环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心
■ 出版 科学出版社

2019
Vol.40 No.9
第40卷 第9期

环境科学
(HUANJING KEXUE)
ENVIRONMENTAL SCIENCE
第40卷 第9期
2019年9月15日

目 次

Eco-Environmental Knowledge Web
环 境 科 学
Environmental Science
第40卷 第9期 2019年9月
Vol. 40, No. 9 Sep., 2019

高速公路沿线 $PM_{2.5}$ 中重金属污染特征

李晓宝, 廖祖文, 赵红*, 彭成辉, 谭腾飞, 黄萍
(江西省交通科学研究院, 南昌 330200)

摘要: 为研究高速公路沿线 $PM_{2.5}$ 中重金属的污染特征, 于2018年3~8月分3次集中采集南昌市周边3条高速公路(昌樟、昌铜和温厚)的服务区、收费站、隧道和公路沿线的 $PM_{2.5}$ 样品, 运用电感耦合等离子体质谱联用仪(ICP-MS)监测了 $PM_{2.5}$ 中6种重金属(Cu、Zn、Pb、Cd、Cr和Ni)浓度, 分析其污染状况和分布情况, 并利用地累积指数法、潜在生态风险指数法评价其污染特征、潜在生态危害程度. 结果表明, 3条高速公路服务区和收费站的 $PM_{2.5}$ 和 $PM_{2.5}$ 中重金属均未表现出显著差异. 高速公路沿线中 $PM_{2.5}$ 和 $PM_{2.5}$ 中的重金属显示为特长隧道 > 长隧道 > 公路沿线、服务区和收费站, 重金属浓度从高到低依次为 Zn($3.8\ \mu g \cdot m^{-3}$)、Pb($10.2 \times 10^{-2} \mu g \cdot m^{-3}$)、Cr($6.8 \times 10^{-2} \mu g \cdot m^{-3}$)、Cu($3.5 \times 10^{-2} \mu g \cdot m^{-3}$)、Ni($1.5 \times 10^{-2} \mu g \cdot m^{-3}$)和 Cd($0.1 \times 10^{-2} \mu g \cdot m^{-3}$). 不同月份 $PM_{2.5}$ 及 $PM_{2.5}$ 中重金属浓度的显著差异可归结为温度和降水的影响. 其中 $PM_{2.5}$ 的浓度与温度呈反相关, 而 $PM_{2.5}$ 中 Zn 浓度与温度呈极显著正相关, 主要是由于温度升高加重轮胎磨损和金属腐蚀. 高速公路 $PM_{2.5}$ 中重金属污染程度和潜在生态危害程度表现为 Zn 和 Cd > Pb > Cu > Ni 和 Cr, 其中 Zn 和 Cd 污染及危害程度是评价标准中最严重的等级, 大气污染防治计划应着重考虑交通源的 Zn 和 Cd 污染.

关键词: 高速公路; $PM_{2.5}$; 重金属; 隧道; 收费站; 服务区
中图分类号: X513 **文献标识码**: A **文章编号**: 0250-3301(2019)09-3916-08 **DOI**: 10.13227/j.hjkx.201811101

Pollution Characteristics of Heavy Metals in $PM_{2.5}$ Near Highway

LI Xiao-bao, LIAO Zu-wen, ZHAO Hong*, PENG Cheng-hui, TAN Teng-fei, HUANG Ping
(Jiangxi Transportation Institute, Nanchang 330200, China)

Abstract: In this study, we evaluate the pollution characteristics of heavy metals in particulate matter with diameters less than 2.5 μm ($PM_{2.5}$) near highways. Three rounds of cluster sampling of $PM_{2.5}$ were conducted on three highways, Changzhang, Changtong, and Wenhou, in peri-urban areas near Nanchang from March to August 2018. The sampling sites included service areas, toll stations, tunnels, and areas near the highway. The concentrations of six heavy metals including Cu, Zn, Pb, Cd, Cr, and Ni in $PM_{2.5}$ were analyzed using inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS). The pollution and distribution of heavy metals in $PM_{2.5}$ near the highway were analyzed, and that pollution characteristics and the level of possible ecological jeopardy were assessed by using the Geoaccumulation Index and Potential Risk Index methods. No significant difference was observed in $PM_{2.5}$ or in heavy metals in $PM_{2.5}$ along highways with different traffic flow, but they differed significantly in among highway settings in the following order: super-long tunnels > long tunnels and area near the highway > service areas and toll stations. The heavy metal concentration in highways decreased in the following order: Zn ($3.8\ \mu g \cdot m^{-3}$) > Pb ($10.2 \times 10^{-2} \mu g \cdot m^{-3}$) > Cr ($6.8 \times 10^{-2} \mu g \cdot m^{-3}$) > Cu ($3.5 \times 10^{-2} \mu g \cdot m^{-3}$) > Ni ($1.5 \times 10^{-2} \mu g \cdot m^{-3}$) > Cd ($0.1 \times 10^{-2} \mu g \cdot m^{-3}$). In accordance with the influence of temperature and precipitation, $PM_{2.5}$ and heavy metals in $PM_{2.5}$ showed significant variations among the monitoring months. The $PM_{2.5}$ concentration had a significant negative correlation with atmospheric temperature. We observed that $PM_{2.5}$ concentration was significantly lower from May to August than from March to April. The Zn concentration in $PM_{2.5}$ was more significant from May to August than from March to April. Pearson analysis showed a significant positive correlation between Zn in $PM_{2.5}$ with atmospheric temperature because elevated temperatures could aggravate wear and tear and metallic corrosion, which then prompts the emission of Zn. According to the Geoaccumulation Index and Potential Ecological Jeopardy Index, the level of pollution associated with heavy metals of $PM_{2.5}$ manifested in the following order: Zn and Cd > Pb > Cu > Ni and Cr. The pollution and degree of jeopardy associated with Zn and Cd were the most severe in the assessment criteria; therefore, the pollution by these elements and the sources of traffic should be noted in air pollution control plans. Super long tunnels, long tunnels, and areas near highways showed greater levels of pollution and higher potential ecological jeopardy than service areas and toll stations. The degree of pollution in densely populated service areas and toll stations was consistent across partially urban areas.

