

降水量与城市大气环境关系 ——以 113 个环保重点城市为例

薛海, 张帆

(华北水利水电大学水利学院, 郑州 450046)

摘要: 为研究降水量与大气污染物之间的关系, 依据 2017 年全国 113 个环保重点城市大气质量数据, 得出城市聚类空间分布规律及两者之间线性拟合方程。基于南北降水量分布特性与城市空气污染指数, 采用模糊聚类法对具有不同亲疏程度的城市进行类别划分, 运用 Spearman 相关性与拟合方程对大气污染特征值与降水量进行分析。结果表明: 随着聚类种数增多, 城市聚集在空间分布上由“环环相套”发展为“依流域分布”, 降水量与大气污染物浓度呈现负向关联性, 晋冀鲁豫陕省份污染最严重。采用 Kolmogorov-Smirnov 检验法, 得出 NO_2 、 O_3 、 $\text{PM}_{2.5}$ 总体分布符合正态分布, SO_2 、 PM_{10} 、 CO 既不符合正态分布, 也不符合均匀、指数分布, 它们与降水量的相关系数为: -0.316 、 -0.238 、 -0.332 、 -0.617 、 -0.574 、 -0.695 ; 线性拟合方程系数处于 $[-0.031, -0.008]$ 之间, 降水量与大气污染物浓度之间负相关性明显。研究结果有助于了解和认识降水量对城市大气环境变化的影响。

关键词: 城市大气环境; 降水分布特征; 模糊聚类; 正态分布; 拟合回归分析

随着城镇化建设的持续发展, 城市不断扩张, 各种能源消耗类的机械使用越来越多, 大气环境的自净能力一直被破坏, 空气环境恶化。尤其近些年雾霾频发, 严重困扰着人们的正常生活。而在自然界中, 与城市和大气环境联系最为紧密的就是降水。降水是水循环的重要组成部分, 大气中的水汽通过海洋、陆地小循环以降水的形式形成地表水和地下水, 使人类在生产生活中获得不可或缺的水资源^[1]。在降水过程中, 城市空气质量也得到改变, 两者有着密不可分的联系。

大气环境污染问题历来是国内外研究的热点, 它与人类的生存息息相关。从研究对象来看, 对城市大气环境污染的研究主要为评价分析, 即依据城市环境历年数据, 从时空方面建立评价指标体系进行综合评价来研究大气污染的程度。如龚则周等^[2]通过构建 CAQI 综合指标采用熵值法建立指标评价体系, 分析常见的六种污染物对中国城市空气质量的综合影响; 王雅楠等^[3]以 10 年 29 个省份的面板数据为基础, 采用门槛效应与环境 Kuznets 曲线法分析了城镇化与碳排放之间的关系, 得出呈“倒 U 型”分布, 当城镇化程度较高时, 碳排放与城镇化率呈负相关性; 徐成龙等^[4]利用 GMM 方法、LMDI 分解及线性模型探究了山东省的大气环境效应, 得出了工业调整对大气污染物减排成正向的关系; Akintola 等^[5]构建隶属函数和权重矩阵, 建立模糊评价模型, 通过收集分析天然气燃烧后形成大气污染物的降水来判断是否可以饮用。何明圆等^[6-9]通过因子分析法、小波分析等构建时空模型, 进行大气污染物的评定分析; 冯鑫媛等^[10]通过气象资料和 API 指数

收稿日期: 2019-01-21; 修订日期: 2019-06-05

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51709108)

作者简介: 薛海 (1974-), 男, 河南修武人, 博士, 副教授, 研究方向为河流及流域水沙模拟。

E-mail: xuehai@ncwu.edu.cn

资料,通过统计学分析的方法得出沙尘天气对PM_{2.5}的影响关系。

对降水量的研究主要为降雨量预测或研究空间分布变化。如GROISMAN等^[11-13]基于 γ 分布或利用飞机观测云层变化等方法,研究了降水量时空分布变化,得出降水对小云滴具有清除的作用,统计模型有助于降水研究;袁定波等^[14]基于地理空间要素采用面向对象的聚类方法分析了降雨的变化趋势,并对面雨量进行估计;刘少华等^[15]依据中国境内2257个气象站逐日降水资料,对国内降水测量的精度进行系统的评价;袁瑞强等^[16]、陈坤等^[17]运用时间序列分析及Mann-Kendall检验探究了山西省降水量时空变化及中国水储量的变化;鄢姣等^[18]利用全国186个城市数据验证了降水量与城镇化发展先成负相关再正相关的变化关系;吴凯等^[19]利用权重法对降水量进行分类,统计出中国近54年各个分区的降水特征及空间变化;樊高峰等^[20]对分钟降水量与能见度及PM_{2.5}之间的关系进行研究,通过非线性拟合得出降水对其有清除的作用;周景坤^[21]依据73个城市面板数据从城市发展水平与降水量的关系探究雾霾污染问题,分析得出雾霾污染严重程度与降水量关系密切,与城市发展水平关系较弱。

目前国内外对降水量与城市大气污染的研究处于单方面侧重的探索阶段,对两者相关性的研究尚不多见。因此,本文以113个环保重点城市的大气污染物与年平均降水量数据为基础,基于模糊聚类空间地理分析及相关性、线性拟合分析,从空间上探讨在不同分类标准下各个城市的聚集变化情况及两者的相关关系,以期为不同污染程度城市分区治理提供一种新的分类方法,为城市建设可持续发展提供必要的理论支撑。

