

城市森林土壤肥力质量指标筛选^①

——以南京市为例

单奇华^{1,2}, 俞元春¹, 张建锋², 虞木奎², 成向荣²

(1 南京林业大学森林资源与环境学院, 南京 210037; 2 中国林业科学研究院亚热带林业研究所, 浙江富阳 311400)

摘要: 土壤质量指标的筛选是科学地进行土壤质量评价的前提。本文以城市森林土壤为研究对象, 探讨了土壤肥力指标的筛选方法。采集南京市不同功能区森林土壤样品 (0~20 cm), 分析了 24 个土壤质量指标。根据指标间的相关性和聚类分析结果, 筛选出体积质量 (容重)、黏粒含量、分散系数、可蚀性因子 K 值、水稳性指数、pH 值、有机质、速效钾和纤维素酶活性, 共 9 个指标作为城市森林土壤肥力质量评价的因子。

关键词: 城市森林土壤; 相关性; 聚类分析; 指标筛选

中图分类号: S714

城市森林和城市森林土壤是城市生态系统可持续发展的必需因素, 其中, 城市森林土壤是城市森林的载体和水肥供应者, 是城市生态系统的基础。研究城市森林土壤的肥力状况, 对城市森林的可持续发展和生态城市的建设有重要意义。研究表明城市森林土壤的体积质量 (容重) 普遍偏高, 孔隙度低^[1-4]。土壤营养元素分布各地差异很大, 在南京、哈尔滨、沈阳、深圳和武汉等城市, 土壤磷 (P) 元素富集, 但在广州和厦门, 土壤 P 元素缺乏^[5-11]。除极端条件^[5], 城市森林土壤的有机质和全氮 (N) 有良好的一致性, 大部分土壤有机质和全 N 含量处于中、低等水平。速效钾 (K) 普遍富集。城市土壤中钙 (Ca)、镁 (Mg)、硫 (S) 等元素含量高且供应充足^[12]。阳离子交换量低但高盐基饱和度是城市土壤的另一典型特征。在城市环境胁迫下, 城市森林土壤的生物特性表现为脲酶和过氧化氢酶活性均显著下降^[13-14], 微生物生物量下降, 但微生物呼吸强度和生理活动却显著提高^[15]。土壤中微生物的数量有减少趋势, 其中变化较大的是细菌, 而真菌和放线菌的变化不明显^[16]。土壤动物数量不同功能区以公园最高, 不同地表植被以林地最高, 表层土最高^[17-18]。

以往的研究成果奠定了城市森林土壤研究的基础, 但同时也体现出一定的局限性, 原因是往往通过

对土壤的物理、化学或生物学等某一特性对城市森林土壤肥力质量进行分析与评价, 缺乏对城市森林土壤肥力质量的综合监测与评价。对土壤肥力质量进行综合评价, 指标筛选是关键, 有人提出最小数据集这一概念^[19-20]。指标被纳入最小数据集中的条件: ①是现有数据库中的一部分, 综合了土壤物理、化学和生物学特性和过程; ②容易测定, 重复性好, 测定费用不大; ③能够被定量化, 与模型过程有关; ④对外界条件变化敏感, 能够准确监测、反应土壤的质量变化; ⑤有一定的区域性和时间性, 适用于特定的生态系统。最小数据集的作用主要是在不影响评价效果的基础上, 最大限度地减少工作量, 提高工作效率^[21]。本文正是基于最小数据集的理论, 以南京市城市森林土壤为研究对象, 探讨了城市森林土壤肥力指标的筛选方法, 为城市森林土壤肥力质量的综合评价提供技术支持, 同时也为相关领域的研究提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于南京市 (118°22'~119°14'E, 31°14'~32°37'N), 全市总面积约 6596 km², 地质类型复杂。地貌以冲积平原和黄土垅岗为主, 另有少量低山丘陵。主要土壤类型为水稻土 (水耕人为土)、黄棕壤 (铁质

①基金项目: 国家林业局“948”引进项目 (2005-4-17), 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项 (RISF 2006-2007-07) 和“十一五”国家科技支撑专题项目 (2006BAD03A1403) 资助。

