

影响城市土壤重金属污染因子的关联度分析*

吴新民^{1,2} 潘根兴¹

(1 南京农业大学农业资源与生态环境研究所, 南京 210095)

(2 池州师范专科学校化学系, 安徽池州 247100)

摘要 城市土壤深受人为活动的影响, 具有明显的重金属人为富积的特点, 认识这些土壤重金属丰度、形态与土壤理化性质及周围环境因子的关系, 有助于更好地保护和修复城市土壤生态系统。本文对南京城市土壤中 Pb、Zn、Cu、Cd 四种重金属元素的含量和形态特征进行了研究, 并用灰色系统理论方法对南京城市土壤重金属污染的影响因子进行了灰色关联度分析, 认为最主要影响因子是距工业区远近, 其次是土壤粘粒含量、pH 值, 而交通车流量、生产生活废弃物在土壤中堆埋的比例和土壤有机质对城市土壤重金属污染的影响相对较小。

关键词 城市土壤, 重金属污染, 灰色关联度分析

中图分类号 X833

城市土壤具有明显的人为扰动特征。城市工厂、居民生活排放的各种垃圾、废气、汽车尾气增加了城市土壤重金属的负荷。国外研究证明, 城市土壤中重金属元素已有不同程度累积, 并产生了一系列的环境问题^[1~4]。城市土壤污染状况对城市绿地建设、城市区域环境质量及人类健康都有十分重要的影响, 如城市园林绿化植物重金属中毒、水源污染、人体血铅过高、儿童铅中毒等。我国也有这方面的研究报道^[5~7], 如卢瑛等人^[6]对南京城市土壤与郊区土壤中 Pb 的含量进行比较研究, 结果表明城市土壤 Pb 的含量是背景值的 4~5 倍。但这些研究大都集中在研究重金属含量及污染程度方面。而对不同城市功能区重金属污染差异性, 以及产生差异性的相关因子进行分析更具有环境指导意义。本文针对这一现状, 对南京市城市土壤重金属在不同的城市功能区的含量及差异性产生进行相关因子分析, 了解它们的累积和分布规律, 以及它们在城市不同功能区的分布差异性产生的原因, 从而为合理地规划和利用城市土壤, 改造和提高城市环境质量, 更好地保护和修复城市土壤生态系统, 保障人类健康等提供重要的依据。

1 研究方法

1.1 城市土壤剖面选取和样本采集

由于人为因素的影响, 城市土壤分布往往具有非连续性、土壤层次混乱、土壤物质来源复杂等特征。土壤剖面选取和样本采集是准确把握和分析城市土壤的关键步骤之一。本研究在选取采样点时主要考虑四个方面: (1) 在城市不同功能区(老工业区、新开发区、商业区、老居民区、城市广场、风景区)设点; (2) 城市土壤人为因素干扰大, 层次混乱, 本研究分别采取 0~5 cm、5~20 cm、50 cm 以下三个土壤剖面层次的土样作为分析样本和剖面记录^[8], 同时为了使分析样本具有代表性, 每个土样均为多点混合样; (3) 对城市市民广场样本采集兼顾草坪、灌木、森林三种植被类型, 老市民广场和新市民广场, 客土填埋和废弃土填埋等成土类型; (4) 各功能区的剖面点尽可能选择具有代表性地段, 回避人工填充物(如沙层、砖瓦砾层、混凝土碎屑层、生活垃圾等), 避免分析结果的极端性。共采集分析样本 56 个, 其中老工业区采样点 3 个(南钢、扬子石化、大厂镇), 采集混合分析样本 8 个; 新开发区采样点 3 个(南京高新区、

