

# 近 14 年西北地区甲醛柱浓度的时空变化研究

刘旻霞\*, 宋佳颖, 孙瑞弟, 李全弟, 秦毅, 张娅娅 (西北师范大学地理与环境科学学院, 甘肃 兰州 730070)

**摘要:** 基于臭氧监测仪(OMI)卫星反演数据,对 2005~2018 年西北 4 省区域大气甲醛柱浓度数据进行提取及分析,探讨其时空变化特征及影响因素.结果表明:在时间变化上,14a 甲醛柱浓度整体呈先上升后下降的波动变化趋势,夏秋季显著高于冬春季,且冬季均值略高于春季.在空间分布上,甲醛柱浓度自西向东、自北向南逐渐升高,高值区集中于陕西和甘肃东南部及青海西南部;低值区集中于宁夏、青海和甘肃的西北部;稳定性呈现出东部分散、西部集聚、差异显著的分布格局.影响甲醛柱浓度变化的因素包括自然和人为因素,自然因素中,甲醛柱浓度受地形影响显著,与风向、气温均呈现显著正相关;人为因素中,甲醛柱浓度与人口密度、地区生产总值、工业废气排放量及建筑房屋竣工面积均表现出正相关关系,与工业废气排放量的相关度最高.大气中甲醛分子与气溶胶粒子二者间呈显著正相关关系,这进一步说明甲醛浓度受到了诸多因素的综合影响,但气溶胶粒子、气温及工业废气的排放是主导因素.

**关键词:** 西北地区; 甲醛柱浓度; 时空变化; 稳定性分析; 气溶胶粒子

中图分类号: X511 文献标识码: A 文章编号: 1000-6923(2020)06-2321-14

DOI:10.19674/j.cnki.issn1000-6923.2020.0266

**Spatio-temporal variation of formaldehyde column concentration in Northwest China in the past 14 years.** LIU Min-xia\*, SONG Jia-ying, SUN Rui-di, LI Quan-di, QIN Yi, ZHANG Ya-ya (College of Geography and Environmental Science, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China). *China Environmental Science*, 2020,40(6): 2321~2334

**Abstract:** The atmospheric formaldehyde column concentration data of four provinces in Northwest China from 2005 to 2018 based on ozone monitoring instrument (OMI) were extracted, and their spatio-temporal change and influencing factors were discussed. The results showed that: in time variation, formaldehyde column had increased firstly and then decreased during 14 years, concentration of formaldehyde column in summer and autumn was significantly higher than that in winter and spring, and the average value in winter was slightly higher than spring. In terms of spatial distribution, formaldehyde column increased from west to east and north to south. High value areas were concentrated in Shaanxi, south-eastern of Gansu and south-western of Qinghai low value areas were concentrated in Ningxia, Qinghai and north-western of Gansu. Stability analysis showed that formaldehyde column was distributed in central and eastern parts, and the distribution was obvious. The main factors affected the change of formaldehyde column concentration including natural and human factors. In natural factors, concentration of formaldehyde column was signally affected by topography, wind direction and temperature. In human factors, it was positively correlated with population density, regional GDP, industrial waste gas emission and construction housing completion area. Among them, industrial waste gas emission was the main impact factor. There was a significant correlation between formaldehyde and aerosol particles in atmosphere. This further indicated that the change of formaldehyde concentration was affected by many factors, but aerosol particles, temperature and emission of industrial waste gas were the dominant factor.

**Key words:** Northwest China; formaldehyde column concentration; spatio-temporal change; stability analysis; aerosol particles

甲醛(HCHO)是具有强烈刺激性气味的挥发性气体,是有机污染物中来源广、危害大、持续时间久的污染物,其一次来源包括化石燃料燃烧、机动车尾气、生物质未完全燃烧等;二次来源包括挥发性有机物的光化学反应,如甲烷、乙烷等<sup>[1]</sup>.同时,甲醛具有较高的活性,在光分解作用下生成羟基自由基,故而甲醛成为大气自由基的重要来源<sup>[2]</sup>.它已被世界卫生组织认定为一类致癌物,在我国有毒气体中排名第二,是潜在的强致突变物之一<sup>[3-4]</sup>.

近年来,大气甲醛污染逐渐成为了环境科学领域的热点问题,以往研究通过地面基站的监测,分析

室内外甲醛的来源及浓度变化.与站点监测相比较,遥感技术可以获取长时间、大尺度的数据,便于揭示甲醛的动态迁移变化<sup>[5]</sup>,是对甲醛研究的有效补充.现阶段,国外专家学者主要以遥感数据为基础,在全球和大洲范围内研究污染物的变化和扩散<sup>[6-9]</sup>.国内对甲醛的研究局限于小区域单点监测及地面基站监测,部分学者开始利用遥感数据分析甲醛的年际变化,但由于遥感数据处理繁琐,研究的区域较小、

收稿日期: 2019-10-31

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(31360114,31760135)

\* 责任作者, 教授, xiaminl@163.com

时段较短.地面监测的研究中有学者应用大气甲醛分析仪,在华北地区德州站进行大气甲醛综合观测实验,表明光化学生成是甲醛的主要来源,其浓度受相对湿度、光照、风速以及湿沉降的影响<sup>[10]</sup>;而在遥感监测中,部分学者基于省域、市域、县域尺度探讨了不同地区的甲醛柱浓度变化,从自然和人为因素两方面进行分析,自然因素中,地形、风向、气温、降水等因素起着重要作用<sup>[5]</sup>,人为因素中的汽车保有量、能源消费、秸秆焚烧等对甲醛浓度变化的影响显著<sup>[11]</sup>.

随着丝绸之路经济带的大力推进,西北地区城市化进程加快,工业化发展水平得到提升,工业废气废渣、汽车尾气、粉尘污染等问题随之产生,大气污染防治问题亟待解决.作为大江大河的发源地,研究区内保持优良的生态环境对全国生态环境建设起着重要的作用.因此本文利用 OMI 遥感数据,结合气象数据、统计年鉴、大气环境公报,选取西北 4 省分析了 2005~2018 年甲醛柱浓度的时空分布特征,旨在揭示甲醛排放及生成的机理,探讨影响甲醛浓度

的自然因子及人为因子,以期为生态环境在大气污染治理方面提供借鉴<sup>[12]</sup>.

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

本文选取了西北地区(31°36′~42°57′N,89°24′~111°15′E)4 个省份包括陕西、甘肃、青海和宁夏回族自治区 4 省,区域面积约为 138.30 万 km<sup>2</sup>.研究区内的气候大部分属于温带大陆性气候,小部分属于暖温带大陆性气候,年均温为 11℃~14℃;全年降水呈现明显季风性特征,年降水量为 200~400mm.西北地区的风速存在北大南小的分布特点,大部分地区的年平均风速为 1~4m/s<sup>[13]</sup>,呈现明显的“冬春大、夏秋小”的季节变化特征<sup>[14]</sup>.全域地势较高,海拔为 189~6659m,位于我国三大阶梯的一、二阶梯,境内黄土高原、青藏高原和内蒙古高原三大高原交汇<sup>[1]</sup>,主要地形包括山地、盆地、荒漠、戈壁等,生态环境较为脆弱(图 1).

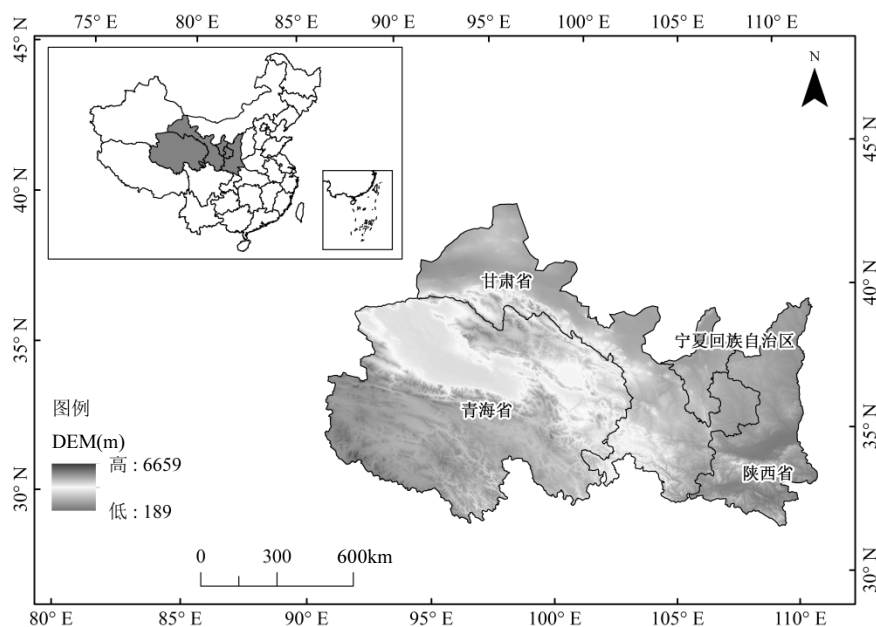


图 1 西北 4 省高程

Fig.1 elevation map of four northwest provinces

### 1.2 数据来源

现阶段,大气污染监测的传感器众多,包括 GOME、SCIAMACHY、GOME-2 以及 OMI<sup>[13]</sup>,其中搭载于 Aura 卫星上的 OMI 传感器反演精度较高<sup>[15]</sup>.Aura 卫星是一颗由多国共同研制的极轨、太阳同步卫星,轨道高度 705km<sup>[16]</sup>,过赤道的时间为

