宁东能源工业基地表层土壤粒径分布、养分、重金属含量与大气降尘的关联性

牛玉斌[1], 樊 瑾[1], 李诗瑶[1], 张振师[2], 余海龙[1], 黄菊莹[3]

(1. 宁夏大学 资源环境学院, 宁夏 银川 750021; 2. 中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司, 陕西 西安 710065; 3. 宁夏大学 环境工程研究院, 宁夏 银川 750021)

摘 要: [目的] 研究宁东能源工业基地大气降尘携带的营养物质、重金属与土壤养分、重金属含量之间的关联性,为该区域的土壤利用和环境保护提供科学依据。[方法] 本研究在宁东能源工业基地马莲台电厂主导风向下风向采集不同距离的表层土壤和大气降尘样品,分析土壤和降尘样品的粒径组成、分形维数以及 6 种重金属(Zn,Cu,Cd,Cr,Pb,Ni)的空间分布特征及其潜在生态风险;利用 Pearson 相关性分析法对表土与大气降尘中重金属含量的相关性进行探讨。[结果] ①宁东能源工业基地大气降尘的成分来源复杂,包括了自然源和人为源降尘。其中自然源降尘主要来自于境内沙尘,主要成分为石英、方解石、斜长石、绿泥石和高岭石等。人为源降尘则主要源自燃煤烟尘,主要成分涉及 Ag,Cr,Pb,Co,Mn,As,Cu 和二硫化硅以及多环芳烃化合物(PHAs)等。②大气降尘和表土的粒径分布曲线在不同距离上均呈非正态性及双峰和多峰分布,说明大气降尘和表土颗粒组成具有多源性。③大气降尘和表土综合潜在生态风险指数表明,距离污染源越远降尘中重金属的生态风险指数越大,而土壤中重金属的生态风险指数越小。Pearson 相关分析分析表明,表土与大气降尘中 Cr 和 Cu 两种重金属元素具有一定的正相关性。④大气降尘携带的营养物质沉降到地表改变了土壤的养分供给,尤其是有机质的增加量最为显著。[结论] 宁东能源工业基地大气降尘成分复杂,对土壤组成有显著影响,且增加了其潜在生态风险指数,尽管其颗粒粒径组成、分布、养分、重金属含量与大气降尘的关联性相对较弱,但其累积效应仍然值得关注。

关键词: 火电厂; 大气降尘; 表土; 矿物特征; 粒径分布; 分形维数

文献标识码: A **文章编号**: 1000-288X(2020)04-0091-09 **中图分类号**: X53

文献参数: 牛玉斌, 樊瑾, 李诗瑶, 等. 宁东能源工业基地表层土壤粒径分布、养分、重金属含量与大气降尘的关联性[J]. 水土保持通报, 2020, 40(4): 91-99. DOI: 10. 13961/j. cnki. stbctb. 2020. 04. 013; Niu Yubin, Fan Jin, Li Shiyao, et al. Correlation between particle size distribution, nutrient and heavy metals content of topsoil in Ningdong energy industrial base and atmospheric dustfall [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2020, 40(4): 91-99.

Correlation Between Particle Size Distribution, Nutrient and Heavy Metals Content of Topsoil in Ningdong Energy Industrial Base and Atmospheric Dustfall

Niu Yubin[1], Fan Jin[1], Li Shiyao[1], Zhang Zhenshi[2], Yu Hailong[1], Huang Juying[3]

(1. *College of Recourses and Environment, Ningxia University, Yinchuan, Ningxia* 750021, *China*; 2. *Power China Northwest Engineering Co. Ltd., Xi'an, Shaanxi* 710065, *China*; 3. *Institute of Environmental Engineering, Ningxia University, Yinchuan, Ningxia* 750021, *China*)

Abstract: [Objective] The relationships between nutrients and heavy metal content of soil and atmospheric dustfall in Ningdong energy industrial base were studied in order to provide a scientific support for soil utilization and environmental protection in this area. [Methods] To examine the distribution characteristics

收稿日期: 2020-03-22 **修回日期**: 2020-04-26

资助项目: 国家自然科学基金项目"灌丛沙堆演化过程中树干茎流与根区优先流对'沃岛效应'的影响"(41961001); 宁夏留学人员科技活动择优资助项目"银川市园林植物吸附 PM2.5 能力分级及其生理生态机制研究"(2016013)

第一作者: 牛玉斌(1994—),男(汉族),甘肃省定西市人,硕士研究生,研究方向为恢复生态学。Email: 1576873811@qq. com。

通讯作者: 余海龙(1979—),男(汉族),甘肃省酒泉市人,教授,硕士生导师,主要从事土壤地理学、生态恢复工程及节水灌溉方面的研究。Email: yhl@nxu. edu. cn。

and the potential ecological risk of heavy metals in both topsoil and atmospheric dustfall, soil and atmospheric dustfall samples of different distances in the leeward of near Maliantai thermal power plant in Ningdong energy industrial base were collected. The contents of 6 kinds of heavy metals (Zn, Cu, Cd, Cr, Pb, Ni) in the both topsoil and atmospheric dustfall samples were measured in the laboratory. The comprehensive potential ecological risk of these heavy metals was evaluated using the potential ecological risk index, and the fractal dimensions of soils, and their relevance with that of atmospheric dustfall were also analyzed. [Results] ① the composition of atmospheric dustfall was complex, which included the dustfalls of natural resources and artificial resources. The dustfall of natural resources was mainly from domestic sand dust, and the main components of which were Quartz, Calcite, Plagioclase, Chlorite and Kaolinite, etc. The dustfall of artificial resources was mainly from flue gas, and the main components of which were related to Ag, Co, Mn, Cr, Pb, As, Cu, Silicon disulfide and some polycyclic aromatic hydrocarbons (PHAs), etc. ② The particle size distribution curves of atmospheric dustfall and topsoil demonstrated abnormal and bimodal and multi-peak distribution status at various distances, which indicated that the compositions of atmospheric dustfall and topsoil were from multiple sources. ③ The comprehensive potential ecological risk index of both atmospheric dustfall and topsoil indicated that the index of atmospheric dustfall increased with the distance from source of pollution, while the index of topsoil decreased with the distance increasing from thermal power plant. Pearson correlation coefficients showed that Cr and Cu in the atmospheric dustfall were positively related to the Cr and Cu in soil. ④ Nutrients carried by atmospheric dustfall deposited into the topsoil changed soil nutrients supply, of which the soil organic matter was the most significant. [Conclusion] The composition of atmospheric dustfall was complex, which significantly changed the soil constitution, and increased the potential ecological risk index. Though, the correlation of particle size distribution, nutrient and heavy metals content between the topsoil and atmospheric dustfall were relatively weak, the cumulative effect deserved more attention in the future.

