

# 交通相关空气污染暴露评估方法研究进展

王丽君<sup>1,2</sup>, 曹蕾<sup>1,2</sup>, 王志伟<sup>3</sup>, 王婷<sup>1,2</sup>, 毛洪钧<sup>1,2</sup>

1. 天津市城市交通污染防治研究重点实验室, 国家环境保护城市颗粒物污染防治重点实验室, 天津 300071

2. 南开大学环境科学与工程学院, 天津 300071

3. 唐山市环境监控中心, 河北 唐山 063000

## 摘要:

本文总结了在评估交通相关空气污染 (traffic-related air pollution, TRAP) 健康效应研究中定量 TRAP 的主要方法及其优缺点。TRAP 暴露评估的研究目前主要集中在外暴露和内暴露两种评估手段。交通外暴露的定量工作主要依赖于交通相关指标 (距离道路远近、交通强度等) 或基于模型 (空气质量扩散模型、土地利用模型、混合个体模型等) 对交通相关空气污染物浓度进行预测; 前者作为 TRAP 长期效应的一种可替代指标, 能够在较小的空间尺度范围内捕捉交通排放的长期变化, 且是考虑了除交通相关空气污染物以外其他环境风险的综合性指标, 但往往会忽视受到众多不同交通水平的道路复合影响的住宅及个体, 并且无法考虑气象等条件的影响, 而后者可以在不建立密集监测网络的前提下较好地描述污染物的时空变异性, 但数据质量和精度是限制模型输出精度的主要条件。还有部分研究选取特异性生物标志物作为交通内暴露的替代, 如苯巯基尿酸、反式, 反式-戊酸、1-羟基芘、微核率。本综述旨在为评估 TRAP 和不同疾病之间相关性的流行病学研究提供理论依据, 深入探寻相关机制问题。

**关键词:** 交通相关空气污染; 空气污染; 评估方法; 生物标志物; 外暴露; 内暴露

## Research progress on methods to estimate health effects of traffic-related air pollution exposure

WANG Lijun<sup>1,2</sup>, CAO Lei<sup>1,2</sup>, WANG Zhiwei<sup>3</sup>, WANG Ting<sup>1,2</sup>, MAO Hongjun<sup>1,2</sup> (1.Tianjin Key Laboratory of Urban Transport Emission Research, State Environmental Protection Key Laboratory of Urban Ambient Air Particulate Matter Pollution Prevention and Control, Tianjin 300071, China; 2.College of Environmental Science and Engineering, Nankai University, Tianjin 300071, China; 3.Tangshan Environmental Monitoring Center, Tangshan 063000, China)

## Abstract:

This review summarized the main methods for the quantification of traffic exposure in studies assessing the health impacts of traffic-related air pollution (TRAP). External and internal exposure assessments are two main approaches to estimate TRAP exposure. In most studies, the quantitative estimation of TRAP external exposure mainly depends on traffic-related metrics (e.g. distance to roads, traffic density) and the prediction of TRAP concentrations based on various models (e.g. air dispersion model, land use regression model, hybrid individual-exposure model). The former is considered as a set of alternative indicators for the long-term effect of TRAP, which can capture long-term changes in traffic emissions at a small spatial scale, and focuses on comprehensive indicators of environmental risks other than traffic-related air pollutants. But it always ignores individuals who are affected by the combined effects of many roads with different traffic levels, and fails to take the effects of conditions such as weather into account. While the latter can better describe the spatiotemporal variability of pollutants without the establishment of intensive monitoring network, but the data quality and accuracy are the main constraints to the accuracy of the models. Additionally, researchers have tried to explore some specific biomarkers to be the proxy of TRAP exposure, such as S-phenylmercapturic acid, trans, trans-muconic acid, 1-hydroxypyrene, and micronucleus frequency. The review was expected to provide a theoretical basis for epidemiological studies to evaluate the correlations between TRAP exposure and different diseases in human, and to give a deeper insight into the related mechanisms.

