

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*

刘美龄 叶勇** 曹长青 唐飞龙

(厦门大学近海海洋环境科学国家重点实验室, 福建厦门 361005)

摘要 应用分形理论分析了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, 海南东寨港土壤的分形维数为 2.302~2.575, 分形维数的大小与土壤中的粘粒、盐分、有机质、全氮含量呈显著正相关, 外滩红树林土壤的分形维数低于中滩和内滩; 随着土壤质地由砂壤土、轻壤土、中壤土、重壤土的变化, 分形维数逐渐增大; 从陆到海土壤分形维数逐渐减小。群落类型、土壤质地、滩位、含盐量、有机质、全氮含量等是影响海南东寨港红树林土壤分形维数的主要因子。

关键词 红树林; 土壤; 粒径分布; 分形维数

中图分类号 Q948.885.3 文献标识码 A 文章编号 1000-4890(2008)09-1557-05

Fractal characteristics and related affecting factors of particle size distribution in mangrove soils in Dongzhai Harbor of Hainan. LIU Meiling YE Yong CAO Changqing TANG Feilong (*State Key Laboratory of Marine Environmental Science, Xiamen University, Xiamen 361005, Fujian, China*). *Chinese Journal of Ecology*, 2008, 27(9): 1557-1561.

Abstract The analysis with fractal theory on the fractal characteristics and related affecting factors of particle size distribution in mangrove soils in Dongzhai Harbor of Hainan showed that the fractal dimension of mangrove soils ranged from 2.302-2.575. There was a significant positive linear relationship between the fractal dimension and the contents of soil clay, salts, organic matter and total nitrogen. The fractal dimension was lower in outside beach than in middle and inner beach, and changed with soil texture, being in the order of sandy loam < light loam < medium loam < heavy loam. From land to sea, the fractal dimension decreased gradually. The main factors affecting the fractal dimension were community type, soil texture, beach position, soil salinity, and organic matter and total nitrogen contents.

Key words mangroves; soil; particle size distribution; fractal dimension

分形理论能够揭示复杂的自然现象和社会现象中所隐藏的规律性、层次性和标度不变性, 被应用于很多领域 (Bartoli *et al.*, 1991; 李毅和王文焰, 2000)。土壤是一个复杂系统, 是由大小、形状不同的固体组分和空隙以一定形式连结而成的多孔介质。土壤粒径、颗粒表面积、颗粒体积、空隙大小等具有自相似性, 因此土壤是具有分形特征的系统 (Turcotte, 1986, 1989; Tyler & Wheatcraft, 1992; 杨培岭等, 1993; Taguas *et al.*, 1999)。

红树林是热带亚热带海岸潮间带特有的木本植物群落, 红树植物与其土壤之间相互作用明显: 土壤

条件影响红树植物的生长和分布, 而不同种类的红树植物对土壤理化性状有不同的影响 (蓝福生等, 1994)。由于红树林环境条件的特殊性和复杂性, 对红林土壤分形研究方面的成果不多, 国内仅见梁士楚 (1996) 对广西红树林土壤的研究。本文给出表征海南东寨港红树林土壤分形特征的分形指数, 通过土壤粒径分布的分形特征分析, 期望了解适宜红树植物群落生长和分布的土壤的条件, 为红树植物的恢复和重建提供一定的指导意义。

1 研究地区与研究方法

1.1 自然概况

东寨港红树林保护区位于海南省海口市境内, 海南岛东北侧, 110°32'E—110°37'E, 19°51'N—20°

* 教育部新世纪优秀人才培养计划 (NCET) 和国家自然科学基金资助项目 (40476040)。

** 通讯作者 E-mail: yeyong@xmu.edu.cn

收稿日期: 2007-12-28 接受日期: 2008-04-11

01'N, 属热带海洋性气候, 年均气温 23.8 °C, 最冷月均温 12.1 °C, 极端最低温度 2.8 °C, 海水表层年平均温度 24.5 °C, 年平均降雨量 1 676 mm。不规则全日潮, 平均潮差约 1 m, 其中红树林面积 1 733 hm², 主要植物种类有: 白骨壤 (*Avicennia marina*)、桐花树 (*Aegiceras corniculatum*)、木榄 (*Bruguiera gymnorhiza*)、秋茄 (*Kandelia candel*)、角果木 (*Ceriops tagal*)、海莲 (*Bruguiera sexangula*)、海漆 (*Excoecaria agallocha*)、榄李 (*Lumnitzera racemosa*)、红海榄 (*Rhizophora stylosa*)、老鼠筋 (*Acanthus ilicifolius*) 等 (王文卿和王瑁, 2007)。

