

DOI: 10.7524/j.issn.0254-6108.2019070502

齐靖宇, 杨柳, 冯谦, 等. 基于聚类方法下的柴油车排放颗粒物无机元素谱分析[J]. 环境化学, 2020, 39(5): 1368-1374.

QI Jingyu, YANG Liu, FENG Qian, et al. Study and review on inorganic elements spectrum of diesel particulate matter: Cluster analysis[J]. Environmental Chemistry, 2020, 39(5): 1368-1374.

基于聚类方法下的柴油车排放颗粒物无机元素谱分析*

齐靖宇¹ 杨柳² 冯谦³ 殷小鸽⁴ 陆凯波¹ 金陶胜^{1**}

(1. 南开大学环境科学与工程学院, 天津市城市交通污染防治研究重点实验室, 国家环境保护城市大气颗粒物污染防治重点实验室, 天津, 300350; 2. 中交公路规划设计院有限公司, 北京, 100088; 3. 中国汽车技术研究中心有限公司, 天津, 300300; 4. 天津港保税区环境监测站, 天津, 300308)

摘要 近年来在大气污染的防治工作中, 柴油车污染防治的重要性日渐凸显. 本文通过测试和文献检索等方法收集了 97 组与柴油车排放颗粒物无机元素排放有关的数据, 采用 k-means 均值聚类分析的方法对数据进行分类并对分类结果进行分析, 得出柴油车无机元素排放占颗粒物比例的大致区间为: Si (0—4.62%)、Al (0—1.53%)、Ca (0—4.09%)、Na (0—2.61%)、Mg (0—2.68%)、K (0—0.85%)、Fe (0—3.4%)、Zn (0—0.54%)、Cu (0—1.49%)、Ni (0—0.06%), 且所得无机元素的排放区间的置信水平平均大于 94%. 同时得到的柴油车排放颗粒物无机元素分析结果, 可以为后续柴油车排放颗粒物无机元素数据分析以及相关污染治理提供参考, 进而促进我国大气环境质量的改善、更好地保障人们身体健康.

关键词 柴油车颗粒物, 无机元素, k-means, 聚类分析.

Study and review on inorganic elements spectrum of diesel particulate matter: Cluster analysis

QI Jingyu¹ YANG Liu² FENG Qian³ YIN Xiaoge⁴ LU Kaibo¹ JIN Taosheng^{1**}

(1. Tianjin Key Laboratory of Urban Transport Emission Research, Ministry of Education Key Laboratory of Pollution Processes and Environmental Criteria, College of Environmental Science and Engineering, Nankai University, Tianjin, 300350, China; 2. China Communications Highway Planning and Design Institute Co., Ltd., Beijing, 100088, China; 3. China Automotive Technology and Research Center Co., Ltd., Tianjin, 300300, China; 4. Tianjin Port Free Trade Zone Environmental Monitoring Station, Tianjin, 300308, China)

Abstract: In recent years, the importance of diesel vehicle pollution has become increasingly prominent in air quality control in China. Ninety-seven data related to the emission of inorganic elements from DPM (Diesel Particulate Matter) from our own experiments and also previous references, were collected and classified by k-means cluster analysis. The results showed that the approximate range of inorganic element in DPM were as follow: Si (0—4.62%), Al (0—1.53%), Ca (0—4.09%), Na (0—2.61%), Mg (0—2.68%), K (0—0.85%), Fe (0—3.4%), Zn (0—0.54%), Cu (0—1.49%), and Ni (0—0.06%). The confidence level of the obtained inorganic element variation range was more than 94%. Our results can be helpful for related future studies of vehicle emission control and health impact assessment.

2019年7月5日收稿(Received: July 5, 2019).

* 国家重点研发计划专项(2017YFC0212100)和国家自然科学基金面上项目(21477057)资助.

Supported by National Key Research and Development Program of China (2017YFC0212100) and National Natural Science Foundation of China (21477057).

* ** 通讯联系人, Tel: 13682181715, E-mail: jints@nankai.edu.cn

Corresponding author, Tel: 13682181715, E-mail: jints@nankai.edu.cn

Keywords: diesel particulate matter, inorganic elements, k-means, cluster analysis.

