

内蒙古畜禽养殖场周边土壤重金属污染特征及评价

孙文静

(内蒙古自治区环境监测中心站, 内蒙古 呼和浩特 010010)

摘要:于2015年5—8月采集内蒙古自治区东部、中部和西部地区32个畜禽养殖场周边共160个土壤样品,分析8种重金属含量。通过单项污染指数法和内梅罗综合污染指数法评价畜禽养殖场周边土壤重金属的污染程度,主成分分析重金属污染的成因和来源。结果表明,除Hg和As外,Cd、Pb、Cr、Cu、Zn和Ni 6种重金属的平均值均高于内蒙古自治区土壤背景值,其中Cd是背景值的2.14倍。单项污染指数评价表明,重金属Cd在东部畜禽养殖场周边土壤中呈中度污染,在中部和西部地区畜禽养殖场周边土壤中呈轻度污染。不同重金属元素平均污染程度为: Cd > Pb > Cr(Ni) > Zn > Cu > As > Hg。内梅罗综合污染指数评价表明,东部地区畜禽养殖场周边土壤污染最严重,为中度污染,中部和西部地区畜禽养殖场周边土壤均为轻度污染。不同地区畜禽养殖场周边土壤重金属内梅罗综合污染指数大小顺序为:东部地区(2.27) > 西部地区(1.52) > 中部地区(1.35)。主成分分析结果显示,内蒙古不同地区畜禽养殖场周边土壤不同重金属的来源存在差异,其中Pb、Cr、Cu、Zn和Ni主要来源于畜禽粪便和冲洗禽舍等污水的不当排放;Hg主要来源于自然源。

关键词: 畜禽养殖场; 土壤; 重金属; 污染特征; 评价; 内蒙古

中图分类号: X825

文献标志码: B

文章编号: 1674-6732(2020)04-0045-06

Characteristic and Evaluation of Soil Pollution by Heavy Metal Adjacent to the Livestock and Poultry Feedlots in Inner Mongolia Autonomous Region

SUN Wen-jing

(Inner Mongolia Autonomous Region Environmental Monitoring Center Station, Inner Mongolia, Hohhot 010010, China)

Abstract: 160 soil samples were collected from the sampling sites adjacent to 32 livestock and poultry feedlots which locate in eastern, central and western part of Inner Mongolia Autonomous Region, and contents of eight heavy metals were analyzed. Single factor pollution index and Nemerow integrated pollution index were used to evaluate the pollution degree and Principal Component Analysis was used to analyze the causes and sources of heavy metal pollution. The results showed that except for Hg and As, the mean contents of six heavy metals, which were Cd, Pb, Cr, Cu, Zn and Ni, exceeded the corresponding background values in the Inner Mongolia Autonomous Region. The mean contents of Cd was 2.14 times of the soil background value of the Inner Mongolia Autonomous Region. Single factor pollution index showed that the soil surrounding livestock and poultry farms in the west was contaminated by Cd moderately, while in the east lightly. The average pollution degree was in the following order: Cd > Pb > Cr(Ni) > Zn > Cu > As > Hg. Nemerow integrated pollution index showed that the soils adjacent to eastern livestock and poultry feedlots were moderately polluted by heavy metals. The soils adjacent to western and central livestock and poultry feedlots were mildly polluted. The Nemerow integrated pollution index of the different areas ranked as follows: Eastern region(2.27) > Western region(1.52) > Central region(1.35). The results of Principal Component Analysis showed that the heavy metals in soil adjacent to the livestock and poultry feedlots of different regions of Inner Mongolia came from different sources. Pb, Cr, Cu, Zn and Ni were mainly originated from livestock manure and waste water which were discharged irregularly, while Hg was mainly from natural sources.

