

南通市城市边缘带土壤重金属污染现状及评价

黄辉^{1,2}, 檀满枝², 周峰², 陈杰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 土壤与农业可持续发展国家重点实验室(中国科学院南京土壤研究所), 南京 210008)

摘要: 通过对不同土地利用方式下的7个样区进行系统的采样测定, 对南通市城市边缘带土壤重金属富集与污染状况进行了分析与评价。结果显示, 研究区土壤未发生明显的重金属污染。但3个样区的土壤有轻度的重金属污染现象, Zn是发生富集最普遍的元素, 约76%的样点土壤Zn富集指数 >1 , 18%的样点土壤出现Zn的轻度污染。Cu、Pb等重金属元素导致的污染也在零星样点被发现。方差分析表明, 土地利用方式不是导致研究区土壤重金属含量空间差异的主要因素, 而土壤类型、样区空间环境与土壤重金属含量及富集、污染有相对密切的关系。

关键词: 重金属; 土壤污染; 城市边缘带; 南通

中图分类号: X53

随着我国城市化、工业化进入快速发展阶段, 城市及其周边地区资源、生态与环境压力日益显现^[1]。作为城市-乡村经济活动交互作用界面, 城市边缘带土地利用类型的多样性、地表结构的复杂性及高度可变性, 使这一特殊的经济、地理区域土壤资源的保护、利用与管理带来严峻挑战。一方面, 城市边缘带作为城市生活与生产资料的“源”, 其城郊型农业是鲜活农产品的重要来源。在城市化、工业化进程中, 城市边缘带土壤资源快速萎缩、农业集约化程度不断提高、土壤利用强度日益加大, 农化产品的过量施用导致有害物质在土壤中积累的现象相当普遍。另一方面, 城市边缘带也是城市及工业“三废”物质排放的“汇”。来自工业、农业、交通以及城市生活多重环境压力下, 城市边缘带土壤健康质量明显下降, 土壤中持久性毒害物质明显积累, 城郊农产品品质以及对人体健康的危害受到广泛关注^[2-8]。

南通市位于江苏省东南部“黄金海岸”和“长江黄金水道”结合部, 气候温和, 雨水充沛, 境内地势平坦, 河网密布, 土壤肥沃, 农业历史悠久, 是传统的农业大市和江苏省主要粮食产区, 农产品及加工品在对外贸易中一直占到近2/3比重。由于南通市自然条件优越、生态环境良好, 是发展高效、优质、无公害、绿色农业的理想地区。然而, 由于近年来城市化和工业化的迅速发展, 大量工厂、企业纷纷落户城市边缘带, 加之城郊型集约农业生产过程中农化产品投入不断加大, 污肥施用、污水灌溉活动依然存在, 可能对城市

边缘带环境质量和生态健康产生不利影响。本研究以南通市城市边缘带土壤环境质量为研究对象, 通过对7个样区4种不同利用方式下的土壤进行系统的采样分析, 旨在摸清城市边缘带土壤重金属污染的现状并进行初步评价, 以期城市边缘带土地利用规划、生态环境建设以及绿色农业、优质特色农业基地布局提供决策依据。

1 研究区概况与样区设计

1.1 研究区概况

南通市(东经 $120^{\circ}21' \sim 121^{\circ}55'$, 北纬 $31^{\circ}41' \sim 32^{\circ}43'$)面积 8001 km^2 , 其中市区 355 km^2 , 建成区 65 km^2 。本文研究区南通市区, 为典型的农业型城市边缘带, 除城郊居民区及零散分布的独立工矿用地外, 土地利用方式以农业生产为主, 水稻与小麦、油菜、蚕豆轮作以及蔬菜为主要种植作物。研究区土壤多发育于长江及其支流冲积、沉积母质, 普遍具石灰反应, 土壤发育幼年性特征明显, 发生学类型比较单一, 主要为潮土类, 灰潮土亚类, 包括泡沙土、高沙土、夹沙土、菜园土和灰泥土等土属。