1.2 研究方法

在东寨港选择 16 个有代表性的群落, 样带长 300 m, 宽 5 m, 主要植物有: 榄李、桐花树、海莲、角果木、红海榄、白骨壤和老鼠筋等。从水缘至陆缘设置样条, 于每样条按一定间距设置调查位点, 在每位点记录物种出现情况, 并随机挖取 3 份 0~20 cm 层的土样, 风干过 60 目筛备用。盐分和有机质含量分别用滴定法和重铬酸钾法测定 (中国科学院南京土壤研究所, 1978)。各样地植被、土壤状况见表 1。

土壤粒径组成用 Mastersizer 2000 激光粒度分析仪测定, 并采用前苏联制的分类标准对土壤质地进行分类。粒径 r 小于某一特定测量尺度 R 的累积土粒质量 $W(r < R)$ 与 R 之间的分形关系式为:

$$\left(\frac{R}{R_{max}}\right)^{3-D} = \frac{W(r < R)}{W_0}$$

式中, R_{max} 为最大土粒的粒径大小, W_0 是各粒级质量的总和, D 是分形维数 (Scott & Stephen, 1989; Rasiah et al., 1993; Wu et al., 1993; Figueira et al., 1999)。

2 结果与分析

2.1 土壤质地类型与分形维数的关系

东寨港红树林土壤分形维数的大小与土壤质地密切相关, 对各土壤质地类型分形维数的均值进行计算, 可得出砂壤土、轻壤土、中壤土和重壤土分形维数的均值分别为 2.2542、2.3062、2.3693 和 2.3984 即随着土壤质地由砂壤土、轻壤土、中壤土和重壤土的变化, 分形维数逐渐增大 (表 2)。单因素方差分析表明, 砂壤土、轻壤土、中壤土和重壤土 4 类质地的分形维数之间的差异均达到显著水平 ($P = 0.014$), 说明土壤质地类型对分形维数的作用有显著差异。同一类型的群落也因土壤质地不同, 其分形维数也有所差异, 如桐花树的分形维数呈现砂壤土 < 中壤土, 海莲的分形维数呈现中壤土 < 重壤土。东寨港红树林土壤分形维数与粘粒含量呈强显著正相关 ($P = 0.000$), 而与其砂粒含量成显著负相关 ($P = 0.003$) (图 1 和图 2)。在维数上表现出粘粒含量越高, 其分形维数越高, 土壤砂粒含量越高, 土壤粒径分布的分形维数越低。砂壤土的颗粒直径最大, 粘粒含量最低 (为 1.19%), 故其分形维数最低 ($D = 2.2542$), 重壤土颗粒较细, 粘粒含量相对较高, 因而其分形维数也较大。即土壤中的砂粒含量越高, 土壤粒径分布的分形维数越小; 而细粘粒含量越高, 土壤粒径分布的分形维数越大。因此, 分形维数可作为土壤质地综合性的定量化指标之一。

