

遵义市 PM_{2.5} LUR 模型的建立与分析

况桃,夏娅,杨华君,曹毅,刘定梅,杨彦

遵义医药高等专科学校卫生管理系,贵州 遵义 563006

摘要:目的 构建遵义市细颗粒物 (particulate matter with an aerodynamic diameter $\leq 2.5 \mu\text{m}$, PM_{2.5}) 土地利用回归 (land use regression, LUR) 模型。方法 收集整理遵义市常规空气质量监测站点 2020 年 1 月 1 日到 2020 年 12 月 31 日的逐小时 PM_{2.5} 监测数据,以及土地利用、道路、人口密度、海拔等地理信息变量数据和气象因子数据,以 PM_{2.5} 浓度为因变量,地理信息变量和气象因子为自变量,进行多元逐步线性回归,构建模型,并采用留一交叉验证 (leave-one-out cross validation, LOOCV) 对模型表现进行验证。结果 所建模型公式为 $Y = 72.656 - 0.026 \times \text{海拔} - 0.009 \times \text{NDVI} - 0.62 \times \text{平均气温} - 383.512 \times \text{平均降水量}$,模型的 $R^2 = 0.74$,调整 $R^2 = 0.72$,交叉验证的 $R^2 = 0.69$, $RMSE = 3.51$,空间分辨率高 (250 m \times 250 m)。结论 模型拟合情况较好,充分反映了遵义市 PM_{2.5} 空间分布的影响因素,可以用于个体暴露水平的估计,为环境健康流行病学研究提供有力支持。

关键词:PM_{2.5}; 个体暴露; LUR 模型

中图分类号: R122 文献标志码: A 文章编号: 1003-8507(2024)20-3687-05

DOI: 10.20043/j.cnki.MPM.202405403

Establishment and analysis of LUR model for PM_{2.5}, Zunyi

KUANG Tao, XIA Ya, YANG Hua-jun, CAO Yi, LIU Ding-mei, YANG Yan

Department of Health Management, Zunyi Medical and Pharmaceutical College, Zunyi, Guizhou 563006, China

Abstract: **Objective** To construct a land use regression (LUR) model for particulate matter with an aerodynamic diameter $\leq 2.5 \mu\text{m}$ (PM_{2.5}) in Zunyi. **Methods** Collect and organize hourly PM_{2.5} monitoring data from routine air quality monitoring stations from January 1, 2020 to December 31, 2020, as well as geographic information data such as land use, roads, population density, altitude, and meteorological factors in Zunyi. Conduct multiple stepwise linear regression with PM_{2.5} concentration as the dependent variable and geographic information variables and meteorological factors as independent variables to construct a model. Use leave-one-out cross validation (LOOCV) to verify the performance of the model. **Results** The model formula is $Y = 72.656 - 0.026 \times \text{altitude} - 0.009 \times \text{NDVI} - 0.62 \times \text{average temperature} - 383.512 \times \text{average precipitation}$. The model had $R^2 = 0.74$, adjusted $R^2 = 0.72$, cross validation $R^2 = 0.69$, $RMSE = 3.51$, and a high spatial resolution (250 m \times 250 m). **Conclusion** The model fits well and fully reflects the influencing factors of PM_{2.5} spatial distribution in Zunyi. It can be used to estimate individual exposure levels and provide strong support for environmental health epidemiological research.

Keywords: PM_{2.5}; Individual exposure; LUR model

随着我国城市化进程的加快及工业化的快速发展,各类污染物的排放,尤其以细颗粒物 (particulate matter with an aerodynamic diameter $\leq 2.5 \mu\text{m}$, PM_{2.5}) 为代表的空气污染物,导致城市空气质量遭受严重影响^[1]。近年来,随着我国大气污染防治不断深入,尽管在治理空气污染上取得了重大进展,PM_{2.5} 的超标天比例不断下降,但是对照世界卫生组织在 2021 年更新的《全球空气质量指南》中 PM_{2.5}

年均浓度指导值,我国年均 PM_{2.5} 浓度仍约为 WHO 标准的 6 倍,是目前全球十多个空气污染最严重的国家之一^[2]。PM_{2.5} 是主导空气污染健康影响的关键因素,已有研究显示,PM_{2.5} 的暴露与人体的呼吸系统^[3]、心血管系统^[4]、肺癌的发生和死亡密切相关^[5],PM_{2.5} 的健康危害受到广泛关注^[6]。

