

煤炭全生命周期阶段划分及其环境行为评价 ——以徐州地区为例

安英莉¹, 戴文婷^{1,2}, 卞正富¹, 董霁红^{1,2}

(1. 中国矿业大学 环境与测绘学院, 江苏 徐州 221116;

2. 江苏省资源环境与信息工程重点实验室, 江苏 徐州 221116)

摘要: 提出煤炭全生命周期阶段的划分和煤炭生命周期系统清单, 基于煤炭全生命周期的 5 个阶段对徐州地区煤炭环境行为进行了评述, 研究分析了煤炭利用阶段 4 种重金属的排放清单并对土壤环境影响提出针对性改善举措. 研究表明: 煤炭利用阶段重金属环境污染明显. 煤、渣、灰中铅(Pb)和砷(As)的潜在生态危害系数均小于 40, 对土壤环境存在低污染危害; 镉(Cd)的潜在危害系数均大于 60, 近一半的潜在危害系数大于 160, 对土壤环境存在高污染危害; 汞(Hg)的潜在危害系数均高于 320, 对土壤环境存在很高污染危害. 煤、渣、灰的综合污染指数呈现较高的态势, 对土壤环境存在潜在高污染危害.

关键词: 煤炭; 全生命周期; 阶段划分; 清单分析; 环境行为评价

中图分类号: X 821 文献标志码: A 文章编号: 1000-1964(2016)02-0293-08

DOI:10.13247/j.cnki.jcumat.000434

Phase division of whole life cycle of coal and their environment behavior assessment

AN Yingli¹, DAI Wenting^{1,2}, BIAN Zhengfu¹, DONG Jihong^{1,2}

(1. School of Environment and Spatial Informatics, China University of Mining & Technology,

Xuzhou, Jiangsu 221116, China; 2. Jiangsu Key Laboratory of Resources

and Environmental Information Engineering, Xuzhou, Jiangsu 221116, China)

Abstract: The phase division of the whole life cycle and the life cycle inventory for coal were proposed, the coal environmental behavior in Xuzhou was assessed based on the five phases obtained, the discharge inventory of four heavy metals in coal utilization phase were also analyzed, and the corresponding improvement measures concerning their impact on soil environment were proposed. Results suggest that the environmental pollution of heavy metals is obvious during coal utilization. The potential ecological hazard coefficients of Pb and As in coal, residue and ash are all lower than 40, their environmental impacts on soil belong to slight pollution; the potential ecological risk coefficients of Cd are higher than 60, nearly half of them are higher than 160, the environmental impacts belong to high pollution; the potential ecological risk coefficients are higher than 320 for Hg, the environmental impacts on soil belong to extremely high pollution. The comprehensive pollution indexes in coal, residue and ash are all relatively higher, suggesting higher potential pollution hazard to soil environment.

Key words: coal; whole life cycle; phase division; inventory analysis; environment behavior assessment

收稿日期: 2015-08-26

基金项目: 国家科技基础性工作专项(2014FY110800); 国家自然科学基金项目(51374208)

通信作者: 卞正富(1965—), 男, 江苏省建湖县人, 教授, 博士生导师, 博士, 从事土地复垦与生态重建、污染土地修复等方面的研究.

E-mail: zfbian@cumt.edu.cn Tel: 13505215978

生命周期(life cycle)是指一个生物体从出生到成长、衰老至死亡所经历的各个阶段和整个过程^[1-2]. 生命周期评价(life cycle assessment, LCA)是一种评价产品、工艺过程或活动从原材料的采集和加工到生产、运输、销售、使用、回收、养护、循环利用和最终处理整个生命周期系统有关环境负荷的过程^[3-4]. LCA 的基本结构包括:定义目标与确定范围、清单分析、影响评价和改善分析. 目前, LCA 被广泛地应用于产品或服务体系的生命周期能源利用和环境影响评价^[5-6], 多数产品和服务体系直接或间接地与煤炭资源相关.