Keywords: thermal power plant; atmospheric dustfall; topsoil; mineralogical characteristics; particle size distribution; fractal dimension

大气降尘是大气环境中因重力作用降至地表的大气颗粒物，其粒径多在10 μm以上，这些细微颗粒物主要来源于人类活动排放的粉尘（如工业废气、建筑扬尘等）和由风力带到空气中的地面固体颗粒物[1]。目前我国城市空气污染特征由SO_2，NO_x类污染逐渐趋向尘类污染，降尘携带的污染物化学成分复杂，在沉降后会对土壤、植物、水体等造成二次污染，危害人体健康[2]。随着我国城市建设和工业产业的不断发展，一些工业密集型的区域的大气降尘量出现逐年递增的趋势[3]。大气降尘是大气污染监测的重要指标，而土壤作为大气污染物的主要蓄积库和指示器，在一定程度上反映了区域环境的污染状况[4]。大气降尘在干旱、半干旱区土壤形成过程中发挥着重要作用，会影响沉降区域的土壤结构和组分[5]。分形维数可以用以衡量土壤及大气降尘的粒度组成。如谢云霞等认为火电厂、市政焚化、冶金过程等产生的大气颗粒物一般都具有分形结构[6]。土壤分形维数能够反映土壤结构、属性及肥力[7]。大气降尘作为一种外源物质，影响土壤的的组成和性质，其数量和成分类型可在一定程度上影响成土过程的特点和强弱[8]。燃煤烟尘是火电厂周围降尘的主要物质来源。大气降尘为土壤提供营养物质并导致土壤重金属积累，会对土壤酶活性、生物活动与生物多样性产生影响[9]。

宁东能源工业基地（以下简称“宁东基地”）是依托宁东煤炭资源建设的能源、化工及相关产业集群的大型工业基地，重点发展煤炭、电力、煤化工和新材料4大主导产业。当地的能源结构、产业格局及当地自然环境决定了宁东基地的大气降尘来源复杂，空气污染严重。在现代人为活动条件下，大气降尘是土壤质量和生态系统演变的重要影响因素[10]。据报道，工业混合区和钢铁工业区降尘每年可能增加土壤厚度0.15～0.33 mm，其累积效应将是非常明显的[10]。因此，在工业区进行大气降尘对周边土壤的影响研究具有重要意义。土壤颗粒组成的分形维数可以用来分析成土强度及其发育环境[11]。目前关于燃煤烟尘对周围土壤影响的研究主要集中在氮[12]、硫[13]沉降和重金属沉降[14]。土壤是大气降尘的最终归宿，大气降尘携带的营养物质、重金属最终会沉降于土壤

中,而重金属含量与降尘粒径有一定依附关系[15],而关于大气降尘粒径组成规律及其痕量重金属在土壤中富集的规律研究鲜有报道。

因此,本文旨在通过对宁东基地典型燃煤电厂周边大气降尘矿物组成、来源及表层土壤接受降尘后颗粒组成及养分和重金属含量变化规律的测定和计算,揭示工矿区大气降尘对当地土壤发育演化过程的累积影响及作用机理,为该区域的土壤利用和环境保护提供科学依据。

1　材料与方法

1.1　研究区概况

研究区位于宁东基地核心区的马莲台电厂。据调查,该电厂燃煤锅炉排放烟气的净化方式主要是静电除尘器,并配备了湿式石灰石—石膏法烟气脱硫装置。宁东基地位于陕、甘、宁、蒙毗邻地区,西与自治区首府银川市隔黄河相望,东与陕北能源化工基地、蒙西能源化工基地毗邻,地理坐标(106°21′39″—106°56′34″E;37°04′48″—38°17′41″N),规划面积 3 483.70 km^2,是国家 14 个亿吨级煤炭基地之一。研究区地处宁夏黄河东岸鄂尔多斯台地,北临毛乌素沙地,南至宁南黄土丘陵北界,条带状分布的缓坡丘陵较多,海拔 1 150～1 512 m。研究区属中温带干旱气候区,具有典型的温带大陆气候特征,降雨多集中在 7—9 月,多年平均降水量为 194.7 mm,蒸发量为 2 088.2 mm,年均温 6.7～8.8 ℃。研究区风大沙多,全年大风(17 m/s 以上)日数为 63 d,年平均风速 2.5～2.6 m/s,风向多为西北风。土壤类型主要是灰钙土和风沙土,淡灰钙土主要分布在宁东工业园区附近,风沙土主要分布在基地中部和南部。植被覆盖度 10%～30%,天然植被分布稀少、且不均匀,主要以一年生或多年生、旱生或超旱生灌木、半灌木或草本植物为主,具耐旱、耐寒、耐土壤贫瘠。