13:45,一天即可覆盖全球一次,经过西北地区上空约为 04:30~06:30(协调世界时).OMI 作为新一代大气成分探测传感器,由荷兰宇航计划总局和气象研究所研制,波长范围 270~500nm,平均波谱分辨率 0.5nm,星下点分辨率 13km×24km,扫描宽度 2600km,覆盖全球只需 1d<sup>[15-16]</sup>,利用大气辐射及散射光谱反

痕量气体,可以对甲醛等大气污染物进行有效观测,进而为治理大气污染提供了新的方法。

本文选用 2005 年 1 月~2018 年 12 月的甲醛数据产品,产品名称为 OMHCHO-003,数据格式为 HDF5,单位为  $\text{molec}/\text{cm}^2$ ,由于数据的指数不一致,为了便于处理,我们将甲醛柱浓度单位改为  $10^{15}\text{molec}/\text{cm}^2$ .该数据在紫外波段下获得,由比利时太空大气研究所(BIRA)进行反演,并发布在美国航空航天局(NASA)官网上的 GES-DISC<sup>[17]</sup>.反演的算法主要是利用差分吸收光谱算法(DOAS)<sup>[18]</sup>,去除地表辐射、气溶胶粒子等因子的影响,最终获得甲醛柱浓度。

气溶胶光学厚度数据也来源于 OMI 传感器,产品名称为 OMAERUV-003,它是在紫外波段下获得的数据,研究时段与甲醛数据一致,其空间分辨率与 OMI 原始资料的星下点分辨率相同,我们以研究区经纬度、卫星过境时间为条件,提取研究区内气溶胶逐日数据。

经济数据(地区生产总值、各产业产值、人口密度、建筑房屋竣工面积、工业废气排放量)来源于国家统计局(<http://www.stats.gov.cn/>)各省 2005~2018 年的统计年鉴,气象数据(风向、风频、气温及降水量)来源于国家气象信息中心(<http://data.cma.cn/>)的《中国地面气候资料月值数据集》,研究月份共计 168 个月,研究区内气象站点共计 224 个(甘肃省 74 个、青海省 37 个、陕西省 88 个、宁夏回族自治区 25 个)。

### 1.3 数据处理方法

OMI 数据按卫星过境时间进行筛选,用 HDF-EOSS 条带格式进行存储,将研究区的经纬度(longitude、latitude)与甲醛柱浓度(column amount)对应,使用 visan 软件提取.为了保证研究区全部覆盖,提高插值的精度,本研究对云量(cloud fraction)大于 20%、缺测率大于 15%的数据进行剔除,将经纬度分别扩大 2 个经纬度.此外,由于 2009 年之后,OMI 数据行异常,部分日期的数据无法覆盖整个研究区,计算月均值时,如果当月数据有 7d 以上的缺失,视为无效并剔除.随即在 ArcGIS 10.3 中进行空间插值处理及掩膜处理,像元大小为  $0.05 \times 0.05$ .利用处理得到的结果,对研究区大气甲醛柱浓度进行时空分析。

## 2 结果与讨论

### 2.1 西北 4 省大气甲醛浓度的月变化

本文以西北地区 4 省区域为研究对象,借助 HDF-View、Python、ArcGIS 10.3 等软件,得到甲醛柱浓度的月、季、年均值.由图 2 可知,14a 间甲醛浓度呈波动变化的趋势.每年的 11 月开始到次年的 2 月甲醛浓度处于低值区,其中,2017 年 12 月的甲醛柱浓度值最小,为  $5.97 \times 10^{15}\text{molec}/\text{cm}^2$ .这可能与近年来冬季城区的化石燃料使用量减少,采用天然气集中供暖有关.每年的 6~9 月甲醛浓度处于高值区,2017 年 10 月出现了最大值,为  $23.28 \times 10^{15}\text{molec}/\text{cm}^2$ ,这与甲醛前体物烷烃、烯烃等在高温高热的条件下易水解生成甲醛有关<sup>[19]</sup>。

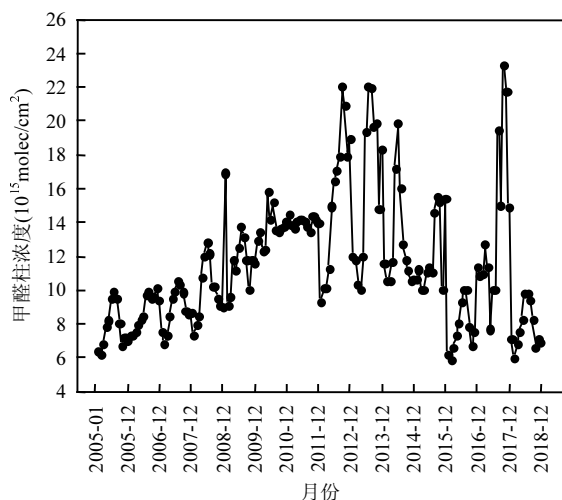


图 2 2005~2018 年西北 4 省甲醛浓度月均值变化趋势图  
Fig.2 Trend of monthly mean value of formaldehyde concentration in four northwestern provinces from 2005 to 2018

图 3 中不同颜色表示不同的等级,依据 ArcGIS 软件中的自然间断点分级法(Jenks)的分级标准将甲醛浓度分为 6 个等级:一级(<4)、二级(4~8)、三级(8~12)、四级(12~16)、五级(16~20)、六级(20~24),单位为  $10^{15}\text{molec}/\text{cm}^2$ .由于 14a 中各年甲醛柱浓度的月变化具有一定的周期性,因此本文主要分析了 2018 年西北 4 省甲醛柱浓度月值变化,结果表明,甲醛浓度高值区集中于陕西、甘肃东南部及青海西南部;低值区集中于宁夏、青海和甘肃的西北部,这可能与研究区的地形以及盛行风向有关.1~3 月份,全域整体上处于三级以下的浓度范围内;4 月份开始,陕西南部出现

四级浓度区,部分区域出现五级浓度区;5 月份高值区持续扩大,并转移到青海东南部;6、7 月份甲醛高浓度区分布广泛,六级高值区覆盖了陕西全省,这是由于光照强度对光化学产物的生成起着重要的作用;8、9 月份高浓度区向青海西南部和东南部扩散,同时,低值区开始出现于青海及甘肃西北部;10、11 月份开始,

青海北部出现大范围的一级低浓度区,四、五级高值区仅出现在甘肃和陕西部分区域;12 月份,全域甲醛浓度值降低到三级以下,但未出现一级低值,这可能是由于研究区冬季处于采暖季、雾霾天气频发<sup>[20]</sup>,相对湿度上升,吸湿性粒子的吸湿增强,出现湿沉降进而导致  $PM_{2.5}$  和甲醛浓度下降<sup>[7]</sup>。

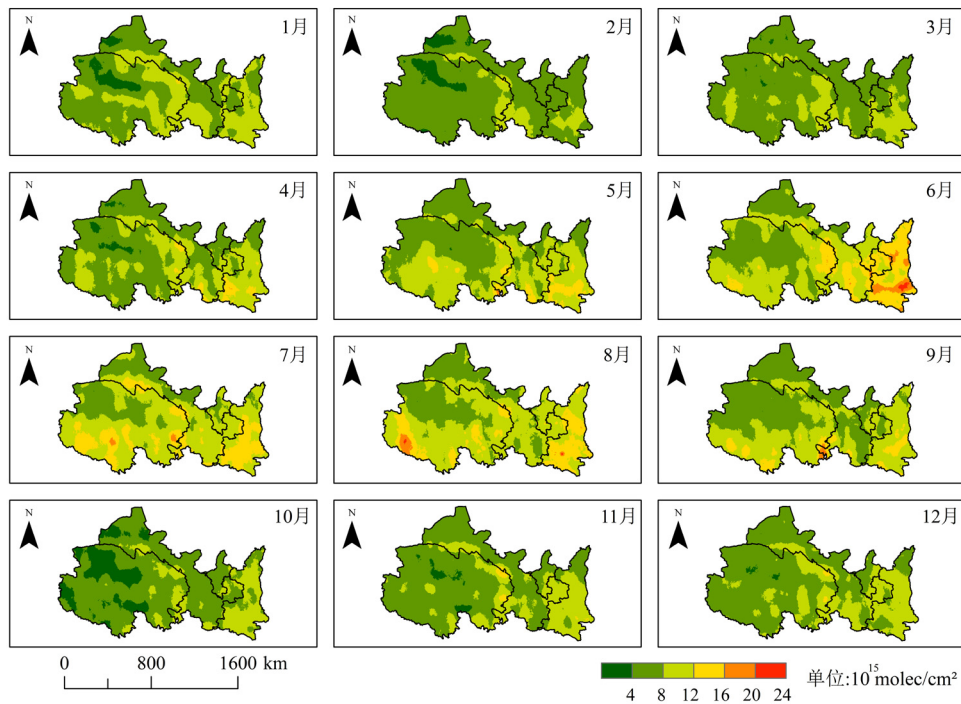


图3 2018年西北4省甲醛柱浓度逐月变化

Fig.3 Monthly change of formaldehyde column concentration in four northwestern provinces in 2018