煤炭资源的开发利用具有明显的生命周期性^[7], 煤炭全生命周期是指煤炭从原煤的开采到最终废弃物处理所经历的各个阶段和整个过程. 长期以来, 煤炭资源以其丰富、廉价、可靠的特性一直处于人类能源供给的重要地位. 然而, 煤炭开发利用是一个庞大复杂的非线性多元化系统, 对大气、地下水、土壤及生态环境的破坏也十分严重^[8], 科学划分煤炭全生命周期阶段, 系统研究生命周期清单, 是煤炭环境影响量化评价、环境成本分摊及环保技术改善的必要基础. 目前, 煤炭资源利用的环境相关研究主要集中在 3 个方面:一是煤炭资源开发利用的主要环境影响及评价^[9-10], 二是煤炭资源生产过程中产生的矿井水、煤矸石等废弃物的综合利用^[11-12], 三是洁净煤技术和措施等^[13-16]. 文献^[17-19]将生命周期理论用于煤炭开采期的相关环境研究, 并将煤矿生命周期进行阶段划分; 文献^[20-23]从煤炭利用的角度进行电力燃煤和化工用煤生命周期环境影响及评价研究. 尽管也有少部分文献提到电力燃煤生命周期阶段的划分, 如文献^[21]将煤炭生命周期划分为开采阶段(extraction stage)、运输阶段(transportation stage)、发电阶段(a power plant); 文献^[23]将煤炭生命周期划分为煤炭开采与洗选(coal mining and preparation)、煤炭燃烧(coal combustion)和煤炭燃烧产物处理(coal combustion product disposal), 但是至今未见统一的煤炭全生命周期阶段划分, 各阶段的环境影响清单也缺乏科学系统的研究. 因此, 本文首先对煤炭全生命周期进行阶段划分, 给出煤炭生命周期系统清单, 在此基础上对徐州地区煤炭环境行为进行评述, 并基于 3 个电力企业的重金属监测数据, 研究徐州煤炭利用阶段对环境的影响, 最后提出我国煤炭可持续性发展的建议.

1 煤炭全生命周期阶段划分

世界主要产煤大国的煤炭开发利用系统各具特色, 如世界上最大的煤炭生产国和消费国之一美国, 建立了一体化高效、清洁的煤炭生产和能源转化系统, 该系统主要包括煤炭开采、煤干燥、电厂燃烧利用产生电能和水蒸气. 南非是世界上第三大煤炭出口国, 仅次于澳大利亚和美国, 煤炭资源主要用于燃烧发电和炼油, 南非约 40% 的燃料来源于煤炭, 其煤炭开发利用过程主要包括煤炭开采、对煤炭进行洗选和液化加工、利用等. 波兰煤炭资源丰富, 煤炭开采已有 400 a 以上的历史, 是世界上重要的煤炭生产国和出口国, 波兰 65% 的煤炭资源用于发电和集中供能, 其煤炭生产利用过程主要包括煤炭开采、原煤筛选和加工、煤炭燃烧发电和供能等. 以上各国煤炭资源的开发利用虽不尽相同, 但是都包含了煤炭开采、煤炭加工和煤炭利用 3 个核心阶段.

我国是目前世界上最大的煤炭生产国和消费国, 煤炭开采、煤炭加工和煤炭利用也是煤炭开发利用过程的 3 个核心阶段. 随着煤炭开发利用的规模扩大, 各阶段对应的组织单位煤矿、洗煤厂及电厂、煤化工企业也逐渐分化且变得愈来愈独立, 分别向大型化方向发展. 除此之外, 由于我国煤炭资源主要分布在西北部地区, 而用煤工业区却集中在东南沿海地区, 这种煤炭资源分布与生产力不适应的状况, 导致我国“西煤东运”和“北煤南运”的长距离输煤格局难以改变. 同时, 我国煤炭开采的 90% 左右为井工开采, 地表沉陷是土地破坏的主要形式, 而废弃物回填处理是治理地表沉陷的主要技术之一. 因此, 在我国煤炭运输和废弃物处理也是煤炭资源开发利用过程中的重要环节. 结合我国煤矿和煤炭自身特征、全生命周期的内涵, 将煤炭全生命周期划分为煤炭开采、加工、运输、利用和废弃物处理 5 个阶段(图 1).

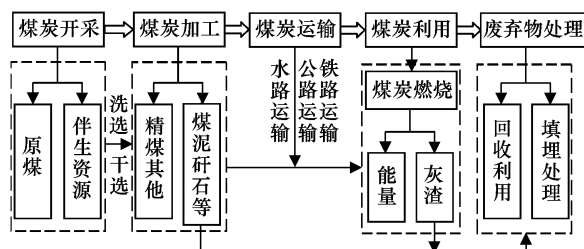


图 1 煤炭全生命周期阶段划分

Fig. 1 Phase division of coal's whole life cycle

如图1所示,煤炭生命周期不同阶段的生产组织重点不同,对生态环境的污染形式和污染程度不同,产生的环境行为特点也具有明显的阶段特征和对应的生命周期阶段环境影响清单。这种煤炭全生命周期阶段划分较好地体现了煤炭生命周期的完整性和阶段特征差异性,有利于煤炭环境行为的系统研究。

