

基于地理探测器的浙江省空气质量风险因子分析

马小雯^{1,2}, 章笑艺^{1,2}, 张丰^{1,2*}, 杜震洪^{1,2}, 刘仁义^{1,2}

(1. 浙江大学 浙江省资源与环境信息系统重点实验室, 浙江 杭州 310028;

2. 浙江大学 地理信息科学研究所, 浙江 杭州 310027)

摘 要: 随着经济改革和城市化建设进程的加快, 我国的空气质量正面临着空前的压力. 识别城市化过程中影响空气质量的风险因子, 探究不同城市化与空气质量耦合协调阶段的风险因子及其决定力的差异, 有助于政府在发展城市经济的同时合理预防、控制及治理空气污染. 本文根据 2015 年浙江省各市城市化与空气质量耦合协调度计算结果, 将全省划分为协调发展、转型过渡和不协调发展的 3 种区域, 运用地理探测器揭示全省及不同耦合协调分区的空气质量风险因子. 研究表明: ①不同耦合协调分区的主要风险因子不完全相同; ②城市化因子通常与年均 AQI 值成正相关关系, 自然、气象因子则通常为负相关; ③风险因子的两两共同作用加强了对空气质量空间分布的解释力.

关 键 词: 空气质量; 城市化; 耦合协调度; 地理探测器

中图分类号: P208

文献标志码: A

MA Xiaowen^{1,2}, ZHANG Xiaoyi^{1,2}, ZHANG Feng^{1,2*}, DU Zhenhong^{1,2}, LIU Renyi^{1,2} (1. Zhejiang Provincial Key Lab of GIS, Zhejiang University, Hangzhou 310028, China; 2. Department of Geographic Information Science, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Study on risk factors of air quality in Zhejiang Province based on geographical detectors. Journal of Zhejiang University (Science Edition), 2018, 45(2):

Abstract: With the acceleration of economic reform and urbanization, China's air quality is facing unprecedented pressure. Identifying the risk factors influencing the air quality in the process of urbanization and studying the differences of risk factors and their determinant powers at different coupling stages will assist the government in the atmospheric environment protection and air quality improvement. According to the coupling coordination level of urbanization and air quality in Zhejiang Province, 2015, divide the province into coordinated area, transitional zone and uncoordinated area. Reveal the risk factors of air quality in these three zones via geographical detectors. The results show that: (1)The main risk factors of different coupling coordination areas are not exactly the same; (2)Urbanization factors are usually positively correlated with annual AQI values, and natural and meteorological factors are usually negative correlation; (3)The combined effect of the two-factor interaction will enhance the explanatory power of the spatial distribution of the air quality.

Key Words: air quality; urbanization; coupling coordination; geographical detectors

0 引言

近年来, 随着经济改革和城市化建设进程的加快, 人口的增长以及人类生产活动规模的不断扩张, 我国的生态环境尤其是空气质量正面临着空前的压

收稿日期: 2017-04-21.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41471313, 41671391); 浙江省科技攻关项目(2015C33021).

作者简介: 马小雯(1992-), ORCID:<http://orcid.org/>, 女, 硕士研究生, 主要从事土地利用数据的时空分析与地理信息应用研究

*通信作者, E-mail: zfcarnation@zju.edu.cn.

力. 空气污染呈现出重点城市集聚和区域性差异分布的空间结构特征^[1], 部分地区和城市灰霾频现, 以可吸入颗粒物(PM₁₀)、细颗粒物(PM_{2.5})为特征污染物的空气污染事件引发公众和学界的关注.

城市化与空气质量存在交互胁迫的复杂关系, 且这种相互作用长期处于动态变化之中. 具体来说, 人口规模扩大、工业化进程加速、燃油燃煤增加等都对空气质量产生胁迫, 导致空气污染压力; 但城市化带来的环保投资增加、科技水平进步, 使空气污染得到更有效的控制和治理. 同时, 空气污染将恶化人民生活环境、降低生活质量, 环保政策可能改变城市规划、制约城市选址, 从人口、社会、空间等方面约束城市化.