1.2 样区设计

根据1:5万南通市地形图、1:10万南通市郊区土壤图和基于SPOT卫星遥感影像(2003年10月)解译的土地利用现状图, 结合相关文字资料和现场调查访问信息, 在综合考虑土壤分布、发生类型、人为活动历史、利用现状以及与城市建成区、交通干道以及工

①基金项目: 中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX3-SW-427)和国家自然科学基金重点项目(40235054)资助。

* 通讯作者 (pangnengxing@yahoo.com.cn)

作者简介: 黄辉(1980—)男, 江苏泰兴人, 硕士研究生, 主要从事现代地表过程及土壤环境质量研究。E-mail: huanghuiqqnj@163.com

业设施距离等时空因素的基础上,在研究区内陈桥乡、幸福乡、唐闸镇、钟秀乡、狼山镇、新开镇以及南通农场共设置面积不等的典型土壤样区7个(图1),样区基本覆盖了南通市城市边缘带有代表性的土壤与土地利用类型。

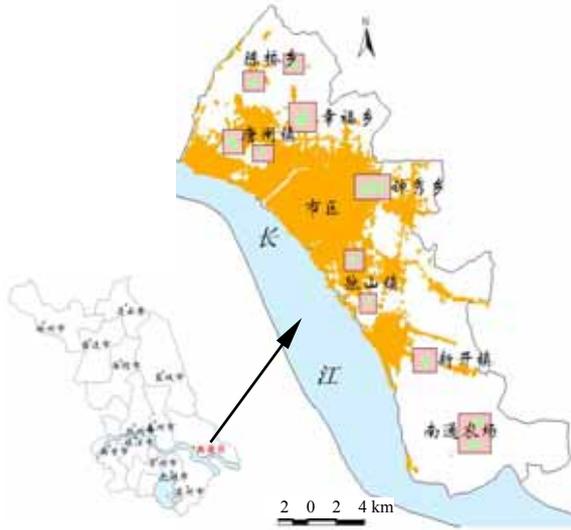


图1 研究区地理位置及土壤样区
Fig. 1 Geographic location map of the studied area and the soil sampling zone

2 样品采集与测试分析

2.1 样品采集

各样区分别采样,采用等距格网(200 m × 200 m)法布设样点。7个样区共采集土壤表层(0~20 cm)5 m

对角线混合样品121个。另设置典型土壤标准剖面9个,剖面样品分层采集。样点GPS定位并标识于GIS环境下的研究区综合信息图,样点所在地土壤类型、利用现状、耕作历史、物质投入以及周边潜在污染源情况录入样区数据库。土壤样品自然风干后研磨,弃除土壤侵入物,研磨过100目尼龙筛备用。

2.2 分析方法

称取过100目筛的土壤样品0.2 g左右放入铂金坩锅中,用优级纯硝酸-氢氟酸-高氯酸消解用于重金属Zn、Cu、Cr、Pb、Cd的全量分析。其中,全量Cd采用石墨炉原子吸收分光光度法测定;全量Zn、Cu、Cr、Pb采用火焰原子吸收分光光度法测定。具体规范见《土壤农业化学分析方法》^[9]。

2.3 土壤重金属污染评价方法

2.3.1 评价标准 土壤重金属评价分别采用研究区土壤重金属含量自然背景值^[10]和国家一级标准(为保护区域自然生态,维持自然背景的土壤环境质量的限值)为参照标准(表1)。当评价标准为自然背景值时,相应的评价结果称之为元素富集^[11],当以国家一级标准为评价标准时,称之为元素污染。

2.3.2 评价方法 采用单因子指数法(式1)和综合指数法(式2),分别表征土壤单一重金属元素富集与污染状况以及所测5种重金属的复合污染状况。

$$P_i = C_i / S_i \quad (1)$$

式(1)中, P_i 为土壤中重金属*i*的单因子指数, C_i 为土壤中重金属*i*的实测浓度, S_i 为土壤中重金属*i*的评价标准。

表1 南通市表层土壤重金属自然背景值和国家土壤环境质量一级标准值(mg/kg)

Table 1 Natural Background of heavy metals of the surface soil of Nantong and Grade I Criteria of the State Soil Environmental Quality Standard