2 煤炭生命周期系统清单

2.1 生命周期清单的构成

生命周期清单(life cycle inventory, LCI)是生命周期评价过程中环境影响评价和改善提案的重要基础,是对给定产品系统整个生命周期中的输入和输出进行汇编和量化评价的过程^[24],具有以下主要用途:1) 综合认识相互关联的产品系统;2) 确定研究目标与范围,界定分析系统并建立系统模型;3) 定量分析产品系统能量和物质的输入输出,建立系统环境行为的基础线;4) 识别产品系统中能量和原材料消耗比例、污染物排放比例,确定工艺改进和环境改善措施;5) 提供科学数据确定生态标志准则,并建立环境成本共摊机制^[25]。LCI的分析步骤如图2所示,LCI是一个不断递进的过程,主要包括初步清单、目标清单、结果清单和标准清单。

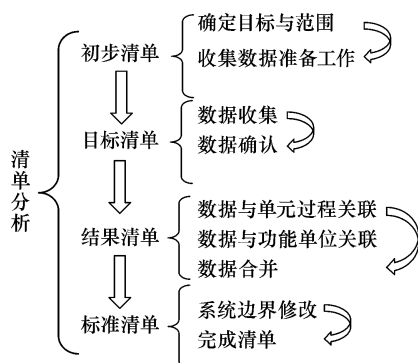


图2 生命周期清单示意

Fig. 2 Diagram of life cycle inventory

2.2 煤炭生命周期清单分析

2.2.1 初步清单

煤炭生命周期初步清单是指在划分煤炭全生命周期的基础上,对各个阶段工业流程的输入和输出数据收集前的准备工作,包括确定目标与范围、制作煤炭生命周期各阶段输入-输出环境信息表。

1) 确定目标与范围:煤炭生命周期清单的研究范围界定为从矿井开采、洗选、直至运送至用户端或出口端的整个生产和运输过程的能源消耗量^[26],需要确定各个阶段工业流程输入和输出物质的种类和数量。相关数据可从正式出版的文献,各类统计年鉴、报表,环境数据手册,煤炭企业内部技术交流资料,以及国内外生命周期评价研究数据库中获取。

2) 制作输入-输出环境信息表:制作煤炭生命周期各个阶段的输入-输出环境信息表,其中输入数据主要包括原材料,提供煤炭生命周期系统运转的能源,其他输入(如水、木材、土地)等;输出数据主要包括煤炭,副产品,固体废弃物,废气,废水,其他输出(如噪声、辐射污染、能量)等。

2.2.2 目标清单

煤炭生命周期目标清单分析是明确煤炭生命周期各个阶段的输出和输入项目及其清单数据获取方式,主要包括煤炭生命周期各个阶段的数据收集和清单数据确认。

1) 煤炭生命周期各阶段数据收集

a. 煤炭开采阶段主要包括煤矿区基础设施建设和煤炭开采,清单数据主要包括建设基础设施的原材料、煤炭年产量、消耗辅助原料、设备电力消耗、产生废弃物等;b. 煤炭加工阶段主要是指煤炭的选洗,清单数据主要包括燃料消耗、设备电力消耗、装运工具燃料消耗、水资源消耗、废水排放等;c. 煤炭运输阶段的清单数据通常包括运输工具类型、燃料消耗、水资源消耗、运输距离、装载率和污染物排放等,该阶段污染物可分为运输污染和装卸污染,运输污染主要包括运输工具的尾气排放和敞篷运输中煤炭的扬尘污染,装卸污染主要是指装卸过程中的起尘污染;d. 煤炭利用主要是指煤炭作为燃料供能,该阶段的清单数据主要包括原煤消耗、水资源消耗、设备电力损耗、年发电量、废水排放量、废气排放量和固体废弃物排放量等;e. 废弃物处理阶段主要分为回收处理再利用和填埋处理两部分,涉及到的清单数据主要包括废弃物填埋量、填埋占地面积、填埋后污染物排放量、回收利用废弃物后增加或减少的原材料、能量消耗和污染物排放量等。煤炭生命周期各个阶段清单数据见表1。

表 1 煤炭生命周期各个阶段清单数据
Table 1 The inventory data of various stages of coal's life cycle

