

碳中和战略下哈尔滨市空气污染物时空动态研究

——基于 Holt-Winters 时间序列模型

欧阳迪, 崔佳

(哈尔滨师范大学管理学院, 哈尔滨 150025)

摘要: 基于哈尔滨市空气污染物共 39 个月数据, 利用 Holt-Winters 指数平滑法, 探究其时空变化特征。结果显示, SO₂ 于 2021 年浓度均值同比 2020 年减少 34.25%、CO 浓度同比减少 9.14%、NO₂ 浓度同比减少 29.36%、PM_{2.5} 则呈现出市内道外区和市郊呼兰区双高的空间特点。其中 SO₂ 与 CO 浓度随季节变化明显, 根据 Person 分析表明两者相关性较高。SO₂、CO、NO₂ 和 PM_{2.5} 浓度虽有季节性反复, 但年均值在逐年降低, 整体呈螺旋式下降。根据 H-W forecast 分析时空变化趋势表明, 在 2022 年下半年 SO₂ 与 CO 浓度预测值比同期上涨 17.03%、PM_{2.5} 相较同期上涨 8.63%、NO₂ 预测值则下降 8.75%。合理利用时间序列预测可以使相关部门更加精准、有效地对未来空气污染进行“预治理”。

关键词: 空气污染; 碳中和; 时间序列; 能源转型

中图分类号: X511

文献标志码: A

DOI: 10.16803/j.cnki.issn.1004-6216.2022070050

Temporal and spatial dynamics of air pollutants in Harbin under the Carbon Neutral Strategy ——Based on Holt-Winters time series model

OUYang Di, CUI Jia

(College of Management, Harbin Normal University, Harbin 150025, China)

Abstract: Based on the 39-month data of air pollutants in Harbin, the Holt-Winters exponential smoothing method was used to investigate the temporal and spatial variation characteristics. The results showed that the average concentration of SO₂ in 2021 decreased by 34.25%, CO concentration decreased by 9.14%, NO₂ concentration decreased by 29.36% comparing with that in 2020, and PM_{2.5} showed the spatial characteristics with a high level in the outer area of the city center and a high level in the suburban Hulan District. Among them, the concentrations of SO₂ and CO varied significantly with seasons, and the correlation between them was high according to Person analysis. Although the concentrations of SO₂, CO, NO₂, and PM_{2.5} had seasonal repetitions, the annual average values were decreasing year by year, and the overall decline was spiraling. According to the analysis of the temporal and spatial trends of the H-W forecast, in the second half of 2022, the predicted values of SO₂ and CO concentrations increased by 17.03% comparing with the same period, PM_{2.5} increased by 8.63%, and the predicted NO₂ decreased by 8.75%. A reasonable use of time series forecasting model could enable relevant departments to "pre-treat" future air pollution more accurately and effectively.

Keywords: air pollution; carbon neutrality; time series; energy transition

CLC number: X511

2020 年 9 月, 我国在联合国大会提出碳中和愿景目标, 在积极响应世界气候变化保护的同时, 城市除 CO₂ 以外的主要污染气体的浓度也在大环境影响下发生变化。以哈尔滨为代表的传统重工业型城市空气污染物变化非常显著, 探究其中的时空变化关系对解决基础空气污染物至关重要。空气中的 SO₂ 可以使人 and 动物呼吸道狭窄, 造成呼吸系统疾病^[1]; NO₂ 则是大气中形成硝酸盐颗粒物的主

要原料, 与粉尘共同存在形成酸雨; 一氧化碳会使人组织细胞缺氧, 严重导致患者窒息死亡^[2]。因此硫化物、氮化物和可吸入悬浮颗粒等污染物的防治工作不能放下, 甚至比 CO₂ 问题更急需“硫中和”“氮中和”。

起初对空气污染物的研究, 国内外学者并未涉及过多的数理领域, 往往采用地理信息系统方式研究污染物浓度变化。近年来随着学科的交叉融合,

收稿日期: 2022-07-29 录用日期: 2022-08-16

引用格式: 欧阳迪, 崔佳. 碳中和战略下哈尔滨市空气污染物时空动态研究——基于 Holt-Winters 时间序列模型[J]. 环境保护科学, 2023, 49(2): 112-119.

越来越多的数理统计方法应用到了生态、环境和地理方向上,其中就包括时间序列分析。LAYTH et al^[3]在1988年于控制图理论中应用时间序列,将观测值拟合,残差序列相互独立,满足基本假设前提为后续学者使用时间序列分析提供了方法示范。但大气污染存在滞后性,因此时间序列既要反应自变量的变化,还要呈现效应的时间结构^[4]。由RAO et al^[5]和DAYANA et al^[6]提出的KZ(Kolmogorov-Zurbenko)研究法在时间序列应用中,观测对象是O₃,并没有应用到SO₂、NO₂和PM_{2.5}等污染物。国内学者杨新平等^[7]以楚雄市空气污染指标为研究对象,利用时间序列分析建立了SO₂、NO₂和PM₁₀的ARIMA时间序列模型,拟合值回归情况良好。王莉等^[8]发现SARIMA模型较完整地拟合了最近10年甘肃省兰州市空气污染指数变化趋势结果接受原假设。任婉侠等^[9]以京沪津渝4个特大城市为研究对象,采用复数小波对4大城市的空气污染指数进行了多时间尺度分析。这里的小波分析能反映时间序列的局部特征^[10],对信号有多维分析的优势^[11]。范竣翔等^[12]将空气污染物模型从研究模型概括性地分为2大类,第一类基于污染物自身的物理化学性质;第二类基于数理统计,并验证了循环神经网络模型(RNN)的可行性。国内的学者对空气质量研究的对象比较全面,但少有HW指数平滑法,针对空气污染这种既有趋势性,又有季节性的观测数据仍相对空白。