对于二者间关系的研究, 最早追溯到 20 世纪 90 年代初, 美国经济学家 GROSSMAN 等^[2]第一次发现人均收入与环境污染之间存在倒“U”型的关系, 即后来被哈佛大学 PANAYOTOU 教授证实的环境库兹涅茨曲线 EKC(Environmnet Kuznets Curve)^[3]. 随着 EKC 曲线在经济发展与环境污染关系研究中的广泛应用, 学者们^[4-6]发现经济指标与空气环境指标并不完全符合倒 U 型曲线, 并借鉴 Kaya 恒等式对变量函数予以修正^[7]. 此外, 王庆松等^[8]将城市化与生态环境交互耦合的“双曲线指数模型”引入到城市化与环境空气耦合协调关系的研究中, 虽然未能得到期望的双曲线结果, 但引发后续学者^[9]对二者间双向关系及其耦合协调机制的探索.

国内外学者还采用 EKC 模型^[10]、多元回归模型^[11]、灰色关联分析^[12]、转移概率模型^[13]、空间误差模型^[14]等多种方法探究影响空气质量的主要污染源和主要人类活动因素. 结果表明, 虽然不同区域、不同污染物类型, 其主要来源或影响因素不完全相同, 但普遍都与工业结构、机动车数量及污染物排放有着较强相关性.

2015 年是全面深化改革的关键之年、“十二五”规划的收官之年和谋划“十三五”蓝图的重要之年. 浙江省是长三角城市群的重要组成部分, 是我国东南沿海重要的经济发展大省, 也是我国环境保护和污染防治的重点区域. 2013 年秋冬雾霾凸显, 浙江省政府迅速推出并落实一系列大气污染治理政策, 2015 年空气质量已明显好转.

本研究通过构建浙江省城市化与空气质量耦合协调模型, 定量分析 2015 年浙江省城市化与空气质量间的耦合关系. 在此基础上, 对协调发展、转型过渡和不协调发展的区域, 运用地理探测器揭示城市化过程中影响空气质量的风险因子, 探究不同城市化与空气质量耦合协调发展阶段的风险因子及其决定力的差异. 据此给出浙江省城市化建设进程中的对策建议, 以期在发展城市经济的同时合理预防、控制及治理该区域的空气污染提供科学依据, 为推动我国生态文明建设、发展绿色经济提供决策支持.

1 方法与数据

1.1 研究方法

1.1.1 耦合协调模型

耦合作为物理学概念, 是指 2 个(或 2 个以上的)系统或运动形式通过各种相互作用而彼此影响的现象^[15]. 本文借鉴诸多学者对城市化与生态环境协调发展的研究^[16-19], 在物理学耦合度模型的基础上, 构建城市化与空气质量的耦合协调关系模型, 分析浙江省 2015 年城市化与空气质量的耦合协调情况.

其中, 城市化水平评价体系通过解析城市化含义、阅读城市化指标体系构建文献^[17, 19-21], 并参考近年来研究者使用频度较高的指标, 从人口、经济、土地和社会 4 个角度进行指标初选, 经双变量相关性检验, 剔除相关度过高(pearson 相关系数大于 0.85)的指标后, 由 23 个指标构建形成(见表 1). 空气质量水平则采用年均空气质量指数(AQI)表征.

1.1.1.1 耦合度函数

变异系数 C_v 是数据标准差 S 与平均数 \bar{x} 的比, 能够在消除测量尺度和量纲的影响的同时反映数据离散程度, 公式如下:

$$C_v = S/\bar{x} \quad (1)$$

其中,

$$S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^2} \quad \bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (2)$$

对于城市化子系统 $U(x)$ 和空气量子系统 $E(y)$, 其变异系数

$$C_v = \sqrt{2 \times \left[1 - \frac{4U(x) \cdot E(y)}{(U(x)+E(y))^2} \right]} \quad (3)$$

越小, 子系统间耦合程度越高. 由此定义耦合度函数:

$$C = \left[\frac{4U(x) \cdot E(y)}{(U(x)+E(y))^2} \right]^k \quad (4)$$

调节系数 $k \in [1, 5]$, 耦合度 $C \in [0, 1]$, 以此反映当 2 个子系统的综合效益或发展水平一定 (即 $U(x)$ 与 $E(y)$ 之和一定) 时, 为使两者复合效益或发展水平 (即 $U(x)$ 与 $E(y)$ 之积) 最大, 二子系统组合协调程度^[22]. 通常对耦合度的划分标准如表 2 所示.

