

基于灰色关联模型对江苏省PM_{2.5}浓度影响因素的分析

贺 祥^{1,2,3}, 林振山^{1,3}, 刘会玉^{1,3}, 齐相贞^{1,3}

(1. 南京师范大学地理科学学院, 南京 210023; 2. 凯里学院, 凯里 556011;
3. 江苏省地理信息资源开发与利用协同创新中心, 南京 210023)

摘要: 采用克里金插值法分析2014年江苏省PM_{2.5}浓度空间分布特征, 运用灰色关联模型计算PM_{2.5}浓度与影响因素间关联度, 分析主要影响指标因子与PM_{2.5}浓度空间分布的相互关系。结果显示: ① 江苏省PM_{2.5}浓度具有沿海低、内陆高, 南部高、北部低的空间分布特征; ② PM_{2.5}污染源指标层的权重值最大($w_i = 0.4691$), 空气质量与气象要素指标层的权重稍大($w_i = 0.2866$), 城市化与产业结构层的权重值最小($w_i = 0.2453$); ③ 在27个指标因子中, 与PM_{2.5}浓度关联度为中度的仅有公路客运量、房屋建筑面积、园林绿地面积、人口密度等4个指标因子, PM_{2.5}与其余指标因子均呈强度相关联, 其中与PM₁₀、O₃、降雨量、公路货运总量、地区工业总产值和第二产业占地区生产总值比重等指标的关联度较高; ④ PM_{2.5}污染源指标层与PM_{2.5}浓度关联度值较大的城市分别是南京、无锡、常州、南通、泰州市; 城市化与产业结构指标层与PM_{2.5}浓度关联度值较大的城市分别是徐州、苏州、盐城、常州市; 空气质量与气象要素指标层与PM_{2.5}浓度关联度值较大的城市分别是盐城、扬州、常州、南通市。综合分析可知, 影响指标因子关联度值与PM_{2.5}浓度空间分布有较好相关性。研究表明, 灰色关联模型可有效分析影响PM_{2.5}浓度的主要因素, 能对PM_{2.5}浓度影响指标进行定量分析与评价。

关键词: 灰色关联模型; PM_{2.5}浓度空间分布; 影响指标因子; 江苏省

DOI: 10.11821/dlxb201607003

1 引言

PM_{2.5}对环境、人体健康及社会经济发展产生重要影响, 国内外学者对它进行了大量研究, 主要包括对PM_{2.5}的跨界扩散与传输^[1], PM_{2.5}污染特征及其影响因素^[2-4], PM_{2.5}污染物组成及其来源解析^[5-7], PM_{2.5}对人体健康的影响^[8-11], PM_{2.5}受气象、环境因素影响^[12-13], 以及PM_{2.5}排放来源及排放源清单^[14-16]等方面的研究。针对PM_{2.5}影响因素的研究, 钟无涯等^[17]从城市生活、生产方式与区域产业结构转型3个不同层面探讨与PM_{2.5}的关系, 认为区域产业结构转型、升级和生产方式转变是改善PM_{2.5}问题途径之一; 齐园等^[18]对北京3

收稿日期: 2016-02-25; 修订日期: 2016-03-21

基金项目: 国家自然科学基金项目(31470519); 2015年江苏省高校自然科学研究重大项目(15KJA17002); 江苏省自然科学基金项目(BK20131399); 江苏省高校优势学科建设工程资助项目; 贵州省科技厅基金项目([2014]7237); 贵州省教育厅人文社科项目(13GH004) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.31470519; University Natural Science Major Project of Jiangsu Province in 2015; Natural Science Foundation of Jiangsu Province, No.BK20131399; The Priority Academic Program Development of Jiangsu Higher Institutions; Science and Technology Department Project of Guizhou Province, No.[2014]7237; Education Department Project of Guizhou Province, No.13GH004]

作者简介: 贺祥(1978-), 男, 贵州水城人, 博士, 副教授, 主要从事生态与环境研究。E-mail: hexiang1997403@163.com

通信作者: 林振山(1955-), 教授, 博士生导师, 主要从事人类活动环境效应研究。E-mail: linzhenshan@njnu.edu.cn

次产业演变与PM_{2.5}排放的动态关系进行研究,认为第二产业是PM_{2.5}排放的长期主要来源,机动车辆及餐饮业是PM_{2.5}的重要来源;莫莉等^[19]研究认为城市化程度与PM_{2.5}等颗粒物浓度有明显的关系,与地区生产总值呈正相关,与林木覆盖率呈负相关;Pateraki等^[20]将风速、气温、相对湿度及天气条件等因素考虑到PM_{2.5}浓度形成研究中,并得到气象条件对PM_{2.5}形成具有显著影响的结论;Yang等^[21]还通过大气稳定气流、气温等因素去研究PM_{2.5}形成条件及极端雾霾的产生条件与过程。针对PM_{2.5}污染时空变化影响因素的研究,Querol等^[22]对西班牙1999-2005年PM_{2.5}的时空变化及影响因素进行了探究,认为气象因素具有显著影响作用;Zheng等^[23]通过有机碳、碳气溶胶和硫酸盐、硝酸盐和铵等主要离子对比分析中国与美国PM_{2.5}浓度季节变化特征;Xie等^[24]对中国31省份分析认为SO₂、NO₂、CO和O₃等与PM_{2.5}浓度空间分布存在显著相关性;王占山等^[25]对北京市35个监测站PM_{2.5}数据分析其时空分布特征及与前体物和大气氧化性的相关性关系。一些学者还运用土地利用回归(LUR)模型方法研究不同土地利用类型要素对PM_{2.5}空间分布特征的影响^[26-30]。虽然许多学者对PM_{2.5}浓度变化与时空分布的影响因素进行了大量研究,但多数学者仅考虑了部分指标因素,很少学者基于气象、污染源和社会经济等因素的综合影响进行研究。

PM_{2.5}的形成是大气环境是一个非常复杂系统过程,污染源多样性显著,其中既包含大量已知又含有未知的信息状态,所以它也是一个灰色系统。因此,本研究将采用灰色关联模型方法对江苏省13个省辖市PM_{2.5}浓度影响指标因子进行综合研究。具体方法与步骤是:首先,对江苏省各省辖市PM_{2.5}浓度时空分布进行分析,构建PM_{2.5}浓度影响因素指标体系,包括空气质量指标、气象要素、城市化、工业排放废气、交通尾气、建筑扬尘等3个层次的27个指标因素;其次,利用灰色关联法对PM_{2.5}浓度与影响指标因子间关联程度进行分析,计算3个指标层次与PM_{2.5}浓度间的关联度,得到各指标因子的关联度排序;最后分析主要影响指标因子与PM_{2.5}浓度空间分布的关系。

2 研究方法与PM_{2.5}浓度影响指标数据

2.1 研究方法

2.1.1 熵值法确定权重系数 在信息论中,熵值反映了信息的无序化程度,可以用来度量信息量的大小,某项指标携带的信息越多,表示该指标对决策的作用越大^[31]。熵值法的计算步骤如下:

(1) 构建 m 个方案, n 个评价指标的判断矩阵:

$$X = \begin{pmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \cdots & x_{mn} \end{pmatrix}, X = \{x_{ij}\}_{m \times n}, (i = 1, 2, \cdots, m; j = 1, 2, \cdots, n) \quad (1)$$