* 江苏省自然科学基金重点项目(BK99196)资助

收稿日期: 2002-07-15; 收到修改稿日期: 2003-01-21

新月湖、苜蓿园),采集混合分析样本7个;商业区采样点5个(新街口、夫子庙、汉中门、鼓楼、南京车站),采集混合样本10个;城市广场采样点6个(鼓楼、中华门、鸡鸣寺、汉中门、中山门、午朝门),采集混合分析样本13个;风景区采样点4个(玄武湖、陵园路、雨花台、清凉山),采集混合分析样本10个;老居民区采样点4个(邓府巷、总统府、东干长巷、梅园新村),采集混合分析样本8个。除少数自然土壤采集50 cm以下的土层作比较之外,大部分城市土壤剖面分析样本均采集0~5 cm、5~20 cm两层作为分析样本。

1.2 城市土壤样本分析

土壤风干后,分别过10目、20目塑料土筛。取部分土样进一步用玛瑙研钵研磨,过100目塑料土筛,供元素全量分析使用。土壤颗粒组成分析采用比重计法,pH值测定用pH计法,有机碳测定用 $K_2Cr_2O_7-H_2SO_4$ 外加加热法^[8]。重金属元素选取典型人类活动源元素^[9]Pb、Cu、Zn、Cd作为测定对象,全量分析采用 HNO_3-HClO_4-HF 三酸消化^[8],重金属元素不同形态分析采用连续提取法^[10,11]。重金属元素样本消化液和浸提液均在TAS-986原子吸收分光光谱仪上测定。

2 结果与讨论

2.1 城市土壤重金属污染状况

对南京市城区主要土壤类型的重金属Pb、Zn、Cu、Cd分析得出,城市土壤中重金属含量高于郊区农业土壤和自然土壤。通过表1可以看出,南京市城市土壤Pb、Zn、Cu、Cd平均含量和六大功能区土壤表层(0~5 cm、5~20 cm)中平均含量都高于土壤背景值,Pb的浓度以老工业区含量最高,依次为老工业区>老居民区>商业区>开发区>其它,Zn的浓度依次为老居民区>商业区>老工业区>其它,Cu的浓度依次为老居民区>商业区>其它,Cd的浓度依次为老工业区>老居民区>其它。以新街口广场土壤重金属含量最高,其Pb、Zn、Cu、Cd含量分别为 345 mg kg^{-1} 、 565.8 mg kg^{-1} 、 157.3 mg kg^{-1} 和 1.59 mg kg^{-1} 。很显然,Pb、Cd的分布在老工业区相对较高,这与老工业区工业废气沉降有关,而Zn、Cu在老居民区相对富集,则与居民日常生活废弃物含Zn、Cu较多相联系的。差异显著性分析结果表明,南京市六大功能区土壤重金属含量存在显著性差异。

表1 南京市城市土壤重金属分布

Table 1 The distribution of heavy metals in urban soils in Nanjing

| 功能区 Zones studied | 重金属含量 Content of heavy metals (mg kg^{-1}) | | | | n |
|----------------------|---|-------------|-----------|-----------|----|
| | Pb | Zn | Cu | Cd | |
| 老工业区 | 283.8±72.1 | 218.3±76.6 | 48.9±9.6 | 2.4±0.7 | 8 |
| 开发区 | 24.4±5.2 | 164.7±41.2 | 16.3±7.7 | 0.89±0.3 | 7 |
| 商业区 | 119.8±110.2 | 334.0±145.6 | 58.2±48.9 | 0.8±0.6 | 10 |
| 城市广场 | 54.5±29.8 | 280.2±170.6 | 32.2±27.3 | 0.9±0.5 | 13 |
| 风景区 | 66.1±33.7 | 202.4±18.5 | 30.3±41.2 | 0.98±0.67 | 10 |
| 老居民区 | 141.6±67.3 | 382.6±104.5 | 80.8±45.9 | 1.65±0.65 | 8 |
| 平均值 | 117.1±103.7 | 273.7±31.6 | 39.9±39.9 | 1.13±0.68 | |
| 背景值 | 24.8 | 76.8 | 20.0 | 0.19 | |