2.2 滩位与分形维数的关系

由于所处滩位不同, 不同红树植物土壤的分形维数有差异 (表 1 和表 2)。同一种红树植物如榄李

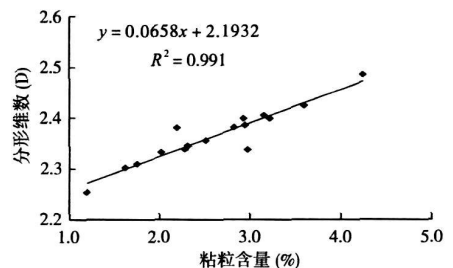


图 1 土壤分形维数与粘粒含量的关系

Fig 1 Relationship between fractal dimension and clay content of soils

表 1 东寨港红树林样地的概况

Tab 1 General situation of mangrove plots in Dongzhai Harbor

样地	滩位	优势植物种类	土壤有机质 ($g \cdot kg^{-1}$)	土壤含盐量 (%)	土壤全氮 ($g \cdot kg^{-1}$)
P1	I	Lr	8.598	6.3096	2.978
P2	M	Lr	24.076	7.5406	4.421
P3	E	Lr	15.477	6.2652	2.711
P4	I	Ac	6.072	4.0669	1.501
P5	M	Ac	7.324	4.9132	1.647
P6	E	Ac	12.038	7.0113	2.012
P7	I	Bs Ct	20.063	8.1678	1.370
P8	I	Rs	29.808	7.2388	2.401
P9	I	Kc	17.091	4.3021	2.891
P10	M	Bs	44.139	8.0411	2.267
P11	M	Ct	63.055	11.2436	2.925
P12	M	Am	21.210	7.4630	2.468
P13	E	Bs	100.880	15.9215	4.444
P14	E	Ai	67.641	12.1030	2.945
P15	E	Ct	25.222	7.3989	1.647
P16	E	Am	20.636	8.6805	1.471

I 内滩, M 中滩, E 外滩。Am 白骨壤, Ac 桐花树, Kc 秋茄, Ct 角果木, Bs 海莲, Lr 榄李, Rs 红海榄, A 老鼠筋。

表 2 东寨港红树林土壤的粒径分布及其分形维数

Tab 2 Particle size distributions of mangrove soils in Dongzhai Harbor and their fractal dimensions

样地	土壤质地	粒径分布 (mm, %)							相关系数	分形维数
		< 0.001	0.001~0.005	0.005~0.01	0.01~0.05	0.05~0.25	0.25~1	1~3		
P1	中壤土	2.83	15.97	15.93	40.56	18.92	5.79	0.00	0.8721	2.3826
P2	中壤土	3.60	18.26	14.39	40.21	19.37	4.17	0.00	0.8742	2.4242
P3	重壤土	3.22	19.25	19.69	43.64	13.32	0.88	0.00	0.8457	2.3991
P4	砂壤土	1.19	9.60	10.34	31.31	32.14	12.35	3.07	0.9009	2.2542
P5	轻壤土	1.62	12.52	14.72	36.13	22.12	12.79	0.10	0.8689	2.3022
P6	轻壤土	1.75	11.45	11.13	36.04	27.37	11.85	0.41	0.9001	2.3101
P7	中壤土	2.51	16.61	16.48	45.89	15.69	1.24	1.58	0.8610	2.3560
P8	重壤土	2.93	21.89	21.05	42.60	10.60	0.93	0.00	0.8161	2.3997
P9	中壤土	2.02	16.26	17.61	40.05	17.19	6.87	0.00	0.8438	2.3331
P10	中壤土	2.32	15.97	19.26	43.85	13.87	3.25	1.48	0.8498	2.3458
P11	重壤土	2.95	19.43	21.40	44.90	9.46	1.86	0.00	0.8317	2.3860
P12	重壤土	2.28	18.58	22.74	47.86	8.54	0.00	0.00	0.8236	2.3386
P13	重壤土	4.25	16.33	13.77	31.74	12.34	7.02	14.55	0.8705	2.4856
P14	中壤土	3.16	14.67	12.65	36.31	25.08	8.13	0.00	0.9007	2.4054
P15	重壤土	2.19	18.70	22.48	43.75	11.60	1.28	0.00	0.8559	2.3813
P16	中壤土	2.97	18.06	17.74	47.56	12.70	0.97	0.00	0.8204	2.3380