针对空气污染的治理与政策,我国专家学者确定了2条技术路径:一是能效提高,加大资源利用效率,改革、更新原有能源设备;二是零碳能源技术,寻找、研究可替代的清洁,环保能源,代替过去的高污染能源。但全社会经济系统零排放能否实现,还要取决于关键技术突破、技术经济性等因素影响^[13]。空气污染的治理应该伴随着严谨的统计学量化模型,合理的时间序列预测可以为空气治理提供必要的理论基础,然而目前国内关于空气治理政策建议更多是基于现存的空气问题,未有效地结合统计学应用随机过程或时间预测,针对性治理还有待提高。

1 研究方法 with 数据来源

1.1 研究方法

Holt-Winters方法是一种时间序列分析和预报

方法,这种方法实际上属于平滑方法,在1960年发展起来,更适合有趋势性、周期性的时间序列,并逐渐成为一种经典的预测方法^[14]。无论是自回归模型AR(p)、移动平均模型MA(q)、自回归滑动平滑ARMA(p, q)模型或者对ARMA进行d次差分后的ARIMA模型,都需要在使用模型之前,进行时间序列判断^[15]。AR模型所需变量少,但会受到相关限制即要求自变量必须是自相关的,且系数>0.5才有效否则预测将偏离准确值。而MA模型加大滑动平均法期数会更利于平滑波动效果,但会使预测值对往期数据变动不灵敏^[16]。指数平滑公式原理见式(1~5):

$$S_0 = x_0 \quad (1)$$

$$B_0 = \frac{1}{L} \left(\frac{x_{L+1} - x_1}{L} + \frac{x_{L+2} - x_2}{L} + \dots + \frac{x_{2L} - x_L}{L} \right) \quad (2)$$

$$S_t = \alpha(x_t - C_{t-L}) + (1 - \alpha)(S_{t-1} + B_{t-1}) \quad (3)$$

$$B_t = \beta(S_t - S_{t-1}) + (1 - \beta)B_{t-1} \quad (4)$$

$$C_t = \gamma(x_t - S_{t-1} - B_{t-1}) + (1 - \gamma)C_{t-L} \quad (5)$$

式中: x 为观测样本; B 为一次简单平滑值; L 为观测样本期数; B_t 为时间预测 t 趋势平滑值; C_t 为时间 t 周期平滑值; S_t 为时间 t 三阶指数平滑值; α 为数据平滑因子; β 为趋势平滑因子; γ 为季节平滑因子。指数平滑法或Holt-Winters能够避免移动平均法带来的问题^[17],有几种不同形式:一次指数平滑法针对没有趋势性,没有季节性的时间序列^[18];二次指数平滑法针对有趋势但没有季节性的序列;三次指数平滑法针对有趋势也有季节性的序列^[19], (3)式即为在一次简单指数平滑的基础上通过(4)式调整了 $B(t)$ 趋势性与(5)式 $C(t)$ 周期性。

Holt-Winters可以更加有针对性分析趋势性与周期性的时间序列,更适合空气污染这种受季节性、人生存习惯规律等影响的样本。我们发现越近的历史信息,其所占权重也越大并且权重按指数级递减,数据越老权重则越小。本文还利用ArcGis绘制污染浓度图、R软件计算数据模型、结合文献分析与专家研讨等多种形式开展工作。

1.2 研究数据来源

采集4项主要大气污染物(PM_{2.5}、SO₂、NO₂和CO)2019年1月—2022年3月共39个月的逐月监测数据,共涉及哈尔滨市27个区县级监测站。监测站数据来源于黑龙江省政府信息公开网环境