项目	Cd	Cr	Cu	Pb	Zn
背景值	0.182	57.14	24.06	25.32	79.71
一级标准	0.20	90	35	35	100

综合指数采用国内相关研究常用的内梅罗(N.C.Nemerow)指数计算:

$$P = \sqrt{\frac{\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_i\right)^2 + (\max(P_i))^2}{2}} \quad (2)$$

式(2)中, P_i 为土壤中各种所测重金属的单因子指数平均值, $\max(P_i)$ 为土壤中各重金属元素单因子指数的最大值。当评价参照标准采用研究区自然背景值时,上述2式的计算结果分别定义为土壤重金属单一和综合富集指数;当评价参照标准为国家一级标准时,则

分别为单一和综合污染指数。

2.3.3 质量分级标准 一般 $P_i \leq 1$,无富集(无污染); $1 < P_i \leq 2$,轻度富集(轻污染); $2 < P_i \leq 3$,中度富集(中度污染); $P_i > 3$,过度富集(严重污染)。

3 结果与讨论

3.1 研究区土壤重金属含量描述性统计分析

各样区土壤样品实验室分析结果(表2)显示,南通市城市边缘带不同样点土壤中各种重金属含量不高且在空间上差异不大,重金属含量的变异系数在19.9%

~ 39.9% 之间, 总体上未显现重金属元素以外源污染形式进入土壤环境的明显特征。对应于研究区土壤环境背景值, 所测 5 种重金属含量中以 Zn 的平均含量 (90.0 mg/kg, 变幅 64.7 ~ 180.8 mg/kg) 相对较高, Cu (21.0 mg/kg, 变幅 9.0 ~ 63.3 mg/kg) 和 Cr (51.3

mg/kg, 变幅 35.1 ~ 108.9 mg/kg) 次之, Pb (16.9 mg/kg, 变幅 8.2 ~ 76.9 mg/kg) 和 Cd (0.11 mg/kg, 变幅 0.05 ~ 0.22 mg/kg) 的含量则相对较低。在上述 5 种重金属元素中, Pb 在样点土壤中的含量差异最大, 最高含量约为最低含量的 9 倍, 变异系数高达 39.9%。

表 2 研究区土壤环境富集指数的描述性统计 (mg/kg)

Table 2 Descriptive statistics of heavy metal contents in soils of Peri-urban Nantong

采样地区	样本数	项目	Cr	Cu	Pb	Zn	Cd
南通农场	18	范围值	41.8 ~ 108.9	9.0 ~ 28.5	8.2 ~ 23.6	66.4 ~ 180.8	0.05 ~ 0.21
		平均值	53.9	21.8	14.7	98.5	0.12
新开镇	10	范围值	47.3 ~ 78.1	21.6 ~ 29.5	20.4 ~ 76.9	70.1 ~ 100.6	0.10 ~ 0.14
		平均值	58.5	25.2	29.4	88.7	0.12
狼山镇	11	范围值	37.1 ~ 97.9	15.2 ~ 56.1	11.9 ~ 20.3	69.0 ~ 99.5	0.07 ~ 0.13
		平均值	50.8	21.6	18.0	83.2	0.11
幸福乡	18	范围值	40.8 ~ 88.1	15.1 ~ 23.0	11.1 ~ 17.2	64.7 ~ 100.6	0.06 ~ 0.15
		平均值	51.6	18.3	13.4	80.9	0.10
陈桥乡	15	范围值	47.2 ~ 63.2	17.7 ~ 25.4	12.8 ~ 22.3	71.7 ~ 109.4	0.08 ~ 0.22
		平均值	53.3	20.8	16.3	90.3	0.13
唐闸镇	14	范围值	36.6 ~ 76.0	16.5 ~ 28.6	12.1 ~ 24.3	82.0 ~ 162.9	0.09 ~ 0.19
		平均值	50.2	24.2	18.9	103.4	0.13
钟秀乡	35	范围值	35.1 ~ 68.9	14.2 ~ 63.3	10.7 ~ 24.9	64.7 ~ 141.4	0.07 ~ 0.13
		平均值	47.1	19.4	15.1	87.4	0.09
全区	121	范围值	35.1 ~ 108.9	9.0 ~ 63.3	8.2 ~ 76.9	64.7 ~ 180.8	0.05 ~ 0.22
		平均值	51.3	21.0	16.9	90.0	0.11
		标准差	10.9	6.4	6.7	17.9	0.03
		变异系数(%)	21.2	30.3	39.9	19.9	27.8