(2) 数据的无量纲处理,对原始数据需要消除量纲,进行标准化处理,转换为可比较数据序列。

(3) 根据熵的定义, m 个评价事物 n 个评价指标,可以确定评价指标的熵为:

$$f_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{j=1}^n x_{ij}}, (j = 1, 2, \cdots, n) \quad (2)$$

$$e_j = -\frac{1}{\ln m} \sum_{i=1}^m f_{ij} \ln f_{ij} \quad (3)$$

式中: e_j 为第 j 个指标的熵; f_{ij} 为第 i 个评价对象第 j 个评价指标标准值的比重; 如果 $f_{ij} = 0$, 则定义 $f_{ij} \ln f_{ij} = 0$ 。那么第 j 项指标的熵权即可以定义为:

$$w_j = \frac{1 - e_j}{\sum_{j=1}^n (1 - e_j)}, (w_j \in [0, 1], \sum_{j=1}^n w_j = 1) \quad (4)$$

2.1.2 灰色关联分析法 根据 Deng^[32]、刘思峰等^[33]提出的灰色关联公理及计算公式, 具体步骤如下:

(1) 确定特征序列和因素序列:

进行灰色关联分析, 首先要确定作为参照的特征序列和被比较的因素序列。记特征序列为 $x_0(t)$, 共采集 m 个数据, 即: $x_0(t) = \{x_0(1), x_0(2), \dots, x_0(m)\}$, $t = 1, 2, \dots, m$; 记因素序列为 $x_i(t)$, 其中有 n 个子序列, 即: $x_i(t) = \{x_i(1), x_i(2), \dots, x_i(m)\}$, $i = 1, 2, \dots, n$ 。

(2) 如果系统中各因素的量纲不相同, 数据无法直接比较, 则需要标准化处理。

(3) 求关联系数和关联度:

① 计算关联系数:

$$\zeta(x_0(t), x_i(t)) = \frac{\min_i \min_t |x_0(t) - x_i(t)| + \rho \max_i \max_t |x_0(t) - x_i(t)|}{|x_0(t) - x_i(t)| + \rho \max_i \max_t |x_0(t) - x_i(t)|} \quad (5)$$

式中: $\min_i \min_t |x_0(t) - x_i(t)|$ 、 $\max_i \max_t |x_0(t) - x_i(t)|$ 分别为极差最小值和极差最大值; ρ 为分辨率, 一般取值为 0.5。

② 计算加权关联度:

$$R_{ij} = \sum_{i=1}^n w_j \times \zeta_i(x_0(t), x_i(t)) \quad (6)$$

2.2 PM_{2.5}浓度影响指标体系与数据来源

2.2.1 PM_{2.5}浓度影响指标体系构建 PM_{2.5}主要来源为二次硝酸盐和硫酸盐、煤燃烧、机动车尾气(尘)、道路扬尘、土壤扬尘、建筑尘、生物质燃烧等, 其形成与变化还受气象等多因素影响。因此, 依据其组成来源及影响因素, 构建3个指标层, 包含27个指标因子的影响指标体系(表1): ① 空气质量指标与气象要素指标层, 包括PM₁₀、SO₂、平均风速、平均气温、平均降雨量和平均相对湿度等10个指标因子, 反映空气污染物在一定气象条件下形成PM_{2.5}的程度; ② PM_{2.5}污染物来源指标层: 工业生产, 以工业用电量指标表征工业生产过程燃煤、工业尾气排放量; 工业废气排放, 包括二氧化硫排放量, 氮氧化物排放量, 烟(粉)尘排放量, 表征大气污染废气量; 交通与路网, 主要以等级公路里程、公路客运量、公路货运总量、机动车保有量, 表征交通运输排放废气量; 建筑, 以房屋建筑施工面积为指标因子, 主要表征建筑扬尘量; ③ 城市化与社会产业指标层: 净化空气能力指标, 包括园林绿地面积、建成区绿地覆盖率、人均公园绿地面积, 反映城市绿化对降低PM_{2.5}污染的能力; 人口密度和市区建成面积指标因子, 反映城市建设对PM_{2.5}浓度的影响; 产业结构, 反映城市社会产业结构对PM_{2.5}污染物排放量的影响, 包括第二产业占地区生产总值比重、人均地区生产总值与市区工业总产值等指标因子。

2.2.2 数据来源 PM_{2.5}数据及空气质量指标数据来源于中国环境监测总站 (<http://www.cnemc.cn/>), 包括PM_{2.5}、PM₁₀、NO₂、O₃、SO₂和CO等6个空气质量监测指标。研究数据是由江苏省13个省辖市内所有监测站的每日平均值计算得到。气象数据来源于中国气象数据网 (<http://data.cma.cn/>), 主要包括日平均气温、平均相对湿度、平均降水量、平均风速和日照时数等5个指标因子。PM_{2.5}污染物来源及城市化与社会产业指标因子数据来源于《2015年江苏统计年鉴》与2014年江苏省国民经济和社会发展统计公报(表2)。

表1 江苏省PM_{2.5}浓度的影响指标体系
Tab. 1 PM_{2.5} influencing index system in Jiangsu province

| 指标层 | 指标因子 | 指标层 | 因素层 | 指标层 | 指标因子 |
|-------------|---|-----------------------|--|----------|--|
| 空气质量指标与气象要素 | PM ₁₀ (μg/m ³) (X ₁) | 大气污染物 | 等级公路里程(km) (X ₁₁) | 城市与绿化面积 | 园林绿地面积*(hm ²) (X ₂₀) |
| | SO ₂ (μg/m ³) (X ₂) | | 公路客运量(万人) (X ₁₂) | | 建成区绿地覆盖率*(%) (X ₂₁) |
| | CO (mg/m ³) (X ₃) | | 公路货运总量(10 kt) (X ₁₃) | | 人均公园绿地面积* (m ² /人) (X ₂₂) |
| | NO ₂ (μg/m ³) (X ₄) | | 机动车保有量(万辆) (X ₁₄) | 城市化与产业结构 | 建成区面积(km ²) (X ₂₃) |
| | O ₃ * (μg/m ³) (X ₅) | | 工业用电量(亿千瓦时) (X ₁₅) | | 人口密度(人/km ²) (X ₂₄) |
| | 降水量* (0.1mm) (X ₆) | PM _{2.5} 污染源 | 二氧化硫排放量(t) (X ₁₆) | | 第二产业占地区生产总值比重(X ₂₅) |
| | 平均风速* (0.1m/s) (X ₇) | 工业生产 | 氮氧化物排放量(t) (X ₁₇) | 产业结构 | 人均地区生产总值(元) (X ₂₆) |
| | 平均气温 (0.1℃) (X ₈) | 工业废气排放 | 烟(粉)尘排放量(t) (X ₁₈) | | 地区工业总产值(亿元) (X ₂₇) |
| | 平均相对湿度 (1%) (X ₉) | 建筑 | 房屋建筑施工面积(10 km ²) (X ₁₉) | | — |
| | 日照时数 (0.1 h) (X ₁₀) | | — | — | — |