1.1.1.2 耦合协调度函数

然而, 根据公式(4), 2 个低水平的子系统可能和 2 个高水平的子系统设计计算所得的耦合度值差不多. 仅凭借耦合度值 C 并不足以全面表达 2 个子系统间的动态协调发展水平, 在多区域对比研究时不够准确, 因此引入耦合协调度函数:

$$D = \sqrt{C * T} \quad (5)$$

其中 C 为耦合度; $T = \alpha U(x) + \beta E(y)$, 为城市化与空气质量综合调和指数, 反映双子系统的整体协同效应或贡献; α, β 分别为各子系统的权重系数. 本研究中, 城市化子系统和空气质量子系统对城市化-空气质量双系统的重要性相同, 因此取 $\alpha = \beta = 0.5$. 耦合协调等级划分暂无统一规定, 借鉴、综合已有研究成果^[9, 23], 本文拟定分级如表 3 所示.

1.1.2 地理探测器

地理探测器 (Geographical Detectors) 由王劲峰等^[24]提出, 通过度量自变量 (或称风险因子) 与因变量 (或称风险事件) 在空间分异性上的相似程度, 探测地理事件影响因子的一种新的统计学方法. 该方法最初被用于探寻地方性疾病的影响因子^[24], 之后被应用于研究土地利用^[25]、区域经济^[26]、公共卫生^[27]、环境污染^[28]等多个领域具有空间分异特征的问题.

表 1 城市化水平评价指标体系

Table 1 Evaluation index system of urbanization level

评价目标	二级指标	三级指标
城市化水平	人口城市化	总人口 (万人)、人口自然增长率 (%), 城镇人口占比 (%), 二三产业从业人员占比 (%)
	经济城市化	人均 GDP (元/人)、人均固定资产投资 (元/人)、人均第二产业固定资产投资 (元/人)、二三产业占比 (%), 工业产值占比 (%), 城镇居民人均可支配收入 (元/人)、二三产业产值占比 (%)
	土地城市化	人口密度 (人/平方公里)、路网密度 (千米/平方公里)、人均建制镇面积 (公顷/人)、建制镇面积占总面积比 (%)
	社会城市化	万人拥有民用汽车数 (辆/万人)、全年人均用电 (千瓦时/人)、万人福利院床位数 (个/万人)、万人医院床位数 (张/万人)、万人拥有医生数 (人/万人)、万人图书藏书量 (本/万人)、两废排放企业数 (个) 污水处理企业数 (个)

表 2 耦合度类型分类

Table 2 Coupling degree classification

耦合度 C	耦合阶段类型
$C=0$	无关状态且向无序发展
$0 < C \leq 0.3$	低水平耦合阶段
$0.3 < C \leq 0.5$	拮抗阶段
$0.5 < C \leq 0.8$	磨合阶段
$0.8 < C < 1$	高水平耦合阶段
$C=1$	良性共振耦合且趋向新的有序结构

表 3 浙江省城市化与空气质量耦合协调度类型划分

Table 3 Classification of the coupling coordination of urbanization and air quality in Zhejiang province

