

多传感器融合下道路交通车辆 碳排放量实时监测方法

朱云波[†], 马聪, 王晋, 付心, 丁怡然

(云南省交通科学研究院有限公司, 云南 昆明 650011)

摘 要:面对日趋复杂的道路交通情况,在车辆碳排放量监测时,容易受到干扰因素影响,导致监测结果不精准,提出了多传感器融合下道路交通车辆碳排放量实时监测方法。使用多传感器阵列采集车辆碳排放量信息,利用卡尔曼滤波法计算采集信息各个样本与融合中心欧式距离,以该距离为半径画圆,将全部采集的车辆碳排放量信息融入其中。使用多传感器融合技术的卡尔曼滤波法构建监测点滤波处理模型,结合多传感器融合框架感知多维数据,剔除噪声后监测点预测值。根据线性微分方程累减白化方程时间,构建基于多传感器融合技术的监测模型。根据多传感器双层融合过程,实现车辆碳排放量的实时监测。由实验结果可知,该方法监测结果与实际统计数据存在最大为0.05 Mt的误差,监测所需最短时间为0.1 s,为交通车辆绿色通行提供技术支持。

关键词:多传感器融合;道路交通;碳排放量;实时监测

中图分类号:TP212.9

文献标识码:A

Real Time Monitoring Method for Carbon Emissions of Road Traffic Vehicles Based on Multi-sensor Fusion

ZHU Yunbo[†], MA Cong, WANG Jin, FU Xin, DING Yiran

(Yunnan Science Research Institute of Communication & Transportation, Kunming, Yunnan 650011, China)

Abstract: Faced with the increasingly complex road traffic situation, when monitoring the carbon emissions of vehicles, it is easy to be affected by confounding, resulting in inaccurate monitoring results, a real-time monitoring method for carbon emissions of road traffic vehicles under multi-sensor fusion is proposed. The multi-sensor array is used to collect the vehicle carbon emission information, and the Kalman filter method is used to calculate the European distance between each sample of the collected information and the fusion center. The distance is used as the radius to draw a circle to fuse all the collected vehicle carbon emission information. The Kalman filter filtering method of multi-sensor fusion technology is used to build the monitoring point filtering processing model, and the multi-sensor fusion framework is used to sense multidimensional data, and the predicted values of monitoring points after removing the noise. According to the linear differential equation to accumulate the whitening equation time, a monitoring model based on multi-sensor fusion technology is constructed. Based on the dual layer fusion process of multiple sensors, real-time monitoring of vehicle carbon emissions is achieved. According to the experimental results, there is a maximum error of 0.05 Mt between the monitoring results of this method and the actual statistical data, and the minimum monitoring time is 0.1 s, providing technical support for green traffic for vehicles.

Key words: multi-sensor fusion; road traffic; carbon emissions; real time monitoring

伴随着中国经济高速发展,二氧化碳排放已成为全球第一,其节约能源和减少温室气体排放的压力非常大。对其进行深入、系统的研究非常有必要。因此,如何准确地估算出碳排放是当前国际上的一个热门课题。

现有碳排放监测方法主要有文献[1]提出的 EKC 视角下监测方法,通过引入制度因素,再一次测量 EKC 曲线,利用 GM(1,1) 灰预测方法,对 EKC 曲线发生拐点的时刻进行预测,并对汽车碳排放进行监控;文献[2]提出了基于全生命周期理论的碳排放核算方法,基于生命周期视角,运用列表方法与排放因子方法,建立道路施工过程中的碳排放核算模式。通过建立的碳排放测算模式,实现了对企业的碳排放的会计核算;文献[3]提出了基于精细单元碳收支核算方法以网格为计算单位,采用精准碳平衡计算方法,实现对区域尺度上的碳平衡计算,为区域尺度上的土地利用优化提供科学依据。

综上所述,当前尽管人们对碳排放量的计量方式进行了很多的探讨,取得了一些成果,但是仍然存在一些缺陷。高精度的目标常常是部分的、不完整的;传统的碳排放测算方法多采用年尺度方式,不能体现其季节性特征。为此,提出了多传感器融合下道路交通车辆碳排放量实时监测方法。