信息(<http://sthj.hlj.gov.cn/xxgkhjgl/index.jhtml>)。煤炭消耗情况数据来源于《中国产业研究院数据库》,

对个别月份缺失数据采用插值法补空。4 种空气污染物的时间分布图, 见图 1。

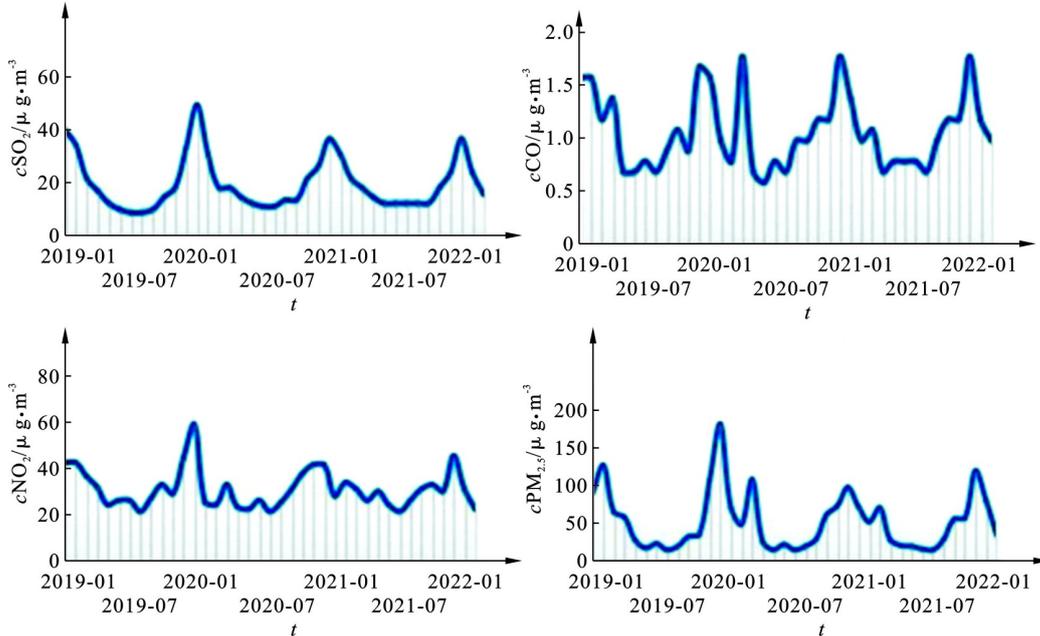


图 1 2019 年 1 月—2022 年 3 月哈尔滨市空气质量检测数据

Fig. 1 Air quality monitoring data of Harbin(2019-01—2022-03)

4 种主要空气污染物浓度呈现出 1 月高, 6—7 月低的特点。污染物排放高的时间集中在冬季与初春, 其原因可能是哈尔滨的冬季时间相对较长, 每年的 10 月至次年 4 月需要燃烧大量的煤等化石能源来供暖。而 6、7 两月受到季风以及大量林业资源净化作用的影响, 空气污染物浓度达到每年最低, $PM_{2.5}$ 也更难在空气中形成气溶胶, 浓度降低更加明显。

2 空气质量时空分析

2.1 空气污染物的离散程度

由于 4 种污染物之间的单位不同, 为了计算离散程度选用变异系数 ($cv = \sigma/\mu$) 作为变量, $PM_{2.5}$ 的变异系数达到 0.74, 受时间因素变动幅度最为剧烈。离散程度最小的是 NO_2 变异系数仅有 0.26, 受时间因素变动相对平稳, 说明季节性对 NO_2 的影响最不明显, 见表 1。

表 1 2019—2022 a 空气污染物数据离散情况

Table 1 Dispersion of air pollutant data (2019—2022)

指标	$PM_{2.5}$	NO_2	SO_2	CO
标准差(δ)	32.87	8.47	8.46	0.35
均值(μ)	44.41	32.05	17.44	1.08
变异系数(cv)	0.74	0.26	0.49	0.32

2.2 空气污染物的拟合估计

由于空气污染受到季风气候、冬季供暖和焚烧秸秆等周期性影响, 因此这里采用 Holt-Winters 指数平滑法, 不是 ARIMA 自回归移动平均模型^[20]。将数据平均后移, 前 4 个数值为 NA, Time 坐标轴的初始值变为 2019 年 5 月。进行 forecast 预测前先将数据进行拟合估计, 观察拟合线上的点与实际观测值的重合度, 该操作将影响到预测数据的精准度。

Holt-Winters 模型对原始数据的预测结果, 基本贴合只是稍有滞后, 见图 2 和图 3。

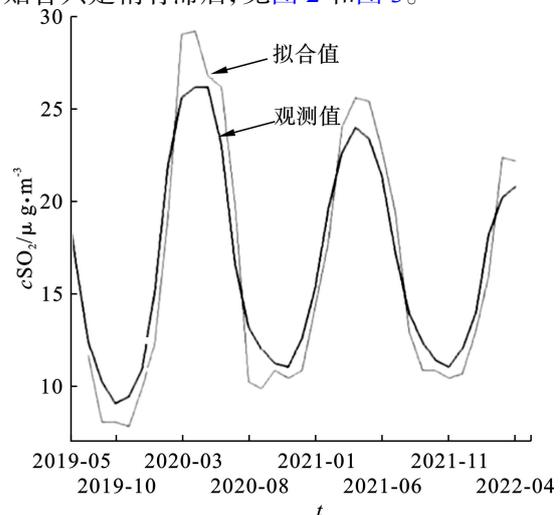


图 2 SO_2 原始数据拟合

Fig. 2 SO_2 original data source fitting

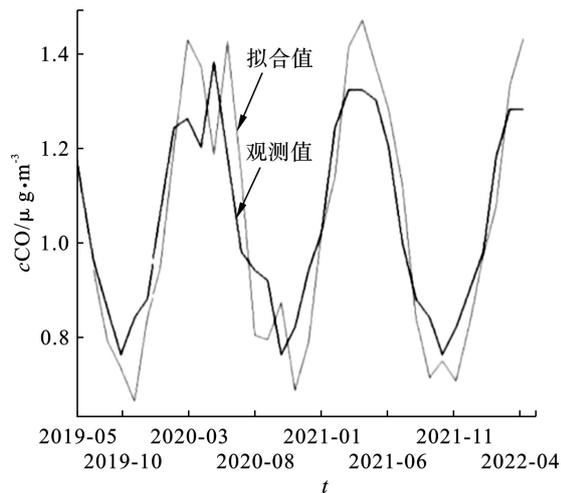


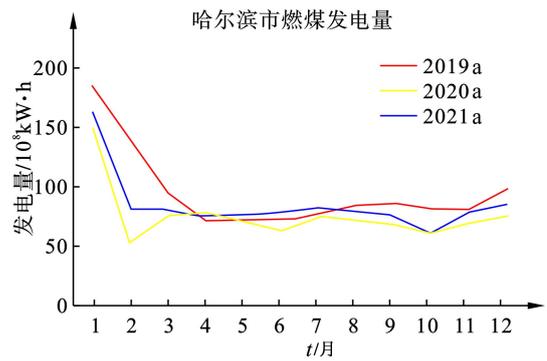
图3 CO原始数据拟合

Fig. 3 CO original data source fitting

在1月达到峰值之后 SO_2 浓度下降更为剧烈,拟合线的坡度更加陡峭,这与硫化物在低温空气中不稳定有一定关系。图3中CO拟合均值拟合值在大部分时间拟合较好基本贴合观测值,但在每年11月、12月明显低于观测均值26%。从整个时间线来看CO的变化区间也相较其他污染物更小,位于 $0.6 \sim 1.5 \text{ mg/m}^3$ 。