类型		亚类型		子类型
协调发展	$0.7 < D \leq 1$	高级协调	$E(y) - U(x) > 0.1$	高级协调-城市化滞后
			$U(x) - E(y) > 0.1$	高级协调-空气质量滞后
			$0 \leq U(x) - E(y) \leq 0.1$	高级协调
转型过渡	$0.5 < D \leq 0.7$	基本协调	$E(y) - U(x) > 0.1$	基本协调-城市化滞后
			$U(x) - E(y) > 0.1$	基本协调-空气质量滞后
			$0 \leq U(x) - E(y) \leq 0.1$	基本协调
不协调发展	$0.3 < D \leq 0.5$	基本不协调	$E(y) - U(x) > 0.1$	基本不协调-城市化受阻
			$U(x) - E(y) > 0.1$	基本不协调-空气质量受阻
			$0 \leq U(x) - E(y) \leq 0.1$	基本不协调
	$0 < D \leq 0.3$	严重不协调	$E(y) - U(x) > 0.1$	严重不协调-城市化受阻
			$U(x) - E(y) > 0.1$	严重不协调-空气质量受阻
			$0 \leq U(x) - E(y) \leq 0.1$	严重不协调

地理探测器包括以下 4 部分: ①因子探测器: 比较每个子区域的累计方差与整个研究区域的方差, 寻找可能影响事件发生的风险因子; ②风险探测器: 比较不同分区间风险事件属性(因变量)的平均值. 均值差异越显著, 该子分区风险越大; ③交互作用探测器: 比较 2 个因子 X_1 和 X_2 独立对风险事件的决定力及 2 个因子共同作用对事件发生的决定力, 评估多因子共同作用时是否会增加或减弱对事件 Y 的解释力; ④生态探测器: 计算不同因子的子分区的累计方差, 比较不同的因子对事件 Y 空间分布的影响是否有显著的差异.

其中, 交互作用探测器将 2 个因子 X_1 、 X_2 的交互作用划分为以下类型, 见表 4, 式中 \cap 即交互作用, 可通过 ArcGIS 对 X_1 、 X_2 2 个图层叠加来实现.

空气污染的影响因子和流行疾病、灾害发生原因具有一定的相似性, 即受到人为因素、气象条件和自然地理要素的综合影响. 而且, 2 个变量在空间分布的一致性比在一维曲线的一致性更难达到, 即地理探测器所测度的相关性比经典回归更为可靠. 因此, 考虑将地理探测器应用到大气污染物影响因子的研究中来.

本文侧重讨论不同耦合协调阶段中, 城市化对空气质量的风险因子, 同时对比分析人为因素与自然、气象因素决定力的差异. 选择 2.1.1 中所得 23 个城市化指标, 以及平均高程、坡度、气温、降水

等级等自然气象因子作为被探测的自变量. 为进一步探寻污染工厂与空气质量的关系, 亦探测废水、废气、危险固体废物排放企业数及污水处理厂数的决定力.

表 4 双因子交互作用的类型划分

Table 4 Classification of two - factor interactions

判据	交互作用
$q(X_1 \cap X_2) < \min(q(X_1), q(X_2))$	非线性减弱
$\min(q(X_1), q(X_2)) < q(X_1 X_2) < \max(q(X_1), q(X_2))$	单因子非线性减弱
$q(X_1 \cap X_2) > \max(q(X_1), q(X_2))$	双因子增强
$q(X_1 \cap X_2) = q(X_1) + q(X_2)$	独立
$q(X_1 \cap X_2) > q(X_1) + q(X_2)$	非线性增强

1.2 数据来源与研究区概况

1.2.1 数据来源与处理

为了保证研究结果的科学性和可靠性, 本文社会经济统计数据来源于《2015 年浙江省统计年鉴》《2016 年浙江省统计年鉴》、各市相应年份统计年鉴及统计公报. 污染企业数据来源于 2015 年《国家重点监控企业名单》《浙江省重点监控企业名单》.

自然资源与环境数据来源于当年《浙江省自然资源与环境统计年鉴》. 气温数据来源于中国气象网. 降水数据来源于《2015 年浙江省农业气候年报》. 高程、坡度数据由 CGIAR-CSI(Consortium for

Spatial Information)提供的 STRM 90m DEM 数据处理获得.

空气质量数据来源全国城市空气质量实时发布平台、浙江省环保局发布的国控污染源实时排放结果.