Key words: Livestock and poultry feedlots; Soil; Heavy metal; Pollution characteristic; Assessment; Inner Mongolia

收稿日期:2020-03-02;修订日期:2020-03-31

作者简介:孙文静(1981—),女,高级工程师,硕士,主要从事土壤环境质量监测和土壤污染防治研究工作。

内蒙古自治区地处中国北部边疆,横跨东北、华北、西北地区,全区土地总面积为 118.3 万 km²,占全国国土总面积的 12.3%,居全国第 3 位。根据《1:100 万中华人民共和国土壤图》,采用“土壤发生分类”系统,内蒙古自治区划分出 11 个土纲,33 个土类,107 个亚类。地带性土壤由东至西分别为黑土、黑钙土、栗钙土、棕钙土、灰棕漠土、灰漠土、褐土、灰钙土以及山地上发育的灰白色森林土、灰色森林土、棕壤、暗棕壤;其中栗钙土类面积最大。

内蒙古自治区是中国重要的畜牧业生产基地,畜禽养殖模式逐渐由分散养殖向规模化养殖转变。2019 年全区年末牲畜存栏数 7 192.4 万头,其中,生猪存栏 429.6 万头,牛存栏 626.1 万头,羊存栏 5 975.9 万头^[1]。随着规模化养殖场的发展,为提高畜禽养殖效率、防治动物疾病等,抗生素和多种重金属元素等各种添加剂常被添加到饲料中,并且绝大部分会随着畜禽粪便排出体外^[2-3],处理不当会造成土壤重金属污染,对生态环境构成极大威胁。由于重金属元素在土壤中移动性很小,不易随水淋滤,不为微生物降解,其在土壤中的含量会逐年累积。现于 2015 年 5—8 月采集内蒙古自治区东部、中部和西部地区 32 个畜禽养殖场周边共 160 个土壤样品,分析 8 种重金属含量。通过单项污染指数法和内梅罗综合污染指数法评价畜禽养殖场周边土壤重金属的污染程度。

1 研究方法

1.1 采样时间

2015 年 5—8 月。

1.2 点位布设

选取内蒙古自治区东部、中部和西部地区规模

为常年存栏量 500 头以上的猪、3 万只以上的鸡、100 头以上的牛和 1 000 头以上的羊等畜禽养殖场,全区共选择 32 个采样区,其中 19 个采样区养殖牛,4 个采样区养殖鸡,2 个采样区养殖羊,7 个采样区养殖猪。采用网格法在畜禽养殖场外围 500 m 范围内随机布点,网格大小为 100 m × 100 m,通过查随机数表,得到 5 个随机数,随机数对应的网格编号,则该网格生成中心点,作为监测点位。在 32 个畜禽养殖场周边共布设 160 个土壤监测点位,选取的畜禽养殖场个数及畜禽种类见表 1。

表 1 畜禽养殖场个数及畜禽种类

地区	畜禽养殖场个数/个	畜禽种类	样点数/个
东部	12	奶牛、肉牛、猪、鸡	60
中部	11	奶牛、肉牛、猪、鸡	55
西部	9	奶牛、羊、猪、鸡	45
合计	32		160

1.3 样品采集与制备

按照《土壤环境监测技术规范》(HJ/T 166—2004)采集和制备样品。每个监测点位采集表层 0~20 cm 的土样。土样避光自然风干,粗磨前拣出碎石、沙砾及动植物残体等杂物,用木棍敲碎土样。粗磨后土样过 2 mm 筛,充分混合、搅拌至均匀,四分法取样。一份装瓶用于 pH 值分析;另一份细磨至 0.15 mm 用于金属元素分析。

1.4 样品消解和测定

土壤 pH 值、金属元素均由取得资质认定的实验室检测,具体检测方法见表 2。仪器设备通过检定或校准,按照《HJ/T 166—2004》进行准确度和精密度控制。

表 2 各项目实验室测定方法

序号	项目	前处理方法	测定方法	仪器设备
1	pH 值	水浸提	玻璃电极法	pH 计(PB-10)
2	砷(As)	1+1 王水消解	原子荧光光度法	原子荧光光度计(北京海光, AFS-230)
3	汞(Hg)			
4	镉(Cd)	四酸消解	石墨炉原子吸收分光光度法	石墨炉原子吸收分光光度计 ZENit contrAA700
5	铅(Pb)		火焰原子吸收分光光度法	原子吸收分光光度计 ZENit ContrAA300
6	铬(Cr)			
7	铜(Cu)			
8	锌(Zn)			
9	镍(Ni)			