煤炭生命周期		输入数据	输出数据	获取方式
煤炭 开采	基础设施 建设	占地面积、木材、钢材、水泥、水资源、 电力消耗	废水、废气、扬尘、噪音等	煤炭企业内部资料、相关统计 数据、已有文献、环境手册等
	煤炭 开采	燃料、水资源、设备电力消耗(如连续 采煤机、装料机、穿梭式机动矿车、除 尘机、照明灯等)、土地占用	煤炭产量、固体废弃物(矸石、煤尘等)、矿井 水、废气、土地利用变化 主要污染因子:CO ₂ ,CO,NO _x ,CH ₄ ……	
煤炭加工		燃料、设备电力损耗(如筛分机、破碎 机、重介质分选机、洗煤脱水离心机 等)、装运工具燃料消耗、水资源等	生产废水、废气、固体废弃物(如煤渣、原煤 中的固体杂质等) 主要污染因子:CO ₂ ,CO,NO _x ,CH ₄ ,S,Pb, Cd,Hg,As……	煤炭加工企业工业流程标准、 相关统计数据、已有文献、环 境手册等
煤炭运输		燃料、水资源等	扬尘、尾气、噪音等 主要污染因子:CO,NO _x ,Pb,Cd,Hg,As ……	实测和收集相关数据资料、已 有研究成果、环境手册等
煤炭利用		煤炭、水资源、设备电力损耗等	发电量、废水、废气、固体废弃物(煤渣、煤灰 等)、固体废弃物占地 主要污染因子:CO ₂ ,CO,SO _x ,NO _x ,Pb,Cd, Hg,As……	相关统计数据、已有研究成 果、环境手册等
废弃物 处理	回收 再利用	设备电力损耗、燃料等	废弃物回收处理转化成的可用材料 主要污染因子:CO ₂ ,CO,NO _x ……	相关统计数据、已有文献和研 究成果等
	填埋 处理	占地面积、运输工具消耗燃料等	废气、废水如滤液、填埋场占地、土地污染 主要污染因子:CO ₂ ,CO,NO _x ……	

2) 数据确认

确认收集到的数据,核实其可靠性和全面性,及时发现数据质量存在问题并予以改进.常用的数据核算方法是对煤炭生命周期各个阶段工艺过程的输入输出进行恒等计算,即“输入=产出+废弃物+散失能量”,该恒等计算符合质量守恒定律和热力学定律.

2.2.3 结果清单

汇总和处理煤炭生命周期目标清单的数据,得到煤炭生命周期结果清单,主要包括数据与单元过程的关联、数据与功能单位的关联和数据合并.

1) 数据与单元过程的关联

煤炭生命周期各个阶段都是一个单元过程,在每个单元过程选择一个合适的参照量,如生产单位煤炭原材料、能源的消耗量和污染物的排放量等.物质能量损耗和污染物排放数据应根据预先确定的分配原则(如产值比、质量比等)进行分配,能量的计算应考虑能源的转换和传输效率.

2) 数据与功能单位的关联和数据合并

得到各个单元过程的清单数据后,按照预先定义的功能单位对各个单元过程的清单数据进行换算,按照数据类型将各个单位过程的数据累加,可获得煤炭生命周期总的原材料、能源消耗和污染物排放清单数据,即煤炭生命周期结果清单.

2.2.4 标准清单

对煤炭生命周期结果进行敏感性分析,确定各个阶段数据的重要性,并对最初定义的煤炭生命周

期系统边界进行修正,如排除一些不重要的生命周期阶段或者单元过程,除去一些对研究结果意义较小的物质流或者能量流,也可重新添加一些有重要意义的生命周期阶段或者单元过程,从而获得煤炭生命周期标准清单.实质上,煤炭生命周期标准清单就是对结果清单进行边界修正,其构成主要包括修正边界后的煤炭生命周期各个阶段的输入数据和输出数据.

3 煤炭生命周期环境行为评价

3.1 煤炭环境行为和影响

煤炭环境行为是指煤炭资源开采利用过程中对环境产生影响的活动,具有外部性、长期性和无形性特征.外部性是指煤炭资源开采利用对外部环境产生的影响,包括有利影响(正外部性)和不利影响(负外部性);长期性是指煤炭资源开采利用过程中产生的环境行为是一个长期的过程;无形性是指煤炭资源开采利用对环境造成的破坏无法被明确界定,同时会给煤炭企业带来一些隐性成本.

煤炭开采利用过程中产生的环境行为会造成相应的环境影响.环境影响评价是结合清单分析的结果对识别出的环境行为进行定性或者定量的评价,即确定研究系统的资源消耗与污染物排放及其对外部环境的影响^[27].目前,已有的环境影响评价方法主要包括潜在生态风险指数法^[28]、生态足迹法^[29]、层次分析法^[30],利用 SimaPro, eBalance 等

生态评价软件评价^[31]。煤炭环境影响评价是在煤炭生命周期清单分析的基础上将环境负荷进行分类,并对其潜在环境影响进行评价的过程。

3.2 徐州矿区煤炭生命周期的阶段特征

徐州作为煤炭资源型城市,已有 130 a 以上的煤炭开采历史,是全国基础能源供应基地之一,为江苏省乃至华东地区、全国经济社会发展做出了历史性重要贡献。原煤年产量约为 2 000 万 t,煤炭开采方式为井工开采。其在煤炭开采、加工、运输、利用和废弃物处理 5 个阶段的环境行为各不相同:

1) 煤炭开采阶段的环境行为主要包括地表沉陷、矸石污染和压占土地、水体和大气污染、噪声污染等,其中地表沉陷是该阶段对环境影响最为明显的因素。由于徐州矿区属于高潜水位矿区,地表沉陷后土地利用发生剧烈变化,徐州境内煤矿塌陷区累计 2 万 hm² 以上,对生态环境影响严重。2) 煤炭加工阶段的环境行为主要是指煤炭洗选加工过程中产生的废水、废气和固体废弃物对周边土地、水体和大气环境的污染。3) 煤炭运输阶段的环境行为主要是指煤炭的储、装、运过程中产生的扬尘、降尘洒水、煤炭自燃产生的废气和运输工具排放的废气等对周边环境的污染。徐州是全国南北交通的中枢,煤炭运输量很大。同时,江苏省的煤炭资源集中于地处苏北地区的徐州,徐州对全省能源安全起着应急保障作用,其煤炭产量的大约 80% 运往苏南和华东地区,因此,煤炭运输阶段的环境效应相比其他地区严重。4) 煤炭利用以直接燃烧为主,煤炭利用阶段的环境行为主要是指煤炭燃烧过程中排放的环境污染物,如烟尘、粉尘、炉渣、粉煤灰等对大气、水体和土壤环境的污染。徐州作为重要的老工业基地之一,其煤炭年消费量也在 2 000 万 t 以上,其中大部分为电力用煤,因此电力燃煤是该阶段主要环境污染源。5) 废弃物处理阶段的环境行为主要是堆放压占、废弃物填埋以及再利用。目前,煤炭废弃物的再利用程度较低,徐州煤炭废弃物的主要利用是煤矸石制砖,以及将煤矸石和粉煤灰用作开采阶段引起的塌陷地复垦的填料。

在煤炭全生命周期的 5 个阶段中,大部分有害物质集中在煤炭利用阶段释放,因此煤炭利用阶段环境的影响程度最大,其中,电力燃煤引起的环境影响最为普遍而严重。

鉴于电力燃煤是徐州煤炭利用的主要方式,且未见徐州电力燃煤过程重金属污染的量化评价报导,本文以徐州 3 家规模和年耗煤量相当的电力企业为例,针对徐州市表层土壤含量高于全国土壤背

景值的 Cd, Pb, As, Hg 等 4 种重金属^[32]的排放,采用潜在生态风险指数法评价煤炭利用阶段重金属对土壤环境的影响。

3.3 徐州矿区煤炭利用阶段的环境影响评价

1) 重金属排放清单和评价方法

数据来源于徐州 3 家规模和年耗煤量相当的电力企业,由徐州市产品质量检测中心于 2014 年 10 月监测获取,具体数据如表 2 所示。

表 2 徐州煤炭电力企业重金属排放清单(2014 年监测数据)

Table 2 The discharge inventory of coal electric power enterprises in Xuzhou (monitoring data in 2014)					
单位	样品	$\omega_B/10^{-6}$			
		Cd	Pb	As	Hg
电力企业 1	煤	1.10	19.00	4.00	0.12
	渣	2.90	31.00	2.00	0.00
	灰	2.60	46.00	5.00	0.20
电力企业 2	煤	0.80	24.00	3.00	0.39
	渣	1.30	18.00	0.20	0.00
	灰	1.40	42.00	5.00	0.15
电力企业 3	煤	0.60	24.00	4.00	0.13
	渣	2.40	20.00	2.00	0.00
	灰	1.80	171.00	1.00	0.15
重金属参比值		0.29	16.30	11.20	0.01

注:表中“煤”是指未完全燃烧的煤。

潜在生态风险指数法是利用重金属与其相应背景值的比值,建立重金属生物毒性系数加权计算的模型,其结果可以反映某一特定环境中单个重金属污染物对环境的影响,也可以反映多种重金属污染物对环境的综合影响,并定量划分重金属元素的潜在生态危害程度,其计算公式如下:

$$C_f^i = C_i^i / C_i,$$
 (1)

$$E_r^i = T_r^i C_f^i,$$
 (2)

$$RI = \sum E_r^i,$$
 (3)

式中: C_f^i 为重金属 i 在某一环境中的污染系数; C_i^i 为重金属 i 的实测含量; C_i 为重金属 i 的参比值,电力企业燃煤发电产生的固体废弃物煤、渣、灰主要排放到土壤环境中,因此,本文采用徐州市土壤元素背景值作为参比值(表 2)^[32]; T_r^i 为重金属 i 的毒性响应系数(见表 3)^[33]; E_r^i 为重金属 i 的潜在生态危害系数; RI 为综合潜在生态风险指数^[32],重金属污染潜在生态危害指数与综合污染程度^[34]如表 4 所示。

表 3 重金属毒性响应系数与环境参比值

Table 3 Toxic response factors and reference values of studied heavy metals				
项目	重金属元素			
	Cd	Pb	As	Hg
毒性响应系数 T_r^i	30	5	10	40

