

锂动力电池产业有毒有害物质筛查及对策研究*

蒋京呈 管小东 林 军 潘 寻[#]

(生态环境部固体废物与化学品管理技术中心,北京 100029)

摘要 随着中国新能源汽车产业的不断发展壮大,锂动力电池生产及回收再利用过程中的环境安全问题逐渐凸显。由于多种有毒有害物质在锂动力电池中广泛使用,且存在回收处置不当、污染控制不力等问题,锂动力电池原材料、生产中新加入的物质和再生过程中产生的污染物均有进入环境的可能。系统梳理了锂动力电池产业原材料化学物质组成及主要污染物,形成了产业有毒有害物质清单;在分析清单物质的国内污染物排放标准、国际有毒有害物质名录、物质自身危害属性的基础上识别了产业重点有毒有害物质,并针对其环境暴露和危害提出了对策建议,以期为相关部门制定或完善产业环保政策,降低环境安全风险,进而为锂动力电池产业健康可持续发展提供决策支持。

关键词 新能源汽车 锂动力电池 有毒有害物质 筛查 对策

DOI:10.15985/j.cnki.1001-3865.2021.06.024

Research on screening and countermeasures of toxic and hazardous substances in lithium power battery industry JIANG Jingcheng, JIAN Xiaodong, LIN Jun, PAN Xun. (Solid Waste and Chemicals Management Center, Ministry of Ecology and Environment, Beijing 100029)

Abstract: With the continuous development and growth of new energy automobile industry in China, environmental safety issues in the production and recycling of lithium power batteries have gradually become prominent. As many toxic and hazardous substances are widely used in lithium power batteries, problems such as improper recycling and disposal, ineffective pollution control exist. Lithium power battery raw materials, newly added substances and pollutants generated in the production and regeneration process may all enter the environment. Therefore, this research systematically combed the chemical composition of raw materials and major pollutants in the lithium power battery industry, forming an industrial toxic and hazardous substance list; identified key toxic and hazardous substances in the industry based on the management of domestic pollutant discharge standards, the current international list of toxic and hazardous substances, and the hazardous properties of the substances; put forward countermeasures and suggestions for their environmental exposure and hazards. It was hoped to formulate and improve industrial environmental protection policies for relevant departments, reduce environmental safety risks, and provide decision-making support for the healthy and sustainable development of the lithium battery industry.

Keywords: new energy automobile; lithium power battery; toxic and hazardous substances; screening; countermeasures

大力发展新能源汽车有利于建立健全绿色低碳循环发展经济体系,培育新的经济增长点和国际竞争优势,构建清洁低碳、安全高效的能源体系,推进资源全面节约和循环利用。国务院发布的《节能与新能源汽车产业发展规划(2012—2020年)》提出了“到2020年,纯电动汽车和插电式混合动力汽车生产能力达200万辆、累计产销量超过500万辆”的发展目标^[1]。经过近10年来一系列政策扶持、财政补贴、试点示范、技术革新,我国新能源汽车产业长足发展。2019年,我国新能源汽车产量124万辆,保

有量超过381万辆,市场规模连续5年居全球首位;其中,电动汽车产量102万辆,占我国新能源汽车总产量的比例超过82%^[2]。

动力电池是电动汽车动力系统的核心。其中,锂动力电池具有工作电压高、体积小、重量轻、比能量大、循环寿命长等优点,成为电动汽车未来主要的技术突破方向。随着新能源汽车保有量不断扩大,锂动力电池产业产生的环境问题逐步凸显,如何实现产业可持续健康发展日益引起社会各方关注。

锂动力电池退役后,如不进行合理回收、处置和

第一作者:蒋京呈,男,1990年生,硕士,工程师,主要从事固体废物污染与治理研究。[#]通讯作者。

* 能源基金会项目(No.G-1909-30286)。

再利用,不仅会造成资源的巨大浪费,而且电池中的重金属、溶剂及各类有机物添加剂也会对土壤、水、大气产生环境风险,并带来较高的环境治理成本。因此,本研究系统梳理了锂动力电池产业原材料化学物质组成及主要污染物,形成了产业有毒有害物质清单;在分析清单物质受国内外污染物排放标准管控现状、物质自身危害属性的基础上识别了产业重点有毒有害物质,并针对其环境暴露和危害提出了相关对策建议。此研究旨在为相关部门制定或完善产业环保政策,降低环境安全风险,进而为锂动力电池产业健康可持续发展提供决策支持。