1 研究方法 with 数据来源

1.1 研究对象

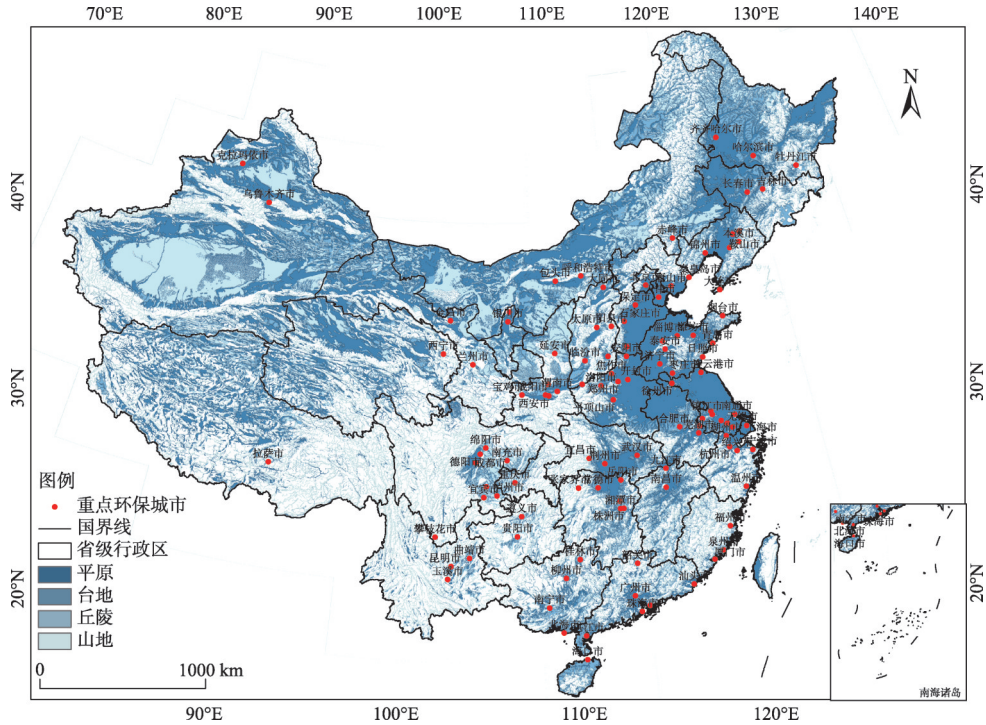
选取113个重点环境保护城市作为样本城市,包括27个省会城市、5个计划单列城市以及其他77个城市,涵盖每一个省份,可以描述全国的大气环境质量,空间分布如图1所示(地理数据来自中国科学院资源环境数据云平台, <http://www.resdc.cn>)。重点环境保护城市大气污染值及降水量数据来自《中国统计年鉴》环境与资源分类项,选取2017年二氧化硫SO₂(年平均浓度 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)、二氧化氮NO₂(年平均浓度 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)、可吸入颗粒物PM₁₀(年平均浓度 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)、一氧化碳日均值第95百分位浓度CO(mg/m^3)、臭氧日最大8小时第90百分位浓度O₃($\mu\text{g}/\text{m}^3$)、细颗粒物PM_{2.5}(年平均浓度 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)以及年平均降水量P(mm)为特征变量。

1.2 研究方法

本文将113组城市主要污染物与降水量作为样本数据,每组数据包含6个大气特征值和1个降水量特征值,采用模糊聚类的方法对其进行分类,并对各个城市的降水量与其对应的大气污染物特征值进行线性拟合分析,探究其空间分布规律及两者相关性。

模糊聚类分析^[22]指依照事物的特征、相似性等标准进行分类的数学方法。常用的方法是系统聚类,系统聚类是一种基于层次的聚类方法,其依据变量之间相似程度依次列出不同阈值下的分类情况,再通过 F 统计量来确定最佳阈值选取最优分类结果,所以系统聚类的结果更加准确可靠,避免了人为分类所造成的误差。在资源环境学科中,许多指标范围无法有明确的界限,因此采用模糊聚类更加符合实际情况。

模糊聚类分析步骤如下:



注: 本图基于国家测绘地理信息局标准地图服务网站下载审图号GS(2016)1603标准地图制作, 底图无修改, 下同。

图1 环保重点城市的空间分布

Fig.1 Spatial distribution of key environmental protection cities

(1) 设论域 $U = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ 为被分类的对象, 每个对象由 m 个特征值表示其性状, 即 $x_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{im}) (i = 1, 2, \dots, n)$, 在本文中 $n = 113, m = 7, x_{i1} = \text{SO}_2, x_{i2} = \text{NO}_2, x_{i3} = \text{PM}_{10}, x_{i4} = \text{CO}, x_{i5} = \text{O}_3, x_{i6} = \text{PM}_{2.5}, x_{i7} = \text{P}$ 。标准化处理, 其方程为:

$$x_{ik}^* = \frac{x_{ik} - \min\{x_{ik}\}}{\max\{x_{ik}\} - \min\{x_{ik}\}} \quad (k = 1, 2, 3, 4, 5, 6) \quad (1)$$

$1 \leq i \leq n \quad 1 \leq k \leq m$

式中: x_{ik}^* 为标准化后的大气指标变量; $\max\{x_{ik}\}$ 、 $\min\{x_{ik}\}$ 代表第 i 组城市中特征值的最大值与最小值。

(2) 建立模糊相似矩阵, 确定不同城市大气环境质量的相似程度。其数学模型为:

$$r_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^m |x_{ik} - \bar{x}_i| |x_{jk} - \bar{x}_j|}{\sqrt{\sum_{k=1}^m (x_{ik} - \bar{x}_i)^2} \cdot \sqrt{\sum_{k=1}^m (x_{jk} - \bar{x}_j)^2}} \quad (2)$$

$$\bar{x}_i = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m x_{ik}, \quad \bar{x}_j = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m x_{jk} \quad (3)$$

$$d(x_i, x_j) = \sqrt{\sum_{k=1}^m (x_{ik} - x_{jk})^2} \quad (4)$$

式中: r_{ij} 为第 i 组与第 j 组特征值的相关系数; \bar{x}_i 与 \bar{x}_j 为第 i 组与第 j 组特征值的平均值;

$d(x_i, x_j)$ 为第 i 组与第 j 组特征值之间的距离。

(3) 选择聚类方法组间平均连接法, 得出不同阈值 λ 的动态聚类图, 并采用 F 统计量确定 λ 最佳阈值, 其计算公式为:

$$F = \frac{\sum_{j=1}^r n_j \|\bar{x}^{(j)} - \bar{x}\|^2 / (r-1)}{\sum_{j=1}^r \sum_{i=1}^{n_j} \|x_i^{(j)} - \bar{x}^{(j)}\|^2 / (n-r)} \quad (5)$$

式中: $\bar{x}^{(j)}$ 为第 k 个变量的平均值, 即: $\bar{x}^{(j)} = \frac{1}{n_j} \sum_{i=1}^{n_j} x_{ik}^{(j)}$ ($k=1, 2, 3, 4, 5, 6$); $\bar{x}^{(j)}$ 与 \bar{x} 间的距离, 即 $\|\bar{x}^{(j)} - \bar{x}\| = \sqrt{\sum_{k=1}^m (\bar{x}_k^{(j)} - \bar{x}_k)^2}$, $\|x_i^{(j)} - \bar{x}^{(j)}\|$ 为第 j 类中第 i 个样本 $x_i^{(j)}$ 与其中心 $\bar{x}^{(j)}$ 间的距离; r 为对应于 λ 的分类数。

对于变量特征值的分布及拟合回归的研究, 本文采用 Kolmogorov-Smirnov 检验法^[23], 来确定 7 个变量的分布的归属问题, 其主要公式如下:

$$D_n = \sup_x |F_n(x) - F(x)| \quad (6)$$

式中: $F_n(x)$ 为检测的序列值; $F(x)$ 为已确定的分布值; D_n 为检验统计量。比较检验统计量 D_n 与临界值 $D_n \alpha$ 的大小, $D_n \alpha$ 在显著水平 $\alpha=0.05$ 的水平下, 依据 n 值查表可得。