2.2.1 CO与 SO_2 时空变化特点 CO与 SO_2 总体趋势上相关性更高,假设空气中的CO与 SO_2 浓度是正相关的,但两者并没有明确的因变量与自变量关系,很可能是产生一种污染物的同时附带了另一种污染物。为验证假设,利用R语言做Pearson相关分析,可得出CO与 SO_2 相关系数 $r=0.7639$,两者浓度显著相关。有学者认为影响城市 SO_2 与CO浓度主要驱动因素包括煤炭燃烧、有色金属冶炼和汽车尾气排放等^[21],并对煤耗率、该地区是否重点环保减排城市和车流量等因素做了线性回归模型,由此发现 SO_2 减排重点城市规制对相关地区煤炭发电企业的年度发电量有显著负面影响^[22],即重点减排城市煤炭发电企业采取了通过降低产出减少排放的方式^[23]。有色金属冶炼并不是哈尔滨市的主要产业,且相关工业工厂屈指可数,全市有色金属冶炼相关公司共12家,其中只有2家厂址在哈尔滨市内。所以本文认为哈尔滨市空气中 SO_2 与CO污染物,主要源于发电、供暖等能源产业的煤炭燃烧。

哈尔滨市2019年11月—2021年8月燃煤发电量,见图4。

图4 2019年1月—2021年12月哈尔滨市燃煤发电量
Fig. 4 Coal-fired power generation in Harbin from 2019-01—2021-12

2020年11月、12月燃煤发电量低于2019年同期。显然发电量与疫情后复工复产的用电需求并不匹配。从2021年10月开始,深圳、苏州和哈尔滨等城市开始陆续限电。其主要原因是煤炭开采减少,动力煤价格暴涨。

碳中和大背景下全球工业化国家加速减煤的趋势已经形成,中国面临减煤的压力逐渐增大^[24]。供需端的改变使煤炭期货与现货价格迅速上涨,见图5,甚至无煤可用。哈尔滨作为传统能源型城市,社会生产都离不开煤炭。由于煤炭短缺导致的限电事件,直接影响了哈尔滨市空气污染物浓度变化。



图5 焦煤、动力煤期货价格走势

Fig. 5 Price trend of coking coal and thermal coal futures

为了遏制新冠疫情,工商业停业停产。2020年2月—2021年12月哈尔滨疫情多次反扑,工厂关闭、订单延期、交通管制,社会生产停滞不前。社会运作离不开生产,生产就意味着排放。在病毒笼罩的这段时间里,市民却呼吸到了近十年来最清新的空气。

2.2.2 NO_2 时空变化特点 NO_2 每年6—8月浓度相差不大且为全年最低,均值约等于 $22 \mu\text{g/m}^3$,见图6。

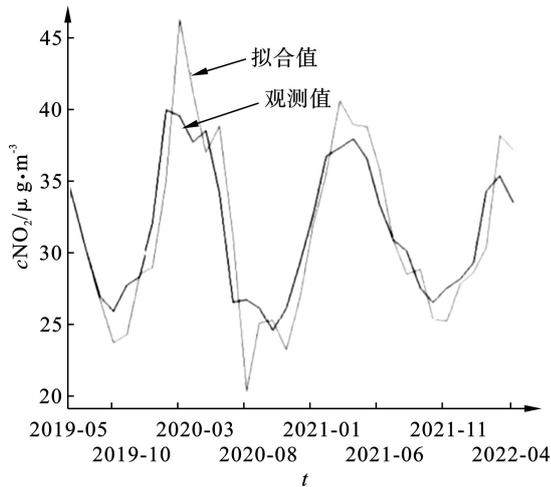
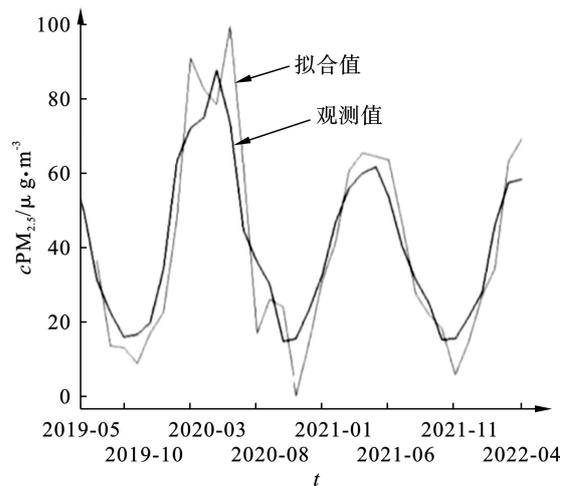
图 6 NO₂ 原始数据拟合Fig. 6 NO₂ original data source fitting