1.2　样品采集和处理

本研究采样以马莲台电厂为中心。2018 年 3—4 月,根据废气排放特征、盛行风向、地形于电厂东南距离烟囱设置 4 个间隔为 100 m 的辐射采样点(见图 1),电厂烟囱与采样点距离最近为 500 m 左右,每个梯度按蛇形布置 7 个收集地面降尘用的集尘缸(缸口直径 80 cm,深 30 cm,布设于空旷、无地物遮挡处),3 月 10 日第 1 次采集降尘,此后每隔 10 d 采集 1 次,共计采集 6 次降尘。将各梯度的大气降尘汇总,筛除其中树叶、碎屑,风干后存储于带有标号的聚乙烯塑料样品袋中。同期,在每个梯度选取 3 个点(每个点采集附近 3 处土样混合而成)0—10 cm 的表层土带回实验室风干、标记储存。并在背风向 50 km 远处选点采集表土作为对照。大气降尘和土壤的有机质含量、全 N 含量和全 P 含量,分别采用重铬酸钾容量—外加热法、凯氏定氮法和 $HClO_4$-H_2SO_4 法测定。大气降尘和土壤的重金属采用 HNO_3-$HClO_4$-HF 三酸消化法提取,在 Agilent 7500 电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP-AES)上测定。降尘的矿物物相分析采用宁夏大学测试分析中心的利用智能转靶 X 射线衍射仪(XRD, Smart Lab0303050201)完成,试验条件:Cu 靶,波长为 0.154 186 2 nm;工作电压及电流为 45 kV 和 200 mA,测试范围 10°～80°;扫描速度 8.255 1°/min,步宽 0.01°。

为了更好地反映样品的粒径组成状况,粒径分析前,称 10 g 样品,加入 10 ml 15% H_2O_2 除去有机质,10 ml 的 0.2 mol/LHCl 去除碳酸盐,适量蒸馏水去除 Ca^{2+} 和 Cl^-,加入 10 ml 0.5 mol/L 六偏磷酸钠(适用于 pH＞7.5 的土壤)搅拌均匀之后,用 Master Sizer2000 超声波粒度分析仪进行测定。实际分析中每个样品重复 3 次,测定结果取平均值。对样品测量结果分析发现其粒径分布范围在 0.01～1 000 μm,为参比大气降尘粒级大小及其对土壤的影响,本研究参照中国制土壤粒级制对大气降尘和土壤进行粒级划分。

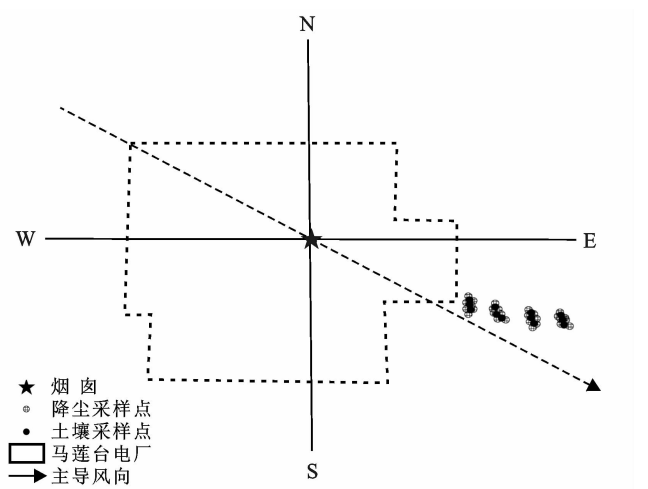


图 1　采样点布设示意图

1.3　数据分析

降尘矿物物相分析采用专业软件 MDI Jade 6.5 中分 3 步完成:①“大海捞针”。遴选与 XRD 图谱拟合最好的矿物;②单峰分析。选择所选中峰对应的物相;③指定元素分析。选择降尘中可能存在的元素,再依据元素组成匹配与其对应的矿物。数据处理与统

计用 Excel 2010 完成，并在 SPSS 24 中进行相关分析与多元线性逐步回归分析，用 Origin 9.0 作图。

大气降尘和土壤粒径分形维数的计算公式为：

$$\frac{V(r<R_i)}{V_T}=\left(\frac{R_i}{R_{\max}}\right)^{3-D} \quad (1)$$

式中：R_i 表示相邻两个粒级 R_i 与 R_{i+1} 间平均粒径，即 $R_i=(R_i+R_{i+1})/2$；$R_{\max}$ 为最大粒级的平均粒径；$V(r<R_i)$ 为粒径小于 R_i 的颗粒累积体积；V_T 表示各粒级颗粒的体积之和。统计得到 R_i 与 $V(r<R_i)$ 之后，公式两边取对数，获取拟合相关直线的斜率，即 $3-D$，从而可以求出分形维数 D。

大气降尘和土壤综合潜在生态风险指数的计算公式为：

$$\mathrm{RI}=\sum_{i=1}^{n}\left(T_i\times\frac{C_i}{B_i}\right) \quad (2)$$

式中：RI 为降尘和土壤中多种重金属的综合潜在生态风险指数；T_i 为重金属 i 的毒性系数；C_i，B_i 分别为重金属 i 的实测含量和背景含量(mg/kg)。

2 结果与分析

2.1 大气降尘与表土黏土矿物组成

研究区土壤主要以石英、斜长石、方解石和黏土矿物组成，黏土矿物组成主要以伊利石为主，高岭石、绿泥石、蒙脱石、蛭石等也占一定比例。而通过对研究区降尘的 XRD 图谱(见图 2)解读发现，研究区降尘矿物组成大体与土壤相似，主要由石英、方解石、斜长石、绿泥石、高岭石和二硫化硅组成。从 XRD 图谱中可以看出离火电厂越远，石英的含量逐渐增加，其他矿物成分的含量在不同梯度上较为稳定(见图 2)。对比降尘中的少量矿物类型的数量发现(见表 1)，随着离火电厂距离的增加，少量矿物类型的数量都呈现先降低后增加的趋势，少量矿物中含 Cr 和 Mn 的矿物，以及磷酸铝($AlPO_4$)基本在各个梯度都有分布，其他含重金属矿物多分布在 100 m 处，并且降尘中还分布着一些多环芳烃化合物(PHAs)，是燃煤不完全燃烧时产生的挥发性碳氢化合物[16]。

