

# 北京和东京城市道路积尘磁性颗粒物中金属元素的污染特征和健康风险

刘岩<sup>1</sup>, 林健<sup>1,2</sup>, 吕俊岗<sup>3</sup>, 李晓秀<sup>2</sup>, 闫岩<sup>1</sup>, 许佳君<sup>1</sup>, 大河内博<sup>4</sup>, 米持真<sup>5</sup>, 张利飞<sup>1\*</sup>

(1. 国家环境分析测试中心, 国家环境保护二噁英污染控制重点实验室, 北京 100029; 2. 首都师范大学资源环境与旅游学院, 北京 100048; 3. 最高人民检察院检察技术信息研究中心, 北京 100144; 4. 早稻田大学创造理工学院, 东京 1690075, 日本; 5. 埼玉环境科学国际中心, 埼玉 3470115, 日本)

**摘要:**于2019年8月对中国北京和日本东京城市道路积尘进行了调查。采用磁性分离和电感耦合等离子质谱法对2个城市道路积尘磁性颗粒物中28种金属元素的含量进行了分析,并比较了污染特征和健康风险。结果表明,东京和北京道路积尘中铁(Fe)元素平均含量分别为25.3和21.2 mg/g,磁性颗粒物占积尘比例分别为22.4%和13.0%。东京道路积尘磁性颗粒物受人类活动排放影响较北京显著,其中锌(Zn)和银(Ag)元素含量是北京的7.2和5.6倍。北京道路积尘磁性颗粒物中元素富集率远高于东京,以铬(Cr)、镍(Ni)等金属元素最为明显。东京和北京道路积尘磁性颗粒物的非致癌风险和致癌风险均低于安全阈值,但致癌风险分别达到 $6.9 \times 10^{-7}$ 和 $6.3 \times 10^{-7}$ ,接近 $10^{-6}$ 的可接受水平,应引起相关部门的关注。手口摄入是非致癌金属元素日平均暴露的首要途径,皮肤接触途径的非致癌物健康风险最高,Cr是导致道路积尘磁性颗粒物健康风险的首要元素。

**关键词:**道路积尘;磁性颗粒物;金属元素;污染特征;健康风险

中图分类号:X53;X820.4

文献标志码:B

文章编号:1674-6732(2021)05-0093-07

## Pollution Characteristics and Health Risks of Metal Elements in Magnetic Particles of Urban Road Dust in Beijing and Tokyo

LIU Yan<sup>1</sup>, LIN Jian<sup>1,2</sup>, LV Jun-gang<sup>3</sup>, LI Xiao-xiu<sup>2</sup>, YAN Yan<sup>1</sup>, XU Jia-jun<sup>1</sup>, OKOCHI Hiroshi<sup>4</sup>, YONEMOCHI Shinichi<sup>5</sup>, ZHANG Li-fei<sup>1\*</sup>

(1. State Environmental Protection Key Laboratory of Dioxin Pollution Control, National Research Center for Environmental Analysis and Measurement, Beijing 100029, China; 2. College of Resource Environment and Tourism, Capital Normal University, Beijing 100048, China; 3. Procuratorial Technology and Information Research Center, Supreme People's Procuratorate, Beijing 100144, China; 4. Graduate School of Creative Science and Engineering, Waseda University, Tokyo 1690075, Japan; 5. Center for Environmental Science in Saitama, Saitama 3470115, Japan)

**Abstract:** In August 2019, the road dust from Beijing and Tokyo was investigated. The concentrations of 28 metal elements in road dust and its magnetic particles from two cities were analyzed by magnetic separation and inductive coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS). A comparison of pollution characteristics and health risks of metal elements were also investigated. The results showed that the concentration of Fe in road dust were 25.3 and 21.2 mg/g, with the magnetic particle ratio 22.4% and 13.0% for Tokyo and Beijing, respectively. The influence of human activities on the magnetic particles of road dust in Tokyo was more significant than that in Beijing, with Zn and Ag were 7.2 and 5.6 times higher. The enrichment rate of Cr, Ni, and other elements in the magnetic particles of road dust in Beijing is much higher than that in Tokyo. In Tokyo and Beijing, the non-

收稿日期:2021-05-28;修订日期:2021-08-03

基金项目:国家重点研发计划基金资助项目(2016YFC0208104)

作者简介:刘岩(1983—),男,工程师,硕士,研究方向为磁性颗粒物的环境行为与风险。

\* 通讯作者:张利飞 E-mail:lfzhang@cneac.com

carcinogenic risk and carcinogenic risk of magnetic particles were lower than the threshold limit values in road dust, but the carcinogenic risk reached  $6.9 \times 10^{-7}$  and  $6.3 \times 10^{-7}$ , respectively, which was very close to the acceptable level of  $10^{-6}$ , and should arouse the attention of relevant departments. Hand-mouth ingestion was the main exposure pathway, but the skin contact has the highest non-carcinogenic risk value. Results of health risk assessment showed that Cr was the major toxic element in magnetic particles.