图 6 可知,2020 年 12 月同比浓度下降了 31 μg/m³, 降幅达到了 42.83%。既往研究表明,城市 NO₂ 主要来源于工厂氮化物排放与化学废料。探究 NO₂ 浓度下降原因,除上述疫情影响导致工厂停工停产之外,NO₂ 可以对一些特定的植物,例如南天竹、金叶银杏等哈尔滨市典型植物提供养料。NO₂ 在进入植物叶片后快速溶于水形成 NO₃⁻,并还原成 NH₄⁺,为植物合成氨基酸蛋白质提供帮助。且有研究表明植物可将空气中氮氧化物转化为氮气或植物体内含氮分子利用酶转化为臭氧^[25]。

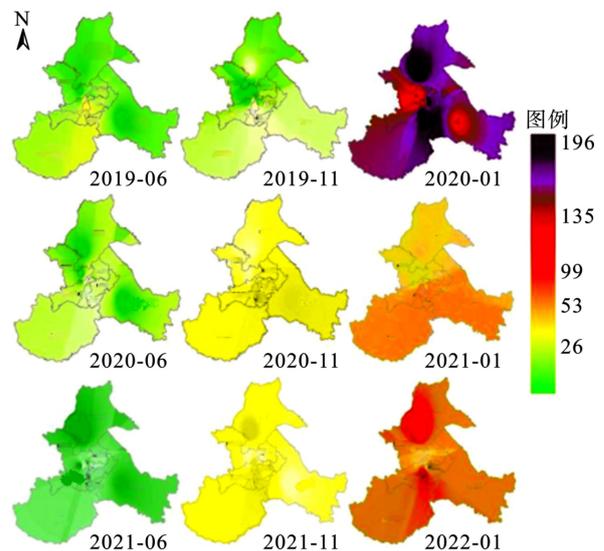
2011 年 11 月,“八大工程、十大经济区”战略将重点扶持森林碳汇等生态环保项目。在社会关注呼吁下黑龙江省第一家环保项目公募基金——中国绿色碳汇基金会黑龙江碳汇专项基金揭牌成立^[26]。近年来在碳中和驱动下哈尔滨市积极发展碳汇经济,致使植被覆盖率增加,企业踊跃购买碳权。黑龙江省是中国森林资源最丰富的省份之一,拥有广阔富饶的林业资源对 NO₂ 的治理与降解提供了坚实的物质基础。

2.2.3 基于 ArcGis 的 PM_{2.5} 浓度变化特点 PM_{2.5} 拟合曲线,见图 7。

图 7 可知,在 2019 年 10 月时拟合曲线明显低于观测曲线,下沉 13.22%,在 2020 年 1 月和 2020 年 3 月拟合曲线分别超过观测曲线 21.84% 和 37.91%,这说明在 2019 年 10 月时空气中 PM_{2.5} 的浓度比数字逻辑的浓度要高,针对 PM_{2.5} 的环境控制并不好,而在 2020 年 1 月和 3 月情况相反,说明实际的 PM_{2.5} 浓度值控制得较好,比模型训练的结果要低。

图 7 PM_{2.5} 原始数据拟合Fig. 7 PM_{2.5} original data source fitting

在哈尔滨 1、6 和 11 月的 PM_{2.5} 浓度差值图中,1 月的同比变化最为明显。2020 年 1 月 PM_{2.5} 最高局部浓度达到 196 μg/m³,全域 PM_{2.5} 均值为 172,空气污染程度最为严重。2021 年 1 月全域 PM_{2.5} 均值降为 51 μg/m³,同比明显下降。2022 年 1 月空气污染稍有反弹但反弹程度不大,处于可接受区间,哈尔滨悬浮颗粒物浓度正处于螺旋式下降阶段,见图 8。

图 8 PM_{2.5} 浓度差值Fig. 8 PM_{2.5} concentration difference

政府“看得见的手”积极发挥作用。每年的 10 月到次年的 4 月是哈尔滨集中供暖的时间,也是空气污染最为严重的阶段。2019 年冬,哈尔滨大范围、持续性强的雾霾天数得到明显降低,空气质量得到明显改善,政府及生态环保部门发挥的作用毋庸置疑,但是大气污染问题依旧严峻^[27]。哈尔滨市

政府坚决贯彻碳中和理念,2021年9月8日为深入打好污染防治攻坚战,落实环境空气质量改善行动计划补齐PM_{2.5}与O₃协同控制短板,按照生态环境部《关于加快解决当前挥发性有机物治理突出问题的通知》编制了方案,并制定空气中可吸入悬浮颗粒治理措施。

3 基于时间序列预测对未来空气治理建议

哈尔滨市空气主要污染物浓度确实因为碳中和大环境引起了变化,虽然最初愿景是CO₂净零排放,但是通过研究分析其他空气污染物浓度也发生了变化。引起污染物浓度变化的原因值得思考,并为日后空气污染治理提供实证意义。有效利用空气污染物时空变化趋势,可以更加精准、有效地对未来空气污染变化做出响应。