1.5 评价方法

研究区域土壤重金属污染状况采用《HJ/T 166—2004》中的土壤单项污染指数和内梅罗综合污染指数进行评价。

1.5.1 单项污染指数法

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

式中： P_i ——单项污染指数；

C_i ——土壤中污染物 i 的实测值，mg/kg；

S_i ——污染物 i 的评价标准值，mg/kg。

选用内蒙古土壤重金属元素的背景值作为评价标准值，以内蒙古自治区土壤重金属元素质量比的中位值作为背景值^[4]。

1.5.2 内梅罗污染指数法

$$P_N = [(P_{i均}^2 + P_{i最大}^2) / 2]^{1/2} \quad (2)$$

式中： P_N ——内梅罗污染指数；

$P_{i均}$ ——平均单项污染指数；

$P_{i最大}$ ——最大单项污染指数。

内梅罗污染指数划定污染等级见表3。

表3 土壤重金属污染分级标准

等级	P_N	污染等级
I	$P_N \leq 0.7$	清洁(安全)
II	$0.7 < P_N \leq 1.0$	尚清洁(警戒限)
III	$1.0 < P_N \leq 2.0$	轻度污染
IV	$2.0 < P_N \leq 3.0$	中度污染
V	$P_N > 3.0$	重污染

1.6 统计分析

数据的统计分析采用 Excel 2007、SPSS 17.0 统计软件进行,并利用 Duncan 单因素方差分析对不同地区畜禽养殖场周边土壤重金属进行两两比较,利用降维处理对各重金属元素进行主成分分析^[5-6]。

2 结果与分析

2.1 研究区域土壤基本特性

内蒙古自治区畜禽养殖场周边 160 个采样点 pH 值为 5.40 ~ 10.22, pH 值_{平均}为 8.20。其中东部地区畜禽养殖场周边土壤 pH 值_{平均}最低,为 7.69; 中部地区 pH 值_{平均}为 8.51, 西部地区 pH_{平均} 值为 8.50, 整体属于碱性土壤。

2.2 畜禽养殖场周边土壤重金属质量比

选取内蒙古自治区土壤中位值作为背景值^[4]。各监测点位土壤样品重金属质量比统计结果见表4。由表4可见,选取的畜禽养殖场周边土壤重金属质量比普遍超过内蒙古自治区土壤背景值。与内蒙古土壤背景值相比,监测点位土壤重金属 Cd、Pb、Cr 超过背景值点位比例均 > 50%, 其中 Cd 超过的比例最大,为 81.88%, 其次是 Pb(72.5%)、Cr(55.0%)。重金属 Cd 平均值是背景值的 2.14 倍,远高于其他 7 种重金属。

表4 内蒙古自治区畜禽养殖场周边土壤重金属质量比 ($n = 160$)

元素	范围/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	($\bar{x} \pm s$)/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	变异系数/%	超过背景值 点位比例/%	背景值 ^① / ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	平均值/ 背景值
Cd	0.005 ~ 0.498	0.096 ± 0.073	76.04	81.88	0.045	2.14
Hg	0.001 ~ 0.177	0.023 ± 0.023	101.77	27.50	0.026	0.87
As	0.18 ~ 15.1	6.63 ± 3.03	45.76	48.13	6.7	0.99
Pb	0.70 ~ 93.6	21.8 ± 16.3	74.54	72.50	13.9	1.57
Cr	2.5 ~ 99.8	41.3 ± 16.4	40.05	55.00	39.3	1.05
Cu	2.80 ~ 38.3	14.9 ± 6.27	42.09	49.38	14.2	1.05
Zn	0.25 ~ 196	56.1 ± 34.3	61.16	40.00	53.8	1.04
Ni	6.20 ~ 49.8	20.1 ± 8.27	41.13	49.38	18.7	1.07

① 内蒙古自治区土壤背景值(中位值)。

采集的土壤中重金属除 Hg 和 As 外,其余 6 种重金属的平均值均 > 内蒙古土壤背景值。Hg 和 As 的平均值分别是背景值的 0.87 和 0.99 倍,Cd、Pb、Cr、Cu、Zn 和 Ni 分别是背景值的 2.14, 1.57, 1.05, 1.05, 1.04 和 1.07 倍,说明内蒙古自治区畜禽养殖场周边土壤已经受到不同程度的重金属污染。

变异系数越大,说明重金属在空间上的分布差异越大,土壤受人类活动干扰越强。研究 8 种重金属的变异系数大小顺序为: Hg > Cd > Pb > Zn > As > Cu > Ni > Cr。As、Cu、Ni 和 Cr 变异系数相对较小,说明这 4 种元素受外界影响较小,空间分布差异小,反映 As、Cu、Ni 和 Cr 在不同地区畜禽养殖