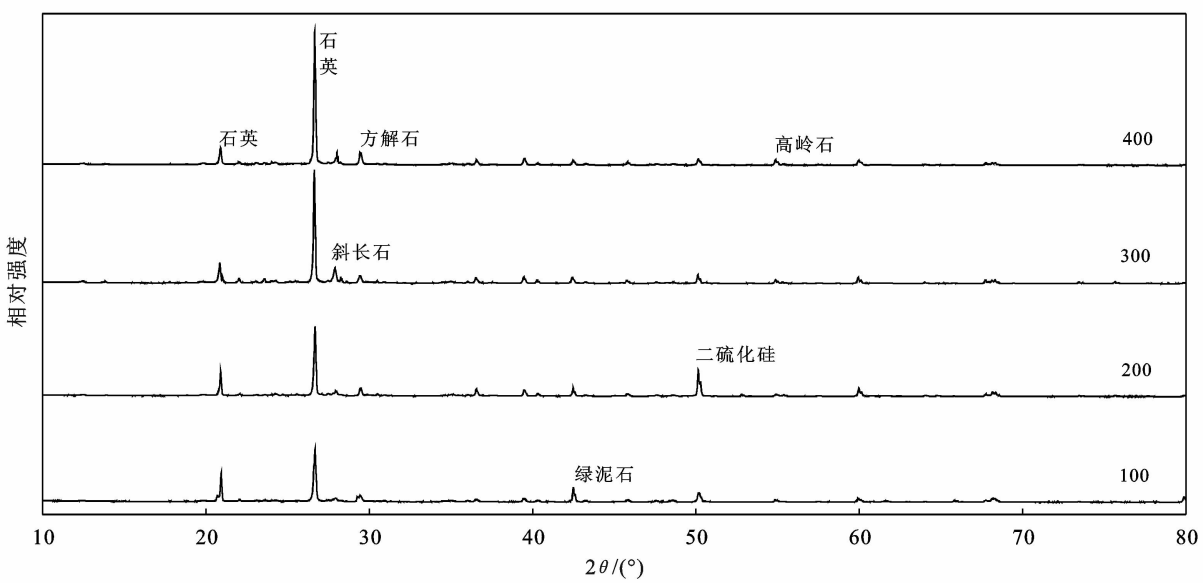


图 2 研究区大气降尘的 XRD 图谱

表 1 大气降尘中少量矿物的类型

距离/m	含重金属矿物							其 他			
	Ag	Cr	Pb	Co	Mn	As	Cu	$C_7H_8N_2O$	$C_3H_4N_2OS$	$C_8H_5Cl_3O_3$	$AlPO_4$
100	+	+	+		+	+	+	+	+	+	+
200		+			+				+	+	+
300	+	+		+	+				+		+
400	+	+	+		+				+	+	+

注："+"代表检测到矿物。

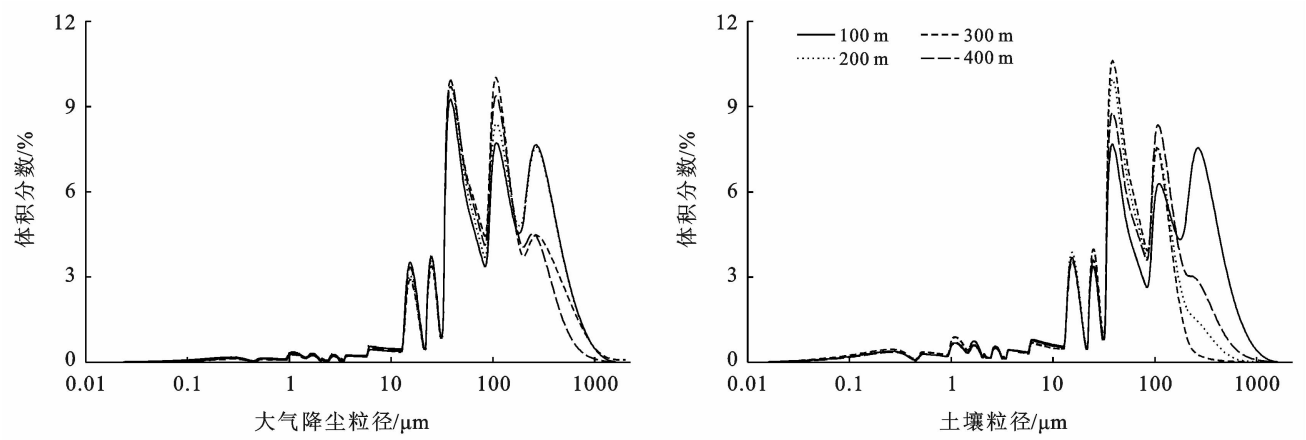
2.2 不同距离梯度大气降尘与表土的粒径分布

粒度频率分布曲线能反映大气降尘和土壤颗粒总体特征，同时可反映大气降尘和土壤中各种粒度的相对含量及其对粒度的贡献。由表 2 可知，降尘的粒

径主要集中分布在 10～50 μm 和 50～250 μm,占其总体积的 87.48%～89.21%,随着距离的增加降尘各个粒级体积分数普遍呈先减小后增加再减小的规律。土壤的粒径主要分布在 10～50 μm 和 50～250 μm,占其总体积的 78.73%～95.74%,浮动范围比大气降尘的要大,但土壤各个粒级体积分数随距离变化无明显规律。在同一距离梯度上降尘的 50～250 μm 和 250～1 000 μm 的体积分数普遍高于土壤,土壤的<1 μm,1～2 μm,2～5 μm,5～10 μm 和 10～50 μm 体积分数普遍高于降尘。从分形维数来看,土壤明显高于降尘。大气降尘和表土的粒径分布曲线表现为非正态性及双峰和多峰分布,说明一般大气降尘和表土颗粒组成具有多源性[32]。其中,大气降尘的累计曲线呈 5 峰分布,表土的粒径分布曲线的累计曲线呈现 4 峰分布,在 100 m 处出现 5 个峰。大气降尘和表土的粒径分布的前 4 个峰态分布趋势相同,大气降尘的第 5 个峰主要分布在 250～1 000 μm(见图 3),且降尘粒径随距离增大呈变粗趋势。

表 2　大气降尘和表土粒径分布情况

	距离/m	粒径/μm							分维数(D)
		<1	1～2	2～5	5～10	10～50	50～250	250～1000	
降尘	100	1.43	1.49	3.97	5.35	34.86	40.29	12.59	2.32
	200	1.24	1.27	3.22	4.34	33.56	43.65	12.70	2.30
	300	1.90	1.69	3.62	4.32	32.3	48.13	7.94	2.36
	400	1.77	1.65	3.85	4.88	35.04	46.50	6.32	2.35
土壤	100	3.71	3.25	7.07	7.56	32.82	33.32	12.29	2.43
	200	3.64	3.32	6.92	7.20	37.99	39.17	1.73	2.41
	300	4.60	4.13	7.35	6.34	37.67	39.72	0.18	2.56
	400	3.71	3.21	6.86	7.16	34.65	40.45	3.96	2.55