2.2 重金属元素与土壤结合的形态分配

表2反映了不同重金属元素在土壤中不同形态分配情况,各元素都以残渣态为主。水溶态重金属毒性最强,易造成水体污染,极易被生物吸收富积。表中各元素平均水溶态含量都很低,但个别剖面点浓度高,易产生点源污染。交换态和碳酸盐结合态这两组分重金属与土壤结合较弱,最易被释放,有较大的可移动性和生物有效性,在酸性条件下有效性增大^[5]。铁锰氧化态重金属在还原条件下易溶解释放。有机结合态重金属在氧化状态下易分解释放。以上几种形态属潜在性污染物,有一定的生物有效

性。残渣态属不溶态重金属元素,它只有通过化学反应转化成可溶态物质才对生物产生影响,但它是土壤重金属污染的物质供给源。南京城市土壤的重金属元素以残渣态为主,依次为铁锰氧化结合态、有机结合态、碳酸盐结合态、交换态。不同元素、不同土壤、不同层次之间各种形态所占比例有很大差别, Pb、Zn、Cd 铁锰氧化结合态分别占 20.6%、12.2% 和 15.9%, 而 Cu 铁锰氧化态比例高达 30% 以上。Pb、Zn、Cu 有机结合态约占 6%~9%。重金属元素其它形态所占比例较少。该市有代表性的 56 个土壤样本中可浸提重金属总量与全量分析比较,可得 Pb、Zn、Cu、Cd 四种元素在土壤中各形态可浸提物总量与全量正相关,线性方程的相关系数分别为 0.995 5、0.982 2、0.896 6 和 0.924 5。

表 2 城市土壤中不同形态重金属的含量

Table 2 The content of different forms of heavy metal in urban soils

| 形态 Forms | 重金属含量 Content of heavy metals (mg kg ⁻¹) | | | |
|-------------|--|--------------------|-------------------|-------------------|
| | Pb | Zn | Cu | Cd |
| 水溶态 | 0.32±0.50(0.27) ¹⁾ | 0.32±0.14(0.12) | 0.013±0.17(0.03) | trace |
| 交换态 | 4.51±1.17(3.85) | 2.15±0.76(0.79) | 0.52±0.64(1.30) | 0.048±0.005(4.25) |
| 碳酸盐结合态 | 6.04±2.17(5.16) | 8.13±9.37(2.89) | 2.56±1.23(6.40) | 0.01±0.005(0.90) |
| 铁锰氧化物结合态 | 24.13±9.85(20.62) | 33.35±19.0(12.22) | 12.09±13.79(30.2) | 0.18±0.05(15.93) |
| 有机结合态 | 9.34±4.32(7.90) | 16.30±8.23(6.96) | 3.42±3.58(8.60) | 0.012±0.04(1.04) |
| 残渣态 | 91.41±109.9(62.2) | 238.17±115.5(77.5) | 21.26±25.44(56.5) | 0.89±0.51(78.9) |

1) 括号内为其所占总量的百分比(%)

2.3 影响城市土壤重金属分布的灰色关联度分析

通过表 1、表 2 可以看出,城市土壤重金属污染在不同的功能区差异显著,然而在同一功能区差异也很大,如在商业区、城市广场、风景区、老居民区不同的样点区内相差可达 1 倍。说明城市土壤重金属含量除了与城市功能有关外,还与其它因素有关。为了找到影响城市土壤重金属分布的主要因子,本研究应用灰色关联度分析方法,对影响城市土壤重金属分布的内因和外因与重金属含量进行灰色关联分析。

