

基于 AOD 修正系数的网格化机动车排放清单

施庆利¹, 冯海霞^{2*}, 魏代梅¹, 王金萍¹, 李忠锐²

(1.山东省交通规划设计院集团有限公司, 山东 济南 250023; 2.山东交通学院交通与物流工程学院, 山东 济南 250357)

摘要:为提高网格化排放清单精度,结合 AOD(aerosol optical depth)和标准路长提出基于 AOD 修正系数的空间分配模型,并以青岛市为例进行验证。验证结果表明:基于 AOD 修正系数的空间分配模型获取的 2019 年青岛市 1 km×1 km 分辨率的 PM_{2.5} 排放清单与测量数据的相关系数 R^2 为 0.55,高于基于标准路长、GDP(gross domestic product)和人口密度的空间分配模型(R^2 分别为 0.47、0.43 和 0.31);青岛市中心城区,下辖的即墨、胶州、莱西、平度的中心城区及胶州湾地区是机动车的高排放区。本研究首次将强现实性的遥感数据引入空间分配模型,使每个网格的空间分配系数由固定值变为随真实大气污染状况变化的动态参数,提高了网格化机动车排放清单的精度,对研究机动车排放对大气污染的影响、精细化管控等具有重要意义。

关键词:空间分配模型;机动车;网格化排放清单;AOD;PM_{2.5}

中图分类号:U4 **文献标志码:**A

引用格式:施庆利,冯海霞,魏代梅,等.基于 AOD 修正系数的网格化机动车排放清单[J].山东大学学报(工学版),2024,54(5):29-33.

SHI Qingli, FENG Haixia, WEI Daimei, et al. Grided vehicle emission inventory based on AOD mediation coefficient[J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2024, 54(5):29-33.

Grided vehicle emission inventory based on AOD mediation coefficient

SHI Qingli¹, FENG Haixia^{2*}, WEI Daimei¹, WANG Jinping¹, LI Zhongrui²

(1. Shandong Provincial Communications Planning and Design Institute Group Co., Ltd., Jinan 250023, Shandong, China;

2. School of Transportation and Logistics Engineering, Shandong Jiaotong University, Jinan 250357, Shandong, China)

Abstract: To improve the accuracy of grided emission inventories, this paper proposed a spatial allocation model based on aerosol optical depth (AOD) combined with standard road lengths. The model was validated using Qingdao as a case study. The validation results showed that the PM_{2.5} emission inventory for Qingdao in 2019 at a 1 km×1 km resolution, obtained using the spatial allocation model based on AOD correction coefficients, exhibited a higher correlation coefficient (R^2 was 0.55) with measured data compared to models based on standard road lengths, GDP, and population density (R^2 was 0.47, 0.43, and 0.31, respectively). High-emission areas for vehicles in Qingdao include the central urban area, as well as the downtown regions of Jimo, Jiaozhou, Laixi, Pingdu, and the Jiaozhou Bay area. This study was the first to introduce remote sensing data into the spatial allocation model, transforming the allocation coefficient of each grid from a fixed value into a dynamic parameter varying with real atmospheric pollution conditions, thereby enhancing the accuracy of grided vehicle emission inventories. This study was of great significance for studying the impact of vehicle emissions on air pollution and facilitating precise control measures.

Keywords: spatial allocation model; motor vehicle; grided emission inventory; AOD; PM_{2.5}

0 引言

机动车飞速增长导致交通拥堵成为我国大多数城市的常态,研究证实交通拥堵导致更多汽车尾

气排放^[1],尾气排放已取代煤炭成为城市 PM_{2.5} 的主要来源^[2]。联合国环境署发布的《全球环境展望》(GEO6)显示全球 25% 的过早死亡和重大疾病都是人为污染和环境破坏所致,空气污染是导致全球疾病的主要环境因素,尤其是在城市区域,减少

收稿日期:2024-04-23

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52102412);山东省自然科学基金资助项目(ZR2022MG077);山东省社会科学规划研究资助项目(23CKFJ16)