1 锂动力电池组成与有毒有害物质基础清单

1.1 正极材料

锂动力电池产业链中市场规模最大、产值最高的是正极材料,因其性能决定了电池的能量密度、寿命、安全性、使用领域等,因此成为锂动力电池的核心关键材料。为了实现能量存储与释放的功能,正极材料需要有稳定的电化学性能、不易分解的结构、较高的氧化还原电位和比容量^[3]。

目前常用的正极材料主要包括磷酸铁锂(LiFePO_4)、钴酸锂(LiCoO_2)、镍酸锂(LiNiO_2)、锰酸锂(LiMn_2O_4)和以镍钴锰酸锂(NCM)为代表的三元材料;导电剂主要是炭黑、石墨、碳纳米管、石墨烯等。正极材料(占正极总质量的90%左右)和导电剂(占正极总质量的7%~8%)、黏结剂(占正极总质量的3%~4%)混合后均匀涂布在铝箔上,质量总计约占锂动力电池的30%左右,成本占锂动力电池的30%~40%。

1.2 负极材料

锂动力电池的负极材料作为储锂的主体,在充放电过程中实现锂离子的嵌入和脱嵌。负极材料主要影响锂动力电池的首次充放电效率、循环性能等,质量约占锂动力电池的15%左右,成本占锂动力电池的10%左右,也是关键材料之一^[4]。

负极材料一般分为碳系和非碳系两类,其中碳系负极可分为石墨、中间相炭微球等;非碳系负极包括钛酸锂(Li_2TiO_3)、锡类合金、硅类合金等。基于成本与性能的综合考虑,目前市场上锂动力电池厂商主要选择石墨作为锂动力电池的负极材料,石墨包括人造石墨和天然石墨,目前人造石墨已成为主流。此外,在负极材料生产过程中还需要用到一定的铜箔和以丁苯乳液、羧甲基纤维素黏结剂为代表

的黏结剂。

1.3 电解液

电解液在正负电极间起到运输电荷的作用,影响着锂动力电池的能量密度、功率密度、循环寿命、安全性能等因素,约占锂动力电池质量的15%左右。电解液由电解质、溶剂和添加剂组成,具体比例因种类与厂家而异。

电解质(占电解液质量的12%左右)通常为锂盐,主要包括六氟磷酸锂(LiPF_6)、六氟砷酸锂(LiAsF_6)、四氟硼酸锂(LiBF_4)和高氯酸锂(LiClO_4)等。溶剂(占电解液质量的84%左右)通常为碳酸甲乙酯(EMC)、碳酸二甲酯(DMC)、碳酸二乙酯(DEC)、碳酸甲丙酯(MPC)、碳酸乙烯酯(EC)和碳酸丙烯酯(PC)等。添加剂(占电解液质量的4%左右)主要包括成膜添加剂、导电添加剂、阻燃添加剂、过充保护添加剂等,其成分主要是碳酸亚乙烯酯(VC)、1,3-丙烷磺酸内酯(PS)、1,3-丙烯磺酸内酯(PRS)、氟代碳酸乙烯酯(FEC)、双三氟甲烷磺酰亚胺锂(BSL)及环己基苯(CHB)等。

1.4 隔膜

电池的存储能量尽可能多而体积尽可能小,但正负电极之间短路成为一个巨大的风险。隔膜位于锂动力电池内部正负电极之间,在保证锂离子通过的同时,阻碍电子传输,从而预防正负电极材料短路。隔膜的性能决定了电池的界面结构、内阻等,直接影响电池的容量、循环以及安全性能等,性能优异的隔膜对提高电池的综合性能具有重要的作用,其占电池总成本的10%以内。大规模商品化的锂动力电池隔膜生产材料以聚烯烃为主,主要包括聚乙烯(PE)、聚丙烯(PP)、PE-PP复合材料等。隔膜质量约占锂动力电池质量的12%左右^[5-6]。