2.3.1 影响城市土壤重金属分布的因子 影响城市土壤重金属分布的因素很多,归纳起来可分两大类:一类是土壤内因,即土壤理化性质对外来重金属元素的吸收固定和累积作用,另一类是人类活动添加到城市土壤中的重金属元素数量。土壤理化性质对外来重金属元素的吸收固定和累积作用的因子有土壤有机质、土壤粘粒含量和 pH 值;人类活动添加到城市土壤中的重金属元素数量影响因子比较复杂,主要有城区降尘、降雨和生产生活废弃物堆放,所以选择距工业区远近、交通车流量、生产生活废弃物堆放程度作为外源重金属元素的影响因子。对这些因子按 1~10 作等级评价,形成了土壤有机质、粘粒含量、pH 值、距工业区远近、交通车流量、生产生活废弃物堆埋程度等六大城市土壤重金属含量影响因子。若设这六大因子分别为 X_1 、 X_2 、 X_3 、 X_4 、 X_5 、 X_6 , 则 X_1 表示土壤有机质含量(g kg^{-1}), X_2 表示土壤粘粒含量(%), X_3 表示 pH 数值, X_4 表示距工业区远近的相对距离(以剖面点所在行政区工业产值^[2]与剖面点距工业区距离(km)的比值为依据,取无量纲(初值化)值 0~10), X_5 表示相对交通车流量(以距剖面点 25 m 内每小时车流量的调查数据为依据,取无量纲(初值化)值 1~10), X_6 表示土壤中生产生活废弃物所占比例(以各土壤剖面中生产生活废弃物占土壤重量百分比为依据,取无量纲(初值化)值 1~10)。因剖面较多,在每个功能区随机选取 2 个剖面表层重金属含量作为代表进行分析,设剖面 1~12 分别代表南钢公司、扬子石化、梅园新村、鸡鸣寺、鼓楼广场、夫子庙、苜蓿园、新街口、邓府巷、火车站、玄武湖、雨花台,得影响因子矩阵(表 3)。

表 3 影响城市土壤重金属含量的主要因子

Table 3 The main factors influencing the contents of heavy metal in urban soils

| 剖面号 Profile No. | 因子 Factors | | | | | |
|--------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| | X ₁ | X ₂ | X ₃ | X ₄ | X ₅ | X ₆ |
| 1 | 23.45 | 30.96 | 7.71 | 10.00 | 5.43 | 3.00 |
| 2 | 24.14 | 28.87 | 7.80 | 9.38 | 4.58 | 3.50 |
| 3 | 55.42 | 31.25 | 7.34 | 2.38 | 7.12 | 8.00 |
| 4 | 38.17 | 24.35 | 7.68 | 2.88 | 9.14 | 10.00 |
| 5 | 19.16 | 22.76 | 8.04 | 2.94 | 6.79 | 2.50 |
| 6 | 37.94 | 20.92 | 7.70 | 1.97 | 8.24 | 7.00 |
| 7 | 32.63 | 22.79 | 8.03 | 1.74 | 4.08 | 5.00 |
| 8 | 53.03 | 26.42 | 7.89 | 3.46 | 10.00 | 6.50 |
| 9 | 49.54 | 22.48 | 7.89 | 2.08 | 3.47 | 9.00 |
| 10 | 29.43 | 23.15 | 7.62 | 3.33 | 6.36 | 4.50 |
| 11 | 41.86 | 21.53 | 7.53 | 2.73 | 2.14 | 2.00 |
| 12 | 31.34 | 37.25 | 5.22 | 1.50 | 1.07 | 1.00 |

注: X₁、X₂、X₃、X₄、X₅、X₆ 分别表示土壤有机质含量(g kg⁻¹)、土壤粘粒含量(%)、土壤 pH 值、距工业区远近的相对距离、相对交通车流量、土壤中生产生活废弃物比例

从表 3 可以看出, 以上 6 个因子均与土壤剖面重金属含量变化有一定关系, 然而哪些因子是起主导作用呢? 将它们与重金属含量作关联分析, 搞清楚各因子的主次关系, 对于城市土壤生态改良和修复是很有必要的。

2.3.2 城市土壤重金属污染评价 为了定量刻画城市土壤污染程度, 对土壤重金属污染现状进行了评价。若城市土壤剖面号为 j , 剖面重金属污染物为 i , 则根据内梅罗公式 $P_{ij} = [[(\text{Max}C_i / S_{ij})^2 + (1/n \sum C_i / S_{ij})^2] \times 0.5]^{0.5}$, 其中 P_{ij} 为 j 剖面综合污染指数, C_i 为 i 重金属实测浓度, S_{ij} 为环境背景值, i 为重金属种类 ($n = 4$), 得表 4。