第一作者简介:施庆利(1985—),男,山东菏泽人,高级经济师,硕士,主要研究方向为交通规划、交通运输经济。E-mail:qingli369@sina.com

*通信作者简介:冯海霞(1976—),女,山东茌平人,副教授,硕士生导师,博士,主要研究方向为智能交通。E-mail:fhx76@163.com

机动车排放已成为保障人民生命健康的关键措施之一^[3]。排放清单技术是当前世界范围内区域空气质量改善的核心支撑技术,清单应该包括污染源排放到大气中的总量、排放源的时间和空间分布信息^[4]。网格化排放清单是排放总量按照一定的时空分配方法进行分配的结果,是研究排放源分布规律的基础,也是空气质量模型的必要输入^[5]。目前重要的国际大型排放清单项目,如欧盟的全球大气研究排放数据库 EDGAR (emissions database for a global atmospheric research)、美国的国家排放清单 NEI (national emission inventory) 和清华大学牵头开放的中国多尺度排放清单模型 MEIC (multi-resolution emission inventory for China) 等,都是网格化排放清单^[6]。网格分辨率从 $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ 提高到了 $0.05^\circ \times 0.05^\circ$,包括移动源(机动车)排放清单,精准的分配方法是提高网格化排放清单精度的关键。

机动车排放清单的核算方法大体分为自上而下和自下而上2种方法^[7]。文献[8-9]给出了机动车排放清单的编制方法。自上而下方法是基于宏观能源消耗数据乘以燃料碳排放因子计算机动车碳排放总量,适用于宏、中观尺度上机动车碳排放的核算^[10];机动车污染物排放的核算更多是采用自下而上方法,即不同类型车辆单位距离排放因子乘以行车里程,适用于城市、区域在宏观、微观层面上的核算^[11]。将排放总量依据时空分配模型分配到研究区每个网格获取网格化排放清单,时空分配模型对于提高网格化排放清单的准确性至关重要^[12]。目前机动车排放清单的空间分配方法主要使用与排放强度相关的特征参数,通过空间插值、等级加权、比例分配或参数替代等简单方法进行建模^[13]。常用的特征参数有道路、人口、GDP (gross domestic product) 和 POI (point of interest) 等,其中道路参数最为常用^[14-16]。尽管道路、人口、GDP、POI 等参数与车辆排放密切相关,但一段时间内其值是固定的,而机动车排放是动态变化的,它们很难反映机动车的实际排放量、大气真实的污染状况及其动态变化^[17]。空间分配模型需要能够反映真实排放或大气污染状况的动态特征参数。

虽然实时的交通流量是反映机动车排放的较好参数,但每个网格的路网交通流量数据获取困难,能反映实时大气状况及动态变化的网格化的遥感数据是较适合的特征参数。遥感数据因客观真实且可回溯、时空连续性强且近实时、覆盖范围广且获取数据快等时空优势,已在大气、海洋、土地利

用、城市发展、环境监测与评估等领域获得广泛应用,但目前尚未应用到空间分配模型的研究中^[18]。众多的研究已证实:AOD (aerosol optical depth) 与空气质量、 $PM_{2.5}$ 都高度相关^[19]。本研究拟以青岛市为例,将遥感数据引入机动车排放清单的空间分配研究中,构建基于 AOD 修正系数和标准路长的空间分配模型,获取青岛市高精度的网格化机动车排放清单。

1 数据和方法

1.1 研究区与数据

1.1.1 研究区

沿海城市经济发达,人口密度高,机动车数量巨大,城市交通拥堵成为海岸带城市的常态。青岛市是一个典型的沿海城市,位于胶东半岛东部,黄海以南,辖7个区,3个县,是国家计划单列市、特大城市、中国沿海重要中心城市、国际港口城市、国内生产总值超万亿城市,也是“一带一路”新亚欧大陆桥经济走廊的主要枢纽和海洋合作战略的支点。截至2023年末,青岛市常住人口1037.15万人,机动车387万余辆,路网密度平均约为 1.36 km/km^2 。文献[20]的研究表明青岛市机动车尾气排放已成为大气中 $PM_{2.5}$ 的主要来源。据文献[21],青岛市内出行强度全国排名第五,通勤拥堵指数全国排名第六。

1.1.2 数据

青岛 GDP 和人口密度数据来源于中国科学院资源环境科学与数据中心,目前公开的最新数据是2019年数据,为了保持数据的一致性,AOD、路网、空气质量监测数据等均选择2019年数据。

