

北京市耕地土壤重金属时空变化特征初步研究

王彬武¹, 李红², 蒋红群¹, 孙丹峰^{1*}

(1. 中国农业大学资源与环境学院 国土资源部农用地质量与监控重点实验室, 北京 100193; 2. 北京市农林科学院综合发展研究所, 北京 100097)

摘要:根据1985年和2006年北京市两次耕地表层(0~20 cm)土壤重金属含量调查结果,初步分析了此期间北京市耕地土壤重金属污染的时空变化特征。数据探索分析显示,Cr、Ni、Zn和Hg服从正态分布并满足Kriging预测条件,可通过对比其含量预测图识别空间分布变化;Cu、As、Cd和Pb则运用Hakanson潜在生态危害指数法和指示克里格法对比其污染风险及空间分布的变化。结果表明,当前北京市耕地土壤重金属含量处在合理水平。随着北京城市化及集约农业的发展,土壤中八种重金属元素在1985—2006年间均有不同程度积累:相对累积最多的是Hg元素;Cr、Ni、Zn和As主要是量的增大,污染范围空间分布变化不明显;而Hg、Cd、Pb和Cu元素在20年间不仅有量的大幅增大,污染风险范围也明显扩大,但仍属于低风险等级。重金属变化最为剧烈的区县有密云、平谷、大兴及北京城周等。

关键词:耕地土壤重金属;时空变化;风险等级;北京市

中图分类号:X825 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2014)07-1335-10 **doi:**10.11654/jaes.2014.07.012

Spatio-temporal Variation of Soil Heavy Metals in Agricultural Land in Beijing, China

WANG Bin-wu¹, LI Hong², JIANG Hong-qun¹, SUN Dan-feng^{1*}

(1.Key Laboratory of Land Quality, Ministry of Land and Resources, College of Resources and Environment, China Agricultural University, Beijing 100193, China; 2.Institute of Comprehensive Research, Beijing Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Beijing 100097, China)

Abstract: In this study, temporal and spatial variation of soil heavy metals were analyzed from 1985 to 2006 in Beijing. The contents and their spatial distribution of Cr, Ni, Zn and Hg were analyzed by comparing the interpolating maps, while environmental risks of As, Cu, Pb and Cd were evaluated using Hakanson potential ecological risk index. Indicator Kriging was employed to draw the probability distribution maps of the risk and to analyze the spatial distribution information. Heavy metal contents in the soils of Beijing were still at reasonable level, but showed certain accumulation between 1985 and 2006 due to urbanization and intensive agriculture, with Hg accumulating greatest. During 1985—2006, the spatial distribution remained almost unchanged for Cr, Ni, Zn, and As, while the scope of Hg, Cd, Pb, and Cu pollution expanded. These metals still had low environmental risks, though the most dramatic changes occurred in Miyun, Pinggu, Daxing and their urbanized areas.

Keywords: soil heavy metals; spatio-temporal variation; risk ranking; Beijing

工业革命以来,快速城市化和工业化带来大量重金属污染物,已通过大气沉降、污水灌溉和点源扩散等途径进入地表环境系统,而现代农业的发展,大量

化肥、农药、塑料薄膜等的施用加剧了这一过程^[1]。重金属污染不仅直接影响土壤的物理和化学性质,而且通过食物链传递威胁人类健康。目前研究多集中在区域土壤重金属的空间格局^[2-6]、影响因素^[7-10]、协同分析^[4,11-13]、风险评估^[14-18]等方面。作为区域土地生态系统中的慢变量——土壤重金属,其特性异于土壤中其他理化性质,其累积效应显著,当累积到一定程度,可能突然活化,对人类食品安全、生存环境构成威胁。因此,有必要系统长期地进行区域尺度上土壤重金属的时空分异研究,探讨自然运移过程和人类干扰活动对

收稿日期:2013-12-28

基金项目:中央高校基本科研业务费专项资金资助(2013YJ003);环保公益性专项基金(201309001);国家自然科学基金(41130526);北京市自然科学基金(8122020)

作者简介:王彬武(1987—),男,山东胶南人,博士研究生,主要研究方向为资源环境信息技术。E-mail:binw_w@cau.edu.cn

* 通信作者:孙丹峰 E-mail:sundf@cau.edu.cn

土壤重金属的协同响应,但因历史数据有限,国内外关于耕地土壤重金属时空趋势的研究报道较少^[19-21]。

本研究尝试以北京市 1985 年图集资料和 2006 年土壤重金属元素调查取得的资料为依据,在已有研究的基础上^[22-23],采用 Hakanson 潜在生态危害指数法和指示克里格法研究快速城市化及农业集约化区耕地土壤中重金属元素分布和累积的时空变化特征,旨在为农用地土壤环境质量评价和土壤重金属预警模型建立提供参考。

1 研究区概况

北京属于暖温带半湿润大陆性季风气候,多年平均温度 12℃,年降雨 584.1 mm 左右。北部丘陵地区成土母质以片麻岩、花岗岩、安山岩为主,西部以灰岩和砂页岩为主;平原地区成土母质质地轻松,以砂壤、轻壤和黄土性母质为主^[24]。水土流失的分配搬运是研究区景观生态系统的主要动力之一,冬季盛行西北风且风力较强,平均风速达 $3\sim4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,也是物质再分配的重要动力。土壤类型总计有山地草甸土 5.26 km^2 ,山地棕壤 $1\,303.4\text{ km}^2$ 、褐土 $8\,905.4\text{ km}^2$ 、潮土 $3\,383.7\text{ km}^2$ ^[25]。农业生产为远郊种植玉米、小麦等粮食作物,近郊以蔬菜为主,以及果树和农田防护林等。随着北京城郊农业和现代化农业发展,农业劳动力投入减少,但大量农药、化肥和有机肥投入逐年增加,截止 2012 年底,单位面积农化投入达 $703.81\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。

由于水资源缺乏,北京市自 20 世纪 50 年代开始利用污水灌溉农田,污灌农田经历了从西郊-西北郊-北郊-南郊-东南郊的迁移过程,面积从最初的 666.7 hm^2 ,发展到 20 世纪 80 年代末最高峰的 $8\times10^4\text{ hm}^2$,再降至 2000 年的 $2.7\times10^4\text{ hm}^2$ ^[26]。目前北京地区污水灌溉面积近 800 km^2 ,占全市耕地面积的 19%,占灌溉农田面积的 24%,其中大多分布在通州、大兴、朝阳、房山等北京城水流下游郊区县^[25]。

北京市城市扩展和工业化经历了从单点到多中心的发展历程。改革开放以后,京郊农村经营体制改革将劳动力从土地上解放出来,促进了产业结构调整,城市化与工业化协同并进;20 世纪 90 年代初一批工业(科技)园在卫星城陆续发展起来^[27];本世纪初明确城市功能定位,实施了“退二进三”,中心城区的制造业逐步向郊区转移,空间上呈现“三产居中心,一产二产外围更替”的发展格局。由于研究区具有典型的城市化、工业化和农业现代化等复杂的区域土地利用系统变化特征,非常适合研究土壤重金属与人地复