注:100 m,200 m,300 m,400 m 分别代表距离火电厂的距离。

图 3　大气降尘与土壤体积累计曲线

2.3　土壤和大气降尘分形维数与各粒级体积分数的关

采用多元线性回归分析不同采样距离大气降尘、土壤粒径分布分形维数的变化与各粒级体积分数的关系,将 7 个粒级依次标注为:<1 μm(X_1),1～2 μm(X_2),2～5 μm(X_3),5～10 μm(X_4),10～50 μm(X_5),50～250 μm(X_6),250～1 000 μm(X_7)。从皮尔逊相关性系数(见表 3)发现,降尘分形维数与<1 μm,1～2 μm,2～5 μm 降尘的体积分数呈显著正相关($n=9$, $p<0.05$);土壤分形维数与<1 μm,1～2 μm,2～5 μm,5～10 μm 土壤的体积分数呈极显著正相关,与 10～50 μm 和 50～250 μm 的体积分数负相关($n=9$, $p<0.05$)。由表 4 可知,降尘和土壤粒径分形维数的皮尔逊相关性系数为 0.651,表示降尘与土壤的分形维数呈较显著的正相关关系($n=9$, $p<0.05$)。说明大气降尘颗粒粒径越小,土壤分形维数越大。

降尘分形维数(D_a)与各粒级体积分数间的多元逐步回归分析发现:<1 μm 和 250～1 000 μm 粒级的体积分数与降尘分形维数偏相关性呈极显著相关。土壤分形维数(D_s)与各粒级体积分数之间的多元逐步回归分析发现,<1 μm 和 10～50 μm 粒级的体积分数与土壤分形维数偏相关性呈显著相关(见表 4)。

表 3 表土和大气降尘分形维数与各粒级之间的皮尔逊相关性

项目		D	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7
降尘	D_a	1							
	X_1	0.949*	1						
	X_2	0.904*	0.976*	1					
	X_3	0.601*	0.689*	0.818*	1				
	X_4	0.128	0.248	0.439	0.86*	1			
	X_5	0.215	0.456	0.575*	0.632*	0.591*	1		
	X_6	0.196	0.342	0.223	−0.042	−0.182	0.016	1	
	X_7	−0.429	−0.676*	−0.68*	−0.531*	−0.355	−0.709*	−0.695*	1
土壤	D_s	1							
	X_1	0.918*	1						
	X_2	0.887*	0.982*	1					
	X_3	0.868*	0.946*	0.955*	1				
	X_4	0.716*	0.756*	0.722*	0.882*	1			
	X_5	−0.589*	−0.38	−0.309	−0.336	−0.335	1		
	X_6	−0.618*	−0.604*	−0.592*	−0.7	−0.769*	0.207	1	
	X_7	0.294	0.046	−0.016	0.077	0.237	−0.684*	−0.537*	1

注：* 表示在 $p<0.05$ 水平显著相关。D_a 为降尘分形维数，D_s 为土壤分形维数，X_{1-7} 为土壤粒级；下同。

表 4 大气降尘与表土分形维数之间的回归分析

项目	D_a	D_s	回归方程	R^2	p
D_a	1.000	0.651*	$D_a=2.137+0.108X_1+0.002X_7$	0.984	0.000
D_s	0.651*	1.000	$D_s=2.451+0.049X_1-0.005X_5$	0.910	0.000

2.4 大气降尘营养物质与表土土壤养分间关系

由表 5 可知，距离火电厂越远，大气降尘中有机质含量有降低的趋势，200 和 400 m 之间差异最为显著；全 N 持续增加，100 和 400 m 之间差异显著；全 P 含量较为稳定。距离火电厂越远，土壤中有机质含量呈现上升趋势，100 和 400 m 之间差异显著；全 N 保持微弱的上升趋势，100 和 400 m 之间差异显著；全 P 含量较为稳定，并且与大气降尘中全 P 含量相当。采样过程中还发现，电厂周边表层土壤中含有大量颗粒状有机质存在。

表 5 不同距离大气降尘与表土养分的分布情况

项目	距离/m	有机质/(g·kg^{-1})	全 N/(g·kg^{-1})	全 P/(g·kg^{-1})
降尘	100	28.47±3.31^{ab}	0.76±0.10^{b}	0.36±0.00^{a}
	200	31.94±1.04^{a}	1.04±0.14^{ab}	0.40±0.01^{a}
	300	18.98±4.39^{bc}	1.11±0.22^{ab}	0.35±0.04^{a}
	400	17.37±2.84^{c}	1.27±0.06^{a}	0.34±0.01^{a}
土壤	100	4.19±1.25^{b}	0.31±0.02^{b}	0.34±0.02^{a}
	200	5.61±1.93^{ab}	0.33±0.08^{b}	0.38±0.01^{a}
	300	7.45±0.63^{ab}	0.41±0.04^{ab}	0.40±0.03^{a}
	400	9.83±1.32^{a}	0.51±0.05^{a}	0.33±0.03^{a}
	对照	2.18±1.25^{c}	0.36±0.05^{b}	0.68±0.04^{b}

注：不同字母表示差异显著($p<0.05$)。下同。

通过对大气降尘和土壤养分的相关性分析(表 6)发现，大气降尘的有机质含量与土壤的有机质含量呈现较强的负相关关系，相关系数为−0.581($n=9$，$p<0.05$)；而大气降尘的全 N 含量与土壤有机质含量和全 N 含量都呈现很强的正相关关系，相关系数分别为 0.703，0.803($n=9$，$p<0.05$)。

表 6 大气降尘和表土养分相关性分析

土壤	大气降尘		
	有机质	全 N	全 P
有机质	−0.581*	0.703*	−0.203
全 N	−0.48	0.803**	−0.193
全 P	−0.138	0.308	0.467

