



引文格式: 梁明武, 李慧婷, 李魏龙, 等. 青藏高原东北部地区城市 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 时空分布特征及气象因素的影响[J]. 西北地质, 2024, 57(4): 285–296. DOI: 10.12401/j.nwg.2023184

Citation: LIANG Mingwu, LI Huiting, LI Weilong, et al. Spatial-Temporal Distribution Characteristics of $PM_{2.5}$ and PM_{10} in the Northeast Tibetan Plateau and the Influence of Meteorological Factors[J]. Northwestern Geology, 2024, 57(4): 285–296. DOI: 10.12401/j.nwg.2023184

青藏高原东北部地区城市 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 时空分布特征及气象因素的影响

梁明武¹, 李慧婷¹, 李魏龙², 贾晓丹^{3,*}, 汪铭媛⁴, 冯朝晖⁴

(1. 中国诚通生态有限公司, 北京 100070; 2. 中国长江电力股份有限公司, 湖北 武汉 430071; 3. 中国地质调查局西安地质调查中心/西北地质科技创新中心, 陕西 西安 710119; 4. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101)

摘要: 随着工业化进程的迅速发展, 大气污染问题已不容忽视, 青藏高原东北部作为中国重要的生态安全战略地区, 由于其常年多风的地理特点导致土地荒漠化, 而土地荒漠化会带来颗粒物污染的问题。笔者以青藏高原东北部地区逐月可吸入颗粒物 (PM_{10}) 和细颗粒物 ($PM_{2.5}$) 浓度为基准, 分析了大气颗粒物 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 时空分布特征, 与气象因素 (降水量、气温和风速) 之间的相关性及其受气象因素的影响程度。结果表明: ①东部人口密集和经济发达的西宁市、海东市和黄南州 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 较高, 以上 3 个市州的 $PM_{2.5}$ 平均水平分别为 $44.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $44.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 和 $36.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$, PM_{10} 平均水平分别为 $99.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $99.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 和 $72.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$; 2015~2019 年的时间分布上各地区颗粒物浓度呈现逐年下降的趋势; 空间分布表明 $PM_{2.5}$ 呈现从西到东逐渐升高的趋势, PM_{10} 则呈东高西低分布。②各地区气温和降水量的峰值均出现在夏季, 呈现出“Λ”型的分布规律; 而各地区的 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 逐月浓度变化整体呈现出“V”型的分布规律, 非采暖季颗粒物浓度最低、采暖季颗粒物浓度最高。③各种气象因素的影响中, $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 与降水量、气温、风速均呈负相关, 并且 $PM_{2.5}$ 浓度受到风速的负向影响, 而 PM_{10} 浓度受到风速的显著正向影响, 表明风起扬尘对该区域大气污染贡献突出但风速与污染物浓度的作用机制复杂。本研究可为典型地区空气质量的改善与预测提供理论基础与参考依据。

关键词: $PM_{2.5}$; PM_{10} ; 空气污染; 气象因素; 成因分析; 青藏高原东北部

中图分类号: P43; X823

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2024)04-0285-12

Spatial-Temporal Distribution Characteristics of $PM_{2.5}$ and PM_{10} in the Northeast Tibetan Plateau and the Influence of Meteorological Factors

LIANG Mingwu¹, LI Huiting¹, LI Weilong², JIA Xiaodan^{3,*}, WANG Mingyuan⁴, FENG Zhaohui⁴

(1. China Chengtong Ecological Co., Ltd., Beijing 100070; 2. China Yangtze Power Co., Ltd., Wuhan 430071, Hubei, China; 3. Xi'an Center of China Geological Survey/Northwest China Center for Geoscience Innovation, Xi'an 710119, Shaanxi, China; 4. Institute of Geographical Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

收稿日期: 2023-07-25; 修回日期: 2023-09-27; 责任编辑: 吕鹏瑞

基金项目: 青海省重点研发与转化计划项目“三源区流域水资源对气候变化的响应及模拟预测研究”(2023-QY-205)资助成果。

作者简介: 梁明武(1972-), 男, 博士, 正高级工程师, 研究方向为环境生态科学。E-mail: lmw@chinapaper.com.cn。

* 通讯作者: 贾晓丹(1979-), 女, 硕士, 高级工程师, 研究方向为环境资源评价与保护。E-mail: jxiaodan@mail.cgs.gov.cn。

Abstract: With the rapid development of industrialization, the problem of air pollution can not be ignored. As an important ecological security strategic area in China, the Northeast Tibetan Plateau had prominent particulate pollution caused by soil desertification. Based on the monthly concentrations of inhalable particulate matter (PM_{10}) and fine particulate matter ($PM_{2.5}$) in 8 cities (prefectures) from 2015 to 2019 and the meteorological data, this study analyzed the spatial-temporal distribution characteristics of $PM_{2.5}$ and PM_{10} , the relationships between them and meteorological factors (precipitation, temperature and wind speed) and the degree of influence of meteorological factors. The results showed that: ① Xining city, Haidong city and Huangnan prefecture, which were densely populated and economically developed in the east of Qinghai province, had higher $PM_{2.5}$ and PM_{10} concentrations, with an average level of $44.2 \mu g/m^3$ ($99.1 \mu g/m^3$), $44.7 \mu g/m^3$ ($99.7 \mu g/m^3$) and $36.5 \mu g/m^3$ ($72.2 \mu g/m^3$) respectively. In terms of time distribution, the concentration of particulate matter in each region showed a downward trend year by year. The spatial distribution showed that $PM_{2.5}$ gradually increased from the west to the east, and PM_{10} was high in the east and low in the west. ② The peak values of temperature and precipitation appeared in summer, showing a "Λ" distribution law. While the monthly concentration changes of $PM_{2.5}$ and PM_{10} in various regions showed a "V" distribution law. The particle concentration in non-heating season was the lowest and that in heating season was the highest. ③ Among the effects of various meteorological factors, the concentrations of $PM_{2.5}$ and PM_{10} were strongly or moderately negatively correlated with precipitation and temperature, and were negatively affected by temperature. The concentration of particulate matter was negatively correlated with wind speed. The concentration of $PM_{2.5}$ was negatively affected by wind speed, while the concentration of PM_{10} was significantly positively affected by wind speed, indicating that wind-induced dust had a prominent contribution to air pollution, but the action mechanism between wind speed and pollutant concentration was complex. The results of this study could provide reference and theoretical basis for the improvement and prediction of air quality in typical regions.

Keywords: $PM_{2.5}$; PM_{10} ; air pollution; meteorological factors; cause analysis; Northeast Tibetan Plateau

大气环境质量与群众健康息息相关, 大气灰霾污染已成为广泛关注的问题(Li et al., 2018; 邹佳乐等, 2019)。细颗粒物($PM_{2.5}$)和可吸入颗粒物(PM_{10})是指环境中空气动力学直径 $\leq 2.5 \mu m$ 和 $\leq 10 \mu m$ 的气溶胶颗粒物, 悬浮空中细颗粒物对可见光具有较强的消光特性, 可降低空气能见度(韩婧等, 2014; 刘彦春等, 2020)。 $PM_{2.5}$ 含有大量的有毒有害物质, 会导致呼吸系统的病变以及心脑血管疾病的发病率和死亡率具有不同程度的增长, 长期暴露下可引发呼吸系统疾病、肺炎、哮喘、慢性阻塞性肺炎甚至肺癌, 因此这种污染物引发了公众的广泛关注(Cao et al., 2018; 王冰玉等, 2020)。 PM_{10} 是中国多处地区的首要空气污染物, 其表面积大的特性使其易吸附空气中的有毒重金属、氮氧化物、酸性氧化物、有机污染物、多环芳烃、细菌、真菌、病毒等有毒有害物质, 也容易对健康构成严重危害, 并且它能被吸入肺部并滞留, 导致肺部功能被直接破坏, 甚至严重危害人体呼吸系统、免疫系统、循环系统和生殖系统, 从而引发多种疾病(Wu et al., 2015; Raaschou-Nielsen et al., 2016; 彭丽思等, 2017; Hwang et al., 2018)。