杂关系相互作用关系。

2 数据来源与研究方法

2.1 数据获取与化验分析

本研究以北京市 1985 年和 2006 年两次重金属元素调查取得的土壤资料为依据,1985 年的数据参考《中国主要农业土壤污染元素背景值图集》^[22]。该图集在北京地区调查 302 个土壤样点,布点时力求避开污染源,布点范围覆盖北京市所有区县、土壤类型、地形部位和水系沉积物,测定了样品中的汞、镉、铅、砷、铬、锌、铜、镍、钴、氟、钼、锰 12 种元素的含量。制图单元综合考虑了土壤类型、成土母质、地貌类型等因素,分级方法采用显著性检验分级法,多数以 60%置信域不相互重叠作为具体分级标准,图集经矢量化、配准后以便对比分析。2006 年的数据依托北京市农业生态环境质量监测与评价项目获得,根据北京市耕作土壤的分布情况,采用不规则分层抽样法于秋季作物收获后采集 1018 个样点(图 1)。每个样点均采自 $10\text{ m}\times10\text{ m}$ 正方形四个顶点和中心点,各取表层(0~20 cm)土壤约 1 kg,现场均匀混合后用四分法从中选取 1 kg 土样作为代表该点的样品。利用 GPS 定位样点坐标,同时记录采样点的土地利用类型以及周围环境特征。为防止样品污染,在采样、样品保存和样品处理过程中,避免与金属器皿直接接触,具体样品分析方法的详细介绍见文献^[23,28-29]。测试值包括每个样点的

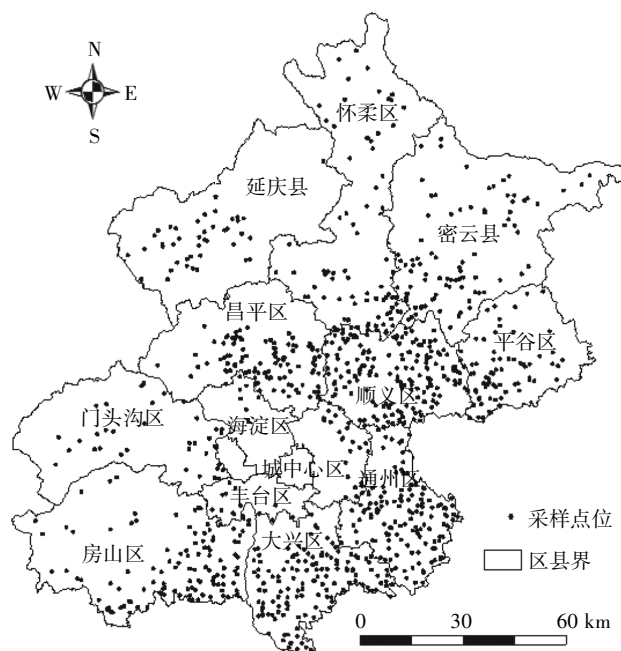


图 1 北京市土壤样点位分布图

Figure 1 Distribution map of soil sampling sites in Beijing

Cr、Ni、Cu、Zn、As、Cd、Pb 和 Hg 含量, 两期数据均作了质量控制。

2.2 研究方法

Hakanson 潜在生态危害指数法(Hakanson Risk Index, HRI)^[30]和指示克里格法^[23]是研究重金属污染问题中常用的方法。HRI 法目前被广泛用于植被、水体、河湖沉积物、土壤等生物地理事物中的重金属风险评价研究,其优点在于依据较少的数据得到单一因子污染指数和综合污染指数,并依据指数划分风险等级;指示克里格法优点在于其抑制了特异值对变异函数稳健性的影响,对数据分布类型不做要求,并可绘制出超出临界值的概率分布图。

2.2.1 潜在生态危害指数法

HRI 是 1980 年瑞典科学家 Lars Hakanson 根据重金属性质及环境行为特点,从沉积学角度提出的对土壤或沉积物中重金属污染程度及其潜在生态危害评价的一种相对简便的方法^[30]。其计算公式如下:

$$C_i^i = \frac{C_i}{C_n^i} \quad (1)$$

$$E_i^i = T_i^i \times C_i^i \quad (2)$$

式中: C_i^i 为某一金属的污染指数(单因子污染指数); C_i 为沉积物中污染物的实测参数; C_n^i 为某污染物参比值,采用土壤中重金属元素背景值(本研究 C_n^i 取值见表 1); E_i^i 为单污染物潜在生态风险指数; T_i^i 为单个污染物的毒性响应参数,本研究参照 Hakanson 和徐争启的计算结果设定 8 种重金属的毒性响应系数依次为 Hg(40)>Cd(30)>As(10)>Cu(5)=Pb(5)=Ni(5)>Cr(2)>Zn(1)^[31]。

根据 C_i^i 、 E_i^i 的分级标准分别来评价单个污染物污染程度、单个污染物生态风险程度。

2.2.2 指示克里格法

指示克里格法是一种非参数估计方法,它表示预测点超出预设阈值的概率的多少。指示克里格法不要求原始数据服从正态分布,并能抑制特异值对变异函数稳健性的影响,是处理有偏数据的有力工具。假设在区域 D 上采样测定了某变量,若该变量在区域 D 上的阈值为 z ,则在 $x \in D$ 处可定义如下二值函数(即指示函数):

$$I(x, z) = \begin{cases} 1 & Z(x) \geq z \\ 0 & Z(x) < z \end{cases} \quad (3)$$

在给定的阈值 Z 的条件下,记 $Z(x) \geq z$ [即 $I(x, z) = 1$] 的概率为:

$$F(z) = \text{prob} [I(x, z) = 1] \quad (4)$$

则指示函数 $I(x, z)$ 的期望值为:

$$E\{I(x, z)\} = 1 \times F(z) + 0 \times [1 - F(z)] = F(z) \quad (5)$$

式(5)表明 x 处 $Z(x) \geq z$ [即 $I(x, z) = 1$] 的概率等于指示变换值的平均值。当 $I(x+h, z)$ 和 $I(x, z)$ 为被矢量 h 分隔的 2 个指示变换数据点时,则指示变异函数可定义为:

$$\gamma_1(h, z) = \frac{1}{2} E\{[I(x+h, z) - I(x, z)]^2\} \quad (6)$$

可见用式(6)求得的指示变异函数,可通过普通克里格估计得到未知点的 $I(x, z)$ 值,即为 $Z(x) \geq z$ 在该点出现的概率,即:

$$F^*(z) = \sum_{\alpha=1}^n \lambda_{\alpha} I(x_{\alpha}) \quad (7)$$

式中: F^* 为 $Z(x) \geq z$ 的概率 F 的克里格估计; n 是在待估点 x 的邻域中的有效点数; x_{α} 是第 α 个采样点的位置; λ_{α} 是克里格权系数。