Key words: highway; $PM_{2.5}$; heavy metal; tunnel; toll station; service area

自2013年全国大范围连续高强度的大气污染事件后, 细颗粒物 $PM_{2.5}$ 的污染已被高度关注, $PM_{2.5}$ 的研究也成为大气环境的研究热点之一. $PM_{2.5}$ 指悬浮在空气中, 动力学当量直径不大于2.5 μm 的颗粒物, 由于其可直接通过呼吸道进入肺部, 故也称为可吸入颗粒物. 有研究表明颗粒物的粒径越小其重金属元素的含量越高[1], $PM_{2.5}$ 吸附的有毒重金属(Cd、Cr、Cu、Ni、Pb和Zn)很可能对人体健康造成潜在危害[2, 3], 如Cu会引起记忆力减退,

收稿日期: 2018-11-15; **修订日期**: 2019-03-08
基金项目: 江西省交通厅科技项目(2017R0025)
作者简介: 李晓宝(1983~), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为交通环境监测与污染治理, E-mail: 24367210@qq.com
* 通信作者, E-mail: zhaohuahua1985@126.com

可能导致肝功能异常；Zn 浓度过高引发动脉硬化；Cd 可引起肾损伤；Cr 和 Ni 易诱发人体细胞组织的癌变；Pb 能够伤害人体，严重影响儿童的智力发育[4].

近几年国内对于 $PM_{2.5}$ 重金属污染的研究多集中在城市或者郊区等大区域范围[3,5~12]，主要的研究方向包括健康风险评价[5,9~11]，污染特征研究[7,8]及源解析方面[6,12]，城市 $PM_{2.5}$ 中重金属主要污染源包括燃煤、工业、交通等. 而以交通为主要来源 $PM_{2.5}$ 研究报道较少，其中 Hou 等[13]和王成辉等[14]对高速公路隧道的大气颗粒物进行研究，分析了隧道内大气颗粒物的污染特征，近期 Li 等[15]探讨了高速公路收费站工作人员的重金属健康风险评价，赵兴敏等[16]分析了长春市高架桥公路的 $PM_{2.5}$ 重金属元素污染特征，但其包括了除交通源外其他人为源的干扰. 截止 2017 年 4 月，江西省机动车保有量已达 651 万辆，其中汽车保有量突破 425 万辆，以 615.3% 的增长速度成为全国私家车数量增长最快的省份. 近年来江西省高速公路建设迅猛发展，2016 年底高速通车里程数已达到6 000 km. 随着江西省及周边省份城市的快速发展，以及高速公路客运量和货运量的攀升，诸多人群长期往返于高速公路，而目前国内对高速公路收费站、服务区 $PM_{2.5}$ 及其重金属相关研究鲜见报道. 因此，基于前人的研究，本文通过监测昌樟、昌铜和温厚这 3 条高速不同沿线的 $PM_{2.5}$ 及其中重金属(Cu、Zn、Pb、Cd、Cr 和 Ni)浓度，分析高速公路沿线 $PM_{2.5}$ 中重金属的污染水平及污染特征，以期为防治高速公路及大气 $PM_{2.5}$ 中重金属污染提供科学依据.

1　材料与方法

1.1　采样地点

本研究选择南北走向的昌樟高速，以及东西走向的昌铜和温厚高速，这 3 条高速公路在建设时期、车流量和地形地势等方面均有较大差异，可代表目前江西省高速公路的整体情况，有利于展开高速公路 $PM_{2.5}$ 中重金属污染特征的研究.

3 条高速公路中服务区、收费站和隧道作为主要采样点，昌樟高速选择胡家坊收费站和樟树服务区，温厚高速选择丰厚收费站和南昌南服务区，昌铜高速选择奉新收费站和奉新服务区，昌铜高速昌奉段中拥有梅岭和萧峰两条隧道，其中梅岭隧道长 3 430 m(属于特长隧道)，萧峰隧道长1 197 m(属于长隧道)，因此本研究在两条隧道中心处采集 $PM_{2.5}$ 样品，同时在两条隧道的公路沿线亦设置了采样点，保证了 3 个采样点不受车流量的影响. 另外，选择距昌铜高速 1 km 以外的无工厂的张坊村竹林作为 $PM_{2.5}$ 的背景值. 具体的采样点如图 1 所示.

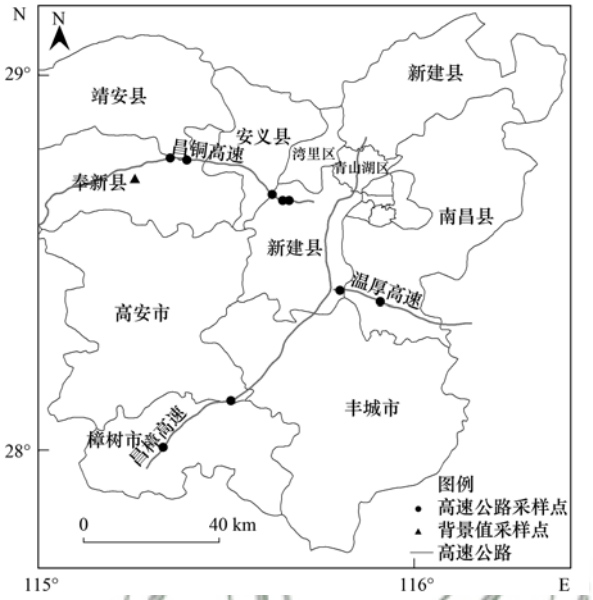


图 1　高速公路 $PM_{2.5}$ 采样点

Fig. 1　$PM_{2.5}$ sampling sites on highway

1.2　采样方法

采用智能中流量空气总悬浮微粒采样器(青岛崂山，TH-150C)对高速公路沿线 $PM_{2.5}$ 样品进行采集，使用的滤膜为聚丙烯滤膜，采样高度距地面 1.5 m. 采样前后将聚丙烯膜放置恒温恒湿箱中恒重，用精度为 0.01 mg 的天平称重，并用铝箔纸封装保存于 −20℃ 冰箱待分析. 采样时间从 2018 年 3 ~8 月，每 2 个月集中采样 1 次，服务区、收费站(有电源)连续 24 h 采样，公路沿线、隧道内(无电源)连续 6h 采样，梅岭隧道、萧峰隧道及 2 条隧道公路沿线中 $PM_{2.5}$ 样品的采集保证同时进行. 采样期间，用自动气象监测仪(QT1010，美国)测定气温、湿度、风向、风速等气象参数. 采样期间的气象参数如表 1 所示.