1 基于多传感器融合的车辆碳排放量信息采集与融合

将多传感器安装在路面桥面上,可以收集移动车辆的长、宽、高、速度等数据。当多传感装置同时发出超声波时,其声波的波束并非完全沿同一方向,而是呈圆锥状,其传播角度是多传感装置的一项重要性能。该方法使用了多传感器进行同步数据收集,为了防止超声信号互相影响,选取多个光束角度低于度数的探头,而邻近或接近的探头则使用多个探头^[4]。

利用多传感器阵列采集车辆碳排放量信息示意图,如图 1 所示。

多传感器阵列的每一个采集模块都对被测量的对象展开多周期的采集,多传感器融合指的是运用计算机技术,从多传感器或者多源数据中,按照一种特殊的标准,对这些数据进行自动的分析和综合,为了达到所需要的决策和估计,需要进行的信

息处理程序^[5]。针对我国城市碳排放监测数据具有较强的不确定性,采用卡尔曼滤波器多源信息融合方法,实现对底层、实时、动态多源信息的融合。

计算采集的信息中各个样本与融合中心欧式距离,公式为:

$$d(x_k, o_l) = \sqrt{\sum_{i=1}^k (x_k - o_l)^2} \quad (1)$$

式(1)中, x_k 表示 k 个采集样本; o_l 表示 l 个融合中心^[6]。

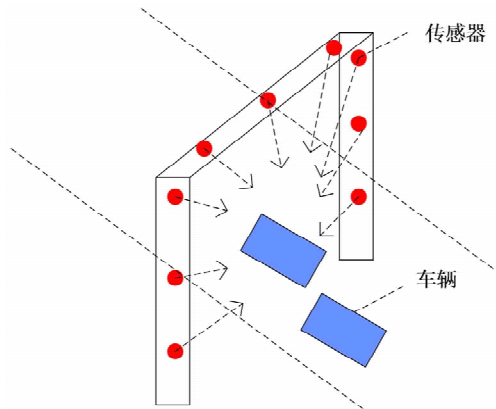


图 1 多传感器阵列采集车辆碳排放量信息示意图

首先,将其划分为欧氏距离最近的一类,再对每一类下的样本点取均值,从而获得一组新的多源数据集。重复这个过程,直至标准方差函数达到最小值。以该距离为半径画圆,将全部采集车辆碳排放量信息融入其中。

2 基于多传感器融合的碳排放量实时监测

2.1 基于多传感器融合技术的监测模型构建

使用多传感器融合技术的卡尔曼滤波法构建了监测点滤波处理模型,如下所示:

$$x_z = \mathbf{R}_z x_{z-1} + \gamma_{z-1} a_{z-1} \quad (2)$$

式(2)中, $\mathbf{R}_z$ 表示 z 阶的采集与融合车辆碳排放量信息转移矩阵; γ_z 表示 z 阶的动态干扰因素矩阵; x 表示采集与融合的车辆碳排放量信息; a 表示动态干扰因素^[7-9]。

结合如图 2 所示的多传感器融合框架,感知多维数据。

通过图 2 所示感知框架,可得到剔除噪声后的监测点预测值 x'_z 。结合该值,构建动态卡尔曼滤波的线性微分方程:

$$M = \frac{dx'_z(z)}{dt} + \lambda x'_z(z) \quad (3)$$

式(3)中, λ 表示线性待定常数; t 表示监测时间^[10]。根据上述线性微分方程累减白化方程时间,构建基于多传感器融合技术的监测模型,如下所示:

$$f(x) = (1 - e^t) \left[x'_z(z) - \frac{M}{\lambda} \right]$$

(4)

使用多传感器融合的动态卡尔曼滤波方法,能够为碳排放量实时监测提供相关数据。

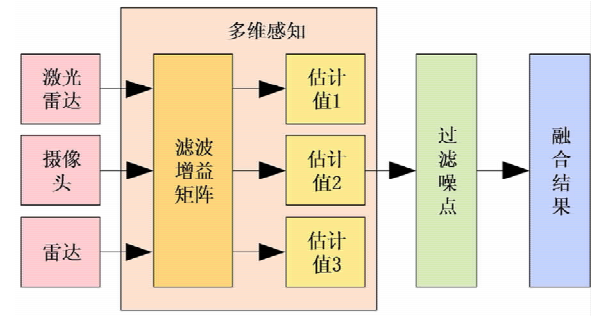


图2 基于多传感器融合框架的多维数据感知

2.2 基于监测模型的碳排放量实时监测

为了便于数学表达,将每一个监测点看作一个移动的对象,那么监测过程就可以看作监测一个对象的运动轨迹,其位移过程可以用牛顿运动第二定律来描述。当被观测点作为观测量时,利用动态卡尔曼滤波器对观测数据进行处理,得到了观测数据。对于类别间的离散性越小,类别间的距离越大,分类效果越好。在此基础上,根据上述算法,选取一个初始的融合中心,将其组合在一起,再根据组合后的图像,计算出其边缘系数^[11]。利用下列公式,计算出融合后的剖面系数及采样剖面:

$$S(z) = \frac{d_a - d_b}{\max \{d_a, d_b\}}$$

(5)