将人口、经济、社会、土地、气温等统计指标根据行政区划空间化. 基于《2015 年浙江省农业气候年报》矢量化获得 2015 年浙江省降水分布图层. 镶嵌并校正 90 m 精度的浙江省 STRM DEM 数据, 运用 ArcGIS 空间分析工具得到浙江省高度、坡度图层. 对于监测站点的空气质量数据, 剔除无效点、异常记录后, 通过站点编码匹配获取其经纬度并定位, 形成 151 个监测站点的点图层. 借鉴已有研究^[29], 对监测站点的 AQI 字段做 1 km 分辨率的克里金插值; 将浙江省划分为 10 km × 10 km 格网, 分别提取每个格网内空气质量(AQI)平均值作为因变量, 提取各城市化指标、自然气象指标值, 采取按面积加权的方法处理计算后作为自变量; 按行政界线做掩膜提取, 以格网几何中心提取样本点; 采用 Jenks 自然断点法对样本点各属性值分层, 将分层结果输入地理探测器.

1.2.2 研究区概况

浙江省地处中国东南沿海、长江三角洲南翼, 陆域面积 $10.55 \times 10^4 \text{ km}^2$, 拥有平原、丘陵、山区、海岛等多种地貌. 海域面积 $26 \times 10^4 \text{ km}^2$, 海岸线总长 6400 余 km, 居全国首位^[30] (维基百科). 在城市化过程中, 浙江充分发挥国有经济主导作用, 用民营经济的发展带动经济的起飞. 近年来, 浙江更是抓住机遇, 大力发展以互联网为核心的信息经济, 经济活力和增长速度均位列全国前茅.

在坚持经济发展的同时, 浙江的生态环境改善工作连续多年位居全国前列. 从“绿色浙江”到“生

态省”, 再到建设“全国生态文明示范区”, 浙江在持之以恒的大力治水治气下, 单位产值能耗降低、地表水质量显著提升、空气质量(AQI)优良天数平均比例上升, 全省环境质量得到一定改善.

2 结果与分析

2.1 浙江省城市化与空气质量耦合协调度的空间分异

耦合协调度 C 、耦合协调度 D 计算结果见表 5. 从计算结果来看, 大部分情况下耦合协调度 D 和耦合度 C 在空间差异上情况相似 (见图 1), 但类型划分有交错. 就耦合度而言, 2015 年全省各市的城市化子系统与空气质量子系统, 除丽水市处于低耦合状态、衢州市处于拮抗状态, 其余各市均达高水平耦合. 而从耦合协调度结果看, 衢州、丽水处于城市化滞后的基本不协调阶段, 杭州、嘉兴、宁波、舟山处于协调发展-高级协调阶段, 温州、湖州、绍兴、金华、台州处于转型过渡阶段, 其中温州、台州城市化滞后, 湖州、绍兴、金华基本协调.

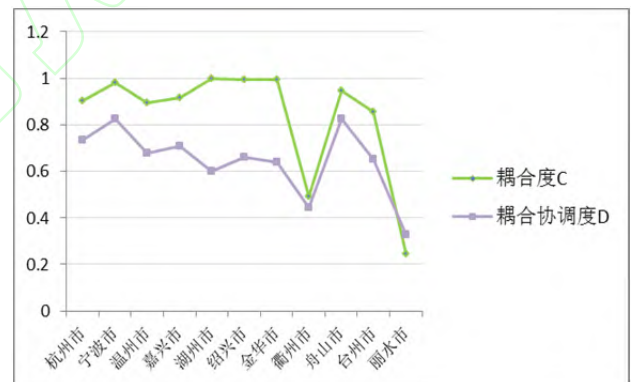


图 1 2015 年浙江省各市耦合度与耦合协调度

Fig.1 Coupling degree and coupling coordination degree of cities in Zhejiang province, 2015

表 5 2015 年浙江省各市耦合度与耦合协调度

Table 5 Coupling degree and coupling coordination degree of cities in Zhejiang province, 2015