近年来,各级政府、业界专家和学者等在政府工作报告、全国生态环境保护大会、全国环境保护工作会议等各类重要会议上,反复强调了“柴油车污染治理”的重要性。柴油车排放的污染物主要包括气态污染物和颗粒物,其中所排放的颗粒物会通过呼吸系统进入机体后,不仅能穿透上皮细胞,而且能够进入血液循环,其所包含的多种组分可产生更为严重的健康危害^[1]。近几年,柴油车颗粒物(diesel particulate matter,简称DPM)中的一些金属如铅、铬和镉等已被美国环保局列为有毒空气污染物^[2]。因此对柴油车颗粒物排放的研究尤其是无机元素就显得尤为重要。为此本文主要对DPM中金属元素和其他的非金属无机元素(主要是Si)排放情况进行分析。DPM中金属元素主要包括Al、Fe、Ca、Na、K、Mg、Zn、Cu、Ni、As、Cd、Cr等。柴油车中金属元素的排放来源通常认为有3种:来自燃油中的金属元素、来自润滑油中的金属元素和来自发动机及排气系统的磨损;同时运行工况、油品以及后处理的不同均会影响柴油车颗粒物中金属元素的排放。

在运行工况方面,Lim等^[3]发现总无机元素排放因子随着发动机功率增加而增加。Jin等^[4]的研究显示在100%负荷下,无机元素占PM质量比随转速增大而减小。在Gangwar等^[5]的研究中,100%负荷下,发动机转速2400 r·min⁻¹时的Na含量(占PM质量比0.2%)比1800 r·min⁻¹时的Na含量(占PM质量比0.6%)低。

在油品方面,Lim等^[3]发现,燃用低硫柴油(LSD)的总无机元素排放因子(11.7—38.1 mg·km⁻¹)比燃用超低硫柴油(ULSD)的总无机元素排放因子(3.4—17.0 mg·km⁻¹)大。黄震等^[6]的研究发现,燃用天然气合成油(GTL)与燃用国Ⅲ柴油相比,所排放的颗粒物含量有大幅度减小。所以,燃用的油品不同,其排放因子和排放效果也不相同^[7]。

在后处理方面,Khalek等^[8]研究显示,与应用2004年技术的柴油机相比,应用2007年技术的柴油机(配备高效催化柴油机颗粒过滤器)能减少无机(主要为金属)元素排放98%。后处理装置使PM有效减排,随着PM排出的金属元素自然减少。然而,并不是加装后处理就一定能使金属元素排放减小。邵忠瑛等^[9]发现,加装SCR(选择性催化还原技术)后处理后,PM只减排9.5%,而PM中大部分重金属元素含量略有增加。所以采用不同的催化处理装置对金属元素的排放会起到不同的影响。此外,于涛、王燕军等^[10-11]通过研究发现发动机运行时间和负载的不同也会影响柴油车颗粒物金属元素的排放。

在无机元素排放规律研究中,张延峰等^[12]、Kim等^[13]和Jin等^[4]的研究中,Ca的含量最大;宋崇林等^[14]的研究显示,PM中含量最高的金属元素是Fe,约占金属元素总质量的一半。Khalek等^[8]和Gangwar等^[5]发现,Na占PM质量比最高。Schauer等^[15]的研究中,Si占PM质量比最高(0.63%±0.04%)。黄成等^[16]发现Ca、Al占PM的质量比最高。美国EPA(美国国家环境保护局)网站中有关柴油车颗粒物金属元素排放的数据统计显示绝大多数测试数据中含量较高的元素为Si、Ca、Fe等,其中Ca、Fe为金属元素,Si、Ca、Fe都属于地壳中含量较高的元素^[17]。综上,虽然排放最高的元素在不同研究中不尽相同,但所列出的大部分文献中的含量数据排放最高的Ca、Na、Fe、Si都属于“地壳元素”。但是考虑到无机元素的排放受工况、燃油类型、后处理装置等的影响较大,所以不同的实验可能具有不同的组成结果。本文为消除这些差异化的影响,对收集的有关金属元素和Si排放的数据采用k-means均值聚类分析^[18]的方法进行分组,对柴油车颗粒物无机元素排放进行分析^[19]。