**Key words:** Road dust; Magnetic particle; Metal element; Pollution characteristic; Health risk

城市道路颗粒物被认为是大气环境风险的主要来源<sup>[1-2]</sup>。2016 年,科学家第一次在人类大脑组织样本中发现了光滑的氧化铁微粒,并指出汽车发动机燃烧和汽车制动磨损是该磁性颗粒物的主要来源<sup>[3]</sup>。事实上,城市道路产生的铬(Cr)、铜(Cu)等有毒元素更易富集于磁性颗粒物<sup>[4-5]</sup>。而磁性颗粒物,尤其是粒径 < 200 nm 的可以直接通过嗅神经轴突进入人脑,引发脑磁场紊乱和氧化应激,进而产生阿尔茨海默症等神经退化性疾病,威胁人体健康<sup>[3,6-7]</sup>。因此,研究城市道路积尘磁性颗粒物中金属元素的污染特征,评价其健康风险具有重要意义<sup>[8-9]</sup>。

目前,中国和日本的城镇化率分别为 60% 和 93%,由于经济发展程度的差异,北京和东京 2 个城市道路的建设、车辆密度和管理水平存在一定差异,城市道路积尘也不一样。城市道路积尘含有较高含量的铁磁性矿物和粗磁性颗粒,其中的四氧化三铁( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ )和单质铁(Fe)以单个磁性纳米颗粒或团聚体共存于道路积尘<sup>[10]</sup>,道路积尘已成为城市大气一次颗粒物的重要来源。现分别采集了北京和东京城市道路积尘样品,重点比较了 2 个典型城市 8 条道路积尘磁性颗粒物中金属元素的含量和富集情况,初步评价了其潜在的健康风险,为掌握城市道路积尘磁性颗粒物中金属元素的环境赋存和健康风险提供了基础数据。

## 1 研究方法

### 1.1 采样时间与点位

于 2019 年 8 月,采集了中国北京市区和日本东京市区共 8 条道路积尘样品,点位信息见表 1。

### 1.2 样品的采集与分析

使用塑料刷和塑料簸箕对机动车路面的道路积尘进行扫集采样,采样点位避开道路交叉口、路基和人行道,收集的道路积尘转移至聚乙烯密封袋中,带回实验室冷冻保存。样品应去除树叶、树枝、石块等杂物,置于 35 °C 烘箱中烘 72 h 后过 60 目尼龙筛备用。

表 1 道路积尘样品采集点位信息

城市	道路名称	点位经纬度	
中国 北京市	育慧南路	N: 39°54'14.6"	E: 116°25'27.4"
	天坛东路	N: 39°53'13.1"	E: 116°24'45.5"
	半步桥路	N: 39°52'09.2"	E: 116°21'44.3"
日本 东京市	諏访路(Suwa)	N: 35°42'30.4"	E: 139°42'27.5"
	明治路(Meiji)	N: 35°42'21.6"	E: 139°42'31.2"
	新宿路(Shinjuku)	N: 35°41'06.5"	E: 139°43'59.8"
	晴海路(Harumi)	N: 35°40'01.0"	E: 139°46'10.9"
	樱田大街(Sakurada)	N: 35°39'19.9"	E: 139°44'43.2"

道路积尘样品用覆盖有 PTFE 滤膜(Advantec, PF060, 直径 47 mm)的钕铁硼磁铁(Nd<sub>2</sub>Fe<sub>14</sub>B, 磁感应强度为 1.2 T)进行磁性分离,多次重复分离过程直到不能再吸附上新颗粒物为止,此样品作为磁性颗粒物样品,剩余未被钕铁硼磁铁分离的样品作为非磁性颗粒物样品。将样品分别转移至微波消解罐中,用硝酸-过氧化氢-氢氟酸(体积比  $\text{HNO}_3:\text{H}_2\text{O}_2:\text{HF}=6:2:1$ )溶解滤膜,置于微波消解仪中消解 50 min,冷却至室温,将消解后的溶液转移至 50 mL 的 PP 样品瓶中,加入铟(In)标准溶液作为内标,最后用 1% 的稀  $\text{HNO}_3$  定容至 20 mL,使用电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS, Agilent 7700X)对钙(Ca)、镁(Mg)、铝(Al)、钠(Na)、钾(K)、铁(Fe)、铜(Cu)、铅(Pb)、锌(Zn)、镍(Ni)、钴(Co)、镉(Cd)、铬(Cr)、砷(As)、锑(Sb)、锰(Mn)、锡(Sn)、钼(Mo)和钒(V)等 28 种金属元素的浓度进行测定。

### 1.3 富集率、富集因子和地质累积指数的计算方法

富集率(Enrichment Ratio, ERs)用于研究样品中金属元素在磁性组分的富集效率,表征特定金属元素与磁性颗粒物结合的难易程度,其计算公式<sup>[11]</sup>如下:

$$\text{ERs} = w_{\text{MFs}} / w_{\text{NMFs}} \quad (1)$$

式中:ERs——金属元素的富集率; $w_{\text{MFs}}$ ——磁性颗粒物中金属元素的含量,mg/kg; $w_{\text{NMFs}}$ ——非磁性颗粒物中金属元素的含量,mg/kg。根据富集效率比值大小,可以将金属元素在磁性颗粒物中的富集程度分为 < 2(无富集或轻微)、2 ~ 5(中度)、

5~20(显著)、20~40(高度)和>40(极高)5个级别。级别越高说明该元素越容易与具有磁性的颗粒物相结合。

富集因子(Enrichment Factors, EFs)表征样品中金属元素在环境中的污染等级<sup>[11-13]</sup>。评价EFs的基础是根据背景土壤中稳定的参考元素浓度,对分析元素进行归一化,用于从人为排放源和自然排放源中区分磁性颗粒物中金属元素的来源。一般情况下,EFs>10,认为其来源于人类活动排放;EFs<10,则认为该元素与背景土壤有关。计算公式如下:

$$EFs = (C_i/C_{ref})_{samples} / (B_i/B_{ref})_{baseline} \quad (2)$$

式中:EFs——富集因子; $C_i$ ——样品中元素*i*的含量,mg/kg; $C_{ref}$ ——样品中参比元素的含量,mg/kg; $B_i$ ——土壤背景值中元素*i*的含量,mg/kg; $B_{ref}$ ——土壤背景值中参比元素的含量,mg/kg。