1.5 黏结剂

黏结剂的主要作用是连接电极活性物质、导电剂和电极集流体,使它们之间具有整体性,从而减小电极的阻抗^[7]。聚偏氟乙烯(PVDF)、偏氟乙烯(VDF)、聚四氟乙烯(PTFE)、丁苯橡胶(SBR)、羧甲基纤维素钠(CMC)是锂动力电池最常用的黏结剂。

除了上述已提到的原材料物质,锂动力电池在生产和再生过程中还会新加入物质或者产生二次污染物。比如在生产过程中,N-甲基吡咯烷酮(NMP)常用作浆料制备过程中的溶剂溶解正极材料、导电剂及黏结剂。在再生过程中的放电环节,电解液中的 LiPF_6 会分解生成五氟化磷(PF_5),并进一步水解

生成 HF;在热解环节, HF 和碱液喷淋的石灰乳液反应生成 CaF_2 , P_2O_5 与石灰乳液生成 $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ 等。

1.6 产业有毒有害物质基础清单

由于我国废旧锂动力电池尚不能全部回收,而且也存在回收处置不当、污染控制不力等问题,因此,锂动力电池生产和再生过程中新加入的物质和产生的污染物均有进入环境和产生环境风险的可能。基于全生命周期环境风险防控,将锂动力电池产业链涉及的原材料物质和再生污染物全部纳入有毒有害物质筛查范围,建立产业有毒有害物质基础清单。基础清单包括 51 种物质,其中原材料物质 34 种,分别为前文提到的 LiPF_6 、 LiAsF_6 、 LiBF_4 、 LiClO_4 、EMC、DMC、DEC、MPC、EC、PC、VC、PS、PRS、FEC、BSL、CHB、 LiCoO_2 、 LiMn_2O_4 、 LiNiO_2 、 LiFePO_4 、NCM、炭黑、碳纳米管、石墨、石墨烯、 Li_2TiO_3 、PE、PP、PVDF、VDF、PTFE、SBR、CMC、NMP;再生污染物 17 种,分别为 H_2SO_4 、HCl、LiF、 PF_5 、 P_2O_5 、HF、CO、 CH_4 、 H_2 、 CaF_2 、 $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ 、 CaSO_4 、CuS、 H_2S 、 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 、 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 、 MgF_2 。

2 产业有毒有害物质筛查

2.1 筛查方法

基于基础清单,按以下方法筛查有毒有害物质,形成有毒有害物质清单:

(1) 按照我国锂动力电池生产企业及再生企业污染物排放标准检索基础清单中的 51 种物质,列入上述标准的物质纳入有毒有害物质清单;(2) 采用美国、欧盟、日本、加拿大有毒有害物质及化学品公约等 23 项管控目录检索基础清单中的 51 种物质,列入上述任何 1 项管控目录的物质纳入有毒有害物质清单;(3) 查询基础清单中 51 种物质的全球化学品统一分类和标签制度(GHS)分类属性,重点考虑将具有两类及以上危害属性的物质纳入有毒有害物质清单,暂不考虑仅具有眼刺激/损伤、皮肤刺激/腐蚀或皮肤致敏性健康危害效应的物质。

2.2 纳入国家污染物控制标准管控的有毒有害物质

我国锂动力电池生产企业污染物排放需满足《电池工业污染物排放标准》(GB 30484—2013)中“锂离子电池”部分相关要求。如果企业利用锅炉提供热能,污染物排放需满足《锅炉大气污染物排放标准》(GB 13271—2014)要求。废旧动力蓄电池综合利用企业污染物排放应符合 GB 30484—2013、《大气污染物综合排放标准》(GB 16297—1996)、《污水综合排放标准》(GB 8978—1996)要求;燃烧室烟气