3.1 能源转型迫在眉睫

采用指数平滑法将4种污染物的数据进行平均后移,结果显示SO₂与CO未来6个月预测的浓度都有上升,见图9和图10。

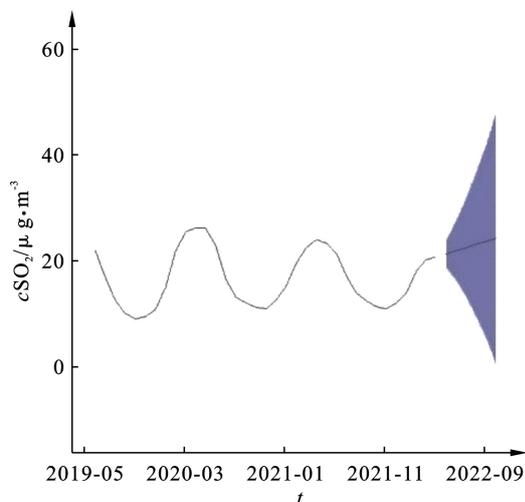


图9 SO₂ 向后6个月预测
Fig. 9 SO₂ 6 months backward forecast

区别于历史的拟合周期,2022年5—10月的空气污染平均数将超过2020—2022这3年,为哈尔滨市空气治理敲响警钟。在疫情高压防控转向动态清零的阶段我们尤其要注意SO₂与CO浓度的反转,致力于将煤炭燃烧产生的空气污染控制到碳中和目标水平,积极探索新能源并利用能源转型。

木柴到煤炭、煤炭到油气、油气再到新能源,全世界正在迎接第3次能源转型。清洁、高效为核心的“新能源”+“智能源”的能源体系是未来能源转型的发展方向与目标^[28]。以欧洲能源消费结构变

化趋势为例,煤炭消费占比除在1980—1985年增加,总体上是逐年降低,见图11。

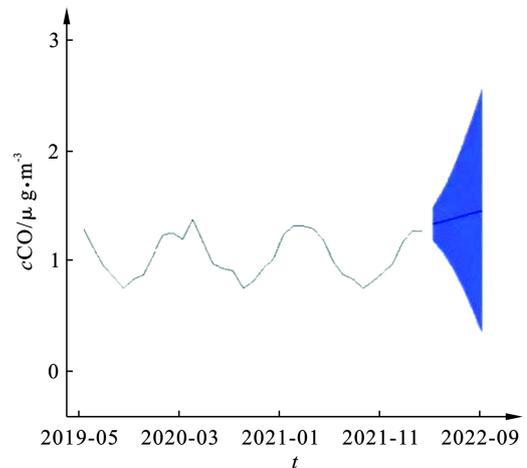


图10 CO 向后6个月预测
Fig. 10 CO 6 months backward forecast

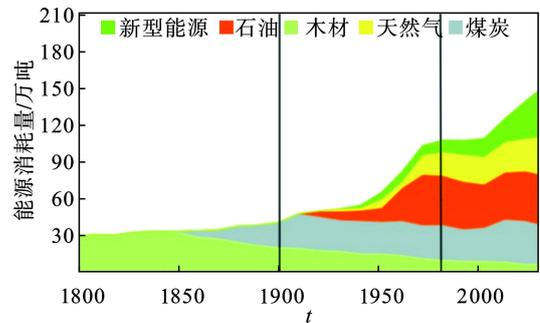


图11 欧洲能源消费结构变化趋势(1800—2020a)
Fig. 11 Trends in energy consumption structure in Europe (1800—2020)

石油作为“工业血液”,消费占比变化量从总体上看不是很大,但天然气比重逐年增加,说明欧洲二次能源转型较为成功^[29]。我省可以参考欧洲的经验,彻底完成哈尔滨市的第二次能源转型,并逐步迈向以新能源、清洁能源为主的第三次能源转型。使用煤炭最紧迫的电力部门,要实现电厂发电成本与工业用电、居民用电消费价格挂钩,并且保证电力供应。采用电力供应与社会用电消费价格挂钩,将直接刺激发电厂的主动转型,与煤炭最相近的发电替代品就是天然气,合理的用电价格意味着将有更多的天然气发电厂取代煤电厂。电价上升也将迫使消费端节约用电,工厂机器空转、区块链挖矿情况都将得到好转。在发电厂大部分更新迭代后,再逐步引入光伏、风能发电。

鼓励其他企业能源改革,用天然气等新能源取代煤炭等污染严重的传统能源^[30]。首先,政府和企业可各方付50%购买新型天然气能源设备用于能源转型,政府方的50%以每年11%的形式发放给

企业 5 年, 这样企业有 5% 的期待价值, 既帮助有意图整改的企业平稳过渡能源转型期, 也让企图诈骗政府补助的企业无利可图; 其次, 招商引资让有天然气等新型清洁能源经营许可的公司积极到哈尔滨建厂, 给予证照办理、厂房构建等准备工作的绿色通行证; 最后, 对于坚持不服从能源转型的企业采取社会公示, 用社会舆论对顽固的企业主进行二次教育, 按情节严重程度给予行政处罚。

3.2 充分利用丰富的林业资源

NO_2 的未来预测相对比较乐观, 呈现明显下降的趋势, 见图 12。先前的空气治理经验可以给我们很好的启发, 提示我们要继续深耕碳汇市场, 将哈尔滨市丰富广阔的森林资源充分利用起来。而 $\text{PM}_{2.5}$ 则是建议两头抓, 从源头防治与吸收处理双管齐下, 尤其在空气湿度较高风力较小的环境下, 要有更为积极的行动以防止空气中的悬浮颗粒形成气溶胶, $\text{PM}_{2.5}$ 与 PM_{10} 浓度反弹, 见图 13。