考虑到大气污染物对生态环境的破坏和对人体可能造成的健康风险, 城市大气污染物浓度分布研究成为了城市大气环境科学研究的重点(Shen et al., 2017, Gaio et al., 2019, 蔡春霞等, 2023)。并且, PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 是评估空气质量的重要指标, 研究它们的浓度和分布情况, 可以帮助监测和评估城市和地区的空气质量状况, 为环境管理和改善提供科学依据(张天先等, 2020)。此外, 研究 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 的来源和组成, 可以帮助确定主要污染源和贡献, 为制定减排措施和污染物治理提供指导(王涛等, 2018)。目前, 对大气污染物浓度的研究主要集中于时间、空间、影响因素几个方面。气象因素对空气污染物浓度分布和扩散过程有重要的影响, 深入了解城市或区域环境空气质量状况, 找出其对 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 影响的问题关键, 是及时制定相关政策措施防治大气污染的前提(孙蓉花等, 2017)。已经有许多关于气象条件对大气污染物的研究, 魏玉香等(2009)通过分析南京市大气中的 SO_2 、 PM_{10} 等变化趋势发现了降雨对污染物有清除作用, 杨洪斌等(2009)则表明尽管污染源条件相同, 在各种气象因子的影响下空气质量则也会对应不同的大气污染等级。

青海省位于“世界第三极”青藏高原的东部,是中国生态文明建设领域的先行区,拥有丰富典型且保护价值极高的自然资源和多样的自然景观及生态系统类型,对中国乃至全球的生态系统功能及生态平衡具有极为重要的作用(蔡振媛等, 2019; 李同昇等, 2021)。虽然有研究显示,中国西北部的空气质量已经明显好转,AQI(空气质量指数)数值有不同程度的下降,然而对于青海省时空分布与气象要素之间的关系却缺少更多的数据支持。因此,本研究基于青藏高原东北部空气质量状况数据,研究了该区域多年 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 时空分布特征与气象要素之间的关系。为进一步开展大气污染治理行动、提升环境空气质量提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域与数据来源

1.1.1 研究区域概况

青海省地处中国西北部,东部和北部与甘肃省相接,西南部毗连西藏自治区,东南部邻接四川省,西北部和新疆维吾尔自治区为邻(图 1)。研究区域位于 E 89°35′~103°04′, N 31°39′~39°19′, 平均海拔 3 000 m,

总体地势西高东低(图 1)。该区域年平均气温-5.1~9.0℃,降水量 15~750 mm,绝大部分地区属于半干旱区或干旱区,年降水量在 400 mm 以下,属于高原大陆性气候,呈现出日照时间长、辐射强、气温日较差大、高寒低氧的气候特征。全省辖西宁市、海东市,以及海南、海北、黄南、玉树、果洛 5 个藏族自治州和海西蒙古族藏族自治州,省会西宁市是全省政治、经济、文化的中心。

1.1.2 数据来源

本研究空气质量数据源于青海省生态环境监测中心的发布数据(<http://www.qhemc.com>),数据采集点包括青海省西宁市、海东市、海南州、海西州、海北州、果洛州、黄南州和玉树州 8 个市(州)的空气质量自动监测点。选取并统计了 8 个市(州)2015~2019 年空气中可吸入颗粒物(PM₁₀)的月均浓度和细颗粒物(PM_{2.5})的月均浓度两项空气质量状况数据,同时收集了青海省 8 个市(州)的逐月总降水量、月平均温度和月平均风速数据。

1.2 研究方法

1.2.1 气象因素与 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 浓度的时空分析与相关性分析

分地区绘制了 2015~2019 年 PM₁₀ 和 PM_{2.5} 的逐

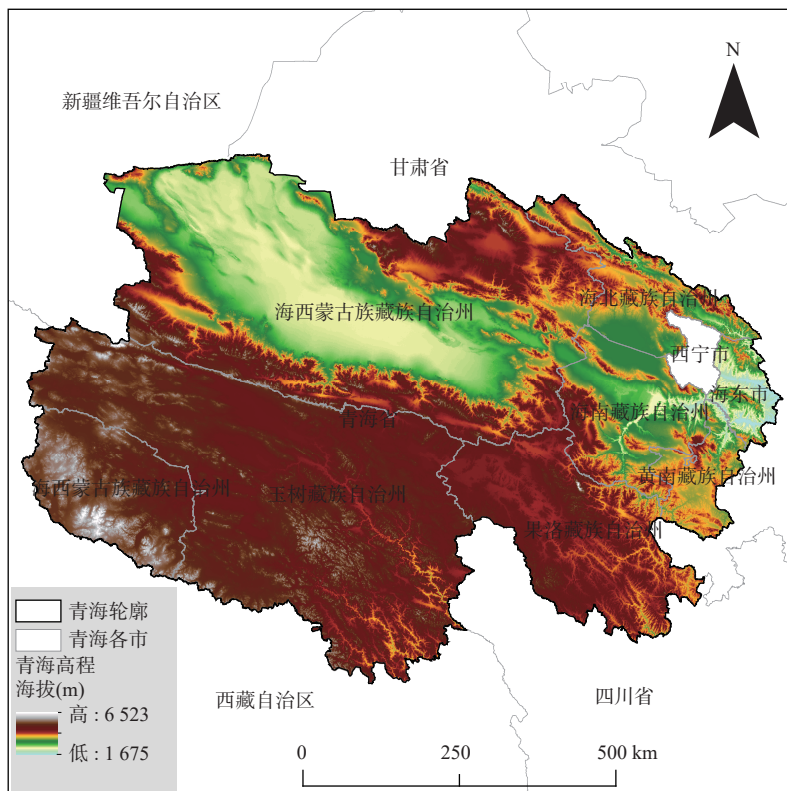


图1 研究区域

Fig. 1 Study region

年浓度以及逐月浓度变化曲线和时间分布规律,并对比了西宁等8个市(州)2015~2019年 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 浓度的逐年空间分布差异,以期明确青海省 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 浓度的时空分布规律。

应用统计软件 SPSS 22 计算了 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 浓度与降水量、气温和风速之间的皮尔逊相关系数(Pearson correlation coefficient)。Pearson 相关系数 $|r|$ 越接近1则表示两个连续变量之间具有越高的相关性;若 $r>0$,表示变量之间存在正相关;若 $r<0$,则表示变量之间存在负相关。若 $|r|\in[0.8,1]$,表示变量之间为强相关关系;若 $|r|\in[0.5,0.8]$,表示变量中度相关;若 $|r|\in[0.3,0.5]$,表示变量低度相关;若 $|r|\in[0,0.3]$,表示变量弱相关或不相关。

1.2.2 多元线性回归

多元线性回归(Multiple Linear Regression, MLR)是一种把因变量用多个自变量组合来共同估计或预测的方法,这比单个自变量的估计或者预测更合理有效(Han et al. 2020)。在本研究中将 $PM_{2.5}$ (PM_{10})看作因变量,用气象因子及 PM_{10} ($PM_{2.5}$)作为自变量联合表达以量化计算自变量对因变量的影响程度,从

而得出气象因子对 $PM_{2.5}$ 或 PM_{10} 的驱动作用,该回归算法的计算方式如式1(Menard, 2011; Pham et al., 2018)。

$$Y = \alpha_0 + \alpha_1 X_1 + \alpha_2 X_2 + \cdots + \alpha_k X_k + \varepsilon \quad (1)$$

式中: Y 为因变量; X_i 为自变量; α_i 为自变量的回归系数,用以量化自变量对因变量的影响; ε 为随机误差且满足 $E(\varepsilon) = 0$ 。

2 结果与分析

2.1 青海省各地区 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 时空(年)变化特征

分析青海省各市(州)2015~2019年 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 浓度的逐年变化情况(图2),可以看出,青海省8个市(州)中西宁市、海东市和黄南州 $PM_{2.5}$ 浓度相对较高,年平均值分别为 $44.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 、 $44.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 和 $36.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$,这3个市(州)均属青海东部区域。位于青海西南部区域的玉树州 $PM_{2.5}$ 浓度最低($16.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$)。西宁市、海东市和黄南州 PM_{10} 浓度同样相对较高,年平均值分别达到 $99.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 、 $99.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 和 $72.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$,玉树州的 PM_{10} 浓度最低($41.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$)。