地质累积指数(Igeo)也可用于反映城市道路积尘磁性颗粒物中金属元素污染水平<sup>[14]</sup>。计算公式如下:

$$Igeo = \log_2 [C_{soil} / (1.5 B_n)] \quad (3)$$

式中:Igeo——金属元素的地质累积指数; $C_{soil}$ ——道路积尘磁性颗粒物中金属元素的含量,mg/kg; $B_n$ ——金属元素的参考背景值,mg/kg;1.5——因岩石差异引起的背景值变化的校正系数。1<Igeo≤2,中度污染;2<Igeo≤3,中到强污染;3<Igeo≤4,强污染。

#### 1.4 健康风险评估方法

道路积尘磁性颗粒物金属元素对人体的暴露途径有手口摄入、口鼻呼吸吸入和皮肤接触。不同暴露途径污染物的日平均暴露量计算公式如下:

$$ADD_{ing} = \frac{C_{soil} \times R_{ing} \times CF \times EF \times ED}{BW \times AT} \quad (4)$$

$$ADD_{inh} = \frac{C_{soil} \times R_{inh} \times EF \times ED}{PEF \times BW \times AT} \quad (5)$$

$$ADD_{der} = \frac{C_{soil} \times SA \times AF \times ABS \times EF \times ED}{BW \times AT} \quad (6)$$

式中: $ADD_{ing}$ ——手口摄入途径日平均暴露量,mg/(kg·d); $ADD_{inh}$ ——口鼻呼吸吸入途径日平均暴露量,mg/(kg·d); $ADD_{der}$ ——皮肤接触途径日平均暴露量,mg/(kg·d); $C_{soil}$ ——金属元素的含量,mg/kg; $R_{ing}$ ——手口摄入频率,mg/d; $R_{inh}$ ——呼吸频率,m<sup>3</sup>/d;EF——暴露频率,d/a;ED——暴露年限,a;BW——人群标准体重,kg;

AT——平均暴露时间,d;CF——转换系数,kg/mg;PEF——积尘排放因子,m<sup>3</sup>/kg;SA——暴露皮肤表面积,cm<sup>2</sup>;AF——皮肤黏附系数,mg/cm<sup>2</sup>;ABS——皮肤吸收系数,cm/h。

非致癌风险(HQ)与致癌风险(ILCR)的计算公式如下:

$$HQ = \frac{ADD}{Rfd} \times 10^{-6} \quad (7)$$

$$ILCR = SF \times ADD_{inh} \quad (8)$$

式中:HQ——人体暴露于某污染物中的健康风险,无量纲;Rfd——污染物在某种暴露途径下的参考剂量,mg/(kg·d);ADD——污染物的日均暴露量,mg/(kg·d);ILCR——人体暴露某污染物的致癌健康风险,无量纲;SF——斜率因子,[mg/(kg·d)]<sup>-1</sup>。根据《中国人群暴露参数手册(成人卷)》和文献[12,15]确定本研究健康风险评估参数数值。通常认为,当HQ<1时,不具有非致癌风险;当ILCR<10<sup>-6</sup>时,不具有致癌风险;当10<sup>-6</sup><ILCR<10<sup>-4</sup>时,有一定的致癌风险;当ILCR>10<sup>-4</sup>时,致癌风险较高<sup>[16]</sup>。

## 2 结果与讨论

### 2.1 道路积尘中金属元素的含量

日本东京和中国北京2个城市道路积尘中28种金属元素总含量见图1。由图1可见,K、Na、Ca、Mg和Al共5种元素总含量分别占东京和北京道路积尘的74%和81%。东京和北京道路积尘中Fe元素分别占总含量的21%和15%,平均含量分别为25.3和21.2 mg/g,东京城市道路积尘中含有较高含量的Fe元素。

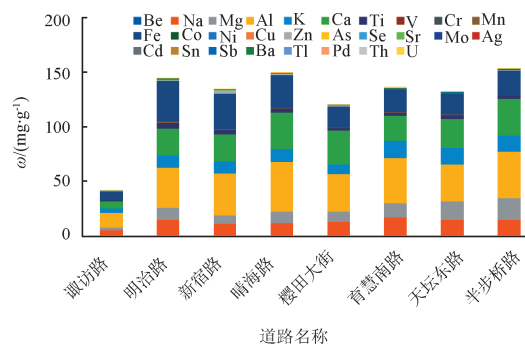


图1 北京和东京道路积尘中金属元素的含量

不同道路的车流量、交通状况和环卫水平直接影响道路积尘中的元素含量。由图1可见,日本东

京道路积尘中金属元素总含量最低为 41 mg/g( 諏访路), 最高为 149 mg/g( 晴海路), 平均值为 (118 ± 44) mg/g。中国北京道路积尘中金属元素总含量最低为 132 mg/g( 天坛东路), 最高为 153 mg/g( 半步桥路), 平均值为 (140 ± 11) mg/g。

## 2.2 道路积尘磁性颗粒物中的金属元素含量

日本东京城市道路积尘磁性颗粒物占道路积尘量为 12.2% ( 樱田大街) ~ 34.6% ( 新宿路), 平均值为 22.4%。新宿路周边为东京铁路和路面交通枢纽, 位于商业区和旅游区, 是东京最繁忙的街道之一。中国北京城市道路积尘磁性颗粒物占道路积尘量为 8.9% ( 育慧南路) ~ 18.5% ( 天坛东路), 平均值为 13.0%。由此可见, 东京城市道路积尘具有较高含量的磁性颗粒物。天坛东路位于北京市中心, 靠近商业和旅游区, 同时, 附近的火车站是外省市进入北京的主要途径之一。因此, 道路车流量和交通状况对磁性颗粒物的分布有着显著影响。