在 PM_{2.5} 与健康影响的流行病学研究中,个体暴露水平的准确估计至关重要。研究表明城市内 PM_{2.5} 浓度在空间上存在显著差异,在不足 100 m 的距离,就有较大的浓度悬殊^[7]。而流行病学研究中,研究对象之间所处位置具有一定距离的间隔,这种空间位置的差异使个体间的暴露水平有所不同,以往的

基金项目:遵义市科技计划项目(遵市科合 HZ 字(2022)153 号)

作者简介:况桃(1990—),女,硕士,讲师,研究方向:环境污染物的暴露与健康影响

通信作者:况桃, E-mail: 947175603@qq.com

研究直接采用空气质量监测站点的浓度作为个体的暴露水平,监测点与研究对象往往存在一定的距离,这种方法并未考虑到污染物浓度的空间异质性问题,不能正确地反映个体暴露量^[8-9]。为此,越来越多的研究开始探讨个体暴露估计模型的构建,近年来,LUR 模型被广泛构建,并在空气污染与健康关联流行病学研究中,用于个体暴露估计^[10]。该模型是利用已知有限的空气质量监测点的污染物浓度数据,并结合这些监测点周围的土地利用、交通道路、地形、人口等地理特征变量构建的线性回归模型。利用该模型可以对研究区域内其他任意未监测地点进行污染物浓度估计,模拟精度高,能很好地反映污染物的空间变异,是一种高效的暴露估计方法^[10]。

本研究基于 LUR 模型的构建方法,在遵义市构建 PM_{2.5} 的预测模型。该模型能够用于个体暴露估计,为遵义市环境流行病学研究在暴露评估方面提供一定的支持。

1 数据来源与方法

1.1 区域概况及 PM_{2.5} 数据

遵义市位于贵州省北部,处于云贵高原向湖南丘陵和四川盆地过渡的斜坡地带,地形起伏大。属亚热带季风气候,终年温暖湿润,雨量充沛。遵义市是成渝—黔中经济区走廊的核心区和主廊道,是西南地区承接南北、连接东西的重要交通枢纽。全市辖 3 个区、9 个县、2 个县市级市,总面积约为 3 万平方千米,常住人口约 650 万。遵义市 3 个中心城区即为本研究的研究区域。

研究区域共有 5 个监测站点,各站点的经纬度见表 1,监测站点之间的直线距离最近为 1.683 km (丁字口站点与凤凰山站点相距最近),最远为 8.400 km (干田坝站点与忠庄站点相距最远),平均为 4.876 km。

我们通过全国城市空气质量实时发布平台,收集了遵义市城区的这 5 个常规空气质量监测点 2020 年 1 月 1 日到 2020 年 12 月 31 日的逐小时 PM_{2.5} 浓度监测数据。通过计算各监测站点数据的完整率、绘制污染物浓度的逐月时间趋势图,对数据质量和污染物时间趋势进行了解。然后根据逐小时浓度计算各站点每个月 PM_{2.5} 的平均浓度,以此作为土地利用回归模型构建的因变量。以上数据统计均用 R 软件 3.5.1 完成。

1.2 地理信息数据来源及预处理

(1) 交通道路数据:数据来自“Open street map”,以监测点为中心,设置 500 m、1 000 m、3 000 m、5 000 m 圆形缓冲区,利用 ArcGIS 软件分别提取各缓冲区内 4 种类型道路(高速公路、城市干道、支路和全部道路)的长度。同时计算各监测点距最近主干道的距离。(2) 土地利用

表 1 遵义市各空气质量监测站点的经纬度

Table 1 Longitude and latitude of air quality monitoring sites in Zunyi

序号	监测点名称	经度(°)	纬度(°)
1	丁字口	106.922 2	27.686 9
2	凤凰山	106.924 2	27.701 9
3	干田坝	106.917 8	27.720 0
4	忠庄	106.890 6	27.648 6
5	舟水桥	106.923 1	27.650 6