作者简介: 单奇华 (1980—), 男, 江苏宜兴人, 博士, 助理研究员, 主要从事森林土壤与污染环境生态修复研究。E-mail: sqhua1980@sina.com

湿润淋溶土)和潮土(淡色潮湿锥形土)。年均气温 15~16℃, 每年 6 月中旬至 7 月中旬为梅雨季节, 年平均降水量约 1000 mm, 汛期雨量(6~9 月)占全年总降水量的 60% 左右。全市森林覆盖率 13%, 市区绿地覆盖率达 40% 以上^[22-24]。

1.2 研究方法

以城市不同功能区(城市公园、道路绿化带、大学校园、城郊天然林)森林土壤为研究对象, 采集 0~20 cm 土壤样品。同一功能区按不同的植被类型(乔、灌、草混交林、单一草坪和裸地)设置采样点, 在每一样点, 以蛇形布点法, 按一定间隔(3~10 m), 用铁锹挖剖面的方式(剖面参数 50 cm×50 cm×20 cm), 重复采集 3 个土壤样品混合成 1 个土壤样品(取约 1 kg), 最后共采集 44 个土壤样品带回实验室。采样期间取一部分新鲜土壤样品放在冰箱里 4℃ 保存, 用来测定土壤微生物生物量碳(microbial biomass carbon, C_{mic})。其余土壤样品室内摊在白纸上自然风干并挑除植物细根, 用木棒磨碎, 分别制备过 2、1 和 0.25 mm 尼龙筛的土壤样品备用。土壤样品采集时间 2006 年 4 月 2 日至 2006 年 4 月 4 日。

系统分析了 24 个土壤肥力指标, 指标测定方法^[25-28]: 土壤孔隙度(容积%)、容积密度(g/cm^3)、通气度(容积%)、贮水量(m^3/hm^2)和渗透性(K_{10})(mm/min): 环刀法。土壤颗粒组成和微团聚体分析: 过 1 mm 筛土样, 比重计法。土壤 pH: 用 25 ml 去离子水浸提过 2 mm 筛的风干土壤样品(10 g), pH 计法。有机质(g/kg): 重铬酸钾外加热法。土壤全 N(g/kg): 凯氏消煮法。土壤有效 P(mg/kg): 碳酸氢钠浸提钼蓝比色法。速效 K(mg/kg): 1 mol/L 乙酸铵浸提-火焰光度法。阳离子交换量(CEC)($cmol/kg$): 1 mol/L 乙酸铵交换法(pH 7.0)。微生物生物量碳(C_{mic})(mg/kg): 氯仿熏蒸-培养法。过氧化氢酶(ml/g): 高锰酸钾滴定法。脱氢酶(mg/g): 2,3,5-三苯基四唑化氯(TTC)比色法。碱性磷酸酶(mg/kg): 苯磷酸二钠比色法。纤维素酶(mg/g): 蒽酮比色法。土壤抗蚀性用水稳性指数表示, 参见《水土保持监测技术》2004 版^[26]。

土壤分散系数计算:

$$\text{分散系数}(\%) = (a/b) \times 100 \quad (1)$$

式中: a 表示土壤微团聚体分析结果中 <0.002 mm 粒级含量; b 表示土壤颗粒分析结果中 <0.002 mm 粒级含量。

土壤可蚀性因子 K 值的计算采用 Williams 等^[26]在 E P I C 模型中的计算公式:

$$K = \left\{ 0.2 + 0.3 \exp[0.0256S(1 - 0.01I)] \right\} \left(\frac{I}{L+I} \right)^{0.3} \cdot \left(1.0 - \frac{0.25C}{C + \exp(3.72 - 2.95C)} \right) \cdot \left(1.0 - \frac{0.7N}{N + \exp(-5.51 + 22.9N)} \right) \quad (2)$$

式中: S 为土壤中砂粒含量(%); I 为土壤中粉粒含量(%); L 为土壤中黏粒含量(%); C 为土壤有机碳含量(%); $N = 1 - S/100$ 。