## 2.2 西北4省大气甲醛柱浓度的季节变化

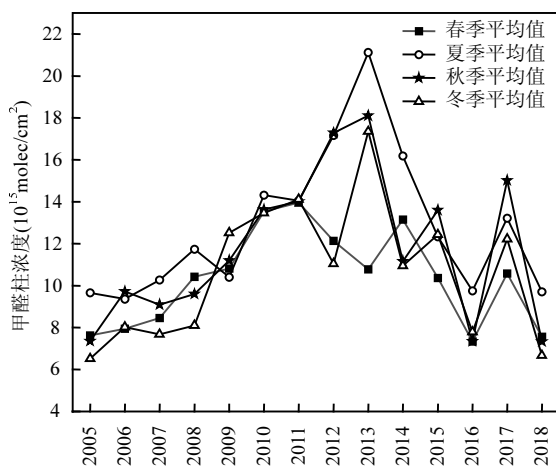


图4 2005~2018年西北4省甲醛浓度季节变化

Fig.4 Seasonal variation of formaldehyde concentration in four northwestern provinces from 2005 to 2018

12、1、2月为冬季,3、4、5月为春季,6、7、8月为夏季,9、10、11月为秋季.浓度分级标准同图3一致

由图4可知,14a间,西北4省甲醛浓度平均值夏秋季显著高于冬春季,且冬季均值略高于春季.2010年前,研究区夏季均值均高于秋季,但差距不显著;2010年后,高值在夏、秋季交替出现.夏、秋、冬3季的甲醛浓度最大值均出现在2013年,与月均值的变化保持一致.2013年前,甲醛浓度保持着波动上升的趋势,2013年后呈逐步下降的趋势,2018年达到低谷.夏秋季近5a的浓度值稳定在  $7.33\sim 16.18 \times 10^{15} \text{ molec/cm}^2$  范围内,冬春季则在  $6.67\sim 13.15 \times 10^{15} \text{ molec/cm}^2$  范围内波动.冬季,甲醛浓度主要受到化石燃料燃烧及汽车尾气排放的影响,而夏秋季受光化学氧化作用的影响,特别是烷烃、烯烃等前体物大量排放,与OH自由基反应,形成光化学烟雾,进而生成甲醛等污染物.近2a,甲醛浓度值的下降与我国2012年发布的《重点区域大气污染防治“十二五”规划》<sup>[21]</sup>以及国家“蓝天保卫战”<sup>[22]</sup>等环境治理政

策的实施密不可分。

春季,研究区甲醛柱浓度处于三级以下,一级低值区出现在青海西部的海西藏族自治州以及甘肃西北部疏勒河区域,青海西南部和甘肃东南部为二级,小部分区域甲醛柱浓度为三级;夏季,甲醛柱浓度整体升高,一级低值区升高至二级,三级浓度区出现于陕西南部;秋季,甲醛柱浓度攀升至三级以上,全域四~五级浓度区扩大,陕西全省均处于四五级浓度范围,南部地区出现了六级的高值.这主要是由于气温较高,辐射量大,挥发性有机物的光化学反应速率加

快,甲醛浓度随之增加.冬季,甲醛柱浓度开始回落至三级以下,一级低值区出现于青海西北部和甘肃西北部(图 5).冬季甲醛浓度高于春季的原因在于部分地区是煤炭采暖,煤炭消耗量大,使得大气污染加剧<sup>[23]</sup>.但冬季太阳辐射弱,光化学反应速率放缓,甲醛浓度保持在低值区.整体上看,研究区自西向东甲醛浓度逐渐递增,高值区均出现在陕西,这可能是由于陕西综合实力较强,经济发展水平高,对工业的依赖性较大,且近 2a 陕西省旅游业发展迅猛<sup>[24]</sup>,因而甲醛浓度处于高值区.

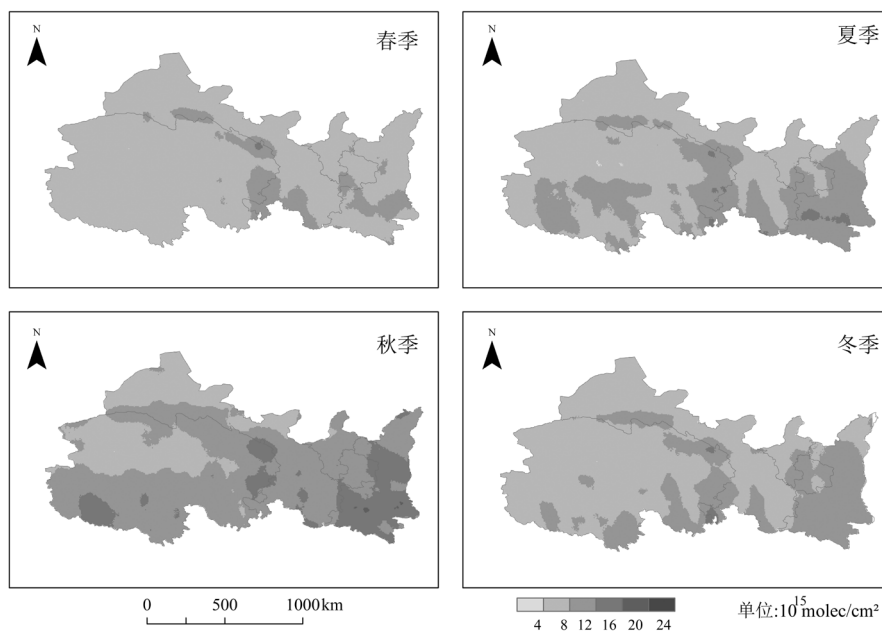


图 5 2018 年西北 4 省甲醛浓度季节分布

Fig.5 Seasonal distribution of formaldehyde concentration in four northwestern provinces in 2018

### 2.3 西北 4 省大气甲醛柱浓度的年际变化

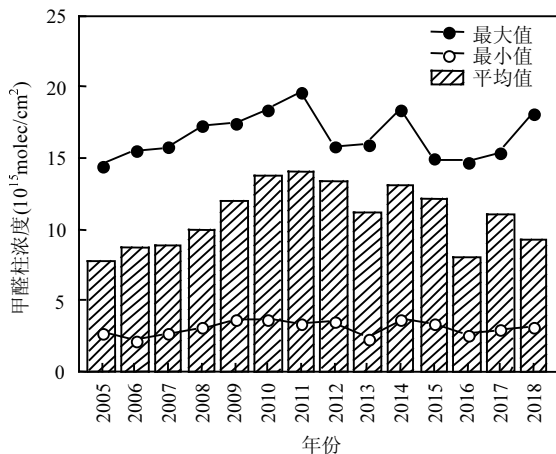


图 6 2005~2018 年甲醛柱浓度年际变化趋势

Fig.6 Trend of annual variation of formaldehyde column concentration from 2005 to 2018

由图 6 可见,2005~2011 年,甲醛柱浓度缓慢增长,2011~2014 年先下降后上升,2014 年出现次高峰.2014~2018 年也保持着先下降后上升的趋势,这与我国自 2013 年起实施的“大气污染防治行动”<sup>[25]</sup>中对挥发性有机物排放量的限制有关.甲醛柱浓度的低值在  $2.50 \times 10^{15} \text{ molec/cm}^2$  左右波动,2013 年处于一个极低值,为  $2.25 \times 10^{15} \text{ molec/cm}^2$ .甲醛柱浓度的年均值保持着先上升后下降的趋势,但在 2014、2015 年有轻微的上升,近 2a 也出现了次高值,这可能与夏季高温和持续性强降雨有关.

14a 间,研究区甲醛柱浓度呈现出东高西低、南高北低的趋势,陕西、宁夏两省甲醛浓度高于青海、甘肃两省.2005~2011 年,全域甲醛柱浓度持续升高,且不断向东扩散.2011 年达到了最大值,4 省均出现

了八级的极高值.2013年,甲醛柱浓度略有降低.2014和2015年有小幅增长,这可能受到了夏季持续高温天气的影响<sup>[20]</sup>.2016年甲醛柱浓度再次下降至四级区,2017年全域浓度有所升高,2018年全域的浓度回落至五级以下,这与各项大气污染防治政策的有效

实施密不可分.总体上看,由于地形等因素的限制,关中平原一直处于六级以上的浓度范围,污染较为严重,这与该区域人口密集、城市分布集中等原因密不可分;而青海西北部地广人稀、工矿较少,甲醛浓度均处于三级以下,生态环境较为优良(图7).