数据:数据来自全国地理信息资源目录服务系统的 Globeland30 m 土地覆盖数据,空间分辨率为 30 m × 30 m。在 ArcGIS 中分别提取监测点周围 500 m、1 000 m、3 000 m、5 000 m 圆形缓冲区内 4 种土地利用(耕地、人造地、水体用地、植被地)的面积。(3) 海拔:数据来自 Advanced Land Observing Satellite (ALOS) Global Digital Surface Model “ALOS World 3D - 30 m (AW3D30)” (<https://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/aw3d30/index.htm>),空间分辨率为 30 m × 30 m,在 ArcGIS 中分别提取 5 个监测站点的海拔。(4) 人口密度:数据来源于资源环境数据云平台 (<http://www.resdc.cn/DOI>),空间分辨率为 1 km × 1 km,在 ArcGIS 中分别提取 5 个监测站点的人口密度。(5) NDVI:数据来自 Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) MOD13Q1 v006 数据集 (<https://lpdaac.usgs.gov/products/mod13q1v006/>),空间分辨率为 250 m × 250 m,在 ArcGIS 中,分别计算每个监测站点 NDVI 的点值及 NDVI 在监测点周围 500 m、1 000 m、3 000 m、5 000 m 圆形缓冲区的平均值,用于反映区域植被覆盖的程度。(6) 监测点到市中心的距离:丁字口是遵义市中心城区最繁华的地点,以这个地点为市中心代表。在 ArcGIS 中,利用 Near 工具,分别计算各监测点到丁字口的距离,以衡量各监测点到市中心的距离。

1.3 气象数据来源及预处理

气温及降水数据来自欧盟及欧洲中期天气预报中心等组织发布的 ERA5 - Land 数据集 (<https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#! /dataset/reanalysis-era5-land-monthly-means?tab=overview>),在 ArcGIS 中对原始栅格数据计算平均值,得到逐月平均气温和平均降水量。

1.4 模型构建和验证

(1) 变量筛选:将各站点的月平均 PM_{2.5} 浓度与 41 个地理信息变量进行双变量相关性分析,排除相关系数符号与先验假设不一致的变量。然后对道路、土地利用、NDVI 这 3 类设置有不同缓冲区的变量,分别确定出每一类变量中相关系数最高的子类变量,并进一步排除与该子类最高相关变量相关性较高的其他同子类变量(相关系数 > 0.6,即为相关性较高)。(2) 模型构建和验证:用筛选出的地

理信息变量结合月平均气温和月平均降水量作为自变量,用月平均 PM2.5 浓度作为因变量,进行逐步线性回归。从模型中踢出回归系数符号与先验假设不一致的变量及方差膨胀因子 (Variance Inflation Factor, VIF) 大于 3 的变量。回归分析采用 IBM SPSS 21 软件进行分析。并对模型进行留一交叉验证 (leave-one-out cross validation, LOOCV)。

2 研究结果

2.1 PM2.5 数据基本情况 5 个站点的 PM2.5 监测数据完整率均较高,均在 99% 以上。PM2.5 的分布水平存在明显的季节差异,全年以夏季较低(6—9 月),如图 1 所示。各站点的月平均浓度见表 2。

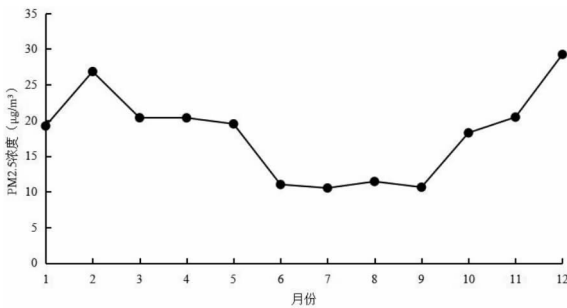


图 1 遵义市 PM2.5 逐月平均浓度的时间趋势

Fig. 1 Time trend of monthly average concentration of PM2.5 in Zunyi

2.2 预测因子 根据变量筛选原则,筛选出地理信息变量如表 3 所示,最终用于建模的预测因子为 21 个地理信息变量和 2 个气象因子(月平均气温及月平均降水量)。

2.3 模型结果 结合预测因子与 PM2.5 构建多元线性回归模型,结果见表 4,模型最终解释变量包括海拔、NDVI、平均气温、平均降水量,具有较高的空间

表 2 遵义市 5 个监测站点 PM2.5 月平均浓度 (µg/m³)