注：*表示负向型指标，其余为正向型指标。

3 PM_{2.5}浓度时空变化特征

克里金空间插值法是在有限区域内对变量进行无偏最优估计的一种方法^[34]，运用ArcGIS 10.0软件，对江苏省PM_{2.5}浓度进行空间克里金插值。插值结果检验：误差平均值为-0.1007，接近于0；标准均方根误差为0.8614，接近于1；平均标准误差为0.5454，均方根误差值为0.4699。结果表明江苏省PM_{2.5}浓度的空间插值结果精度高，效果好。插值结果（图1）表明，江苏省连云港、盐城、南通市3个沿海城市的PM_{2.5}浓度值最低，浓度最高的是南京市与泰州市。同时，江苏省PM_{2.5}浓度还具有南部比北部高、内陆比沿海高的趋势分布特征。通过对江苏省13个省辖市在2014年PM_{2.5}浓度的逐日变化（图2）分析可知，各城市PM_{2.5}污染较严重，浓度值超过100 μg/m³天数较多。PM_{2.5}浓度在11月、12月、1月，以及5月、6月出现浓度峰值；在8月、9月、10月则出现浓度谷值，同时还呈现出1月、2月PM_{2.5}浓度比11月、12月浓度高的趋势特征。

4 结果与分析

4.1 PM_{2.5}浓度与影响指标关联度分析

4.1.1 指标权重系数计算与分析 对原始数据进行无量纲化处理得到标准化数据，然后运用熵值赋权法，利用公式（2）、（3）、（4）计算得到影响PM_{2.5}浓度的指标层和指标因子的权重（w_i）（表3）。对权重值分析可知，PM_{2.5}污染源指标层对江苏省PM_{2.5}浓度影响最大（w_i = 0.4691），其次是空气质量指标与气象要素层（w_i = 0.2866），城市化与产业结

表2 江苏省13个省辖市PM_{2.5}浓度影响指标因子的数据

Tab. 2 Data of the PM_{2.5} influencing indices for the 13 provincial cities in Jiangsu province

| 指标层 | 因子 | 南京市 | 无锡市 | 徐州市 | 常州市 | 苏州市 | 南通市 | 连云港市 | 淮安市 | 盐城市 | 扬州市 | 镇江市 | 泰州市 | 宿迁市 |
|---------------------------------|-----------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| PM _{2.5} | X ₀ | 73.82 | 67.27 | 67.28 | 66.48 | 65.92 | 61.51 | 74.78 | 68.65 | 58.30 | 65.93 | 67.28 | 62.83 | 68.81 |
| | X ₁ | 123.46 | 105.38 | 118.86 | 103.76 | 89.98 | 93.89 | 112.03 | 101.78 | 92.54 | 112.29 | 109.70 | 110.42 | 114.88 |
| | X ₂ | 23.00 | 28.17 | 37.95 | 35.16 | 22.06 | 26.37 | 29.68 | 27.66 | 19.83 | 33.06 | 24.40 | 30.61 | 27.11 |
| | X ₃ | 0.90 | 1.10 | 1.22 | 1.10 | 0.93 | 0.74 | 1.01 | 1.07 | 0.77 | 0.83 | 1.18 | 1.21 | 1.20 |
| | X ₄ | 50.82 | 44.28 | 37.16 | 44.57 | 51.79 | 36.30 | 35.28 | 23.33 | 25.43 | 32.22 | 45.33 | 22.87 | 33.18 |
| | X ₅ | 99.43 | 101.66 | 91.68 | 102.48 | 95.89 | 105.04 | 98.83 | 111.73 | 101.12 | 86.79 | 90.05 | 75.59 | 92.01 |
| | X ₆ | 29.99 | 37.99 | 22.76 | 33.21 | 34.84 | 36.43 | 23.55 | 26.92 | 37.48 | 30.56 | 23.50 | 22.84 | 28.74 |
| | X ₇ | 25.96 | 22.01 | 17.31 | 20.93 | 20.76 | 28.67 | 20.03 | 21.39 | 22.81 | 18.76 | 28.08 | 22.64 | 17.30 |
| | X ₈ | 165.09 | 168.78 | 156.64 | 157.37 | 171.46 | 159.49 | 147.39 | 149.43 | 149.53 | 163.13 | 158.22 | 156.89 | 150.55 |
| | X ₉ | 73.96 | 73.36 | 66.08 | 66.12 | 73.61 | 77.40 | 75.31 | 77.32 | 78.60 | 72.47 | 86.75 | 74.52 | 73.01 |
| 空气 质量 指标 及 气象 要素 | X ₁₀ | 51.06 | 47.23 | 60.83 | 48.84 | 44.47 | 50.00 | 53.19 | 47.15 | 60.08 | 56.23 | 58.86 | 57.60 | 54.14 |
| | X ₁₁ | 11131 | 2951 | 3926 | 4276 | 4610 | 3928.0 | 1529 | 4871 | 2891 | 4203 | 1602 | 3242 | 3228 |
| | X ₁₂ | 10493 | 3364 | 10259 | 4673 | 24010 | 6586 | 3133 | 4420 | 4018 | 6035 | 2245 | 3437 | 1374 |
| | X ₁₃ | 10912 | 4734 | 7529 | 6932 | 5065 | 4769 | 3053 | 2220 | 2110 | 6155 | 3529 | 1123 | 762 |
| | X ₁₄ | 140.41 | 67.63 | 35.80 | 61.01 | 113.22 | 34.56 | 12.13 | 19.30 | 14.91 | 29.02 | 16.15 | 17.97 | 14.45 |
| | X ₁₅ | 286.71 | 194.01 | 158.90 | 215.48 | 418.01 | 96.62 | 28.35 | 63.65 | 24.96 | 69.70 | 84.67 | 53.43 | 51.01 |
| | X ₁₆ | 112435 | 83745 | 136060 | 35916 | 165939 | 65145 | 49739 | 47931 | 47125 | 48891 | 66346 | 52501 | 29906 |
| | X ₁₇ | 143701 | 148750 | 209055 | 93502 | 248636 | 71126 | 45952 | 70366 | 51645 | 81567 | 82025 | 53889 | 37826 |
| | X ₁₈ | 68910 | 47123 | 58398 | 36964 | 70299 | 36439 | 23221 | 23899 | 32914 | 19023 | 24452 | 18243 | 40074 |
| | X ₁₉ | 16637 | 4431 | 7703 | 8765 | 10999 | 54420 | 3451 | 8054 | 8943 | 17652 | 1905 | 18977 | 4842 |
| PM _{2.5} 污染物 来源 | X ₂₀ | 86117 | 18333 | 15269 | 8088 | 21315 | 7271 | 19852 | 6170 | 4040 | 6724 | 7388 | 3585 | 8300 |
| | X ₂₁ | 15 | 15 | 16 | 13 | 15 | 14 | 14 | 13 | 12 | 17 | 18 | 9 | 13 |
| | X ₂₂ | 44 | 43 | 43 | 43 | 42 | 42 | 40 | 41 | 40 | 43 | 42 | 41 | 42 |
| | X ₂₃ | 713 | 325 | 253 | 186 | 441 | 172 | 150 | 140 | 96 | 132 | 128 | 96 | 75 |
| | X ₂₄ | 1243 | 2194 | 1043 | 1813 | 1224 | 1532 | 736 | 846 | 869 | 1048 | 1131 | 1032 | 710 |
| | X ₂₅ | 0.43 | 0.49 | 0.54 | 0.52 | 0.52 | 0.53 | 0.50 | 0.48 | 0.56 | 0.53 | 0.51 | 0.56 | 0.51 |
| | X ₂₆ | 98011 | 115985 | 83828 | 99368 | 121230 | 82054 | 54815 | 48405 | 59043 | 90355 | 103675 | 79930 | 41390 |
| | X ₂₇ | 12563 | 5853 | 5085 | 7874 | 11620 | 3827 | 1384 | 2873 | 2208 | 5426 | 2762 | 3618 | 1019 |
| | X ₂₈ | | | | | | | | | | | | | |
| 城市化 与产业 结构 | X ₂₉ | | | | | | | | | | | | | |
| | X ₃₀ | | | | | | | | | | | | | |
| | X ₃₁ | | | | | | | | | | | | | |
| | X ₃₂ | | | | | | | | | | | | | |
| | X ₃₃ | | | | | | | | | | | | | |
| | X ₃₄ | | | | | | | | | | | | | |
| | X ₃₅ | | | | | | | | | | | | | |
| | X ₃₆ | | | | | | | | | | | | | |
| | X ₃₇ | | | | | | | | | | | | | |
| | X ₃₈ | | | | | | | | | | | | | |