指标	杭州	宁波	温州	嘉兴	湖州	绍兴	金华	衢州	舟山	台州	丽水
耦合度 C	0.903	0.981	0.896	0.915	0.997	0.995	0.995	0.490	0.946	0.855	0.248
耦合协调度 D	0.736	0.827	0.677	0.710	0.602	0.662	0.637	0.444	0.825	0.654	0.327
双子系统差($U-E$)	0.373	0.192	-0.329	0.321	0.042	0.064	-0.056	-0.573	-0.336	-0.381	-0.751

这是因为耦合度计算时仅关注子系统间得分的

差异程度, 当城市化水平和空气质量水平都较低时

获得的较高耦合度,会在空气污染治理成效超前于城市化发展、城市化滞后加剧时,表现出耦合度的降低.而在此基础上,耦合协调度还考虑了子系统本身的水平变化,更能反映城市化与空气质量的耦合协调关系.因此,选择耦合协调度作为浙江省各市城市化与空气质量耦合协调水平的划分依据,根据 2015 年计算结果,将我省划分为①协调发展区:杭州、嘉兴、宁波、舟山;②转型过渡区:湖州、绍兴、金华、温州、台州;③不协调发展区:衢州、丽水,进行后续空气质量风险因子探究.

2.2 空气质量风险因子探究

2.2.1 全省空气质量风险因子分析

运用地理探测器对全省 1 161 个样本点进行探测,结果如下:

2.2.1.1 因子探测结果

因子探测器结果显示,对年均 AQI 值决定力最高的 5 个因子为:全年人均用电(0.655)、三废排放企业数(0.608)、人均第二产业固定资产投资(0.596)、人均 GDP(0.559)、建制镇面积占比(0.550).

如图 2 所示,排名前 5 的风险因子与年均 AQI

在空间分布上有较强的一致性.自然因子高程等级(0.291)、坡度等级(0.178)及气象因子平均最高温(0.271)、平均最低温(0.230)、平均气温(0.190)、降水等级(0.327)决定力普遍低于城市化类因子,其中降水量的决定力相对较高.可见,就浙江省全省范围而言,城市化因素比自然、气象因素与年均 AQI 有着更高的相关性,特别是人均用电、三废工厂数,对空气质量的解释力超过 60%.

2.2.1.2 风险探测结果

观察图 2 并使用风险探测器发现,决定力大的因子与因变量 AQI 值的总体关系趋势是因子值越高,年均 AQI 越大,且各因子的各分区间差异显著(见图 3).而以平均最高温、降水等级、高程、坡度为代表的气象、自然因素则不然.平均最高温第 3 等级 21.77~22.17 摄氏度的地区有着最高的年均 AQI 值;降水在第 2 等级 0~1 800 mm 的地区 AQI 值较大,大部分情况下降水等级越高、降水量越大的地区, AQI 值越小,空气质量越好;高程值越大即高度越高,空气质量越好;坡度在第 1 等级 0~2.34° 时 AQI 值较大,随着坡度增加,空气质量改善,当坡度超过第 9 等级 45.15° 时, AQI 回升,空气质量水平又回落(见图 4).