表 4 城市土壤污染指数

Table 4 The pollution indexes of urban soils

| 剖面号 Profile No. | 重金属含量 Content of heavy metals (mg kg ⁻¹) | | | | P _{ij} ¹⁾ |
|--------------------|--|-----|-----|------|-------------------------------|
| | Pb | Zn | Cu | Cd | |
| 1 | 235 | 263 | 39 | 2.84 | 11.8 |
| 2 | 250 | 176 | 24 | 2.71 | 11.2 |
| 3 | 175 | 348 | 119 | 2.21 | 9.64 |
| 4 | 80 | 523 | 106 | 1.91 | 8.37 |
| 5 | 30 | 178 | 26 | 1.21 | 4.91 |

续表

| 剖面号 Profile No. | 重金属含量 Content of heavy metals (mg kg ⁻¹) | | | | P _{ij} ¹⁾ |
|--------------------|--|-----|-----|------|-------------------------------|
| | Pb | Zn | Cu | Cd | |
| 6 | 88 | 435 | 51 | 1.33 | 5.947 |
| 7 | 20 | 201 | 26 | 0.34 | 2.17 |
| 8 | 345 | 566 | 157 | 1.60 | 11.8 |
| 9 | 153 | 421 | 77 | 2.21 | 9.49 |
| 10 | 158 | 331 | 59 | 0.34 | 5.25 |
| 11 | 70 | 308 | 23 | 0.59 | 3.44 |
| 12 | 58 | 226 | 23 | 0.19 | 3.12 |

1) P_{ij} 为 j 剖面综合污染指数, 其中 i 为重金属污染物

2.3.3 影响城市土壤重金属含量因子的关联度分析 因子分析当前普遍采用统计学的回归分析方法, 它一般具有较高的精度和置信度, 但是这种方法一是需要大量完备连续的信息资料, 二是要求数据分布是线性的或者是典型的, 三是计算方法工作量大, 且相关系数对数据变化的灵敏度高, 有可能出现反常的结论^[13]。而灰色系统理论是在信息不是很完备或缺损的情况下, 对系统进行量化处理, 弥补信息的不足, 以得到较精确的分析结果^[13]。运用城市土壤重金属污染模型, 对南京市城市土壤重金属污染影响因子进行分析, 污染指数与影响因子的边界是清楚的, 但影响因子信息不是很完备, 也不连续, 且因子交叉影响, 对重金属污染指数作用的关系直观上不清楚。因此本文试图用灰色关联分析方法进行因子分析。

对表 4 中的数据进行无量纲(初值化)处理, 即 $|X_{ik}/X_{i1}|$, 其中 i 为影响因子 1~6, k 为剖面点 1~12, X_{i1} 为剖面点 1 的数值, 可得表 5。

表 5 影响城市土壤重金属污染因子的无量纲数值

Table 5 Non-dimensional numbers of the factors affecting the heavy metal pollution in urban soils

| 剖面号 Profile No. | 因子 Factors | | | | | |
|--------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| | X ₁ | X ₂ | X ₃ | X ₄ | X ₅ | X ₆ |
| 1 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 |
| 2 | 1.026 | 0.935 | 1.012 | 0.938 | 0.852 | 1.167 |
| 3 | 2.340 | 1.000 | 0.952 | 0.238 | 1.315 | 2.667 |
| 4 | 1.626 | 0.774 | 0.996 | 0.288 | 1.685 | 3.333 |
| 5 | 0.817 | 0.742 | 1.043 | 0.294 | 1.259 | 0.833 |
| 6 | 1.613 | 0.677 | 0.999 | 0.197 | 1.519 | 2.333 |
| 7 | 1.387 | 0.742 | 1.042 | 0.174 | 0.759 | 1.667 |
| 8 | 2.255 | 0.839 | 1.023 | 0.346 | 1.852 | 2.167 |
| 9 | 2.106 | 0.710 | 1.023 | 0.208 | 0.648 | 3.000 |
| 10 | 1.251 | 0.742 | 0.988 | 0.333 | 1.185 | 1.500 |
| 11 | 1.783 | 0.710 | 0.977 | 0.273 | 0.389 | 0.667 |
| 12 | 1.332 | 1.194 | 0.677 | 0.150 | 0.185 | 0.333 |