需满足《无机化学工业污染物排放标准》(GB 31573—2015)及《工业企业挥发性有机物排放控制标准》(DB12/ 524—2014)要求;废水污染物排放应符合 GB 31573—2015 及《污水排入城镇下水道水质标准》(GB/T 31962—2015)要求。在基础清单中,有 21 种物质被列入上述污染物排放标准管制对象,分别为: LiPF_6 、 LiAsF_6 、 LiBF_4 、 LiCoO_2 、 LiMn_2O_4 、 LiNiO_2 、NCM、炭黑、碳纳米管、石墨、石墨烯、 H_2SO_4 、HCl、LiF、 PF_5 、HF、 CaF_2 、 CaSO_4 、CuS、 H_2S 、 MgF_2 。

2.3 纳入国际管控目录的有毒有害物质

美国、欧盟、日本、加拿大等化学品管理起步较早,在化学物质危害属性研究和风险评估领域有一定基础,已发布了多个目录对有毒有害物质或污染物实施管控。此外,联合国环境规划署和粮食与农业组织提出了需要在全世界范围实施《斯德哥尔摩公约》和《鹿特丹公约》管控物质目录,国际癌症研究中心提出了需要广泛关注 2B 类以上的物质目录。各目录及管控物质种类数见表 1。

表 1 国际有毒有害物质管控目录
Table 1 International control catalogues of toxic and hazardous substances

目录依据		管控物质种类数
美国	《清洁空气法》	187
	《清洁水法》	126
	污染物释放与登记转移制度	709
	《安全饮用水法》	76
	持久性、生物累积性、毒性(PBT)物质	21
欧盟	《关于化学品注册、评估、许可和限制的法规》(REACH)高关注物质	201
	REACH 授权物质	54
	REACH 限制物质	70
	污染物释放与登记转移制度	91
	《水框架指令》	33
日本	《化审法》	56
	《大气污染防治法》	248
	《水污染防治法》	84
	《土污染防治法》	26
	污染物释放与登记转移制度	562
加拿大	《环境保护法》中有毒有害物质	153
	实际清除物质	2
	污染物释放与登记转移制度	324
	PBT 物质	393
	致癌、致突变、致畸(CMR)物质	802
《斯德哥尔摩公约》		30
《鹿特丹公约》		52
国际癌症研究中心 2B 类以上物质		513

采用表 1 对基础清单中的 51 种物质进行筛选,结果见表 2,有 17 种物质被纳入上述管控目录中的至少 1 项。虽然 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 被美国《安全饮用水法》和

表 2 基础清单物质纳入国际有毒有害物质管控目录情况¹⁾
Table 2 The basic list of substances that included in the international toxic and hazardous control lists

序号	物质	Aa	Ab	Ac	Ea	Eb	Ec	Ja	Jb	Jc	Jd	Je	Ca	Cb	W
1	LiAsF ₆					●			●	●	●	●			
2	LiBF ₄									●	●	●			
3	PS	●	●		●							●			●
4	LiCoO ₂											●			
5	炭黑													●	●
6	碳纳米管														●
7	NMP		●		●	●		●					●	●	
8	H ₂ SO ₄		●										●		
9	HCl	●	●							●			●		
10	LiF									●	●				
11	HF	●	●							●	●	●	●		
12	CO						●						●		
13	CaF ₂									●	●		●		
14	CuS									●		●			
15	H ₂ S		●										●		
16	Al(OH) ₃			●						●					
17	MgF ₂									●	●				

注: 1) Aa 为美国《清洁空气法》; Ab 为美国污染物释放与登记转移制度; Ac 为美国《安全饮用水法》; Ea 为欧盟 REACH 高关注物质; Eb 为欧盟 REACH 限制物质; Ec 为欧盟污染物释放与登记转移制度; Ja 为日本《化审法》; Jb 为日本《大气污染防治法》; Jc 为日本《水污染防治法》; Jd 为日本《土污染防治法》; Je 为日本污染物释放与登记转移制度; Ca 为加拿大污染物释放与登记转移制度; Cb 为加拿大 CMR 物质; W 为国际癌症研究中心 2B 类以上物质。