**Keywords:** traffic-related air pollution; air pollution; method of assessment; biomarker; external exposure; internal exposure

DOI 10.13213/j.cnki.jeom.2021.20475

## 基金项目

国家自然科学基金青年项目 (21806082)

## 作者简介

王丽君 (1996—), 女, 硕士生;  
E-mail: 827259452@qq.com

## 通信作者

毛洪钧, E-mail: hongjun\_mao@hotmail.com

伦理审批 不需要

利益冲突 无申报

收稿日期 2020-10-16

录用日期 2021-04-02

文章编号 2095-9982(2021)05-0542-05

中图分类号 R122.2

文献标志码 A

## ►引用

王丽君, 曹蕾, 王志伟, 等. 交通相关空气污染暴露评估方法研究进展 [J]. 环境与职业医学, 2021, 38 (5): 542-546.

## ►本文链接

[www.jeom.org/article/cn/10.13213/j.cnki.jeom.2021.20475](http://www.jeom.org/article/cn/10.13213/j.cnki.jeom.2021.20475)

## Funding

This study was funded.

## Correspondence to

MAO Hongjun, E-mail: hongjun\_mao@hotmail.com

Ethics approval Not required

Competing interests None declared

Received 2020-10-16

Accepted 2021-04-02

## ►To cite

WANG Lijun, CAO Lei, WANG Zhiwei, et al. Research progress on methods to estimate health effects of traffic-related air pollution exposure[J]. Journal of Environmental and Occupational Medicine, 2021, 38(5): 542-546.

## ►Link to this article

[www.jeom.org/article/en/10.13213/j.cnki.jeom.2021.20475](http://www.jeom.org/article/en/10.13213/j.cnki.jeom.2021.20475)

交通相关空气污染 (traffic-related air pollution, TRAP) 主要指机动车通过燃烧和非燃烧的方式产生的尾气和非尾气所造成的空气污染<sup>[1]</sup>。尾气排放主要包括燃烧产生的一氧化碳、细颗粒物、碳氢化合物、炭黑、氮氧化物、挥发性有机物等；非尾气排放主要包括轮胎、刹车、离合器、路面磨损等产生的粗颗粒物、有机污染物 (多环芳烃、苯并噻唑及衍生物)、无机污染物 (铜、锌、钡、镉和锰等元素)，以及由氮氧化物和挥发性有机物参与化学反应产生的臭氧等二次污染物<sup>[2]</sup>。车辆排放污染物的类型和浓度与车辆类型 (轻型车、重型车)、行驶里程、行驶工况、维护条件、尾气后处理技术等有关；其在环境中的浓度也受到气象条件、交通特征、道路粉尘、地形等多种因素的影响。众所周知，暴露于交通相关空气污染物会导致人类一系列不良健康结局，如不良妊娠结局<sup>[3]</sup>、心脑血管疾病<sup>[4]</sup>、呼吸系统疾病<sup>[5]</sup>等，TRAP 暴露评估的准确性直接影响其健康影响评估的准确性。

## 1 TRAP 的外暴露评估方法

在目前环境流行病学的研究中，对 TRAP 的评估方式存在争议<sup>[1]</sup>。大气污染源可以分为点源、线源、面源、体源、网格源等。一部分研究者基于模型，把交通源当作线源，输入交通源排放清单、交通特征数据等参数，以此对污染物浓度进行预测，作为 TRAP 的替代<sup>[6-7]</sup>；另一部分研究者直接使用一些暴露个体所对应的交通相关指标 (如交通活动水平、距离道路远近、交通强度等) 对 TRAP 进行量化<sup>[7-8]</sup>。关于 TRAP 的外暴露估计方法主要有以下四种。

### 1.1 交通相关指标

交通相关指标可以量化个体暴露强度，如距离道路远近、交通强度、交通负载、交通噪音等。距离道路远近指暴露个体与其最近的主要公路、快速路或高速公路的直线距离，部分研究将该指标当作连续性变量，而部分研究选择 200、500 m 作为临界值，把该指标当作二分类变量<sup>[9]</sup>。交通强度的定义更加多样化，可以是暴露个体最近道路的日均车流量，也可以是暴露个体周围一定半径范围内所有道路的日均车流量之和，既可作为二分类变量，也可作为连续性变量<sup>[7, 10]</sup>。交通负载是指一定半径范围内道路路段的长度和交通强度的乘积<sup>[10]</sup>。一些学者认为这些指标在某种程度上可以作为 TRAP 长期效应的一种可替代指标，能够在较小的空间尺度范围内捕捉交通排放的长期变化，且是考虑了除交通相关空气污染物以外其他环境风