式(5)中, d_a 表示样本 x 到同簇其他样本距离; d_b 表示其他簇包含的所有样本平均最小距离^[12]。因此,在融合结果类内相似度越大,类间相似度越小时,轮廓就会越大,融合结果就会越好,这样就会选择使得轮廓值最大的分类值作为最佳融合个数。

多传感器信息融合受样本参数选取的影响较大,传统的基于经验或随机选取少数天数的有代表性的数据,很难实现对汽车尾气信息的准确融合,也很难实现碳排放量的实时、高精度监测。因此,将日数据集作为一个单元进行初步融合,根据融合的结果,从各个群中选择了与融合中心最接近的日数据集构造出典型日样本数据集,并将选定所有典

型日样本中数据融合,如图3所示。

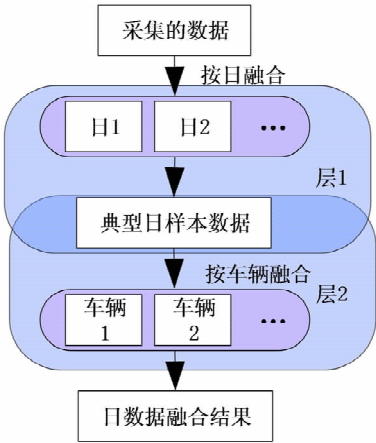


图3 多传感器双层融合

由于日数据集中汽车种类数量的变化,或者产业结构周期性变化,导致融合数量、中心发生变化,所以根据最初代表性天数及融合数量和中心,对全部日数据集进行再融合,准确地判断出每个聚类所含日数据的时间范围。将每个聚类中与融合中心关系较好的日数据集,再将选定的代表性天数集合与各个用电客户进行再融合。

道路交通车辆碳排放量指的是燃料燃烧产生的二氧化碳排放量,其大小是由燃料二氧化碳排放因子和燃料活动水平决定的。

燃料二氧化碳排放因子,计算公式为:

$$A_i = C_i \cdot O_i \cdot \frac{44}{12}$$

(6)

式(6)中, C_i 表示第 i 种交通工具燃油每热量中的碳含量; O_i 表示第 i 种汽车燃油的碳氧化速率; $\frac{44}{12}$ 表示二氧化碳和碳的相对分子质量比^[13-14]。

燃料活动水平,计算公式为:

$$\varphi_i = Q_i \cdot W_i$$

(7)

式(7)中, Q_i 表示燃料发热量; W_i 表示燃料消费量。

结合上述两个参数,计算碳排放量,公式为:

$$E_i = \sum \varphi_i \cdot A_i$$

(8)

按照多传感器融合的自变量和因变量之间复杂关系,使用线性回归方法描述不同车辆和一组碳排放量之间的关系,线性回归方程可表示为:

$$y = \alpha_0 + \alpha_1 x_1 + \alpha_2 x_2 + \cdots + \alpha_n x_n + \epsilon$$

(9)

式(9)中, α_n 表示 n 次采集的碳排放量实时监测模型参数; x_n 表示碳排放变量; ϵ 表示干扰变

量。使用多传感器融合过程中,采用均方误差衡量实时监测的效果^[15]。均方根误差计算公式为:

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (y_a^j - y_b^j)^2$$

(10)

式(10)中, y_a^j 、 y_b^j 分别表示第 j 个监测值和真实值之间的差异。该数值越小,说明实时监测效果越好。

3 实验

3.1 测量实验系统

利用 GSM 公网与车辆展开双向信息传递,但 GSM 传输速率较慢,会降低大量城市车辆碳排放量数据的传输速度和传输效率。为了有效促进车辆碳排放量数据信息的双向传递,更迅速地传输车辆的实时位置、速度和运行状态等信息,并且保障数据传输的完整性与可靠性,选用一种低延迟、高传输速率的移动网络技术即 5G 移动网络技术,与具有点对点通信和面向连接特征的数据传输协议即 TCP 数据传输协议,实现车辆碳排放量数据的高速、稳定传输。