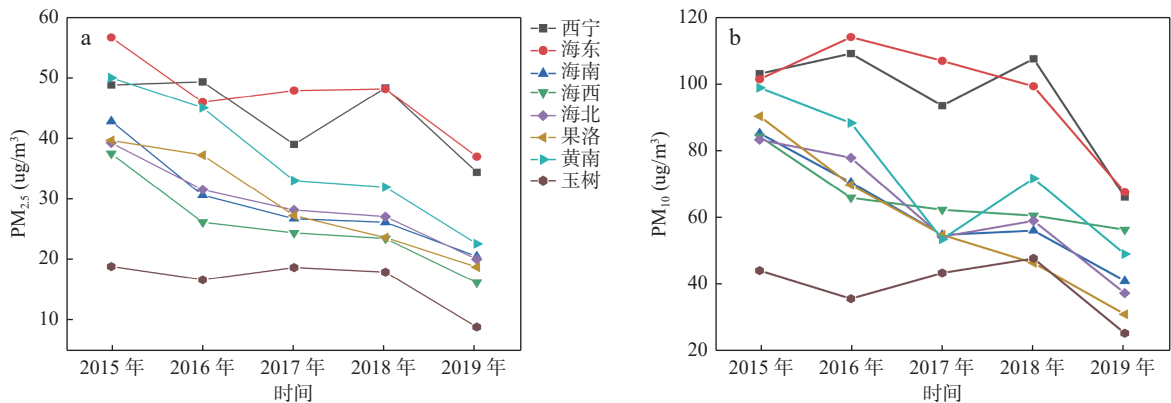


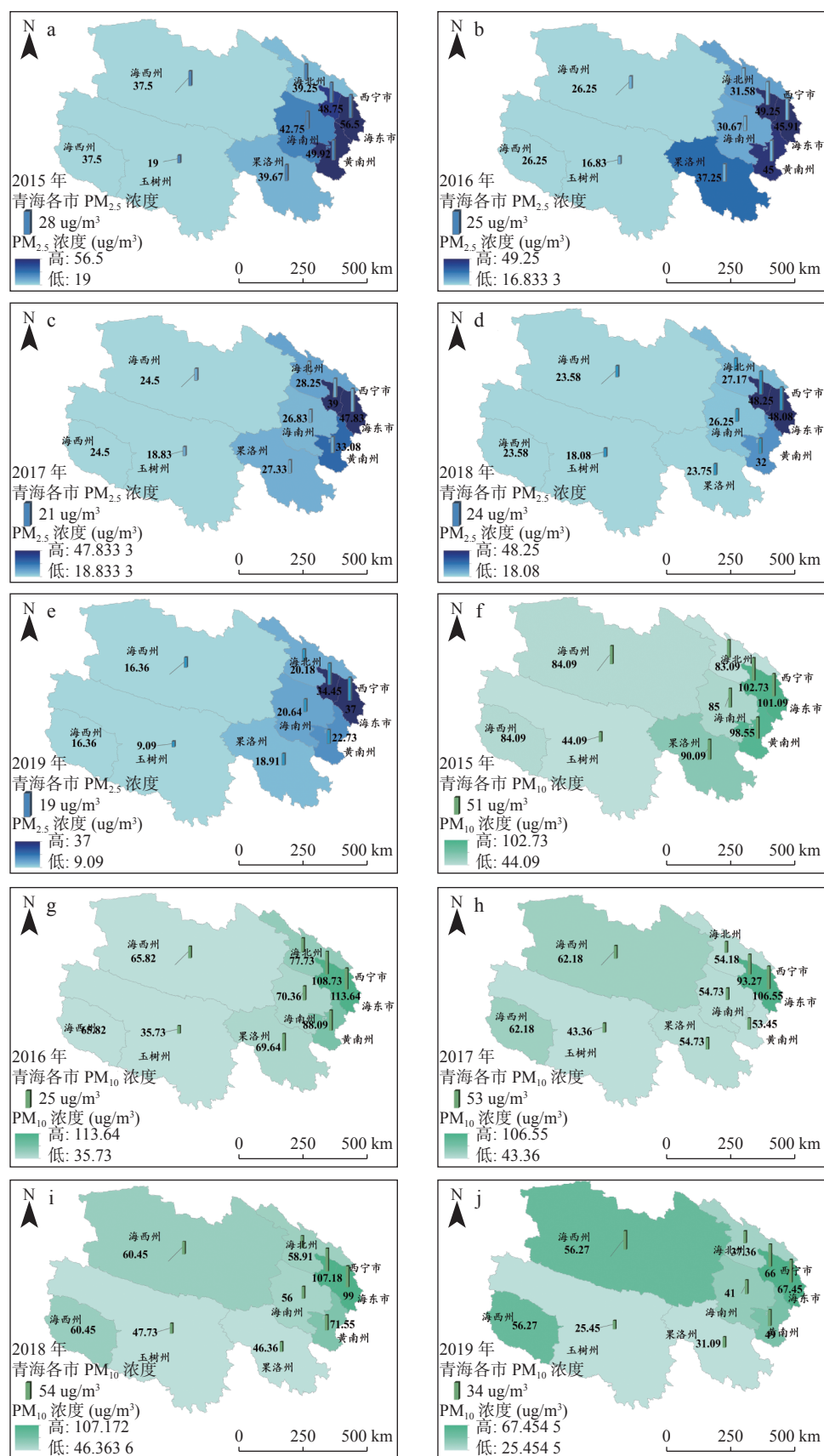
图2 青海省各地级市(自治州) $PM_{2.5}$ (a)和 PM_{10} 浓度(b)均值逐年变化情况

Fig. 2 (a) Annual change of mean $PM_{2.5}$ and (b) PM_{10} mass concentration in cities of Qinghai province

青海各地区 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 浓度整体上均呈现逐年下降的趋势,均在2019年达到最低值,并且海南州、海西州、海北州、果洛州和黄南州 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 浓度逐年下降的趋势相近。黄南州 $PM_{2.5}$ 浓度降低幅度最高($27.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$),果洛州 PM_{10} 浓度降低幅度最高($58.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$),玉树州 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 浓度的降低幅度均最低($22.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$)。

从 $PM_{2.5}$ 浓度的空间分布上看,2015~2019年青

持最低,而青海省东部地区(西宁和海东)一直最高,青海省东南部的黄南地区高于青海西部广大地区和中部的海北、海南和果洛,使青海 $PM_{2.5}$ 浓度的空间分布总体上呈现从西到东逐渐升高的趋势(图3)。2015年和2019年青

图3 青海省各地级市(自治州) $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 浓度均值逐年空间分布图Fig. 3 Annual spatial distribution of mean $PM_{2.5}$ and PM_{10} mass concentration in cities of Qinghai province

2015 年和 2019 年情况相反,在海北、海南和果洛 3 个城市中 $PM_{2.5}$ 浓度最低(图 3c); 2018 年的 $PM_{2.5}$ 浓度在黄南、海南、海北 3 个地区从南到北逐渐升高(图 3d)。总体来看, 2015~2019 年青海省各市(州)的 $PM_{2.5}$ 浓度整体下降, 5 年间 $PM_{2.5}$ 的浓度最低的为玉树州, 而浓度最高的是青海省东部地区的西宁和海东。