用式(7)可以估计 $Z(x) \geq z$ 的条件概率图^[23]。

具体分析思路,根据 2006 年的数据进行八种重金属的数据探索分析^[32-34],符合对数正态分布的 Cr、Ni、Zn 和 Hg 采用普通克里格插值得到含量空间分布图,而不符合正态分布的 Cu、As、Cd 和 Pb 含量不能直接插值得到空间分布图,因而采用潜在生态危害指数法计算其污染风险,并用指示克里格插值出风险等级分布图。为了进行准确的重金属积累时空变化分析,1985 年的 Cu、As、Cd 和 Pb 含量分布图也用同样的方法转为污染风险指数分布图,而 Cr、Ni、Zn 和 Hg 仍为含量变化的对比。

3 结果与分析

3.1 20 年间土壤重金属含量变化

北京市耕地土壤重金属含量从 1985 年到 2006 年发生了很大变化,基本统计量的变化对比见表 1。与 1985 年的数据比较,全部采样点中 8 种重金属的最小值、最大值、平均值、中位值都有明显增大。由于两次采样点的数量和位置不同,极值会有明显差异,且部分数据不服从正态分布,故增大倍数比较其中位值更合理。20 年间增大幅度最大的为 Hg,其次为 Pb、Cu 和 Cd,而 Cr、Ni 和 Zn 的中位值增大不多,1985 年 8 种重金属大部分都低或略大于 2004 年陈同斌等计算的北京市土壤元素背景值^[35],尚未造成污染,但 Cr 平均含量已是背景值的近两倍。这说明 1985 年北京土壤重金属元素含量一般较低,背景系数(本区某元素平均含量与全国该元素平均值之比)除 Cd 较高

表1 北京市1985—2006年土壤重金属变化统计($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)Table 1 Changes of heavy metal concentrations in Beijing soils from 1985 to 2006($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)

重金属	背景值	最小值		最大值		平均值		中位数		增大倍数/倍
	2004	1983—1985	2006	1983—1985	2006	1983—1985	2006	1983—1985	2006	
Cr	29.8	20	31.6	102.5	300	56.47	60.75	53.34	57.94	0.09
Ni	26.8	9.7	8.87	46	203.38	23.1	28.49	22.42	26.60	0.19
Cu	18.7	3.1	8.31	40.6	496.6	18.5	59.67	18.21	46.27	1.54
Zn	57.5	24.5	28.5	118.3	221.62	55.5	76.27	54.62	72.94	0.34
As	7.09	2.4	2.57	19.26	72.93	8.14	16.09	8.51	13.55	0.59
Cd	0.119	0.047	0.02	0.213	4.25	0.119	0.24	0.117	0.21	0.80
Pb	24.6	8.3	6.88	40	660	13.78	50.21	12.57	35.80	1.85
Hg*	0.08	0.007	0	0.219	4.29	0.044	0.22	0.041	0.13	2.17

注: * 土壤 Hg 的背景值来自李健等的《环境背景值数据手册》。

(1.22)外,其余都在1.0以下,其中铜最低,仅为全国平均值的三分之一^[22];而2006年Cr、Ni、Cu、Zn、As、Cd、Pb、Hg的中位值分别是相应背景值的1.94、0.99、2.47、1.27、1.91、1.77、1.46倍和1.63倍,除Ni外,均存在污染风险。

3.2 Cr、Ni、Zn和Hg含量的时空变化

北京市表层土壤中Hg元素在20年里变化剧烈(图2a),平均值增大4倍,增幅较大。2006年Hg元素含量高于80年代最高值($0.219\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)的区域广泛分布,除顺义东部、大兴南部有部分低值区域外,其他区域重金属含量均高于 $0.219\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。从空间结构来看,1985年的Hg含量高值集中在昌平和城区周围,尤其城区周围最为严重。以城区为圆心,等值线以同心圆形式向郊区逐渐降低,在城区附近和工业发达的房山、良乡附近含量偏高^[22],而2006年这些区域依然是Hg含量最高的区域,且数量大幅增大,范围有所扩大;其次,密云、平谷和房山的含量也较高,Hg元素多来源于工业和燃煤,所以Hg元素的大量积累受人类活动影响较大。

1985年土壤中的Cr含量分布比较均匀(图2b),没有明显突出的高值区域,集中在 $40\sim70\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间。平原区变化不大,一般都在 $50\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 左右,位于房山、平谷扇形坡地上的土壤,含量稍高,可达 $60\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,东北旺洼地、大兴西南永定河两侧和通县东、靠潮白河砂质土壤区,含量略微偏低。2006年的Cr比1985年整体略有积累,但不是特别严重,大部分地区的含量仍在 $40\sim70\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间,高于 $70\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的区域主要在密云、通州和平谷,特别是密云水库周围是北京市土壤Cr积累最严重的地区。虽然如此,但Cr含量超过国家二级标准处于污染状态的样