Table 2 Monthly average concentration of PM2.5 at 5 monitoring stations in Zunyi (µg/m³)

月份	丁字口	凤凰山	忠庄	舟水桥	干田坝
1	24.25	16.99	19.75	17.97	17.10
2	32.09	25.33	27.25	24.81	24.68
3	23.32	19.75	21.83	17.80	19.09
4	25.28	18.14	23.19	16.54	18.58
5	23.48	15.49	21.47	20.90	16.14
6	14.38	11.06	9.76	9.56	10.27
7	13.42	10.46	8.77	9.12	10.81
8	14.14	10.67	10.81	10.36	11.17
9	13.55	10.38	9.69	10.20	9.32
10	19.78	18.28	18.80	17.97	16.39
11	22.84	19.94	22.16	19.21	18.09
12	31.51	27.87	30.54	29.22	27.03

分辨率(250 m × 250 m)。模型 R^2 为 0.74,调整后的 R^2 为 0.72,表明模型的大部分变异可以通过预测变量进行解释,LOOCV 结果显示 R^2 为 0.69, RMSE 为 3.51,提示模型拟合精度尚可。

表 3 经变量筛选纳入回归分析的地理信息变量(21 个)

Table 3 Geographical Information Variables Selected for Regression Analysis (21)

PM2.5 预测变量	r^b	PM2.5 预测变量	r^b
ALL_1 000 m ^a	0.567	耕地_5 000 m	0.610
ALL_3 000 m	0.215	植被用地_1 000 m	-0.055
ALL_5 000 m	0.551	人造地_5 000 m	0.800
高速公路_1 000 m	0.513	人造地_500 m	0.028
高速公路_3 000 m	0.463	NDVI	-0.650
高速公路_5 000 m	0.103	NDVI_1 000 m	-0.303
城市干道_1 000 m	0.243	距主干道最近距离	-0.286
城市干道_5 000 m	0.582	各站点距市中心的距离	-0.574
城市干道_500 m	0.127	人口密度	0.391
支路_1 000 m	0.625	海拔	-0.472
支路_3 000 m	0.265		

注:a:指监测点周围 1 000 m 缓冲区内全部道路的长度;b:各预测变量与 PM2.5 浓度的 Spearman 相关系数。

表 4 回归模型及交叉验证结果

Table 4 The results for regression model and cross validation of model

污染物	变量	β	s_x	P	VIF	R^2	调整 R^2	LOOCV	
								RMSE	R^2
PM2.5	常量	72.656	12.012	<0.001		0.74	0.72	3.51	0.69
	海拔	-0.026	0.010	0.013	1.04				
	NDVI	-0.009	0.003	0.002	1.04				
	平均气温	-0.620	0.076	<0.001	1.51				
	平均降水量	-383.512	163.960	0.023	1.51				

线性回归方程为: $Y = 72.656 - 0.026 \times \text{海拔} - 0.009 \times \text{NDVI} - 0.62 \times \text{平均气温} - 383.512 \times \text{平均降水量}$ 。

3 讨论与分析

本研究根据遵义市区的 5 个常规空气质量监测

站点的监测数据,结合监测点周围的土地利用、道路、人口密度、海拔等地理信息数据及气象因子,构建遵义市 PM_{2.5} 浓度模拟的 LUR 模型。模型的 $R^2 = 0.74$,调整 $R^2 = 0.72$,交叉验证的 $R^2 = 0.69$, $RMSE = 3.51$,最终纳入的自变量分别为海拔、NDVI、平均气温、平均降水量。

LUR 模型通常依赖于高空间分辨率的地理信息数据来进行精确的环境分析和模拟,其空间分辨率取决于地理信息数据的分辨率。我们的模型中空间分辨率最低的地理信息变量是 NDVI (250 m × 250 m),这使得 LUR 模型的整体空间分辨率处于此水平。