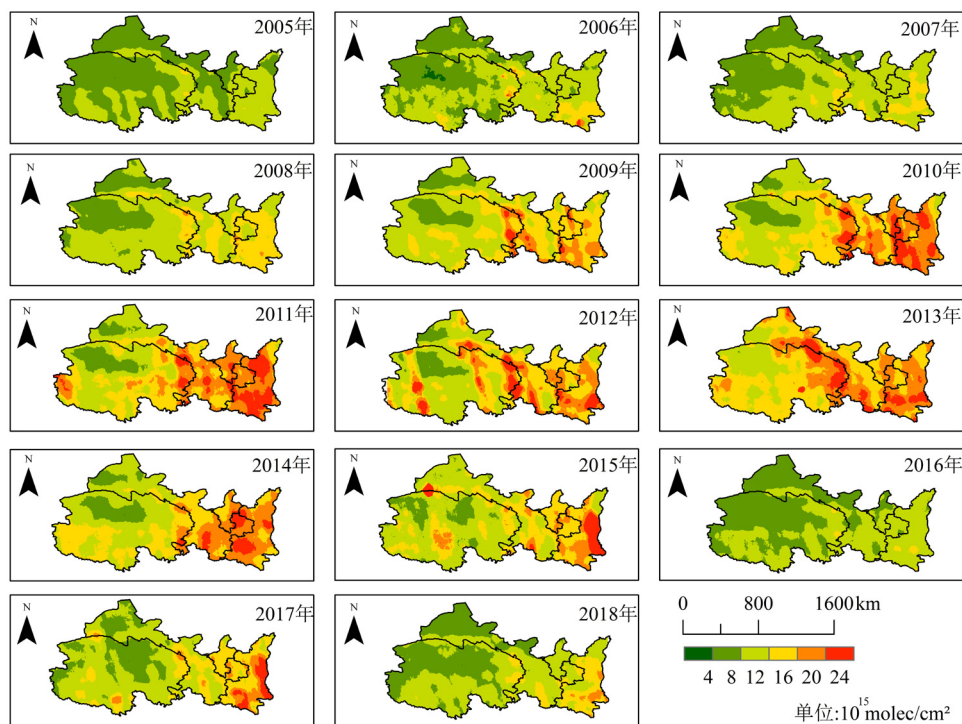


图7 2005~2018年西北4省甲醛柱浓度空间分布

Fig.7 Spatial distribution of formaldehyde column concentration in four northwestern provinces from 2005 to 2018

表1 全国各区域大气甲醛柱浓度月均值对比表

Table 1 Comparison table of atmospheric formaldehyde column concentration in various regions of China

城市	研究时段	甲醛柱浓度范围 ( $10^{15}$ molec/cm <sup>2</sup> )	参考文献
兰州地区	2006~2016	5.70~17.77	[1]
华北5省	2005~2016	7.83~25.08	[2]
长江三角洲	2008~2017	7.78~19.07	[5]
黑龙江省	2005~2016	4.59~19.48	[11]
四川盆地	2005~2016	5.39~26.70	[18]
西北地区	2005~2018	6.92~23.28	本文

为进一步研究西北地区的甲醛柱浓度水平,本研究对比了我国各区域已有的相关研究,结果汇总于表1.与兰州地区的甲醛柱浓度对比,西北地区的甲醛柱浓度保持在合理的范围内,浓度的低值较为接近,高值略高,这与陕西省工业发达,废气排放量较大,大气污染较严重有关.研究区的甲醛柱浓度与华

北5省最为接近,这可能与研究区内相似的产业结构有关.长江三角洲的甲醛柱浓度整体较低,这可能是由于当地实施了严格的环保政策并且得到落实.

#### 2.4 西北4省大气甲醛柱浓度标准偏差分析

标准偏差分析是一种重要的度量数据离散程度的方法,一般用来评估污染物在时间序列上的稳定程度.计算公式如下:

$$SD = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}{n-1}} \quad (1)$$

式中:SD为标准偏差; $n$ 为研究总时长,本研究中 $n=14$ ; $y_i$ 为第 $i$ 年的甲醛柱浓度; $\bar{y}$ 为 $i$ 年的甲醛柱浓度平均值.SD值越小,表明数据在这一时间范围内,波动越小,离散程度越弱,稳定性越好,反之,SD值越大,稳定性越差<sup>[26]</sup>.根据式(1)对研究区大气甲醛柱浓度进行分析,如图8所示,结果表明:西北地区甲醛柱

浓度呈现中东部分散、西部集聚、差异较显著分布格局.在空间分布上,高波动区域分布在青海东部、甘肃西南部、陕西东南部区域,这些地区地势落差大,受自然和人为因素的扰动大,甲醛柱浓度稳定性差.中等波动区域属于高、低波动区的过渡地带,分布在甘肃东南部、陕西东北部及宁夏全域,这些区域城市化水平较高、工矿较多,大气环境容易受到污

染,甲醛柱浓度的稳定性随之波动.低波动区主要分布在青海和甘肃西北部,原因在于该区域经济发展缓慢、人口密度较低,人类活动对环境的作用力小,加之地形地貌单一,受自然因素影响较小,甲醛柱浓度常年保持低值、波动较小、稳定性强.而陕西南部的渭河平原,地势较低,大气污染物在西北风的主导作用下,容易积聚在低谷区域.

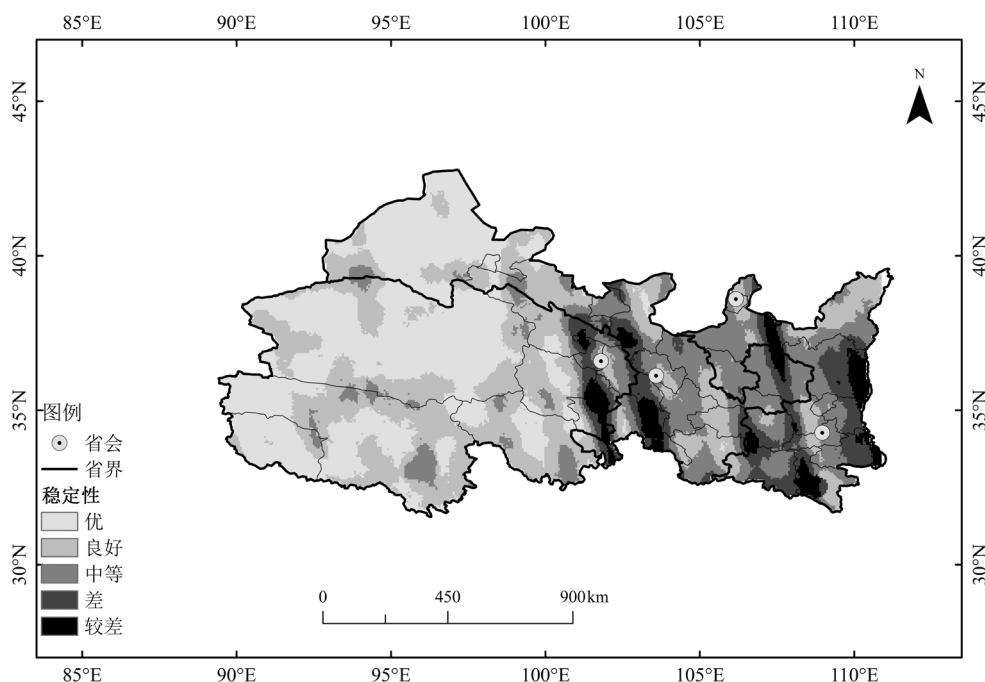


图 8 2005~2018 年西北 4 省甲醛柱浓度标准偏差分布

Fig.8 Distribution of standard deviation of formaldehyde column concentration in four northwestern provinces from 2005 to 2018

### 3 影响因子

#### 3.1 自然因素

**3.1.1 地形和气候甲醛柱浓度的空间分布变化** 受地形影响显著,研究区内青海省处于青藏高原,甘肃、宁夏和陕西 3 省处于青藏高原和黄土高原的过渡地带,全域位于我国第一和第二两级阶梯,地势起伏较大.受地形和热力作用的影响,秋冬季盛行偏北风,整个研究区甲醛柱浓度处于低值.甘肃、宁夏北部、青海省西北部以及陕西省西南部,地势平缓,在大气环流输送作用下,甲醛向这些区域扩散(图 1、7).

西北 4 省深居内陆,远离海岸线,戈壁沙漠广布,水汽难以输送,除陕西和甘肃南部区域外,大部分地区为干旱区和半干旱区,植被覆盖率低,极易受气候变化的影响<sup>[18]</sup>.而且研究区域内下垫面结构复杂,涵

盖青藏高原高寒植被区、温带荒漠区、暖温带落叶阔叶林区以及亚热带常绿阔叶林区.甲醛浓度的高值区出现在 7~9 月,这与该时间段植被茂盛、太阳辐射强烈等密切相关.此外,夏季降水集中,植被在降水的作用下,会释放挥发性有机物,高温高热强辐射下会发生转化,使得甲醛浓度升高.

**3.1.2 风向和风频** 风作为大气污染的主要动力之一,其强度和方向直接影响着污染物扩散速度与方向<sup>[27]</sup>.图 9 表明,陕西、宁夏、甘肃和青海 4 省春季的主导风向均为北北西风和北北东风,在主导风作用下,4 省的北部地区甲醛浓度较高.夏季的主导风向均为东南风和南南东风,因而青海和甘肃东南部、陕西和宁夏南部甲醛浓度较高.秋季的主导风向为东南风,这使得青海和甘肃南部的甲醛浓度偏高.冬季的主导风向为北北西风和西北西风,在这一风

力作用下,青海东南部甲醛浓度升高,甘肃、陕西和宁夏北部区域甲醛浓度降低.