1 材料与方法(Materials and methods)

本次研究共选取97组数据,其中为保证数据更具有普遍性,选取了全球多个国家(中国、美国、墨西哥等)不同年份的数据进行分析,并且在数据的选取上并未人为的对数据进行筛选。其中包括作者实际测量数据7组,查找有关问文献、资料库中的数据90组^[4,14,17,20-21]。为了保证准确性,在选择所分析的元素时,尽量选取含量不太低的元素,主要考察机动车颗粒物排放中的Si、Al、Ca、Na、Mg、K、Fe、Zn、Cu、Ni元素排放比,本次研究将该97组数据进行1—97号编号(1—7为本实验室数据,8—97为搜集数据)。数据来源和各元素占比如表1和图1所示。

表 1 数据编号及其来源

Table 1 Data number and source

实验编号 Experiment number	出处 Source	实验编号 Experiment number	出处 Source
1—7	测试(天津)	17	[14]
8—13	[4]	18	[21]
14—16	[20]	19—97	[17]

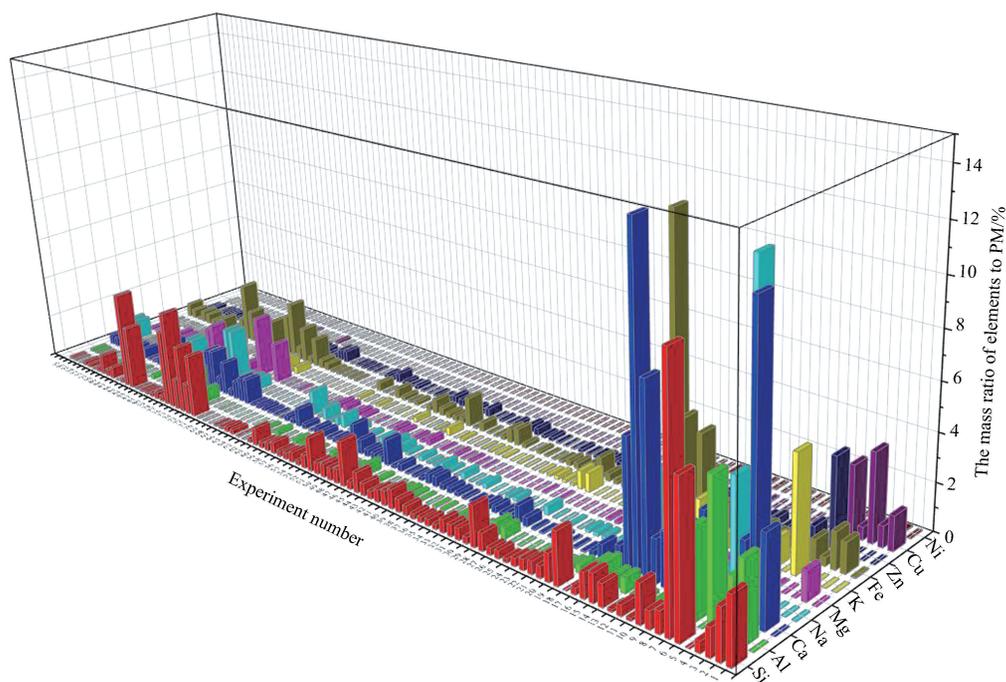


图 1 无机元素占机动车排放颗粒物比例

Fig.1 The contribution of Inorganic elements to diesel particulate matter

1.1 实验装置

本实验室测量的 7 组数据全部采用发动机台架测试系统进行测试,实验装置主要包括发动机台架测试系统和柴油发动机.发动机台架测试系统采用的是 AVL 公司的 CEB(combustion emission bench)污染物台架测试系统,主要通过计算机控制系统来控制整个测试系统.发动机测功机能够记录发动机转速和扭矩等参数.传感器能够记录温度和压力等参数.燃油供给系统不仅可以供给燃油,还可以同时检测燃油的消耗量.然后利用 CVS 定容采样系统以及颗粒物采集系统,稀释发动机尾气,将颗粒物采集在滤膜上.