表 4 重金属污染潜在生态危害指数与综合污染程度划分
Table 4 Pollution level of heavy metals based on the index of potential ecological hazard

污染等级	污染程度与潜在生态风险程度			
	E_i^p		RI	
1	<40	低污染	<150	低污染
2	40~80	中等污染	150~300	中等污染
3	80~160	较高污染	300~600	较高污染
4	160~320	高污染	>600	高污染
5	>320	很高污染	—	—

2) 煤炭重金属土壤风险

根据重金属潜在风险指数具体公式、重金属毒性相应系数与土壤环境参比值,计算徐州 3 个煤炭电力企业煤、渣、灰重金属潜在生态危害系数,如表 5 所示。

表 5 徐州煤炭重金属潜在生态危害系数
Table 5 Potential ecological hazard coefficient of heavy metals in Xuzhou coal

单位	样品	Cd	Pb	As	Hg	综合污染指数 RI
电力企业 1	煤	113.79	5.83	3.57	480.00	603.19
	渣	300.00	9.51	1.79	—	311.30
	灰	268.97	14.11	4.46	800.00	1 087.54
电力企业 2	煤	82.76	7.36	2.68	560.00	1 652.80
	渣	134.48	5.52	0.18	—	140.18
	灰	144.83	12.88	4.46	600.00	762.17
电力企业 3	煤	62.07	7.36	3.57	520.00	593.00
	渣	248.28	6.13	1.79	—	256.20
	灰	186.21	52.45	0.89	600.00	839.44

由表 5 可以看出,煤、渣、灰中这 4 种重金属的潜在生态危害系数依次为 $Hg > Cd > Pb > As$ 。煤、渣、灰中 Pb 和 As 的潜在生态危害系数均小于 40 (除个别异常数据),对土壤环境存在潜在低污染危害;煤、渣、灰中 Cd 的潜在危害系数为 62.07~300.00,其中,44%的潜在危害系数大于 160,对土壤环境存在潜在高污染危害;煤、渣、灰中 Hg 的潜在危害系数均高于 320,对土壤环境存在潜在很高污染危害。

从综合污染指数来看,电力企业 1 各污染物对土壤环境的潜在污染程度依次为灰>煤>渣;电力企业 2 各污染物对土壤环境的潜在污染程度依次为煤>灰>渣;电力企业 3 各污染物对土壤环境的潜在污染程度依次为灰>煤>渣。3 家电力企业的煤和灰的综合污染指数均高于 600,对土壤环境存在潜在高污染危害;渣的综合污染指数大体介于 150~300 之间,对土壤环境存在潜在中等污染危害。

3) 重金属环境改善举措

徐州电力企业用煤 75% 以上需要外地供应,这与徐州向苏南和华东地区输出的煤炭量大致相

当。由于供应渠道多样,电煤重金属平均含量接近全国煤炭平均值。针对电厂固体废弃物中重金属的潜在危害性和供应渠道多样性特点,本文提出徐州电力系统重金属污染的环境改善措施:1)鼓励煤炭加工企业提高原煤入洗率,采取洗选、筛分等先进工艺,从源头减少电厂重金属的输入量;2)优选低重金属含量电煤供应商并加强煤炭质量、减排效率的监督与管理;3)对燃煤电厂废弃物进行有效的无害化处理。

4 结 论

煤炭全生命周期阶段划分和环境行为评价有助于定量研究煤炭开发利用的全过程及其产生的环境影响,为煤炭资源开发利用产生的环境成本合理分摊和减排政策的制订提供科学依据。当前我国需要加强煤炭全生命周期的系统研究,建立完善煤炭及其开发利用过程的标准化数据库和环境影响评价体系,对各阶段环境影响进行科学的系统的量化监管,有效降低能源消耗和控制环境污染,最终实现煤炭行业的可持续发展。本研究划分了煤炭全生命周期,并依据煤炭全生命周期清单分析和环境影响,对煤炭全生命周期的环境行为进行评价后认为:

1) 综合已有研究成果、煤矿和煤炭的特征、全生命周期内涵,可将煤炭全生命周期划分为煤炭开采、加工、运输、利用和废弃物处理 5 个阶段。

2) 明晰了煤炭全生命周期清单包括初步清单、目标清单、结果清单和标准清单,同时确定了清单分析的具体步骤和数据处理方法。

3) 煤炭生命周期具有明显的阶段特征,徐州 3 家电力企业的重金属监测数据表明:煤炭利用阶段重金属环境污染明显:a. 煤、渣、灰中 Pb 和 As 对土壤环境存在低污染危害,近一半的 Cd 对土壤环境存在高污染危害, Hg 对土壤环境存在很高污染危害;b. 3 家电力企业煤和灰的综合污染指数均高于 600,电力企业 1~3 各污染物对土壤环境的潜在污染程度依次为灰>煤>渣,电力企业 2 各污染物对土壤环境的潜在污染程度依次为煤>灰>渣,对土壤环境存在高污染危害。