险的综合性指标。但这些方法往往会忽视受到众多不同交通水平的道路复合影响的住宅及个体，并且无法考虑气象等条件的影响<sup>[9]</sup>。

### 1.2 土地利用回归模型

土地利用回归模型基于监测数据，以各观测点为中心，在给定的半径范围内，根据土地利用类型和交通特点等信息来预测区域环境污染物浓度，以此作为研究对象个体暴露浓度的替代<sup>[11]</sup>。计算方法如公式 (1) 所示。

$$\rho_s = \beta_1 W_{1s} + \beta_2 W_{2s} + \dots + \beta_n W_{ns} \quad (1)$$

其中： $\rho_s$  表示在某监测点  $s$  的污染物浓度； $\beta_n$  表示每个自变量的回归系数； $W_{ns}$  分别表示在  $s$  点位一定范围内的土地利用类型 (居民区、政府机构、商业区、公园等)、道路类型 (主干道、次干道、高速公路)、交通特征 (流量)、海拔高度、人口密度、工业用地面积、风向等。

与其他方法相比，该模型的使用成本较低，在估计污染物浓度方面提供了较高的空间和时间分辨率，是评价 TRAP 暴露的有效方法。但该模型对短期暴露的评估效力很低，仅能在拥有相似变量的附近区域进行应用，且无法有效分离出主要污染物的影响，这样有可能错误估计某种污染物对人体的影响<sup>[12-13]</sup>。

### 1.3 大气扩散模型

大气扩散模型是非反应性的稳态高斯线源扩散模型，基于空气质量数据 (监测站数据)、地球物理数据 (地形高度、地表粗糙度)、气象条件数据 (风向、风速、环境温度、太阳辐射、大气稳定性) 和交通排放数据 (交通活动水平、排放因子、速度) 等信息对污染物浓度进行时间和空间的暴露评估<sup>[1, 14]</sup>。该模型可以较好地描述污染物的时空变异性且不需要建立密集的监测网络。同时，高斯扩散模型与地理信息系统能够结合监测系统资料和研究地区人口分布数据进行分析。新型的混合建模框架结合区域模型 (如 Comprehensive Air Quality Model with Extensions, CAMx) 和区域尺度分散模型 (如 Research LINE source model for near-surface releases, R-LINE) 实现同时从区域和局部两个尺度对路域环境下污染物浓度进行有效的估计<sup>[15]</sup>。但该模型也有不足之处：第一，需要相对昂贵的硬件软件设备和专业的操作人员；第二，需要有历史交通和排放数据支撑；第三，需要较多的检测数据进行交叉验证；第四，数据不匹配或误分类可能造成估计结果的偏倚<sup>[16]</sup>。

### 1.4 混合个体模型

混合个体模型是指结合个体采样和区域采样计

算个体暴露浓度的暴露评估方法<sup>[1, 14, 17]</sup>。基于以上三种方法中的一种或多种, 结合活动时间和不同微环境中污染物监测浓度来计算个体时间加权平均暴露程度( $TWE_i$ ), 如公式(2)所示。

$$Y_{TWE_i} = \frac{\rho_i}{T_i} = \frac{\sum \rho_{im} \Delta t_{im}}{\sum \Delta t_{im}} \quad (2)$$

其中: $\rho_i$ 表示个体 $i$ 的暴露浓度, $T_i$ 表示个体 $i$ 暴露时间的总和, $\rho_{im}$ 表示个体 $i$ 在微环境 $m$ 中的暴露浓度, $\Delta t_{im}$ 表示个体 $i$ 在微环境 $m$ 中的活动时间。这种模型量化个体暴露, 而不是环境暴露, 从而有效避免小样本研究的代表性问题。同样, 数据质量和精度是限制模型输出精度的主要条件。