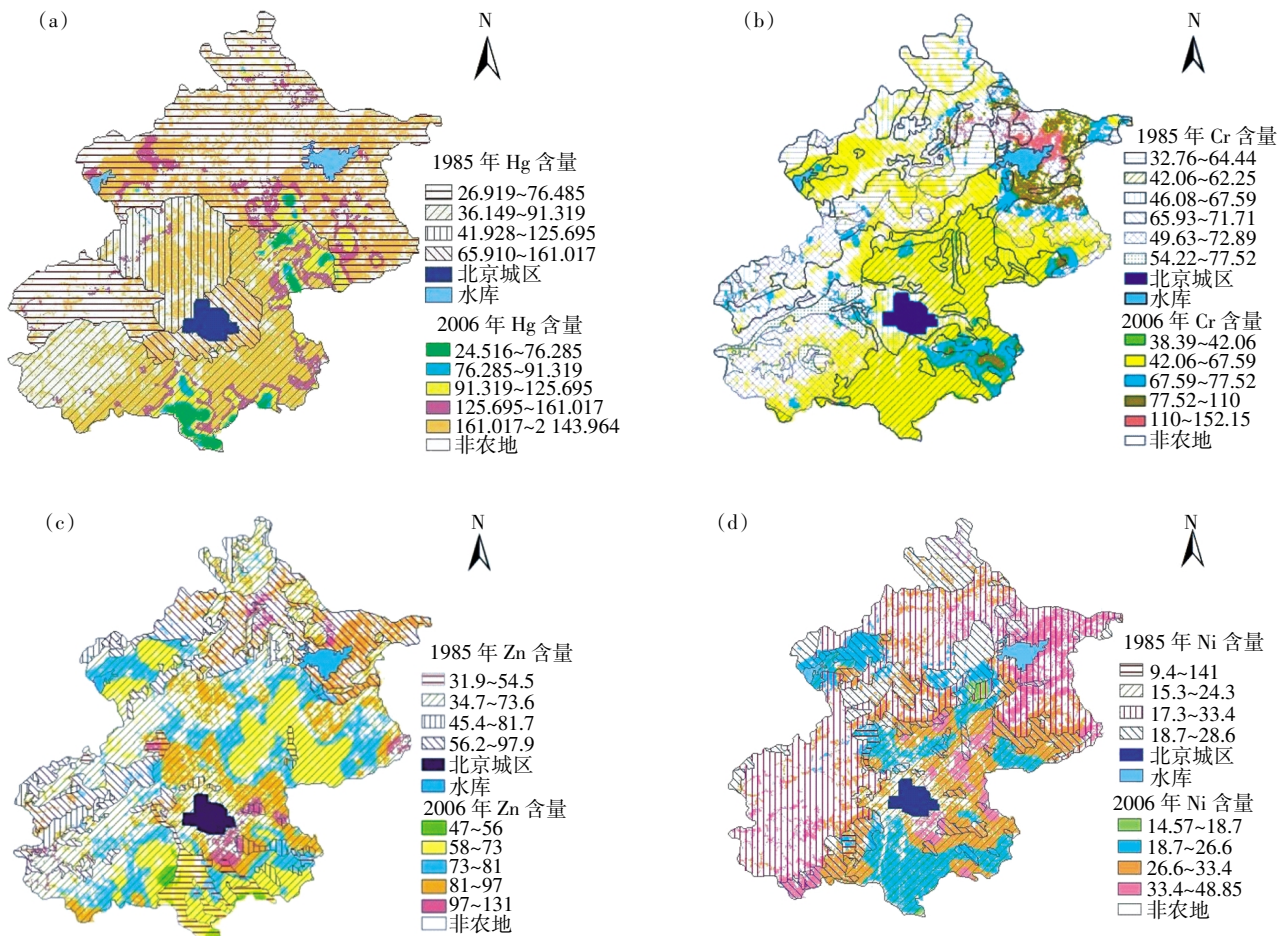
点很少^[10],说明近20年北京市土壤中Cr的积累并不严重,还未引起污染风险,但应注意密云地区,应控制人类活动,避免其含量继续增加。

1985年土壤中Zn的含量在 $34.7\sim73.6\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间的面积最大,其次含量在 $56.2\sim97.9\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,主要分布在密云、怀柔、延庆和门头沟等地。2006年的大部分地区含量在 $56\sim97\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间,相对而言变化不大,部分区域土壤Zn含量高于1985年的最高值 $97\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,主要分布在北京城区、密云、怀柔等地,但都面积不大(图2c)。两个时期的Zn元素变化不大且有部分区域超过了背景值 $57.5\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,总体表征土壤Zn污染问题并不明显。这与郑袁明等^[36]的研究结果一致。

1985年至2006年北京市土壤中Ni的含量变化不显著,其空间分布也有同样趋势,只有房山、密云、顺义等有部分区域Ni含量有上升(图2d)。但大部分区域Ni的含量依然在背景值以下,没有严重污染现象,且其空间分布与前面所述成土母质空间分布有类似结构。郑袁明等^[37]在2003年分析北京近郊区土壤Ni的空间结构时认为北京市土壤Ni含量的空间分布主要受母质的影响,与本研究结果一致,但其研究范围仅局限在北京市近郊区,本研究可认为是对前人工作的拓展。

3.3 Cu、As、Cd和Pb污染风险等级时空变化

利用Hakanson公式^[30]计算重金属污染的潜在生态风险指数($E_i^p<40$,生态危害程度),并将1985年的Cd含量分布图矢量化后转为风险分布图,2006年的样点数据利用指示克里格插值得到风险大于40的概率分布图。两图叠加对比(图3a),1985年Cd的风险值基本都在警戒线40以下,属于无风险状态。2006



Hg 元素含量单位为 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 其余元素含量单位为 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$

图 2 Hg、Cr、Zn 和 Ni 的含量时空变化对比

Figure 2 Comparisons of spatial distribution of soil Hg, Cr, Zn and Ni concentrations between 1985 and 2006

年 Cd 的污染风险明显上升,一半以上样点的风险大于 40,在全市范围内均有分布,密云、平谷尤为严重;部分地区风险概率大于 80,主要在大兴区。可能原因是:一方面,该区域是农业生产区,长期使用塑料地膜(生产过程中加入了含 Cd、Pb 的热稳定剂)会增加耕作土壤中 Cd、Pb 富集风险;另一方面,长期的污水灌溉、大气沉降、磷肥施用^[38]等也是土壤 Cd 元素积累的原因。

1985 年 Pb 的风险整体比较低,其含量最大值与背景值相等,为进行风险等级比较,2006 年的概率分布图阈值设为默认 7.06(误差最小)(图 3b)。2006 年土壤中 Pb 含量大幅上升,一半以上的样点含量超过背景值,但其污染风险基本都在 40 以下,风险在阈值以上的概率和区域都不大,仍属于低风险等级。在空间上也表现的比较分散,没有风险显著区县,1985 年有类似趋势。除上述地膜、污灌因素外,道路交通带来的大量 Pb 元素使其空间上呈分散分布。

1985 年土壤中 As 已经出现积累现象(图 3c),部分区域土壤中 As 含量已高于背景值,但仍处于低风险等级,相对高风险区域主要有平谷、房山、门头沟和昌平等地。2006 年风险概率插值阈值设为 1985 年的最大值 18.6,得到 2006 年 As 污染风险高于 18.6 的概率分布图,结果土壤中 As 污染风险明显上升,大部分区域存在大于 18.6 的较大概率,但整体仍在风险警戒线以下,部分样点风险超过 40,主要分布在平谷、房山、门头沟和延庆。As 在这 20 年的变化主要是量的累积,在空间分布上变化不大,源于燃煤和尾矿堆积等。

1985 年土壤中 Cu 已经有积累趋势,大部分区域已超过背景值含量(图 3d)。但其污染风险都在 40 以下,处于无污染状态,风险较高的区域有密云、怀柔、门头沟等地。2006 年风险概率插值阈值设为 10,结果显示,2006 年相对有恶化趋势,不但大部分样点都高于背景值含量,污染风险也有部分超过了 40,密云、