日本东京道路积尘磁性颗粒物中金属元素总含量最低为 69.0 mg/g ( 樱田大街), 最高为 154 mg/g( 明治路), 平均值为 120 mg/g。中国北京道路积尘磁性颗粒物中金属元素总含量最低为 96.8 mg/g( 天坛东路), 最高为 157 mg/g( 半步桥路), 平均值为 119 mg/g。北京和东京城市道路积尘磁性颗粒物中 28 种金属元素的含量见表 2。

由表 2 可见, 北京道路积尘磁性颗粒物中 K、Na、Ca 和 Mg 元素含量高于东京, 而东京道路积尘磁性颗粒物中 Al 元素含量高于北京。2 个城市道路积尘磁性颗粒物中 Fe 元素的含量相当。东京道路积尘磁性颗粒物中 Co、Ni、Cu、Mo、Cd、Sn 和 Pb 等元素含量是北京的 1.7 ~ 3.4 倍, Ag 和 Zn 元素更是达到北京的 5.6 和 7.2 倍。汽车发动机燃烧和汽车制动磨损被认为是城市道路磁性颗粒物的主要来源<sup>[3]</sup>。Revuelta 等<sup>[5]</sup>在西班牙巴塞罗那市的研究表明, 磁性颗粒物源自道路交通的制动器磨损。东京比北京拥有更久的道路交通发展历史, 机动车保有量远高于北京的 608.4 万辆<sup>[17]</sup>, 且没有机动车限行措施, 同时北京在夏季施行道路清扫作业, 并在空气重污染时增加清扫频次, 这些因素可能是东京道路积尘磁性颗粒物中金属元素含量高于北京的重要原因。同时, 季节、交通量、人口密度、出行行为以及样本量等因素可能影响这一结果, 这些变量有待在今后的研究中进一步探讨。

表 2 北京和东京城市道路积尘磁性颗粒物中金属元素的含量

序号	金属元素	东京		北京	
		均值	标准偏差	均值	标准偏差
1	Be	0.56	0.22	0.54	0.08
2	Na	5 501	1 197	6 121	606.5
3	Mg	7 586	3 233	9 350	1 988
4	Al	25 120	10 560	19 490	2 543
5	K	5 178	2 005	6 991	229.0
6	Ca	11 710	4 580	13 360	3 218
7	Ti	5 461	3 224	6 386	2 902
8	V	175.9	148.6	131.0	41.1
9	Cr	269.3	191.0	226.9	106.2
10	Mn	1 002	387.4	688.8	236.3
11	Fe	55 080	24 150	55 150	23 770
12	Co	19.0	9.5	11.4	3.1
13	Ni	94.5	54.6	48.9	13.4
14	Cu	358.7	241	145.8	23.5
15	Zn	1 877	1 604	260.7	68.8
16	As	5.98	2.9	4.47	1.0
17	Se	4.77	1.4	3.84	1.2
18	Sr	135.5	74.3	194.1	37.2
19	Mo	12.9	5.6	3.78	0.96
20	Ag	1.27	0.85	0.23	0.03
21	Cd	0.88	0.67	0.27	0.06
22	Sn	46.8	23.1	15.7	1.4
23	Sb	16.1	7.7	15.5	3.7
24	Ba	294	114	517	141
25	Tl	0.19	0.09	0.15	0.01
26	Pb	116.0	101	56.4	39.1
27	Th	2.36	1.16	1.94	0.48
28	U	0.80	0.37	0.68	0.11

## 2.3 道路积尘磁性颗粒物中金属元素的污染特征

东京道路积尘磁性颗粒物中多种金属元素富集率均 < 2, 为无富集或轻微富集, 其他元素均为中度富集, 富集率由高到低依次为 Cr > Ni > V > Cu > Fe > Sn > Mo > Co > Zn > Cd > Mn > Ag, 其中 Cr、Ni 和 V 的富集率分别为 4.7、4.6 和 4.4。北京道路积尘磁性颗粒物中金属元素富集率远高于东京, Cd、Sb 和 Pb 为中度富集, 显著富集的元素由高到低依次为 Cr > Mo > Ni > Fe > V > Ti > Cu > Mn > Zn > Co > Sn > As, 其中 Cr、Mo 和 Ni 的富集率分别为 17.6、16.2 和 13.3, 其他元素为无富集或轻微富集。可以看出, Cr、Ni、Mo、V、Fe 和 Cu 等元素更易于富集在城市道路积尘的磁性颗粒物中。Wang 等<sup>[18]</sup>在兰州市和 Kelepertzis 等<sup>[11]</sup>在希腊雅典市的研究表明, 磁性颗粒物中的 Cu、Zn 等金属元素源自工业燃烧过程, 而城市道路中的 Cr、Cu 等金属元素更易富集于磁性颗

颗粒物<sup>[4-5]</sup>。

北京和东京城市道路积尘磁性颗粒物中金属元素富集因子的计算均以Al元素为参比对象,土壤背景值中元素的含量分别采用魏复盛等<sup>[19]</sup>和Takeda等<sup>[20]</sup>的研究结果。东京和北京道路积尘磁性颗粒物中与人类活动排放有关的元素分别有11个和6个。按照富集因子由高到低,东京依次为Zn > Sb > Sn > Ag > Se > Mo > Cu > Cr > Pb > Ni > Cd,其中Zn、Sb和Sn的富集因子分别为89,85和80;北京依次为Sb > Se > Cu > Sn > Cr > Zn,其中Sb、Se和Cu的富集因子分别为45,44和22。东京道路积尘中的磁性颗粒物较北京受人类活动排放影响更为显著。