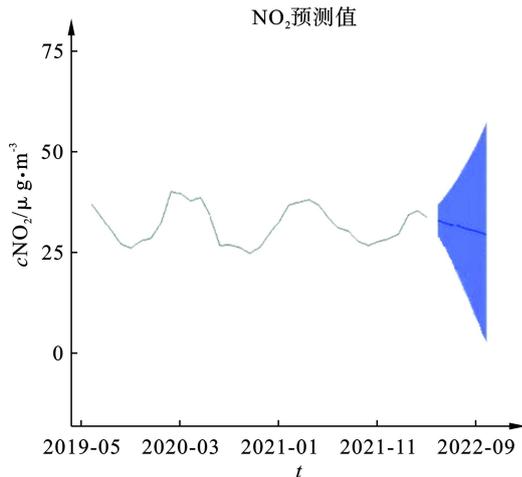


图 12 NO_2 向后 6 个月预测

Fig. 12 NO_2 6 months backward forecast

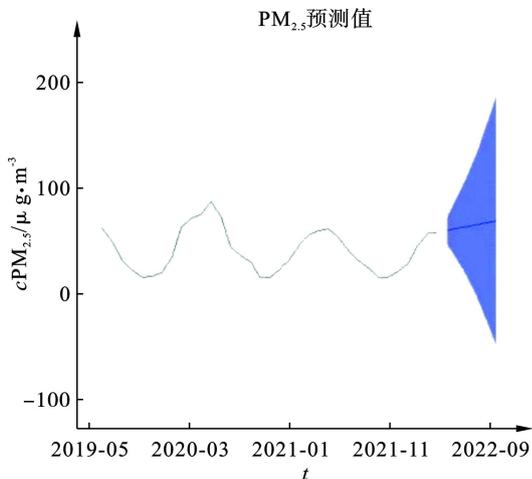


图 13 $\text{PM}_{2.5}$ 向后 6 个月预测

Fig. 13 $\text{PM}_{2.5}$ 6 months backward forecast

多年研究表明, 悬铃木、垂柳、银杏和柳杉等植物都有较强的吸收 NO_2 和空气悬浮颗粒物的能力。由于所在地区林业植被的完整性和生物种群的多样性, 植物在固碳的同时也会固氮, 碳汇市场完善的同时也是“氮”交易市场的完善。黑龙江省林地面积 2 623 万 hm^2 , 位居全国第二, 林地占全省面积 55.5%, 而身处中心腹地的哈尔滨市截至 2022 年共有林地面积 22 617 m^2 。如此广阔优势的自然资源应得到充分利用。大力发展碳汇市场不仅对本市的空气净化起到重要作用, 还可以催生新的产业链提供就业机会^[31]。

3.2.1 保护林地资源 哈尔滨市目前的林业现状仍以满足经济增长, 提供木材供应为主要目的。较高的经济增长率会导致木材的高需求和森林资源的高消耗, 加剧森林碳汇需求和木材需求之间的矛盾; 而经济增长率的适度降低会相对减少森林资源的消耗, 强化森林生态服务的供给^[32]。政府在伐树盈利和绿水青山之间必须做出抉择, 使用线性约束、成本收益法等量化方法设置林地保护红线并统计中心城市的污染物排放量, 为碳汇市场平稳运行做充分的物质准备。

3.2.2 开发林地资源, 构建完善碳汇市场 碳交易市场需要政府提供系统的哈尔滨市碳源排放量和碳汇量, 为市场供需双方提供交易平台的制度保障基础; 维护市场。哈尔滨市政府应着手修订碳汇市场交易法, 并规范相关单位在碳汇市场的执法行为; 管理市场。为防止投机炒作、融资不健全等事件发生, 政府应该在碳汇市场中起管理作用, 弥补市场失灵; 完善市场。允许和鼓励资本进入碳汇交易市场, 引导机构参与创新金融衍生品, 从而补充完善碳交易市场^[33]。

随着碳汇经济的逐步发展, 哈尔滨市拥有的大量森林植被将在以保护生态系统可持续的大气治理中发挥更强的作用。本着以增汇减排、缓解气候变化为目标, 哈尔滨市政府积极牵头, 让具有排放污染物要求的企业参与到购买碳权的行动中来, 已取得显著成果。同时, 政府在社会各渠道展开空气污染的知识宣传, 与碳汇方面专家、学者开展积极讨论, 为森林碳汇有关的科研活动提供资金和技术支持。相关部门也在着手起草关于自然人环境权益入宪的法律规定。相信不久的将来, 哈尔滨市将成为黑龙江省碳汇交易的主战场, 中国碳中和战略