1.2 样品采集

采集颗粒物所用的滤膜为 AVL 公司的 teflon 滤膜,它的直径为 70 mm.每次测试时将两张滤膜串联并放在同一个气流通道中在同一时间采集气体样品.然后分别称取采样前后滤膜的质量.在称重前,为了尽量消除称重环境不一致所导致的误差,要将滤膜恒温(25 ± 5 °C)恒湿($45\% \pm 5\%$)避光平衡 72 h.平衡称重后,将滤膜放入滤膜盒,保存在 -19 °C 的冰箱中,和空白滤膜样品一起进行 PM 成分分析.对滤膜上元素进行测量时,使用美国 Agilent 公司的 Agilent 7500a 型电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)分析每张滤膜中的 Na、K、Cr、Cd、Ni、V、Cu、Zn、Pb 共 9 种元素;用电感耦合等离子光谱法(ICP-OES)测定滤膜中的 As、Mg、Ca、Fe、Al 共 5 种元素.

1.3 k-means 聚类分析

聚类分析基于一个原始的合并准则^[18],将样品(或变量)按相似度的大小逐一归类,关系较密切的先进进行聚类,关系疏远的最后进行聚类,直到将所有的样品都聚集完毕,最后根据设定的分组数将样品

根据疏远程度的大小分到各个组内^[22].k-means 均值聚类,是首先从 n 个数据对象任意选择 k 个对象作为初始聚类中心;而对于所剩下其它对象,则根据它们与这些聚类中心的相似度(距离),分别将它们分配给与其最相似的(聚类中心所代表的)聚类;然后再计算每个所获新聚类的聚类中心(该聚类中所有对象的均值);不断重复这一过程直到标准测度函数开始收敛为止^[23].k-means 聚类具有以下特点:各聚类本身尽可能的紧凑,而各聚类之间尽可能的分开.通过采用聚类分析的方法对大量的数据进行分类分析,排除了个别实验因素带来的误差以及防止若干特异性数据在进行常规数学统计方法时数据的特异性,且对数据采用统计分析的方法,更具有代表性与准确性^[24].

分类个数:k-means 聚类分析的 k 值的确定有很多种方法,比如常见的手肘法、轮廓系数法等等,关于分类方法并没有明确的规定,合理即可,本文主要根据类内平均距离/类间平均距离的比值 D 与 k 的关系来确定.根据 k 取 2—15 时 D 的大小情况,如图 2 所示,不同的 k 有不同的 D , D 越小越好,但 k 也不能过大.综合 D 值大小和 k 值大小关系,本次聚类分析的 k 值取 5.

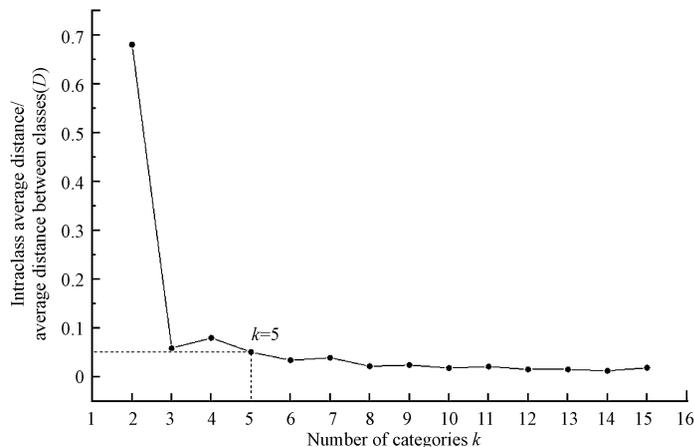


图 2 k 与 D 关系曲线

Fig.2 Curve of relationship between k and D

2 结果与讨论 (Results and discussion)

2.1 聚类结果分析

将上述 97 组初始数据按照 $k=5$ 进行 k-means 聚类分析,分类结果如表 2 所示.确定分类之后,各类数据取平均值结果如图 3 所示.