地质累积指数分析表明,东京城市道路积尘磁性颗粒物中Sn、Zn和Sb的I<sub>geo</sub>分别为3.4,3.5和3.6,表现为强污染;Mo和Ag的I<sub>geo</sub>分别为2.6和2.8,表现为中到强污染。北京城市道路积尘磁性颗粒物中Sb和Se的I<sub>geo</sub>均为3.1,表现为强污染;Cu的I<sub>geo</sub>为2.1,表现为中到强污染。东京城市道路积尘磁性颗粒物中金属元素污染水平较北京重。

#### 2.4 道路积尘磁性颗粒物的健康风险

采用道路积尘磁性颗粒物中金属元素的平均含量作为估算风险的指标,根据《中国人群暴露参数手册(成人卷)》和公式(4)~(6)分别计算得到手口摄入、口鼻呼吸吸入和皮肤接触3种不同暴露途径金属元素的日平均暴露量。在东京和北京道路积尘磁性颗粒物3种暴露途径中,V、Cr、Mn、Co、Ni、Cu、Zn、As、Cd和Pb 10种非致癌金属元素的日平均暴露总量均以手口摄入暴露量最高,皮肤接触次之,口鼻呼吸吸入最低。东京成人10种非致癌金属元素的日平均暴露量是北京的2倍。东京的3种途径暴露量分别为 $1.63 \times 10^{-3}$ , $1.84 \times 10^{-4}$ 和 $2.31 \times 10^{-7}$  mg/(kg·d),而北京的为 $7.70 \times 10^{-4}$ , $9.16 \times 10^{-5}$ 和 $1.02 \times 10^{-7}$  mg/(kg·d)。

采用文献[12,15]中金属元素进入人体的日暴露健康风险参考值(RfD)和致癌斜率因子(SF),根据公式(7)、(8)分别计算得到10种非致癌金属元素的健康风险和Cr、Co、Ni、As和Cd 5种致癌金属元素的健康风险(表3)。由表3可见,东京和北京道路积尘磁性颗粒物中非致癌金属元素3种暴露途径中均以皮肤接触健康风险最高,手

口摄入的健康风险次之,口鼻呼吸吸入的健康风险最低。东京和北京的非致癌健康风险值分别为 $4.7 \times 10^{-7}$ 和 $4.4 \times 10^{-7}$ ,不存在健康风险,但道路积尘磁性颗粒物会因长期累积导致风险逐年增加。10种非致癌金属元素在东京的风险排序为:Cr > V > Mn > Pb > As > Cu > Cd > Zn > Ni > Co,在北京的风险排序为:Cr > V > Mn > Pb > As > Cu > Ni > Cd > Zn > Co。东京和北京5种致癌金属元素的健康风险值分别为 $6.9 \times 10^{-7}$ 和 $6.3 \times 10^{-7}$ ,低于可接受的风险值 $10^{-6}$ ,不存在健康风险。5种致癌金属元素在2个城市的风险排序均为:Cr > Co > As > Ni > Cd。Cr是导致道路积尘磁性颗粒物健康风险的首要金属元素。

北京和东京2个城市8条主要道路健康风险见表4。由表4可见,2个城市8条主要道路的非致癌物风险排序为:明治路(东京) > 育慧南路(北京) > 半步桥路(北京) > 新宿路(东京) > 晴海路(东京) > 天坛东路(北京) > 諏访路(东京) > 樱田大街(东京);2个城市道路的致癌物风险排序为:明治路(东京) > 新宿路(东京) > 諏访路(东京) > 育慧南路(北京) > 晴海路(东京) > 天坛东路(北京) > 半步桥路(北京) > 樱田大街(东京)。

### 3 结论

(1)日本东京和中国北京2个城市8条道路夏季积尘中28种金属元素总含量水平相当。东京城市道路积尘中磁性颗粒物的占比更高。东京和北京道路积尘磁性颗粒物中Fe元素的含量水平相当,东京道路积尘磁性颗粒物中Zn和Ag元素含量是北京的7.2和5.6倍,Co、Ni、Cu、Mo、Cd、Sn和Pb等元素含量是北京的1.7~3.4倍。东京道路积尘磁性颗粒物中金属元素污染水平较北京重,受人类活动排放影响更为显著。

(2)北京主要道路积尘磁性颗粒物中金属元素富集率远高于东京,Cr、Ni、Mo、V、Fe和Cu等元素更易于富集在城市道路积尘的磁性颗粒物中。

(3)东京和北京道路积尘磁性颗粒物中金属元素的非致癌风险远低于可接受水平。2个城市非致癌金属元素的日平均暴露总量均以手口摄入暴露量最高,皮肤接触次之,口鼻呼吸吸入最低,