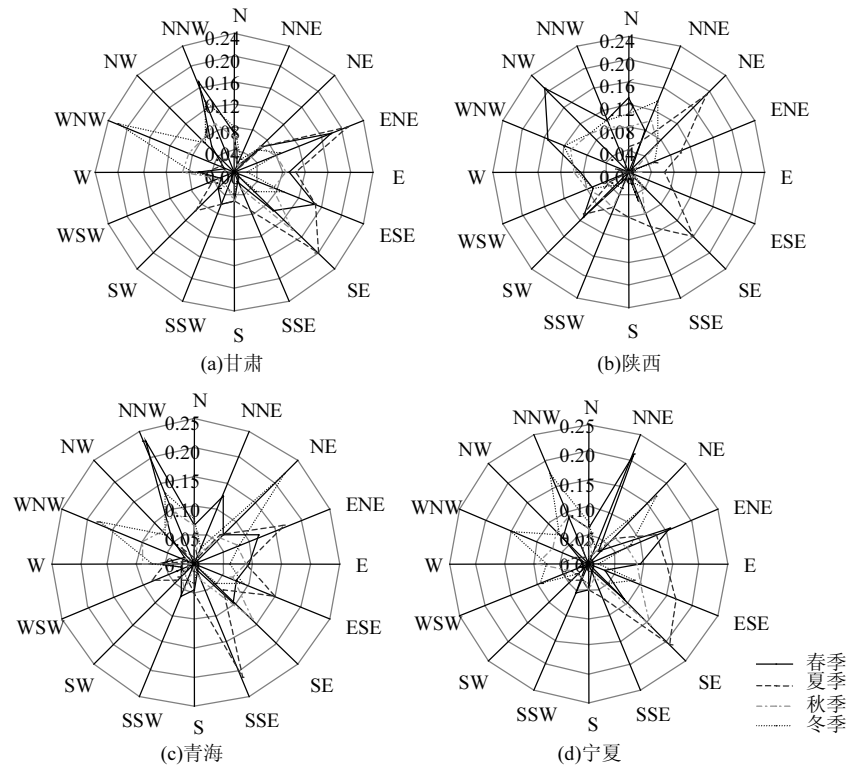


图9 西北4省的风向和风频

Fig.9 Wind direction and wind frequency distribution map in four northwestern provinces

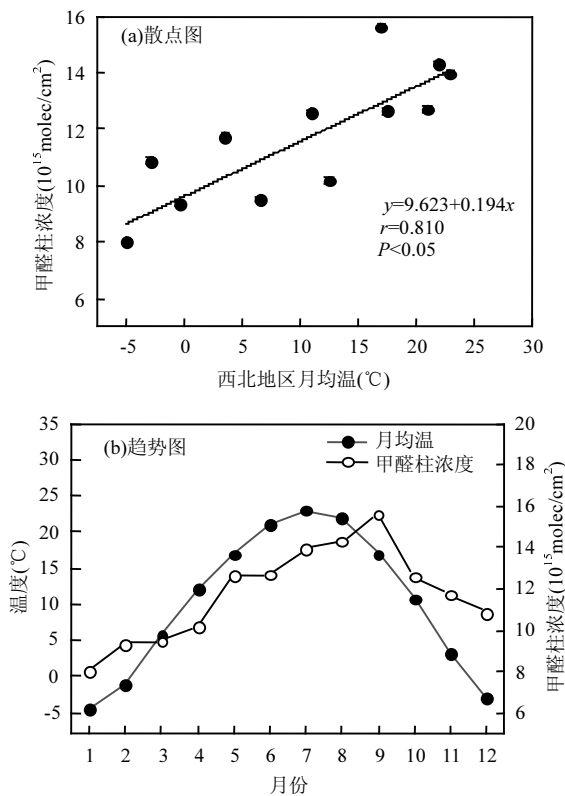


图10 2005~2018年西北4省甲醛柱浓度随气温变化趋势  
Fig.10 Trend of formaldehyde column concentration with temperature in four northwestern provinces from 2005 to 2018

3.1.3 气温和降水 温度的升高会加速光化学反应的速率,进而导致前体物快速转化为甲醛,而二次污染也是甲醛污染的重要来源.因此,气温是影响甲醛浓度的重要因素.夏末秋初,研究区内气温较高,辐射量大,不仅有利于烷烃、烯烃等前体物的产生,而且也利于植物释放的挥发性有机物氧化为甲醛<sup>[28]</sup>.冬季虽然煤炭等化石燃料使用量大,但研究区内面积广阔、人口稀少,总体来说,甲醛柱浓度处于低值.图 10(a)显示,西北 4 省甲醛柱浓度与月均温呈显著正相关关系( $P<0.05$ ).图 10(b)可以看出,3~7 月份,随着气温的升高,甲醛柱浓度也处于上升趋势.12 个月的散点图中,点的集聚性较高,相关系数  $r$  达到了 0.810,说明甲醛浓度与气温二者间呈现出极强相关关系,进一步表明气温对甲醛浓度产生了显著影响.

西北地区深居内陆,水资源短缺且分布不均,该区域距海洋远,太平洋暖湿气流难以抵达;研究区南部受喜马拉雅山的阻隔,印度洋的暖湿气流也被阻挡,因此,每年夏季的降水便成为了重要的来源.图 11(a)显示甲醛柱浓度与降水量呈显著性相关关系 ( $P<0.05$ ),相关系数  $r$  为 0.779.图 11(b)表明甲醛柱浓



度与降水量的最大值的均出现在夏季,这可能是由于夏季降水的增加,促进植被生长,而植被释放的气体包括异戊二烯、单萜等挥发性有机物<sup>[28]</sup>,这些前体物的增加会导致甲醛浓度的升高。

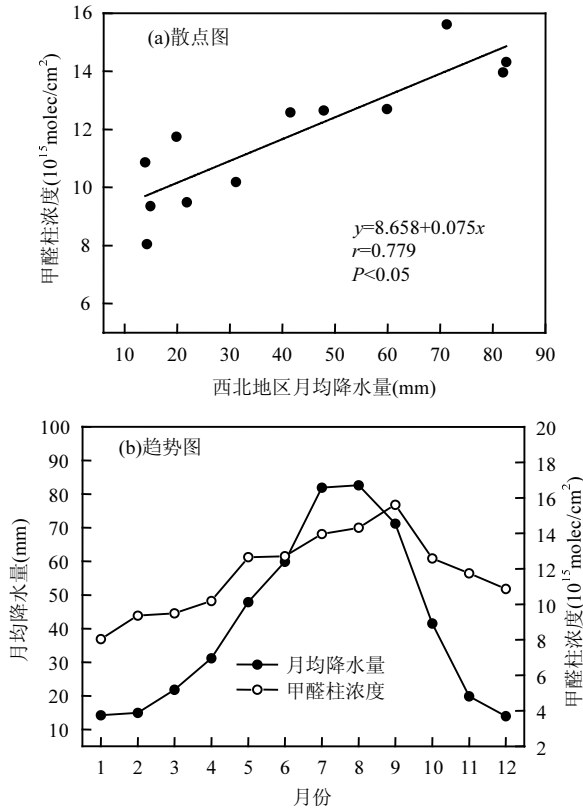


图 11 2005~2018 年西北 4 省甲醛柱浓度随降水量变化趋势  
Fig.11 Trend of formaldehyde column concentration with precipitation in four northwestern provinces from 2005 to 2018

### 3.2 人为因素

**3.2.1 人口密度及地区生产总值** 人口密度是单位土地面积上的人口数量,它是衡量一个地区人口分布状况的重要指标<sup>[29]</sup>。人口密度高的地区,人类生产活动频繁,形成了不同功能区。工矿集聚的工业区大气污染严重,甲醛便是一项主要污染物。研究区内面积广阔、地貌类型多样,人口集聚在山麓、河谷、盆地等地,山地、戈壁、沙漠则人烟稀少。表 2 可知,研究区内甲醛柱浓度与甘肃、青海、宁夏、陕西人口密度存在正相关关系,相关系数分别为 0.623、0.677、0.752、0.673,  $P < 0.05$ ,通过显著性检验,说明甲醛浓度与人口密度存在密切联系,人口密度高的地区,氮氧化物( $\text{NO}_x$ )、烟尘粉尘的排放量高,甲醛污染也越严重<sup>[21]</sup>。

生产总值是一个地区经济水平最直接的体现,各产业产值的高低均影响着当地甲醛浓度的状况<sup>[5]</sup>。表 3 显示,甲醛柱浓度与一产、二产、三产的相关系数分别为 0.420、0.585、0.295,  $P < 0.05$ ,通过了显著性检验。说明甲醛浓度的变化与工业的发展有密切关系,石油、化工生产中产生的  $\text{NO}_x$  等会直接影响甲醛浓度。除此之外,一产和三产的相关系数均小于 0.5,说明农业、旅游业、服务业等产业对甲醛的影响较小,这进一步表明研究区旅游业虽然在发展中,但贡献率较低,第二产业仍占据着重要地位,是主要的污染源。

表 2 2005~2018 年西北 4 省甲醛柱浓度与各省人口密度相关性矩阵

Table 2 Correlation matrix of formaldehyde column concentration and population density of each province in four northwestern provinces from 2005 to 2018

项目	甲醛柱浓度	甘肃人口密度	青海人口密度	宁夏人口密度	陕西人口密度
甲醛柱浓度	1.000				
甘肃人口密度	0.623	1.000			
青海人口密度	0.677	0.953	1.000		
宁夏人口密度	0.752	0.929	0.997	1.000	
陕西人口密度	0.673	0.972	0.990	0.982	1.000

表 3 2005~2018 年西北 4 省甲醛柱浓度与地区生产总值及各产业产值相关性矩阵

Table 3 Correlation matrix of formaldehyde column concentration and regional GDP and production value of each industry in the five provinces of southeast coast from 2005 to 2018

项目	甲醛柱浓度	第一产业	第二产业	第三产业	地区生产总值	人均生产总值
甲醛柱浓度	1.000					
第一产业	0.420	1.000				
第二产业	0.585	0.954	1.000			
第三产业	0.295	0.950	0.873	1.000		
地区生产总值	0.421	0.986	0.953	0.979	1.000	
人均生产总值	0.430	0.987	0.958	0.976	1.000	1.000

**3.2.2 工业废气排放量** 工业废气排放量是指企业厂区内燃料燃烧和生产工艺过程中产生的各种排入空气的含有污染物的气体总量<sup>[30]</sup>。图 12 中宁夏、陕西、甘肃、青海 4 省工业废气排放量和甲醛柱浓度的相关性系数分别为 0.672、0.747、0.473、0.637,均呈现正相关关系,  $P < 0.05$ ,通过了显著性检验,

散点和线性趋势线十分贴近,拟合度较高,说明工业废气排放对甲醛浓度具有重要贡献.西北4省中,陕西工业废气排放量最大;宁夏和青海两省工业废气排放量次之;甘肃省近2a工业升级转型,大力发展旅

游业等第三产业,废气排放量随之减少,环境质量转优.整体上看,随着工业废气排放量的增加,甲醛浓度随之升高,部分年份增长速率放缓,但整体保持上升趋势.