1.3 统计分析方法

用 SAS6.0 软件, 对实验数据进行相关性分析(Pearson two-tailed bivariate correlations)和聚类分析(Cluster analysis)^[29]。根据相关性结果, 分别以 $\alpha = 0.05$ 和 $\alpha = 0.01$ 显著性水平的 $r_{\alpha/2}$ (42) 值为标准, 在各指标对中排除其中之一。由原来的 24 个土壤质量指标与经过筛选保留的土壤质量指标, 用聚类分析法分别作出聚类图, 以证明筛选结果的可靠性。

2 结果与讨论

2.1 土壤质量指标的相关性及筛选

体积质量是较为稳定的指标, 容易测定, 邓南荣等^[30]和项建光等^[31]都将体积质量作为土壤肥力综合评价的重要指标, 因此保留体积质量。根据相关性分析(表 1), $\alpha = 0.01$ 水平时, 查表得 $t_{0.005}$ (42) = 2.704, 以其相对应的 $r_{\alpha} = 0.385$ 为标准, 剔除指标: 非毛管孔隙、毛管孔隙、土壤通气度、土壤贮水量、最佳含水率下限、砂粒含量和渗透性。

有机质和全 N 与体积质量均有极显著相关性, 但有机质和全 N 是土壤检测和评价的重要指标, 测定方法简单, 结果准确、可信度高, 且有机质和全 N 与土壤的物理、化学和生物学指标均有相关性, 所以保留有机质和全 N 指标。由于有机质和全 N 的相关系数达 0.93, 因此, 保留有机质而剔除全 N 指标, 同时以 $\alpha = 0.01$ 水平, $r_{\alpha} = 0.385$ 为标准, 剔除指标: 粉粒含量、脱氢酶活性和微生物生物量碳(C_{mic})^[32-34]。

土壤质地是稳定性指标, 在以往的一些土壤质量评价中, 都重点考虑土壤质地^[6,30,35]。土壤质地主要通过土壤的颗粒组成表现出来, 即土壤砂粒含量、粉粒含量和黏粒含量。由于砂粒含量与土壤体积质量呈极显著相关性, 粉粒含量与土壤有机质呈极显著相关性, 所以砂粒含量和粉粒含量均被剔除, 保留黏粒含量。以 $\alpha = 0.01$ 水平, $r_{\alpha} = 0.385$ 为标准, 剔除指标: 碱性磷酸酶活性。

pH 值与黏粒含量呈极显著相关性, 但土壤酸度是较稳定指标, 是土壤质量评价的重要指标, 以往的土

表 1 指标的相关系数和显著性检验

Table 1 Correlation coefficients between various indicators and significance levels