1.3　样品的分析测定

$PM_{2.5}$ 质量浓度测定按《环境空气 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 的测定 重量法》(HJ 618-2011)进行. $PM_{2.5}$ 中重金属浓度的样品处理按照《空气和废气 颗粒物中铅等金属元素的测定 电感耦合等离子体质谱法(ICP-MS)》(HJ 657-2013)中的方法，采用 ICP-MS (NexIon-350x，美国)分析 $PM_{2.5}$ 中的 Cu、Zn、Pb、Cd、Cr 和 Ni 的质量浓度，相应金属元素检出限分别为：0.000 7、0.003、0.000 6、0.000 03、0.001 和 0.000 5 $\mu g \cdot m^{-3}$.

1.4　数据分析

本研究主要采用地累积指数法、富集因子法及

表 1 采样期间的气象参数

Table 1 Partial metrological parameters during the sampling periods

采样地点	采样日期(月-日)	温度/℃	气压/kPa	相对湿度/%	风向	风速/m·s^{-1}
昌铜	04-08 ~ 04-26	27.4 ~ 31.5	100.6	33.2 ~ 37.7	东南	0.7 ~ 1.0
	06-24 ~ 06-29	33.4 ~ 35.0	99.8	62.4 ~ 67.2	东北	1.2 ~ 2.0
	07-26 ~ 08-10	38.1 ~ 42.9	99.8	49.0 ~ 57.0	南	0.3 ~ 0.5
昌樟	03-26 ~ 03-28	21.6 ~ 30.0	101.5	63.4 ~ 70.6	西南	0.8 ~ 1.3
	06-26 ~ 06-28	35.4 ~ 36.7	100.1	54.1 ~ 55.9	西南	1.5 ~ 2.0
	08-26 ~ 08-28	34.0 ~ 34.0	100.1	40.0	南	0.5
温厚	03-22 ~ 03-24	24.3 ~ 28.8	101.5	41.0 ~ 46.2	东南	0.3 ~ 0.5
	06-24 ~ 06-26	34.5 ~ 36.1	100.4	51.8 ~ 63.2	东南	0.8 ~ 1.2
	08-22 ~ 08-24	32.0 ~ 32.0	100.3	5.01 ~ 54.0	东南	1.2 ~ 1.3

统计分析法分析高速公路沿线 $PM_{2.5}$ 中重金属污染特征.

1.4.1 地累积指数法

地累积指数(geo-accumulation index, I_{geo})是1969年由德国海德堡大学沉积物研究所的科学家Muller提出的广泛用于研究沉积物中重金属污染程度的定量指标,目前地累积指数法常用于表征大气颗粒物中重金属的污染程度[8,9,12],计算公式如下:

$$I_{geo} = \log_2 \frac{c_i}{k \times B_i}$$

式中,I_{geo}为地积累指数,c_i 为 $PM_{2.5}$ 中元素 i 的含量(mg·kg^{-1}),B_i 是元素 i 的土壤背景值,本研究采用的土壤背景值如表2[17],k 为考虑造岩运动可能引起背景值变动而加入的常数,一般取值为1.5.

$PM_{2.5}$ 中元素的 I_{geo} 与污染程度的关系分级见表3.

表 2 江西省重金属元素背景值/mg·kg^{-1}

Table 2 Background value of heavy metal elements/mg·kg^{-1}

项目	Cu	Zn	Pb	Cd	Cr	Ni
参数值	20.8	69.0	32.1	0.1	48.0	19.0

表 3 地累积指数 I_{geo} 与污染程度分级

Table 3 Contamination degree corresponding to geoaccumulation index

等级	I_{geo}	污染程度
1	$I_{geo} \leqslant 0$	无污染
2	$0 < I_{geo} \leqslant 1$	轻微污染
3	$1 < I_{geo} \leqslant 2$	轻度污染
4	$2 < I_{geo} \leqslant 3$	中度污染
5	$3 < I_{geo} \leqslant 4$	偏重污染
6	$4 < I_{geo} \leqslant 5$	重度污染
7	$I_{geo} > 5$	严重污染

1.4.2 潜在生态风险指数法

目前该方法是大气颗粒物中重金属潜在生态风险评价最为常用方法之一,该方法定量划分出重金属的潜在生态风险等级,是表征重金属对生态环境影响程度的综合指标. 计算公式如下:

$$C_f^i = \frac{C^i}{C_n^i}$$

$$E_r^i = T_r^i \times C_f^i$$

$$RI = \sum_i^m E_r^i$$

式中,C^i 为重金属 i 的实测浓度;C_n^i 为重金属 i 的土壤背景值;T_r^i 为重金属 i 的毒性响应系数,被用来反映重金属的毒性水平以及生物对重金属敏感程度,Cu、Zn、Pb、Cd、Cr 和 Ni 的毒性响应系数分别为5、1、5、30、2 和5[18],E_r^i 为潜在生态危害指数,RI 为多种重金属元素的潜在生态风险指数. 重金属污染潜在生态危害指数及风险指数分级标准列于表4.

表 4 潜在生态危害的分级评价标准

Table 4 Classification criteria of the potential ecological jeopardy assessment

E_r^i	RI	生态危害程度
$E_r^i < 40$	RI < 150	轻微生态危害
$40 \leqslant E_r^i < 80$	$150 \leqslant RI < 300$	中等生态危害
$80 \leqslant E_r^i < 160$	$300 \leqslant RI < 600$	较高生态危害
$160 \leqslant E_r^i < 320$	$600 \leqslant RI < 1200$	高生态危害
$E_r^i \geqslant 320$	$RI \geqslant 1200$	极高生态危害

1.4.3 统计分析

不同采集时间不同采集地点 $PM_{2.5}$ 中重金属浓度的方差分析采用 Ducan 法,$PM_{2.5}$ 中重金属浓度与温度、湿度等相关分析采用 Pearson 相关分析法,应用的软件为 SPSS 16.0,采用 SigmaPlot 10.0 软件制作相关图表.