### 1.5 TRAP 外暴露评估方法的验证

相关研究对交通相关指标(如距离道路远近、交通强度等)和实测污染物浓度进行了交叉验证, 结果表明无论是成年人还是儿童, 其暴露特点(是否住在交通繁忙区、距离道路远近)与污染物的暴露浓度之间存在一定的相关性, 而交通密度与其相关性较差<sup>[18]</sup>。但大部分研究的道路指标分类以及计算方法不完全一致, 一部分研究计算暴露个体至高速公路的距离<sup>[19-20]</sup>, 另外一部分研究计算至主干道或次干道等的距离<sup>[8, 21]</sup>, 另外对道路的污染现状、交通流量等指标均没有细致的描述, 这使得各研究间的可比性较差<sup>[22]</sup>。

也有研究对预测交通相关空气污染物浓度的模型结果和空气中的实测值进行了交叉验证, 结果表明对于一般污染物(如一氧化碳、一氧化氮等), 当模型有足够的技术支持时, 模型的结果能较好地预测污染物浓度<sup>[23-24]</sup>。而个体暴露模型, 由于个体活动时间、住宅特点、污染物室内室外渗透率以及交通源对污染物贡献等多种指标的复杂性, 有关其结果和暴露的真实值之间交叉验证的研究较少, 而且模型结果的准确性往往依赖于数据的准确性和可靠性, 模型输入数据受道路网络精准度、土地利用错分和空间边界模糊、监测站位置准确性、本地化排放清单多样化、高时空分辨率的空气质量监测数据难以获得等众多因素的限制<sup>[25]</sup>。

## 2 TRAP 的内暴露评价方法

生物标志物是指在致病因素作用到生物体出现各种效应的过程中, 发生改变的一些特异性分子或生理化学指标。主要分为接触(暴露)生物标志物、效应标志物和敏感性生物标志物3种类型。一些研究者尝试寻找生物标志物作为TRAP的替代指标, 来解释流

行病学研究结果, 深入探寻相关机制问题。但考虑到TRAP人体实验研究涉及的伦理道德问题, 迄今为止有关TRAP的特异性生物标志物研究较少。

有研究者基于小样本数据以苯和多环芳烃的代谢标志物作为TRAP特异性标志物, 如尿液中的苯巯基尿酸<sup>[26]</sup>、反式, 反式-戊酸(trans, trans-muconic acid, t, t-MA)<sup>[27-30]</sup>、1-羟基芘<sup>[31]</sup>等。在20世纪末的一项研究中发现, 与几乎没有交通污染的区域相比, 居住在交通繁忙区域内(高速公路横跨该区域且交通强度 $>80000$ 辆 $\cdot d^{-1}$ )的青少年尿液中t, t-MA含量更高<sup>[27]</sup>。泰国曼谷市中心的两项研究分别揭露了交通警察的苯暴露水平高于内勤民警和道路工作者(布摊贩、烤肉摊贩), 加油站工作者苯暴露水平高于道路附近500m内的寺庙中的和尚和尼姑, 市区主要道路附近500m内的学校学生苯暴露水平高于距离市区110km的省级行政区的学生, 且随着苯暴露水平的增加, 各暴露组尿液中的t, t-MA水平均增加<sup>[28-29]</sup>。2008—2014年在比利时基于895名初中学生的一项研究表明, 暴露组青少年尿液中t, t-MA浓度较非暴露组增加了10倍<sup>[30]</sup>。也有研究以尿液中1-羟基芘水平作为多环芳烃暴露的近似替代指标, 结果表明出租车司机尿中1-羟基芘的水平高于办公室员工, 且抽烟对尿中1-羟基芘的水平也有不良影响<sup>[31]</sup>。