指标	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_9	X_{10}	X_{11}	X_{12}
X_1	1.00											
X_2	-0.51**	1.00										
X_3	-0.51**	-0.02	1.00									
X_4	-0.74**	0.47**	0.63**	1.00								
X_5	0.54**	-0.24	-0.28	-0.75**	1.00							
X_6	-0.75**	0.11	0.93**	0.72**	-0.41**	1.00						
X_7	-0.41**	0.19	0.16	0.37*	-0.43**	0.25	1.00					
X_8	0.22	-0.04	-0.10	-0.08	0.15	-0.14	-0.44**	1.00				
X_9	-0.07	0.10	0.14	-0.04	0.19	0.07	-0.25	-0.24	1.00			
X_{10}	-0.03	0.22	-0.27	0.10	-0.29	-0.17	0.17	0.20	-0.38*	1.00		
X_{11}	-0.66**	0.22	0.47**	0.53**	-0.32*	0.63**	0.04	0.04	0.005	-0.06	1.00	
X_{12}	-0.17	0.17	0.10	0.24	-0.15	0.11	0.31*	0.66**	-0.10	0.25	0.09	1.00
X_{13}	0.07	-0.05	-0.01	0.03	-0.16	-0.04	-0.08	-0.11	0.16	-0.13	-0.13	-0.14
X_{14}	0.19	-0.16	-0.04	-0.03	-0.09	-0.06	-0.11	0.34*	-0.43**	0.21	0.04	0.13
X_{15}	-0.46**	0.16	0.32*	0.26	-0.23	0.37*	0.56**	-0.39**	0.13	-0.14	0.06	0.12
X_{16}	-0.50**	0.13	0.44**	0.31*	-0.19	0.48**	0.47**	-0.44**	0.25	-0.23	0.13	0.02
X_{17}	0.05	0.11	-0.09	-0.06	-0.08	-0.17	-0.05	0.15	-0.04	0.20	-0.13	0.10
X_{18}	0.10	0.12	-0.17	-0.18	0.11	-0.23	-0.31*	-0.02	-0.03	0.11	-0.20	-0.32*
X_{19}	0.05	0.003	-0.12	-0.30*	0.30*	-0.08	-0.53	0.11	0.11	-0.09	-0.01	-0.30*
X_{20}	-0.21	0.10	0.21	0.26	-0.10	0.19	0.03	-0.23	0.38**	0.23	0.10	-0.09
X_{21}	-0.09	-0.01	-0.14	-0.05	-0.05	-0.03	-0.01	0.06	0.14	-0.001	0.13	0.11
X_{22}	-0.07	0.04	0.16	0.25	-0.28	0.19	-0.12	0.22	-0.24	0.24	0.15	0.16
X_{23}	-0.38*	0.16	0.33*	0.27	-0.03	0.39**	0.25	-0.13	0.05	0.02	0.17	0.11
X_{24}	-0.36*	-0.01	0.24	0.15	-0.12	0.32*	0.49**	-0.31*	-0.06	-0.19	0.11	0.08
指标	X_{13}	X_{14}	X_{15}	X_{16}	X_{17}	X_{18}	X_{19}	X_{20}	X_{21}	X_{22}	X_{23}	X_{24}
X_{13}	1.00											
X_{14}	-0.03	1.00										
X_{15}	0.09	-0.24	1.00									
X_{16}	0.20	-0.30*	0.93**	1.00								
X_{17}	0.14	0.16	0.13	0.08	1.00							
X_{18}	0.21	0.08	0.14	0.12	0.64**	1.00						
X_{19}	0.19	0.01	-0.08	-0.03	0.13	0.49**	1.00					
X_{20}	0.50**	-0.55**	0.35*	0.46**	0.08	0.12	0.06	1.00				
X_{21}	0.15	0.02	-0.003	-0.001	-0.07	-0.20	-0.28	0.05	1.00			
X_{22}	0.09	0.44**	0.17	0.03	0.02	0.15	0.20	-0.21	-0.03	1.00		
X_{23}	0.02	-0.11	0.52**	0.64**	-0.13	-0.006	0.004	0.21	0.03	0.16	1.00	
X_{24}	0.09	-0.14	0.51**	0.54**	-0.02	-0.19	-0.05	0.23	-0.04	-0.18	0.23	1.00

注: *表示 $p=0.05$ 显著性水平, **表示 $p=0.01$ 显著性水平, $n=44$, X_1 为体积质量 (g/cm^3), X_2 为非毛管孔隙 (容积%), X_3 为毛管孔隙 (容积%), X_4 为土壤通气度 (容积%), X_5 为土壤贮水量 (m^3/hm^2), X_6 为最佳含水率下限 (%), X_7 为砂粒含量 ($2 \sim 0.05 \text{ mm}$) (%), X_8 为粉粒含量 ($0.05 \sim 0.002 \text{ mm}$) (%), X_9 为黏粒含量 ($<0.002 \text{ mm}$) (%), X_{10} 为分散系数 (%), X_{11} 为渗透性 (K_{10}) (mm/min), X_{12} 为可蚀性因子 K 值, X_{13} 为水稳性指数, X_{14} 为pH值, X_{15} 为有机质 (g/kg), X_{16} 为全N (g/kg), X_{17} 为有效P (mg/kg), X_{18} 为速效K (mg/kg), X_{19} 为阳离子交换量 (cmol/kg), X_{20} 为碱性磷酸酶活性 (mg/kg), X_{21} 为纤维素酶活性 (mg/g), X_{22} 为过氧化氢酶活 (ml/g), X_{23} 为脱氢酶活性 (mg/g), X_{24} 为微生物生物量碳 (C_{mic}) (mg/kg)。