对于 PM_{10} 浓度的空间分布, 2015~2019 年青海东部地区(西宁和海东)始终最高, 青海西部的玉树除了 2018 年比果洛略高外, 其余年份一直为青海地区最低。在逐年的空间分布变化上, 只有 2016 年青海 PM_{10} 浓度的空间分布总体上呈现从西到东逐渐升高的趋势, 其余年份均是在东高西低的基础上略有差异(图 3)。2015 年青海西部的海西地区 PM_{10} 浓度高于海北地区, 青海中部的海北、海南、果洛 3 个城市的 PM_{10} 浓度由北向南逐渐升高, 东部的西宁、海东、黄南 3 个城市则由北向南逐渐降低(图 3f)。2016 年青海中部的海北、海南、果洛 3 个城市的 PM_{10} 浓度分布与 2015 年相反, 由北向南逐渐降低; 另外青海东部与 2015 年不同的是海东 PM_{10} 浓度高于西宁(图 3g)。与 2015 和 2016 年不同的是, 2017 年青海西部的海西地区 PM_{10} 浓度高于青海中部的海北、海南、果洛 3 个城市, 甚至高于青海东南部的黄南; 青海中部的海北、海南、果洛 3 个城市与 2015 年一样, PM_{10} 浓度由北向南逐渐升高; 另外青海东南部的黄南地区 PM_{10} 浓度低于青海西部的海西和中部的海北、海南、果洛 3 个城市, 青海东部的海东 PM_{10} 浓度高于西宁, 这与 2016 年情况一致(图 3h)。2018 年青海西部的广大海西地区 PM_{10} 浓度仍较高; 而青海南部的玉树、果洛是 PM_{10} 浓度最低的; 另外青海中部的海北、海南、果洛和青海东部的西宁、海东、黄南 PM_{10} 浓度分布均是从南向北逐渐降低, 这与 2015 年青海中部城市与青海东部城市 PM_{10} 浓度分布变化趋势相反的情况并不一致(图 3i)。

2.2 青海省各地区 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 浓度月份特征

2015~2019 年青海省各地区 $PM_{2.5}$ 月均浓度分别处于 $19.0\sim56.5\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ 、 $16.8\sim49.3\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ 、 $18.8\sim47.8\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ 、 $18.1\sim48.3\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ 和 $9.1\sim37.0\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。西宁市和海东市 2015~2019 年 $PM_{2.5}$ 月均浓度整体相对较高, 玉树 $PM_{2.5}$ 月均浓度整体最低(图 4)。从时间分布分析可知, 各地区在 6 月、7 月、8 月 $PM_{2.5}$ 的月均浓度较低, 在 1 月、2 月、3 月、10 月、11 月和 12 月月均浓

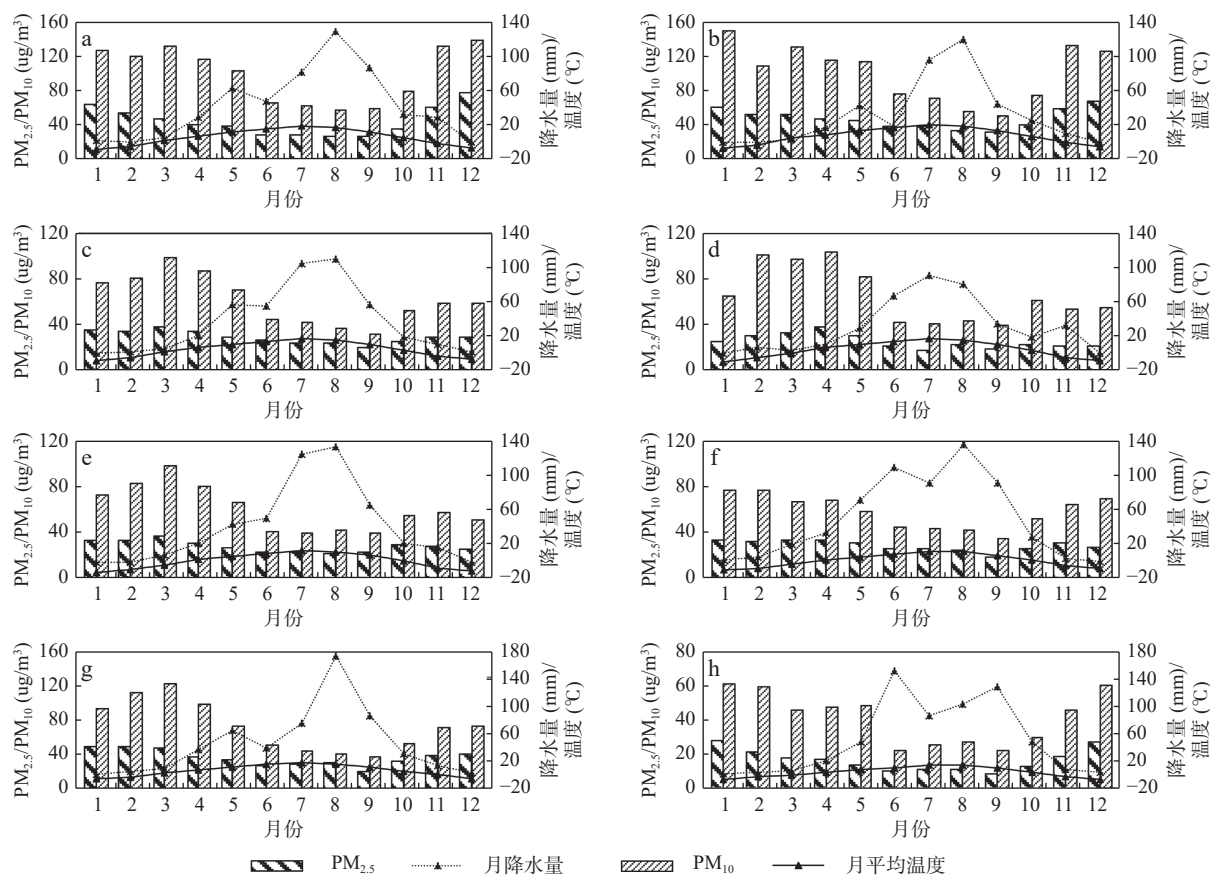
度较高。其中, 西宁市和海东市 $PM_{2.5}$ 月均浓度分布相似, 在 1 月、2 月、3 月、10 月、11 月和 12 月的 $PM_{2.5}$ 月均浓度高于其他月份, 整体呈现出“V”型分布规律, 从 1 月至 8 月 $PM_{2.5}$ 月均浓度逐渐下降, 从 8 月至 12 月 $PM_{2.5}$ 月均浓度逐渐上升。海南州、海北州和黄南州 $PM_{2.5}$ 月均浓度分布相似, 均分别在 3 月和 11 月达到第一个和第二个浓度高峰(图 4)。

2015~2019 年各市(州) PM_{10} 月均浓度分别处于 $44.1\sim102.7\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ 、 $35.7\sim113.6\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ 、 $43.4\sim106.5\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ 、 $46.4\sim107.2\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ 和 $25.5\sim67.5\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。西宁市和海东市 2015~2019 年 PM_{10} 月均浓度整体相对较高, 玉树 PM_{10} 月均浓度整体相对最低。从时间分布分析可知, 各地区整体上在 6 月、7 月、8 月的 PM_{10} 月均浓度较低, 1 月、2 月、3 月、11 月和 12 月的月均浓度较高。其中, 西宁市和海东市 PM_{10} 月均浓度分布相似, 在 1 月、2 月、3 月、11 月和 12 月月均浓度高于其他月份; 海南州、海西州、海北州和黄南州 PM_{10} 月均浓度分布相似, 在 2 月和 3 月达到峰值, 在 8 月和 9 月达到谷值(图 4)。

2.3 青海省各地区 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 浓度与气象因素相关性分析

青海省地级市(州) $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 浓度与降水量、温度呈现负相关性, 随着降水量的增加颗粒物的去除效果增强; 而颗粒物浓度与温度的关系主要受到季节因素的影响, 污染物浓度水平在采暖季较高而非采暖季较低。同时青海省地级市(州) $PM_{2.5}$ 与 PM_{10} 月均浓度存在显著强正相关性, 相关系数均高于 0.85。海北州和果洛州 $PM_{2.5}$ 月均浓度与风速呈现中度正相关性, 其余地区 $PM_{2.5}$ 浓度与风速相关性则不显著。西宁市、海西州、黄南州 PM_{10} 月均浓度与风速相关性不显著, 其余地区 PM_{10} 浓度与风速呈现强或中度正相关性。颗粒物浓度与风速大多呈现正相关表明随着风速的增加颗粒物的传输明显, 青海省大部地区高寒干旱、土地退化严重, 土壤扬尘污染问题突出(韩福财, 2017; 许文轩等, 2017)。