日本《水污染防治法》均列入管控目录, 主要原因是 Al(OH)₃ 可使水质浑浊而导致外观不达标, 因此未将 Al(OH)₃ 纳入有毒有害物质清单。

2.4 具有较高环境和健康危害的有毒有害物质

基于中国《危险化学品目录(2015 版)实施指南(试行)》、欧盟《物质和混合物分类、标签和包装法规》(CLP) 以及日本 GHS-J 数据库, 对基础清单中的 51 种物质的 GHS 分类结果进行查询。将具有两类及以上下述危害属性的物质列为有毒有害物质, 包括水生急性毒性、水生慢性毒性、生殖毒性、致癌性、致突变、急性毒性(吸入)、急性毒性(经口)、急性毒性(经皮)、特定靶器官毒性(单次接触)和特定靶器官毒性(反复接触)等环境和健康毒性。经筛选, 基础清单中有 16 种物质符合该标准, 分别为 LiPF₆、LiAsF₆、LiBF₄、EC、VC、PS、FEC、BSL、CHB、LiCoO₂、炭黑、NMP、HF、CO、CuS 及 H₂S。

2.5 产业有毒有害物质清单

将纳入我国污染物排放标准、国际有毒有害物质管控目录以及具有两类以上特定健康危害或环境危害的物质汇总, 归纳得到锂离子电池产业有毒有害物质清单。该清单共包括有毒有害物质 29 种, 其中原材料物质 17 种, 再生污染物 12 种, 具体见表 3。

3 重点有毒有害物质环境风险分析

在筛查出的 29 种有毒有害物质中, 21 种物质

已纳入我国现行污染物排放标准, 1 种物质(CO)列入《环境空气质量标准》(GB 3095—2012), 而对于其余 7 种物质我国尚无环境标准对其排放或环境风险实施控制, 这 7 种物质分别是: EC、VC、PS、FEC、BSL、CHB 和 NMP, 其中前 6 种物质来源于锂离子电池电解液, NMP 为锂离子电池生产过程中新加入物质。以下着重对这 7 种有毒有害物质进行环境风险分析。

3.1 重点有毒有害物质生产和使用

根据 2016 年生态环境部固体废物与化学品管理技术中心开展的全国化学品生产使用情况调查结果, 除 BSL, 其他 6 种有毒有害物质均可检索到生产及使用相关信息, 具体情况如下:

全国有 11 家 EC 生产使用企业, 其中生产企业两家, 年生产总量 11 660 t; 使用企业 9 家, 年使用总量 7 500 t, 其中, 用于生产锂离子电池电解液的使用量 4 851 t, 占使用总量的 64.7%。

全国有 7 家 VC 生产使用企业, 其中生产企业 4 家, 年生产总量 1 151 t; 使用企业 3 家, 年使用总量 97.4 t, 其中, 用于生产锂离子电池电解液的使用量 88.8 t, 占使用总量的 91.2%。

全国有 8 家 PS 生产使用企业, 其中生产企业 4 家, 年生产总量 1 116 t; 使用企业 4 家, 年使用总量 104.7 t, 其中, 用于生产锂离子电池电解液的使用量 41.2 t, 占使用总量的 39.4%。

表3 锂动力电池产业有毒有害物质清单
Table 3 List of lithium power battery industrial toxic and hazardous substances