壤质量评价中,无一例外地都选择pH作为评价指标^[30-35],且容易测定,结果可信度高,所以保留土壤pH值指标。以 $\alpha = 0.01$ 水平, $r_\alpha = 0.385$ 为标准,剔除指标:过氧化氢酶活性。

速效K测定方法和操作过程简单,重复性好,测定结果可信度高,而且本实验中与有效P和阳离子交换量都呈极显著正相关,因此保留速效K指标,以 $\alpha = 0.01$ 水平, $r_\alpha = 0.385$ 为标准,剔除指标:有效P和阳离子交换量。

另外,保留分散系数、水稳性指数、纤维素酶活性和可蚀性因子K值。可蚀性因子K值是一个综合性指标,由土壤质地和有机质含量决定,但其受砂粒含量和粉粒含量影响较大,受黏粒含量和有机质含量影响较小,所以保留该指标。

综合上述分析,最终以 $\alpha = 0.01$ 水平, $r_\alpha = 0.385$ 为标准,保留指标:体积质量、黏粒含量、分散系数、可蚀性因子K值、水稳性指数、pH值、有机质、速效K和纤维素酶活性。

同理,以 $\alpha = 0.05$ (查表得 $t_{0.025}(42) = 2.021$), $r_\alpha = 0.298$ 为标准,保留的指标有:体积质量、黏粒含量、水稳性指数、pH值、有机质、速效K和纤维素酶活性。

2.2 聚类分析

根据24个土壤质量指标,用类平均法(UPGMA)对44个土壤样品(编号为1、2、3、……、44)进行聚类分析。根据聚类分析结果和聚类树状图(图1,图中纵坐标序号代表土壤样品,横坐标表示样品间的平均距离,为无量纲,下同),将44个土壤样品分为3个类:一类:36;二类:30;三类:1、2、3、……、29、31、……、35、37、……、44。

根据显著性水平 $\alpha = 0.01$, $r_\alpha = 0.385$ 为标准,筛选的9个指标,用类平均法(UPGMA)对44个土壤样品进行聚类分析。根据聚类分析结果和聚类树状图(图2),将44个土壤样品分为5个类:一类:30;二类:4;三类:36;四类:5、7、8、9;五类:1、2、3、6、10、……、29、31、……、35、37、……、44。

根据显著性水平 $\alpha = 0.05$, $r_\alpha = 0.298$ 为标准,筛选的7个指标,用类平均法(UPGMA)对44个土壤样品进行聚类分析。根据聚类分析结果和聚类树状图(图3),将44个土壤样品分为5个类:一类:4;二类:36;三类:1、16、34、37、42、43、44;四类:2、3、11、20、25、32、35、40、41;五类:5、6、7、……、

10、12、……、15、17、18、19、21、……、24、26、……、31、33、36、38、39。

结果表明:随着指标数量的减少,土壤间的差异越大,被分的类越多,类与类之间的差异越大。可见,对不同土壤进行差异分析,并不是指标数越多越好。土壤指标过多,反而掩盖了土壤的特性,模糊了土壤间的差异,并不利于土壤质量的评价。

比较原来的24个土壤质量指标与经过筛选保留的9个土壤质量指标的聚类分析结果,后者比前者多分了2个类,且多分出的类中的土壤都属于一个采样功能区,这些功能区的土壤类型和环境都比较相近。因此,用筛选保留的9个指标对土壤进行分类,能够较好地反映土壤类别的本来状况,且更加细致和准确。

比较原来的24个土壤质量指标与经过筛选保留的7个土壤质量指标的聚类分析结果,两者差异较大。比较经过筛选保留的9个土壤质量指标与经过筛选保留的7个土壤质量指标的聚类分析结果,两者虽然都分为5个类,但在土壤样品的归类上有较大差异。因此,用筛选的7个指标进行土壤分类,并进行土壤质量评价,风险较大。