参考文献:

- [1] 马费成,望俊成,张于涛. 国内生命周期理论研究知识图谱绘制[J]. 情报科学, 2010, 28(3): 334-340.
MA Feicheng, WANG Juncheng, ZHANG Yutao. The knowledge map of domestic life cycle theory studies

- [J]. Intelligence Science, 2010, 28(3): 334-340.
- [2] 朱晓峰. 生命周期方法论[J]. 科学学研究, 2004, 22(6): 566-571.
- ZHU Xiaofeng. Study on life cycle methodology[J]. Studies in Science of Science, 2004, 22(6): 566-571.
- [3] CONSOIL F, ALLEN D, BOUSTED I, et al. Guidelines for life-cycle assessment a code of practice[M]. STEAC; Pensacola, FL, 1993.
- [4] 樊庆铎, 敖红光, 孟超. 生命周期评价[J]. 环境科学与管理, 2007, 32(6): 177-180.
- FAN Qingxin, AO Hongguang, MENG Chao. Life cycle assessment[J]. Environmental Science and Management, 2007, 32(6): 177-180.
- [5] FINNVEDEN G, HAUSCHILD M Z, EKVALL T, et al. Recent developments in life cycle assessment[J]. Journal of Environmental Management, 2009, 91(1): 1-21.
- [6] DURUCAN S, KORRE A, MELENDEZ G M. Mining life cycle modelling: a cradle-to-gate approach to environmental management in the minerals industry[J]. Journal of Cleaner Production, 2006, 14: 1057-1070.
- [7] 王兰甫. 把握煤矿生命周期外向拓展相关多元[J]. 中国煤炭工业, 2007, 12: 47-48.
- WANG Lanpu. Grasp the outward expansion multiple of life cycle of coal mine[J]. China Coal Industry, 2007, 12: 47-48.
- [8] 李永峰. 煤炭资源开发对矿区资源环境影响的测度研究[J]. 中国矿业大学学报, 2009, 38(4): 1-2.
- LI Yongfeng. Study of the measurement of the effect of coal resource development on resource environment in mining area[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2009, 38(4): 1-2.
- [9] MANGENA S J, BRENT A C. Application of a life cycle impact assessment framework to evaluate and compare environmental performances with economic values of supplied coal products[J]. Journal of Cleaner Production, 2006, 14(12-13): 1071-1084.
- [10] CHINH L D, GHEEWALA S H, BONNET S. Integrated environmental assessment and pollution prevention in Vietnam: The case of anthracite production[J]. Journal of Cleaner Production, 2007, 15(18): 1768-1777.
- [11] MUKHERJEE A B, ZEVENHOVEN R, BHATTACHARYA P, et al. Mercury flow via coal and coal utilization by-products: a global perspective[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2008, 52(4): 571-591.
- [12] 王博泰, 包永红, 李毅红, 等. 浅谈我国煤炭深加工及废弃物的综合利用[J]. 陕西煤炭, 2012(1): 25-27.
- WANG Botai, BAO Yonghong, LI Yihong, et al. Discussion on the comprehensive utilization of coal deep processing and waste in China[J]. Shaanxi Coal, 2012(1): 25-27.
- [13] SOLVEIG G W T. Coal cleaning: A viable strategy for reduced carbon emissions and improved environment in China[J]. Energy Policy, 2005, 33(4): 525-542.
- [14] 王超. 基于煤炭生命周期的电煤供应链废气排放研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2011.
- [15] ALVARO R, EDSON B, RAPHAEL M. A life cycle assessment of the Brazilian coal used for electric power generation[J]. Journal of Cleaner Production, 2015(92): 179-186.
- [16] 钱鸣高, 许家林, 缪协兴. 煤矿绿色开采技术[J]. 中国矿业大学学报, 2003, 32(4): 343-348.
- QIAN Minggao, XU Jialin, MIAO Xiexing. Green technology in coal mining[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2003, 32(4): 343-348.
- [17] 佟瑞鹏, 翟亚兵, 刘欣, 等. 煤矿全生命周期粉尘健康损害评价方法[J]. 中国安全科学学报, 2013, 23(10): 126-131.
- TONG Ruipeng, ZHAI Yabing, LIU Xin, et al. A health damage evaluation method of coal mine dust in its life cycle[J]. China Safety Science Journal, 2013, 23(10): 126-131.
- [18] 王行风, 汪云甲, 李永峰. 基于生命周期理论的煤矿区土地利用演变模拟[J]. 地理研究, 2009, 28(2): 379-390.
- WANG Xingfeng, WANG Yunjia, LI Yongfeng. Simulation and prediction for land utilization structural evolution in mine area based on lifecycle theory[J]. Geographical Research, 2009, 28(2): 379-390.
- [19] DONOGHUE A M. The design of hazard risk assessment matrices for ranking occupational health risks and their application in mining and minerals processing[J]. Society of Occupation Medicine, 2000, 51(2): 118-123.
- [20] NASER A O, TIMOTHY T C. Life cycle analysis of UK coal fired power plants[J]. Energy Conversion and Management, 2008(49): 212-220.
- [21] XIANG Dong, YANG Siyu, LI Xiuxi, et al. Life cycle assessment of energy consumption and GHG emissions of olefins production from alternative resources in China[J]. Energy Conversion and Management, 2015(90): 12-20.
- [22] STEINMANN Z J N, HAUCK M, KARUPPIAH