表 3 北京和东京城市道路积尘磁性颗粒物中金属元素的健康风险

金属元素	非致癌物健康风险						皮肤接触			风险总和			致癌物健康风险	
	手口摄入		口鼻呼吸吸入		致癌物健康风险		致癌物健康风险		致癌物健康风险		致癌物健康风险		致癌物健康风险	
	东京	北京	东京	北京	东京	北京	东京	北京	东京	北京	东京	北京	东京	北京
V	$1.05 \times 10^{-8}$	$9.15 \times 10^{-9}$	$1.48 \times 10^{-12}$	$1.21 \times 10^{-12}$	$1.18 \times 10^{-7}$	$1.09 \times 10^{-7}$	$1.28 \times 10^{-7}$	$1.18 \times 10^{-7}$	$1.28 \times 10^{-7}$	$1.18 \times 10^{-7}$	$1.28 \times 10^{-7}$	$1.18 \times 10^{-7}$	$6.66 \times 10^{-7}$	$6.17 \times 10^{-7}$
Cr	$3.74 \times 10^{-8}$	$3.70 \times 10^{-8}$	$5.54 \times 10^{-10}$	$5.13 \times 10^{-10}$	$2.11 \times 10^{-7}$	$2.20 \times 10^{-7}$	$2.49 \times 10^{-7}$	$2.58 \times 10^{-7}$	$2.49 \times 10^{-7}$	$2.58 \times 10^{-7}$	$2.49 \times 10^{-7}$	$2.58 \times 10^{-7}$	$6.66 \times 10^{-7}$	$6.17 \times 10^{-7}$
Mn	$9.07 \times 10^{-9}$	$7.32 \times 10^{-9}$	$4.13 \times 10^{-9}$	$3.12 \times 10^{-9}$	$2.56 \times 10^{-8}$	$2.18 \times 10^{-8}$	$3.88 \times 10^{-8}$	$3.22 \times 10^{-8}$	$3.88 \times 10^{-8}$	$3.22 \times 10^{-8}$	$3.88 \times 10^{-8}$	$3.22 \times 10^{-8}$	$1.10 \times 10^{-8}$	$7.21 \times 10^{-9}$
Co	$3.96 \times 10^{-10}$	$2.78 \times 10^{-10}$	$1.96 \times 10^{-10}$	$1.29 \times 10^{-10}$	$5.58 \times 10^{-11}$	$4.14 \times 10^{-11}$	$6.48 \times 10^{-10}$	$4.48 \times 10^{-10}$	$6.48 \times 10^{-10}$	$4.48 \times 10^{-10}$	$6.48 \times 10^{-10}$	$4.48 \times 10^{-10}$	$1.10 \times 10^{-8}$	$7.21 \times 10^{-9}$
Ni	$1.97 \times 10^{-9}$	$1.20 \times 10^{-9}$	$2.70 \times 10^{-13}$	$1.54 \times 10^{-13}$	$8.21 \times 10^{-10}$	$5.27 \times 10^{-10}$	$2.79 \times 10^{-9}$	$1.72 \times 10^{-9}$	$2.79 \times 10^{-9}$	$1.72 \times 10^{-9}$	$2.79 \times 10^{-9}$	$1.72 \times 10^{-9}$	$4.67 \times 10^{-9}$	$2.66 \times 10^{-9}$
Cu	$3.74 \times 10^{-9}$	$1.78 \times 10^{-9}$	$5.25 \times 10^{-13}$	$2.35 \times 10^{-13}$	$1.40 \times 10^{-9}$	$7.07 \times 10^{-10}$	$5.14 \times 10^{-9}$	$2.49 \times 10^{-9}$	$5.14 \times 10^{-9}$	$2.49 \times 10^{-9}$	$5.14 \times 10^{-9}$	$2.49 \times 10^{-9}$	$4.67 \times 10^{-9}$	$2.66 \times 10^{-9}$
Zn	$2.61 \times 10^{-9}$	$4.25 \times 10^{-10}$	$3.68 \times 10^{-13}$	$5.63 \times 10^{-14}$	$1.47 \times 10^{-9}$	$2.53 \times 10^{-10}$	$4.07 \times 10^{-9}$	$6.78 \times 10^{-10}$	$4.07 \times 10^{-9}$	$6.78 \times 10^{-10}$	$4.07 \times 10^{-9}$	$6.78 \times 10^{-10}$	$5.32 \times 10^{-9}$	$4.37 \times 10^{-9}$
As	$8.31 \times 10^{-9}$	$7.29 \times 10^{-9}$	$1.17 \times 10^{-12}$	$9.62 \times 10^{-13}$	$2.28 \times 10^{-9}$	$2.12 \times 10^{-9}$	$1.06 \times 10^{-8}$	$9.41 \times 10^{-9}$	$1.06 \times 10^{-8}$	$9.41 \times 10^{-9}$	$1.06 \times 10^{-8}$	$9.41 \times 10^{-9}$	$3.28 \times 10^{-10}$	$1.11 \times 10^{-10}$
Cd	$3.68 \times 10^{-10}$	$1.33 \times 10^{-10}$	$5.20 \times 10^{-14}$	$1.76 \times 10^{-14}$	$4.15 \times 10^{-9}$	$1.58 \times 10^{-9}$	$4.52 \times 10^{-9}$	$1.71 \times 10^{-9}$	$4.52 \times 10^{-9}$	$1.71 \times 10^{-9}$	$4.52 \times 10^{-9}$	$1.71 \times 10^{-9}$	$3.28 \times 10^{-10}$	$1.11 \times 10^{-10}$
Pb	$1.38 \times 10^{-8}$	$7.89 \times 10^{-9}$	$1.94 \times 10^{-12}$	$1.04 \times 10^{-12}$	$1.04 \times 10^{-8}$	$6.26 \times 10^{-9}$	$2.42 \times 10^{-8}$	$1.41 \times 10^{-8}$	$2.42 \times 10^{-8}$	$1.41 \times 10^{-8}$	$2.42 \times 10^{-8}$	$1.41 \times 10^{-8}$	$6.87 \times 10^{-7}$	$6.31 \times 10^{-7}$
总和	$8.81 \times 10^{-8}$	$7.25 \times 10^{-8}$	$4.88 \times 10^{-9}$	$3.76 \times 10^{-9}$	$3.75 \times 10^{-7}$	$3.62 \times 10^{-7}$	$4.68 \times 10^{-7}$	$4.38 \times 10^{-7}$	$4.68 \times 10^{-7}$	$4.38 \times 10^{-7}$	$4.68 \times 10^{-7}$	$4.38 \times 10^{-7}$	$6.87 \times 10^{-7}$	$6.31 \times 10^{-7}$