此外, 有研究指出微核率的增加与高水平的TRAP有关, 与癌症的发展也有密切关系<sup>[32-33]</sup>。微核是小的核外体, 可能是由于染色体断裂或整个染色体在后期落后而不能合并到新的细胞核中, 是早期遗传效应的生物标志物<sup>[34]</sup>。丹麦一项研究表明, 生活在繁忙道路50m范围内的儿童单核T淋巴细胞微核率比对照组高2.5倍, 但没有发现TRAP与双核T淋巴细胞的微核水平之间的相关性<sup>[35]</sup>。此外, 中国2017年的一项研究发现, 全年累计路口执勤时间每增加1h, 交通警察的微核率较内勤警察上升0.036%。(95%CI: 0.03%~0.043%)<sup>[36]</sup>, 基于意大利82名交警的病例对照研究没有发现TRAP与外周血白细胞中微核率增加之间的相关性<sup>[37]</sup>。中国2016年一项基于柴油机暴露人群的研究也发现, 柴油机排放提高了细胞坏死率, 而细胞坏死率与微核发生率之间呈现正相关<sup>[38]</sup>。

此外, 还有研究以t, t-MA水平作为TRAP的内暴露替代指标, 发现TRAP对神经行为功能(如持续注意力、短期记忆能力)存在负面影响<sup>[30, 39]</sup>。这些研究为TRAP特异性生物标志物的选择提供了参考依据, 也为未来TRAP的健康风险评估奠定了基础。未来可借

助生物标志物的变化情况揭示 TRAP 对健康影响。

### 3 存在的问题及展望

TRAP 暴露评估的相关研究目前主要集中在外暴露和内暴露两种评估手段。TRAP 外暴露的评估方法(如大气扩散模型和土地回归利用模型等)一直以来受到各种来源数据精度的限制,尤其是个体暴露模型方面的交叉验证研究较少,难以判断该模型对个体暴露强度的评估是否准确。因此,提高污染源排放清单的准确性,提高监测点位、道路位置的精确性,以及避免道路类型错分等是模型准确性提升的关键所在。另外,基于交通数据本身来评估个体暴露程度的研究较多,但不同的研究在道路类型的选择、交通强度的计算方法等方面参差不齐,导致研究之间的可比性较差,未来相关研究在交通相关指标的定义和计算方法的标准化、统一化方面有待进一步加强。

由于 TRAP 复杂的组成和结构特性,其对人体健康影响的潜在分子机制研究也是一大科学研究难题。一些研究者致力于寻找早期诊断的标志物来探索 TRAP 相关疾病的发病机理,但相关研究较少,主要集中在苯和多环芳烃的代谢物等指标的变化。目前与 TRAP 相关的特异性生物标志物的研究尚存在不足,未来如何探索特异、简易、灵敏的内暴露标志物及其精准可靠的评估方法成为亟待解决的课题,且对于这些指标如何引起不良健康结局的机制也存在较大研究空间。