Spearman 相关系数计算公式如下所示:

$$R = \frac{3 \sum d_i^2}{n(n^2 - 1)}, \quad d_i = x_i - y_i \quad (7)$$

式中: d_i 为变量 (x_i, y_i) 的秩次差; n 为对子数。

显著性检验公式:

$$r_s = \frac{\sum_{i=1}^n (R_i - \bar{R})(S_i - \bar{S})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (R_i - \bar{R})^2 \sum_{i=1}^n (S_i - \bar{S})^2}} \quad (8)$$

式中: r_s 为检验值; R_i 与 S_i 为变量特征值的秩次; \bar{R} 与 \bar{S} 为秩次的平均值; r_s^α 为临界值可由《Spearman 相关系数检验临界表》获得。当 $r_s > r_s^\alpha$ 时, 拒绝原假设, 认为两变量相关, 当 $r_s < r_s^\alpha$ 时, 不能拒绝原假设, 认为两变量无关。

2 结果分析

2.1 特征值聚类分析

对环保城市大气污染数据预处理, 分析变量特征值的离散程度, 如图 2 所示。根据国家环境空气质量标准 (GB 3095-2012) 规定, 居住区、商业交通居民区以及农村地区属于环境空气功能区的二类区, 空气浓度限值应低于二级标准。SO₂ 与 CO 排放量情况整体较好, 除临汾市与安阳市外, 其余全部符合国家二级排放标准, 且平均浓度值远低于国家限制。查阅有关资料^[24,25]: 临汾市矿产资源丰富, 煤矿资源占山西省的 14%, 煤炭的燃烧使用导致 SO₂ 排放量过高; 对于安阳, 白云岩、含钾砂页岩、霞石正长岩等冶炼所用矿石居河南省第一位, 在冶炼过程中需要大量 CO, CO 的不完全反应使得安阳的 CO 排放浓度较高。PM_{2.5} 与 PM₁₀ 整体情况较差, 平均值大于国家限定标准, 大部分城市都处于超标状态。O₃ 及 NO₂ 的平均值与各自对应的限定值相接近, 总体约有 50% 的城市超标。

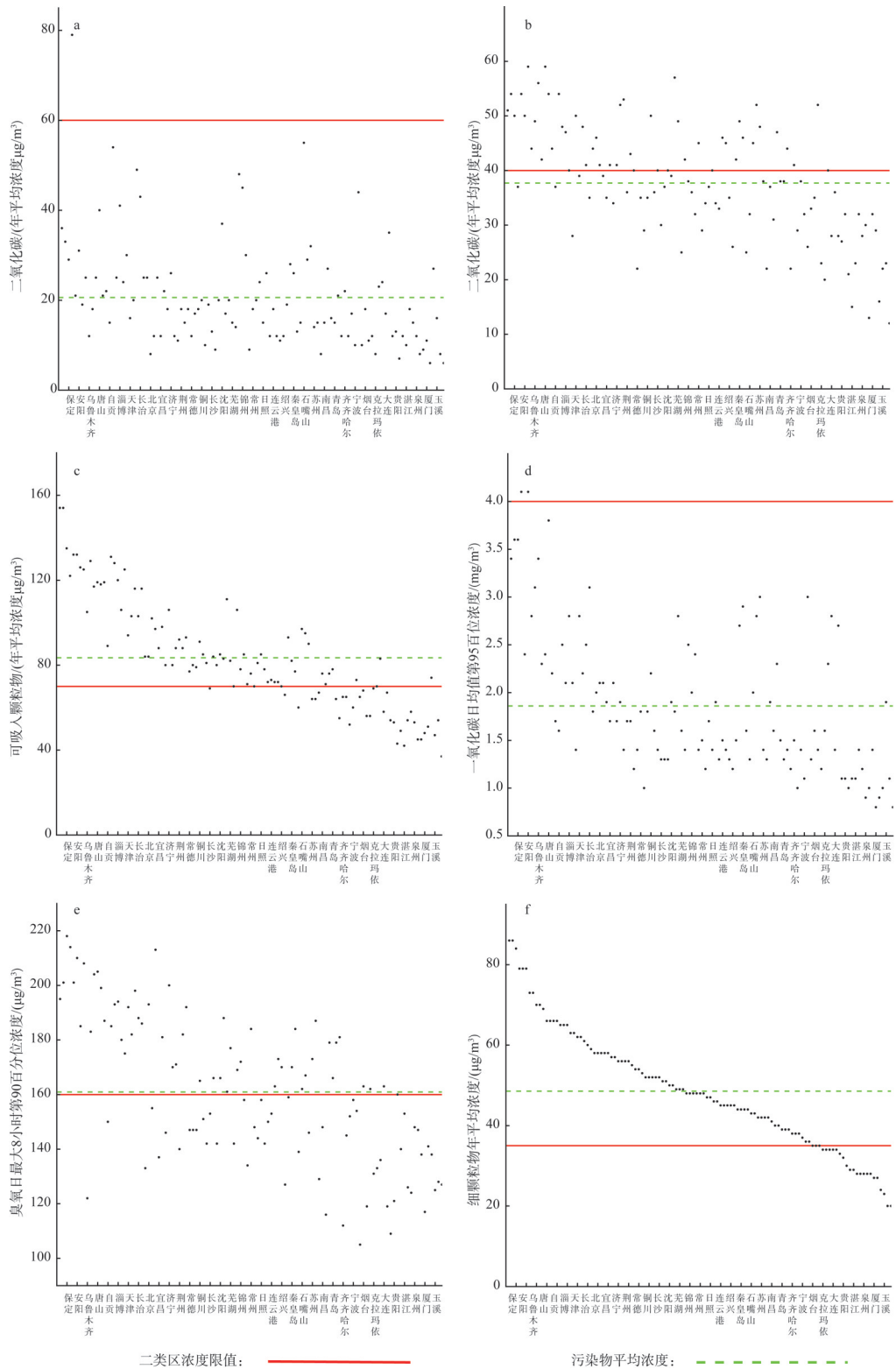


图2 污染物浓度值

Fig. 2 Pollutant concentration value

表1 城市大气污染物及降水量特征值统计

Table 1 Statistical characteristic values of air pollutants and precipitation in 113 cities