青岛市路网数据包括道路类型、道路等级、长度、车道、设计流量等(来源于山东省公安厅交管局)。

2019年研究区全年的 MCD19AOD 产品融合了 MODIS Terra 和 Aqua 卫星的观测数据,采用了多角度大气校正算法,产品分辨率可达 $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$,与 MOD04 气溶胶产品(分辨率分别为 $10 \text{ km} \times 10 \text{ km}$ 和 $3 \text{ km} \times 3 \text{ km}$)相比,分辨率和精度都有较大提高,可在 NASA 网站免费下载。

空气质量监测数据来自中国空气质量在线监测分析平台,包括青岛市18个监测站2019年 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 逐时监测数据。天气数据来源于中国气象数据服务中心,包括2019年7个国家级天气监测站温度、湿度等逐时数据。

青岛的路网、AOD、GDP、人口密度在空间分布趋势上是基本一致的,这是因为路网密度大的地区,基本也是经济发达、人口密度大、排放较多的地区。虽然空间分布趋势基本一致,但还是有一定差异,如 GDP、人口密度在行政区边界差异明显,路网、AOD 则没有。

1.1.3 数据预处理

(1) 遥感数据预处理

利用遥感图像处理软件 ENVI 对 MCD19AOD 的日产品进行预处理。将不同轨道的 AOD 数据(每日 AOD 数据中有超过 3 个轨道的数据)进行平均,获取 AOD 日均值,进而获取 AOD 月均值、AOD 年均值。

(2) 研究区网格化

利用 GIS 软件,将研究区划分为 $1\text{ km} \times 1\text{ km}$ 的网格,统计每个网格对应的 GDP、人口密度、AOD 数据,并将数据相互关联。

1.2 方法

1.2.1 机动车排放总量

机动车排放总量的估算采用了文献[9]中提供的方法,具体公式为:

$$E_{-(i,j,k)} = \sum F_{i,j,k} \times S_{i,j,k} \times P_{i,j,k} \times 10^{-6}, \quad (1)$$

式中: E 为机动车排放污染物的年排放总量,t; i 为车辆类型; j 为排放标准; k 为污染物类型; F 是 i 车型 j 排放标准下 k 污染物的排放因子,g/km; S 为车辆的年均行驶里程,km/辆; P 为机动车保有量,辆。不同车型的排放因子 F 和平均行驶里程 S 采用了文献[9]中推荐的数据。

1.2.2 空间分配模型的构建

空间分配模型是排放总量 E 进行空间分配的依据,本研究将遥感数据(MCDAOD 数据)引入空间分配模型,结合标准路长(道路类型和等级的差异,交通容量和交通流量不同,将每个网格内的所有道路都转换为可以比较的标准道路长度)^[13],构建新的空间分配模型,即基于 AOD 修正系数的空间分配模型,模型的构建如下。

网格 i 的 k 类型污染物的排放量计算公式为:

$$E_{i,k} = W_{i,k} \times E_k, \quad (2)$$

式中: $W_{i,k}$ 为网格 i 的 k 类型污染物分配权重,是空间分配模型的关键; E_k 为 k 类污染物的排放总量,在本研究中指 $\text{PM}_{2.5}$ 。 $W_{i,k}$ 具体计算公式为:

$$W_{i,k} = C_i \times G_i = \frac{D_i}{D_{\text{avg}}} \times \frac{L_i}{\sum L_i}, \quad (3)$$

$$L_i = \sum_{b=1}^m \sum_{a=1}^n L_{a,b} \times C_b, \quad (4)$$

式中: C_i 为网格 i 的 AOD 调整系数; G_i 为网格 i 的标准路长分配系数; D_i 为网格 i 的 AOD 值; D_{avg} 是研究区所有网格的平均值; L_i 为网格 i 内标准路长; b 为道路类型,分为高速公路、国道、省道、县道、乡道和其他道路,城区分为快速路、主干路、次干路及支路; m 为网格 i 内道路类型的总数; a 为网格 i 中的道路编号; n 为网格 i 中道路的数目; $L_{a,b}$ 为属于 b 类型道路的编号 a 的道路的长度; C_b 为不同道路的标准长度换算因子。