3.2 土壤重金属富集与污染分析与评价

以背景值为评价标准时, 南通市城市边缘带不同样区的平均土壤重金属综合富集指数为 0.99, 说明各样区土壤重金属含量总体上极其接近其自然背景值。7 个样区中, 唐闸镇、新开镇及南通农场 3 个样区土壤重金属平均综合富集指数 > 1, 分别为 1.13、1.09 和 1.06, 表明上述 3 个样区可能出现外源重金属元素在

土壤中的轻度富集 (表 3)。

研究区土壤中各重金属元素的平均单因子富集指数从大到小依次为 Zn > Cr > Cu > Pb > Cd。其中, Zn 在研究区土壤中的平均富集指数为 1.13, 7 个样区平均富集指数也全部 > 1, 变幅在 1.01 ~ 1.30 之间。除 Zn 以外的其他 4 种重金属元素在研究区中的平均单因子富集指数都 < 1, 但 Cu 在 25.6% 的样点土壤中富集

表 3 南通市城市边缘带土壤重金属富集指数

Table 3 Enrichment indices of heavy metals in soils of Peri-urban Nantong

采样地区	样本数	单因子富集指数					综合富集指数
		Cr	Cu	Pb	Zn	Cd	
南通农场	18	0.94	0.91	0.58	1.24	0.64	1.06
新开镇	10	1.02	1.05	1.16	1.11	0.66	1.09
狼山镇	11	0.89	0.90	0.71	1.04	0.58	0.94
幸福乡	18	0.90	0.76	0.53	1.01	0.55	0.89
陈桥乡	15	0.93	0.87	0.65	1.13	0.70	1.00
唐闸镇	14	0.88	1.00	0.74	1.30	0.68	1.13
钟秀乡	35	0.82	0.80	0.60	1.10	0.50	0.94
全区	121	0.90	0.87	0.67	1.13	0.60	0.99

指数>1, Cr、Cd、Pb 3种重金属元素出现富集的样点比例分别为 15.7%、3.3% 和 2.5%。需要指出的是, 在 121 个样点土壤中, Pb 富集现象虽然只出现于 3 个样点中, 但最大富集指数却高达 3.04, Cu 的最大富集指数也达 2.63, 揭示零星分布的点源污染对研究区土壤重金属含量的显著影响。

样区方面, 唐闸镇、南通农场样区土壤 Zn 富集明显, 富集指数分别达 1.30 和 1.24, 是上述两个样区土壤重金属综合富集指数超过 1 的最主要贡献者(其他 4 种重金属平均单因子富集指数均<1)。在新开镇样区, 除 Cd 以外的 4 种重金属元素 Zn、Pb、Cu、Cr 在土壤中均出现富集现象, 是 7 个样区土壤重金属富集现象最严重的样区。新开镇作为近年来南通市郊新兴的工业强镇, 钢丝绳生产为本镇的支柱产业之一, 全镇星罗棋布的此类大小企业的生产经营活动可能是导致土壤重金属含量增加的主要原因。