西宁市和海东市的 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 浓度与气象因子相关性的强度排序均为: 温度>降水量>风速。黄南州和玉树州与 $PM_{2.5}$ 浓度相关性强弱的气象因子排序均为温度>降水量>风速, 而与 PM_{10} 浓度相关性强弱的气象因子排序均为降水量>温度>风速。海南州和海北州与 $PM_{2.5}$ 浓度相关性强弱的气象因子排序均为降水量>温度>风速(图 5)。



a. 西宁市; b. 海东市; c. 海南州; d. 海西州; e. 海北州; f. 果洛州; g. 黄南州; h. 玉树州

图4 青海省各地级市(自治州) $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 月均浓度和降水量、温度逐月变化情况Fig. 4 Monthly mean value of $PM_{2.5}$, PM_{10} , precipitation and temperature in cities of Qinghai province

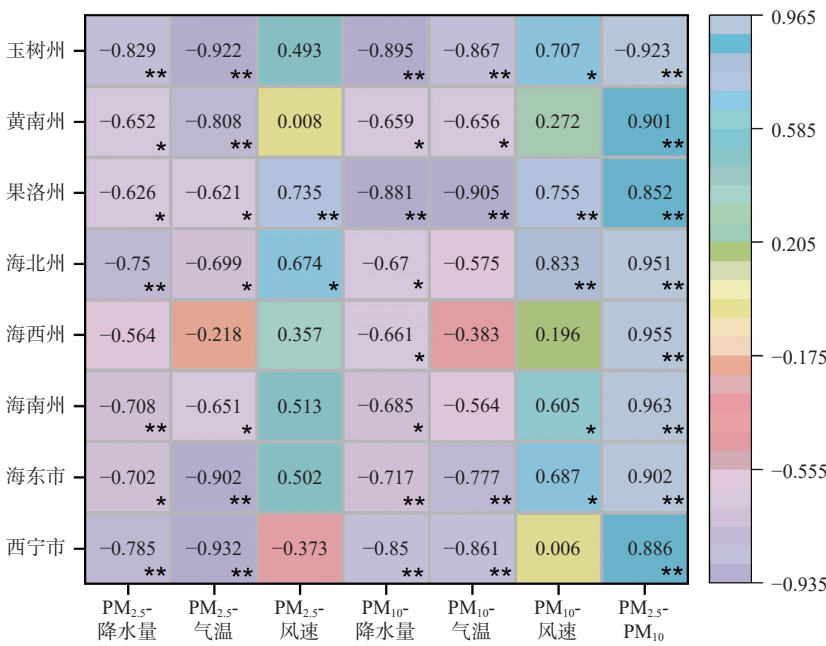
果洛州 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 浓度与气象因子的相关系数均 >0.6 , 呈现中度或强相关。海西州 PM_{10} 浓度与降水量相关性高于温度和风速。从逐月分布趋势分析可知(图 5), 青海各地区的温度和降水量均呈现“Λ”型的分布规律, 在温度和降水量最低的时期, $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 浓度达到峰值; 而在温度和降水量达到峰值的 6 月至 8 月, $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 浓度又均达到最低水平。

2.4 气象因子对 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 浓度的多元回归分析

气象因子温度、降水、风速与 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 浓度的多元线性回归模型结果见表 1。计算结果表明, 除了果洛外, 其余所有地区的 $PM_{2.5}$ 都受 PM_{10} 浓度的正向影响; 青海省全省和海东、黄南、玉树 3 个地区的 $PM_{2.5}$ 都受到温度的负向影响; 另外西宁和海北的 $PM_{2.5}$ 浓度还受到风速的负向影响。对于 PM_{10} 来说, 在除了果洛外的所有地区受到 $PM_{2.5}$ 浓度的正向影响; 在果洛受到气温的显著负向影响; 另外在西宁、海北、果洛和玉树 4 个地区受到风速的显著正向影响。

3 讨论

研究表明青海省西宁市、海东市和黄南州的 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 浓度高于其他区域, 玉树州 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 浓度则是最低的; 空间分布图显示 $PM_{2.5}$ 总体呈现出从西到东逐渐升高的趋势, PM_{10} 则呈现出东高西低的分布(图 1、图 2)。从地形地貌方面来看, 由于西宁市、海东市和黄南州均位于青海东部区域(姚振等, 2012), 地势相对较低, 周围山脉环绕, 容易形成地形地貌上的“盆地效应”。这种地形特点使得空气流动受限, 容易造成污染物在地表积聚, 导致 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 浓度都相对较高。相反, 玉树州位于青藏高原西南部, 地势相对较高, 周围山脉环绕, 空气流动较为畅通。这种地理位置使得污染物在大气中的扩散和沉降能力较强, 减少了污染物在地表积聚的可能性, 从而降低了 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 的浓度。除此之外, 因为西宁市是省会城市, 也是青海省的政治、经济、文化中心, 2015 年



**在 0.01 水平(双侧)上显著相关; *在 0.05 水平(双侧)上显著相关, N = 12

图5 青海省地级市(自治州)PM_{2.5}、PM₁₀ 月均浓度与气象因子相关性

Fig. 5 Correlation analysis between monthly mean value of PM_{2.5}, PM₁₀ and meteorological variables in Qinghai province

表 1 PM_{2.5} 与 PM₁₀ 多元线性回归结果

Tab. 1 Results of multiple linear regression between PM_{2.5} and PM₁₀

污染物	地区	多元回归模型	R ²	调整后 R ²	p值
PM _{2.5}	西宁	24.269+0.466*×PM ₁₀ -0.021×气温+0.005×降水-25.996×风速	0.946	0.915	0.000
	海东	21.599**+0.133*×PM ₁₀ -0.566*×气温+0.029×降水+8.849×风速	0.968	0.950	0.000
	海北	26.564***+0.242***×PM ₁₀ -0.093×气温-0.013×降水-4.361×风速	0.973	0.957	0.000
	黄南	17.730+0.169×PM ₁₀ -0.857×气温+0.053×降水+5.044×风速	0.921	0.876	0.001
	海南	14.512+0.236*×PM ₁₀ -0.277×气温+0.041×降水+0.370×风速	0.955	0.929	0.000
	果洛	11.575+0.183×PM ₁₀ +0.069×气温-0.027×降水+4.387×风速	0.793	0.675	0.015
	玉树	5.463+0.413**×PM ₁₀ -0.392×气温+0.034×降水-4.285×风速	0.948	0.918	0.000
	海西	8.175*+0.176**×PM ₁₀ +0.038×气温-0.095×降水+4.216×风速	0.954	0.928	0.000
	青海	15.047**+0.184*×PM ₁₀ -0.630**×气温+0.063×降水+2.971×风速	0.984	0.975	0.000
PM ₁₀	西宁	-12.793+1.456**×PM _{2.5} -1.145×气温-0.006×降水+54.761*×风速	0.954	0.928	0.000
	海东	-87.131+3.667*×PM _{2.5} +0.818×气温-0.120×降水+8.639×风速	0.931	0.892	0.000
	海北	-101.720***+3.498***×PM _{2.5} +0.200×气温+0.046×降水+22.352**×风速	0.975	0.961	0.000
	黄南	-75.280+2.232×PM _{2.5} -0.486×气温-0.034×降水+33.545×风速	0.885	0.819	0.002
	海南	-32.042+2.624*×PM _{2.5} +0.377×气温-0.187×降水+14.860×风速	0.964	0.943	0.000
	果洛	0.990+0.288×PM _{2.5} -1.209*×气温-0.028×降水+29.034**×风速	0.970	0.953	0.000
	玉树	1.168+1.692**×PM _{2.5} +0.359×气温-0.086×降水+10.561*×风速	0.959	0.935	0.000
	海西	-30.355+3.972**×PM _{2.5} -0.429×气温+0.110×降水-3.438×风速	0.938	0.902	0.000
	青海	-42.628+2.835×PM _{2.5} +0.813×气温-0.207×降水+14.313×风速	0.974	0.959	0.000