表 2 k-means 聚类分类结果

Table 2 The results of k-means cluster classification

类别 Classification	实验编号 Experiment number	类别 Classification	实验编号 Experiment number
1	1, 4, 8—13, 17—18, 21—97	4	2, 6, 7, 19
2	20	5	3, 14, 15, 16
3	5		

k-means 聚类分析结果显示 5(第 3 类)、20(第 2 类)这两组数据单独为一类,其中第 20 组数据为 1995 年南美洲的测试数据,第 5 组来自本实验室.通过图 3 发现 5、20 这两组数据确实与其他数据规律的差异略大,例如第 5 组数据的 Na 占比极高,而其他类数据则处于较低水平;第 20 组数据 Fe 处于较高占比,而其他类别处于较低水平.

通过 k-means 均值聚类的结果发现:第 1 类主要为 1997—2005 年北美洲数据,第 4 类数据主要为 2018 年中国(天津)数据,第 5 类主要为 2011 年的中国(北京)数据.通过图 3 发现 1997—2005 年北美洲(美国)无机元素占 PM 的百分比较少(金属元素占比均不超过 0.5%);相反中国无机元素的排放占比要

高, Si、Al、Ca 等元素都远高于美国. 进一步研究发现, 美国 1997—2005 刚好处于 Tier1 执行阶段, 2011 年中国(北京)处于国 II、国 III 排放标准, 而 2018(天津)测试的排放标准为国 V、国 VI 标准. Tier1 标准的柴油车 PM 限值约为 $0.08 \text{ g} \cdot \text{mile}^{-1}$, 国 VI 标准的 PM 限值为 $0.05 \text{ g} \cdot \text{km}^{-1}$, 两者的 PM 限值几乎相等, 但是美洲的无机元素含量却远低于 2018(天津), 反应到无机元素的排放因子上是我国的无机元素排放量远高于美国. 对比 2011 年与 2018 年的无机元素排放含量, 排放比例约有 20% 左右的降幅, 但 Si、Al、Fe 等主要元素含量相比于 2011 年却有约 20% 左右的上升.

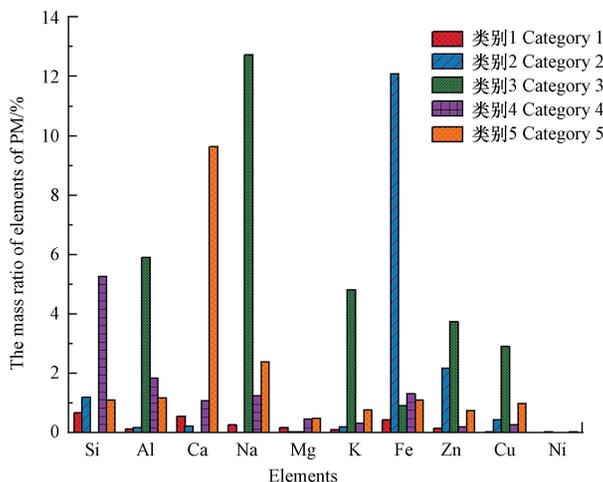


图 3 各类别中无机元素占机动车排放颗粒物比例

Fig. 3 The contribution of Inorganic elements to diesel particulate matter in each category

采用 k-means 分类的各类数据的无机元素排放区间(取各类别的最高值和最小值)如表 3 所示.

表 3 元素占比变化区间

Table 3 Element ratio variation range

分类编号 Classification number	1	2	3	4	5
Si	0—4.53	1.2	0	2.11—10	0.9—1.2
Al	0—1.39	0.191	5.9111	0—3.68	0.58—2.5
Ca	0—3.68	0.24	0	0—3.75	5.38—13.5
Na	0—2.47	0	12.744	0—4.63	0—3.66
Mg	0—2.82	0.0396	0.0434	0—1.25	0—0.99
K	0—0.8	0.212	4.8265	0—1.14	0—1.57
Fe	0—3.5	12.1	0.9235	0.05—3.9	0.7—1.5
Zn	0—0.5	2.19	3.7419	0—0.6	0—1.32
Cu	0—1.45	0.441	2.9132	0.02—0.08	0.05—3.7
Ni	0—0.06	0.0496	0.0103	0—0.06	0.017—0.06