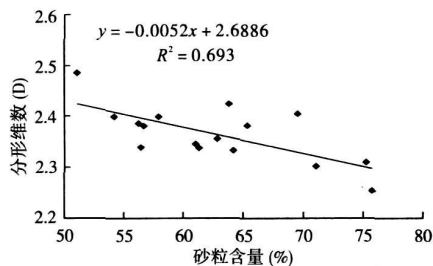


图 2 土壤分形维数与砂粒含量的关系

Fig 2 Relationship between fractal dimension and sand content of soils

从外滩、中滩到内滩均有分布, 分形维数分别为 2.3826、2.4242 和 2.3991; 同时对各滩位分形维数的均值进行计算, 也可得出外滩、中滩和内滩分形维数的均值分别为 2.3447、2.3598 和 2.3866, 即从陆到海土壤分形维数逐渐减小。产生这种现象的原因除与土壤质地有关外, 还与红树植物所属生态环境有关, 红树群落所属滩位不同, 被海浪冲击的程度也不同。外滩淹潮频度大, 潮波反复作用, 滩面物质受到较好的分选, 粘粒物质较少, 土壤砂粒含量高; 内滩的红树群落受海浪冲击较弱, 滩地冲刷能力下降, 阻拦作用和促淤能力比外滩的强, 粘粒含量较高 (林鹏, 1990)。双因素方差分析得出, 潮位对分形维数没有显著性影响 ($P = 0.16$), 物种对分形维数有显著性影响 ($P = 0.019$), 共同作用也有显著性影响 ($P = 0.000$)。总体上, 东寨港红树林土壤分形维数从陆到海土壤分形维数逐渐减小。

2.3 群落类型与分形维数的关系

生态环境和土壤条件决定红树植物的生态分布, 单因素方差分析结果表明, 群落类型对分形维数具有显著影响 ($P = 0.01$)。白骨壤群落、桐花树群落属于演替前期的群落, 在贫瘠的土壤环境中摄取养分的能力强, 一般分布于潮滩前沿, 土壤砂粒含量较高, 因此它们的分形维数较低。样地 P4 桐花树群落处于外滩, 地表受波浪影响较大, 砂粒含量高达 47.56%, 所以分形维数小。而秋茄、角果木、海莲群落属于演替中后期群落, 其土壤物理性粘粒含量多高于 30%, 分形维数 > 2.3。由于土壤与红树群落的相互作用, 这种演替途径实质上反映了潮滩的生态演替进程 (梁士楚等, 2003)。因此, 在东寨港红树林的进展演替过程中, 演替前期群落的土壤分形维数低于演替后期群落。

2.4 土壤盐度与分形维数的关系

由于周期性的潮水浸淹, 红树植物生长的环境中不仅水体有较高的盐含量, 土壤盐含量也很高。土壤颗粒越小, 粘粒越多, 总表面积越大, 吸附盐类的数量越多 (林鹏, 1990, 1997)。一般砂壤土盐含量 < 10‰, 轻壤土-轻粘土盐含量 10‰~30‰, 粘土高达 40‰ (王文卿和王瑁, 2007)。

土壤盐含量随着土壤粘粒含量增大而增大, 且土壤粘粒含量对盐含量有显著性影响 ($P = 0.009$), 盐含量与分形维数之间存在显著正相关 ($P = 0.007$) (图 3 和图 4)。因此, 分形维数是影响东寨

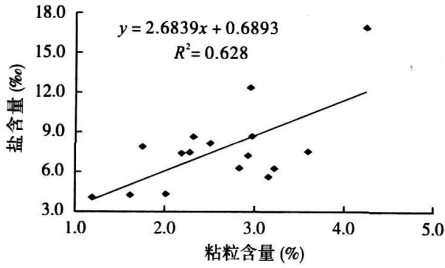


图 3 土壤粘粒与盐含量的关系

Fig. 3 Relationship between salt content and clay content of soils

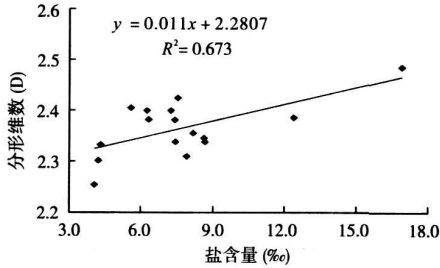


图 4 土壤盐含量与分形维数的关系

Fig. 4 Relationship between salt content and fractal dimension of soils

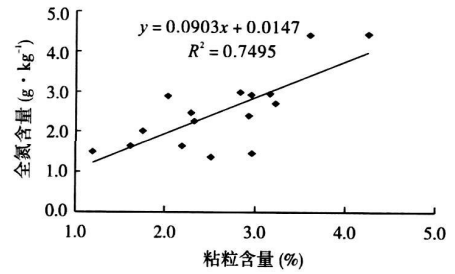


图 5 土壤粘粒与全氮含量的关系

Fig. 5 Relationship between total nitrogen content and clay content of soils

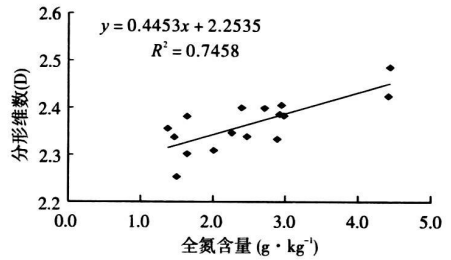


图 6 土壤全氮含量与分形维数的关系

Fig. 6 Relationship between total nitrogen content and fractal dimension of soils