- R, et al. A methodology for separating uncertainty and variability in the life cycle greenhouse gas emissions of coal-fueled power generation in the USA [J]. The International Journal of Life Cycle Assessment, 2014, 19: 1146-1155.
- [23] BABBITT C W, LINDNER A S. A life cycle comparison of disposal and beneficial use of coal combustion products in Florida [J]. Life Cycle Assessment, 2008, 13(3): 202-211.
- [24] 王寿兵, 胡 聃, 杨建新. 综合产品环境审计工具: 生命周期清单分析 [J]. 环境科学, 2000, 21(3): 27-30.
WANG Shoubing, HU Dan, YANG Jianxin. A comprehensive environmental auditing tool of products: Life cycle theory [J]. Environmental Science, 2000, 21(3): 27-30.
- [25] 彭程志. 住宅建筑生命周期环境影响评价研究 [D]. 西安: 长安大学, 2012.
- [26] 庄 幸, 姜克隽. 煤炭产品从矿井到用户的能源含量分析 [J]. 中国能源, 2009, 31(9): 30-36.
ZHUANG Xing, JIANG Kejun. Analysis on energy content of coal product from coal mine to user [J]. China Energy, 2009, 31(9): 30-36.
- [27] 王明新, 包永红, 吴文良, 等. 华北平原冬小麦生命周期环境影响评价 [J]. 农业环境科学学报, 2006, 25(5): 1127-1132.
WANG Mingxin, BAO Yonghong, WU Wenliang, et al. Life cycle environmental impact assessment of winter wheat in north China plain [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2006, 25(5): 1127-1132.
- [28] 王晓钰. 基于重金属化学形态的土壤重金属污染的模糊综合评价模型 [J]. 郑州大学学报 (理学版), 2014, 46(1): 88-93.
WANG Xiaoyu. An integrated model for assessing the risk of soil environmental pollution based on fuzzy theory [J]. Journal of Zhengzhou University, 2014, 46(1): 88-93.
- [29] 宫先达, 梁 雯, 刘 康. 基于生态足迹法的高速公路生态环境影响评价 [J]. 水土保持通报, 2012, 32(5): 298-300.
- [30] 刘吉军, 费庆平, 姚翠巧, 等. 基于层次分析法的土地整治规划环境影响评价 [J]. 安徽农业科学, 2013, 41(22): 9437-9439.
LIU Jijun, FEI Qingping, YAO Cuiqiao, et al. Environmental impact evaluation of land regulation planning based on analytic hierarchy process [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2013, 41(22): 9437-9439.
- [31] 雷永佳, 姚 景, 赵 飞, 等. 成都市生活垃圾两种处理方式的生命周期环境影响评价 [J]. 安全与环境工程, 2014, 21(4): 75-79.
LEI Yongjia, YAO Jing, ZHAO Fei, et al. LCA environmental impact assessment of two treatment methods of household garbage in Chengdu city [J]. Safety and Environmental Engineering, 2014, 21(4): 75-79.
- [32] 王学松, 秦 勇. 徐州城市表层土壤中重金属元素的富集特征与来源识别 [J]. 中国矿业大学学报, 2006, 35(1): 84-88.
WANG Xuesong, QIN Yong. Accumulation and Identification of heavy metals in Xuzhou urban topsoil. [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2006, 35(1): 84-88.
- [33] 樊文华, 白中科, 李慧峰, 等. 复垦土壤重金属污染潜在生态风险评价 [J]. 农业工程学报, 2011, 27(1): 348-354.
FAN Wenhua, BAI Zhongke, LI Huifeng, et al. Potential ecological risk assessment of heavy metals in reclaimed soils [J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(1): 348-354.
- [34] 董霁红. 矿区充填复垦土壤重金属分布规律及主要农作物污染评价 [D]. 徐州: 中国矿业大学, 2008.

(责任编辑 姚志昌)