构层的影响最弱 ($w_i = 0.2453$)。其中, 空气质量指标与气象要素层中平均风速权重值最大, 其次是NO₂、平均降雨量和平均气温; 污染源指标层中, 机动车保有量权重值最大, 其次是公路客运量、工业用电量、氮氧化物排放量和房屋建筑施工面积; 城市化与产业结构层中城市建成区面积、人口密度和地区工业总产值的权重值较大。

4.1.2 关联系数和关联度计算与分析 灰色关联度 (R_{ij}) 值越大表示影响因素对PM_{2.5}浓度影响作用越强, 贡献作用越显著, 反之亦然。因此, 依据关联度值可对影响PM_{2.5}浓度变化的指标层及指标因子按强弱进行排序。首先, 计算PM_{2.5}浓度与指标因子间的关联

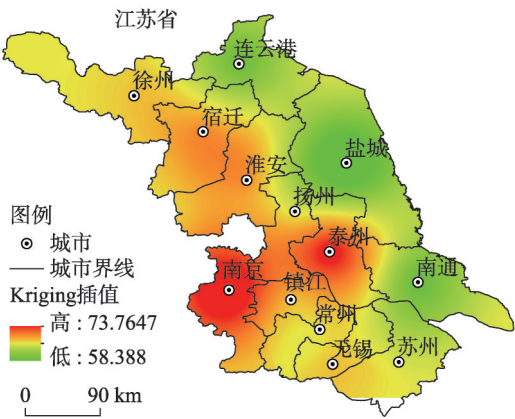


图1 2014年江苏省PM_{2.5}浓度空间变化

Fig. 1 Spatial distribution of the PM_{2.5} concentration in Jiangsu province in 2014

度, 然后计算 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度与指标层间的综合关联度。将影响指标因子与 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度标准化数据代入公式 (5), 得到关联系数 (表 4), 对各地市关联系数之和求平均值, 得到 27 个指标因子分别与 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度间的关联度值 (表 5)。将关联系数值代入公式 (6), 得到各指标层与 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的综合关联度值 (表 6)。

通常, 当 $0 < R \leq 0.30$, 关联度为轻度; 当 $0.30 < R \leq 0.60$, 关联度为中度; 当 $0.60 < R \leq 1.0$, 关联度为强度。对各指标因子与 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的关联度值 (表 5) 分析可知, 影响指标因子与 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的关联度值均较大, 其关联度为中度或强度, 充分显示各指标因子对 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度变化具有重要影响, 也表明各指标因子选择较为合理。关联度为中度的指标仅包括公路客运量、房屋建筑施工面积、园林绿地面积和人口密度, $\text{PM}_{2.5}$ 与其余指标因子均呈强度相关联, 其中与 PM_{10} 、 O_3 、降雨量、公路货运总量、地区工业总产值和第二产业占地区生产总值比重等指标的关联度相对较高。空气污染物与气候要素是 $\text{PM}_{2.5}$ 中的水溶性离子、

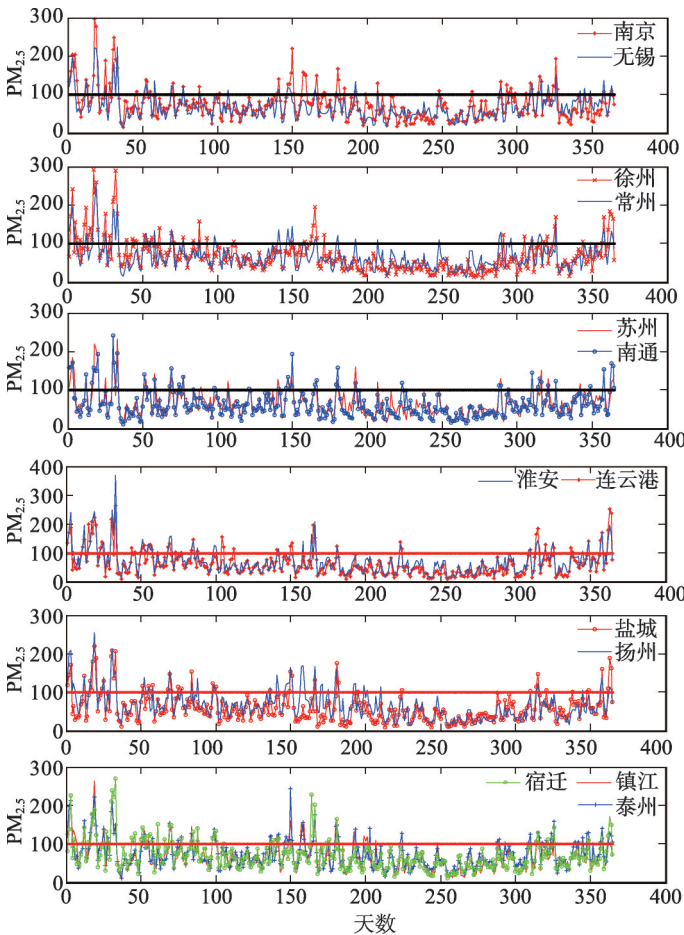


图2 江苏省13个省辖市 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的逐日变化曲线
Fig. 2 The daily change of $\text{PM}_{2.5}$ of 13 provincial cities in Jiangsu province

表3 江苏省 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度影响评价指标体系的权重
Tab. 3 Weight of the evaluation indexes system for the $\text{PM}_{2.5}$ in Jiangsu province

| 空气质量指标与气象要素 | | $\text{PM}_{2.5}$ 污染源 | | 城市化与产业结构 | |
|----------------|-------------|-----------------------|-------------|----------------|-------------|
| $w_i = 0.2866$ | | $w_i = 0.4691$ | | $w_i = 0.2453$ | |
| 指标因子 | 权重(w_i) | 指标因子 | 权重(w_i) | 指标因子 | 权重(w_i) |
| X_1 | 0.0889 | X_{11} | 0.0879 | X_{20} | 0.0392 |
| X_2 | 0.0935 | X_{12} | 0.1190 | X_{21} | 0.1026 |
| X_3 | 0.0921 | X_{13} | 0.0727 | X_{22} | 0.0924 |
| X_4 | 0.1124 | X_{14} | 0.1622 | X_{23} | 0.2566 |
| X_5 | 0.0752 | X_{15} | 0.1225 | X_{24} | 0.1769 |
| X_6 | 0.1175 | X_{16} | 0.0996 | X_{25} | 0.0534 |
| X_7 | 0.1269 | X_{17} | 0.1095 | X_{26} | 0.1051 |
| X_8 | 0.1119 | X_{18} | 0.0970 | X_{27} | 0.1738 |
| X_9 | 0.0930 | X_{19} | 0.1296 | — | — |
| X_{10} | 0.0887 | — | — | — | — |