特征变量	SO ₂ /(μg/m ³)	NO ₂ /(μg/m ³)	PM ₁₀ /(μg/m ³)	CO /(mg/m ³)	O ₃ /(μg/m ³)	PM _{2.5} /(μg/m ³)	P /mm
平均值	20.16	37.73	83.48	1.86	160.94	48.58	937.93
中位数	18.00	38.00	80.00	1.60	160.00	48.00	813.50
方差	142.01	109.43	25.55	0.559	714.15	217.93	236936.79
最小值	6.00	12.00	37.00	0.80	105.00	20.00	108.90
最大值	79.00	59.00	154.00	4.10	218.00	86.00	2256.50

对数据进一步进行统计分析，如表1所示。污染物变量极值相差很大，离散程度高，反映出我国城市大气环境具有显著差异性；而降水量方差达到23万多，反映出我国降水量分布极不均匀。查阅资料，我国降水整体趋势从东南沿海至西北内陆逐渐递减^[26]，内陆吐鲁番盆地的托克逊历史上年降水量最少仅为5.9 mm，而东南台湾岛火烧寮曾达到6557.8 mm，为托克逊的1111倍^[27]。

为探究大气污染物与降水量作用下的城市分布规律，基于重点环保城市7种变量特征值，通过城市聚集空间的演变对重点环保城市进行聚类分析，将具有相似特征值的城市归为一类，研究不同类别区域的大气污染值与降水量之间的联系，探寻其内在规律。聚类结果如图3所示，自上而下的5条红色虚线代表了分类数从5到10类的不同情况（红色虚线与黑色垂直实线相交的点为一种聚类情况）。随着分类增多，主分类区变化不大，被分出的城市基本为单个分出，与已聚好的城市无相似性。临汾市与乌鲁木齐市在5种分类结果中单独成为一类，广州市、枣庄市在8种分类与9种分类中单独分出成为一类。

将六种聚类结果进行F统计量检验，确定最优分类种数。如表2所示，在置信度为95%的水平下，各变量对应的F统计量满足自身分布要求，分类数据具有显著性差异，因此六种分类都具有良好的效果，分类结果合理。

为探究重点环保城市在不同聚类情况下的空间分布变化规律，将分类结果在地图中表示出来，如图4所示。与上述聚类系谱图对应，在6种聚类中临汾（图中黄色十字架）、乌鲁木齐（图中蓝色五角星），各自分成为一类，与其余城市相似性差。查阅临汾各变量数据，其SO₂与CO年平均浓度位列所有城市第一；PM₁₀年平均浓度为122 μg/m³，几乎为国家限制标准的二倍；O₃日最大8小时第90百分位浓度排名第二，远超国家标准；PM_{2.5}年平均浓度79 μg/m³超出国家标准35 μg/m³一倍还多；年平均降水量仅为498.2 mm排倒数第14名。由此可见，临汾市在113个重点环保城市中属于污染最为严重的一个城

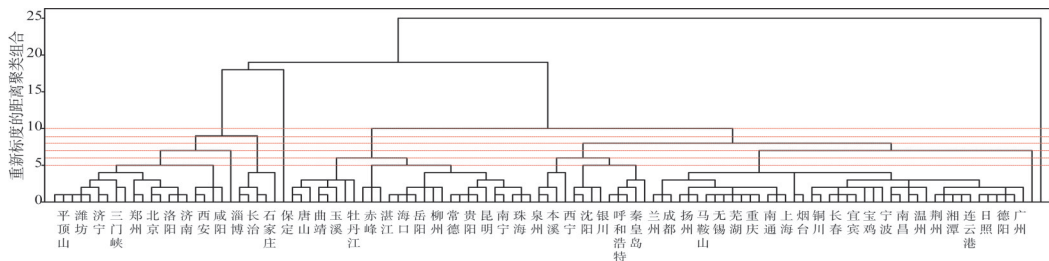


图3 环保重点城市聚类谱系图

Fig. 3 Environmental protection key cities cluster spectrum map

表2 六种分类的F统计量检验
Table 2 Statistical test of six classifications

变量	分类数					
	五	六	七	八	九	十
SO ₂	18.41**	15.40**	31.92**	27.21**	24.62**	21.75**
NO ₂	42.34**	36.35**	30.17**	26.99**	23.62**	23.28**
PM ₁₀	84.72**	81.70**	72.42*	64.18**	57.59**	51.29**
CO	24.59**	32.63**	63.37**	54.31**	49.75**	47.63**
O ₃	55.63**	46.15**	39.18*	33.27**	29.02**	25.99**
PM _{2.5}	70.36**	69.51**	61.91**	54.95**	48.95**	43.11**
P	7.78**	6.37**	11.27**	11.17**	32.30*	28.55**