以国家土壤环境质量一级标准作为评价参照, 南通市城市边缘带土壤重金属综合污染指数 0.80, 且所测 5 种重金属元素的平均污染指数值均<1(表 4), 表明研究区土壤总体上未发生所测重金属污染。但在 7 个样区 121 样点土壤中, 所测 5 种重金属造成的零星单因子污染在一些样点发现, 其中, 18.2% 的样点即 22 个样点 Zn 轻度污染, 污染指数最大值为 1.81; 3 个样点 Cd 轻微污染, 最大指数值为 1.07; 2 个样点 Cu 轻微污染, 最大值为 1.81; 2 个样点 Cr 轻微污染, 最大指数值为 1.21; 1 个样点 Pb 中度污染, 指数值为 2.2。重金属综合污染指数数据显示, 共有 9 个样点发生轻微复合污染, 占总样点数的 7.4%。重金属综合污染指数>1 的样点主要是由于 Zn 超标, 个别样点 Cu 和 Pb 高浓度有关。研究区土壤重金属平均单因子污染指数 Zn>Cu>Cr>Cd>Pb, 与相应的富集指数大小顺序 Zn>Cr>Cu>Pb>Cd 有明显差异。

表 4 研究区土壤污染指数的描述性统计

Table 4 Descriptive statistics of soil pollution indices in Nantong Peri-urban area

项目	平均值	中值	最小值	最大值	标准差	变异系数 (%)	污染样点 (%)
Cr	0.57	0.55	0.39	1.21	0.12	21.31	1.7
Cu	0.60	0.55	0.26	1.81	0.18	30.46	1.7
Pb	0.48	0.43	0.24	2.20	0.19	40.09	0.8
Zn	0.90	0.87	0.65	1.81	0.18	19.97	18.2
Cd	0.54	0.51	0.27	1.07	0.15	27.93	2.5
综合指数	0.80	0.76	0.58	1.69	0.17	21.58	7.4

3.3 土壤重金属含量异常空间分析

本研究相关结果表明, 南通市城市边缘带样点土壤重金属元素富集及污染现象在空间上不具明显规律。这一现象可能与研究区土壤类型之间重金属自然含量差异、外源重金属进入土壤环境的途径与速率差异(土壤利用方式及样区周围环境差异)的综合影响有关。本研究以土壤重金属含量为观察变量, 分别以不同土壤类型、土地利用方式、不同样区(与城市的空间距离与周围环境)为控制变量, 进行单因素方差分析(ANOVA), 来检验土壤重金属含量在空间分布上的差异。

表 5 中方差分析结果显示, 在研究区 4 种主要土壤类型中, 高沙土与菜园土重金属 Cr、Cu、Pb、Cd 含量均具有显著性差异, 4 种重金属在高沙土中的含量都显著高于菜园土, 灰泥土与菜园土的 Cr、Cd 含量也存在显著性差异, 而 Zn 在 4 种土壤类型中都不存在显著性差异。多重均值比较结果显示 5 种重金属在 4 种利用方式下均没有显著性差异, 说明在该区不同土

地利用方式不是影响土壤重金属含量差别的主要因素, 土壤类型对重金属含量的影响大于土地利用方式的差异, 似乎表明研究区主要是土壤的发生环境与演变过程环境, 而非外源因素导致了样点土壤重金属含量异常。然而, 样区单因素方差分析结果显示, 不同样区土壤中 Zn、Cr、Cu、Pb、Cd 含量、单因子富集指数以及样区重金属平均综合富集指数在位于不同乡、镇的样区之间具有显著差异, 说明土壤重金属富集程度可能与离城市空间距离和乡镇产业结构、生产活动不同有关。

4 主要结论

(1) 南通市城市边缘各样区、样点之间土壤重金属含量整体上差别不大, 没有表现出外源重金属元素进入土壤环境的明显特征; 研究区土壤重金属平均含量接近自然背景值, 土壤环境质量整体上处于安全状态, 土壤资源适宜绿色农业和特色农业生产。

(2) 共计 7 个样区中的 3 个样区(唐闸镇、新开

表 5 不同土壤类型及不同利用方式下土壤重金属含量方差分析 (mg/kg)

Table 5 ANOVA results of soil heavy metal contents in soils different in soil type and land use