从模型的判定系数 R^2 来看,全球范围内的 LUR 模型研究, R^2 多处于 0.5 ~ 0.8^[11-12],相对来说,本研究构建的模型拟合情况较好,解释能力是不错的,变量的显著性检验都在 0.05 以下。与国内其他研究模型结果相比,我们的模型表现与南京、杭州、重庆等城市的 LUR 模型表现相当,南京 PM_{2.5} LUR 模型的调整 R^2 为 0.72^[13]。杭州 PM_{2.5} LUR 模型调整 R^2 为 0.70 ~ 0.76^[14],重庆 PM_{2.5} LUR 模型的调整 R^2 为 0.75^[15]。本研究模型 R^2 与交叉验证 R^2 相差不大,提示我们的模型是稳定的。

模型最终纳入海拔、NDVI、平均气温、平均降水量 4 个变量,且均显示与 PM_{2.5} 浓度呈负相关,可以被合理解释。首先,遵义市地形多山,地势高低起伏,污染源多集中分布在低海拔地区,致使 PM_{2.5} 浓度分布与海拔表现出负相关,这与吴健生在重庆的研究结果一致^[16]。其次,归一化植被指数表征区域植被覆盖的程度,污染物的主要净化方式之一就是依靠植被的吸收和吸附,因此 NDVI 与 PM_{2.5} 浓度呈负相关^[17]。对于气温和降水量,PM_{2.5} 浓度的浓度通常是与其呈负相关的^[18-19],这是由于随着温度的升高,大气对流运动加剧,有利于污染物的稀释和扩散,使其浓度降低。此外,降水量的增加,提高了与气溶胶粒子碰撞的效率,增强污染物的沉降,使污染物浓度下降。模型中气温和降水量与 PM_{2.5} 的负相关也有效解释了遵义市原始 PM_{2.5} 监测浓度在夏季水平较低的现象。

4 结 论

本研究利用遵义市 5 个常规空气质量监测站点的监测数据及其周围土地利用信息、气象因子构建了 PM_{2.5} 浓度模拟的 LUR 模型。结果显示,在遵义地区,影响 PM_{2.5} 浓度分布的变量为海拔、NDVI、平均气温、平均降水量。该模型较好地体现了 PM_{2.5} 空间分布的影响因素,能够用于个体暴露水平的估计,为遵义市环境流行病学研究提供了一个可用的暴露

评估模型。

利益冲突声明 本研究不存在任何利益冲突

参考文献

- [1] Huang JP, Zhou CH, Lee XH, et al. The effects of rapid urbanization on the levels in tropospheric Nitrogen dioxide and ozone over East China[J]. Atmospheric Environment, 2013, 77: 558 - 567.
- [2] 朱彤,万薇,刘俊,等.世界卫生组织《全球空气质量指南》修订解读[J].科学通报,2022,67(8):10.
Zhu T, Wan W, Liu J, et al. Interpretation of therevision of the World Health Organization's Global Air Quality Guidelines[J]. Chinese Science Bulletin, 2022, 67(8): 10. (In Chinese)
- [3] West JJ, Cohen A, Dentener F, et al. "What we breathe impacts our health: improving understanding of the Link between air pollution and health"[J]. Environmental Science & Technology, 2016, 50(10): 4895 - 4904.
- [4] Adar SD, Kaufman JD. Cardiovascular disease and air pollutants: evaluating and improving epidemiological data implicating traffic exposure[J]. Inhalation Toxicology, 2007, 19 Suppl 1: 135 - 149.
- [5] 赵兰慧,黎倩欣,袁晓霞,等.2017—2019 年广州市 PM_{2.5} 空气污染所致肺癌疾病负担研究[J].现代预防医学,2021,48(20): 3683 - 3688.
Zhao LH, Li QX, Yuan XX, et al. Study on burden of lung cancer caused by PM_{2.5} air pollution inGuangzhou from 2017 to 2019 [J]. Modern Preventive Medicine, 2021, 48(20): 3683 - 3688. (In Chinese)
- [6] Englert N. Fine particles and human health - - A review of epidemiological studies[J]. Toxicology Letters, 2004, 149(1/3): 235 - 242.
- [7] Briggs DJ, Collins S, Elliott P, et al. Mapping urban air pollution using GIS: a regression - based approach[J]. International Journal of Geographical Information Science, 1997, 11(7): 699 - 718.
- [8] 张钰娟,薛凤霞,白志鹏.时间调整土地利用回归模型用于孕期空气污染暴露评估的研究进展[J].中华预防医学杂志,2017, 51(3):265 - 276.
Zhang YJ, Xue FX, Bai ZP. Applying temporally-adjusted land use regression models to estimate ambient air pollution exposure during pregnancy [J]. Chinese Journal of Preventive Medicine, 2017, 51(3): 265 - 276. (In Chinese)
- [9] Pungler EM, West JJ, et al. The effect of grid resolution on estimates of the burden of ozone and fine particulate matter on premature mortality in the USA[J]. Air Quality, Atmosphere, & Health, 2013, 6(3): 10.
- [10] 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]. Atmospheric Environment, 2008, 42(33): 7561 - 7578.
- [11] 王伟业.武汉市孕妇孕期 NO₂ 暴露与胎儿生长及妊娠期糖尿病关系研究[D].武汉:华中科技大学,2017.
Wang WY. Study on the relationship between NO₂ exposure during pregnancy, fetal growth and gestational diabetes in Wuhan[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2017. (In Chinese)