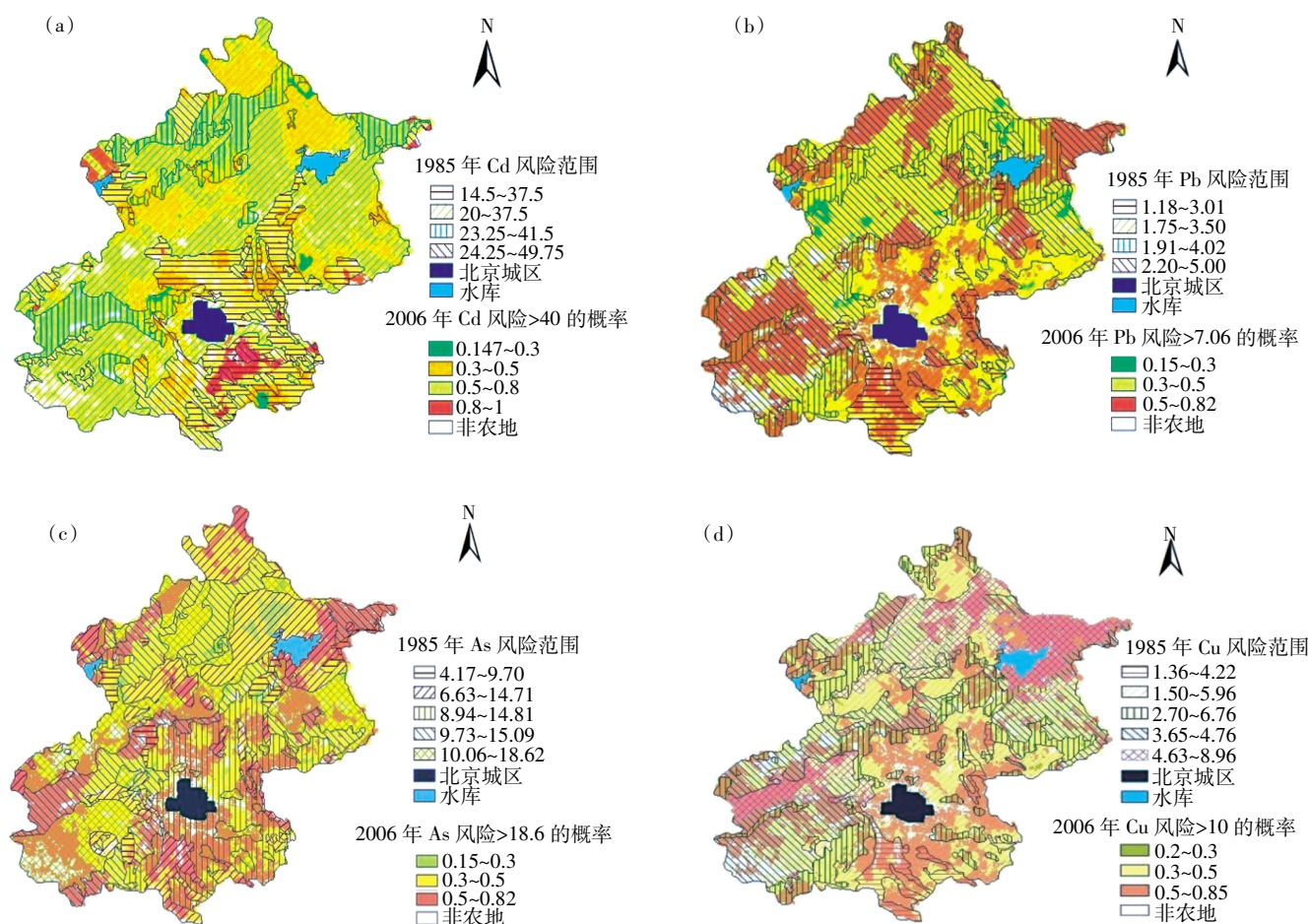


图3 Cd、Pb、As 和 Cu 污染风险等级时空变化对比

Figure 3 Comparisons of spatial distribution of environmental risk of soil Cd, Pb, As and Cu between 1985 and 2006

怀柔、昌平、城区周围及房山边缘污染风险都比较高。对比 1985 年不仅有量的积累,还有风险区域的扩大。Cu 元素一般存在于农药和城市污水中,这种剧烈的变化是城市发展和农业生产共同作用的结果。

4 讨论

自然背景值的差异与人类活动的影响导致耕地土壤重金属富集具有复杂性特点,具体认定某一元素的特定来源存在障碍,但通过对比时空变化特征可以有效反映区域性因素对重金属富集的影响。在都市土地利用系统中,城市化、工业化与集约农业是人类活动的重要表现形式,同时也对土壤重金属富集起到重要影响。

4.1 城市化对重金属积累的影响

城市化是社会经济变化过程,包括农业人口非农化、城市人口规模不断扩张,城市用地不断向郊区扩

展,城市数量不断增加以及城市社会、经济、技术变革进入乡村的过程。统计年鉴数据显示:在 1991—2006 年间,北京市城镇人口持续增长,从 808 万人增加到 1 333.3 万人;城镇化率由 73.86% 提高到 84.33%,城市用地必然向郊区扩展;汽车保有量也迅速增长,从 42.5 万辆增加到 287.6 万辆。人类的社会经济活动,工矿业发展及交通运输会产生大量重金属。在上述结果中 Hg 元素的污染范围除密云东南与平谷东部有零星高值外,其余均与城市扩张模式^[39]吻合,不难推出 Hg 污染主要是城市快速发展带来的;而密云县 Cr 和 Ni 元素明显高于全市均值(表 2),是由矿山开采造成的;海淀、朝阳是城市发达区域,其农业土壤中的重金属含量都明显高于其他区县,海淀区 Cu、Zn 和 Hg 元素含量最高。研究表明,汽车在怠速状态,汽车尾气排向大气的颗粒物中 Pb 的排放量是 $0.571 \text{ mg} \cdot \text{min}^{-1}$ ^[40],汽车轮胎生产加工过程中多采用含 Cd、Pb

表 2 北京市各区县土壤重金属含量均值比较(mg·kg⁻¹)
Table 2 Means of soil heavy metal concentrations in counties of Beijing(mg·kg⁻¹)

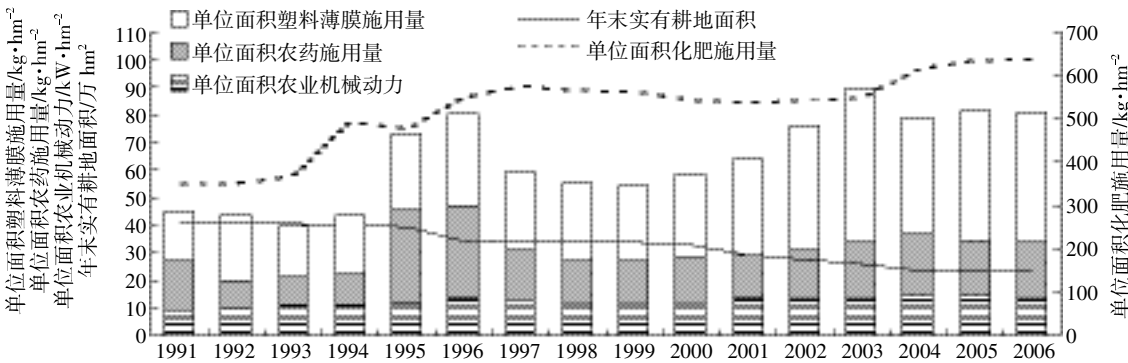
区县	样点数	Cr	Ni	Cu	Zn	As	Cd	Pb	Hg
昌平区	104	62.78	27.09	70.87	82.07	17.9	0.26	61.3	0.25
朝阳区	26	46.64	29.79	77.97	90.72	15.59	0.31	61.95	0.68
大兴区	135	51.2	25.17	49.63	69.06	14.54	0.3	36.42	0.15
房山区	113	57.52	29.66	60.69	73.79	18.53	0.25	53.43	0.22
丰台区	14	58.84	25.3	64.79	77.47	16.34	0.14	59.82	0.65
海淀区	7	60.5	23.68	81.2	92.21	15.52	0.21	56.99	1.79
怀柔区	80	63.25	26.4	56.7	81.12	13.47	0.22	58.41	0.17
门头沟区	38	68.26	30.45	61.89	82.22	15.78	0.22	53.31	0.32
密云县	88	86.27	32.77	68.74	79.05	14.13	0.24	57.32	0.17
平谷区	68	61.18	28.21	48.51	76.48	17.37	0.24	45.43	0.18
顺义区	167	49.53	30.9	57.17	70.46	16.29	0.2	46.11	0.14
通州区	137	68.6	28.76	62.54	79.3	16.11	0.25	50.14	0.21
延庆县	41	57.81	23.8	47.76	72	16.72	0.23	37.36	0.16
市中心区	1018	60.75	28.49	59.67	76.27	16.09	0.24	50.21	0.22