#### 参考文献

- [1] Health Effects Institute. Traffic-related air pollution : a critical review of the literature on emissions, exposure, and health effects [M] . Boston : Health Effects Institute, 2010 : 409-444.
- [2] GRIGORATOS T, MARTINI G. Brake wear particle emissions : a review [J] . Environ Sci Pollut Res Int, 2015, 22 (4) : 2491-2504.
- [3] STIEB DM, CHEN L, HYSTAD P, et al. A national study of the association between traffic-related air pollution and adverse pregnancy outcomes in Canada, 1999-2008 [J] . Environ Res, 2016, 148 : 513-526.
- [4] WARD-CAVINESS CK, KRAUS WE, BLACH C, et al. Associations between residential proximity to traffic and vascular disease in a cardiac catheterization cohort [J] . Arterioscler Thromb Vasc Biol, 2018, 38 (1) : 275-282.
- [5] PENNINGTON AF, STRICKLAND MJ, KLEIN M, et al. Exposure to mobile source air pollution in early-life and childhood asthma incidence : the Kaiser air pollution and pediatric asthma study [J] . Epidemiology, 2018, 29 (1) : 22-30.
- [6] PEDERSEN M, GIORGIS-ALLEMAND L, BERNARD C, et al. Ambient air pollution and low birthweight : a European cohort study (ESCAPE) [J] . Lancet Respir Med, 2013, 1 (9) : 695-704.
- [7] PADULA AM, YANG W, LURMANN FW, et al. Prenatal exposure to air pollution, maternal diabetes and preterm birth [J] . Environ Res, 2019, 170 : 160-167.
- [8] YORIFUJI T, NARUSE H, KASHIMA S, et al. Residential proximity to major roads and obstetrical complications [J] . Sci Total Environ, 2015, 508 : 188-192.
- [9] DADVAND P, OSTRO B, FIGUERAS F, et al. Residential proximity to major roads and term low birth weight : the roles of air pollution, heat, noise, and road-adjacent trees [J] . Epidemiology, 2014, 25 (4) : 518-525.
- [10] BEELEN R, HOEK G, VIENNEAU D, et al. Development of NO<sub>2</sub> and NO<sub>x</sub> land use regression models for estimating air pollution exposure in 36 study areas in Europe—The ESCAPE project [J] . Atmos Environ, 2013, 72 : 10-23.
- [11] BRIGGS DJ, COLLINS S, ELLIOTT P, et al. Mapping urban air pollution using GIS : a regression-based approach [J] . Int J Geogr Inf Sci, 1997, 11 (7) : 699-718.
- [12] GULLIVER J, MORLEY D, DUNSTER C, et al. Land use regression models for the oxidative potential of fine particles (PM<sub>2.5</sub>) in five European areas [J] . Environ Res, 2018, 160 : 247-255.
- [13] HOEK G, BEELEN R, DE HOOGH K, et al. A review of land-use regression models to assess spatial variation of outdoor air pollution [J] . Atmos Environ, 2008, 42 (33) : 7561-7578.
- [14] JERRETT M, ARAIN A, KANAROGLU P, et al. A review and evaluation of intraurban air pollution exposure models [J] . J Expo Sci Environ Epidemiol, 2005, 15 (2) : 185-204.
- [15] PARVEZ F, WAGSTROM K. A hybrid modeling framework to estimate pollutant concentrations and exposures in near road environments [J] . Sci Total Environ, 2019, 663 : 144-153.
- [16] RANZI A, FANO V, ERSPAMER L, et al. Mortality and morbidity among people living close to incinerators : a cohort study based on dispersion modeling for exposure assessment [J] . Environ Health, 2011, 10 (1) : 22.
- [17] WU J, LURMANN F, WINER A, et al. Development of an individual exposure model for application to the Southern California children's health study [J] . Atmos Environ, 2005,