注: **、*分别表示在0.01、0.05水平上显著,下同。

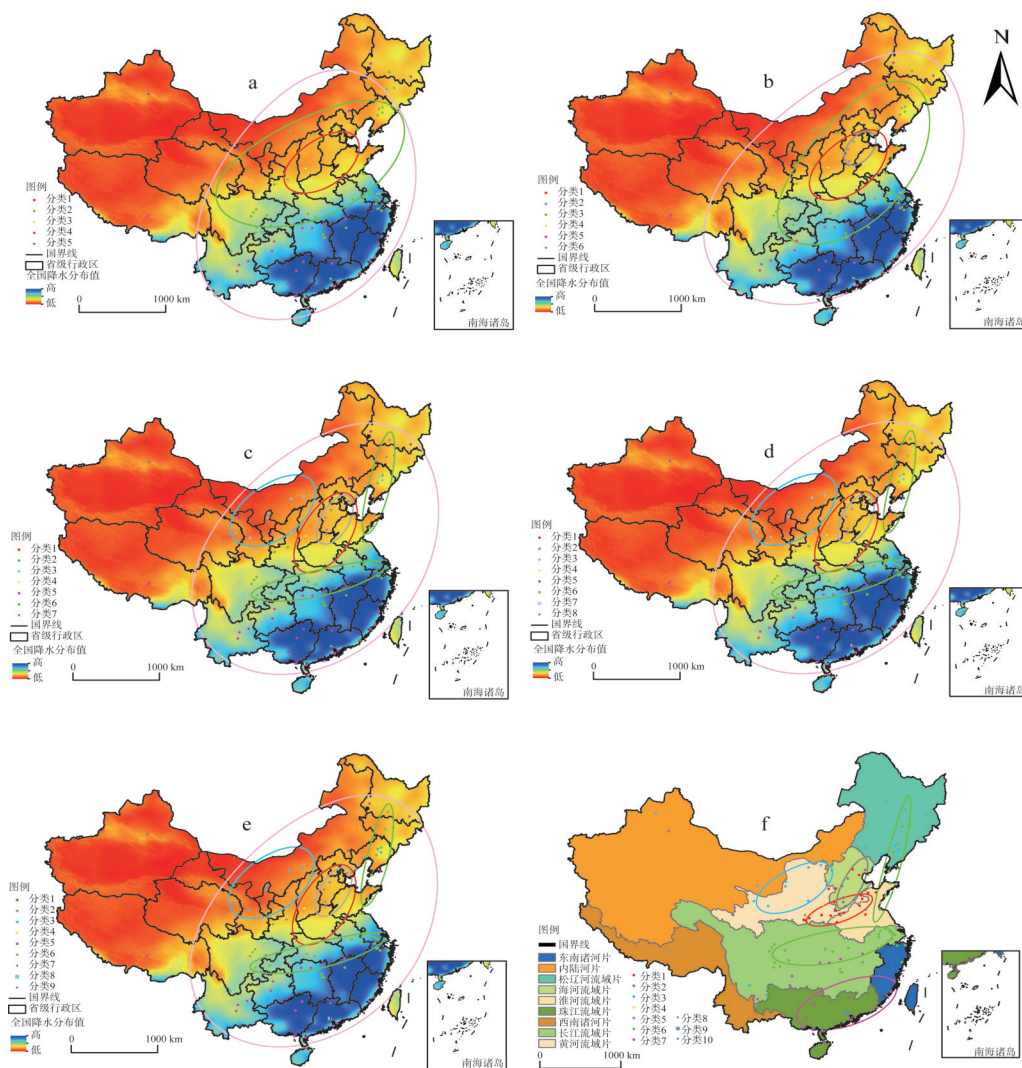


图4 城市六种聚类分布动态变化

Fig. 4 Dynamic variation diagram of six kinds of urban clustering distribution

市,且降雨稀少,属于水资源匮乏地区,自己单独成为一类,分类合理。乌鲁木齐东西南部群山环绕,北部平原开阔,是世界上距离海洋最远的城市,属于最内陆的大型城市,降雨稀少。由于独特的地势分布形成了乌鲁木齐特有环境风格。其 SO_2 、 O_3 年平均浓度远远低于国家标准,达到良好级别;但细颗粒污染物受地势的影响,在城市中堆积不易扩散, PM_{10} 与 $\text{PM}_{2.5}$ 年平均浓度远超国家限值,属于不合格标准。这两种极端的情况使之成为单独一类。

当环保重点城市聚为五类时,呈现出“环环相套”的空间分布,最内环基本涵盖河北省、河南省、山东省、山西省以及陕西省,其余城市分布在二环及三环之间,城市空气质量由内向外逐渐升高,如图4a所示。近些年,晋冀鲁豫陕经济发展迅速,人民生活水平大大提高,工厂机械化程度不断升高,机动车等各种燃油设备随处可见,尾气排放等大气污染问题越来越严重,加之这五个地区处于干旱少雨的主要区域,降水量较少,因此大气环境问题比较严重。对于二环和三环的环保重点城市,处于“环心”西北方位的由于经济发展较缓,重工业少,空气质量环境较好;处于“环心”东部及南部的城市,其地理位置沿海或者处于温带季风气候区域,温热多雨,所以空气质量环境也比较好。

随着分类越来越细,“环环相套”的格局发生变化,但“环心”城市分布变化不大,依然是以晋冀鲁豫陕五个省份为主,只有少数城市被分离出来。在聚为十类的情况下,临汾市、乌鲁木齐市、枣庄市(浅红三角形)、广州市(红色正方形)单独成为一类,枣庄市与乌鲁木齐市的类型基本相似, SO_2 、 NO_2 、 CO 年平均浓度较低,而 PM_{10} 与 $\text{PM}_{2.5}$ 含量却很高,降水量处于平均水平,其特征值具有特殊性,因此被分为一类;广州市年平均降水量在环保重点城市中排名第一,各种环保特征值都符合国家限制标准,是环保城市中环境最优的城市。本文旨在研究不同聚类情况下的城市大气污染特异性差异及降水量的相关性,因此对单独成为一类的特例不进行深入研究。

对于其余环保重点城市,由南向北依次聚为不同类型,呈现出“依流域分布”的特点^[28]。如图4f所示:分类1中20个城市85%分布在黄河流域与淮河流域的红色环状区域;分类2灰色环状区域5个城市全部分布在海河流域;分类3中13个城市分布在黄河流域、松辽河流域及长江流域,其中分布在黄河流域与内陆河流域交界处蓝色环状区域的占62%;分类4中43个城市分布在长江流域与松辽河流域,其中84%的城市分布在长江流域;分类7中75%的城市分布在珠江流域。

依据城市空间聚类分布图与降水量分布情况,可以看出城市大气环境质量的优劣与流域的分布及距离海岸线远近等多种因素有关,其实质反映出降水量对环保城市大气质量环境的影响。我国降水分布极不均匀,总体呈现由东南向西北逐渐递减的趋势,因此大气质量基本由南向北逐渐降低,但受经济发展、工业化程度及以地势等影响,污染较为严重的地区处于晋冀鲁豫陕分布区。整体观察,依据城市空间聚类分布情况,我国降水量与大气污染物之间大致呈现负相关性,即降水量越多,大气环境质量越好。

2.2 相关性拟合分析

为进一步探究变量之间的相关关系,研究降水量与大气污染物相关性的强弱,对7种特征值进行Kolmogorov-Smirnov正态性检验,其中 NO_2 、 O_3 、 $\text{PM}_{2.5}$ 的显著性大于0.05,说明在0.05显著性水平上,变量服从正态分布;而 SO_2 、 PM_{10} 、 CO 、 P 的显著性小于0.05,不服从正态分布。由于存在非正态分布变量,本文选用对观测变量的总体形态没有要求的Spearman相关系数法^[29]来判断两者相关性的强弱。Spearman法适用范围广,

表3 正态性检验与显著性分析
Table 3 Normality test and significance analysis

	SO ₂	NO ₂	PM ₁₀	CO	O ₃	PM _{2.5}	P
个案数	113	113	113	113	113	113	113
最极端差值	绝对	0.15	0.04	0.11	0.14	0.07	0.06
	正	0.15	0.04	0.11	0.14	0.07	0.06
	负	-0.12	-0.04	-0.07	-0.09	-0.06	-0.03
检验统计	0.15	0.04	0.11	0.14	0.07	0.06	0.12
渐近显著性(双尾)	0	0.2	0.001	0	0.2	0.2	0.0001
相关系数 ρ	-0.62**	-0.32**	-0.57**	-0.70**	-0.24*	-0.33**	1

常用来衡量变量之间的依赖程度,统计结果如表3所示。

大气污染变量与降水量相关系数全部为负,其中O₃呈弱相关性,NO₂、PM_{2.5}呈中等相关,SO₂、PM₁₀、CO呈强相关性。对降水量与大气污染物的线性关系,本文进一步进行了拟合研究。