以 1、4、5(由于 2、3 两类结果中每类只含 1 组数据, 因此区间只有 1 个值, 所以不对这两类进行分析)三类结果中类内数据的含量为权重, 对 1、4、5 三类数据的排放区间按权重进行分析, 得出了柴油车无机元素谱排放的比例数据一般落在: Si(0—4.62%), 置信水平为 98%; Al(0—1.53%), 置信水平为 96%; Ca(0—4.09%), 置信水平为 96%; Na(0—2.61%), 置信水平为 95%; Mg(0—2.68%), 置信水平为 99%; K(0—0.85%), 置信水平为 96%; Fe(0—3.4%), 置信水平为 97%; Zn(0—0.54%), 置信水平为 94%; Cu(0—1.49%), 置信水平为 98%; Ni(0—0.06%), 置信水平为 97%, 排放区间如图 4 所示. 通过给出的排放区间以及排放区间的置信水平均超过 94%, 这可以为后续进行柴油车无机元素排放数据统计与筛选提供时参考, 通过判断数据是否位于排放区间内来判断数据的准确性等等.

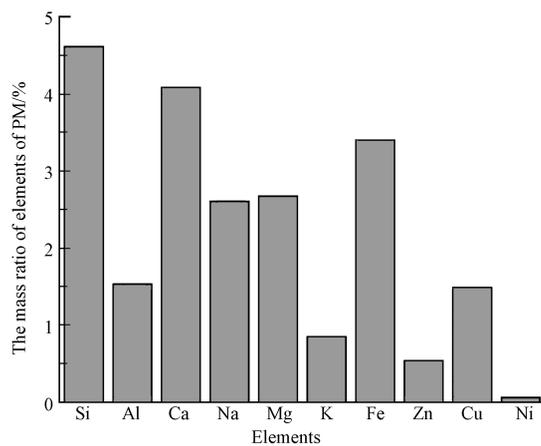


图4 无机元素占颗粒物比例的总体变化区间

Fig.4 The overall variation range of inorganic elements to particulate matter

2.2 实测数据结果分析

本实验室测量的7组数据中在k-means中的分类情况如表4所示。

表4 实测数据分类

Table 4 The classification of measured data

测试编号 Test number	类别 Classification	后处理 After-treatment	工况 Drive cycle	油品 Oil product	主要元素 Main element	区间外元素 Out-of-range element
1	1	无	ESC	国V柴油	Si	无
2	4	无	WHTC	国V柴油	Ca、Al、Si	Al
3	5	SCR	WHTC	国V柴油	Cu、Al、Fe	Cu
4	1	SCR	ETC	国V柴油	Ca	无
5	3	SCR	C-WTVC	国VI柴油	Al、K、Mg	Al、Mg、K、Zn、Cu
6	4	SCR	CATC	国VI柴油	Si	Si
7	4	无	C-WTVC	国VI柴油	Al、Na、Si	Al、Na

第1组数据和第4组数据均未含区间外元素,第2组数据和第3组数据均含区间外元素,且2、3两组数据的金属元素含量均高于1、4。通过分析发现这可能是由于WHTC(WHSC)工况与ETC(ESC)工况相比,处于低速和怠速的时间点更长,所以无机元素占PM的质量比会有一个较高的增加。

对比5、6、7等3组数据发现,第5组的Al、Mg、K、Zn、Cu,第6组数据的Si和第7组数据Al和Na位于排放区间外。其中5、7组数据的部分金属元素超过区间是由于C-WTVC工况会导致金属元素的排放增加;同时发现加装SCR会导致柴油车所排放的PM含量减小(减幅为25%),但却导致金属元素的排放因子略有增加,所以导致第5组数据区间外的金属元素数量增加。

3 结论(Conclusion)