场污染程度的相似性或污染程度相对较轻;Hg、Cd 和 Pb 变异系数较大,均 >70%,说明这 3 种元素受外界干扰较大,在空间上的分布有较大差异。

2.3 畜禽养殖场周边土壤重金属分布

内蒙古自治区东部、中部和西部地区 32 个畜禽养殖场周边土壤重金属质量比不同。东部地区畜禽养殖场周边土壤中 Cd、Hg、As、Pb 和 Ni 质量比最高,分别为背景值的 2.87,1.12,1.29,1.94 和 1.18 倍;中部地区畜禽养殖场周边土壤中 Cu 质量

比最高,为背景值的 1.11 倍;西部地区畜禽养殖场周边土壤中 Cr 和 Zn 质量比最高,分别为背景值的 1.13 和 1.14 倍。

通过方差分析比较东部、中部和西部地区畜禽养殖场周边土壤重金属元素的质量比,分析结果表明 Cd、Hg、As、Pb 和 Ni 在不同畜禽养殖场周边土壤中的分布差异有统计学意义($P < 0.05$)。内蒙古自治区东部、中部和西部地区畜禽养殖场周边土壤重金属质量比见表 5。

表 5 内蒙古自治区不同地区畜禽养殖场周边土壤重金属质量比^①

元素	东部地区/(mg·kg ⁻¹)	中部地区/(mg·kg ⁻¹)	西部地区/(mg·kg ⁻¹)	背景值/(mg·kg ⁻¹)	P
Cd	0.129 ± 0.104a	0.072 ± 0.038b	0.083 ± 0.029b	0.045	0.000
Hg	0.029 ± 0.026a	0.019 ± 0.014b	0.019 ± 0.026b	0.026	0.019
As	8.67 ± 2.45a	5.57 ± 2.83b	5.20 ± 2.49b	6.7	0.000
Pb	26.9 ± 24.0a	17.4 ± 7.58b	20.3 ± 7.05b	13.9	0.005
Cr	41.3 ± 17.5a	38.7 ± 19.0a	44.3 ± 10.1a	39.3	0.238
Cu	15.2 ± 6.37a	15.8 ± 7.59a	13.5 ± 3.73a	14.2	0.173
Zn	59.5 ± 49.2a	48.1 ± 17.7a	61.3 ± 22.4a	53.8	0.100
Ni	221 ± 9.52a	19.5 ± 8.87ab	18.0 ± 4.34b	18.7	0.038

① 同一行中字母(a,b)如相同表示差异不显著,字母不同表示差异显著($P < 0.05$)。

2.4 畜禽养殖场周边土壤重金属污染评价

采用单项污染指数法评价重金属元素对内蒙古自治区畜禽养殖场周边土壤的污染程度,结果显示,不同重金属元素污染程度大小顺序为: Cd > Pb > Cr(Ni) > Zn > Cu > As > Hg。内蒙古东部、中部和西部地区畜禽养殖场周边土壤重金属 Cd 为轻度污染(除东部地区中度污染外);Pb 为轻度污染;

Cr 和 Zn 呈轻度污染(除中部地区无污染外);Cu 和 Ni 呈轻度污染(除西部地区无污染外);Hg 和 As 无污染(除东部地区轻度污染外)。除 Hg 和 As 外,Cd、Pb、Cr、Cu、Zn 和 Ni 的 P_i 均 > 1.0,表明内蒙古自治区畜禽养殖场周边土壤重金属已发生累积现象。内蒙古自治区畜禽养殖场周边土壤重金属污染评价见表 6。

表 6 内蒙古自治区畜禽养殖场周边土壤重金属污染评价指数

畜禽养殖场	P_i								P_N
	Cd	Hg	As	Pb	Cr	Cu	Zn	Ni	
东部地区	2.87	1.12	1.29	1.94	1.05	1.07	1.11	1.18	2.27
中部地区	1.59	0.73	0.83	1.25	0.99	1.11	0.89	1.04	1.35
西部地区	1.84	0.72	0.78	1.46	1.13	0.95	1.14	0.96	1.52
平均值	2.10	0.86	0.97	1.55	1.06	1.04	1.05	1.06	