的热稳定剂,刹车过程将摩擦于地表,朝阳区域内有公路超过 1000 km,干线道路密度是北京市平均道路密度的 2 倍多,且首都国际机场位于朝阳区东北部。这些原因可能是导致朝阳区 Cd 和 Pb 元素均高于其他区县的重要原因。

4.2 集约农业对重金属积累的影响

集约农业已不再投入过多劳动力,取而代之的是农业机械的应用和大量化肥、农药、塑料薄膜的施用。在北京耕地呈现减少趋势的情况下(图 4),单位面积农药和化肥施用量持续增加,2000 年左右有所控制,但随后又持续增加。化肥和有机肥都含有一定量的重金属元素,如芮玉奎等^[41]实验分析了北京市场上销售的硫酸铵(NH₄)₂SO₄和尿素 CO(NH₂)₂两种氮肥的 10 种有害重金属元素含量,(NH₄)₂SO₄中重金属含量分

别是:Cr 2 539.27 ng·g⁻¹,Ni 287.26 ng·g⁻¹,Cu 674.05 ng·g⁻¹,Zn 270.79 ng·g⁻¹,As 42.54 ng·g⁻¹,Cd 22.13 ng·g⁻¹,Hg 27.20 ng·g⁻¹,Pb 123.87 ng·g⁻¹;CO(NH₂)₂中上述重金属的含量分别是 1 167.71 ng·g⁻¹、188.6 ng·g⁻¹、7.46、64.45、10.55、0.00、0.09、3.71 ng·g⁻¹。表明各常用氮肥中均含有重金属元素,且含量差异显著。许多农药含 Cu、Hg、As 制剂,地膜中含有 Cd、Pb,农药及地膜的大量使用也增加了土壤重金属含量。另外,北京市自 20 世纪 50 年代开始采用污水灌溉,污水中的重金属离子会导致土壤中重金属 Hg、Cd、As、Cu 等含量的增加,杨军等^[42]的研究证实污水灌溉是导致土壤重金属积累的另一重要原因。农业生产活动的投入与产出构成了耕地土壤重金属的物质流循环的一部分,其影响直接作用于农产品中危害人类健康,因此在指导



数据来源于新中国农业 60 年统计资料和北京市 2007 年统计年鉴,其中 1993 年农药使用量数据缺失作前后年均值处理

图 4 1991—2006 年间北京耕地面积和农化投入变化趋势

Figure 4 Changes of arable land area and agrochemical inputs in Beijing from 1991 to 2006

农民从事农业活动时,相关部门应尽量提供重金属含量较低的生产资料。

本研究所采用的1985年数据为历史图集资料矢量化得到,在空间化过程及数据匹配性方面存在不确定性,但只是对于北京市区域层面研究,且趋势性变化特征可被监测到,本文认为这是对历史数据的较好挖掘,可为区域性宏观决策制定提供参考。

5 结论

本文利用GIS空间分析技术和数理统计方法,以北京市1985年和2006年两次重金属元素调查取得的土壤资料为依据,重点分析了Ni、Cr、Zn和Hg含量和Cu、As、Cd和Pb污染风险等级的时空变化特征。研究结果表明:

(1)北京市耕地土壤重金属含量在1985—2006年间空间累积程度差异显著,其中Hg元素累积效应强烈,且与城市用地空间拓展路径相似;Cr、Zn、Ni局部地区有上升趋势,属于潜在污染风险元素,应以控制为主,防止人类活动使其含量增大,尤其在密云矿区和昌平垃圾填埋场区域;Cd、Pb、As和Cu污染风险等级均有上升趋势。

(2)城市化和集约化农业生产投入已成为都市农业区耕地土壤重金属物质流的重要输入“源”,时空变化特征的研究可以为土壤重金属分区管理提供数据支持。从时空趋势上看,北京市土壤重金属风险管理大致可分为都市中心系统(朝阳、海淀、丰台、石景山,城中“两区”等)、都市城郊农业生产风险系统(大兴、通州、昌平、顺义等)、都市远郊工矿开采风险系统(密云、平谷、怀柔、门头沟、房山等)等三大区域^[43]。不同风险区管理宜采取不同环境治理措施,如绿色交通、有机农业、土壤环境容量开发等。

本文是对土壤历史数据挖掘的一次尝试,尽管存在不确定性,但该方法计算简易,所得结论在实际研究中可供应用与参考。

参考文献:

- [1] Wang X H. Spatio-temporal changes in agrochemical inputs and the risk assessment before and after the grain-for-green policy in China[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2013, 185(2): 1927–1937.
- [2] Krishna A K, Mohan K R. Metal contamination and their distribution in different grain size fractions of sediments in an industrial development area[J]. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 2013, 90(2): 170–175.
- [3] Dalai B, Ishiga H. Geochemical evaluation of present-day Tuul River sediments, Ulaanbaatar basin, Mongolia[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2013, 185(3): 2869–2881.
- [4] 陈秀端, 卢新卫, 赵彩凤, 等. 西安市二环内表层土壤重金属空间分布特征[J]. *地理学报*, 2011, 66(9): 1281–1288.
CHEN Xiu-duan, LU Xin-wei, ZHAO Cai-feng, et al. The spatial distribution of heavy metals in the urban topsoil collected from the interior area of the Second Ring Road, Xi'an[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2011, 66(9): 1281–1288.
- [5] 吴绍华, 周生路, 杨得志, 等. 宜兴市近郊土壤重金属来源与空间分布研究[J]. *科学通报*, 2008(增刊1): 162–170.
WU Shao-hua, ZHOU Sheng-lu, YANG De-zhi, et al. Source and spatial distribution of heavy metal in soil of suburbs in Yixing[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2008, 53(Suppl1): 162–170.
- [6] Szalinska E, Drouillard K G, Fryer B, et al. Distribution of heavy metals in sediments of the Detroit River[J]. *Journal of Great Lakes Research*, 2006, 32(3): 442–454.
- [7] Ericson B, Caravanos J, Chatham-Stephens K, et al. Approaches to systematic assessment of environmental exposures posed at hazardous waste sites in the developing world: The toxic sites identification program[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2013, 185(2): 1755–1766.
- [8] Cai Q Y, Mo C H, Li H Q, et al. Heavy metal contamination of urban soils and dusts in Guangzhou, South China[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2013, 185(2): 1095–1106.
- [9] Bae M J, Kim J S, Park Y S. Evaluation of changes in effluent quality from industrial complexes on the Korean Nationwide Scale using a self-organizing map[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2012, 9(4): 1182–1200.
- [10] 霍霄妮, 李红, 孙丹峰, 等. 北京耕地土壤重金属空间自回归模型及影响因素[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(5): 78–82.
HUO Xiao-ni, LI Hong, SUN Dan-feng, et al. Spatial autogression model for heavy metals in cultivated soils of Beijing[J]. *Transactions of the CSAE*, 2010, 26(5): 78–82.
- [11] 郭朝晖, 肖细元, 陈同斌, 等. 湘江中下游农田土壤和蔬菜的重金属污染[J]. *地理学报*, 2008, 63(1): 3–11.
GUO Zhao-hui, XIAO Xi-yuan, CHEN Tong-bin, et al. Heavy metal pollution of soils and vegetables from midstream and downstream of Xiangjiang River[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2008, 63(1): 3–11.
- [12] 刘剑锋, 谷宁, 张可慧. 土壤重金属空间分异及迁移研究进展与展望[J]. *地理与地理信息科学*, 2012, 28(2): 99–103.
LIU Jian-feng, GU Ning, ZHANG Ke-hui. Progress and prospect of soil heavy metal spatial differentiation and migration[J]. *Geography and Geo-Information Science*, 2012, 28(2): 99–103.
- [13] Cheraghi M, Lorestan B, Merrikhpour H, et al. Heavy metal risk assessment for potatoes grown in overused phosphate-fertilized soils[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2013, 185(2): 1825–1831.
- [14] 方淑波, 贾晓波, 安树青, 等. 盐城海岸带土壤重金属潜在生态风险控制优先格局[J]. *地理学报*, 2012, 67(1): 27–35.
FANG Shu-bo, JIA Xiao-bo, AN Shu-qing, et al. The priority pattern for managing the potential ecological risks associated with heavy metals of the top soil on Yancheng Coast [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2012,

- 67(1):27-35.
- [15] 吕建树, 张祖陆, 刘 洋, 等. 日照市土壤重金属来源解析及环境风险评价[J]. 地理学报, 2012, 67(7):971-984.
- LÜ Jian-shu, ZHANG Zu-lu, LIU Yang, et al. Sources identification and hazardous risk delineation of heavy metals contamination in Rizhao City[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2012, 67(7):971-984.
- [16] 郑袁明, 余 轲, 吴泓涛, 等. 北京城市公园土壤铅含量及其污染评价[J]. 地理研究, 2002, 21(4):418-424.
- ZHENG Yuan-ming, YU Ke, WU Hong-tao, et al. Lead concentrations of soils in Beijing urban parks and their pollution assessment[J]. *Geographical Research*, 2002, 21(4):418-424.
- [17] Nazzari Y, Rosen M A, Al-Rawabdeh A M. Assessment of metal pollution in urban road dusts from selected highways of the Greater Toronto Area in Canada[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2013, 185(2):1847-1858.
- [18] Fernandes L L, Nayak G N. Geochemical assessment in a creek environment in Mumbai, west coast of India[J]. *Environmental Forensics*, 2012, 13(1):45-54.
- [19] 房世波, 潘剑君, 成杰民, 等. 南京市郊蔬菜地土壤中重金属含量的时空变化规律[J]. 土壤与环境, 2002, 11(4):339-342.
- FANG Shi-bo, PAN Jian-jun, CHENG Jie-min, et al. Spatio-temporal distributions of soil heavy metals in vegetable plots in Nanjing[J]. *Soil and Environmental Sciences*, 2002, 11(4):339-342.
- [20] 周国华, 董岩翔, 刘占元, 等. 杭嘉湖地区土壤元素时空变化研究[J]. 中国地质, 2004, 31(增刊1):72-79.
- ZHOU Guo-hua, DONG Yan-xiang, LIU Zhan-yuan, et al. Temporal-spatial variation of elements in soils in the Hangjiahu area[J]. *Geology in China*, 2004, 31(Suppl1):72-79.
- [21] Schroder W, Pesch R. Time series of metals in mosses and their correlation with selected sampling site-specific and ecoregional characteristics in Germany[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2005, 12(3):159-167.
- [22] 李玉浸, 高怀友, 等. 中国主要农业土壤污染元素背景值图集[M]. 天津:天津教育出版社, 2006.
- LI Yu-jin, GAO Huai-you, et al. Maps of agricultural soil trace elements background value in China [M]. Tianjin: Tianjin Education Publishing House, 2006.
- [23] 姜菲菲, 孙丹峰, 李 红, 等. 北京市农业土壤重金属污染环境风险等级评价[J]. 农业工程学报, 2011, 27(8):330-337.
- JIANG Fei-fei, SUN Dan-feng, LI Hong, et al. Risk grade assessment for farmland pollution of heavy metals in Beijing[J]. *Transactions of the CSAE*, 2011, 27(8):330-337.
- [24] 北京市农村工作委员会. 北京都市型现代农业“211 行动计划”郊区资源底牌调查报告[R]. 2007.
- [25] 张凤荣, 赵华甫, 陈 阜, 等. 都市型现代农业产业布局[M]. 北京:中国石油大学出版社, 中国农业大学出版社, 2007.
- [26] 杨华峰. 北京地区污水灌溉农田若干特征研究[D]. 北京:中国农业大学, 2005.
- YANG Hua-feng. Study on some characteristics about sewage irrigation farmland of Beijing Region[D]. Beijing:China Agricultural University, 2005.
- [27] 张文茂, 苏 慧. 北京城市化进程与特点研究(上)[J]. 北京规划建设, 2009(2):80-83.
- ZHANG Wen-mao, SU Hui. Study on processes and characteristics of urbanization in Beijing. *Beijing Planning Review*, 2009(2):80-83
- [28] 李淑敏, 李 红, 孙丹峰, 等. 北京耕作土壤 4 种重金属空间分布的网络特征分析[J]. 农业工程学报, 2012, 28(23):208-215.
- LI Shu-min, LI Hong, SUN Dan-feng, et al. Network analysis of agricultural soil heavy metals' spatial distribution in Beijing[J]. *Transactions of the CSAE*, 2012, 28(23):208-215.
- [29] 霍霄妮, 李 红, 张微微, 等. 北京耕作土壤重金属多尺度空间结构[J]. 农业工程学报, 2009, 25(3):223-229.
- HUO Xiao-ni, LI Hong, ZHANG Wei-wei, et al. Multi-scale spatial structure of heavy metals in Beijing cultivated soils[J]. *Transactions of the CSAE*, 2009, 25(3):223-229.
- [30] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control: A sedimentological approach[J]. *Water Research*, 1980, 14(8):975-1001.
- [31] 徐争启, 倪师军, 虞先国, 等. 潜在生态危害指数法评价重金属毒性系数计算[J]. 环境科学与技术, 2008, 31(2):112-115.
- XU Zheng-qi, NI Shi-jun, TUO Xian-guo, et al. Calculation of heavy metals' toxicity coefficient in the evaluation of potential ecological risk index[J]. *Environmental Science & Technology*, 2008, 31(2):112-115.
- [32] Huo X N, Li H, Sun D F, et al. Combining geostatistics with moran's I analysis for mapping soil heavy metals in Beijing, China[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2012, 9(3):995-1017.
- [33] Huo X N, Li H, Sun D F, et al. Multi-scale spatial structure of heavy metals in agricultural soils in Beijing[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2010, 164:605-616.
- [34] 霍霄妮, 李 红, 孙丹峰, 等. 北京市耕作土壤重金属统计分布复杂性特征初步研究[J]. 中国农学通报, 2012, 28(35):233-238.
- HUO Xiao-ni, LI Hong, SUN Dan-feng, et al. A preliminary study on the complexity feature of heavy metals's statistical distribution in Beijing cultivated soil [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2012, 28(35):233-238.
- [35] 陈同斌, 郑袁明, 陈 煌, 等. 北京市土壤重金属含量背景值的系统研究[J]. 环境科学, 2004, 25(1):117-122.
- CHEN Tong-bin, ZHENG Yuan-ming, CHEN Huang, et al. Background concentrations of soil heavy metals in Beijing[J]. *Environmental Science*, 2004, 25(1):117-122.
- [36] 郑袁明, 宋 波, 陈同斌, 等. 北京市不同土地利用方式下土壤锌的积累及其污染风险[J]. 自然资源学报, 2006, 21(1):64-72.
- ZHENG Yuan-ming, SONG Bo, CHEN Tong-bin, et al. Zinc accumulation and pollution risk in soils under different land use types in Beijing[J]. *Journal of Natural Resources*, 2006, 21(1):64-72.
- [37] 郑袁明, 陈同斌, 陈 煌, 等. 北京市近郊区土壤镍的空间结构及分布特征[J]. 地理学报, 2003, 58(3):470-476.
- ZHENG Yuan-ming, CHEN Tong-bin, CHEN Huang, et al. The spatial structure and distribution of Ni contents in soils of suburbs of Beijing [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2003, 58(3):470-476.