大气污染物的浓度值 C 及降水量值 P 的拟合线性方程表示为:

$$C_{(SO_2, NO_2, CO, PM_{2.5}, PM_{10}, O_3)} = a \times P + b \quad (9)$$

拟合结果如图5所示:

对6个线性拟合方程进行检验,结果如表4所示。

从表中可以得出,降水量与大气污染物线性关系存在, T 检验下拟合回归效果显著,降水量与大气污染成负相关。

3 结论与讨论

3.1 讨论

本文在分析重点环保城市大气污染数据的基础上,基于不同污染程度城市聚类空间格局的演化过程,探究了降水量与大气环境污染物之间的关系,为大气污染城市分区治理提供了一种新方法。而城市大气污染与诸多因素有关,能源消费、经济水平^[30]、工业结构优化调整^[4]以及气候环境^[31]等在大气污染时空演变过程中都起着一定的作用,所以在后续研究中可将风力、地势、经济等具体因素考虑其中,对重点环保城市进行更为精确的分类。此外,对于降水量较大的城市需进一步探究两者之间成负相关的内因,判断是由城市污染物浓度排放低,还是因降水量多而导致的。文中虽以113个城市大气资料为研究数据,涵盖面广,满足全国不同区域整体性研究的需要,但限于环保城市细化数据的可获得性,以上具体研究内容需进一步查阅资料,通过适合的方法,更科学、准确地采用控制单一变量研究降水量与大气污染物之间具体的关系,以期在城市污染分区治理提供更为准确的分类。

对于降水来说,雨滴直径、雨量大小对不同污染物有着不一样的作用。小于2 mm的雨滴对极可溶性气体的污染物有着良好的清除作用,而粒径在0.3~1 μm 之间的细颗粒物浓度在雷雨天气之后会增加^[32]。对于大气污染物来说,随着各种大气污染物浓度的增加,大气降水也会受到影响。在太行山周边区域,研究人员采用1966-2005年观测数据及模型试验,发现在逆风的平原区,气溶胶污染可导致小型降雨的减少^[33]。降水与大

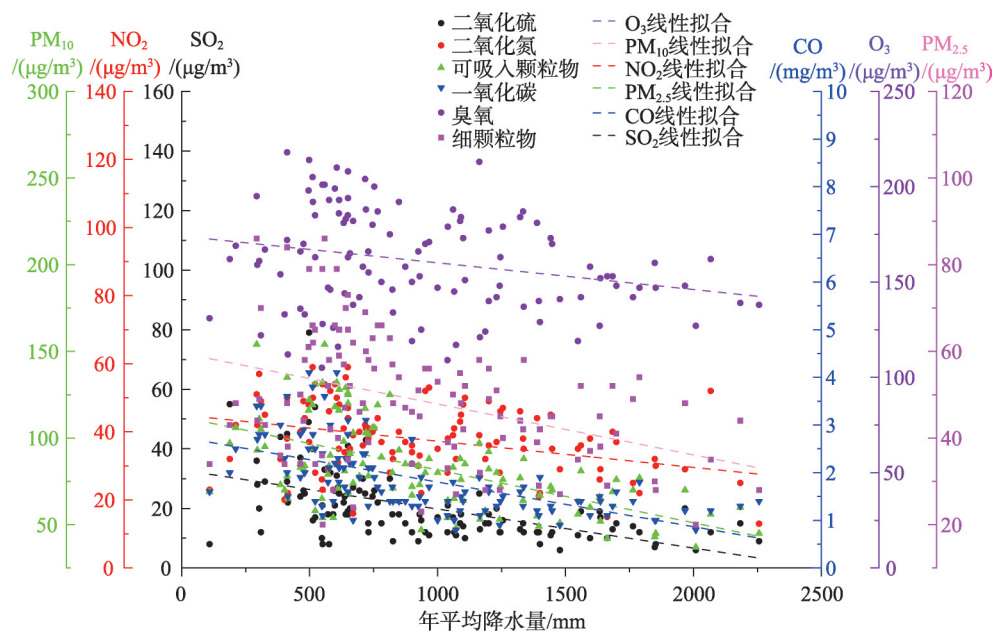


图5 降水量与大气污染特征值线性拟合方程

Fig. 5 Linear fitting equation of precipitation and atmospheric pollution eigenvalues

表4 线性回归结果与拟合检验

Table 4 Linear regression results and fitting tests

	SO ₂		NO ₂		PM ₁₀		CO		O ₃		PM _{2.5}	
	拟合系数	T检验	拟合系数	T检验	拟合系数	T检验	拟合系数	T检验	拟合系数	T检验	拟合系数	T检验
<i>b</i>	32.89	16.05**	44.95	21.66**	2.74	24.34**	112.08	19.11**	59.59	34.84**	174.08	20.13**
<i>a</i>	-0.02	-6.68**	-0.01	-3.10**	-0.01	-6.07**	-0.03	-5.58**	-0.01	-3.38**	-0.01	-3.19**
<i>R</i> ²	0.28		0.13		0.33		0.37		0.15		0.06	

气污染物之间并非单向作用，而是相互影响。本文从重点环保城市空间聚类变化的角度，在全国层面对降水量与大气污染物进行研究，方法简单直观，便于理解，为两者相关性研究提供了一种新思路。但由于两者之间关系复杂，对于不同污染物与降水量的研究还需具体分析。因此将在后续工作中，从数据全面性、单因素分析及多因素叠加出发，对大气环境污染分析工作进行更加全面深入的探讨。

3.2 结论

本文依据2017年全国重点环保重点城市大气数据资料，采用地理信息系统与模糊聚类相结合的方法，在空间上对降水量与大气污染物的关系进行了理论分析；并采用相关性分析及回归分析等统计学方法，对两者相关关系进行研究，得出以下结论：

(1) 本文选取113个重点环保城市，涵盖了各个省份，研究特征变量为SO₂、NO₂、CO、PM₁₀、PM_{2.5}以及O₃，基本包含了大气污染物中主要成分，研究结果具有普适性。

(2) 根据变量特征值离散程度大且我国降水量分布极不均匀的特性，将特征相似城市归为一类，有利于分析与寻找规律。研究发现环保重点城市聚集情况由“环环相套”逐步发展为“依流域分布”，聚类情况反映出降水量对环保城市大气质量环境的影响。依据我国降水量分布及工业化城镇化发展情况得出晋冀鲁豫陕省份污染最为严重，降水量