内蒙古东部、中部和西部地区畜禽养殖场周边土壤重金属 P_N 大小顺序为:东部地区(2.27) > 西部地区(1.52) > 中部地区(1.35)。东部地区畜禽养殖场周边土壤污染最严重,为中度污染,中部和西部地区畜禽养殖场周边土壤均为轻度污染。说明内蒙古自治区东部、中部和西部地区畜禽养殖场周边土壤已受到了不同程度的重金属污染,可能是

畜禽养殖粪便或冲洗禽舍等污水排放不当造成。

2.5 土壤重金属的主成分分析

通过数据的降维处理对各种重金属进行主成分分析。内蒙古自治区畜禽养殖场周边土壤主成分分析结果见表 7。由表 7 可见,主成分 1 贡献率为 42.29%,说明该因子对土壤中重金属具有决定性作用。Hg 在主成分 2 中具有较高的因子载荷,

主要来源于自然源,即来源于成土母质。Pb、Cr、Cu、Zn 和 Ni 在主成分 1 中具有较高载荷,是人为源输入影响的结果,主要来源于畜禽粪便和冲洗禽舍等污水。

表 7 土壤重金属元素载荷量

元素(变量)	主成分	
	主成分 1	主成分 2
Cd	0.366	0.482
Hg	0.074	0.816
As	0.597	0.497
Pb	0.670	-0.436
Cr	0.792	-0.127
Cu	0.678	0.263
Zn	0.762	-0.322
Ni	0.878	-0.083
贡献率/%	42.29	19.13

3 讨论

(1) 内蒙古自治区 32 个畜禽养殖场周边土壤中除 Hg 和 As 外,其余 6 种重金属的平均含量均超过内蒙古土壤背景值(中位值)。这与金媛娟^[7]研究较为一致:莆田市畜禽养殖场周边农田土壤 8 种元素中,只有 As 未富集,其他 7 种重金属元素均存在不同程度的富集现象,其中 Cd、Cu、Zn 超背景值较高,富集较明显。且不同重金属在不同地区畜禽养殖场周边土壤中的累积程度也不同。Cd、Pb 和 Ni 在东部地区畜禽养殖场周边土壤中具有较高的累积,Cu 在中部地区畜禽养殖场周边土壤中具有较高的累积,Cr 和 Zn 在西部地区畜禽养殖场周边土壤中具有较高的累积。说明内蒙古自治区畜禽养殖业的发展已造成了其周边土壤中重金属的累积,其中累积程度最高的是 Cd,其次是 Pb。可能是因为土壤中黏土矿物、有机质等组分对 Cd 具有吸附固定能力,且多数土壤对 Cd 的吸附率可达到 80%~95%^[8]。虽然土壤中 Cd 含量较高,但 Cd 不进入食物链,相对安全,这是因为土壤矿物对 Cd 元素具有较强的固定与容纳能力^[9-10]。

(2) 内蒙古自治区东部、中部和西部地区畜禽养殖场周边土壤重金属污染程度不同。东部地区畜禽养殖场周边土壤污染最严重,为中度污染,中部和西部地区畜禽养殖场周边土壤均为轻度污染。可能与内蒙古东部地区以森林土壤为主,中西部以草原土壤、荒漠土壤为主有关,森林土壤中 Cd、Cr、Hg、Pb 和 Zn 含量较草原土壤和荒漠土壤高^[4]。

另外东部地区土壤自然肥力较高,结构和水分条件良好,易于耕作。农田土壤中 Cd 含量高,与频繁的耕作、家用机械的使用和化肥的大量施用有关。农田常施用有机肥、过磷酸碱复合肥,磷肥是以磷矿为原料生产,原磷矿中所含的 Cd 大部分或全部残留在磷肥中^[11]。Cd 随着磷肥进入土壤,由于 Cd 在土壤中运动小,流失少,不会被微生物分解,加上长期施用增加了土壤中 Cd 的积累。

内蒙古东部地区畜禽养殖场周边土壤污染较重,可能与东部地区土壤形成过程中钙积化强烈,有机质积累较多有关。土壤有机质能与重金属元素形成络合物,影响各形态重金属迁移转化^[12]。孙花等^[13]探讨了土壤有机质与土壤重金属积累及其有效性关系,分析得出我国部分沿海地区农田土壤多种重金属含量与土壤有机质呈显著正相关。