2 结果分析

2.1 青岛市机动车年排放总量

青岛市 2019 年机动车保有量为 306.1 万辆,根据公式(1),青岛市 2019 年机动车 $\text{PM}_{2.5}$ 年排放总量为 10 467.4 t。

2.2 网格化排放清单

基于新构建的 AOD 修正系数空间分配模型,将 2019 年青岛市机动车 $\text{PM}_{2.5}$ 排放总量分配到 $1\text{ km} \times 1\text{ km}$ 的网格上,获取 2019 年青岛市网格化机动车 $\text{PM}_{2.5}$ 排放清单。

青岛市中心城区(市辖区),下辖的即墨、胶州、莱西、平度等区县的中心城区以及环胶州湾区都是机动车 $\text{PM}_{2.5}$ 的高排放区,尤其是处于环胶州湾的市南区、市北区,其单位网格的 $\text{PM}_{2.5}$ 排放量都在 5 t 以上。这些高排放区的路网密度也都较高,其路网密度基本都在 $10\text{ km}/\text{km}^2$ 以上(以标准路长计算)。经济发达、路网密集的胶州湾地区是机动车的高排放区,其单位网格的机动车 $\text{PM}_{2.5}$ 排放量基本都在 3 t 以上。

2.3 不同空间分配模型分配结果的对比分析

为了对本研究新构建的基于 AOD 修正系数的空间分配模型的分配结果进行分析,分别利用基于标准路长、GDP、人口密度 3 种空间分配模型对青岛市 2019 年机动车 $\text{PM}_{2.5}$ 排放进行空间分配。这 3 种空间分配模型的空间权重系数的计算公式类似,分别是网格 i 内的标准路长、GDP、人口密度与研究区所有网格总的标准路长、GDP、人口密度的比值,获取了 3 种空间分配模型分配后的网格化 $\text{PM}_{2.5}$ 排放清单。

基于 AOD 修正系数、标准路长、GDP、人口密度 4 种空间分配模型分配后的结果在空间分布趋势

上是基本一致的,这是因为路网密度大的地区,基本也是经济发达、人口密度大、高排放的地区。虽然空间分布趋势基本一致,但还是有一定差异的。基于标准路长空间分配模型获取的网格化排放清单的空间分布与本研究新构建的基于 AOD 调整系数模型获取的网格化排放清单的空间分布近似,但基于 AOD 调整系数空间分配模型获取的网格化排放清单的精度有所提高,具体数据见后面验证部分。基于 AOD 修正系数模型获取的网格化清单与基于 GDP 和人口密度空间分配模型获取的 2 种网格化排放清单的差异较大。因 GDP、人口分布具有明显的地区差异,边界差异明显,导致基于人口和 GDP 空间分配模型获取的网格化机动车 $PM_{2.5}$ 排放清单也具有明显的边界差异,这有悖于实际的道路交通排放。基于 AOD 修正系统和标准路长的两种分配模型不存在边界差异问题。基于 AOD 修正系数和标准路长模型获取的网格 $PM_{2.5}$ 排放的均值为 1.37 t,而基于人口和 GDP 模型分配后的网格 $PM_{2.5}$ 均值为 1.01 t,这是因为基于 AOD 修正系数模型和基于标准路长的模型进行空间分配时,没有考虑路网长度为 0 的区域,而基于 GDP 和人口密度 2 种模型考虑了研究区内所有网格。

2.4 验证

目前对时空分配模型的分配结果,即网格化排放清单的验证比较困难,本研究使用了大气监测数据、CMAQ 模型 2 种方法对基于 AOD 修正系数空间分配模型获取的网格化机动车 $PM_{2.5}$ 排放清单的精度进行验证。

2.4.1 基于空气质量监测数据的验证

采用空气质量监测数据对网格化机动车 $PM_{2.5}$ 排放清单进行验证,也是文献[9]中推荐的方法。利用青岛市 18 个空气质量监测站 2019 年 $PM_{2.5}$ 监测数据(y)分别与站点所在网格上(1 km×1 km)基于 AOD 修正系数、标准道路长度、GDP、人口密度 4 种空间分配模型获取的机动车排放的 $PM_{2.5}$ 数据(x)进行拟合,其拟合公式和相关系数 R^2 见表 1。