与城市大气污染特征值在空间分布上有密切的负向关联性。

(3) 以113组城市大气环境数据为基础,通过Kolmogorov-Smirnov正态性检验,得出六种大气污染物中 NO_2 、 O_3 、 $\text{PM}_{2.5}$ 的分布规律符合正态分布,而 SO_2 、 PM_{10} 、CO的分布既不符合正态分布,也不符合均匀、指数分布。使用Spearman相关性判断,得出降水量与大气污染物的相关性为: -0.617 、 -0.316 、 -0.574 、 -0.695 、 -0.238 、 -0.332 。 O_3 符合弱相关性, NO_2 、 $\text{PM}_{2.5}$ 符合中等相关性, SO_2 、 PM_{10} 、CO符合强相关性,最终经线性回归拟合得出降水量与各种大气污染物之间的关系方程,方程系数在 $[-0.031, -0.008]$ 之间,表明降水量与大气污染物成负相关性,方程在 T 检验下拟合回归显著。

参考文献(References):

- [1] 王文川. 工程水文学. 北京: 中国水利水电出版社, 2016: 7-8. [WANG W C. Engineering Hydrology. Beijing: China Water & Power Press, 2016: 7-8.]
- [2] 龚则周, 张晓平. 中国城市空气污染及其空间溢出效应评估: 以113个环保重点城市为例(英文). Journal of Resources and Ecology, 2017, 8(6): 584-594. [GONG Z Z, ZHANG X P. Evaluation of urban air pollution and its spatial spillover effect in China: A case study of 113 key environmental protection cities. Journal of Resources and Ecology, 2017, 8(6): 584-594.]
- [3] 王雅楠, 马明义, 陈伟, 等. 城镇化对碳排放的门槛效应及区域空间分布. 环境科学与技术, 2018, 41(11): 165-172. [WANG Y N, MA M Y, CHEN W, et al. The threshold effect of urbanization on carbon emission and regional spatial distribution. Environmental Science and Technology, 2018, 41(11): 165-172.]
- [4] 徐成龙, 程钰. 新常态下山东省环境规制对工业结构调整及其大气环境效应研究. 自然资源学报, 2016, 31(10): 1662-1674. [XU C L, CHENG Y. The action of environmental regulation on industrial structure adjustment and atmospheric environment effect under the new normal in Shandong province. Journal of Natural Resources, 2016, 31(10): 1662-1674.]
- [5] AKINTOLA O A, SANGODOYIN A Y, AGUNBIAD E F O. Anthropogenic activities impact on atmospheric environmental quality in a gas-flaring community application of fuzzy logic modelling concept. Environmental Science & Pollution Research, 2018, 25(4): 1-12.
- [6] 何明圆, 杜江. 我国经济增长与空气污染关系研究: 基于重点环保城市及区域异质性的研究. 价格理论与实践, 2015, (10): 108-110. [HE M Y, DU J. Research on the relationship between economic growth and air pollution in China: Based on the research of key environmental protection cities and regional heterogeneity. Price Theory and Practice, 2015, (10): 108-110.]
- [7] 李思莹. 我国主要城市空气质量的分析与研究: 以2013年51个环保重点城市为例. 科技创新与应用, 2016, (13): 158-158. [LI S Y. Analysis and research on air quality of major cities in China: Taking 51 key environmental protection cities in 2013 as an example. Science & Technology Innovation and Application, 2016, (13): 158-158.]
- [8] 段玉森, 魏海萍, 伏晴艳, 等. 中国环保重点城市API指数的时空模态区域分异. 环境科学学报, 2008, 28(2): 384-391. [DUAN Y S, WEI H P, FU Q Y, et al. Spatial and temporal modal regional differentiation of API indices in key environmental protection cities in China. Acta Scientiae Sinica Sinica Sinica, 2008, 28(2): 384-391.]
- [9] 雷平, 高青山, 赵连荣. 经济发展与细颗粒物污染的关系: 以中国112个环保重点城市为例. 城市问题, 2016, (5): 56-62. [LEI P, GAO Q S, ZHAO L R. The relationship between economic development and fine particulate matter pollution: Taking 112 key environmental protection cities in China as an example. Urban Problems, 2016, (5): 56-62.]
- [10] 冯鑫媛, 王式功, 杨德保. 近几年沙尘天气对中国北方环保重点城市可吸入颗粒物污染的影响. 中国沙漠, 2011, 30(3): 735-740. [FENG X Y, WANG S G, YANG D B. The Influence of dust weather on inhalable particulate matter pollution in key environmental protection cities in Northern China in recent years. Journal of Desert Research, 2011, 30(3): 735-740.]
- [11] GROISMAN P Y, KARL T R, EASTERLING D R, et al. Changes in the probability of heavy precipitation: Important indicators of climatic change. Climatic Change, 1999, 42(1): 243-283.
- [12] AUSTIN P, WANG Y, KUJALA V, et al. Precipitation in stratocumulus clouds: Observational and modeling results. Journal of the Atmospheric Sciences, 1995, 52(13): 2329-2352.
- [13] STAHL D W, CLEVELAND M K, GRISSINO-MAYER H D, et al. Cool- and warm-season precipitation reconstructions over Western New Mexico. Journal of Climate, 2009, 22(13): 3729-3750.
- [14] 袁定波, 艾萍, 洪敏, 等. 基于地理空间要素的雅鲁江流域雨量估算. 水科学进展, 2018, 29(6): 779-787. [YUAN D