的排头兵。

参考文献

- [1] YUMI K, SANTOS J M, MILL J G, et al. Mortality risks due to long-term ambient sulphur dioxide exposure: large variability of relative risk in the literature[J]. *Environmental Science and Pollution research international*, 2020, 27(29): 2 – 10.
- [2] 李勇华. 大气中二氧化硫和氮氧化物的污染及防治方法[J]. *资源节约与环保*, 2015, 169(12): 140.
- [3] LAYTH C, HARRY A, ROBERTS V. Time-series modeling for statistical process control[J]. *Journal of Business & Economic Statistics*, 1988, 6(1): 87 – 95.
- [4] 路凤, 李亚伟, 李成橙, 等. 时间序列分析在空气污染与健康领域的应用及其 R 软件实现[J]. *中国卫生统计*, 2018, 35(4): 622 – 625.
- [5] RAO S T, ZURBENKO I G. Detecting and tracking changes in ozone air quality[J]. *Air & Waste:Journal of the Air & Waste Management Association*, 1994, 44(9): 1089 – 1092.
- [6] DAYANA M A, ELBA C T, FELIPE N P. Time-series analysis of surface ozone and nitrogen oxides concentrations in an urban area at Brazil[J]. *Atmospheric Pollution Research*, 2014, 5(3): 411 – 420.
- [7] 杨新平, 徐登国. 基于中小城市空气污染指标的时间序列模型构建[J]. *环境污染与防治*, 2014, 36(11): 111.
- [8] 王莉, 赵渊, 杨显明, 等. 基于时间序列模型与残差控制图的兰州市空气质量研究[J]. *高原气象*, 2015, 34(1): 230 – 236.
- [9] 任婉侠, 薛冰, 张琳, 等. 中国特大型城市空气污染指数的时空变化[J]. *生态学杂志*, 2013, 32(10): 2788 – 2796.
- [10] XING J L, YANG G L, CAI T J. Marine SINS self-alignment method in complex interference environment based on MEEMD algorithm[J]. *Electronics*, 2022, 11(6): 925.
- [11] 许月卿, 李双成, 蔡运龙. 基于小波分析的河北平原降水变化规律研究[J]. *中国科学 (D 辑:地球科学)*, 2004, 34(12): 1176 – 1183.
- [12] 范竣翔, 李琦, 朱亚杰, 等. 基于 RNN 的空气污染时空预报模型研究[J]. *测绘科学*, 2017, 42(7): 76 – 83.
- [13] 王灿, 张雅欣. 碳中和愿景的实现路径与政策体系[J]. *中国环境管理*, 2020, 12(6): 58 – 64.
- [14] 李晓童. Holt-Winters 模型与 X-11 模型在预测中的比较研究[J]. *张家口师专学报*, 2000, 16(02): 76 – 79.
- [15] TAYLOR A G, JOHN D H, ALEXANDER A. Using cloud computing to analyze model output archived in zarr format[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2022, 39(4): 449 – 462.
- [16] 何亚磊, 许乾坤. 时间序列预测技术综述[J]. *信息通信*, 2018, 191(11): 35 – 36.
- [17] SUN G, ZHANG Z Y, ZHENG B. Multi-sensor data fusion algorithm based on trust degree and improved genetics[J]. *Sensors*, 2019, 19(9): 2139 – 2140.
- [18] PADHEE G, DUTTA M. Spatio-temporal reconstruction of MODIS NDVI by regional land surface phenology and harmonic analysis of time-series[J]. *GIScience & Remote Sensing*, 2019, 56(8): 1261 – 1288.
- [19] WIN W, DAS S, ARUL E, et al. Time series analysis of demographic and temporal trends of tuberculosis in Singapore[J]. *BMC Public Health*, 2014, 14(1): 1121.
- [20] LYNCH J, GORE R. Application of one-, three-, and seven-day forecasts during early onset on the COVID-19 epidemic dataset using moving average, autoregressive, and naïve forecasting methods[J]. *Data in Brief*, 2021, 35(prepublish): 106759.
- [21] WU Y, LI R, CUI L L, et al. The high-resolution estimation of sulfur dioxide (SO₂) concentration, health effect and monetary costs in Beijing[J]. *Chemosphere*, 2020, 241(C): 125031.
- [22] MARCIN P, ARTUR W, WOJCIECH S, et al. A generalized unit commitment and economic dispatch approach for analysing the polish power system under high renewable penetration[J]. *Energies*, 2020, 13(8): 1952.
- [23] 吴力波, 孙可骝, 时志雄. 环境规制下中国煤炭发电企业成本技术效率研究[J]. *中国人口·资源与环境*, 2018, 28(8): 31 – 38.
- [24] 潘伊人. 煤炭: 中国实施碳中和战略的远虑和近忧[J]. *电力设备管理*, 2021(6): 1 – 2.
- [25] 圣倩倩, 祝遵凌. 南京市 7 种适生彩叶植物抗 NO₂ 能力及生态功能研究[J]. *中南林业科技大学学报*, 2018, 38(8): 81 – 88.
- [26] 缪宇明, 陈卓梅, 陈亚飞, 等. 浙江省 38 种园林绿化植物苗木对二氧化氮气体的抗性及其吸收能力[J]. *浙江林学院学报*, 2008, 97(6): 765 – 771.
- [27] 赵焜. 黑龙江省森林碳汇经济可持续发展问题研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2013.
- [28] 董坤, 周晨琳. 对加快我国空气污染治理法治化进程的探析——以哈尔滨地区为例[J]. *农村经济与科技*, 2019, 30(6): 3 – 4.
- [29] 邹才能, 何东博, 贾成业, 等. 世界能源转型内涵、路径及其对碳中和的意义[J]. *石油学报*, 2021, 42(2): 233 – 247.
- [30] CHAI J, JIN Y. The dynamic impacts of oil price on China's natural gas consumption under the change of global oil market patterns: An analysis from the perspective of total consumption and structure[J]. *Energies*, 2020, 13(4): 867.
- [31] YUAN J H, ZHOU S, PENG T D, et al. Petroleum substitution, greenhouse gas emissions reduction and environmental benefits from the development of natural gas vehicles in China[J]. *Petroleum Science*, 2018, 15(3): 644 – 656.
- [32] 姜霞, 黄祖辉. 经济新常态下中国林业碳汇潜力分析[J]. *中国农村经济*, 2016, 383(11): 57 – 67.
- [33] 漆雁斌, 张艳, 贾阳. 我国试点森林碳汇交易运行机制研究[J]. *农业经济问题*, 2014, 35(4): 73 – 79.