因此,在运用 GSM 公共网络的基础上,GPS 对车辆运行过程的总体状况进行监视,获得车辆的每个子行驶距离和怠速时段,完整的城市道路交通碳排放量测量实验系统,如图 4 所示。

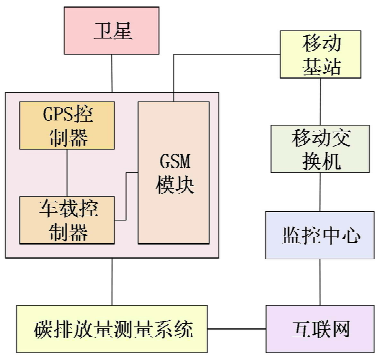


图 4 测量实验系统

全部资料经由 GSM 公用网络传输至控制中心,并储存于资料库。然后对在这个城市中每辆车的行驶距离和怠速时段进行了计算,得到了车辆的行驶距离和怠速时间。最后就可以从交通运输部、环境部得到各种车型的相关资料,如各种车型的能耗、二氧化碳等。

3.2 实验数据分析

截至 2021 年 3 月底,某省高速公路通车总里

程超过 1.5 万公里,统计某省高速公路全路网碳排放量在 2020 年 10 月—2021 年 3 月的数值,如表 1 所示。

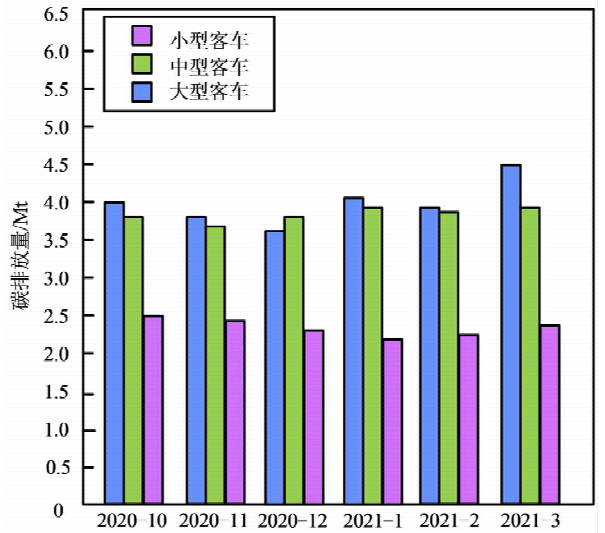
表 1 不同类型车辆碳排放量

时间	车辆类型	碳排放量/Mt
2020 年 10 月	小型客车	1.5
	中型客车	3.0
	大型客车	4.5
2020 年 11 月	小型客车	1.4
	中型客车	2.7
	大型客车	5.0
2020 年 12 月	小型客车	1.0
	中型客车	3.3
	大型客车	4.0
2021 年 1 月	小型客车	1.2
	中型客车	2.6
	大型客车	4.5
2021 年 2 月	小型客车	1.1
	中型客车	3.5
	大型客车	5.0
2021 年 3 月	小型客车	1.1
	中型客车	3.2
	大型客车	5.5