- B, AI P, HONG M, et al. Estimation of surface rainfall in the Yalong River Basin based on geospatial elements. *Advances in Water Science*, 2018, 29(6): 779-787.]
- [15] 刘少华, 严登华, 王浩, 等. 中国大陆流域分区 TRMM 降水质量评价. *水科学进展*, 2016, 27(5): 639-651. [LIU S H, YAN D H, WANG H, et al. Evaluation of TRMM precipitation quality in China's Basin. *Advances in Water Science*, 2016, 27(5): 639-651.]
- [16] 袁瑞强, 龙西亭, 王鹏, 等. 山西省降水量时空变化及预测. *自然资源学报*, 2015, 30(4): 651-663. [YUAN R Q, LONG X T, WANG P, et al. Tempo-spatial variation and forecast of precipitation in Shanxi province. *Journal of Natural Resources*, 2015, 30(4): 651-663.]
- [17] 陈坤, 蒋卫国, 何福红, 等. 基于 GRACE 数据的中国水储量变化特征分析. *自然资源学报*, 2018, 33(2): 275-286. [CHEN K, JIANG W G, HE F H, et al. *Journal of Natural Resources*, 2018, 33(2): 275-286.]
- [18] 鄢姣, 胡必亮. 降雨量对城镇化的影响机制研究. *区域经济评论*, 2018, (2): 81-90. [YAN J, HU B L. Study on the influence mechanism of rainfall on urbanization. *District Economic Review*, 2018, (2): 81-90.]
- [19] 吴凯, 王晓琳, 许怡, 等. 中国大陆降水时空格局演变新事实. *南水北调与水利科技*, 2017, 15(3): 30-36. [WU K, WANG X L, XU Y, et al. The new facts of the temporal and spatial pattern of precipitation in China. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2017, 15(3): 30-36.]
- [20] 樊高峰, 马浩, 任律, 等. 分钟降水量对能见度及 PM_{2.5} 浓度影响研究. *气象*, 2017, 43(12): 1527-1533. [FAN G F, MA H, REN L, et al. Study on the influence of minute precipitation on visibility and PM_{2.5} concentration. *Meteorological*, 2017, 43(12): 1527-1533.]
- [21] 周景坤. 从城市发展水平与年均降雨量的关系探究我国雾霾污染问题研究: 基于 2013 年 73 个主要城市截面数据的分析. *干旱区资源与环境*, 2017, 31(8): 94-100. [ZHOU J K. Research on the relationship between urban development level and annual average rainfall in China. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2017, 31(8): 94-100.]
- [22] 谢季坚. 模糊数学方法及其应用. 武汉: 华中科技大学出版社, 2015: 62-79. [XIE J J. *Fuzzy Mathematics Method and its Application*. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 2015: 62-79.]
- [23] ANA JUSTEL A. A multivariate Kolmogorov-Smirnov test of goodness of fit. *Statistics & Probability Letters*, 1997, 35(3): 251-259.
- [24] 秦建英, 薛龙义. 临汾市煤炭产业发展对环境的影响分析. *城市地理*, 2017, (15): 117. [QIN J Y, XUE LY. Analysis of the impact of coal industry development on environment in Linfen city. *City Geography*, 2017, (15): 117.]
- [25] 赵海丽, 唐敏, 丁志安, 等. 2005 年-2014 年安阳市城市空气质量变化趋势分析及治理对策研究. *环境科学与管理*, 2016, 41(6): 141-145. [ZHAO H L, TANG M, DING Z A, et al. Analysis of urban air quality change trends and countermeasures in Anyang city from 2005 to 2014. *Environmental Science and Management*, 2016, 41(6): 141-145.]
- [26] 梁圆, 千怀遂, 张灵. 中国近 50 年降水量变化区划(1961-2010 年). *气象学报*, 2016, 74(1): 31-45. [LIANG Y, QIAN H S, ZHANG L. The regionalization of precipitation change in China in the past 50 years (1961-2010). *Acta Meteorologica Sinica*, 2016, 74(1): 31-45.]
- [27] 施祥云. 中国气候“四极”. *教师博览*, 1995, (10): 44. [SHI X Y. The "Quadrupole" of China's climate. *Teacher's Expo*, 1995, (10): 44.]
- [28] 王莉萍, 王维国, 张建忠. 我国主要流域降水过程时空分布特征分析. *自然灾害学报*, 2018, (2): 161-173. [WANG L P, WANG W G, ZHANG J Z. Analysis of temporal and spatial distribution characteristics of precipitation processes in main watersheds in China. *Journal of Natural Disasters*, 2018, (2): 161-173.]
- [29] DE WINTER J C F, GOSLING S D, POTTER J. Comparing the pearson and spearman correlation coefficients across distributions and sample sizes: A tutorial using simulations and empirical data. *Psychological Methods*, 2016, 21(3): 273-290.
- [30] 彭远新, 林振山. 能源消费产生的 SO₂ 和工业烟尘排放量时空演变分析. *自然资源学报*, 2010, 25(1): 52-59. [PENG Y X, LIN Z S. Spatial and temporal evolution analysis of SO₂ and industrial smoke emission from energy consumption. *Journal of Natural Resources*, 2010, 25(1): 52-59.]
- [31] WANG J Q, QU W J, LI C, et al. Spatial distribution of wintertime air pollution in major cities over eastern China: Relationship with the evolution of trough, ridge and synoptic system over East Asia. *Atmospheric Research*, 2018, 212(21): 186-201.
- [32] YU S C. Water spray geoengineering to clean air pollution for mitigating haze in China's cities. *Environmental Chemistry Letters*, 2014, 12(1): 109-116.
- [33] GUO J, DENG M, FAN J, et al. Precipitation and air pollution at mountain and plain stations in Northern China: Insights gained from observations and modeling. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2014, 119(8): 4793-4807.

Study on the relationship between precipitation and urban atmospheric environment: Cases of 113 key environmental protection cities

XUE Hai, ZHANG Fan

(School of Water Conservancy, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450046, China)

Abstract: In order to study the relationship between precipitation and atmospheric pollutants, according to the air quality data of 113 key environmental protection cities in China in 2017, the spatial distribution law of urban clusters and the linear fitting equation between them are obtained. Based on the distribution characteristics of precipitation in the north and south and the urban air pollution index, the fuzzy clustering method was used to classify cities with different degrees of affinity. The Spearman correlation and fitting regression method were used to analyze the air pollution characteristic value and precipitation. The results show that when the key environmental protection cities are clustered into five categories, the spatial distribution of "rings and loops" is presented. The innermost ring basically covers five provinces of Hebei, Henan, Shandong, Shanxi and Shaanxi. The rest of the city is distributed between the second and third rings, and the urban air quality gradually increases from the inside to the outside. As the number of clusters increases, the urban agglomeration pattern changes, and the spatial distribution develops into "distribution according to the basin", but the "circle" city does not change much. In this clustering situation, the impact of the amount of precipitation on the atmospheric quality environment of environmentally friendly cities can be clearly reflected. The precipitation is negatively correlated with the concentration of atmospheric pollutants, and the environment in these five provinces is seriously polluted. Using Kolmogorov-Smirnov test method, it is calculated that the overall distribution of NO_2 , O_3 and $\text{PM}_{2.5}$ conforms to the normal distribution, and that of SO_2 , PM_{10} and CO does not conform to the normal distribution, nor does it conform to the uniform and exponential distribution. The correlation coefficients of NO_2 , O_3 , $\text{PM}_{2.5}$, SO_2 , PM_{10} and CO with precipitation are -0.316 , -0.238 , -0.332 , -0.617 , -0.574 and -0.695 , respectively. O_3 is in weak correlation; NO_2 and $\text{PM}_{2.5}$ are in moderate correlation; SO_2 , PM_{10} and CO are in strong correlation. The coefficient of linear regression equation is between -0.031 and -0.008 , and the negative correlation between precipitation and atmospheric pollutant concentration is obvious. The research results will help to understand the impact of precipitation on urban atmospheric environment changes, and provide the necessary theoretical support for the sustainable development of urban construction.

Keywords: urban atmospheric environment; precipitation distribution characteristics; fuzzy clustering; normal distribution; fitting regression analysis