表4 江苏省13个省辖市PM_{2.5}浓度与影响指标间的灰色关联系数矩阵Tab. 4 Grey correlation coefficient matrix of PM_{2.5} of 13 provincial cities in Jiangsu province

| 指标体系 | | 南京市 | 无锡市 | 徐州市 | 常州市 | 苏州市 | 南通市 | 连云港市 | 淮安市 | 盐城市 | 扬州市 | 镇江市 | 泰州市 | 宿迁市 |
|-----------------------|-----------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 指标层指标因子 | | | | | | | | | | | | | | |
| 空气质量指标与气象要素 | X ₁ | 1.0000 | 0.8093 | 0.6380 | 0.8118 | 0.5046 | 0.8474 | 0.5368 | 0.6137 | 0.8674 | 0.7413 | 0.9793 | 0.6384 | 0.8828 |
| | X ₂ | 0.3774 | 0.8095 | 0.5429 | 0.6108 | 0.5763 | 0.7643 | 0.4322 | 0.6804 | 1.0000 | 0.6773 | 0.6053 | 0.5127 | 0.6448 |
| | X ₃ | 0.4288 | 0.7470 | 0.5428 | 0.7107 | 0.8259 | 0.7074 | 0.4202 | 0.9593 | 0.9133 | 0.6184 | 0.5989 | 0.6503 | 0.6473 |
| | X ₄ | 0.9368 | 0.7547 | 0.8549 | 0.6917 | 0.4955 | 0.6599 | 0.7124 | 0.4344 | 0.8497 | 0.7477 | 0.7160 | 0.3588 | 0.6093 |
| | X ₅ | 0.4312 | 0.6257 | 0.9539 | 0.6481 | 0.9049 | 0.9586 | 0.7937 | 0.4284 | 0.6299 | 0.7162 | 0.9587 | 0.8246 | 0.7918 |
| | X ₆ | 0.5130 | 0.4639 | 0.5429 | 0.7006 | 0.6376 | 0.8272 | 0.4096 | 0.8935 | 0.9370 | 0.9917 | 0.5729 | 0.8318 | 0.8769 |
| | X ₇ | 0.6773 | 0.7537 | 0.4636 | 0.7061 | 0.7285 | 0.3866 | 0.9756 | 0.6192 | 0.5076 | 0.5791 | 0.5747 | 0.5410 | 0.4247 |
| | X ₈ | 0.6541 | 0.6167 | 0.7200 | 0.8161 | 0.4955 | 0.6279 | 0.6876 | 0.4621 | 0.8484 | 0.7549 | 0.7958 | 0.5006 | 0.4781 |
| | X ₉ | 0.4469 | 0.6891 | 0.4634 | 0.4876 | 0.7983 | 0.5945 | 0.6950 | 0.8026 | 0.4522 | 0.7323 | 0.5425 | 0.5074 | 0.5939 |
| | X ₁₀ | 0.4559 | 0.5499 | 0.5429 | 0.6577 | 0.5046 | 0.7919 | 0.6204 | 0.4983 | 0.3438 | 0.6876 | 0.6239 | 0.8461 | 0.8536 |
| PM _{2.5} 污染源 | X ₁₁ | 1.0000 | 0.5378 | 0.6029 | 0.6745 | 0.7463 | 0.9207 | 0.6876 | 0.6105 | 0.7790 | 0.7008 | 0.4669 | 0.4114 | 0.4999 |
| | X ₁₂ | 0.4557 | 0.5051 | 0.7284 | 0.5671 | 0.4955 | 0.9551 | 0.7699 | 0.4843 | 0.8107 | 0.6361 | 0.4808 | 0.3839 | 0.4247 |
| | X ₁₃ | 1.0000 | 0.7283 | 0.8507 | 0.8613 | 0.8819 | 0.7267 | 0.9971 | 0.4886 | 0.7901 | 0.9270 | 0.6205 | 0.3682 | 0.4247 |
| | X ₁₄ | 1.0000 | 0.7749 | 0.5590 | 0.7736 | 0.6272 | 0.9400 | 0.6876 | 0.4500 | 0.9585 | 0.5812 | 0.4775 | 0.3709 | 0.4314 |
| | X ₁₅ | 0.5995 | 0.7719 | 0.6773 | 0.9214 | 0.4955 | 0.9534 | 0.6959 | 0.4679 | 1.0000 | 0.5694 | 0.5397 | 0.3784 | 0.4501 |
| | X ₁₆ | 0.5597 | 0.7330 | 0.7129 | 0.5085 | 0.4955 | 0.9053 | 0.8600 | 0.4833 | 0.7980 | 0.5866 | 0.6169 | 0.4073 | 0.4247 |
| | X ₁₇ | 0.5011 | 0.9063 | 0.6819 | 0.6551 | 0.4955 | 0.9111 | 0.7261 | 0.4937 | 0.8841 | 0.6374 | 0.5755 | 0.3795 | 0.4247 |
| | X ₁₈ | 0.9493 | 0.9559 | 0.7221 | 0.7488 | 0.4955 | 0.7779 | 0.7917 | 0.4724 | 0.6395 | 0.5118 | 0.5213 | 0.3588 | 0.6598 |
| | X ₁₉ | 0.4100 | 0.4855 | 0.5162 | 0.5576 | 0.6115 | 0.3866 | 0.7166 | 0.4762 | 0.7886 | 0.7224 | 0.4636 | 0.4679 | 0.4459 |
| | X ₂₀ | 0.3333 | 0.6726 | 0.6414 | 0.5446 | 0.6295 | 0.4005 | 0.4648 | 0.6237 | 0.3346 | 0.5155 | 0.5711 | 0.8246 | 0.6530 |
| 城市化与产业结构 | X ₂₁ | 0.4450 | 0.7011 | 0.5540 | 0.8915 | 0.7427 | 0.7092 | 0.7061 | 0.8301 | 0.4229 | 0.5358 | 0.4636 | 0.8246 | 0.8163 |
| | X ₂₂ | 0.3333 | 0.6507 | 0.6303 | 0.6742 | 0.9715 | 0.6706 | 0.3928 | 0.7782 | 0.3621 | 0.6430 | 0.7422 | 0.9319 | 0.7132 |
| | X ₂₃ | 1.0000 | 0.7288 | 0.6250 | 0.5859 | 0.8579 | 0.9013 | 0.8202 | 0.4694 | 0.9382 | 0.5540 | 0.5023 | 0.3674 | 0.4247 |
| | X ₂₄ | 0.4384 | 0.5422 | 0.5851 | 0.6982 | 0.7762 | 0.5903 | 0.7049 | 0.4652 | 0.8233 | 0.6546 | 0.6293 | 0.4251 | 0.4247 |
| | X ₂₅ | 0.3333 | 0.8318 | 0.6750 | 0.8051 | 0.7567 | 0.4829 | 0.6161 | 0.6489 | 0.3462 | 0.6503 | 0.9876 | 0.8249 | 0.8100 |
| | X ₂₆ | 0.6323 | 0.5838 | 0.9134 | 0.7155 | 0.4955 | 0.6230 | 0.8944 | 0.4633 | 0.6934 | 0.8047 | 0.7125 | 0.5489 | 0.4247 |
| | X ₂₇ | 1.0000 | 0.7586 | 0.6880 | 0.8828 | 0.5391 | 0.9320 | 0.7188 | 0.4968 | 0.8292 | 0.8194 | 0.5391 | 0.4279 | 0.4247 |