(3) 内蒙古自治区畜禽养殖场周边土壤重金属的主成分分析结果表明,不同畜禽养殖场周边土壤重金属受人为活动的影响程度不同。Hg 主要来源于自然源;而受人为活动影响最强的重金属是 Pb、Cr、Cu、Zn 和 Ni,主要来自饲料中重金属的添加和畜禽粪便、冲洗禽舍等污水的不规范排放。有研究表明,畜禽粪便及饲料中含有重金属 Cr、Cu、Zn、As、Cd、Pb 等,如果畜禽粪便等废弃物处理不当、堆放不规范,就可能造成土壤重金属污染^[14-18]。

4 结论

(1) 内蒙古畜禽养殖场周边土壤 Cd、Pb、Cr、Cu、Zn 和 Ni 6 种重金属的平均值均高于内蒙古自治区土壤背景值,其中 Cd 的含量是背景值的 2.14 倍。重金属 Cd 在东部地区畜禽养殖场周边土壤中呈中度污染,在中部和西部地区畜禽养殖场周边土壤中呈轻度污染。不同重金属元素平均污染程度为: Cd > Pb > Cr(Ni) > Zn > Cu > As > Hg。

(2) 内蒙古东部地区畜禽养殖场周边土壤污染最严重,为中度污染,中部和西部地区畜禽养殖场周边土壤均为轻度污染。不同地区畜禽养殖场周边土壤重金属 P_N 大小顺序为:东部地区(2.27) > 西部地区(1.52) > 中部地区(1.35)。

(3) 内蒙古不同地区畜禽养殖场周边土壤不同重金属的来源存在差异,其中 Pb、Cr、Cu、Zn 和 Ni 主要来源于畜禽粪便和冲洗禽舍等污水的不当排放;Hg 主要来源于自然源。

[参考文献]