注：* 表示在 $p<0.05$ 水平显著相关，** 表示在 $p<0.01$ 水平显著相关。

2.5 大气降尘与土壤中重金属含量及其风险评价

由表 7 可知，距离火电厂越远，降尘中 Zn，Ni，Cd 和 Cr 的含量呈现增加的趋势，距离越远增加越明显，并且 100～400 m 之间 Zn，Ni，Cd 和 Cr 的含量差异显著；而 Pb 距离火电厂越远呈现先增加后下降的趋势，火电厂近端和远端差异极其显著；Cu 距离火电厂越远呈现先下降后上升的趋势，300 m 处与其他各梯度之间差异显著。距离火电厂越远土壤中重金属并无明显变化规律，除 Ni 和 Cd 在火电厂近端和远端差异显著之外，Zn，Cr，Pb 和 Cu 在各个距离梯度上差异并不显著，但土壤中重金属含量全部低于降尘。降尘和土壤中重金属综合潜在生态风险指数都大于 600，有着极强生态危害[31-32]，并且距离火电厂越远降尘中重金属的生态危害指数在增加，而土壤中重金属的生

态危害指数在下降。通过对大气降尘和土壤重金属的相关性分析(表 8)发现,大气降尘和表土中 Zn,Ni,Cd 和 Pb 的含量呈现较弱的负相关性,Cr 和 Cu 呈现较弱的正相关性。

表 7　不同距离大气降尘和表土重金属含量分布

项 目	距离/m	重金属含量						
		Zn	Ni	Cd	Cr	Pb	Cu	RI
降 尘/(mg·kg^{-1})	100	115.81±6.37^{b}	36.23±0.73^{b}	8.12±1.26^{b}	93.81±6.38^{c}	116.61±15.65^{a}	33.10±1.91^{c}	2 221
	200	107.26±2.28^{b}	38.22±1.90^{b}	6.83±0.88^{b}	111.14±7.10^{bc}	134.41±6.24^{a}	64.91±2.49^{b}	1 888
	300	122.96±10.16^{b}	41.51±4.45^{b}	9.61±4.62^{b}	164.62±11.72^{a}	40.61±4.76^{b}	92.14±1.78^{a}	2 618
	400	189.70±17.38^{a}	92.52±6.18^{a}	29.81±3.64^{a}	125.16±6.76^{b}	32.21±5.91^{b}	40.62±9.85^{c}	8 021
土 壤/(mg·kg^{-1})	100	108.5±8.75^{a}	57.25±2.59^{a}	17.72±0.46^{a}	92.07±7.96^{c}	63.88±3.81^{a}	38.54±4.25^{a}	4 783
	200	83.22±6.55^{b}	35.80±4.69^{b}	11.00±2.48^{ab}	124.53±12.58^{a}	87.32±16.57^{a}	37.49±5.42^{a}	2 986
	300	88.88±6.25^{ab}	41.60±9.44^{ab}	10.98±4.26^{ab}	122.12±23.79^{a}	94.22±24.34^{a}	40.44±1.21^{a}	2 984
	400	89.15±4.82^{ab}	34.42±1.21^{b}	9.30±1.39^{b}	108.81±2.07^{b}	70.05±4.25^{a}	34.03±6.87^{a}	2 525
背景值/(mg·kg^{-1})[17]		58.8	36.5	0.112	60	20.6	22.1	
毒性系数[16,18]		1	5	30	2	5	5	

表 8　大气降尘和表土重金属相关性分析

土壤	大气降尘					
	Zn	Ni	Cd	Cr	Pb	Cu
Zn	−0.332	−0.507	−0.460	−0.137	−0.230	−0.145
Ni	−0.239	−0.470	−0.439	−0.107	−0.204	−0.199
Cd	−0.229	−0.493	−0.478	−0.249	−0.224	−0.165
Cr	−0.473	−0.487	−0.568	0.103	0.246	0.045
Pb	0.034	0.189	0.282	−0.123	−0.127	−0.022
Cu	−0.507	−0.300	−0.304	0.394	0.412	0.300

3　结果讨论

3.1　宁东能源工业基地大气降尘组分及其粒径空间分布特征

降尘颗粒物的矿物组成是分析大气污染的重要手段之一。宁东能源工业基地特殊的地理位置、产业布局和大气条件使该区降尘量大且来源复杂。因当地气候干燥少雨,植被稀疏,大风日数较多。自然源降尘主要来自于境内扬尘,主要成分为石英、方解石、斜长石、绿泥石和高岭石等(见图 2)。人为源降尘组分则较为复杂,其中重金属矿物组成涉及 Ag,Cr,Pb,Co,Mn,As,Cu(见表 1)和二硫化硅以及一些多环芳烃化合物(PHAs),是燃煤不完全燃烧时产生的挥发性碳氢化合物和石英和其他硅化物被还原成的中间产物[19]。这和王毓秀在山西阳泉、朔州等地的火电厂烟尘成分谱的研究结果相近[20],部分差异如 Ag,Co 等元素在其烟尘成分谱中没有检出,这可能和当地电厂燃煤的品质有关。当地企业类型多样,涉及煤炭、石油、天然气的开采及深度加工,而一些痕量元素如 Ag,Cr,Pb,Co,Mn,As,Cu 的存在不仅印证了当地污染的多源性,更说明当地潜在污染的复杂性。

燃煤烟尘是火电厂周围降尘的主要物质来源。顺主风向存在着大气降尘的风力分选过程[21],不同粒径降尘在大气中的移动方式和移动距离各不相同。研究区常年盛行西北风,大风携带和输送大量的燃煤烟尘、风沙与地表尘土,并在不同距离沉降。本研究通过对盛行风下风向降尘粒径组成统计分析发现,在东南方向上颗粒物容易扩散,粒径较粗且沉降距离更远。由于距离物源远近不同,在大气降尘粒度组成及其分形维数上存在一定的差异性,表现为距离物源 300 m 远处,50～250 μm 粒径降尘和分形维数(D)均呈增加趋势,这表明大气降尘的粒度分布分形维数与气象因素密切相关。本研究结果表明火电厂周边不同距离大气降尘粒径主要集中在 10～250 μm 之间,并且在此粒径范围内存在双峰分布:10～50 μm 和 50～250 μm。其中 10～50 μm 大气降尘以短时悬浮方式移动,而 50～250 μm 则以变性跃移方式移动[22-23]。从 0—10 cm 表层样品的颜色来看,在研究所涉及的距离范围内土壤表层除了尘暴降尘明显特征的黄褐色粉末[24],还有分布较为均匀的黑色颗粒物,这种颜色特征说明其来源为地表工业烟尘排放,这与施泽明等[25]的研究结果相似。说明研究区大气降尘粒度分