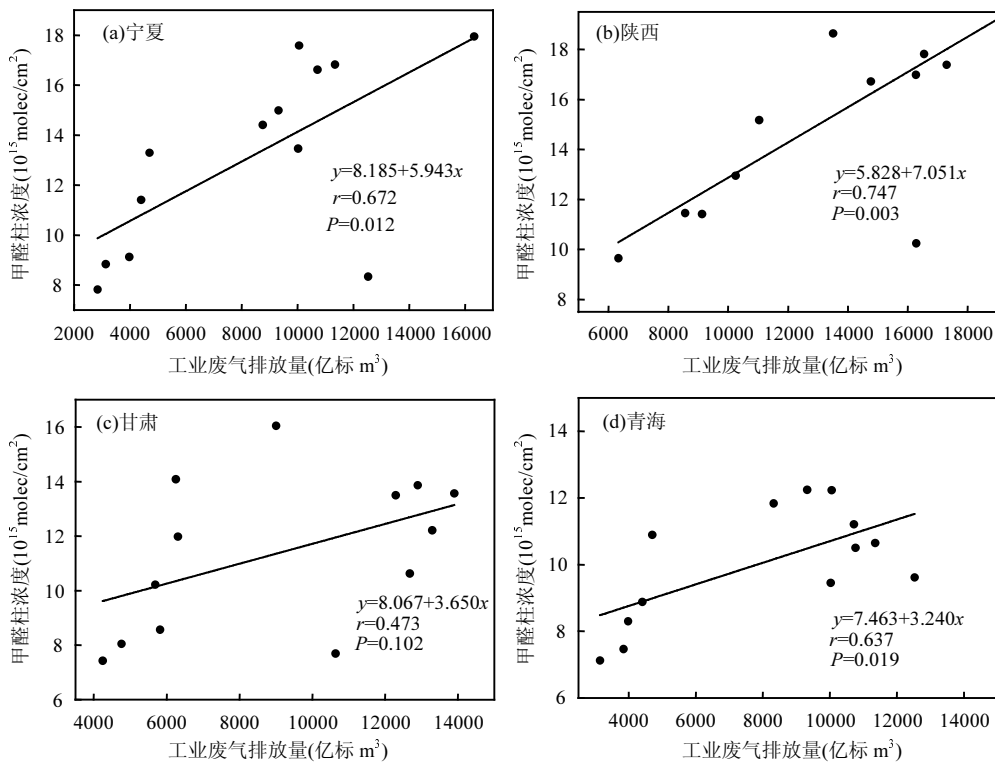
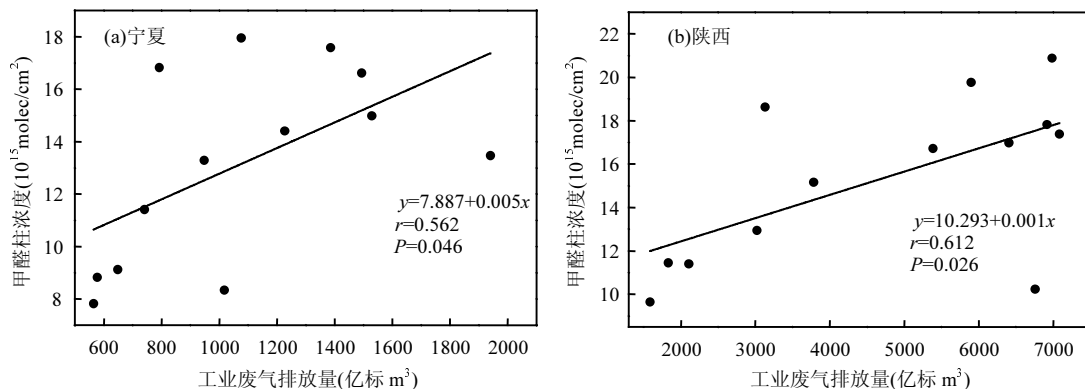


图 12 2005~2018 年西北 4 省甲醛柱浓度与工业废气排放量散点图

Fig.12 Scatter plot of formaldehyde column concentration and industrial waste gas emissions in four northwestern provinces from 2005 to 2018

3.2.3 建筑房屋竣工面积 建筑材料和家具装修是室内甲醛污染的主要来源<sup>[31]</sup>,随着房地产业的发展,建筑材料大量消耗,室内甲醛污染也在逐步加剧.图 13 显示,甲醛柱浓度与宁夏、陕西、甘肃、青海 4 省建筑房屋竣工面积的相关系数分别为 0.562、0.612、0.309、0.502,除甘肃外,其余 4 省相关系数均

大于 0.5,这表明家具建材及室内装修对该区域的甲醛浓度具有一定贡献,对大气环境造成了危害.综合图 12 可以看出,室内甲醛污染虽然不容忽视,但相较于工业废气,室内污染的影响较小,而且人为因素对甲醛浓度的影响与不同地区不同时期的经济政策以及环保措施有关.



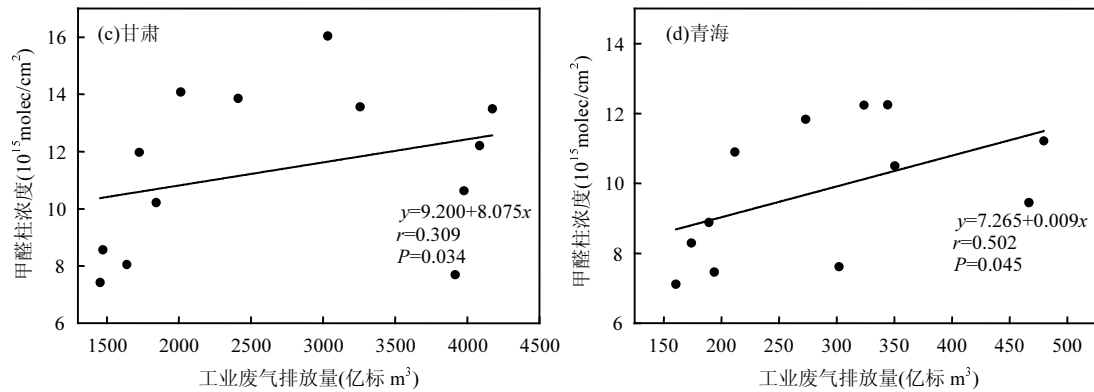


图 13 2005~2018 年西北 4 省甲醛柱浓度与建筑房屋竣工面积散点图

Fig.13 Scatter plot of formaldehyde column concentration and completed building area in four northwestern provinces from 2005 to 2018

### 3.3 西北 4 省大气气溶胶对甲醛的协同影响

大气中的硫酸盐和硝酸盐等颗粒物是大气气溶胶粒子的重要组成部分<sup>[12]</sup>,气溶胶能吸收太阳辐射、蒸发云滴、减少云量,同时也可以吸附大气中的甲醛分子.气溶胶粒子增多,太阳辐射(反射、散射、折射)作用会增强,在强辐射的作用下,光化学反应速率加快,甲醛分子生成速率随之加快,这说明气溶胶粒子在一定程度上会促进甲醛分子的生成.通过对气溶胶与甲醛这 2 个典型污染物的分析,旨在探讨二者间的协同影响,以期能为大气污染治理提供一定的帮助.由图 14 可知,气溶胶光学厚度和甲醛柱浓度的相关系数  $r$  为 0.75,  $P < 0.05$ ,呈显著正相关关系.随着气溶胶光学厚度的增加,甲醛浓度随着增长,特别是 4~6 月增速较快,这与夏季高温高辐射密不可分;8~10 月,太阳辐射减弱,光化学反应速率降低,甲醛柱浓度随之降低;11 月气溶胶粒子和甲醛分子均出现小幅增长,这可能是由于冬季采暖季来临,煤炭等燃料的使用量大幅增加,产生了黑炭气溶胶;另外,冬季地表温度较低会形成逆温层,污染物不易扩散.