多环芳烃有机物和二次污染物转化形成的重要条件。降雨量对空气中PM_{2.5}中尘粒具有冲洗作用,风速对降低PM_{2.5}浓度具有显著作用,PM_{2.5}属于PM₁₀中粒径更小的组成部分,公路货运汽车尾气排放是交通运输尘粒排放的主要来源,工业用电量及地区工业总产值代表了工业生产的规模与总量,工业废气烟尘排放量是空气中PM_{2.5}污染来源的主要组成,而园林绿地面积则对降低PM_{2.5}浓度具有显著作用。因此,各指标因子与PM_{2.5}浓度的灰色关联度较强,充分说明各指标因子对PM_{2.5}浓度变化具有较显著影响。

对各指标层与PM_{2.5}浓度的综合关联度(表6)分析可知,3个指标层中,PM_{2.5}污染源指标层与PM_{2.5}浓度关联度值较大的城市分别是南京、无锡、常州、南通、泰州市;城市化与产业结构指标层与PM_{2.5}浓度关联度值较大的城市分别是徐州、苏州、盐城、常州市;空气质量与气象要素指标层与PM_{2.5}浓度关联度值较大的城市分别是盐城、扬州、常州、南通市。不同城市各指标层与PM_{2.5}浓度综合关联度值差异,也充分体现出不同城市间在区域环境、社会经济、人口密度、城市产业结构、城市规模等方面对PM_{2.5}浓度影响的差异。

表 5 江苏省 PM_{2.5}浓度与影响指标因子间的关联度

| Tab. 5 Grey correlation degree between PM _{2.5} and the index of influencing factors in Jiangsu province | | | | | | | | | |
|---|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 指标因子 | X_1 | X_2 | X_3 | X_4 | X_5 | X_6 | X_7 | X_8 | X_9 |
| 关联度(R) | 0.7593 | 0.6334 | 0.6746 | 0.6786 | 0.7435 | 0.7076 | 0.6106 | 0.6506 | 0.6004 |
| 指标因子 | X_{10} | X_{11} | X_{12} | X_{13} | X_{14} | X_{15} | X_{16} | X_{17} | X_{18} |
| 关联度(R) | 0.6136 | 0.6645 | 0.5921 | 0.7435 | 0.6640 | 0.6554 | 0.6224 | 0.6363 | 0.6619 |
| 指标因子 | X_{19} | X_{20} | X_{21} | X_{22} | X_{23} | X_{24} | X_{25} | X_{26} | X_{27} |
| 关联度(R) | 0.5422 | 0.5546 | 0.6649 | 0.6534 | 0.6750 | 0.5967 | 0.6745 | 0.6543 | 0.6967 |

表 6 江苏省 13 个省辖市 PM_{2.5}浓度与影响指标层的综合关联度

| Tab. 6 Synthetic grey correlation degrees between PM _{2.5} and the index layers of 13 provincial cities in Jiangsu province | | | | | | | | | | | | | |
|--|---------|---------|---------|---------|---------|---------|--------|--------|--------|---------|--------|---------|---------|
| 指标 | 南京市 | 无锡市 | 徐州市 | 常州市 | 苏州市 | 南通市 | 连云港市 | 淮安市 | 盐城市 | 扬州市 | 镇江市 | 泰州市 | 宿迁市 |
| PM _{2.5} 浓度 | 73.8167 | 67.2667 | 67.2833 | 66.4833 | 65.9167 | 61.5083 | 61.825 | 68.65 | 58.3 | 65.9333 | 67.275 | 72.1667 | 68.8083 |
| R 空气质量指标与气象要素 | 0.6219 | 0.6918 | 0.6244 | 0.7014 | 0.6590 | 0.6993 | 0.5764 | 0.6497 | 0.7390 | 0.7204 | 0.6680 | 0.6285 | 0.6889 |
| R 污染源 | 0.8902 | 0.7420 | 0.6613 | 0.7208 | 0.5802 | 0.8317 | 0.3476 | 0.5063 | 0.8409 | 0.6582 | 0.5415 | 0.8490 | 0.4790 |
| R 城市化与产业结构 | 0.6511 | 0.6980 | 0.6815 | 0.7052 | 0.7270 | 0.7358 | 0.4476 | 0.5695 | 0.7118 | 0.6690 | 0.6107 | 0.6865 | 0.5431 |

4.2 指标因子关联度与 PM_{2.5}浓度空间分布的相关性

与 PM_{2.5}浓度呈强度关联的 23 个指标在不同城市存在空间分异，表明不同城市对 PM_{2.5}浓度的影响作用存在显著差异。影响南京市 PM_{2.5}浓度的指标中 PM₁₀、NO₂、等级公路里程、公路货运总量、机动车保有量、烟尘排放量、建成区面积、工业总产值的关联度值在所有城市中最大。苏州市影响 PM_{2.5}浓度的指标中 CO、O₃、公路货运总量、人均绿地面积等指标的关联度值较大。而临海的盐城市影响 PM_{2.5}浓度较强指标是 SO₂、CO、降雨量、平均气温和工业用电量等指标。因此，通过指标因素关联度分析，可清晰了解不同城市 PM_{2.5}浓度变化的主要影响指标因素。

另外，综合关联度也与 PM_{2.5}浓度空间变化有较好的关联性。连云港市、盐城市和南通市的 PM_{2.5}浓度值在全省最低，但仅连云港市 PM_{2.5}浓度与各指标层的综合关联度均为中度，盐城市、南通市的污染源影响指标层均与 PM_{2.5}浓度的综合关联度为强度。分析可知，虽然盐城与南通市都有形成严重 PM_{2.5}的污染源及污染条件，但他们的 PM_{2.5}浓度值都较低，这是因为它们还受到临近海洋环境的削弱影响作用。南京、泰州是江苏省 PM_{2.5}浓度值最高的城市，其 PM_{2.5}污染来源指标层与 PM_{2.5}浓度的综合关联度值也较高。南京 PM_{2.5}浓度值高的最主要影响指标因素是工业生产废气排放、交通尾气与建筑施工扬尘等，这也与其实际情况吻合。无锡市、徐州市、镇江市、常州市、淮安市和苏州市的 PM_{2.5}浓度值相差较小，但对其影响的各指标层次综合关联度值却存在明显差异，体现出不同城市 PM_{2.5}浓度变化的影响指标层的空间分异。研究结果表明，灰色关联度模型分析法可有效分析出主要影响指标因子与 PM_{2.5}浓度空间分布的相互关系。

5 结论

PM_{2.5}污染问题是目前人类社会发展中面临的非常严重环境问题，它对人类的身体健康、生态环境系统、社会生产均产生严重影响。通过构建 PM_{2.5}浓度的影响指标体系，运用灰色关联数学分析方法对其关联度进行分析与研究，并探讨其与 PM_{2.5}浓度空间分布的关系。结果表明：PM_{2.5}污染来源指标层的权重值最大，其次是空气质量与气象要素指标