- 39 (2) : 259-273.
- [18] BRIGGS DJ. The use of GIS to evaluate traffic-related pollution [J]. *Occup Environ Med*, 2007, 64 (1) : 1-2.
- [19] LAURENT O, HU J, LI L, et al. Sources and contents of air pollution affecting term low birth weight in Los Angeles County, California, 2001-2008 [J]. *Environ Res*, 2014, 134 : 488-495.
- [20] YANG CY, CHANG CC, CHUANG HY, et al. Evidence for increased risks of preterm delivery in a population residing near a freeway in Taiwan [J]. *Arch Environ Health*, 2003, 58 (10) : 649-654.
- [21] LAURENT O, HU J, LI L, et al. A statewide nested case-control study of preterm birth and air pollution by source and composition : California, 2001-2008 [J]. *Environ Health Perspect*, 2016, 124 (9) : 1479-1486.
- [22] WAND L, GUO P, TONG H, et al. Traffic-related metrics and adverse birth outcomes : a systematic review and meta-analysis [J]. *Environ Res*, 2020, 188 : 109752.
- [23] BEYEA J, HATCH M, STELLMAN SD, et al. Validation and calibration of a model used to reconstruct historical exposure to polycyclic aromatic hydrocarbons for use in epidemiologic studies [J]. *Environ Health Perspect*, 2006, 114 (7) : 1053-1058.
- [24] JERRETT M, ARAIN MA, KANAROGLOU P, et al. Modeling the intraurban variability of ambient traffic pollution in Toronto, Canada [J]. *J Toxicol Environ Health A*, 2007, 70 (3/4) : 200-212.
- [25] 薛文博, 王金南, 杨金田, 等. 国内外空气质量模型研究进展 [J]. *环境与可持续发展*, 2013, 38 (3) : 14-20.
- XUE WB, WANG JN, YANG JT, et al. Domestic and foreign research progress of air quality model [J]. *Environ Sustain Dev*, 2013, 38 (3) : 14-20.
- [26] LOVREGGIO P, D'ERRICO MN, FUSTINONI S, et al. Biomarkers of internal dose for the assessment of environmental exposure to benzene [J]. *J Environ Monit*, 2011, 13 (10) : 2921-2928.
- [27] STAESSEN JA, NAWROT T, HOND ED, et al. Renal function, cytogenetic measurements, and sexual development in adolescents in relation to environmental pollutants : a feasibility study of biomarkers [J]. *Lancet*, 2001, 357 (9269) : 1660-1669.
- [28] ARAYASIRI M, MAHIDOL R, NAVASUMRIT R, et al. Biomonitoring of benzene and 1, 3-butadiene exposure and early biological effects in traffic policemen [J]. *Sci Total Environ*, 2010, 408 (20) : 4855-4862.
- [29] NAVASUMRIT P, CHANVAIVIT S, INTARASUNANONT P, et al. Environmental and occupational exposure to benzene in Thailand [J]. *Chem-Biol Interact*, 2005, 153-154 : 75-83.
- [30] KICINSKI M, SAENEN ND, VIAENE MK, et al. Urinary *t*, *t*-muconic acid as a proxy-biomarker of car exhaust and neurobehavioral performance in 15-year olds [J]. *Environ Res*, 2016, 151 : 521-527.
- [31] CHUANG CY, CHANG CC. Urinary 1-hydroxypyrene level relative to vehicle exhaust exposure mediated by metabolic enzyme polymorphisms [J]. *J Occup Health*, 2007, 49 (2) : 140-151.
- [32] BONASSI S, EI-ZEIN R, BOLOGNESI C, et al. Micronuclei frequency in peripheral blood lymphocytes and cancer risk : evidence from human studies [J]. *Mutagenesis*, 2011, 26 (1) : 93-100.
- [33] PEDERSEN M, WICHMANN J, AUTRUP H, et al. Increased micronuclei and bulky DNA adducts in cord blood after maternal exposures to traffic-related air pollution [J]. *Environ Res*, 2009, 109 (8) : 1012-1020.
- [34] KIRSCH-VOLDERS M, BONASSI S, KNASMUELLER S, et al. Commentary : critical questions, misconceptions and a road map for improving the use of the lymphocyte cytokinesis-block micronucleus assay for in vivo biomonitoring of human exposure to genotoxic chemicals-a HUMN project perspective [J]. *Mutat Res Rev Mutat Res*, 2014, 759 : 49-58.
- [35] MØRCK TA, LOOCK KV, POULSEN MB, et al. Micronucleus frequency in Danish schoolchildren and their mothers from the DEMOCOPHES population [J]. *Mutagenesis*, 2016, 31 (1) : 1-8.
- [36] TAN C, LU S, WANG Y, et al. Long-term exposure to high air pollution induces cumulative DNA damages in traffic policemen [J]. *Sci Total Environ*, 2017, 593-594 : 330-336.
- [37] BOLOGNESI C, MERLO F, RABBONI R, et al. Cytogenetic biomonitoring in traffic police workers : Micronucleus test in peripheral blood lymphocytes [J]. *Environ Mol Mutagen*, 1997, 30 (4) : 396-402.
- [38] ZHANG X, XIAO X, DUAN H, et al. Cytotoxicity of diesel engine exhaust among the Chinese occupational population : a complement of cytokinesis-block micronucleus cytome [J]. *Inhal Toxicol*, 2016, 28 (6) : 274-280.
- [39] KICINSKI M, VERMEIR G, VAN LAREBEKE N, et al. Neurobehavioral performance in adolescents is inversely associated with traffic exposure [J]. *Environ Int*, 2015, 75 : 136-143.

(英文编辑：汪源；责任编辑：汪源)