注: X₁、X₂、X₃、X₄、X₅、X₆ 分别表示无量纲的土壤有机质、土壤粘粒、pH、距工业区远近的相对距离、相对交通车流量、土壤中生产生活废弃物比例

由于是分析土壤重金属污染的关联度,因此将污染指数 P_{ij} 作为参考数列 $X_0, X_0 = P_{ij}/P_{11} = P_{ij}/11.8$, 而将 $X_1, X_2, X_3, X_4, X_5, X_6$ 作为比较数列, 得 $|X_0(k) - X_i(k)|$ 数列如表 6。对于 X_0 在 k 剖面的关联系数 $\xi_i(k)$ 有:

$$\xi_i(k) = (\text{Min}_i \text{Min}_k |X_0(k) - X_i(k)| + \lambda \text{Max}_i \text{Max}_k |X_0(k) - X_i(k)|) / (|X_0(k) - X_i(k)| + \lambda \text{Max}_i \text{Max}_k |X_0(k) - X_i(k)|) \quad (1)$$

式中, $\xi_i(k)$ 为 k 剖面污染指数与 i 因子的灰色关联系数, λ 为分辨系数, $X_i(k)$ 为 k 剖面 i 因子的影响值。

表 6 灰色关联系数计算表 A
Table 6 The calculation A of grey-relational analysis

| 剖面号 Profile No. | $ X_0 - X_1 $ | $ X_0 - X_2 $ | $ X_0 - X_3 $ | $ X_0 - X_4 $ | $ X_0 - X_5 $ | $ X_0 - X_6 $ |
|-----------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| 1 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 2 | 0.076 | 0.014 | 0.063 | 0.012 | 0.097 | 0.218 |
| 3 | 1.523 | 0.183 | 0.135 | 0.579 | 0.498 | 1.850 |
| 4 | 0.916 | 0.065 | 0.287 | 0.421 | 0.976 | 2.624 |
| 5 | 0.401 | 0.326 | 0.627 | 0.122 | 0.843 | 0.417 |
| 6 | 1.109 | 0.174 | 0.495 | 0.306 | 1.015 | 1.830 |
| 7 | 1.203 | 0.558 | 0.858 | 0.009 | 0.575 | 1.483 |
| 8 | 1.255 | 0.161 | 0.023 | 0.654 | 0.852 | 1.167 |
| 9 | 1.302 | 0.095 | 0.219 | 0.596 | 0.156 | 2.196 |
| 10 | 0.806 | 0.297 | 0.543 | 0.112 | 0.740 | 1.055 |
| 11 | 1.491 | 0.418 | 0.685 | 0.019 | 0.097 | 0.375 |
| 12 | 1.068 | 0.929 | 0.413 | 0.114 | 0.079 | 0.069 |

注: $X_0 = P_{ij}/P_{11} = P_{ij}/11.8$; $X_1, X_2, X_3, X_4, X_5, X_6$ 分别表示无量纲的土壤有机质、土壤粘粒、pH、距工业区远近的相对距离、相对交通车流量、土壤中生产生活废弃物比例

由表 6 可得: $\text{Min}_i \text{Min}_k |X_0(k) - X_i(k)| = 0.000 \quad (2)$

$$\text{Max}_i \text{Max}_k |X_0(k) - X_i(k)| = 2.572 \quad (3)$$

在(1)式中 λ 为分辨系数, 其值越小, 分辨率越高。一般令 $\lambda = 0.5$, 得:

$$\xi_i(k) = (0.000 + 0.5 \times 2.572) / (\Delta X_{ik} + 0.5 \times 2.572) \quad (4)$$