2 结果与讨论

2.1 高速公路沿线 $PM_{2.5}$ 中重金属浓度变化

本研究监测了不同高速公路中 $PM_{2.5}$ 浓度及其重金属浓度(表5),结果表明昌樟、昌铜和温厚这3条高速公路沿线的 $PM_{2.5}$ 浓度及其重金属浓度均高于乡村背景. 尽管3条高速公路的收费站和服务

区有较大的车流量差异(昌樟、昌铜和温厚日车流量均值分别为15 000、13 000和4 700辆)，但 3 条高速中收费站和服务区的 $PM_{2.5}$ 浓度及其重金属浓度均未呈现显著差异，主要由于收费站和服务区大气流通良好，大气 $PM_{2.5}$ 未受车流量影响. 而通过监测昌铜高速沿线不同设施中 $PM_{2.5}$ 及其重金属浓度，发现监测结果显示出显著性差异，其中 $PM_{2.5}$ 浓度梯度分别为特长隧道(100 $\mu g \cdot m^{-3}$) > 长隧道(74 $\mu g \cdot m^{-3}$) > 公路沿线、服务区和收费站(45 ~ 53 $\mu g \cdot m^{-3}$). 重金属的浓度梯度显示为特长隧道 > 长隧道和公路沿线 > 服务区和收费站. 隧道是一个半封闭且大气污染物不易扩散的微环境，并且隧道长度越长，大气污染物扩散越困难，因此特长隧道的大气污染物浓度高于短隧道. 本文公路沿线 $PM_{2.5}$ 中重金属浓度高于服务区和收费站，这可能与采样地点处于两个隧道之间，通风条件较差有关.

高速公路沿线的大气 $PM_{2.5}$ 中重金属浓度从高到低依次为 Zn(3.8 $\mu g \cdot m^{-3}$)、Pb(10.2×10^{-2} $\mu g \cdot m^{-3}$)、Cr($6.8 \times 10^{-2} \mu g \cdot m^{-3}$)、Cu($3.5 \times 10^{-2}$ $\mu g \cdot m^{-3}$)、Ni($1.5 \times 10^{-2} \mu g \cdot m^{-3}$)和 Cd($0.1 \times 10^{-2}$ $\mu g \cdot m^{-3}$)，见表 5. 邵莉等[19]测得南昌公路沿线大气 PM_{10} 中重金属浓度从高到低依次是 Zn、Pb、Cu 和 Cd；Li 等[20]测得香港街道灰尘中重金属浓度从高到低依次为 Zn、Pb、Cu 和 Cd；Adamiec 等[21]和 Lanzerstorfer[22]分别对波兰和奥地利街道灰尘进行粒径分级，测得最小粒径(<20 μm)灰尘中的重金属浓度从高到低均为 Zn、Pb、Cu 和 Cd. 另外，以本文的研究结果与南方周边城市重庆[7]、成都[8,9]、南昌[10]、上海、南京、杭州和广州[11,12]等地区相比，高速公路沿线 $PM_{2.5}$ 中 Zn 的平均浓度较城市大气的平均浓度高 3 倍以上. 研究结果说明含 Pb 汽油停止使用之后，Zn 已成为高速公路大气 $PM_{2.5}$ 中重金属的首要污染物.

表 5　高速公路沿线 $PM_{2.5}$ 中重金属浓度[1)]/$\mu g \cdot m^{-3}$

Table 5　Heavy metal concentrations of $PM_{2.5}$ near highway/$\mu g \cdot m^{-3}$

项目	$PM_{2.5}$	Cu	Zn	Pb	Cd	Cr	Ni
昌铜(奉新收费站)	47 ± 10	$1.8 \times 10^{-2} \pm 0.4 \times 10^{-2}$	3.0 ± 1.6	$6.1 \times 10^{-2} \pm 3.1 \times 10^{-2}$	$0.09 \times 10^{-2} \pm 0.01 \times 10^{-2}$	$3.3 \times 10^{-2} \pm 0.80 \times 10^{-2}$	$0.84 \times 10^{-2} \pm 0.17 \times 10^{-2}$
昌铜(奉新服务区)	45 ± 40	$1.5 \times 10^{-2} \pm 0.4 \times 10^{-2}$	2.6 ± 1.5	$4.8 \times 10^{-2} \pm 2.8 \times 10^{-2}$	$0.07 \times 10^{-2} \pm 0.01 \times 10^{-2}$	$2.9 \times 10^{-2} \pm 0.32 \times 10^{-2}$	$0.74 \times 10^{-2} \pm 0.01 \times 10^{-2}$
昌铜(特长隧道)	100 ± 53	$7.4 \times 10^{-2} \pm 1.4 \times 10^{-2}$	6.8 ± 2.7	$19 \times 10^{-2} \pm 12 \times 10^{-2}$	$0.16 \times 10^{-2} \pm 0.05 \times 10^{-2}$	$15 \times 10^{-2} \pm 2.9 \times 10^{-2}$	$3.2 \times 10^{-2} \pm 0.72 \times 10^{-2}$
昌铜(公路沿线)	53 ± 17	$6.0 \times 10^{-2} \pm 1.6 \times 10^{-2}$	4.0 ± 2.7	$18 \times 10^{-2} \pm 12 \times 10^{-2}$	$0.10 \times 10^{-2} \pm 0.06 \times 10^{-2}$	$15 \times 10^{-2} \pm 4.4 \times 10^{-2}$	$2.7 \times 10^{-2} \pm 2.3 \times 10^{-2}$
昌铜(长隧道)	74 ± 13	$6.0 \times 10^{-2} \pm 0.5 \times 10^{-2}$	6.3 ± 3.8	$18 \times 10^{-2} \pm 14 \times 10^{-2}$	$0.16 \times 10^{-2} \pm 0.06 \times 10^{-2}$	$12 \times 10^{-2} \pm 2.1 \times 10^{-2}$	$2.9 \times 10^{-2} \pm 0.45 \times 10^{-2}$
昌樟(胡家坊收费站)	59 ± 16	$2.6 \times 10^{-2} \pm 1.3 \times 10^{-2}$	3.2 ± 1.7	$6.6 \times 10^{-2} \pm 3.8 \times 10^{-2}$	$0.09 \times 10^{-2} \pm 0.06 \times 10^{-2}$	$3.9 \times 10^{-2} \pm 1.7 \times 10^{-2}$	$1.0 \times 10^{-2} \pm 0.46 \times 10^{-2}$
昌樟(樟树服务区)	47 ± 24	$2.6 \times 10^{-2} \pm 1.4 \times 10^{-2}$	2.8 ± 1.7	$6.2 \times 10^{-2} \pm 3.4 \times 10^{-2}$	$0.10 \times 10^{-2} \pm 0.6 \times 10^{-3}$	$3.9 \times 10^{-2} \pm 1.8 \times 10^{-2}$	$1.0 \times 10^{-2} \pm 0.50 \times 10^{-2}$
温厚(丰厚收费站)	70 ± 35	$1.9 \times 10^{-2} \pm 0.3 \times 10^{-2}$	3.0 ± 1.2	$2.8 \times 10^{-2} \pm 5.8 \times 10^{-2}$	$0.09 \times 10^{-2} \pm 0.05 \times 10^{-2}$	$2.8 \times 10^{-2} \pm 0.42 \times 10^{-2}$	$0.73 \times 10^{-2} \pm 0.06 \times 10^{-2}$
温厚(南昌南服务区)	50 ± 25	$1.8 \times 10^{-2} \pm 0.3 \times 10^{-2}$	2.5 ± 31	$6.6 \times 10^{-2} \pm 3.5 \times 10^{-2}$	$0.08 \times 10^{-2} \pm 0.04 \times 10^{-2}$	$2.9 \times 10^{-2} \pm 0.55 \times 10^{-2}$	$0.53 \times 10^{-2} \pm 0.04 \times 10^{-2}$
平均值	64 ± 37	$3.5 \times 10^{-2} \pm 2.3 \times 10^{-2}$	3.8 ± 2.2	$10.2 \times 10^{-2} \pm 9.1 \times 10^{-2}$	$0.10 \times 10^{-2} \pm 0.05 \times 10^{-2}$	$6.8 \times 10^{-2} \pm 5.4 \times 10^{-2}$	$1.5 \times 10^{-2} \pm 1.3 \times 10^{-2}$
乡村背景	18	0.9×10^{-2}	0.3	1.3×10^{-2}	1.9×10^{-4}	1.2×10^{-2}	0.3×10^{-2}
南方城市[6~11]	41 ~ 165	$2.0 \times 10^{-2} \sim 34 \times 10^{-2}$	0.2 ~ 2.1	0.1 ~ 0.45	$0.2 \times 10^{-2} \sim 1.3 \times 10^{-2}$	$1.4 \times 10^{-2} \sim 5.4 \times 10^{-2}$	$0.3 \times 10^{-2} \sim 2.3 \times 10^{-2}$