层, 城市化与产业结构层的权重值最小; 对影响指标的关联度分析表明, 与PM_{2.5}浓度关联度为强度的是PM₁₀、O₃、CO、NO₂、SO₂、平均风速、降雨量、平均气温、平均相对湿度、照时数、等级公路里程、公路货运量、机动车保有量、工业用电量、SO₂排放量、烟(粉)尘排放量、建成区绿地覆盖率、人均公园绿地面积、建成区面积、第二产业占地区生产总值比重、人均地区生产总值和地区工业总产值; 与PM_{2.5}浓度关联度为中度的指标因子分别是公路客运量、房屋建筑施工面积、园林绿地面积和人口密度等4个指标因子。PM_{2.5}污染源指标层与PM_{2.5}浓度关联度值较大的城市分别是南京、无锡、常州、南通、泰州市; 城市化与产业结构指标层与PM_{2.5}浓度关联度值较大的城市分别是徐州、苏州、盐城、常州市; 空气质量与气象要素指标层与PM_{2.5}浓度关联度值较大的城市分别是盐城、扬州、常州、南通市。通过关联系数与关联度值分析均表明, 影响指标因子关联度值与PM_{2.5}浓度空间分布有较好相关性。研究结果表明, 灰色关联模型可有效对PM_{2.5}浓度主要影响因素进行定量分析与评价。

该研究中还存在一些需要改进和深入的地方: PM_{2.5}浓度影响指标体系仍需要改进, 如增加城市交通地、居民用地等指标, 考虑距海远近因素、农业生产扬尘与生物资燃烧等因素; 深入研究PM_{2.5}浓度与影响因素间灰色关联度的时空分异及预测模型, 继而探讨PM_{2.5}的污染与防治措施等。

参考文献(References)

- [1] Gehrig R, Buchmann B. Characterising seasonal variations and spatial distribution of ambient PM₁₀ and PM_{2.5} concentrations based on long-term Swiss monitoring data. *Atmospheric Environment*, 2003, 37(19): 2571-2580.
- [2] Song Yu, Tang Xiaoyan, Zhang Yuanhang, et al. Effects on fine particles by the continued high temperature weather in Beijing. *Environmental Science*, 2002, 23(4): 33-37. [宋宇, 唐孝炎, 张远航, 等. 夏季持续高温天气对北京市大气细粒子(PM_{2.5})的影响. *环境科学*, 2002, 23(4): 33-37.]
- [3] Wei Yuxiang, Yin Yan, Yang Weifen, et al. Analysis of the pollution characteristics influence factors of PM_{2.5} in Nanjing area. *Environmental Science and Management*, 2009, 34(9): 29-34. [魏玉香, 银燕, 杨卫芬, 等. 南京地区PM_{2.5}污染特征及其影响因素分析. *环境科学管理*, 2009, 34(9): 29-34.]
- [4] Zhao Chenxi, Wang Yunqi, Wang Yujie, et al. Temporal and spatial distribution of PM_{2.5} and PM₁₀ pollution status and the correlation of particulate matters and meteorological factors during winter and spring in Beijing. *Environmental Science*, 2014, 35(2): 418-427. [赵晨曦, 王云琦, 王玉杰, 等. 北京地区冬春PM_{2.5}和PM₁₀污染水平时空分布及其与气象条件的关系. *环境科学*, 2014, 35(2): 418-427.]
- [5] Wei Fusheng, Teng Enjiang, Wu Guoping, et al. Concentrations and elemental components of PM_{2.5}, PM₁₀ in ambient air in four large Chinese cities. *Environmental Monitoring in China*, 2001, 17(7): 1-6. [魏复盛, 滕恩江, 吴国平, 等. 我国4个大城市空气PM_{2.5}、PM₁₀污染及其化学组成. *中国环境监测*, 2001, 17(7): 1-6.]
- [6] Bao Zhen, Feng Yinchang, Jiao Li. Characterization and source apportionment of PM_{2.5} and PM₁₀ in Hangzhou. *Environmental Monitoring in China*, 2010, 26(2): 44-48. [包贞, 冯银厂, 焦荔. 杭州市大气PM_{2.5}和PM₁₀污染特征及来源解析. *中国环境监测*, 2010, 26(2): 44-48.]
- [7] Xiao Zhimei, Bi Xiaohui, Feng Yinchang, et al. Source apportionment of ambient PM₁₀ and PM_{2.5} in urban area of Ningbo city. *Research of Environmental Sciences*, 2012, 25(5): 549-555. [肖致美, 毕晓辉, 冯银厂, 等. 宁波市环境空气中PM₁₀和PM_{2.5}来源解析. *环境科学研究*, 2012, 25(5): 549-555.]
- [8] Dockery D W, Pope C A, Xu X, et al. An association between air pollution and mortality in six US cities. *New England Journal of Medicine*, 1993, 329(24): 1753-1759.
- [9] Yin Yongwen, Cheng Jinping, Duan Yusen, et al. Correlation analysis between the PM_{2.5}, PM₁₀ which were taken in the hazy day and the number of outpatient about breathing sections, breathing sections of pediatrics in shanghai. *Environmental Sciences*, 2011, 32(7): 1894-1898. [殷永文, 程金平, 段玉森, 等. 上海市霾期间PM_{2.5}、PM₁₀污染与呼吸科、儿呼吸科门诊人数的相关分析. *环境科学*, 2011, 32(7): 1894-1898.]
- [10] Jia Yuqiao, Zhao Xiaohong, Guo Xingbiao. Effects of PM₁₀ and PM_{2.5} on secretion of inflammatory factors in human lung fibroblast cell. *Journal of Environment and Health*, 2011, 28(3): 206-208. [贾玉巧, 赵晓红, 郭新彪. 大气颗粒物