序号	物质	来源	列入国内污染控制标准	列入国外管控目录	具有 GHS 两类以上危害属性
1	LiPF ₆	电解质	是	否	是
2	LiAsF ₆	电解质	是	是	是
3	LiBF ₄	电解质	是	是	是
4	EC	电解液溶剂	否	否	是
5	VC	电解液添加剂	否	否	是
6	PS	电解液添加剂	否	是	是
7	FEC	电解液添加剂	否	否	是
8	BSL	电解液添加剂	否	否	是
9	CHB	电解液添加剂	否	否	是
10	LiCoO ₂	正极材料	是	是	是
11	LiMn ₂ O ₄	正极材料	是	否	否
12	LiNiO ₂	正极材料	是	否	否
13	NCM	正极材料	是	否	否
14	炭黑	负极材料	是	是	是
15	碳纳米管	负极材料	是	是	否
16	石墨	负极材料	是	否	否
17	石墨烯	负极材料	是	否	否
18	NMP	新加入物质	否	是	是
19	H ₂ SO ₄	再生污染物	是	是	否
20	HCl	再生污染物	是	是	否
21	LiF	再生污染物	是	是	否
22	PF ₅	再生污染物	是	否	否
23	HF	再生污染物	是	是	是
24	CO	再生污染物	否	是	是
25	CaF ₂	再生污染物	是	是	否
26	CaSO ₄	再生污染物	是	否	否
27	CuS	再生污染物	是	是	是
28	H ₂ S	再生污染物	是	是	是
29	MgF ₂	再生污染物	是	是	否

全国有 6 家 FEC 生产使用企业,其中生产企业 4 家,年生产总量 4 072 t;使用企业两家,年使用总量 710 t,全部用于生产锂动力电池电解液。

全国有两家 CHB 使用企业,年使用总量 14.4 t,其中用于生产锂动力电池电解液的使用量 0.88 t,占使用总量的 6.1%。

全国有 82 家 NMP 生产使用企业,其中生产企业 15 家,年生产总量 76 872 t;使用企业 67 家,年使用总量 44 082 t,NMP 主要用于合成反应溶剂、提取/提纯溶剂、清洗溶剂等。

3.2 重点有毒有害物质环境危害分析

预测无效应浓度(PNEC,以质量浓度计)是化学品剂量(浓度)-反应(效应)评估的阈值,一般情况下毒性越大的物质 PNEC 越小。基于欧盟化学品管理局(ECHA)建立并维护的 CHEM 数据库^[6],查询 7 种重点有毒有害物质在淡水、污水处理厂、沉积物和土壤中的 PNEC,结果见表 4。

7 种重点有毒有害物质中,除 EC 在污水处理厂介质中无 PNEC 外,其余均具有明确的 PNEC。在淡水中,CHB 的 PNEC 最低;在污水处理厂、沉

表4 7种重点有毒有害物质在不同环境介质中的 PNEC
Table 4 PNEC of 7 key toxic and hazardous substances in different environmental media

序号	物质	淡水/($\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$)	污水处理厂/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	沉积物/($\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	土壤/($\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)
1	EC	5 900		28 300	2 200
2	VC	2.4	1	14	1.3
3	PS	16	26	69.0~84.5	4.5~5.5
4	FEC	8.4	8	35.5	2.16
5	BSL	14	10	71	6
6	CHB	0.37	17	191	38
7	NMP	250	10	1 090	70.9

积物和土壤中,VC的PNEC均最低。7种重点物质已被纳入欧盟、美国、日本多个有毒有害物质管控目录,其中,NMP已在欧盟地区完全禁用。就锂动力电池产业而言,除常规污染物外,还应特别关注废弃电解液和生产环节使用的有毒有害物质的环境风险。

4 对策建议

锂动力电池产业链条长、环节多、范围广,涉及管理制度、政策衔接及市场机制等诸多方面。2018年全国锂动力电池报废量为53 000~74 000 t,正规渠道回收量为5 000~13 000 t,正规渠道回收比例不超过20%^[9]。大量废旧电池的利用处置不可控,造成资源浪费和环境污染风险。加强锂动力电池产业有毒有害物质环境风险防控,构建高效的锂动力电池回收利用体系,是有效降低环境风险、推动我国新能源汽车产业可持续发展的根本路径。因此,提出以下建议:

一是加强电池生产企业的有毒有害物质管理,制定完善产业标准和产品标准,推行清洁生产技术,严格控制电解液溶剂、添加剂等原材料的添加和使用,并逐步实现低有机溶剂、添加剂替代技术,从源头降低其后续进入环境的风险。

二是加强锂动力电池回收处理过程的污染防治,制定技术规范,指导再生企业规范预处理技术、资源再生技术以及污染控制工艺、设施和效率,减少重金属、持久性有机污染物(POPs)以及环境危害较大的有毒有害物质的排放。