(1)在柴油车排放颗粒物的无机元素中,地壳元素占PM质量比较高(1%—5%),且顺序一般为Si>Ca>Fe>Al。

(2)在PM控制水平相同的情况下我国柴油车颗粒物中无机元素排放含量显著高于国外(美国);同时通过对我国2011年与2018年的无机元素占比情况分析发现:无机元素含量总占比虽有下降但趋势不明显,个别元素Si、Fe的含量甚至有所上升。

(3)通过实测数据分析发现加装SCR、C-WTVC工况均会导致金属元素的排放比例增加。

针对柴油车排放颗粒物中无机元素的控制与研究思路,本文主要提出以下建议:加强对无机元素绝对质量的分析研究,开展更多关于无机元素分析的实验与数据测试,积累更多相关数据;开展有关不同

油品等因素下的柴油车无机元素排放情况分析,找出油品等对柴油车无机元素影响的影响;结合实验和本文的排放区间找出更多关于无机元素排放的规律等等。

参考文献 (References)

- [1] 李晓丽, 戴培贇, 张吉亮, 等. 柴油机颗粒物的形成、危害及其控制方法[J]. 机电设备, 2018, 35(4):6-15.
LI X L, DAI P Y, ZHANG J L, et al. The formation, harmness of diesel particulate matter and its control strategy[J]. Mechanical and Electrical Equipment, 2018, 35(4):6-15(in Chinese).
- [2] USEPA (United States Environmental Protection Agency). About Air Toxics [EB/OL]. [2019-03-07]. <http://www.epa.gov/ttn/atw/allabout.html#what>.
- [3] LIM M, AYOKO G A, MORAWSK L, et al. The effects of fuel characteristics and engine operating conditions on the elemental composition of emissions from heavy duty diesel buses[J]. Fuel, 2007, 86(12-13):1831-1839.
- [4] JIN T S, QU L, LIU S X, et al. Chemical characteristics of particulate matter emitted from a heavy duty diesel engine and correlation among inorganic and PAH components[J]. Fuel, 2014, 116:655-661.
- [5] GANGWAR J N, GUPTA T, AGARWAL A K. Composition and comparative toxicity of particulate matter emitted from a diesel and biodiesel fuelled CRDI engine[J]. Atmospheric Environment, 2012, 46:472-481.
- [6] 黄震, 李新令, 吕田, 等. 燃料特性对柴油机排放颗粒物理化特性影响的研究[J]. 内燃机学报, 2016, 34(2):97-104.
HUANG Z, LI X L, LU T, et al. Effect of fuel properties on physicochemical characteristics of diesel engine exhaust PM[J]. Transactions of CSICE, 2016, 34(2):97-104(in Chinese).
- [7] MANPREET S S, MURARI M R. Glycerine emulsions of diesel-biodiesel blends and their performance and emissions in a diesel engine [J]. Applied Energy, 2018, 230:148-159.
- [8] KHALEK I A, BOUGHER T L, MERRITT P M, et al. Regulated and unregulated emissions from highway heavy-duty diesel engines complying with US Environmental Protection Agency 2007 emissions standards[J]. Journal of the Air & Waste Management Association, 2011, 61(4):427-442.
- [9] 邵忠瑛, 张仲荣, 高俊华. SCR 后处理系统对柴油机颗粒物成分的影响研究[C]. 2010 中国汽车工程学会年会论文集, 2010: 375-378.
SHAO Z Y, ZHANG Z R, GAO J H. Analysis of compounds in particulates from diesel engine using SCR post processing technology[C]. SEA-C2010P192, 2010:375-378(in Chinese).
- [10] 于涛. 基于 GM(1,1)模型预测柴油机润滑油金属元素含量的变化趋势[J]. 内燃机与动力装置, 2016, 33(3):34-36.
YU T. Predicting the trend of metal element content in diesel engine lubricating oil based on GM(1,1) Model[J]. Internal Combustion Engine & Powerplant, 2016, 33(3):34-36(in Chinese).
- [11] 王燕军, 吉喆, 尹航, 等. 重型柴油车污染物排放因子测量的影响因素[J]. 环境科学研究, 2014, 27(3):232-238.
WANG Y J, JI Z, YIN H, et al. Study of parameters influencing measurement on heavy duty diesel vehicle's emission factors[J]. Research of Environmental Sciences, 2014, 27(3):232-238(in Chinese).