由此分别计算各剖面的灰色关联系数如表 7。

表 7 灰色关联系数计算表 B
Table 7 The calculation B of grey-relational analysis

| 剖面号 Profile No. | $\xi_i(k)^{1)}$ | | | | | |
|--------------------|-----------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| | $\xi_1(k)$ | $\xi_2(k)$ | $\xi_3(k)$ | $\xi_4(k)$ | $\xi_5(k)$ | $\xi_6(k)$ |
| 1 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 |
| 2 | 0.871 | 0.974 | 0.892 | 0.978 | 0.841 | 0.703 |
| 3 | 0.253 | 0.738 | 0.792 | 0.471 | 0.508 | 0.218 |
| 4 | 0.360 | 0.888 | 0.642 | 0.550 | 0.345 | 0.164 |
| 5 | 0.562 | 0.612 | 0.451 | 0.808 | 0.379 | 0.552 |
| 6 | 0.317 | 0.747 | 0.510 | 0.627 | 0.337 | 0.220 |

续表

| 剖面号 Profile No. | $\xi_i(k)^{1)}$ | | | | | |
|--------------------|-----------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| | $\xi_1(k)$ | $\xi_2(k)$ | $\xi_3(k)$ | $\xi_4(k)$ | $\xi_5(k)$ | $\xi_6(k)$ |
| 7 | 0.300 | 0.480 | 0.375 | 0.982 | 0.472 | 0.258 |
| 8 | 0.291 | 0.762 | 0.957 | 0.441 | 0.377 | 0.306 |
| 9 | 0.283 | 0.845 | 0.702 | 0.464 | 0.767 | 0.190 |
| 10 | 0.390 | 0.634 | 0.487 | 0.822 | 0.410 | 0.328 |
| 11 | 0.257 | 0.552 | 0.429 | 0.965 | 0.841 | 0.579 |
| 12 | 0.325 | 0.357 | 0.555 | 0.818 | 0.867 | 0.882 |

1) $\xi_i(k)$ 为 k 剖面污染指数与 i 因子的灰色关联系数

由表 7 可以进行关联度的计算。令灰色关联度为 R , 则:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} \xi_i(k) / n}{\quad} \quad (5)$$

由 (5) 式可得各因素与土壤剖面重金属污染的灰色关联度 $R_1 = 0.434$, $R_2 = 0.716$, $R_3 = 0.649$, $R_4 = 0.744$, $R_5 = 0.595$, $R_6 = 0.450$, 即土壤有机质、粘粒含量、pH 值、距工业区远近、交通车流量、生产生活废弃物堆埋程度六大因子对城市土壤重金属含量产生的影响系数分别为 0.434、0.716、0.649、0.744、0.595、0.450。且 $R_4 > R_2 > R_3 > R_5 > R_6 > R_1$, 表明距工业区远近是影响城市土壤重金属含量最主要的因子, 其次是土壤粘粒含量和土壤 pH 值, 这与土壤粘粒吸附和在碱性条件下重金属淀积有关。交通车流量往往被认为是城市土壤重金属污染的主要原因之一, 但南京市城市建设迅速, 近几年主要交通要道都已建起立交桥, 周围绿化带都是客土回填, 加上燃油质量管理和交通工具排污管理, 使其对土壤重金属污染的影响相对较小, 但 R 值仍达 0.595, 作用仍不可忽视。土壤有机质和生产生活废弃物堆埋程度两因子对土壤重金属污染的影响较小, 概因南京城区土壤重金属污染指数决定因素是 Pb、Cd 含量, 生产生活废弃物中较多的 Cu、Zn 对土壤重金属污染指数影响较小的缘故。土壤重金属形态分配与其全量有一定的线性关系, 所以其关联度分析在此省略。

3 结 论

1. 城市土壤重金属污染较为严重, Pb、Zn、Cu、Cd 四种重金属元素在不同区域都超过土壤背景值, 城市土壤重金属形态特征分析表明, 城市土壤重金属各种不同形式的有效态含量很高, 潜在性危险大。