三是提高行业环境准入标准,引导企业合理布局。推动江西、湖南等产业聚集地区尽快制定并发布废锂动力电池处理行业污染物排放标准,严控企业污染物排放水平和强度。建立定期巡查和抽查制度,依法依规处理排放不达标企业。

四是开展锂动力电池生产行业和综合利用行业污染物专项调查,摸清行业污染物生产和排放底数,围绕重点有毒有害物质向环境中的释放途径、迁移转化规律、环境暴露水平和环境效应开展研究,为后续环境管理决策制定提供科学依据。

参考文献:

[1] 国务院.国务院关于印发节能与新能源汽车产业发展规划(2012—2020年)的通知[EB/OL].[2020-12-01].http://www.gov.cn/jxgk/pub/govpublic/mrlm/201207/t20120709_65317.html.

[2] 陈秀娟,黎冲森,郑劼.山坡上的新能源车[J].汽车观察,2020(2):58-82.
[3] 邢生玉.解析全球动力电池产业[J].青海科技,2016(5):25-27.
[4] 申晨,王怀国.我国锂离子电池产业技术发展概况[J].新材料产业,2019(9):15-21.
[5] 崔光磊.动力电池中聚合物关键材料[M].北京:科学出版社,2018.
[6] 周志敏.电动汽车动力电池梯次利用与回收技术[M].北京:化学工业出版社,2019.
[7] 柴丽莉,张力,曲群婷,等.锂离子电池电极粘结剂的研究进展[J].化学通报,2013,76(4):299-306.
[8] ECHA.Information on chemicals[EB/OL].[2020-12-01].<https://echa.europa.eu/information-on-chemicals>.
[9] 林虹,曹开颜.2018年我国锂离子电池市场现状与发展趋势[J].电池工业,2019,23(4):218-223.

编辑:徐婷婷 (收稿日期:2020-12-28)

(上接第783页)

[18] 邹莎娜,张睿,孙帅杰,等.宁波市工业危险废物处置体系现状分析[J].环境保护与循环经济,2019,39(3):11-14,17.
[19] 王烨.安徽省危险废物利用处置现状及对策[J].安徽农业科学,2017,45(33):68-71.
[20] 叶玲娅,陶国建.台州市工业危险固废产生及处置情况和对策研究[J].环境科学与管理,2017,42(2):39-42.
[21] 侯文正.苏州工业园区危险废弃物管理与处理现状调查及对策研究[D].苏州:苏州科技大学,2017.
[22] 赵赞,邵翔,田宇.打击固体废物环境违法行为专项行动工作进展及管理建议[J].精细与专用化学品,2019,27(12):1-3.
[23] 张成,张后虎,申秀芳,等.长江经济带固体废物污染防治和管理研究[J].环境保护,2018,46(16):24-30.
[24] 国家发展改革委国土开发与地区经济研究所课题组.地区间建立横向生态补偿制度研究[J].宏观经济研究,2015(3):13-23.
[25] 万军,张惠远,王金南,等.中国生态补偿政策评估与框架初探[J].环境科学研究,2005,18(2):1-8.
[26] 洪尚群,马丕京,郭慧光.生态补偿制度的探索[J].环境科学与技术,2001,24(5):40-43.
[27] 王璟睿,陈龙,张懿,等.国内外生态补偿研究进展及实践[J].环境与可持续发展,2019,44(2):121-125.
[28] 吴晓青,洪尚群,段昌群,等.区际生态补偿机制是区域间协调发展的关键[J].长江流域资源与环境,2003,12(1):13-16.
[29] 胡仪元.生态补偿标准研究综述[J].陕西理工大学学报(社会科学版),2019,37(5):25-30.
[30] 孙新章,谢高地,张其仔,等.中国生态补偿的实践及其政策取向[J].资源科学,2006,28(4):25-30.
[31] 刘春腊,刘卫东.中国生态补偿的省域差异及影响因素分析[J].自然资源学报,2014,29(7):1091-1104.

编辑:徐婷婷 (收稿日期:2020-10-10)