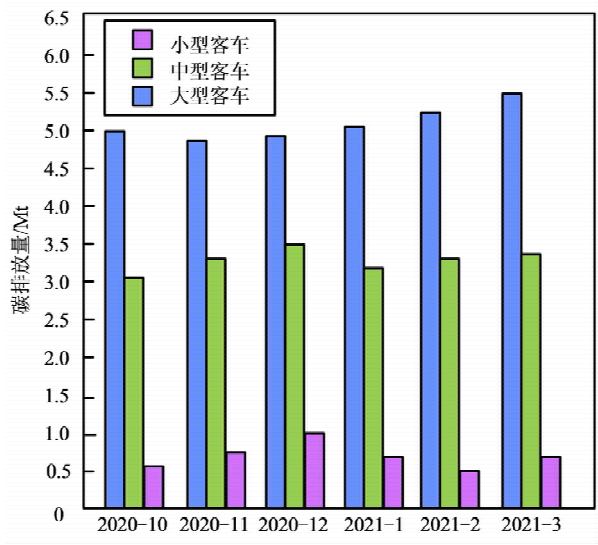
将表 1 所示数据作为标准数据,展开详细实验分析。

3.3 结果对比分析

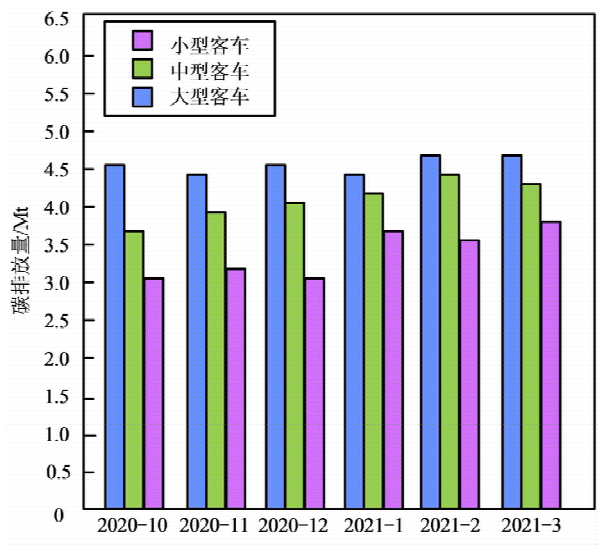
使用 EKC 视角下监测方法、基于全生命周期理论的碳排放核算方法、基于精细单元碳收支核算方法和多传感器融合监测方法,对比分析碳排放量监测结果,如图 5 所示。



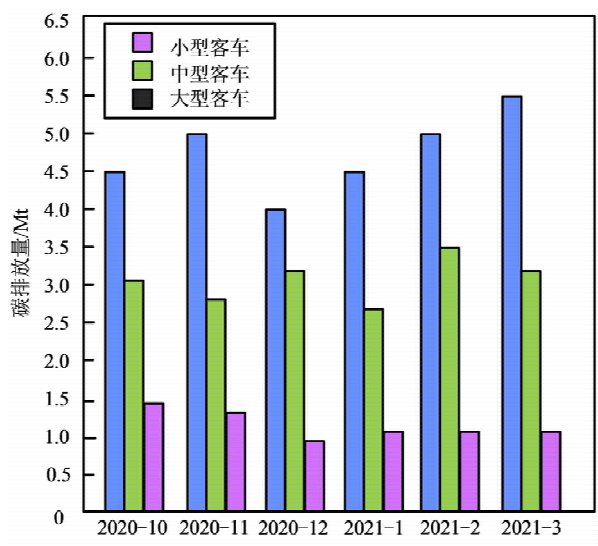
(a)EKC 视角下监测方法



(b)基于全生命周期理论的碳排放核算方法



(c)基于精细单元碳收支核算方法



(d)多传感器融合监测方法

由图 5(a)可知,使用该方法与实际统计结果数值均不一致,分别在 2020 年 12 月、2021 年 1 月、2020 年 11 月监测的大型客车碳排放量与实际统计结果存在最大误差,对应的数值分别为 1.0 Mt、1.2 Mt、1.3 Mt。

由图 5(b)可知,使用该方法与实际统计结果数值均不一致,分别在 2020 年 12 月、2021 年 1 月、2020 年 10 月监测的大型客车碳排放量与实际统计结果存在最大误差,对应的数值分别为 1.0 Mt、0.5 Mt、1.0 Mt。

由图 5(c)可知,使用该方法与实际统计结果数值均不一致,分别在 2021 年 3 月、2021 年 1 月、2021 年 3 月监测的大型客车碳排放量与实际统计结果存在最大误差,对应的数值分别为 0.8 Mt、1.5 Mt、2.8 Mt。

由图 5(d)可知,使用所研究方法在 2020 年 10 月与实际统计数据存在最大为 0.01 Mt 的监测误差,在 2020 年 12 月与实际统计数据存在最大为 0.05 Mt 的监测误差。其余时间段内,监测结果与实际统计数据一致。

综合图 5 不同方法碳排放量检测对比分析结果可知,EKC 视角下监测方法、基于全生命周期理论的碳排放核算方法以及基于精细单元碳收支核算方法的大型客车碳排放量计算结果与实际统计结果数值不一致,计算结果均存在较大误差。而多传感器融合监测方法在 2020 年 10 月、2020 年 12 月与实际统计数据存在最大为 0.01 Mt、0.05 Mt 的监测误差,其余时间段内,监测结果与实际统计数据一致。这主要是由于多传感器融合监测方法使用多传感器融合技术的卡尔曼滤波法构建了监测点滤波处理模型,可以实现碳排放量的精准检测。由此可知,多传感器融合监测方法具有较好的实际应用效果。