项目		Cr	Cu	Pb	Zn	Cd
不同土壤 类型	高沙土	53.32b	23.37b	21.85b	87.84a	0.120b
	夹沙土	51.15ab	20.63ab	15.79a	91.07a	0.110b
	灰泥土	52.68b	21.10ab	15.62a	86.91a	0.107b
	菜园土	46.04a	18.74a	15.22a	94.45a	0.087a
不同土地利用 方式	林地	55.21a	22.37a	15.66a	91.45a	0.104a
	旱地	52.57a	21.80a	16.95a	91.01a	0.116a
	菜地	50.08a	19.46a	15.31a	87.61a	0.093a
	荒地	46.83a	21.00a	20.53a	91.33a	0.115a

注：同列不同字母表示均值在 $P < 0.05$ 水平差异显著。

镇、南通农场)土壤重金属元素出现轻度富集现象,零星样点发现土壤单一重金属元素污染。其中,Zn在研究区土壤中富集现象相对普遍,7个样区土壤的平均Zn单一因子富集指数均 >1 ,约18%的样点土壤Zn浓度超过国家一级标准,达到轻度污染;个别样点土壤发生Pb中度污染。

(3)土地利用方式不是导致研究区土壤重金属含量空间差异的主要因素,土壤类型对样点土壤重金属含量的差异的影响显著大于土地利用方式的影响;另外,样区空间环境与土壤重金属的富集和污染有较密切相关关系,样区与城市距离、样区所在乡镇产业定位、生产活动可能对外源重金属元素进入土壤具有重要影响。

参考文献:

- [1] 陈杰,陈晶中,檀满枝.城市化对周边土壤资源与环境的影响.中国人口·资源与环境,2002,12(2):70-74
- [2] 阎伍玖,吕成文,陈飞星.芜湖城市郊区土壤重金属污染危害及其对策研究.土壤学报,2000,31(1):136-141
- [3] 孔德工,唐其展,田忠孝,方东,粟学军.南宁市蔬菜基地土壤重金属含量及评价.土壤,2004,36(1):21-24
- [4] 郑海龙,陈杰,邓文靖.六合蒋家湾蔬菜基地重金属污染现状与评价.土壤,2004,36(5):557-560
- [5] 张勇.沈阳郊区土壤及农产品重金属污染的现状评价.土壤通报,2001.32(4):182-186
- [6] 丁爱芳,潘根兴.南京城郊零散菜地土壤与蔬菜重金属含量及健康风险分析.生态环境,2003,12(4):409-411
- [7] 李其林,黄昀,赵中金,骆东其.重庆市蔬菜基地土壤重金属含量情况.土壤,2001,3:159-162
- [8] Zhang MK, Wang MQ, Liu XM, Jiang H, Xu, JM. Characterization of soil quality under vegetable production along an urban-rural gradient. Pedosphere, 2003, 13: 173-180
- [9] 鲁如坤.土壤农业化学分析方法.北京:中国农业科技出版社,2000
- [10] 李建,郑春江.环境背景值数据手册.北京:中国环境科学出版社,1989
- [11] Banat KM, Howari FM, Al-Hamad AA. Heavy metals in urban soils of central Jordan: Should we worry about their environmental risks? Environmental Research, 2005, 97: 258-273

Status and Assessment of Heavy Metal Pollution of Soils in The Peri-Urban Nantong

HUANG Hui^{1,2}, TAN Man-zhi², ZHOU Feng², CHEN Jie², PAN Gen-xing¹

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

2 State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

Abstract: Based on laboratory analysis of soil samples collected from 7 plots located in the peri-urban Nantong, enrichment of heavy metals in the soils was investigated and the soils were evaluated for heavy metal pollution. Results indicated that no significant heavy metal pollution occurred in the study area as a whole. Slight enrichment of some metal elements, however, was found in the soils of 3 amongst the 7 sampling sites. Zn enrichment in the studied soils was the most prevalent and found in 76% of the sampling sites. And about 18% of the sampling sites were found slightly polluted with Zn. Besides, pollution by some other metal elements, such as Cu, Pb, was also be detected in a few sites. ANOVA results showed that difference in landuse was not one of the main causes leading to spatial variation of concentrations of soil heavy metals. Instead, relative close relationships were found of contents and enrichment of heavy metals in soils with type of the soil and environment of the sampling site.

Key words: Heavy metal, Soil pollution, Peri-urban, Nantong