- [38] 白玲玉, 曾希柏, 李莲芳, 等. 不同农业利用方式对土壤重金属累积的影响及原因分析[J]. 中国农业科学, 2010, 43(1):96-104.
BAI Ling-yu, ZENG Xi-bai, LI Lian-fang, et al. Effects of land use on heavy metal accumulation in soils and source analysis[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2010, 43(1):96-104.
- [39] 匡文慧, 邵全琴, 刘纪远, 等. 1932 年以来北京主城区土地利用空间扩张特征与机制分析[J]. 地球信息科学学报, 2009, 11(4):428-435.
KUANG Wen-hui, SHAO Quan-qin, LIU Ji-yuan, et al. Spatio-temporal patterns and driving forces of urban expansion in Beijing Central City since 1932[J]. *Journal of Geo-Information Science*, 2009, 11(4):428-435.
- [40] 张志红, 杨文敏. 汽油车排出颗粒物的化学组分分析[J]. 中国公共卫生, 2001, 17(7):623-624.
ZHANG Zhi-hong, YANG Wen-min. Analysis on chemical components in particulates of gasoline-fueled engine exhaust[J]. *China Public Health*, 2001, 17(7):623-624.
- [41] 芮玉奎, 申建波, 张福锁. 应用 ICP-MS 测定两种氮肥中重金属含量[J]. 光谱学与光谱分析, 2008, 28(10):2425-2427.
RUI Yu-kui, SHEN Jian-bo, ZHANG Fu-suo. Application of ICP-MS to determination of heavy metal content of heavy metals in two kinds of N fertilizer[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2008, 28(10):2425-2427.
- [42] 杨 军, 郑袁明, 陈同斌, 等. 北京市凉水河灌区土壤重金属的积累及其变化趋势[J]. 环境科学学报, 2005, 25(9):1175-1181.
YANG Jun, ZHENG Yuan-ming, CHEN Tong-bin, et al. Accumulation and temporal variation of heavy metals in the soils from the Liangfeng Irrigated Area, Beijing City[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2005, 25(9):1175-1181.
- [43] Wang B W, Li H, Sun D F. Social-ecological patterns of soil heavy metals based on a self-organizing map(SOM): A case study in Beijing, China[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2014, 11(4):3618-3638.

新书推荐



除尘技术

本书采用问答的形式,从实用的角度着手,汇总了除尘技术的各项内容,既包括粉尘和除尘技术的基础知识、除尘系统的选择和设计,又包括各类除尘技术,如机械除尘技术、袋式除尘技术、静电除尘技术、湿法除尘技术等原理、类型及计算,还包括除尘系统的维护管理和检测。其中还涵盖了部分除尘设备的选择和应用的基本知识。

本书内容丰富,资料翔实,可查阅性强。可供电厂等相关企业的基层环境保护技术人员、管理人员阅读,也适合于在校学生、在职人员培训时参考。

※书号:9787122203557

※定 价:48.0 元

※开本:32

※出版日期:2014 年 7 月



燃煤黑烟防治与节煤减排技术

本书介绍了煤质的基本知识和划分黑烟治理难度类别的方法;论述了燃煤挥发分不完全燃烧产生黑烟的机理以及保证完全燃烧的四大要素;还分别介绍了手烧炉和机烧炉的各种消烟技术及其所适用的消烟难度类别,治理技术的科学评价、治理方案的制订,消烟同时的节煤及其他污染治理技术。

本书可作为环保公司消烟技术手册、大专教材和关心 PM2.5 治理的广大读者。

※书号:9787122197061

※定 价:38.0 元

※开本:32

※出版日期:2014 年 7 月

如需更多图书信息,请登录 www.cip.com.cn

服务电话:010-64518888,64518800(销售中心)

网上购书可登录化学工业出版社天猫旗舰店:<http://hxgycbs.tmall.com>

邮购地址:(100011)北京市东城区青年湖南街 13 号 化学工业出版社

如要出版新著,请与编辑联系,联系电话:010-64519525。