- PM₁₀和PM_{2.5}对人肺成纤维细胞及其炎症因子分泌的影响. 环境与健康杂志, 2011, 28(3): 206-208.]
- [11] Wang Wengming, Sheng Huiping, Huang Yunbiao, et al. The PM_{2.5} fine particulate pollution states and its impact on human health. Shanghai Journal of Preventive Medicine, 2015, 27(5): 290-295. [王文朋, 沈惠平, 黄云彪, 等. 大气PM_{2.5}细颗粒物污染状况及对人体健康的影响. 上海预防医学, 2015, 27(5): 290-295.]
- [12] Buseck P R, POsfai M. Airborne minerals and related aerosol particles: effects on climate and the environment. Proceedings of the National Academy of Sciences, 1999, 96(7): 3372-3379.
- [13] Tsai Y I, Kuoc S C, Lee W J, et al. Long-term visibility trends in one highly urbanized, one highly industrialized, and two rural areas of Taiwan. Science of Total Environment, 2007, 382(2/3): 324-341.
- [14] Viana M, Kuhlbusch T A, Querol X, et al. Source apportionment of particulate matter in Europe: A review of methods and results. Journal of Aerosol Science, 2008, 39(10): 827-849.
- [15] Zhu Xianlei, Zhang Yuanhang, Zeng Limin, et al. Source identification of ambient PM_{2.5} in Beijing. Research of Environmental Sciences, 2005, 18(5): 1-5. [朱先磊, 张远航, 曾立民, 等. 北京市大气细颗粒物PM_{2.5}的来源研究. 环境科学研究, 2005, 18(5): 1-5.]
- [16] Cheng Hairong, Wang Zuwu, Feng Jialiang, et al. Carbonaceous species composition and source apportionment of PM_{2.5} in urban atmosphere of Wuhan. Ecology and Environmental Sciences, 2012, 21(9): 1574-1579. [成海容, 王祖武, 冯家良, 等. 武汉市城区大气PM_{2.5}的碳组分与源解析. 生态环境学报, 2012, 21(9): 1574-1579.]
- [17] Zhong Wuya, Yan Wei. Analysis on urban economic development in view of PM_{2.5}. Urban Insight, 2013(1): 169-174. [钟无涯, 颜玮. 城市经济发展与PM_{2.5}关系探析. 城市观察, 2013(1): 169-174.]
- [18] Qi Yang, Zhang Yongnan. Dynamic relationship between the evolution of three industries and PM_{2.5} emissions in Beijing. China Population, Resources and Environment, 2015, 25(7): 15-23. [齐园, 张永安. 北京三次产业演变与PM_{2.5}排放的动态关系研究. 中国人口·资源与环境, 2015, 25(7): 15-23.]
- [19] Mo Li, Yu Xinxiao, Zhao Yang, et al. Correlation analysis between urbanization and particle pollution in Beijing. Ecology and Environmental Sciences, 2014, 23(5): 806-811. [莫莉, 余新晓, 赵阳, 等. 北京市区域城市化程度与颗粒物污染的相关性分析. 生态环境学报, 2014, 23(5): 806-811.]
- [20] Pateraki S, Asimakopoulos D N, Flocas H A, et al. The role of meteorology on different sized aerosol fractions (PM₁₀, PM_{2.5}, PM_{2.5-10}). Science of the Total Environment, 2012, 419: 124-135.
- [21] Yang Y, Liu X, Qu Y, et al. Formation mechanism of continuous extreme haze episodes in the megacity Beijing, China, in January 2013. Atmospheric Research, 2015, 155: 192-203.
- [22] Querol X, Alastuey A, Rodriguez S, et al. Monitoring of PM₁₀ and PM_{2.5} around primary particulate anthropogenic emission sources. Atmospheric Environment, 2001, 35(5): 845-858.
- [23] Zheng M, Salmon L G, Schauer J J, et al. Seasonal trends in PM_{2.5} source contributions in Beijing, China. Atmospheric Environment, 2005, 39(22): 3967-3976.
- [24] Yangyang Xie, Bin Z, Lin Z, et al. Spatiotemporal variations of PM_{2.5} and PM₁₀ concentrations between 31 Chinese cities and their relationships with SO₂, NO₂, CO and O₃. Particuology, 2015, 20: 141-149.
- [25] Wang Zanshan, Li Yunting, Chen Tian, et al. Spatial-temporal characteristics of PM_{2.5} in Beijing in 2013. Acta Geographica Sinica, 2015, 70(1): 110-120. [王占山, 李云婷, 陈添, 等. 2013年北京市PM_{2.5}的时空分布. 地理学报, 2015, 70(1): 110-120.]
- [26] Lin Qiaoying, Chen Yongshan. Spatial variation of PM_{2.5} in cities in winter and anthropogenic influencing factors in China. Journal of Ecology and Rural Environment, 2015, 31(4): 460-465. [林巧莺, 陈永山. 我国城市冬季PM_{2.5}空间特征及其人为影响因子. 生态与农村环境学报, 2015, 31(4): 460-465.]
- [27] Gelencsér A, May B, Simpson D, et al. Source apportionment of PM_{2.5} organic aerosol over Europe: primary/secondary, natural/anthropogenic, and fossil/biogenic origin. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2007, (1984-2012), 112(D23).
- [28] Briggs D J, Collins S, Elliott P, et al. A Mapping urban air pollution using GIS: A regression-based approach. International Journal of Geographical Information Science, 1997, 11: 699-718.
- [29] Wu Jiansheng, Liao Xing, Peng Jian, et al. Simulation and influencing factors of spatial distribution of PM_{2.5} concentrations in Chongqing. Environmental Science, 2015, 36(3): 759-767. [吴健生, 廖星, 彭建, 等. 重庆市PM_{2.5}浓度空间分异模拟及影响因子. 环境科学, 2015, 36(3): 759-767.]
- [30] Chen Jingwen, Zou Bin, Wang Min, et al. Bayesian network in PM_{2.5} concentration prediction considering data characteristics. Environmental Science & Technology, 2015, 38(11): 49-56. [陈璟雯, 邹滨, 王敏, 等. 顾及数据特征的贝叶斯网络PM_{2.5}浓度预报研究. 环境科学与技术, 2015, 38(11): 49-56.]

- [31] Shannon C E. A mathematical theory of communication. ACM SIGMOBILE. Mobile Computing and Communications Review, 2001, 5(1): 3-55.
- [32] Deng Julong. Control problems of grey systems. Systems & Control Letters, 1982, 1(5): 288-294.
- [33] Liu Sifeng, Dang Yaoguo, Fang Zhigeng, et al. Grey System Theory and Its Application. 5th ed. Beijing: Science Press, 2010: 169-175. [刘思峰, 党耀国, 方志耕, 等. 灰色系统理论及其应用. 5版. 北京: 科学出版社, 2010: 169-175.]
- [34] Brus D J, Heuvelink G B. Optimization of sample patterns for universal kriging of environmental variables. Geoderma, 2007, 138(1): 86-95.

Analysis of the driving factors of PM_{2.5} in Jiangsu province based on grey correlation model

HE Xiang^{1,2,3}, LIN Zhenshan^{1,3}, LIU Huiyu^{1,3}, QI Xiangzhen^{1,3}

(1. College of Geography Science, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China;

2. Kaili University, Kaili 556011, Guizhou, China; 3. Jiangsu Center for Collaborative Innovation in
Geographical Information Resource Development and Application, Nanjing 210023, China)

Abstract: In this paper, the Kriging interpolation method was introduced to analyze the spatial distribution characteristics of PM_{2.5} in Jiangsu province in 2014, and then the evaluation index system for the PM_{2.5} was constructed, which consists of three index layers and 27 indexes. The grey correlation analysis method was used to explore the correlation between PM_{2.5} and its influencing factors. Finally, the relationship between the spatial distribution of PM_{2.5} and the main influencing factors was analyzed. The conclusions can be drawn as follows: (1) The PM_{2.5} in the coastal areas and the north is lower, while it is higher in the inland areas and the south. (2) The weight of PM_{2.5} pollution sources index layer is the largest ($w_i = 0.4691$), the weight of the air quality index and meteorological elements layer is larger ($w_i = 0.2866$), and the weight value of urbanization and industrial structure index layer is the minimum ($w_i = 0.2453$). (3) In the 27 indexes, the volume of highway freight, housing construction area, garden green space area and population density have moderate correlation degrees. The other indexes have strong correlation degrees, among which, the correlation degree of the PM₁₀, O₃, total road freight volume and gross industrial output value are relatively high. (4) The synthetic correlation degree values between the PM_{2.5} pollution sources index layer and PM_{2.5} are much higher in cities of Nanjing, Wuxi, Changzhou, Nantong and Taizhou. The synthetic correlation degree values between urbanization and industrial structure index layer and PM_{2.5} are much higher in cities of Xuzhou, Suzhou, Yancheng and Changzhou. The synthetic correlation degree values between the air quality index and meteorological elements layer and PM_{2.5} are much higher in cities of Yancheng, Yangzhou, Changzhou and Nantong. Our results demonstrate that the grey correlation degrees of the evaluation indexes system are closely related with spatial distribution of PM_{2.5} in Jiangsu province. Therefore, the grey correlation analysis model can be employed to analyze and evaluate the spatial distribution of PM_{2.5}.

Keywords: grey correlation model; the spatial distribution of PM_{2.5}; influencing index; Jiangsu province