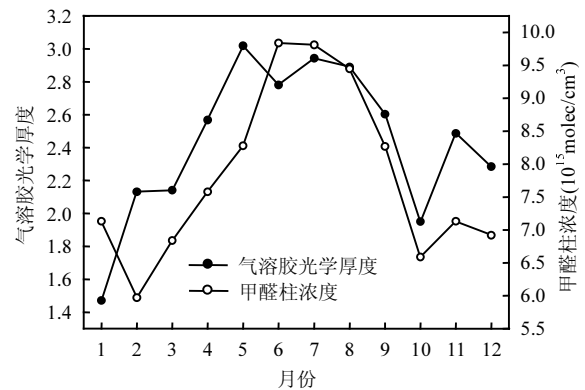
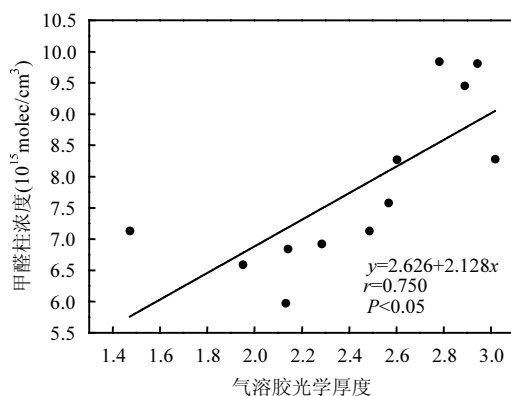


图 14 2005~2018 年西北 4 省气溶胶光学厚度与甲醛柱浓度月均值的变化趋势

Fig.14 The trend of monthly mean aerosol optical thickness and formaldehyde column concentration in four northwestern provinces from 2005 to 2018

空间相关性计算方法是一种基于像元的空间分析方法,它可以通过选取各种影响因子(气温、降水、植被覆盖率等)分析其与甲醛柱浓度的相关关系<sup>[32]</sup>.本文将气溶胶光学厚度与甲醛柱浓度结合,分析二者的相关关系.计算公式如下:

$$R_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n [(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})]}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (2)$$

式中: $R_{xy}$  为甲醛柱浓度与气溶胶光学厚度的相关性系数,域值在 $[-1,1]$ 之间; $x_i$  表示第  $i$  月的甲醛柱浓度值; $y_i$  表示第  $i$  月的气溶胶光学厚度; $\bar{x}$  表示甲醛柱浓度的月均值; $\bar{y}$  表示气溶胶光学厚度的月均值; $n$  为样本数量,在该研究中  $n=12$ . $R_{xy} > 0$ ,表示二者呈正相关关系; $R_{xy} < 0$ ,表示二者呈负相关关系. $R_{xy}$  越接近于 1,表明二者的正相关性越强; $R_{xy}$  越接近于 -1,表明二

者的负相关性越强。

为了更直观的体现气溶胶光学厚度与甲醛柱浓度的空间相关性,本研究基于像元的空间相关性计算方法,以2018年为例,分析甲醛柱浓度与气溶胶光学厚度的相关关系,根据式(2)对2018年的逐月栅格图进行地图代算,得到图15。结果表明:有75.05%的格点数据通过了0.05的置信度检验,气溶胶光学厚度与甲醛柱浓度呈正相关的区域占总面积的87.51%。从空间分布上看,相关系数大于0.5的区域占全域面积的84.58%,分布在青海和陕西省西南部、甘肃省东南部、宁夏全域,这与该区域经济发展缓慢、生产以农牧业

为主有关,而且地势较高不利于气溶胶的扩散。相关系数小于0.5的区域占全域面积的15.42%,分布在甘肃省西北和西南部、青海省北部、陕西省东北部,该区域地势较低有利于气溶胶在大气传输作用下疏散,而甲醛在平原和谷地易于集聚,浓度随之增加,因此二者保持着较低的相关性。除此之外,化石燃料的燃烧是众多大气污染物的主要来源,冬季采暖季时煤炭使用量大幅增加,不仅会导致气溶胶粒子中黑炭气溶胶的生成,也会产生挥发性有机物等甲醛前体物,进而导致甲醛浓度的升高,因此气溶胶粒子和甲醛分子在一定程度上保持此消彼长的趋势。

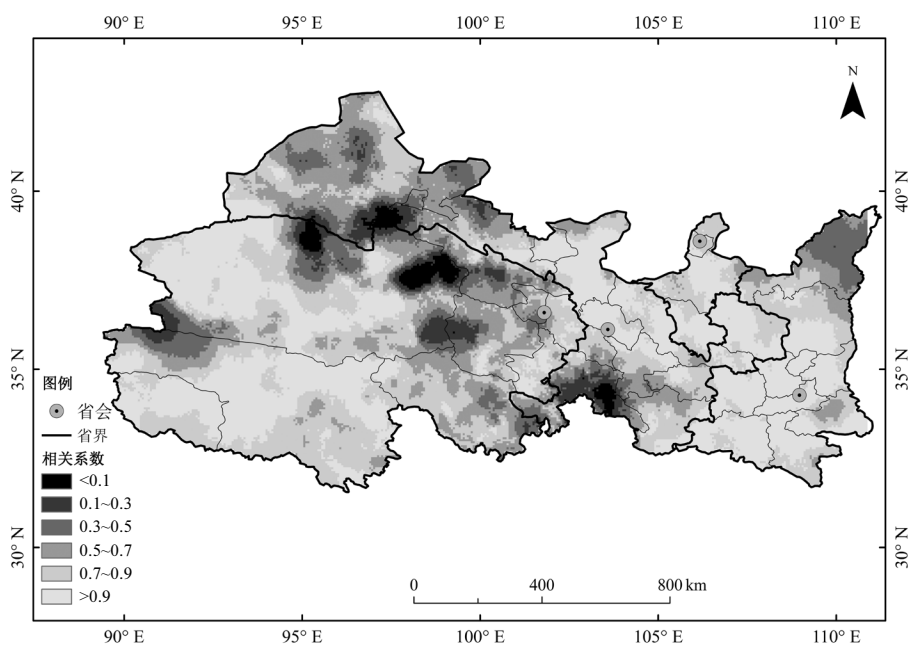


图15 2018年西北4省甲醛柱浓度月均值与气溶胶光学厚度的相关性

Fig.15 Correlation analysis between monthly mean value of formaldehyde column concentration and aerosol optical thickness in four northwestern provinces in 2018

## 4 结论

4.1 从时间变化上看,14a中,研究区甲醛柱浓度呈现先增加后减小的波动变化趋势,2005~2011年,甲醛柱浓度处于小幅上升的趋势,2011~2014年先下降后上升,2014年出现次高峰,2014~2018年继续保持着先下降后上升的趋势。研究区甲醛柱浓度夏秋季显著高于冬春季,且冬季均值略高于春季。

4.2 从空间分布上看,研究区甲醛柱浓度总体呈现东高西低、南高北低的趋势,陕西、宁夏两省高于青海、甘肃两省。稳定性呈现中东部分散、西部集聚、

差异较显著的分布格局。高波动区分布在青海省东部、甘肃省西南部、陕西省东南部区域;中等波动区分布在甘肃省东南部、宁夏全域、陕西省东北部;低波动区主要分布在青海省西部、甘肃省西北部。

4.3 分析其影响因子,自然因素中,甲醛柱浓度的空间分布受地形影响显著,与风向、气温均呈现显著正相关;人为因素中,甲醛柱浓度与人口密度、地区生产总值、工业废气排放量及建筑房屋竣工面积均表现出正相关关系,其中,甲醛柱浓度与工业废气排放的相关度最高。

4.4 西北4省大气气溶胶粒子对甲醛分子产生了

协同作用,二者间相关系数为 0.75,呈显著正相关关系.气溶胶光学厚度与甲醛柱浓度呈正相关的区域占全域面积的 87.51%,主要分布区为青海省西部、陕西省西南部、甘肃省东南部和宁夏全域.