2. 城市土壤重金属污染分布不均匀。以老工业区含量最高, 依次为老居民区、商业区、风景区、城市广场、开发区, 区内分布也不均衡, 同一区内不同样点重金属含量相差可达一倍以上。

3. 城市土壤重金属污染的各影响因子的灰色关联度分析表明, 距工业区远近、土壤粘粒含量、土壤 pH 值是主要影响因子, 交通车流量、生产生活废弃物堆埋程度、土壤有机质对城市土壤重金属污染的影响相对较小。

参考文献

1. De Kimple C R, Jean L M. Urban soil management: A growing concern. *Soil Sci.*, 2000, 165(1): 31~ 40
2. Markus J A, McBatney A B. An urban soil study: Heavy metals in Glebe, Australia. *Aust. J. Soil Res.*, 1996, 34: 453~ 465
3. Pouyat R V, McDonnell M J. Heavy metal accumulations in forest soils along an urban-rural gradient in southeast New York, USA. *Water Air and Soil Pollution*, 1991, 57(8): 797~ 807
4. Lottemoser B G. Natural enrichment of topsoils with chromium and other heavy metals, Port Macquarie, New South Wales, Australia. *Aust. J. Soil Res.*, 1997, 35: 1165~ 1176
5. 杨元根, Paterson E, Campbell C. 城市土壤中重金属元素的积累及微生物效应. *环境科学*, 2001, 22(3): 44~ 48
6. 卢瑛, 龚子同, 张甘霖. 南京城市土壤 Pb 的含量及其化学形态. *环境科学学报*, 2002, 22(2): 156~ 160

7. 马建华, 张丽, 李亚丽. 开封市城区土壤性质与污染的初步研究. 土壤通报, 1999, 30(2): 93~ 96
8. 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业科技出版社, 1999. 1~ 9, 13, 106~ 109, 116~ 119, 205~ 226
9. Ratha D S, Sahu B K. Source and distribution of metals in urban soil of Bombay, India, using multivariate statistical techniques. Environmental Geology, 1993, 22: 276~ 285
10. 蒋延惠, 胡霭堂, 秦怀英. 土壤锌、铜、铁、锰形态区分方法的选择. 环境科学学报, 1990, 10(3): 280~ 286
11. Tessler A, Campbell P G C, Blsson M. Sequential extraction procedures for the speciation of particulate trace metals. Analytical Chemistry, 1979, 51(7): 844~ 851
12. 南京市统计局编. 南京年鉴(2000). 北京: 中国统计出版社, 2001
13. 邓聚龙. 灰色系统基本方法. 武汉: 华中理工学院出版社, 1987

THE CORRELATION ANALYSIS BETWEEN THE CONTENT OF HEAVY METALS AND THE FACTORS INFLUENCING THE POLLUTION OF HEAVY METALS IN URBAN SOILS IN NANJING CITY

Wu Xian-min^{1,2} Pan Gen-xing¹

(1 Institute of Resources Ecosystem and Environment for Agriculture, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)

(2 Chizhou Junior Teachers College, Chizhou, Anhui 247100, China)

Summary

The urban soils are affected greatly by human activity and characterized by significantly anthropogenic enhancement of heavy metals. It will be helpful for us to protect and to remedy the ecosystem of urban soils better if we are learn the relation between the abundance and the fom of heavy metals in soil with the physical and chemical properties of soils and the factors of surrounding environment. This study was conducted to examine the content and the forms of heavy metals in urban soils in Nanjing, applying the theory of grey system to analyze the factors influencing the pollution of heavy metals. Such factors as soil organic matter content, soil clay content, soil pH, the distance from industrial zone, the automobile flow, and the fraction of residue in soils were concerned in this paper. Grey relational analysis showed that the most important factor is the distance from industrial zone. The factors such as soil clay content and soil pH are also important. Other factors are relatively unimportant.

Key words Urban soils, Heavy metal pollution, Grey-relational analysis