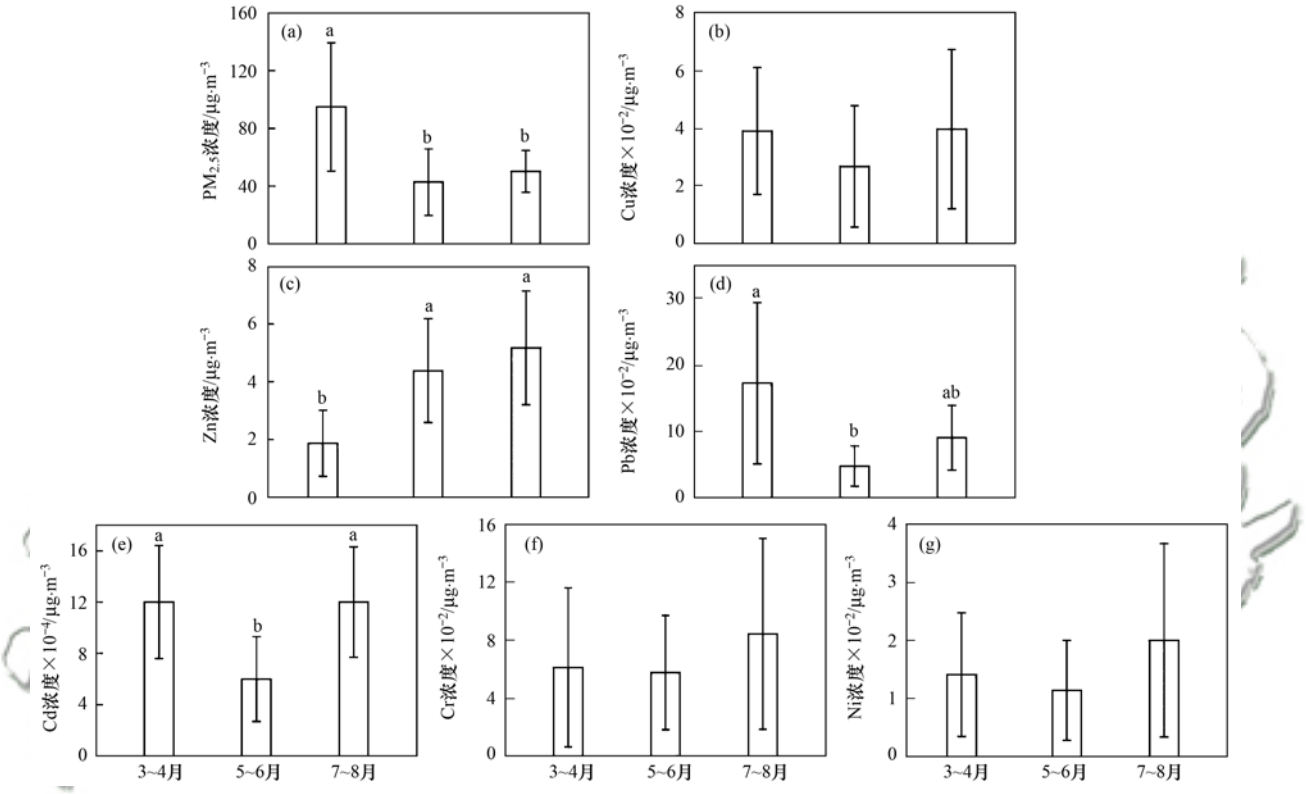
1)表内数值为平均值 ± 标准差

本文研究结果表明，不同月份的 $PM_{2.5}$ 浓度及其重金属浓度呈现显著差异(图 2)，而不同月份的监测结果可用气象因子与 $PM_{2.5}$ 浓度及其重金属浓度的相关性来解释. 如3 ~ 4 月气温偏低时，虽然其车流量较 5 ~ 8 月低 7% ~ 25%，但公路沿线的 $PM_{2.5}$ 浓度仍较 5 ~ 8 月高 1 倍左右(图 2). 这是由于气温升高带来的气象变化及高植被丰富度有利于 $PM_{2.5}$ 及部分 $PM_{2.5}$ 中重金属浓度的吸收扩散. 诸多研究证实 $PM_{2.5}$ 呈现“冬高夏低，春秋居中”的态势[23,24]，这与气温对 $PM_{2.5}$ 的影响趋势一致. 另外江西省 5 ~ 6 月降水丰富，雨水的冲刷致使 $PM_{2.5}$ 中重金属浓度降低[19].