注： 为p<0.1, *为p<0.05, **为p<0.01, ***为p<0.001。

以1.1%的城市面积承载了青海39%的人口,2018年人口占全省总人口的35.34%,生产总值占全省生产总值的44.9%;而海东市和黄南州2018年人口占比分别为29.42%和4.75%,年生产总值占比分别为15.76%和21.82%。西宁市、海东市和黄南州的行政面积均小于其他5个地区,且人口密集、经济发达,据已有研究,中国人口密度高和社会经济发达的城市空气污染也会相对更严重(章异平等,2012;薛澜等,2017;杨文涛等,2020)。因此,青海省东部空气颗粒污染物浓度高于西部地区与当地的经济发展、人口增长与不合理的产业布局密不可分,如西宁城市周边的经济开发区在2015年已经占全市工业增加值的73.9%(贺博文等,2021;刘娜等,2021;聂赛赛等,2021)。需要指出的是,青海东部的西宁等随着城市化进程加快,私人汽车、民用货车等数量也逐年上升,也使交通废气成为大气颗粒物PM_{2.5}和PM₁₀的重要污染源(刘震,2021;周安琪,2021)。另外,由于青海东部地区降水偏少,冷空气频繁,使沙尘日数和大风天气明显偏多,这种沙尘的外来污染源输送会令大气中的颗粒污染物PM_{2.5}和PM₁₀浓度显著提升(毛旭等,2018;王遵娅等,2018;中国气象局,2020)。青海西南部的玉树等高原地区地广人稀,大气中的污染源主要来自运输站、输油泵站和过往汽车,而该地区这种气溶胶源非常少,使得高原的大气气溶胶光学厚度远小于其他地区,只有在近地面层500 hPa的地方气溶胶含量最高,然后随着海拔的升高而含量降低,因此在高海拔的玉树地区大气颗粒物PM_{2.5}和PM₁₀浓度很低(李轶冰,2007)。

时间变化特征表明青海各地区PM_{2.5}和PM₁₀浓度整体呈现逐年下降的趋势,且青海省空气质量达标天数比例逐年增加,2015~2019年空气质量逐年转好,得益于青海省在生态环境建设时优先生态环境保护,以改善大气环境质量为核心,强化污染全过程监管,强力推进大气污染综合治理。根据青海政府打赢蓝天保卫战行动方案,青海地区已经确立了以细颗粒物PM_{2.5}和可吸入颗粒物PM₁₀为重点防治对象,同时协同推进挥发性有机物、氮氧化物等的治理的污染防治工作。污染物治理工作主要在西宁和海东展开,另外包括海西的格尔木、德令哈和周边工业园,黄南的隆务镇、海北的西海镇、海南的恰卜恰镇、果洛的大武镇和玉树地区。目前采取的污染物治理措施主要有优化产业布局,限制火电、钢铁和化工等行业的污染物排放,化解大气污染严重行业的产能,综合整治

“散乱污”的企业,对工业污染的治理进一步深化等(魏旖梦,2021)。另外,在青海东部大气污染物浓度较高的西宁自2013年9月开展的大气污染综合治理行动,2014年又在其基础上进一步细化措施,分重点、分阶段有序开展机动车、扬尘、工业企业、煤烟尘等方面的大气污染整治工作,由于以上政策及整治行动,2015~2019年的研究时段PM_{2.5}和PM₁₀浓度整体呈逐年下降趋势(杨森,2014)。

Pearson相关性分析与多元回归分析的结果表明PM_{2.5}与PM₁₀在青海省地级市(州)均存在显著强正相关性,这可能与大气传输、大气化学反应、大气扩散能力等有关。青海省各地区PM_{2.5}和PM₁₀浓度的月份特征统计结果也表明6~8月温度偏高,冬季温度偏低,但6~8月PM_{2.5}和PM₁₀的月均浓度较低,反而冬季月均浓度较高。其他研究显示,PM_{2.5}和PM₁₀的浓度和季节的相关性不仅仅出现在青海省,在中国的西北部地区都呈现“冬季最高,夏季最高”的现象(杨稳强等,2023)。这是因为冬季取暖排放的废烟、废气会提升大气中污染物浓度;PM_{2.5}和PM₁₀在时间变化上具有协调效应是因为很多时候它们具有共同的污染来源,如污染严重的钢铁、冶金和化工产业,人为生活排放(取暖等),交通车辆尾气排放等,使它们在空气中同时集聚(刘妍妍,2021)。因此对于青海省区域大气污染治理而言,应坚持以颗粒物污染防治为重点,制定具有区域差异性、切实可行的针对性综合治理途径、措施和控制策略;升级改造以煤为主的能源结构、以重化工为主的产业结构、以公路货物为主的运输结构。

相关性分析中PM_{2.5}与PM₁₀均与降水量呈现负相关性。从逐月变化分析可知,青海省8个地级市(自治州)的PM_{2.5}和PM₁₀月均浓度整体上均呈现“V”型规律分布,在6~8月达到最低值,而降水量在各城市整体却呈现“Λ”型分布,6~8月为峰值期。这是因为在6~8月青海省是雨季,各地区平均降水量较多,丰富的降水量有利于颗粒物的沉降和清除,而降水有助于清除大气中的颗粒物和气溶胶粒子,使其沉降到地表,同时也能抑制地表的扬尘,使PM_{2.5}和PM₁₀月均浓度降低,对空气质量改善起到积极作用(郭立平等,2015;石春娥等,2018;唐家翔等,2018;李江苏等,2023)。同时根据Pearson相关性分析,PM_{2.5}与PM₁₀均与温度呈现强或中度负相关性,多元回归结果也显示海东、黄南、玉树3个地区PM_{2.5}都受到温

度的负向影响。这是因为 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 主要来源于煤、石油等燃料的燃烧,青海每年在 10 月中旬至次年 4 月中旬采暖,采暖类型以燃烧供暖为主,使得空气中的颗粒物以及硫氧化物、氮氧化物浓度增加,因此冬季供暖是影响青海各城市 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 浓度变化并使其浓度明显高于非供暖时期的重要原因(Hsu et al., 2016; Qiu et al., 2016; 裴阅等, 2020)。

海北州和果洛州 $PM_{2.5}$ 与 PM_{10} 浓度与风速呈现中度正相关性,此外海东市、海北州、玉树 PM_{10} 浓度与风速呈现强或中度正相关性。这是因为未利用土地是这些地区主要的土地利用类型,它们大多是裸岩石质地、戈壁、沙地、盐碱地,这两个城市在春节和冬季的风速大于其他时期且高于 2 m/s,较高的风速易引起扬尘天气,从而导致这些区域的 $PM_{2.5}$ 与 PM_{10} 浓度升高(韩福财, 2017; 许文轩等, 2017)。多元回归结果显示西宁和海北的 $PM_{2.5}$ 浓度受到风速的负向影响,这是因为大风参与了输送大气颗粒物的过程,对局地扩散造成影响,根据高斯扩散理论较高的风速确实会降低大气污染物浓度。而在西宁、海北、果洛和玉树 4 个地区 PM_{10} 浓度受到风速的显著正向影响,根据 Pasquill 的稳定度分级理论,大的风速会使大气层的结构趋向稳定,不利于污染物的扩散,因此风速越大,会使污染物的浓度越大(张红, 2018)。

4 结论

(1) 青海东部西宁市、海东市和黄南州的 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 浓度高于其他区域,这 3 个市州的 $PM_{2.5}$ 平均水平分别为 $44.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $44.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 和 $36.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$, PM_{10} 平均水平分别为 $99.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $99.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 和 $72.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$,西南部的玉树州 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 浓度相对较低;空间分布而言, $PM_{2.5}$ 呈现从西到东逐渐升高的趋势, PM_{10} 的浓度分布大致呈东高西低的特征,青海各地区颗粒物浓度呈现逐年下降的趋势。这可能是青海省东部经济发展、地形地貌、人口增长与不合理的产业布局与交通车辆较西部更多的原因导致的。

(2) 根据相关性分析与回归分析推测由于共同的污染来源,如:钢铁、冶金和化工产业,人为取暖排放,交通车辆尾气排放等使 $PM_{2.5}$ 与 PM_{10} 在青海各地级市(州)均存在显著正相关性或受到彼此的正向影响。

