. Application of fractal mathematics to soil water retention estimation[J]. Soil Science Society of America Journal, 1989, 53(4):987-996.
- [5] Rieu M, Sposito G. Fractal fragmentation, soil porosity, and soil water properties: I. Theory[J]. Soil Science Society of America Journal, 1991, 55(5):1231-1238.
- [6] Rasiyah V, Kay B, Perfect E. New mass-based model for estimating fractal dimensions of soil aggregates[J]. Soil Science Society of America Journal, 1993, 57(4):891-895.
- [7] 蔡新民,丁新新,潘健等. 分形理论在土壤科学研究中的应用[J]. 防护林科技,2011(6):8-13.
Cai X M, Ding X X, Pan J, et al. Application of fractal theory in soil science[J]. Protection Forest Science and Technology, 2011(6): 8-13.
- [8] 陈秉聪,佟金. 土壤分形与土壤粘附[J]. 世界科技研究与发展,1999,21(2):34-36.
Chen B C, Tong J. Fractal and adhesion of soil[J]. Research and Development of The World Science and Technology, 1999, 21(2): 34-36.
- [9] 张季如,朱瑞庚,祝文化. 用粒径的数量分布表征的土壤分形特征[J]. 水利学报,2004,35(4):67-71.
Zhang J R, Zhu R G, Zhu W H. Fractal features of soils characterized by grain size distribution[J]. Shuili Xuebao, 2004, 35(4):67-71.
- [10] 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):491-497.
Huang G H, Zhan W H. Fractal property of soil particle size distribution and its application[J]. Acta Pedologica Sinica, 2002, 39(4):491-497.
- [11] Munodawafa A. Assessing nutrient losses with soil erosion under different tillage systems and their implications on water quality[J]. Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, 2007, 32(15):1135-1140.
- [12] Arya L M, Paris J F. A physicoempirical model to predict the soil moisture characteristic from particle-size distribution and bulk density data[J]. Soil Science Society of America Journal, 1981, 45(6):1023-1030.
- [13] Turcotte D. Fractals and fragmentation[J]. Journal of Geophysical Research, 1986, 91(B2):1921-1926.
- [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):1896-1899.
Yang P L, Luo Y P, Shi Y C. Fractal features of soils characterized by weight distribution[J]. Chinese Science Bulletin, 1993, 38(20):1896-1899.
- [15] Al-Kaisi M M, Yin X, Licht M A. Soil carbon and nitrogen changes as influenced by tillage and cropping systems in some Iowa soils[J]. Agriculture, ecosystems & environment, 2005, 105(4):635-647.
- [16] Sovik A K, Aagaard P. Spatial variability of a solid porous framework with regard to chemical and physical properties[J]. Geoderma, 2003, 113(1):47-76.
- [17] Wang Y, Zhang X, Huang C. Spatial variability of soil total nitrogen and soil total phosphorus under different land uses in a small watershed on the Loess Plateau, China[J]. Geoderma, 2009, 150(1):141-149.
- [18] Liu X, Zhang G, Heathman G C, et al. Fractal features of soil particle-size distribution as affected by plant communities in the forested region of Mountain Yimeng, China[J]. Geoderma, 2009, 154(1):123-130.
- [19] 王金锡,马志贵. 大熊猫主食竹生态学研究[M]. 成都:四川科学技术出版社,1993.