(下转第 3701 页)

- Chinese General Practice, 2024, 27(2): 233 - 244, 252. (In Chinese)
- [15] 魏俏俏, 胡樱, 胡迪, 等. 基于 Joinpoint 分析 1990—2019 年中国归因于高 BMI 的 2 型糖尿病疾病负担[J]. 中国卫生统计, 2024, 41(1): 2 - 6.
Wei QQ, Hu Y, Hu D, et al. Analysis of the disease burden of type 2 diabetes attributable to high BMI in China from 1990 to 2019 based on joinpoint regression model[J]. Chinese Journal of Health Statistics, 2024, 41(1): 2 - 6. (In Chinese)
- [16] GBD 2021 Forecasting Collaborators. Burden of disease scenarios for 204 countries and territories, 2022 - 2050: a forecasting analysis for the Global Burden of Disease Study 2021[J]. Lancet, 2024, 403(10440): 2204 - 2256.
- [17] 朱家峰, 古建昌, 杨茂全, 等. 1990—2019 年中国归因于高盐饮食的缺血性心脏病疾病负担及其变化趋势分析[J]. 中国循环杂志, 2023, 38(3): 337 - 342.
Zhu JF, Gu JC, Yang MQ, et al. Analysis of the burden and changing trends of ischemic heart disease attributable to high salt diet in China from 1990 to 2019[J]. Chinese Circulation Journal, 2023, 38(3): 337 - 342. (In Chinese)
- [18] 赵明日, 宇传华. 基于年龄 - 时期 - 队列模型分析 1990—2019 年中国归因于高盐饮食的缺血性心脏病疾病负担趋势[J]. 公共卫生与预防医学, 2024, 35(3): 1 - 5.
Zhao MR, Yu CH. Trend and age - period - cohort analysis of heart disease deaths and DALY attributable to high - salt diets in Chinese residents in 1990 - 2019[J]. Journal of Public Health and Preventive Medicine, 2024, 35(3): 1 - 5. (In Chinese)
- [19] 健康中国行动推进委员会. 健康中国行动(2019—2030) [EB/OL]. [2024 - 08 - 21]. https://www.gov.cn/xinwen/2019-07/15/content_5409694.htm.
- The HealthyChina Action Promotion Committee. Healthy China initiative (2019 - 2030) [EB/OL]. [2024 - 08 - 21]. https://www.gov.cn/xinwen/2019-07/15/content_5409694.htm. (In Chinese)
- [20] 新华社. 中共中央国务院印发《“健康中国 2030”规划纲要》 [EB/OL]. [2024 - 08 - 21]. https://www.gov.cn/zhengce/2016-10/25/content_5124174.htm.
TheXinhua News Agency. The CPC Central Committee and The State Council issued the Outline of the "Healthy China 2030" Plan [EB/OL]. [2024 - 08 - 21]. https://www.gov.cn/zhengce/2016-10/25/content_5124174.htm. (in Chinese)
- [21] 史欣然, 陈天骄, 马军. 儿童青少年饮食行为模式的家庭影响因素分析[J]. 中华流行病学杂志, 2024, 41(8): 1291 - 1295.
Shi XR, Chen TJ, Ma J. Analysis of family influencing factors of dietary behavior patterns in children and adolescents[J]. Chinese Journal of Epidemiology, 2020, 41(8): 1291 - 1295. (In Chinese)
- [22] 李子悦, 方珈文, 林凯程. 1990—2019 年中国归因于高体质指数的 2 型糖尿病疾病负担分析与预测研究[J]. 中国全科医学, 2024, 27(9): 1126 - 1133, 1148.
Li ZY, Fang JW, Lin KC. Analysis and prediction study of type 2 diabetes disease burden attributed to high physical fitness index in China from 1990 to 2019[J]. Chinese General Practice, 2024, 27(9): 1126 - 1133, 1148. (In Chinese)
- [23] 曹维杰, 包玉倩. 碳水化合物和心血管疾病危险因素的研究进展[J]. 中华糖尿病杂志, 2021, 13(6): 633 - 636.
Cao WJ, Bao YQ. Advances in research on carbohydrate and risk factors of cardiovascular disease [J]. Chinese Journal of Diabetes Mellitus, 2021, 13(6): 633 - 636. (In Chinese)