交通源 $PM_{2.5}$ 有 3 个主要来源：①燃油燃烧所释放的尾气；②交通扬尘(包括轮胎磨损、汽车零件

摩擦、道路尘土沉降)；③道路施工建设形成的扬尘源，而交通扬尘对 $PM_{2.5}$ 浓度增高的贡献比尾气排放更大[25]. 交通扬尘如轮胎磨损、汽车零件摩擦与 Zn、Cd 和 Cu 有关. 防腐镀 Zn 汽车板的广泛使用产生大量含 Zn 粉尘. 机动车尾气排放、燃油燃烧与 Pb、Cr、Ni 和 Cu 有关[20, 26]. 表 6 为 $PM_{2.5}$ 中重金属浓度与气象因子的相关性分析结果，其中 Zn、Pb、Cr、Cu、Ni 和 Cd 之间均有显著的相关性，说明本研究监测的重金属均与交通扬尘关系密切.

由表 6 可知，$PM_{2.5}$ 中 Zn 浓度与温度呈极显著正相关，这是由于轮胎添加剂、润滑油添加剂均有大量的含 Zn 化合物. 据 Li 等[20]的报道，气温较高时，轮胎磨损加重，释放更多的 Zn 粉进入大气，同时润滑油在高温下与空气氧化产生的酸腐蚀金属也会产生大量的 Zn 粉[26]，所以公路沿线 $PM_{2.5}$ 中的 Zn 浓度在 5 ~ 8 月较 3 ~ 4 月高.



不同小写字母表示不同月份 $PM_{2.5}$ 及 $PM_{2.5}$ 中重金属浓度存在显著性差异

图 2 高速公路沿线不同月份 $PM_{2.5}$ 中重金属浓度

Fig. 2 Heavy metal concentrations of $PM_{2.5}$ in different months near highway

表 6 $PM_{2.5}$ 中重金属浓度与气象因子的相关性1)

Table 6 Correlation between the heavy metal concentrations of $PM_{2.5}$ and meteorological parameters

	$PM_{2.5}$	Cu	Zn	Pb	Cd	Cr	Ni	温度	湿度	气压
$PM_{2.5}$	1.00									
Cu	0.31	1.00								
Zn	−0.34	0.61**	1.00							
Pb	0.63**	0.72**	0.14	1.00						
Cd	0.48*	0.82**	0.55**	0.79**	1.00					
Cr	−0.29	0.92**	0.72**	0.66**	0.77**	1.00				
Ni	−0.11	0.89**	0.76**	0.61**	0.76**	0.91**	1.00			
温度	−0.60**	−0.59*	0.54**	−0.80**	−0.48*	0.33	0.19	1.00		
湿度	−0.35	−0.04	−0.07	−0.54**	−0.40	−0.14	−0.22	0.18	1.00	
气压	0.64**	0.62**	−0.53*	0.70**	0.41	−0.42	−0.24	−0.86**	−0.04	1.00

1) * 表示 $P<0.05$，** 表示 $P<0.01$

2.2 公路沿线 $PM_{2.5}$ 中重金属污染特征评估

高速公路沿线 $PM_{2.5}$ 中重金属元素的 I_{geo} 结果见表 7，从 I_{geo} 的结果来看，$PM_{2.5}$ 中重金属污染程度为 Zn、Cd > Pb > Cu > Cr > Ni. Zn 和 Cd 在高速公路沿线的 I_{geo} 处于 6.39 ~ 9.63 之间，全部表现为严重污染，可见 Zn 和 Cd 是高速公路中污染程度最高的重

金属，这与赵兴敏等[16]在长春典型高架公路 $PM_{2.5}$ 中重金属污染特征的研究结果基本一致. Pb、Cu、Cr 和 Ni 的 I_{geo} 分别处于 4.16 ~ 6.08、3.33 ~ 4.98、2.83 ~ 4.46 和 2.24 ~ 3.77，Ni 在 6 种重金属中的 I_{geo} 污染程度最低，表现为中度至偏重污染. 从高速公路沿线来看，$PM_{2.5}$ 中重金属污染程度表现为超长隧道、公路沿线、长隧道 > 收费站、服务区，可能由于收费站和服务区空间相对大，大气流通良好. 另外，收费站和服务区乔、灌木的绿化植被配置更为丰富，对 $PM_{2.5}$ 也有一定的滞尘作用.

表 7　高速公路沿线 $PM_{2.5}$ 中各重金属元素的地累积指数(I_{geo})

Table 7　Geoaccumulation index of heavy metal elements in $PM_{2.5}$ near highway

重金属	收费站		服务区		超长隧道		公路沿线		长隧道	
	I_{geo}	污染程度	I_{geo}	污染程度	I_{geo}	污染程度	I_{geo}	污染程度	I_{geo}	污染程度
Cu	3.33	偏重污染	3.76	偏重污染	4.62	重度污染	4.98	重度污染	4.73	重度污染
Zn	8.74	严重污染	9.12	严重污染	9.46	严重污染	9.37	严重污染	9.63	严重污染
Pb	4.16	重度污染	4.66	重度污染	5.16	严重污染	6.08	严重污染	5.39	严重污染
Cd	6.39	严重污染	6.86	严重污染	6.75	严重污染	6.91	严重污染	7.13	严重污染
Cr	2.83	中度污染	3.38	偏重污染	4.40	重度污染	4.42	重度污染	4.46	重度污染
Ni	2.24	中度污染	2.41	中度污染	3.55	偏重污染	3.77	偏重污染	2.77	中度污染

高速公路沿线 $PM_{2.5}$ 中重金属元素含量潜在生态危害评价结果如表 8 所示，从重金属元素的污染程度来看，$PM_{2.5}$ 中重金属元素的潜在生态危害评价程度依次为 Cd、Zn、Pb、Cu、Ni 和 Cr. 潜在生态危害程度最高的是 Cd 和 Zn，其次为 Pb、Cu、Cr 和 Ni. 不同高速公路沿线 6 种重金属综合的潜在生态风险指数值(RI)均超过1 200，说明交通源 $PM_{2.5}$ 对高速公路沿线存在极强的潜在生态危害，其中重金属 Cd 的毒性水平最高[18]，并且 Cd 对 RI 的贡献值最大. 现有报道指出城市 $PM_{2.5}$ 中重金属 Cd 的潜在生态危害指数也远超过其他元素[8]. 未来在治理大气环境过程中，要注意加强对交通源污染物 Cd 和 Zn 的治理，以减少对生态环境和人体的损害.