布及其分形维数和区域环境、气候特征吻合。

3.2 宁东基地大气降尘对表土物质组成及其粒径分形维数的影响

土壤粒径分布分形维数是不同粒径含量的综合反映,可用以描述土壤内部复杂与不规则结构[26]。表土粒度组成不仅与地表沉积物的来源有关,而且与大气降尘活动中的搬运和堆积过程密切相关。气候因素是影响地表沉积物特征的关键因素,且在风力作用下,产生粒径高度分选和成分组成混合的特征。本研究中,火电厂周边表土粒径分布呈多峰分布,其中主峰为10～50 μm,次峰为50～250 μm。多峰分布说明其可能具有不同的来源,从本研究中大气降尘的物相分析结果显示:成分涉及自然源降尘和燃煤烟尘颗粒(图2,表1)。以往的研究发现土壤质地越粗,分形维数值越小[27]。本研究中,土壤分形维数在2.41～2.56之间(表2)。据李德成[28]的研究发现砂土的分形维数为2.56,而本研究中,土壤质地类型也是砂土,但随接受降尘量的多寡,分形维数相应地发生变化,反映了土壤颗粒物质的增减状况,说明降尘能够改变土壤的组成并影响土壤分形维数。

3.3 大气降尘对土壤中重金属与养分含量的贡献

作为"西电东送"火电基地,宁东能源工业基地的煤电产业规模在全国都属前列。但煤电行业生产过程中会向大气中排放大量含有重金属的污染物,它们吸附于气溶胶中,以沉降的方式进入周边表层土壤,是大气降尘中重金属污染的重要来源。由于大气降尘颗粒物其较小的粒径分布既决定了颗粒物的可迁移性,也决定了其潜在污染的可能。大气降尘为土壤提供营养物质的同时,将各类重金属带入土壤。本研究中,在相同距离上大气降尘中的重金属含量普遍高于表土,主要是因为表层土壤中大量颗粒状有机质的存在,以及大气降尘携带的养分元素进入土壤引起可溶性有机质和养分的增加,这为重金属元素的固定和富集提供了可能。有机质的存在延长了重金属在土壤中的滞留时间,有利于重金属的固定,提高其在土壤中的富集量,从而使土壤中重金属的潜在风险概率增大[29]。燃煤中所含的Pb,Cr,Cd等痕量重金属在燃烧过程中会部分或全部挥发成气态,并富集在细颗粒物表面随废气排放[30]。同时,本研究结果显示大气降尘中Zn,Ni,Cd,Cr,Cu元素含量进入土体后都有不同程度的降低(表6),大气降尘中Zn,Ni,Cd,Cr,Pb,Cu含量平均值分别超过表土中平均值的44.89%,23.31%,10.96%,10.55%,2.65%和53.34%,主要是因为有机质中的腐植酸具有一定的还原性可促进土壤中部分重金属元素形成硫化物而沉淀[31]。大气降尘和土壤综合潜在生态风险指数表明,距离火电厂越远降尘中重金属的潜在生态危害指数在增加,而土壤中重金属的潜在生态危害指数在下降。土壤重金属与大气降尘重金属之间的关联性可以反映重金属污染的来源、土壤—大气系统中重金属的传输、迁移和扩散特征[32]。罗娜娜等[33]采用灰色关联分析法对北京城区大气降尘与地表土壤重金属元素之间进行了关联度分析,发现大气降尘与表层土壤是高度关联的。而本研究中采用Pearson相关分析法分析了大气降尘与地表土壤重金属元素之间的关联性,结果表明Cr和Cu呈现较弱的正相关性(表8)。其关联度之间存在差别,可能和不同元素的沉降特性有关[34],也可能和当地植被特征、地形、风力风向等有关,这些因素会影响到燃煤烟尘等污染物的扩散方式和路径从而使大气降尘对表层土壤的影响不均匀。

土壤是大气降尘的最终归宿,大气降尘携带的营养物质沉降到地表会改变土壤的养分供给。从表5可以看出,大气降尘中养分含量较高。其中有机质是土壤的8～15倍,全N是土壤的2～3倍。沉降到土壤中也使表土的土壤有机质和全N含量在不同距离梯度上均有增加,其中有机质含量比对照增加1.92～4.51倍;降尘可以使气携氮化物进入土壤,但本研究所属区域降雨过少空气湿度也较小,更多的N会以干沉降的形式沉降于距离更远处,因而本研究中大气降尘对土壤N含量的影响较小。这表明降尘是土壤养分补充的一个重要途径。不同距离上增加程度的差异,主要是由携带养分的降尘特性和地形、风速造成的,这和自然源降尘的养分变化规律相似[35]。主要表现为降尘中的养分含量随策源地距离的增加而增加。因本试验中土样采集于当年7月,降尘作用大于风蚀作用时,降尘导致养分的净增加。

4 结 论

(1) 宁东基地大气降尘的成分来源复杂,包括了自然源和人为源降尘。其中自然源降尘主要来自于境内扬尘,主要成分为石英、方解石、斜长石、绿泥石和高岭石等。人为源降尘则涉及Ag,Cr,Pb,Co,Mn,As,Cu和二硫化硅以及一些多环芳烃化合物(PHAs)等燃煤过程中产生的中间产物。

(2) 大气降尘和表土的粒径分布曲线在不同距离上均呈非正态性及双峰和多峰分布,说明大气降尘和表土颗粒组成具有多源性。

(3) 大气降尘和土壤综合潜在生态风险指数表明,距离污染源越远降尘中重金属的生态风险指数在增加,而土壤中重金属的生态风险指数在下降。

Pearson 相关分析分析表明,表土与大气降尘中 Cr 和 Cu 两种重金属元素具有一定的正相关性,相关系数分别为 0.103,0.30。尽管相关性较弱,但其累积效应还是具有较大潜在威胁。

(4) 土壤是大气降尘的最终归宿,大气降尘携带的营养物质沉降到地表改变了土壤的养分供给,尤其是有机质的增加量最为显著。

[参 考 文 献]

[1] 乔庆庆,黄宝春,张春霞.华北地区大气降尘和地表土壤磁学特征及污染来源[J].科学通报,2014,59(18):1748-1760.