- [1] 内蒙古自治区统计局. 内蒙古自治区2019年国民经济和社会发展统计公报[R]. 2020.
- [2] ABDELLAH Z, JOSE M S. Review on the toxicity, occurrence, oetabolism, detoxification, regulations and intake of zearalenone: An oestrogenic mycotoxin [J]. *Food and Chemical Toxicology*, 2007, 45(1): 1-18.
- [3] 王瑾, 韩剑众. 饲料中重金属和抗生素对土壤和蔬菜的影响[J]. *生态与农村环境学报*, 2008, 24(4): 90-93.
- [4] 中国环境监测总站. 中国土壤元素背景值[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1990: 94-145, 330-380.
- [5] 郭伟, 孙文慧, 赵仁鑫, 等. 呼和浩特市不同功能区土壤重金属污染特征及评价[J]. *环境科学*, 2013, 34(4): 1561-1567.
- [6] 杨永志, 闫海霞, 马穆德. 呼和浩特市绿地土壤重金属污染特征及评价[J]. *北方园艺*, 2019(16): 110-116.
- [7] 金媛娟. 莆田市畜禽养殖场周边农田土壤重金属污染监测及评价[J]. *海峡科学*, 2016(6): 71-73.
- [8] 范毓强. 环境中的镉[M]. 北京: 中国大百科全书出版社, 1996.
- [9] 鲁安怀. 土壤重金属环境质量矿物学评价方法[J]. *地质通报*, 2005, 25(8): 715-720.
- [10] 郑喜坤, 鲁安怀, 汪庆华, 等. 用矿物学方法评价浙江土壤中Cd污染的状况[J]. *地质通报*, 2007, 26(5): 598-604.
- [11] 鲁如坤. 我国磷矿磷肥中镉的含量及其对生态环境影响评价[J]. *土壤学报*, 1992, 29(2): 150-157.
- [12] 吕殿青, 王宏, 潘云, 等. 容重变化对土壤溶质运移特征的影响[J]. *湖南师范大学(自然科学学报)*, 2010, 33(1): 75-79.
- [13] 孙花, 谭长银, 黄道友, 等. 土壤有机质对土壤重金属积累、有效性及形态的影响[J]. *湖南师范大学(自然科学学报)*, 2011, 34(4): 82-87.
- [14] 颜培, 王擎运, 张佳宝, 等. 长期施用畜禽养殖废弃物下潮土重金属的累积特征[J]. *土壤*, 2017, 49(2): 321-327.
- [15] 何梦媛, 董同喜, 茹淑华, 等. 畜禽粪便有机肥中重金属在土壤剖面中积累迁移特征及生物有效性差异[J]. *环境科学*, 2017, 38(4): 1576-1586.
- [16] 吴二社, 张松林, 刘焕萍, 等. 农村畜禽养殖与土壤重金属污染[J]. *中国农学通报*, 2011, 27(3): 285-288.
- [17] 戴婷, 章明奎. 长期畜禽养殖污水灌溉对土壤养分和重金属积累的影响[J]. *灌溉排水学报*, 2010, 29(1): 36-39.
- [18] 刘海东, 李琳, 张维俊, 等. 华东地区不同种类畜禽粪便对农田土壤重金属输入的影响[J]. *环境与可持续发展*, 2017, 42(6): 136-139.
- [6] 王志轩, 潘荔, 赵鹏, 等. 现有燃煤电厂二氧化硫治理“十一五”规划研究[J]. *环境科学研究*, 2007, 20(3): 142-147.
- [7] 高兰兰, 傅成诚, 冯新斌, 等. 贵州东部某燃煤电厂汞排放对周边环境空气及土壤的影响[J]. *中国环境监测*, 2018, 34(3): 51-58.
- [8] 薛志钢, 柴发合, 段宁, 等. 运用ISC3模型模拟电厂脱硫后的大气环境影响[J]. *环境科学研究*, 2003, 16(5): 62-64.
- [9] 黄青, 程水源, 陈东升, 等. 华北电厂源对北京及周边地区SO₂影响[J]. *北京工业大学学报*, 2009, 35(10): 1389-1395.
- [10] 马英, 陶申鑫. 火电厂烟尘排放对重点城市的环境影响分析[J]. *中国环境监测*, 1990, 6(5): 38-42.
- [11] 张秀义, 周爱国, 闫来洪, 等. 胜利电厂一期工程环境影响回顾评价——污染源和污染治理措施回顾评价[J]. *中国环境监测*, 1996, 12(6): 30-34.
- [12] 王志勤, 颜文洪. 燃煤电力工程对城区环境空气质量影响分析[J]. *湖南理工学院学报*, 2008, 21(2): 84-87.
- [13] 张明华, 谢文勇, 唐晓青, 等. 河北省大气污染状况分析及对策研究[J]. *中国环境管理干部学院学报*, 2015(1): 47-50.
- [14] 生态环境部. 2019年7月和1—7月全国空气质量状况[EB/OL]. (2019-08-27) [2019-11-12]. <http://www.mee.gov.cn/>.
- [15] 韩立红. 河北省能源结构分析[J]. *河北经贸大学学报*, 2010, 31(3): 64-68.
- [16] BULTYNCK H, MALET L M. Van der Parren. Evaluation of atmospheric dilution factors for effluents diffused from an elevated continuous point source [J]. *Tellus*, 1972(5): 465-471.
- [17] LEFEBVRE W, FIERENS F, TRIMPENEERS E, et al. Modeling the effects of a speed limit reduction on traffic-related elemental carbon (EC) concentrations and population exposure to EC [J]. *Atmospheric Environment*, 2011, 45: 197-207.
- [18] VENKATRAM A, HORST T W. Approximating dispersion from a finite line source [J]. *Atmospheric Environment*, 2006, 40: 2401-2408.
- [19] LEFEBVRE W, VERCAUTEREN J, SCHROOTEN L. Validation of the MIMOSA-AURORA-IFDM model chain for policy support: Modeling concentrations of elemental carbon in Flanders [J]. *Atmospheric Environment*, 2011, 45: 6705-6713.
- [20] COSEMANS G, KRETZSCHMAR J G. The 1998 IFDM evaluation with the model validation kit [J]. *International Journal of Environment and Pollution*, 2000, 14: 122-130.
- [21] LEFEBVRE W, VAN POPPEL M, MAIHEN B. Evaluation of the RIO-IFDM-street canyon model chain [J]. *Atmospheric Environment*, 2013, 77: 325-337.
- [22] 所在地区地方志编纂委员会. 所在地区志(1979—2009) [M]. 石家庄: 河北人民出版社, 2015: 75-78.

栏目编辑 李文峻

(上接第32页)