综合上述分析,用筛选保留的9个指标对土壤进行分类并进行土壤质量评价比较可靠。另外,按指标的稳定性分类,这9个指标中包括了4个稳定性指标:黏粒含量、分散系数、可蚀性因子K值和水稳性指数;3个中度稳定性指标:体积质量、pH值和有机质;2个不稳定指标:速效K和纤维素酶活性。稳定性指标和中度稳定性指标居多,保证了土壤分类和评价的可靠性。按常规指标分类方法,这9个指标中包括了5个物理指标:体积质量、黏粒含量、分散系数、可蚀性因子K值和水稳性指数;3个化学指标:pH值、有机质和速效K;1个生物学指标:纤维素酶活性。用物理、化学和生物学指标组成的指标体系,又以物理和化学指标居多,对土壤进行分类并进行评价,具有较高的可靠性。

3 结论

根据相关性分析和聚类分析,原来的24个土壤质量指标经过筛选,保留9个指标作为城市森林土壤肥力质量评价的因子,保留的指标为:体积质量、黏粒含量、分散系数、可蚀性因子K值、水稳性指数、pH值、有机质、速效K和纤维素酶活性。

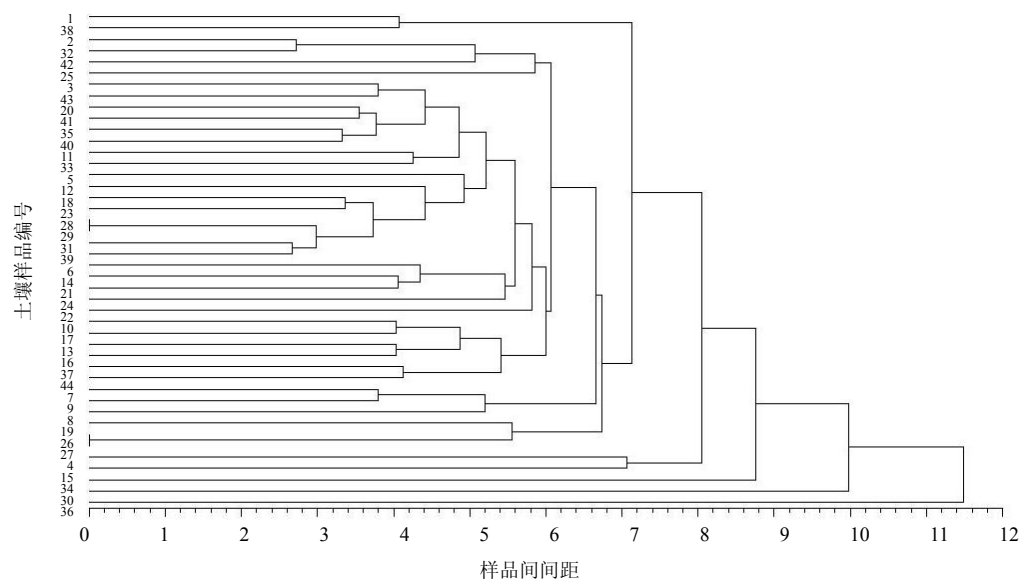


图 1 土壤样品聚类的树状图 (24 个指标)