为了验证监测方法能够实现实时监测的目的,再次对比四种方法监测所需时间,如表 2 所示。

表 2 不同方法监测所需时间对比分析/s

时间	EKC 视角下 监测方法	全生命 周期理论	精细单元 碳收支 核算	多传感器 融合监测
2020 年 10 月	4.4	6.1	5.8	0.2
2020 年 11 月	4.5	6.0	5.5	0.3
2020 年 12 月	5.1	6.7	5.4	0.2
2021 年 1 月	5.0	6.6	5.2	0.4
2021 年 2 月	4.3	6.3	5.0	0.3
2021 年 3 月	4.9	6.2	4.9	0.1

图 5 不同方法碳排放量监测结果对比分析

由表 2 可知,使用所研究方法在不同时间段监测所需时间均未超过 0.5 s,检测所需时间最短,其余方法均较长。这主要是由于所研究方法利用动态卡尔曼滤波器对观测数据进行处理,有效控制类别间的离散性,增大类别间的距离,实现碳排放量的实时监测。由此可知,所研究方法在碳排放量实时监测方面具有可靠性与有效性。

4 结 论

提出了多传感器融合下道路交通车辆碳排放量实时监测方法,通过对多感知信息的协同、组合和互补,克服外部环境和部分传感器失效等因素对检测结果的干扰,大幅提升多感知信息的鲁棒性。在此基础上,通过实验结果可知,所提出的监测算法具有精准监测效果,并且也证明了在实时监测方面是有效的。

参考文献

[1] 许华,王莹. EKC 视角下陕西经济增长与碳排放量实证研究[J]. 调研世界,2021(1):54—59.

[2] 方海,曹子龙,凤振华,等. 基于全生命周期理论的公路建设期碳排放核算方法及实证研究[J]. 公路工程,2021,46(1):92—97+124.

[3] 封雅静,翟亮,桑会勇,等. 基于精细单元碳收支核算及变化分类方法[J]. 地球信息科学学报,2023,25(3):468—478.

[4] 王祎,王翔,郑建颖,等. 基于多传感器融合感知的车辆微观轨迹自动采集方法[J]. 公路交通科技,2023,40(4):160—169.

[5] 林旭坤,张扬,罗芷晴,等. 高速公路网车辆碳排放测算方法研究[J]. 华南理工大学学报(自然科学版),2022,50(9):22—28.

[6] 赵小曼,张帅,袁长伟. 中国交通运输碳排放环境库兹涅茨曲线的空间计量检验[J]. 统计与决策,2021,37(4):23—26.

[7] 程瑞芬,魏鑫磊,夏海英. 基于车辆安全配置的道路运输车辆运行安全风险评估[J]. 公路交通科技,2023,40(5):193—201.

[8] 刘浩,李艳霞,于凤菊,等. 京津冀地区道路碳排放量的演变及空间分布[J]. 中国环境科学,2022,42(10):4556—4564.

[9] 孟祥晨,李源渊. 沥青路面建设期拌和阶段能耗与碳排放量化研究[J]. 公路工程,2022,47(5):94—101.

[10] 陈赞,沈浩,王佳裕,等. 基于“能源大脑”的城市区域碳排放实时计算方法[J]. 上海交通大学学报,2022,56(9):1111—1117.

[11] 刘科,杨兴森,王太,等. 基于实时监测的燃煤机组碳排放特性研究[J]. 热力发电,2022,51(10):47—53.

[12] 王益民,王静平,仇丽. 基于数字孪生技术的变电站碳排放监测平台应用[J]. 工业建筑,2021,51(12):207.

[13] 王剑,关士钦,严维斌,等. 青海省“三生用地”时空演化特征及其碳排放效应[J]. 环境科学与技术,2021,44(4):212—218.

[14] 余柳. 国际视角下城市交通碳中和策略与路径研究[J]. 城市交通,2021,19(5):19—25+81.

[15] 吉雪强,刘慧敏,张跃松. 中国省际土地利用碳排放空间关联网络结构演化及驱动因素[J]. 经济地理,2023,43(2):190—200.