表 4 北京和东京城市 8 条主要道路健康风险

金属元素	非致癌物健康风险								致癌物健康风险					
	东京		北京		东京		北京		东京		北京		北京	
	新宿路	明治路	晴海路	樱田大街	育慧南路	天坛东路	半步桥路	新宿路	明治路	晴海路	樱田大街	育慧南路	天坛东路	半步桥路
V	$8.97 \times 10^{-8}$	$3.22 \times 10^{-7}$	$7.76 \times 10^{-8}$	$6.55 \times 10^{-8}$	$8.75 \times 10^{-8}$	$6.55 \times 10^{-8}$	$8.07 \times 10^{-8}$	$1.19 \times 10^{-7}$	$8.07 \times 10^{-8}$	$1.19 \times 10^{-7}$	$8.07 \times 10^{-8}$	$1.19 \times 10^{-7}$	$1.19 \times 10^{-7}$	$1.55 \times 10^{-7}$
Cr	$1.61 \times 10^{-7}$	$5.46 \times 10^{-7}$	$2.62 \times 10^{-7}$	$9.59 \times 10^{-8}$	$1.79 \times 10^{-7}$	$9.59 \times 10^{-8}$	$3.87 \times 10^{-7}$	$1.48 \times 10^{-7}$	$3.87 \times 10^{-7}$	$1.48 \times 10^{-7}$	$3.87 \times 10^{-7}$	$1.48 \times 10^{-7}$	$1.48 \times 10^{-7}$	$2.38 \times 10^{-7}$
Mn	$3.49 \times 10^{-8}$	$5.82 \times 10^{-8}$	$4.24 \times 10^{-8}$	$1.67 \times 10^{-8}$	$4.16 \times 10^{-8}$	$1.67 \times 10^{-8}$	$2.66 \times 10^{-8}$	$2.51 \times 10^{-8}$	$2.66 \times 10^{-8}$	$2.51 \times 10^{-8}$	$2.66 \times 10^{-8}$	$2.51 \times 10^{-8}$	$2.51 \times 10^{-8}$	$4.50 \times 10^{-8}$
Co	$5.30 \times 10^{-10}$	$1.15 \times 10^{-9}$	$6.00 \times 10^{-10}$	$2.60 \times 10^{-10}$	$7.02 \times 10^{-10}$	$2.60 \times 10^{-10}$	$4.04 \times 10^{-10}$	$3.54 \times 10^{-10}$	$4.04 \times 10^{-10}$	$3.54 \times 10^{-10}$	$4.04 \times 10^{-10}$	$3.54 \times 10^{-10}$	$3.54 \times 10^{-10}$	$5.87 \times 10^{-10}$
Ni	$3.15 \times 10^{-9}$	$4.90 \times 10^{-9}$	$3.43 \times 10^{-9}$	$7.07 \times 10^{-10}$	$1.76 \times 10^{-9}$	$7.07 \times 10^{-10}$	$2.22 \times 10^{-9}$	$1.66 \times 10^{-9}$	$2.22 \times 10^{-9}$	$1.66 \times 10^{-9}$	$2.22 \times 10^{-9}$	$1.66 \times 10^{-9}$	$1.66 \times 10^{-9}$	$1.28 \times 10^{-9}$
Cu	$3.55 \times 10^{-9}$	$9.92 \times 10^{-9}$	$4.33 \times 10^{-9}$	$8.67 \times 10^{-10}$	$7.02 \times 10^{-9}$	$8.67 \times 10^{-10}$	$2.13 \times 10^{-9}$	$2.92 \times 10^{-9}$	$2.13 \times 10^{-9}$	$2.92 \times 10^{-9}$	$2.13 \times 10^{-9}$	$2.92 \times 10^{-9}$	$2.92 \times 10^{-9}$	$2.42 \times 10^{-9}$
Zn	$2.09 \times 10^{-9}$	$2.29 \times 10^{-9}$	$1.00 \times 10^{-8}$	$1.60 \times 10^{-9}$	$4.38 \times 10^{-9}$	$1.60 \times 10^{-9}$	$4.88 \times 10^{-10}$	$7.02 \times 10^{-10}$	$4.88 \times 10^{-10}$	$7.02 \times 10^{-10}$	$4.88 \times 10^{-10}$	$7.02 \times 10^{-10}$	$7.02 \times 10^{-10}$	$8.44 \times 10^{-10}$
As	$7.89 \times 10^{-9}$	$9.79 \times 10^{-9}$	$1.38 \times 10^{-8}$	$4.18 \times 10^{-9}$	$1.73 \times 10^{-8}$	$4.18 \times 10^{-9}$	$7.06 \times 10^{-9}$	$1.11 \times 10^{-8}$	$7.06 \times 10^{-9}$	$1.11 \times 10^{-8}$	$7.06 \times 10^{-9}$	$1.11 \times 10^{-8}$	$1.01 \times 10^{-8}$	$1.01 \times 10^{-8}$
Cd	$3.00 \times 10^{-9}$	$2.62 \times 10^{-9}$	$1.01 \times 10^{-8}$	$1.55 \times 10^{-9}$	$5.26 \times 10^{-9}$	$1.55 \times 10^{-9}$	$1.24 \times 10^{-9}$	$1.93 \times 10^{-9}$	$1.24 \times 10^{-9}$	$1.93 \times 10^{-9}$	$1.24 \times 10^{-9}$	$1.93 \times 10^{-9}$	$1.93 \times 10^{-9}$	$1.96 \times 10^{-9}$
Pb	$1.21 \times 10^{-8}$	$1.23 \times 10^{-8}$	$3.65 \times 10^{-8}$	$4.71 \times 10^{-9}$	$5.53 \times 10^{-8}$	$4.71 \times 10^{-9}$	$4.67 \times 10^{-9}$	$1.35 \times 10^{-8}$	$4.67 \times 10^{-9}$	$1.35 \times 10^{-8}$	$4.67 \times 10^{-9}$	$1.35 \times 10^{-8}$	$2.42 \times 10^{-8}$	$2.42 \times 10^{-8}$
总和	$3.18 \times 10^{-7}$	$9.68 \times 10^{-7}$	$4.61 \times 10^{-7}$	$1.92 \times 10^{-7}$	$3.99 \times 10^{-7}$	$1.92 \times 10^{-7}$	$5.12 \times 10^{-7}$	$3.24 \times 10^{-7}$	$5.12 \times 10^{-7}$	$3.24 \times 10^{-7}$	$5.12 \times 10^{-7}$	$3.24 \times 10^{-7}$	$4.79 \times 10^{-7}$	$4.79 \times 10^{-7}$