[2] 庞绪贵,王晓梅,代杰瑞.济南市大气降尘地球化学特征及污染端元研究[J].中国地质.2014,41(1):285-293.

[3] 于瑞莲,胡恭任,袁星,等.大气降尘中重金属污染源解析研究进展[J].地球与环境,2009,37(1):73-79.

[4] Manta D S, Angelone M, Bellanca A, et al. Heavy metals in urban soils: A case study from the city of Palermo (Sicily), Italy [J]. Science of the Total Environment, 2002,300(1):229-243.

[5] McTamsh G, Strong C, The role of aeolian dust in ecosystems [J]. Geomorphology, 2007,89(36):39-54.

[6] 谢云霞,罗文峰,李后强.大气颗粒物的分形特征[J].应用生态学报,2010,21(6):1410-1416.

[7] 王景燕,胡庭兴,龚伟,等.川南坡地不同退耕模式对土壤团粒结构分形特征的影响[J].应用生态学报.2010,21(6):1410-1416.

[8] Zhenhua Zhang. Impact of seasalt deposition on acid soils in maritime regions [J]. Pedosphere, 2003,13(4):375-380.

[9] 王焕华,李恋卿,潘根兴,等.南京市不同功能城区表土微生物碳氮与酶活性分析[J].生态学杂志,2005,24(3):273-27.

[10] 倪刘建,张甘霖,杨金玲,等.钢铁工业区降尘对周边土壤的影响[J].土壤学报,2007,24(3):637-642.

[11] 苏永中,赵哈林.科尔沁沙地农田沙漠化演变中土壤颗粒分形特征[J].生态学报,2004,24(1):71-74.

[12] 周爱佳.合肥城区地表灰尘氮磷形态及污染特征研究[D].安徽 合肥:合肥工业大学,2012.

[13] 朱仁果,肖化云,王燕丽,等.用苔藓组织硫含量、S/N 比值探讨江西省大气硫沉降[J].地球与环境,2012,40(4):479-484.

[14] 朱媛婕.西安市灞桥燃煤电厂周边土壤和灰尘介质中重金属污染特征研究[D].陕西 西安:陕西师范大学,2016.

[15] Richard L, David F S, Natusch, et al. Trace elements in fly ash: Dependence of concentration on particle size [J]. Environmental Science & Technology, 1974, 8(13):1107-1113.

[16] 张先波.淮南市大气可吸入颗粒物中多环芳烃的污染特征研究[D].安徽 淮南:安徽理工大学,2010.

[17] 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.

[18] 常静,刘敏,许世远,等.城市地表灰尘的概念、污染特征与环境效应[J].应用生态学报,2007,18(5):1153-1158.

[19] 姚志通.固体废弃物粉煤灰的资源化利用:以杭州热电厂和半山电厂粉煤灰为例[D].浙江 杭州:浙江大学,2010.

[20] 王毓秀,彭林,王燕,等.电厂燃煤烟尘 PM2.5 中化学组分特征[J].环境科学,2016,37(1):60-65.

[21] 毛东雷,雷加强,李生宇,等.策勒沙漠—绿洲过渡带不同下垫面的输沙通量及粒度差异特征[J].干旱区资源与环境,2014,28(2):167-174.

[22] 闫德仁,黄海广,薛博.浑善达克沙地大气降尘颗粒物特征研究[J].生态环境学报,2018,27(1):87-92.

[23] 吴正.风沙地貌与治沙工程学[M].北京:科学出版社,2003:196-208.

[24] 李小平,张蒙,周骞.乌鲁木齐城市土壤与灰尘粒径空间分布特征[J].中国环境监测,2019,35(1):37-43.

[25] 施泽明,倪师军,张成江.成都市近地表大气尘的矿物学特征及其环境指示意义[J].矿物岩石,2006,26(2):117-120.

[26] 杨培岭,罗远培,石元春.用粒径的重量分布表征的土壤分形特征[J].科学通报,1993,38(20):1896-1899.

[27] 贾晓红,李新荣,张景光,等.沙冬青灌丛地的土壤颗粒大小分形维数空间变异性分析[J].生态学报,2006,26(9):2827-2833.

[28] 李德成,张桃林.中国土壤颗粒组成的分形特征研究[J].土壤与环境,2000(4):263-265.

[29] 曹人升,范明毅,黄先飞,等.金沙燃煤电厂周围土壤有机质与重金属分析[J].环境化学,2017,36(2):397-407.

[30] 朱燕,代静玉.腐殖物质对有机污染物的吸附行为及环境学意义[J].土壤通报,2006,37(6):1224-1230.

[31] Helble J J. Trace element behavior during coal combustion: Result of a laboratory study [J]. Fuel Processing Technology, 1990,24(1/3):1811-1818.

[32] 阿尔祖娜·阿布力米提,王敬哲,王宏卫,等.新疆准东矿区土壤与降尘重金属空间分布及关联性分析[J].农业工程学报,2017,33(23):259-266.

[33] 罗娜娜,赵文吉,晏星,等.北京城区大气颗粒物与地表土壤金属元素空间关联分析[J].生态环境学报,2013,22(6):1025-1031.

[34] 余涛,程新彬,杨忠芳,等.辽宁省典型地区大气颗粒物重金属元素分布特征及对土地质量影响研究[J].地学前缘,2008,15(5):146-154.

[35] 吕贻忠,马兴旺.荒漠化土壤养分变化的影响因素研究进展[J].生态环境学报,2003,12(4):473-477.