收稿日期: 2024-05-29

(上接第 3690 页)

- [12] 吴健生, 谢舞丹, 李嘉诚. 土地利用回归模型在大气污染时空分异研究中的应用[J]. 环境科学, 2016, 37(2): 413 - 419.
Wu JS, Xie WD, Li JC. Application of land - use regression models in spatial - temporal differentiation of air pollution [J]. Environmental Science, 2016, 37(2): 413 - 419. (In Chinese)
- [13] Huang L, Zhang C, Bi J. Development of land use regression models for PM_{2.5}, SO₂, NO₂ and O₃ in Nanjing, China [J]. Environmental Research, 2017, 158: 542 - 552.
- [14] 汉瑞英, 陈健, 王彬. 利用 LUR 模型模拟杭州市 PM_{2.5} 质量浓度空间分布[J]. 环境科学学报, 2016, 36(9): 3379 - 3385.
Han RY, Chen J, Wang B. Application of LUR models for simulating the spatial distribution of PM_{2.5} concentration in Hangzhou, China [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2016, 36(9): 3379 - 3385. (In Chinese)
- [15] 祝桃. 基于 LUR 模型探讨重庆市主城区孕期大气污染物暴露与不良妊娠结局的关系[D]. 重庆: 重庆医科大学, 2021.
Kuang T. Investigate the relationship between exposure to air pollutants during pregnancy and adverse pregnancy outcomes by LUR model [D]. Chongqing: Chongqing Medical University, 2021. (In Chinese)
- [16] 吴健生, 廖星, 彭建, 等. 重庆市 PM_{2.5} 浓度空间分异模拟及影响因素[J]. 环境科学, 2015, 36(3): 759 - 767.
Wu JS, Liao X, Peng J, et al. Simulation and influencing factors of spatial distribution of PM_{2.5} concentrations in Chongqing [J]. Environmental Science, 2015, 36(3): 9. (In Chinese)
- [17] 杜彦彦, 黄青. 河南省 PM_{2.5} 时空分布特征及其与植被覆盖度的关系[J]. 生态环境学报, 2019, 28(11): 2257 - 2265.
Du YY, Huang Q. Spatial and temporal variation characteristics of PM_{2.5} and its relationship with vegetation fraction in Henan province [J]. Ecology and Environment Sciences, 2019, 28(11): 2257 - 2265. (In Chinese)
- [18] 魏文静, 谢炳庚, 周楷淳, 等. 2013—2018 年山东省大气 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 污染时空变化及其影响因素[J]. 环境工程, 2020, 38(12): 103 - 111.
Wei WJ, Xie BG, Zhou KC, et al. Research on the temporal and spatial variations of atmospheric PM_{2.5} and PM₁₀ and the influencing factors in Shandong, China during 2013—2018 [J]. Environmental Engineering, 2020, 38(12): 103 - 111. (In Chinese)
- [19] 黄鹏. 湖南省 PM_{2.5} 时空特征及其影响因素研究[D]. 湘潭: 湖南科技大学, 2019.
Huang P. Spatial - temporal characteristics of PM_{2.5} and its influencing factors in Hunan province [D]. Xiangtan: Hunan University of Science and Technology, 2019. (In Chinese)

收稿日期: 2024-05-27