- Wang J X, Ma Z G. Ecological Research of giant panda staple food bamboo [M]. Chengdu: Sichuan Science and Technology Press, 1993.
- [20] Tyler S W, Wheatcraft S W. Fractal scaling of soil particle-size distributions; analysis and limitations [J]. Soil Science Society of America Journal, 1992, 56(2): 362-369.
- [21] Rieu M, Sposito G. Fractal fragmentation, soil porosity, and soil water properties: II. Applications [J]. Soil Science Society of America Journal, 1991, 55(5): 1239-1244.
- [22] 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.
- Li D C, Zhang T L. Fractal features of particle size distribution of soils in China [J]. Soil and Environmental Sciences, 2000, 9(4): 263-265.
- [23] 程先富, 史学正, 王洪杰. 红壤丘陵区耕层土壤颗粒的分形特征 [J]. 地理科学, 2003, 23(5): 618-621.
- Chen X F, Shi X Z, Wang H J. Fractal characteristics of particle of arable layers in hilly region of red soil [J]. Scientia Geographica Sinica, 2003, 23(5): 618-621.
- [24] 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.
- Zhuang S R, Deng L J, Zhou Q, et al. Fractal dimensions of particle surface in the plowed layers and their relationships with main soil properties [J]. Acta Pedologica Sinica, 2002, 39(2): 221-226.
- [25] 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.
- Miao C Y, Wang Y F, Wei X, et al. Fractal characteristics of soil particles in surface layer of black soil [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2007, 18(9): 1987-1993.
- [26] 曾宪勤, 刘和平, 路炳军, 等. 北京山区土壤粒径分布分形维数特征 [J]. 山地学报, 2008, 26(1): 65-70.
- Zeng X Q, Liu H P, Lu B J, et al. Fractal dimension of soil particle-size distribution characteristic in the Beijing Mountains [J]. Journal of Mountain Science, 2008, 36(1): 65-70.
- [27] 郭中领, 符素华, 王向亮, 等. 北京地区表层土壤分形特征研究 [J]. 水土保持通报, 2010, 30(2): 154-158.
- Guo Z L, Fu S H, Wang X L, et al. Fractal dimension characteristic of soil particle-size distribution in Beijing Region [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2010, 30(2): 154-158.
- [28] 徐宁, 吴兆录, 李正玲, 等. 滇西北亚高山不同土地利用类型土壤容重与根系生物量的比较研究 [J]. 安徽农业科学, 2008, 36(005): 1961-1963.
- Xu N, Wu Z L, Li Z L, et al. Comparative studies on soil bulk density and underground roots biomass under different land use types in Northwestern Yunnan Province [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2008, 36(005): 1961-1963.
- [29] 黄昌勇. 土壤学 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- Huang C Y. Soil Science [M]. Beijing: Chinese Agriculture Press, 2000.

Resources, Environment and Ecology in Three Gorges Area

Fractal Characteristics of Soil Particles of the Nature Reserve in Wanglang

LI Jun¹, TANG Chun-rong¹, SHEN Jun-jian¹, YAN Hong-yu², LEI Ning-fei¹, ZHUANG He¹

(1. College of Materials and Chemistry and Chemical Engineering, Chengdu University of Technology, Chengdu 610000;

2. Bureau of Forestry in Aba Tibetan and Qiang Nationality Autonomous Prefecture, Barkam Sichuan 624000, China)

Abstract: Fractal theory was employed to analyze the fractal dimension of soil particle size distribution for seven generic soil in Wanglang, and the fractal dimension and the correlation between soil chemical properties (e. g. he content of organic matter, total nitrogen, total phosphorus, pH and volume density) was investigated. The results were indicated that the fractal dimension of soil particles in surface layer rang from 2. 679 6 to 2. 741 4. The logarithm correlation coefficient of the soil particle size between cumulative weight is more than 0. 85 ($p < 0. 05$). The fractal dimension only has a very significant positive correlation with the content of 0. 001~0. 005 and less 0. 001 mm soil particles. In addition, no significant correlations are observed between the fractal dimension and the contents of oil organic matter, otal nitrogen, otal phosphorus, pH and olume density, but there is a significant positive correlation between the contents of oil organic matter and otal nitrogen ($p < 0. 05$). Through studying of the fractal dimension of top soil particle size distribution of the Nature Reserve in Wanglang concluded that the fractal dimension of soil particles is lower, and that soil structure is more loose and easily caused soil erosion, therefore it is indispensable to highlight ecological construction.

Key words: fractal dimension; soil particle size; correlation