Fig. 1 The dendrogram of soil samples cluster analysis

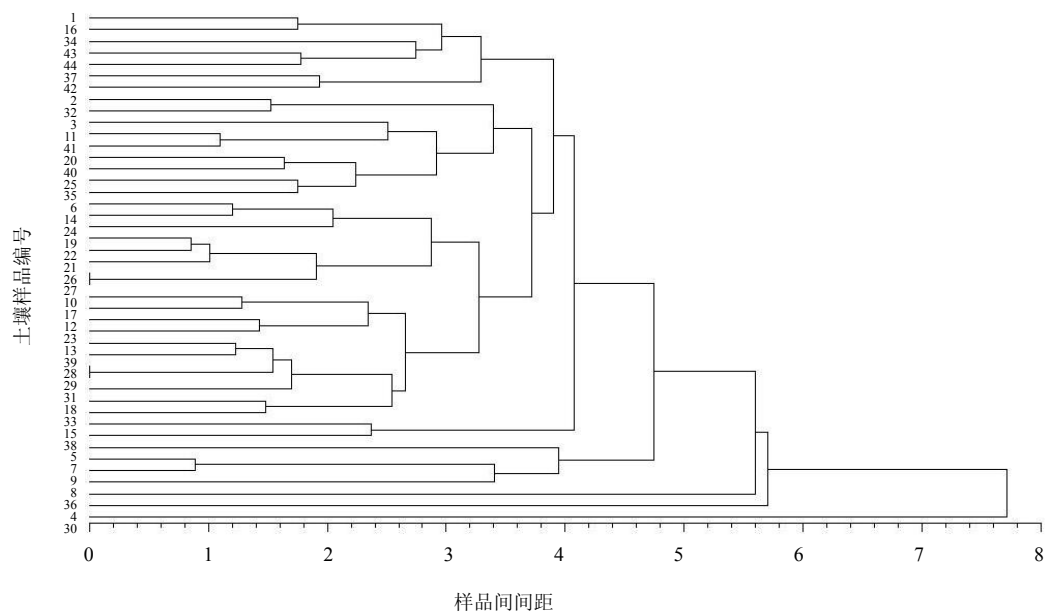


图 2 土壤样品聚类的树状图 (9 个指标)

Fig. 2 The dendrogram of soil sample cluster analysis

图 3 土壤样品聚类的树状图 (7 个指标)

Fig. 3 The dendrogram of soil sample cluster analysis

参考文献:

- [1] 杨金玲, 张甘霖, 赵玉国, 赵文君, 何跃, 阮心玲. 城市土壤压实对土壤水分特征的影响. 土壤学报, 2006, 43(1): 33-37
- [2] 陈立新. 城市土壤质量演变与有机改土培肥作用研究. 水土保持学报, 2002, 16(3): 36-39
- [3] Craul PJ. The nature of urban soils: their problems and future. *Arboricultural Journal*, 1994, 18: 275-287
- [4] 卢瑛, 龚子同, 张甘霖. 城市土壤的特性及其管理. 土壤与环境, 2002, 11(2): 206-209
- [5] 管东生, 何坤志, 陈玉娟. 广州城市绿地土壤特征及其对树木生长的影响. 环境科学研究, 1998, 11(4): 51-54
- [6] 卢瑛, 甘海华, 史正军, 刘振良. 深圳城市绿地土壤肥力质量评价及管理对策. 水土保持学报, 2005, 19(1): 153-156
- [7] 张甘霖, 卢瑛, 龚子同, 杨金玲. 南京城市土壤某些元素的富集特征及其对浅层地下水的影响. 第四纪研究, 2003, 23(4): 446-453
- [8] 章明奎, 周翠. 杭州市城市土壤有机碳的积累和特性. 土壤通报, 2006, 37(1): 36-37
- [9] 边振兴, 王秋兵. 沈阳市公园绿地土壤养分特征的研究. 土壤通报, 2003, 34(4): 284-290
- [10] 王良睦, 王文卿, 林鹏. 城市土壤与城市绿化. 城市环境与城市生态, 2003, 16(6): 180-181
- [11] 李妍, 胡红青, 刘静, 王备, 朱永官. 武汉动物园土壤特性与磷释放研究. 华中农业大学学报, 2005, 24(2): 165-168
- [12] 卢瑛, 龚子同, 张甘霖. 南京城市土壤的特性及其分类的初步研究. 土壤, 2001, 33(1): 47-51
- [13] 刘树庆. 保定市污灌区土壤的 Pb、Cd 污染与土壤酶活性关系研究. 土壤学报, 1996, 33(2): 175-182
- [14] 史长青. 重金属污染对水稻土酶活性的影响. 土壤通报, 1995, 26(1): 34-35
- [15] 杨元根, Paterson E, Campbell C. 城市土壤中重金属元素的积累及其微生物效应. 环境科学, 2001, 22(3): 44-48
- [16] 孙福军, 丁青坡, 韩春兰, 王秋兵. 沈阳市城市表土中微生物区系变化的初步研究. 土壤通报, 2006, 37(4): 768-770
- [17] 彭涛, 欧阳志云, 文礼章, 郑华. 北京市海淀区土壤节肢动物群落特征. 生态学杂志, 2006, 25(4): 389-394
- [18] 杨冬青, 高峻, 肖烈桂, 韩红霞. 城市特定生境下土壤动物的生态分布. 云南环境科学, 2005, 24(1): 22-27
- [19] Schoenholtz SH, Miegroet HVan, Burger JA. A review of chemical and physical properties as indicators of forest soil quality: challenges and opportunities. *Forest Ecology and Management*, 2000, 138: 335-356
- [20] 张华, 张甘霖. 土壤质量指标和评价方法. 土壤, 2001, 33(6): 326-330
- [21] 单奇华, 俞元春, 张金池. 城市林业土壤质量评价. 林业科技开发, 2007, 21(5): 12-15
- [22] 王辉, 张学雷, 张薇, 孙燕瓷, 陈杰. 南京市土壤集合组成及其嵌套性分析. 生态学报, 2007, 27(1): 220-226
- [23] 黄荣珍, 张金池, 林杰, 彭桂兰, 张现武. 城市水土保持生态建设思路与对策. 南京林业大学学报: 人文社会科学版, 2005, 5(2): 80-83
- [24] 单奇华, 李卫正, 俞元春, 张金池. 南京城市林业土壤可蚀性