(3) 青海省各市的 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 月均浓度整体呈现“V”型规律分布,在 6~8 月达到最低值,而降水

量却为“Λ”型分布,6~8 月为峰值期,使相关性分析中降雨与 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 呈负相关,这是由于降水可将颗粒物沉降和清除。相关性分析与回归分析表明冬季供暖的人类活动也会大大增加 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 的浓度,西宁和海北的 $PM_{2.5}$ 浓度受到风速的负向影响,西宁、海北、果洛和玉树四个地区的 PM_{10} 浓度受到风速的正向影响,两者可分别用高斯扩散理论和 Pasquill 稳定度分级理论解释。

(4) 青海省应当因地制宜、重点控制扬尘及燃煤污染和协同推进重点区域污染防治,才能有效改善当地的环境质量。

参考文献(References):

- 蔡春霞,贾晓丹,鲍国臣,等.典型燃煤电厂大气污染物沉降对周边水源地的影响及贡献研究[J].西北地质,2024,57(1): 64-72.
- CAI Chunxia, JIA Xiaodan, BAO Guochen, et al. Impact and contribution of atmospheric pollutant deposition from a typical power plant on surrounding water sources[J]. Northwestern Geology, 2024, 57(1): 64-72.
- 蔡振媛,覃雯,高红梅,等.三江源国家公园兽类物种多样性及区系分析[J].兽类学报,2019,39(4): 410-420.
- CAI Zhenyuan, QIN Wen, GAO Hongmei, et al. Species diversity and fauna of mammals in Sanjiangyuan National Park[J]. Acta Theriologica Sinica, 2019, 39(4): 410-420.
- 郭立平,乔林,石茗化,等.河北廊坊市连续重污染天气的气象条件分析[J].干旱气象,2015,33(3): 497-504.
- GUO Liping, QIAO Lin, SHI Minghua, et al. Analysis about meteorological conditions of continuous heavy pollution episodes in Langfang of Hebei province[J]. Journal of Arid Meteorology, 2015, 33(3): 497-504.
- 韩福财.西宁市空气质量指数 AQI 现状分析[J].青海环境,2017,27(1): 36-38.
- HAN Fucui. Analysis on current situation of air quality index AQI in Xining[J]. Journal of Qinghai Environment, 2017, 27(1): 36-38.
- 韩婧,代志光,李文韬.西安市灰霾天气下 $PM_{2.5}$ 浓度与气象条件分析[J].环境污染与防治,2014,36(2): 52-56.
- HAN Jing, DAI Zhiguang, LI Wentao. Analysis of $PM_{2.5}$ concentration and meteorological conditions in haze weather of Xi'an city[J]. Environmental Pollution & Control, 2014, 36(2): 52-56.
- 贺博文,聂赛赛,王帅,等.承德市 $PM_{2.5}$ 中碳质组分的季节分布特征及来源解析[J].环境科学,2021,42(11): 5152-5161.
- HE Bowen, NIE Saisai, WANG Shuai, et al. Seasonal Variation and Source Apportionment of Carbonaceous Species in $PM_{2.5}$ in Chengde[J]. Environmental Science, 2021, 42(11): 5152 -

- 5161.
- 李江苏, 段良荣, 张天娇. 中国城市 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 时空分布特征和影响因素分析[J/OL]. 环境科学, 2023, 1-18.
- LI Jiangsu, DUAN Liangrong, ZHANG Tianjiao. Analysis of Spatio-temporal Distribution Characteristics and Influencing Factors of PM_{2.5} and PM₁₀ in Chinese Cities[J/OL]. Environmental Science, 2023, 1-18. doi:10.13227/j.hjxx.202305037.
- 李同昇, 陈谢扬, 芮旻, 等. 西北地区生态保护与高质量发展协同推进的策略和路径[J]. 经济地理, 2021, 41(10): 154-164.
- LI Tongsheng, CHEN Xieyang, RUI Yang, et al. Strategy and path of cooperative promotion of ecological protection and high-quality development in northwest China[J]. Economic Geography, 2021, 41(10): 154-164.
- 李轶冰. 江河源区生态环境演变与时空格局[D]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2007.
- LI Yibing. Environment evolvement and spatio-temporal pattern in the source regions of Yangtze, Yellow and Lancang River[D]. Xianyang: Northwest A&F University, 2007.
- 刘娜, 余晔, 张莉燕, 等. 2016—2018年西宁市颗粒物来源及输送差异分析[J]. 环境科学学报, 2021, 41(10): 4212-4227.
- LIU Na, YU Ye, ZHANG Liyan, et al. Difference analysis of source and transportation in particulate matter in Xining during 2016-2018[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2021, 41(10): 4212-4227.
- 刘彦春, 靳聪丽, 王雨薇, 等. 校园3种植被类型对春季空气 PM_{2.5} 含量的影响[J]. 河南科技大学学报(自然科学版), 2020, 41(3): 88-92.
- LIU Yanchun, JIN Congli, WANG Yuwei, et al. Effects of campus 3 vegetation types on air PM_{2.5} content in spring[J]. Journal of Henan University of Science and Technology (Natural Science), 2020, 41(3): 88-92.
- 刘妍妍. 湖南省2021年春节期间 PM_{2.5} 重污染特征及来源分析[J]. 江西科学, 2021, 39(05): 893-900.
- LIU Yanyan. Analysis on the characteristics and source of heavy pollution process of PM_{2.5} during the Spring Festival in 2021 in Hunan province[J]. Jiangxi Science, 2021, 39(05): 893-900.
- 刘震. 黄河流域9市空气质量与社会经济及人群健康效应研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2021.
- LIU Zhen. Study on the air quality, social economic development and population health effect in 9 cities of the Yellow River Basin[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2021.
- 毛旭, 张涛. 2018年4月大气环流和天气分析[J]. 气象, 2018, 44(07): 977-984.
- MAO Xu, ZHANG Tao. Analysis of the April 2018 atmosphere circulation and weather[J]. Meteorological Monthly, 2018, 44(07): 977-984.
- 聂赛赛, 王帅, 崔建升, 等. 石家庄市大气污染物的季节性时空特征及潜在源区[J]. 环境科学, 2021, 42(11): 5131-5142.
- NIE Saisai, WANG Shuai, CUI Jiansheng, et al. Spatial-Temporal Characteristics and Potential Source Areas of Seasonal Atmospheric Pollution in Shijiazhuang[J]. Environmental Science, 2021, 42(11): 5131-5142.
- 彭丽思, 孙涵, 聂飞飞. 中国大气污染时空格局演变及影响因素研究[J]. 环境经济研究, 2017, (1): 48-56.
- 裴阅, 汪家权, 胡淑恒. 2015-2016年安徽省 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 时空分布特征[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2020, 43(1): 113-118.
- QIU Yue, WANG Jiaquan, HU Shuheng. Spatial-temporal distribution of PM_{2.5} and PM_{10-2.5} in Anhui Province, 2015-2016[J]. Journal of Hefei University of Technology (Natural Science), 2020, 43(1): 113-118.
- 石春娥, 邓学良, 吴必文, 等. 降水和风对大气 PM_{2.5}、PM₁₀ 的清除作用分析[J]. 环境科学学报, 2018, 38(12): 4620-4629.
- SHI Chune, DENG Xueliang, WU Biwen, et al. The scavenging effect of precipitation and wind on PM_{2.5} and PM₁₀[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2018, 38(12): 4620-4629.
- 孙蓉花, 陈学刚, 魏疆, 等. 乌鲁木齐市 PM_{2.5} 浓度与气象条件耦合分析[J]. 环境污染与防治, 2017, 39(12): 1353-1357.
- SUN Ronghua, CHEN Xuegang, WEI Jiang, et al. Coupling analysis of PM_{2.5} concentrations and meteorological conditions in Urumqi[J]. Environmental Pollution & Control, 2017, 39(12): 1353-1357.
- 唐家翔, 符传博, 杨仁勇, 等. 海口市 PM_{2.5} 演变特征及其与气象因素的关系[J]. 环境污染与防治, 2018, 40(4): 445-449.
- TANG Jiaxiang, FU Chuanbo, YANG Renyong, et al. Evolution of PM_{2.5} in Haikou and its relationship with weather factors[J]. Environmental Pollution & Control, 2018, 40(4): 445-449.
- 王冰玉, 蔡颖, 郑凯, 等. PM_{2.5} 对 HBE 细胞致癌致突变相关基因表达的影响[J]. 癌变·畸变·突变, 2020, 32(1): 33-38.
- WANG Bingyu, CAI Ying, ZHENG Kai, et al. Effect of PM_{2.5} on expression of genes related to carcinogenesis and mutagenesis in HBE cells[J]. Carcinogenesis, Teratogenesis & Mutagenesis, 2020, 32(1): 33-38.
- 王涛, 邵田田. 2017年上海市 PM₂ 和 PM₁₀ 变化特征及来源分析[J]. 河南科学, 2018, 36(11): 1752-1758.
- WANG Tao, SHAO Tiantian. Characteristics and sources of PM₂ and PM₁₀ in Shanghai in 2017[J]. Henan science, 2018, 36(11): 1752-1758.
- 王遵娅, 柳艳菊, 丁婷, 等. 2018年春季气候异常及可能成因分析[J]. 气象, 2018, 44(10): 1360-1369.
- WANG Zunya, LIU Yanju, DING Ting, et al. Features and possible causes for climate anomalies in spring 2018[J]. Meteorological Monthly, 2018, 44(10): 1360-1369.
- 魏玉香, 童尧青, 银燕, 等. 南京 SO₂、NO₂ 和 PM₁₀ 变化特征及其与气象条件的关系[J]. 大气科学学报, 2009, 32(3): 451-457.
- WEI Yuxiang, TONG Yaoqing, YIN Yan, et al. The variety of main air pollutants concentration and its relationship with meteorological condition in Nanjing city[J]. Transactions of Atmospheric Science, 2009, 32(3): 451-457.
- 魏旖梦. 西北五省(区)大气污染物特征及其影响因素研究[D].