- [12] 张延峰, 宋崇林, 成存玉, 等. 车用柴油机排气颗粒物中有机组分和无机组分的分析[J]. 燃烧科学与技术, 2004, 10:197-201.
ZHANG Y F, SONG C L, CHENG C Y, et al. Analysis of the organic and inorganic components in the emission particulates from diesel engine[J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2004, 10:197-201(in Chinese).
- [13] KIM O N T, THIANATHI W, BOND T C, et al. Compositional characterization of PM_{2.5} emitted from in-use diesel vehicles[J]. Atmospheric Environment, 2010, 44(1):15-22.
- [14] 宋崇林, 王玉秋, 范国梁, 等. 柴油机排气颗粒物中有机组分的分离方法及微量金属的测定[J]. 天津大学学报, 2000, 33(6):707-710.
SONG C L, WANG Y Q, FAN G L, et al. Fractionation method of the soluble organic fraction of diesel exhaust particulates and the measurement of trace metal in diesel exhaust particulates[J]. Journal of Tianjin University, 2000, 33(6):707-710(in Chinese).
- [15] SCHAUER J J, KLEEMAN M J, CASS G R, et al. Measurement of emissions from air pollution sources. 2. C1 through C30 organic compounds from medium duty diesel trucks[J]. Environmental Science & Technology, 1999, 33(10):1578-1587.
- [16] 黄成, 楼晟荣, 乔利平, 等. 重型柴油公交车实际道路颗粒物排放的理化特征[J]. 环境科学研究, 2016, 29(9):1352-1361.
HUANG C, LOU S R, QIAO L P, et al. Physicochemical characteristics of real-world PM emissions from heavy-duty diesel buses[J]. Research of Environmental Sciences, 2016, 29(9):1352-1361(in Chinese).
- [17] United States Environmental Protection Agency. SPECIATE version 4.4. [DB/OL]. [2019-03-07]. <https://www3.epa.gov/ttn/chief/software/speciate/index.html#speciate>
- [18] CARIOU V, QANNARI E M. Statistical treatment of free sorting data by means of correspondence and cluster analyses[J]. Food Quality and Preference, 2018, 68:1-11.
- [19] JI X R, LU F H. K-means clustering analysis and evaluation for internet of acoustic environment characteristics[J]. Cognitive Systems Research, 2018, 52:603-609.
- [20] 石爱军, 马俊文, 耿春梅, 等. 北京市机动车尾气排放 PM₁₀组分特征研究[J]. 中国环境监测, 2014, 30(4):44-49.
SHI A J, MA J W, GENG C M, et al. Characteristics of chemical composition of particulate matter (PM₁₀) from Beijing Vehicle[J]. Environmental Monitoring in China, 2014, 30(4):44-49(in Chinese).
- [21] 张仲荣, 高俊华, 陈翠萍. ICP-MS 研究柴油机排气颗粒物中的无机元素[C]. 2009 中国汽车工程学会年会论文集, 2009.
ZHANG Z R, GAO J H, CHEN C P. Investigation of inorganic elements in particulates from diesel engine emission by ICP-MS [C]. 2009 SAE-China Congress PROCEEDINGS, 2009(in Chinese).
- [22] MARIUSZ K, MIROSLAW P. Similarity and provenance of underpainting chalk grounds based on their nannofossil assemblages cluster analysis[J]. Journal of Cultural Heritage, 2018, 34:13-22.
- [23] DAYANA M A, ELBA C T, MARCEL F B, et al. Cluster analysis of urban ultrafine particles size distributions[J]. Atmospheric Pollution Research, 2019, 10:45-52.
- [24] JACOB J C, AHMED A M, SOPHIA E R B, et al. Parcellating cognitive heterogeneity in early psychosis-spectrum illnesses: A cluster analysis[J]. Schizophrenia Research, 2018, 202:91-99.