- 及影响因素. 南京林业大学学报: 自然科学版, 2008, 32(2): 47-50
- [25] 中华人民共和国林业部科技司编. 林业标准汇编. 北京: 中国林业出版社, 1991
- [26] 刘震. 水土保持监测技术. 北京: 中国大地出版社, 2004
- [27] 周礼恺. 土壤酶学. 北京: 科学出版社, 1987
- [28] 严昶升. 土壤肥力研究方法. 北京: 农业出版社, 1988
- [29] 沈其君. SAS 统计分析. 北京: 高等教育出版社, 2005
- [30] 邓南荣, 吴志峰, 刘平, 张坚, 马燕. 城市园林绿化用地土壤肥力诊断与综合评价. 土壤与环境, 2000, 9(4): 287-289
- [31] 项建光, 方海兰, 杨意, 黄懿珍, 张琪, 赵晓艺, 奚有为. 上海典型新建绿地的土壤质量评价. 土壤, 2004, 36 (4): 424-429
- [32] 姚贤良, 程云生. 土壤物理学. 北京: 农业出版社, 1986
- [33] 单秀枝, 魏由庆, 严慧峻, 刘继芳, 张锐. 土壤有机质含量对土壤水动力学参数的影响. 土壤学报, 1998, 35(1): 1-9
- [34] Kinniburgh DG, Jackson ML, Syres JK. Adsorption of alkaline earth, transition and heavy metal cations by hydrous oxide gels of iron and aluminum. Soil Sci. Soc. Am. J., 1976, 40: 796-799
- [35] 阙文杰, 吴启堂. 一个定量综合评价土壤肥力的方法初探. 土壤通报, 1994, 25(6): 245-247

Determination of Fertility Index of Urban Forest Soil in Nanjing City

SHAN Qi-hua^{1,2}, YU Yuan-chun¹, ZHANG Jian-feng², YU Mu-kui², CHENG Xiang-rong²

(1 College of Forest Resources and Environment, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China;

2 Institute of Subtropical Forestry, Chinese Academy of Forest, Fuyang, Zhejiang 311400, China)

Abstract: It is necessary to establish the proper indicators for soil quality assessment. In this paper a method with Pearson two-tailed bivariate correlations and Cluster analysis was applied for the determination of soil quality index of urban forest soil. Urban soil samples at 0-20 cm depths were collected from the forests in Nanjing at different functional areas, and 24 soil indicators were analyzed in lab, finally 9 of soil indicators were selected to compose the minimum factor set for the fertility assessment of urban forest soil, including soil bulk density, clay content, dispersion coefficient, erodibility K values, water stable index, pH, organic matter, available potassium, and cellulase activity.

Key words: Urban forest soil, Correlations, Cluster analysis, Indicators pick