#### 参考文献:

- [1] 谢顺涛,巨天珍,葛建团,等.基于卫星遥感中国甲醛的时空分布及影响因子 [J]. 中国环境科学, 2018,38(5):1677-1684.  
Xie S T, Ju T Z, Ge J T, et al. Spatial and temporal distribution and related factors analysis of formaldehyde in China, based on satellite remote sensing [J]. China Environmental Science, 2018,38(5):1677-1684.
- [2] 焦 骄,刘旻霞,李俐蓉,等.近 12 年华北 5 省区域对流层甲醛柱浓度时空变化及影响因素 [J]. 环境科学学报, 2018,38(6):2191-2200.  
Jiao J, Liu M X, Li L R, et al. Spatio-temporal change and influencing factors of tropospheric HCHO column density of the five provinces of North China in the 12years [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2018, 38(6):2191-2200.
- [3] 李新茹.浅谈室内甲醛污染的危害与防治 [J]. 焦作大学学报, 2017, 31(4):83-84.  
Li X R. Research about the harm and prevention of indoor formaldehyde pollution [J]. Journal of Jiaozuo University, 2017,31(4): 83-84.
- [4] 郑 玄,蒋朝晖,翟海晴,等.长沙市大气中醛酮类化合物浓度变化特征 [J]. 中国环境监测, 2019,35(3):93-99.  
Zheng X, Jiang Z H, Zhai H Q, et al. Variation characteristics of atmospheric carbonyl compounds in Changsha [J]. Environmental Monitoring in China, 2019,35(3):93-99.
- [5] 李 阳,巨天珍,马 成,等.长江三角洲近 10 年甲醛柱浓度变化及影响因素 [J]. 中国环境科学, 2019,39(3):897-907.  
Li Y, Ju T Z, Ma C, et al. The temporal, spatial variation and influencing factor of formaldehyde column concentration in the Yangtze River Delta in the past 10 years [J]. China Environmental Science, 2019,39(3):897-907.
- [6] Grytsai A, Milinevsky G. SCIAMACHY/Envisat, OMI/Aura, and ground-based total ozone measurements over Kyiv-Goloseyev station [J]. International Journal of Remote Sensing, 2013,34(15): 5611-5622.
- [7] Balis D, Kroon M, Koukouli M E, et al. Validation of ozone monitoring instrument total ozone column measurements using Brewer and Dobson spectrophotometer ground-based observations [J]. Journal of Geophysical Research, 2007,VOL.112,D24S46.
- [8] Zhang J, Ronald Johannes Van Der A, Ding J Y. Detection and emission estimates of NO<sub>x</sub> sources over China North Plain using OMI observations [J]. International Journal of Remote Sensing, 2018, 39(9):2847-2859.
- [9] Bracher A, Lamsal L N, Weber M, et al. Global satellite validation of SCIAMACHY O<sub>3</sub> columns with GOME WFOAS [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2005,5:2357-2368.
- [10] 姜加龙,曾立民,王文杰,等.华北地区冬季和夏季大气甲醛污染特征分析 [J]. 环境科学学报, 2019,39(6):1895-1901.  
Jiang J L, Zeng L M, Wang W J, et al. Characteristics of atmospheric formaldehyde pollution in winter and summer in North China [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2019,39(6):1895-1901.
- [11] 刘宏庆,巨天珍,裴 洁,等.黑龙江省近 12 年甲醛柱浓度时空变化及其影响因素 [J]. 中国环境科学, 2018,38(6):2001-2011.  
Liu H Q, Ju T Z, Pei J, et al. Spatial-temporal changes of tropospheric HCHO column density and its impact factors over Heilongjiang Province during 2005-2016 [J]. China Environmental Science, 2018, 38(6):2001-2011.
- [12] 黄 鑫,李亚丽,王靖中,等.1980-2016 年陕西省冬季霾日数时空变化及增多成因初探 [J]. 中国环境科学, 2019,39(9):3671-3681.  
Huang X, Li Y L, Wang J Z, et al. The spatial-temporal variations of haze in Shaanxi Province from 1980 to 2016 and the initial exploration of the increase [J]. China Environmental Science, 2019,39(9): 3671-3681.
- [13] 田 莉,奚晓霞.近 50 年西北地区风速的气候变化特征 [J]. 安徽农业科学, 2011,39(32):20065-20068.  
Tian L, Xi X X. Climate change characteristic of wind speed in northwest of China in recent 50years [J]. Journal of Anhui agriculture science, 2011,39(32):20065-20068.
- [14] 李 艳,王 元,汤剑平.中国近地层风能资源的时空变化特征 [J]. 南京大学学报(自然科学版), 2007,43(3):61-72.  
Li Y, Wang Y, Tang J P. Spatial-temporal characteristics of wind energy resources in near China's surface [J]. Journal of Nanjing University(Natural Science Edition), 2007,43(3):61-72.
- [15] Akinyemi M L. Comparative analysis of total ozone data from satellite EPTOMS and ground-based Dobson instrument at Lagos-Nigeria [J]. Journal of Innovative Research in Engineering and Science, 2011,2: 162-172.
- [16] Bodeker G E, Scott J C, Kreher K, et al. Global ozone trends in potential vorticity coordinates using TOMS and GOME intercompared against the Dobson network: 1978-1998 [J]. Journal of Geophysical Research, 2001,106:23029-23042.
- [17] 咸 龙,葛建团,徐 敏,等.珠江三角洲对流层 HCHO 柱浓度遥感监测及影响因子 [J]. 中国环境科学, 2018,38(9):3221-3231.  
Xian L, Ge J T, Xu M, et al. Remote sensing monitoring of tropospheric HCHO column concentration and influential factors over pearl river delta, China [J]. China Environmental Science, 2018,38(9): 3221-3231.
- [18] 古 珊,杨显玉,吕世华,等.基于 OMI 数据的四川盆地对流层甲醛时空分布特征 [J]. 环境科学学报, 2019,39(9):2860-2872.  
Gu S, Yang X Y, Lü S H, et al. Spatiotemporal variations in OMI satellite-based tropospheric formaldehyde in Sichuan Basin [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2019,39(9):2860-2872.
- [19] 肖钟湧,江 洪.长江三角洲地区大气顶气溶胶直接辐射强迫遥感估算 [J]. 中国环境科学, 2013,33(5):799-807.  
Xiao Z Y, Jiang H. Estimations of aerosol direct radioactive forcing at the top of the atmosphere using remote sensing data in Yangtze River Delta region, China [J]. China Environmental Science, 2013,33(5): 799-807.
- [20] 中国气象局.大气环境气象公报 [EB/OL]. 2018.http://www.nmc.cn/publish/environment/National-Bulletin-atmospheric-environment.htm. China Meteorological Administration. Atmospheric environmental

- meteorological bulletin. [EB/OL].
- [21] 林永生.中国大气污染防治重点区污染物排放的驱动因素研究 [J]. 中国人口·资源与环境, 2016,26(11):65-68.  
Lin Y S. Study on driving factors of pollutants in China air pollution prevention key areas [J]. China Population Resources and environment, 2016,26(11):65-68.
- [22] 贺克斌.打赢蓝天保卫战需要加快钢铁行业超低排放改造 [N]. 中国环境报, 2019-05-06(003).  
He K B. Winning the defense of the blue sky needs to accelerate the ultra-low emission transformation of the steel industry [N]. China Environment News, 2019-05-06(003).
- [23] Celarier E A, Brinkma E J, Gleason J F, et al. Validation of ozone monitoring instrument nitrogen dioxide columns [J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 2008,113(D15).
- [24] 杨 亮.陕西省旅游业经济效应研究 [D]. 兰州:西北师范大学, 2017.  
Yang L. A study on economic effects of the tourism industry of Shaanxi Province [D]. Lanzhou: Northwest Normal University, 2017.
- [25] 生态环境部大气环境司.全国大气污染防治工作进展及建议 [J]. 环境保护, 2018,46(19):11-15.  
Ministry of Ecology and Environment. Progress and suggestions on air pollution control in China [J]. Environmental Protection, 2018,46(19): 11-15.
- [26] 宋佳颖,刘旻霞,孙瑞弟,等.基于 OMI 数据的东南沿海大气臭氧浓度时空分布特征研究 [J]. 环境科学学报, 2020,40(2):439-449.  
Song J Y, Liu M X, Sun R D, et al. Temporal and spatial characteristics of atmospheric ozone concentration in Southeast Coast based on OMI data [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2020,40(2):438-449.
- [27] 赵瑞东,刘旻霞,李 瑞,等.基于 OMI 数据太原市 NO<sub>2</sub> 时空变化及影响因素分析 [J]. 环境科学与技术, 2017,40(6):141-148.  
Zhao R D, Liu M X, Li R, et al. Spatio-temporal variation of NO<sub>2</sub> in concentrated Taiyuan and analysis of influencing factor based on OMI remote sensing data [J]. Environmental Science and Technology, 2017, 40(6):141-148.
- [28] 廖建军,齐增湘,李 涛,等.植物挥发性有机物研究进展 [J]. 南华大学学报(自然科学版), 2016,30(3):119-123.  
Liao J J, Qi Z X, Li T, et al. Research advances in volatile organic compounds of plant [J]. Journal of University of South China (Natural Science Edition), 2016,30(3):119-123.
- [29] 石佩珍,赵 煜.县域尺度的西北五省区人口分布地统计学分析 [J/OL]. 广西师范学院学报(自然科学版), 2019,(3):1-9.  
Shi P Z, Zhao Y. Geo-statistical analysis of population distribution in the five northwest provinces at county scale [J/OL]. Journal of Guangxi Teachers Education University (Natural Science Edition), 2019,(3): 1-9.
- [30] 沈中增.工业废气治理技术效率及其影响因素研究 [J]. 环境与发展, 2019,31(7):109+141.  
Shen Z Z. Study on technical efficiency of industrial waste gas treatment and its influencing factors [J]. Environment and Development, 2019,31(7):109+141.
- [31] 孙 湛,王蔚茹,张 扬.新装修住宅室内空气甲醛污染状况及影响因素 [J]. 中国公共卫生管理, 2013,29(1):92-93.  
Sun Z, Wang W R, Zhang Y. Air formaldehyde pollution in newly renovated residential buildings and its influencing factors [J]. Chinese Journal of Public Health Management, 2013,29(1):92-93.
- [32] 张亮林,潘竟虎,张大弘.基于 MODIS 数据的中国气溶胶光学厚度时空分布特征 [J]. 环境科学学报, 2018,38(11):4431-4439.  
Zhang L L, Pan J H, Zhang D H. Spatio-temporal distribution characteristics of aerosol optical depths in China based on MODIS data [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2018,38(11):4431-4439.

**作者简介:** 刘旻霞(1972-),女,甘肃镇原人,教授,博士,主要从事大气污染及生态恢复方面的教学科研工作.发表论文 50 多篇.