- 乌鲁木齐: 新疆大学, 2021.
- WEI Yimeng. Study on the characteristics of air pollutants and its influencing factors in northwest of China[D]. Urumqi: Xinjiang University, 2021.
- 许文轩, 田永中, 肖悦, 等. 华北地区空气质量空间分布特征及成因研究[J]. 环境科学学报, 2017, 37(8): 3085–3096.
- XU Wenxuan, TIAN Yongzhong, XIAO Yue, et al. Study on the spatial distribution characteristics and the drivers of AQI in North China[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2017, 37(8): 3085–3096.
- 薛澜, 翁凌飞. 中国实现联合国 2030 年可持续发展目标的政策机遇和挑战[J]. 中国软科学, 2017, (1): 1–12.
- XUE Lan, WENG Lingfei. The policy opportunities and challenges in China's implementation of 2030 sustainable development goals[J]. *China Soft Science*, 2017, (1): 1–12.
- 杨洪斌, 李元宜, 邹旭东, 等. 辽宁空气中度污染和重污染天气类型分析[J]. 气象与环境学报, 2009, 25(6): 15–17.
- 杨森. 以幸福的名义建设生态西宁[J]. 青海科技, 2014, (04): 12–14.
- 杨稳强. 西北地区大气污染特征及其影响因素分析[D]. 兰州: 西北师范大学, 2023.
- YANG Wenqiang. Characteristics of air pollution in Northwest China and its influencing factors[D]. Lanzhou: Northwest Normal University, 2023.
- 杨文涛, 谯鹏, 刘贤赵, 等. 2011~2017 年中国 PM_{2.5} 多尺度时空分异特征分析[J]. 环境科学, 2020, 41(12): 5236–5244.
- YANG Wentao, QIAO Peng, LIU Xianzhao, et al. Analysis of Multi-scale Spatio-temporal Differentiation Characteristics of PM_{2.5} in China from 2011 to 2017[J]. *Environmental Science*, 2020, 41(12): 5236–5244.
- 姚振, 田兴元, 姬丙艳, 等. 西宁—乐都地区土地质量地球化学评估[J]. 西北地质, 2012, 45(1): 317–323.
- 中国气象局. 2019 年全国生态气象公报[EB/OL]. 2020, [2020-06-30].
- 张红. 典型沿江城市空气污染物特征及与气象条件的耦合关系研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2018.
- ZHANG Hong. Study on Relationship & Characteristics of Atmospheric Pollution and Meteorological Conditions of Cities along the Yangtze River[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2018.
- 张天先, 陈长彬, 姚洪发. 天津市大气环境中 PM_{2.5} 与 PM₁₀ 时空分布特征研究[J]. 洛阳理工学院学报(自然科学版), 2020, 30(04): 8–13.
- 章异平, 徐军亮, 赵西平, 等. 基于灰色关联的洛阳市空气质量影响因素分析[J]. 河南科技大学学报(自然科学版), 2012, 33(1): 100–104.
- 周安琪, 刘建伟, 周旭, 等. 北京大气 PM_{2.5} 载体金属浓度、来源及健康风险的城郊差异[J]. 环境科学, 2021, 42(6): 2595–2603.
- ZHOU Anqi, LIU Jianwei, ZHOU Xu, et al. Concentrations, sources, and health risks of PM_{2.5} carrier metals in the Beijing urban area and suburbs[J]. *Environmental Science*, 2021, 42(6): 2595–2603.
- 邹佳乐, 林尧林, 杨薇. 中国近年 PM_{2.5} 污染研究进展[J]. 环境污染与防治, 2019, 41(3): 357–361.
- ZOU Jiale, LIN Yaolin, YANG Wei. Advances on PM_{2.5} pollution research in China in recent years[J]. *Environmental Pollution & Control*, 2019, 41(3): 357–361.
- Cao Q, Rui G, Liang Y. Study on PM_{2.5} pollution and the mortality due to lung cancer in China based on geographic weighted regression model[J]. *BMC Public Health*, 2018, 18(1): 925.
- Gaio V, Roquette R, Dias CM, et al. Ambient air pollution and lipid profile: Systematic review and meta-analysis[J]. *Environmental Pollution*, 2019, 254(Pt B): 113036.
- Han X, Xiao J, Wang L, et al. Identification of areas vulnerable to soil erosion and risk assessment of phosphorus transport in a typical watershed in the Loess Plateau[J]. *Science of The Total Environment*, 2020, 758.
- Hsu C Y, Chiang H C, Lin S L, et al. Elemental characterization and source apportionment of PM₁₀ and PM_{2.5} in the western coastal area of central Taiwan[J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 541: 1139–1150.
- Hwang S H, Park W M. Radon and PM₁₀ concentrations in underground parking lots and subway stations with health risks in South Korea[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2018, 25(35): 35242–35248.
- Li R, Zhou R, Zhang J. Function of PM_{2.5} in the pathogenesis of lung cancer and chronic airway inflammatory diseases[J]. *Oncology Letters*, 2018, 15(5): 7506–7514.
- Menard, S. Standards for standardized logistic regression coefficients[J]. *The Journal of Social Forces*, 2011, 89(4): 1409–1428.
- Pham T G, Degener J, Kappas M. Integrated universal soil loss equation (USLE) and geographical information system (GIS) for soil erosion estimation in a Sap basin: central Vietnam[J]. *International Soil and Water Conservation Research*, 2018, 6: 99–110.
- Qiu X, Duan L, Gao J, et al. Chemical composition and source apportionment of PM₁₀ and PM_{2.5} in different functional areas of Lanzhou, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 40: 75–83.
- Raaschou-Nielsen O, Beelen R, Wang M, et al. Particulate matter air pollution components and risk for lung cancer[J]. *Environment International*, 2016, 87: 66–73.
- Shen F, Ge X, Hu J, et al. Air pollution characteristics and health risks in Henan Province, China[J]. *Environmental Research*, 2017, 156: 625–634.
- Wu F, Wang W, Man Y B, et al. Levels of PM_{2.5}/PM₁₀ and associated metal(loid)s in rural households of Henan Province, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2015, 512–513: 194–200.