其中,皮肤接触途径的非致癌物健康风险最高,8条道路夏季积尘中以东京明治路的磁性颗粒物重金属非致癌风险最高。Cr是导致道路积尘磁性颗粒物健康风险的首要金属元素。

(4)东京和北京的道路积尘中Cr、Co、As、Ni和Cd的致癌风险均低于可接受风险水平。Cr的致癌风险最高,并接近 $10^{-6}$ 的可接受水平,应对道路积尘颗粒物中的重金属致癌风险特别关注。

#### [参考文献]

- [1] BOOGAARD H, JANSSEN N A H, FISCHER P H, et al. Contrasts in oxidative potential and other particulate matter characteristics collected near major streets and background locations[J]. *Environmental Health Perspectives*, 2012, 120(2): 185–191.
- [2] LI X, LI Y, LAWLER M J, et al. Composition of ultrafine particles in urban Beijing: measurement using a thermal desorption chemical ionization mass spectrometer[J]. *Environmental Science and Technology*, 2021, 55(5): 2859–2868.
- [3] MAHER B A, AHMED I A M, KARLOUKOVSKI V, et al. Magnetite pollution nanoparticles in the human brain[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2016, 113(39): 10797–10801.
- [4] BOURLIVA A, PAPADOPOULOU L, AIDONA E. Study of road dust magnetic phases as the main carrier of potentially harmful trace elements[J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 553: 380–391.
- [5] REVUELTA M A, MCINTOSH G, PEY J, et al. Partitioning of magnetic particles in  $PM_{10}$ ,  $PM_{2.5}$  and  $PM_1$  aerosols in the urban atmosphere of Barcelona (Spain)[J]. *Environmental Pollution*, 2014, 188: 109–117.
- [6] PANKHURST Q, HAUTOT D, KHAN N, et al. Increased levels of magnetic iron compounds in Alzheimer's disease[J]. *Journal of Alzheimer's Disease*, 2008, 13: 49–52.
- [7] LU D, LUO Q, CHEN R, et al. Chemical multi-fingerprinting of exogenous ultrafine particles in human serum and pleural effusion[J]. *Nature Communications*, 2020, 11(1): 2567.
- [8] GONET T, MAHER B A. Airborne, vehicle-derived Fe-bearing nanoparticles in the urban environment: a review[J]. *Environmental Science and Technology*, 2019, 53(17): 9970–9991.
- [9] KERMENIDOU M, BALCELLS L, MARTINEZ-BOUBETA C, et al. Magnetic nanoparticles: An indicator of health risks related to anthropogenic airborne particulate matter[J]. *Environmental Pollution*, 2021, 271: 116309.
- [10] LONG X, LUO Y, ZHANG Z, et al. The nature and oxidative reactivity of urban magnetic nanoparticle dust provide new insights into potential neurotoxic studies[J]. *Environmental Science and Technology*, 2020, 54(17): 10599–10609.
- [11] KELEPERTZIS E, ARGYRAKI A, BOTSOU F, et al. Tracking the occurrence of anthropogenic magnetic particles and potentially toxic elements (PTEs) in house dust using magnetic and geochemical analyses[J]. *Environmental Pollution*, 2019, 245: 909–920.
- [12] 张文超, 吕森林, 刘丁彧, 等. 宣威街道尘中重金属的分布特征及其健康风险评估[J]. *环境科学*, 2015, 36(5): 1810–1817.
- [13] 李慧明, 钱新, 冷湘梓, 等. 南京市 $PM_{2.5}$ 中金属元素污染特征及健康风险[J]. *环境监控与预警*, 2021, 13(1): 7–13.
- [14] 阿迪莱·伊斯马伊力, 麦麦提吐尔逊·艾则孜, 靳万贵, 等. 典型石油城市道路积尘重金属污染及健康风险评估[J]. *环境污染与防治*, 2020, 42(4): 487–492.
- [15] 郭清源, 白雯宇, 赵雪艳, 等. 淄博市道路尘细粒子载带金属元素的来源与健康风险评估[J]. *环境科学*, 2021, 42(3): 1245–1254.
- [16] 坑斌, 郭新彪, 孙利文. 2017年北京市怀柔区大气 $PM_{2.5}$ 中重金属污染特征及健康风险评估[J]. *环境卫生学杂志*, 2019, 9(2): 148–152.
- [17] 孙宏阳. 本市2019年机动车保有量控制在620万辆轨道交通达699公里[EB/OL]. (2019-02-15)[2021-05-28]. <http://www.beijing.gov.cn/>.
- [18] WANG G, OLDFIELD F, XIA D, et al. Magnetic properties and correlation with heavy metals in urban street dust: a case study from the city of Lanzhou, China[J]. *Atmospheric Environment*, 2012, 46: 289–298.
- [19] 魏复盛, 陈静生, 吴燕玉, 等. 中国土壤环境背景值研究[J]. *环境科学*, 1991, 12(4): 12–19.
- [20] TAKEDA A, KIMURA K, YAMASAKI S. Analysis of 57 elements in Japanese soils, with special reference to soil group and agricultural use[J]. *Geoderma*, 2004, 119: 291–307.