表 1 不同空间分配结果与监测值的 R^2
Table 1 R^2 of different spatial allocation results and monitored values

分配方法	R^2	拟合公式
AOD 修正系数	0.55	$y=0.027\ 1x+34.122$
标准路长	0.47	$y=0.025\ 7x+35.061$
GDP	0.31	$y=0.263\ 1x+35.744$
人口密度	0.43	$y=0.259\ 2x+34.877$

从表 1 可以看出:基于 AOD 修正系数空间分配模型获取的机动车排放的 $PM_{2.5}$ 与监测的 $PM_{2.5}$ 质量浓度相关性最高, R^2 达到 0.55;其次是标准路长模型, R^2 为 0.47;基于 GDP 的空间分配模型分配结果的拟合效果最差, R^2 只有 0.31,检验拟合效果参数 p 为 0,说明数据具有显著的统计性。

2.4.2 基于 CMAQ(community multiscale air quality)模型的验证

为了解决测量数据与机动车排放数据单位不一致的问题,空气质量模型用于网格化排放清单的验证,空气质量模型可以将网格化排放清单的质量数据转化为大气中浓度数据。空气质量模型可模拟污染源扩散过程和输送过程,是大气环境研究的重要工具,网格化排放清单是其必要的输入。本研究采用了 CMAQ 模型,CMAQ 模型是美国环境保护局开发的第三代空气质量模型,广泛应用于空气质量的相关研究中。本研究使用 CMAQ5.0.2,参数设置分别为:CB05 化学机制、AERO6 气溶胶机制、云微物理方案(WSM6)、积云参数化方案(K-F)、行星边界层方案(YSU)、CAM 长波辐射方案、RRTMG 短波辐射方案、城市冠层模型(UCM)、LAMBERT 投影,中心点坐标为北纬 36°11'40",东经 120°22'10",嵌套区域为 4 层,水平网格分辨率分别为 27、9、3 和 1 km,垂直方向上有 13 层,地面层距地面约 80 m,模拟时间为 2019 年 1 月。选择了与监测值相关性较好的基于标准路长模型获取的网格化 $PM_{2.5}$ 排放清单与本研究提出的基于 AOD 修正系数模型获取的网格化 $PM_{2.5}$ 排放清单进行比较;采用相关系数 R^2 、标准化平均偏差和标准化平均误差对模拟结果进行评估。

利用青岛市 18 个空气质量监测站监测的 $PM_{2.5}$ 数据与 CMAQ 模拟的 $PM_{2.5}$ 数据进行对比分析,模拟的 $PM_{2.5}$ 数据单位与测量 $PM_{2.5}$ 数据的单位是相同的,故基于 2 种 $PM_{2.5}$ 排放清单 CMAQ 模拟后的 $PM_{2.5}$ 与监测 $PM_{2.5}$ 数据的 R^2 分别增加到 0.60 和 0.53,模拟前 R^2 分别为 0.55 和 0.47。与基于标准路长的分配模型相比,基于 AOD 修正系数的网格化 $PM_{2.5}$ 排放清单的模拟结果的标准化平均偏差和标准化平均误差分别降低了 34% 和 28%。

3 结论

本研究首次将强现实性的遥感数据作为机动

车排放清单的空间分配模型的特征参数,结合 AOD 数据和标准路长,提出了基于 AOD 修正系数的空间分配模型,并基于新构建的空间分配模型,获取了 2019 年青岛市 1 km×1 km 分辨率的网格化机动车 PM_{2.5}排放清单。基于监测数据和 CMAQ 模型的验证结果表明:基于 AOD 修正系数的空间分配模型获取的网格化排放清单的精度高于基于标准路长、GDP 和人口密度的空间分配模型获取的网格化排放清单。未来的研究可考虑更多的遥感数据,如监测 O₃ 等痕量气体成分的对流层监测仪 (TROPOMI) 数据。

参考文献:

- [1] 李振宇,廖凯,崔占伟,等. 缓解城市交通拥堵的 CO₂ 减排效益评估方法研究[J]. 交通运输系统工程与信息, 2020, 20(2): 8-12.
LI Zhenyu, LIAO Kai, CUI Zhanwei, et al. An evaluation method of CO₂ emissions reduction in urban traffic congestion mitigation[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2020, 20(2): 8-12.
- [2] 冯海霞,王兴渝,戚化彩,等. 城市交通运行状况对机动车碳排放的影响研究[J]. 交通运输系统工程与信息, 2022, 22(4): 167-175.
FENG H X, WANG X Y, XIAN H C, et al. Impact of urban traffic operations on vehicle carbon dioxide emission [J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2022, 22(4): 167-175.
- [3] UN Environment. Global Environment Outlook 6 [EB/OL]. (2019-03-04) [2024-01-25]. <https://www.unep.org/geo/ptbr/node/4>.
- [4] ZHENG B, HUO H, ZHANG Q, et al. A new vehicle emission inventory for China with high spatial and temporal resolution[J]. Atmospheric Chemistry & Physics Discussions, 2013, 13(12): 32005-32052.
- [5] ÁLAMOS N, HUNEEUS N, OPAZO M, et al. High-resolution inventory of atmospheric emissions from transport, industrial, energy, mining and residential activities in Chile[J]. Earth System Science Data, 2021, 14(1): 361-379.
- [6] FENG H X, NING E W, YU L, et al. The spatial and temporal disaggregation models of high-accuracy vehicle emission inventory[J]. Environment International, 2023, 181: 108287.
- [7] FENG H X, WANG X Y, JIA Q, et al. A novel spatial disaggregation model of vehicle emission inventory[J]. Urban Climate, 2024, 55: 101947.
- [8] EGGLESTON H S, BUENDIA L, MIWA K, et al. 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories[EB/OL]. (2006-07-01) [2024-01-25]. <https://www.osti.gov/etdeweb/biblio/20880391>.
- [9] 生态环境部. 道路机动车大气污染物排放清单编制技术指南(试行)[EB/OL]. (2014-12-31) [2024-01-25]. https://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bgg/201501/t20150107_293955.htm.
- [10] GÓMEZ C D, GONZALEZ C M, OSSES M, et al. Spatial and temporal disaggregation of the on-road vehicle emission inventory in a medium-sized Andean city. Comparison of GIS-based top-down methodologies [J]. Atmospheric Environment, 2018, 179: 142-155.
- [11] 孙世达,金嘉欣,吕建华,等. 基于精细化年均行驶里程建立机动车排放清单[J]. 中国环境科学, 2020, 40(5): 2018-2029.
SUN Shida, JIN Jiabin, LÜ Jianhua, et al. Developing vehicle emission inventory based on refined annual average vehicle kilometers travelled [J]. China Environmental Science, 2020, 40(5): 2018-2029.
- [12] GONZALEZ C M, GOMEZ C D, ARISTIZABAL B H, et al. An algorithm for spatial and temporal disaggregation of on-road vehicle emission inventories [J]. Aerosol and Air Quality Research, 2020, 20(12): 2765-2779.
- [13] 郑君瑜,车汶蔚,王兆礼. 基于交通流量和路网的区域机动车污染物排放量空间分配方法[J]. 环境科学学报, 2009, 29(4): 815-821.
ZHENG Junyu, CHE Wenwei, WANG Zhaoli. Traffic flow and road network-based spatial allocation of regional mobile source emission inventories [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2009, 29(4): 815-821.
- [14] CASTESANA P, RESQUIN M, HUNEEUS N, et al. PAPIA dataset: a regional emission inventory of reactive gases for South America based on the combination of local and global information[J]. Earth System Science Data, 2022, 14(1): 271-293.
- [15] JING B, WU L, MAO H J, et al. Development of a vehicle emission inventory with high temporal-spatial resolution based on NRT traffic data and its impact on air pollution in Beijing-Part 1: Development and evaluation of vehicle emission inventory [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2016, 16(5): 3161-3170.
- [16] SUN S, SUN L, LIU G, et al. Developing a vehicle emission inventory with high temporal-spatial resolution in Tianjin, China[J]. Science of the Total Environment, 2021, 776: 145873.
- [17] FENG H X, LI J, FENG H Y, et al. A high-resolution index suitable for multi-pollutant monitoring in urban areas[J]. Science of the Total Environment, 2021, 772(6): 145428.