从高速公路沿线来看，$PM_{2.5}$ 中重金属潜在生态危害评价依次为超长隧道、公路沿线、长隧道 > 收费站、服务区，潜在生态危害评价的结果趋势与 I_{geo} 一致. 本研究中收费站和服务区与成都[8]、太原[27]和兰州[28]等城市 $PM_{2.5}$ 中的 Pb、Cu、Ni 和 Cr 元素的危害程度较为一致，证明高速公路收费站和服务区中大气重金属污染与城市较为接近.

表 8　高速公路沿线 $PM_{2.5}$ 中各重金属元素的潜在生态危害指数(E_n^i)

Table 8　Potential ecological jeopardy index (E_n^i) of heavy metal in $PM_{2.5}$ near highway

重金属	收费站		服务区		超长隧道		公路沿线		长隧道	
	E_n^i	危害程度	E_n^i	危害程度	E_n^i	危害程度	E_n^i	危害程度	E_n^i	危害程度
Cu	82	较高	112	高	199	高	268	高	200	高
Zn	834	极高	1 289	极高	1 229	极高	1 104	极高	1 319	极高
Pb	150	较高	198	高	274	高	389	极高	357	极高
Cd	4 391	极高	6 031	极高	5249	极高	5 551	极高	6 564	极高
Cr	25	轻微	37	轻微	67	中等	86	较高	68	中等
Ni	41	中等	54	中等	96	较高	119	较高	105	较高

3　结论

(1)不同高速公路沿线的 $PM_{2.5}$ 及其重金属浓度梯度为特长隧道 > 长隧道 > 公路沿线 > 服务区和收费站，而车流量差异较大的 3 条高速公路中服务区和收费站的 $PM_{2.5}$ 及其重金属浓度未发现显著性差异.

(2)由于温度和降水的双重影响，不同月 $PM_{2.5}$ 及 $PM_{2.5}$ 中重金属浓度表现出显著差异，其中 $PM_{2.5}$ 的浓度与温度呈反相关，而 $PM_{2.5}$ 中 Zn 浓度与温度呈极显著正相关，主要是由于温度升高加重轮胎磨损和金属腐蚀.

(3)高速公路 $PM_{2.5}$ 中重金属污染程度和潜在生态危害均表现为 Zn、Cd > Pb > Cu > Ni > Cr. 重金属 Cd 的潜在生态危害指数远超过其他元素，其次为 Zn. 未来在治理大气环境过程中，应注意加强对交通源污染物 Cd 和 Zn 的治理.

(4)高速公路沿线的重金属污染及危害程度依次为超长隧道、公路沿线、长隧道 > 收费站、服务区，收费站与服务区 $PM_{2.5}$ 的重金属污染程度与城市较为接近，而隧道和公路沿线的潜在生态危害程度较高.

参考文献：

[1] Talbi A, Kerchich Y, Kerbachi R, *et al*. Assessment of annual air pollution levels with PM_1, $PM_{2.5}$, PM_{10} and associated heavy metals in Algiers, Algeria[J]. Environmental Pollution, 2018, **232**: 252-263.

[2] Zhang J, Wu L, Fang X Z, *et al*. Elemental composition and health risk assessment of PM_{10} and $PM_{2.5}$ in the roadside microenvironment in Tianjin, China[J]. Aerosol and Air Quality Research, 2018, **18**(7): 1817-1827.

[3] Zeng X, Xu X J, Zheng X B, *et al*. Heavy metals in $PM_{2.5}$ and in blood, and children's respiratory symptoms and asthma from an e-waste recycling area[J]. Environmental Pollution, 2016, **210**: 346-353.

[4] Bekteshi L, Lazo P, Qarri F, *et al*. Application of the normalization process in the survey of atmospheric deposition of heavy metals in Albania through moss biomonitoring [J]. Ecological Indicators, 2015, **56**: 50-59.

[5] Zhang Y Y, Ji X T, Ku T T, *et al*. Heavy metals bound to fine particulate matter from northern China induce season-dependent health risks: A study based on myocardial toxicity [J]. Environmental Pollution, 2016, **216**: 380-390.

[6] Yang J, Song D, Fang D L, *et al*. Drivers of consumption-based $PM_{2.5}$ emission of Beijing: a structural decomposition analysis [J]. Journal of Cleaner Production, 2019, **219**: 734-742.

[7] 焦姣, 姬亚芹, 白志鹏, 等. 重庆市颗粒物 PM_{10}/$PM_{2.5}$ 中元素污染特征和来源[J]. 南开大学学报(自然科学版), 2013, **46**(6): 8-13, 19.
Jiao J, Ji Y Q, Bai Z P, *et al*. Element distribution characteristics and source apportionment in PM_{10}, $PM_{2.5}$ in Chongqing [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Nankaiensis, 2013, **46**(6): 8-13, 19.

[8] 杨怀金, 杨德容, 叶芝祥, 等. 成都西南郊区春季 $PM_{2.5}$ 中元素特征及重金属潜在生态风险评价[J]. 环境科学, 2016, **37**(12): 4490-4503.
Yang H J, Yang D R, Ye Z X, *et al*. Characteristics of elements and potential ecological risk assessment of heavy metals in $PM_{2.5}$ at the southwest suburb of Chengdu in spring[J]. Environmental Science, 2016, **37**(12): 4490-4503.

[9] 李友平, 刘慧芳, 周洪, 等. 成都市 $PM_{2.5}$ 中有毒重金属污染特征及健康风险评价[J]. 中国环境科学, 2015, **35**(7): 2225-2232.
Li Y P, Liu H F, Zhou H, *et al*. Contamination characteristics and health risk assessment of toxic heavy metals in $PM_{2.5}$ in Chengdu[J]. China Environmental Science, 2015, **35**(7): 2225-2232.