港红树林土壤盐含量的重要因子; 分形维数的测定也为土壤含盐量数量表征提供了一个新的指标。

2.5 土壤肥力与分形维数的关系

土壤肥力是土壤的本质属性和特殊功能, 它反映了土壤系统本身的物质成分、结构和土体构型, 以及土壤各种过程和性质 (吴礼树, 2004)。土壤颗粒组成直接影响到土壤的某些物理性质和化学性质, 如土壤通透性、土壤养分含量等都有很大的影响, 分形维数可以表征土壤粒径大小和质地组成的均匀程度, 这就为利用分形维数研究土壤肥力提供了可行性。

2.5.1 全氮含量与分形维数的关系

土壤各粒级之间, 在保持植物营养元素方面表现出不同的能力; 同时, 就其本身化学成分来比较, 较细小颗粒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为植物可利用的形态 (吕贻忠和李保国, 2004)。东寨港红树林土壤全氮与分形维数关系密切: 土壤全氮含量随着土壤粘粒含量增大而增大, 且土壤粘粒含量对全氮含量有显著性影响 ($P = 0.001$), 且分形维数与盐含量之间也存在显著性影响 ($P = 0.001$) (图 5 和图 6)。随着分形维数的增大, 土壤颗粒变细, 土壤中氮元素含量增加, 保肥能力增大。反之, 当分形维数变小, 土壤颗粒变粗, 土壤中氮元素的含量减小, 红树植物急需氮肥的补充。

2.5.2 分形维数与有机质含量的关系 在土壤的各级颗粒组成中, 细颗粒物对矿质养分的吸收与保持以及对土壤有机质的结合方面都表现出很大的活性, 砂质土通气良好, 好氧微生物活动强烈, 土壤中有机质分解迅速, 易释放有效养分, 有机质不易积累, 土壤粘粒含量高, 土壤通气性差, 好氧性微生物活动受到抑制, 有机质分解较慢, 易于积累 (吴礼树, 2004)。

随着粘粒含量的增大, 东寨港红树林土壤中分形维数和有机质含量也随之增大, 且土壤粘粒含量对有机质含量有显著性影响 ($P = 0.006$), 分形维数与有机质含量之间存在显著正相关 ($P = 0.004$) (图 7 和图 8)。反之, 当土壤的分形维数变小, 土壤颗

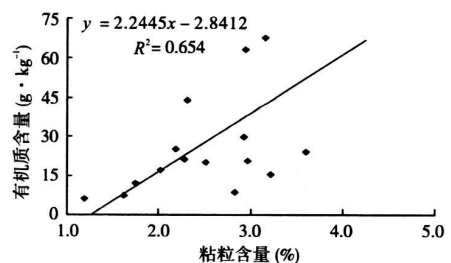


图 7 土壤粘粒与有机质含量的关系

Fig. 7 Relationship between organic matter content and clay content of soils

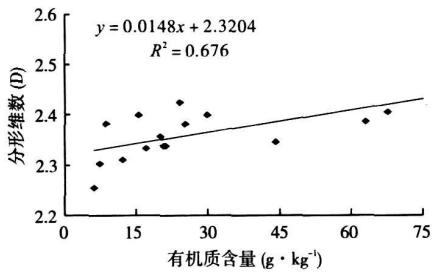


图 8 有机质含量与土壤分形维数的关系

Fig 8 Relationship between organic matter content and fractal dimension of soils

粒变粗, 土壤中有机质含量降低。这是由于土壤粘粒与有机质具有胶结凝聚的作用, 使营养物质不易被潮水冲走。因此, 红树林土壤丰富的粘粒物质对保持和固定养分具有重要作用。

3 结论

海南东寨港红树林区土壤的粒径分布具有分形特征, 其分形维数介于 2.3020~2.5754。分形维数的大小表征了土壤的密实程度; 分形维数越高, 表明土壤结构越紧密; 分形维数越低, 表明土壤结构越松散。不同类型的群落, 由于组成种类及其生物生态学特性的不同, 其捕获沉积物和促进淤积的能力不同, 同时受质地类型、含盐量、有机质和全氮含量等影响, 土壤的粒径分布有所差异, 而具有不同的分形特征。