[10] 郑权, 胡恭任, 于瑞莲, 等. 南昌市冬季大气 $PM_{2.5}$ 中重金属元素来源分析及健康风险评价[J]. 地球与环境, 2018, **46**(3): 306-312.
Zheng Q, Hu G R, Yu R L, *et al*. Source analysis and health risk assessment of heavy metals in $PM_{2.5}$ in winter in Nanchang city[J]. Earth and Environment, 2018, **46**(3): 306-312.

[11] Luo X S, Zhao Z, Xie J W, *et al*. Pulmonary bioaccessibility of trace metals in $PM_{2.5}$ from different megacities simulated by lung fluid extraction and DGT method[J]. Chemosphere, 2019, **218**: 915-921.

[12] Ming L L, Jin L, Li J, *et al*. $PM_{2.5}$ in the Yangtze River Delta, China: chemical compositions, seasonal variations, and regional pollution events[J]. Environmental Pollution, 2017, **223**: 200-212.

[13] Hou C, Shao L Y, Hu W, *et al*. Characteristics and aging of traffic-derived particles in a highway tunnel at a coastal city in southern China[J]. Science of the Total Environment, 2018, **619-620**: 1385-1393.

[14] 王成辉, 闫琨, 韩新宇, 等. 高原城市昆明公路隧道大气中 $PM_{2.5}$ 理化特征分析[J]. 环境科学, 2017, **38**(12): 4968-4975.
Wang C H, Yan K, Han X Y, *et al*. Physico-chemical characteristic analysis of $PM_{2.5}$ in the highway tunnel in the plateau city of Kunming[J]. Environmental Science, 2017, **38**(12): 4968-4975.

[15] Li P H, Yu J, Bi C L, *et al*. Health risk assessment for highway toll station workers exposed to $PM_{2.5}$-bound heavy metals[J]. Atmospheric Pollution Research, 2019, **10**(4): 1024-1030.

[16] 赵兴敏, 杨扬, 郭欣欣, 等. 长春市典型高架公路大气环境颗粒物中重金属污染特征[J]. 环境科学学报, 2017, **37**(9): 3280-3288.
Zhao X M, Yang Y, Guo X X, *et al*. Pollution characteristics of heavy metals in atmospheric particulates from typical elevated highway in Changchun City[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2017, **37**(9): 3280-3288.

[17] 何纪力, 徐光炎, 朱惠民, 等. 江西省土壤环境背景值研究[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2006.

[18] 徐争启, 倪师军, 庹先国, 等. 潜在生态危害指数法评价中重金属毒性系数计算[J]. 环境科学与技术, 2008, **31**(2): 112-115.
Xu Z Q, Ni S J, Tuo X G, *et al*. Calculation of heavy metals' toxicity coefficient in the evaluation of potential ecological risk index[J]. Environmental Science & Technology, 2008, **31**(2): 112-115.

[19] 邵莉, 肖化云. 公路两侧大气颗粒物中的重金属污染特征及其影响因素[J]. 环境化学, 2012, **31**(3): 315-323.
Shao L, Xiao H Y. Pollution characterization and controlling factors of heavy metals in airborne particulate matter near expressway[J]. Environmental Chemistry, 2012, **31**(3): 315-323.

[20] Li X D, Poon C S, Liu P S. Heavy metal contamination of urban soils and street dusts in Hong Kong[J]. Applied Geochemistry, 2001, **16**(11-12): 1361-1368.

[21] Adamiec E, Jarosz-Krzemińska E, Wieszala R. Heavy metals from non-exhaust vehicle emissions in urban and motorway road dusts[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2016, **188**(6): 369.

[22] Lanzerstorfer C. Heavy metals in the finest size fractions of road-deposited sediments[J]. Environmental Pollution, 2018, **239**: 522-531.

[23] 姜磊, 周海峰, 赖志柱, 等. 中国城市 $PM_{2.5}$ 时空动态变化特征分析: 2015—2017 年[J]. 环境科学学报, 2018, **38**(10): 3816-3825.
Jiang L, Zhou H F, Lai Z Z, *et al*. Analysis of spatio-temporal characteristic of $PM_{2.5}$ concentrations of Chinese cities: 2015—2017[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, **38**(10): 3816-3825.

[24] Liu Y K, Yu Y P, Liu M, *et al*. Characterization and source identification of $PM_{2.5}$-bound polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in different seasons from Shanghai, China[J]. Science of the Total Environment, 2018, **644**: 725-735.

[25] 张玉梅, 张卫东, 王军玲. 大气 $PM_{2.5}$ 源解析"源清单化学质量平衡法(I-CMB)"模型的建立与应用[J]. 大气科学学报, 2015, **38**(2): 279-284.
Zhang Y M, Zhang W D, Wang J L. Establishment and application of pollutant Inventory-Chemical Mass Balance (I-CMB) model for source apportionment of $PM_{2.5}$ [J]. Transactions of Atmospheric Sciences, 2015, **38**(2): 279-284.

[26] Men C, Liu R M, Xu F, *et al*. Pollution characteristics, risk assessment, and source apportionment of heavy metals in road dust in Beijing, China[J]. Science of the Total Environment, 2018, **612**: 138-147.

[27] 李丽娟，温彦平，彭林，等. 太原市采暖季 $PM_{2.5}$ 中元素特征及重金属健康风险评价[J]. 环境科学，2014，**35**(12)：4431-4438.
Li L J, Wen Y P, Peng L, *et al*. Characteristic of elements in $PM_{2.5}$ and health risk assessment of heavy metals during heating season in Taiyuan[J]. Environmental Science, 2014, **35**(12): 4431-4438.

[28] 林海鹏，武晓燕，战景明，等. 兰州市某城区冬夏季大气颗粒物及重金属的污染特征[J]. 中国环境科学，2012，**32**(5)：810-815.
Lin H P, Wu X Y, Zhan J M, *et al*. Analysis of atmospheric particles and heavy metals character at the area of Lanzhou City in summer and winter[J]. China Environmental Science, 2012, **32**(5): 810-815.

HUANJING KEXUE Vol. 40 No. 9
Environmental Science (monthly) Sep. 15, 2019

CONTENTS