随着土壤质地由砂壤土, 轻壤土, 中壤土, 重壤土的变化, 东寨港红树林土壤的分形维数逐渐增大, 从陆到海分形维数逐渐减小, 土壤粒径分布的分形维数与其粘粒、盐分、土壤肥力密切相关, 这与梁士楚等 (2003)、梁士楚和王伯荪 (2003) 在广西英罗港红树林的研究结果相似。

粒径分布是表征土壤物理性质的重要参数之一, 研究表明: 通过分析海南红树林土壤粒径分布的分形特征, 不仅能够表征土壤粒径大小, 还能反映质地的均一程度; 分形维数可以表征土壤的肥力状况, 可以较好地作为土壤肥力特性的量化指标, 在一定范围内, 分形维数越高, 则土壤中的粘粒含量越丰富, 土壤的化学性质越活泼, 土壤的氮元素含量及有机质含量均随着分形维数的增大而增大, 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。

参考文献

蓝福生, 李瑞棠, 陈平, 等. 1994. 广西海滩红树林与土

壤的关系. 广西植物, 14(1): 54-59

- 李毅, 王文焰. 2000. 农业土壤和水资源研究中的分形理论. 西北水资源与水工程, (4): 12-17.
- 梁士楚. 1996. 广西英罗港红树植物群落的研究. 植物生态学报, 20(4): 310-321
- 梁士楚, 董鸣, 王伯荪, 等. 2003. 英罗港红树林土壤粒径分布的分形特征. 应用生态学报, 14(1): 11-14
- 梁士楚, 王伯荪. 2003. 广西英罗港红树林区木榄群落土壤粒径分布的分形特征. 热带海洋学报, 22(1): 17-22
- 林鹏. 1990. 红树林研究论文集. 厦门: 厦门大学出版社.
- 林鹏. 1997. 中国红树林生态系. 北京: 科学出版社.
- 吕贻忠, 李保国. 2006. 土壤学. 北京: 中国农业出版社.
- 王文卿, 王瑁. 2007. 中国红树林. 北京: 科学出版社.
- 吴礼树. 2004. 土壤肥料学. 北京: 中国农业出版社.
- 杨培岭, 罗远培, 石元春. 1993. 用粒径的重量分布表征的土壤分形特征. 科学通报, 38(20): 1896-1899.
- 中国科学院南京土壤研究所. 1978. 土壤理化性质分析. 上海: 科学技术出版社.
- Barbali F, Philipp R, Doirisse M, et al. 1991. Structure and self-similarity in silty and sandy soils: The fractal approach. *Soil Science of America Journal*, 42: 167-185.
- Figueira RR, Fourmieri LL, Sarli GO, et al. 1999. Sensitivity of fractal parameters of soil aggregate to different management practices in a Phaeozem in central Argentina. *Soil & Tillage Research*, 52: 217-222.
- Rasiah V, Kay BD, Perfect E. 1993. New mass-based model for estimating fractal dimensions of soil aggregates. *Soil Science Society of America Journal*, 57: 891-89.
- Scott WT, Stephen WW. 1989. Application of fractal mathematics to soil water retention estimation. *Soil Science Society of America Journal*, 53: 987-996.
- Taguas FJ, Martin MA, Perfect E. 1999. Simulation and testing of self-similarity structures for soil particles-size distributions using iterated function systems. *Geoderma*, 88: 191-203.
- Turcotte DL. 1986. Fractals and fragmentation. *Journal of Geophysical Research*, 91: 1921-1926.
- Turcotte DL. 1989. Fractals in geology and geophysics. *Pure and Applied Geophysics*, 131: 171-196.
- Tyler SW, Wheatcraft SW. 1992. Fractal scaling of soil particle size distributions: Analysis and limitations. *Soil Science Society of America Journal*, 56: 362-369.
- Wu Q, Borokovec M, Sticher H. 1993. On particles-size distributions in soil. *Soil Science Society of America Journal*, 57: 883-890.

作者简介 刘美龄, 女, 1983年生, 硕士研究生。主要从事红树林生态学研究。E-mail: lmkmu@163.com
责任编辑 王伟