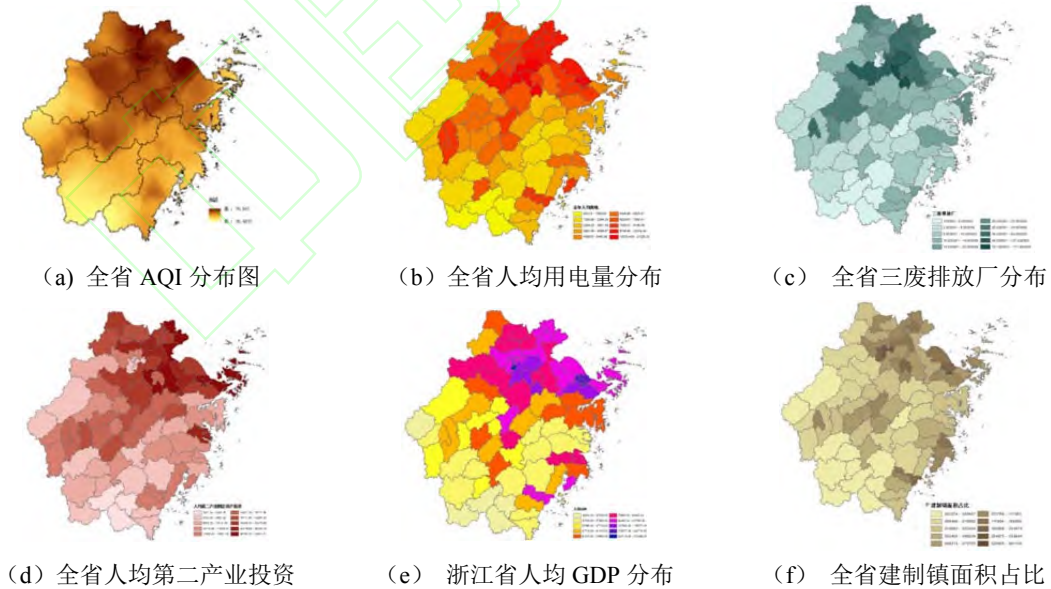


图 2 浙江省空气质量水平及其主要风险因子分布图

Fig.2 Distribution of air quality and main risk factors in Zhejiang province

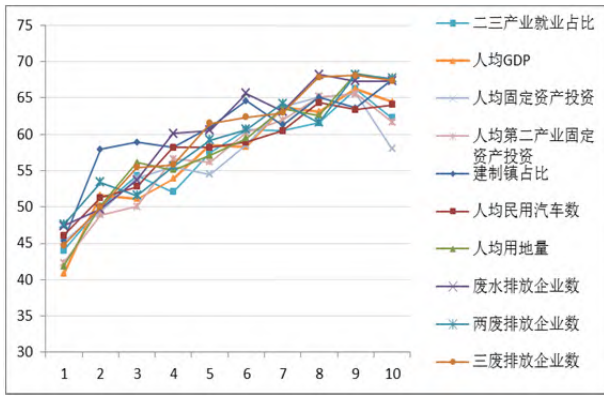


图 3 全省主要风险因子各分区空气质量水平变化图

Fig.3 Variation of air quality of main risk factors in Zhejiang province

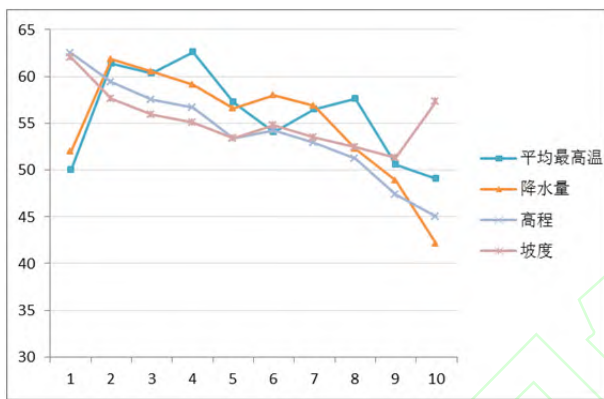


图 4 全省自然气象因子各分区空气质量水平变化图

Fig.4 Variation of air quality of natural, meteorological factors in Zhejiang province

2.2.1.3 交互作用探测结果

交互作用探测结果显示, 与空气质量相关度高的城市化因子及自然气象因子, 两两共同作用均双线性或非线性得加强了对年均 AQI 空间分布的解释力(见表 6), 大部分共同作用因子决定力大于 0.6 甚至 0.7. 其中人均第二产业固定资产投资与三废排放企业数交互后决定力达 0.813, 平均最高温和全年人均用电量交互后决定力达 0.803, 即这 2 组因子的共同作用能在超过 80% 的程度上解释 AQI 的空间分布. 可见空气质量与社会、经济、自然、气象共同作用的关联性更高.

表 6 全省主要风险因子交互作用决定力
Table6 Determinant power of two-factor interaction in Zhejiang province

双因子交互作用决定力	全年人均用电	三废排放厂	人均第二产业固定资产投资	人均 GDP	平均最高温
全年人均用电	0.655				
三废排放厂	0.789	0.608			
人均第二产业固定资产投资	0.813	0.813	0.596		
人均 GDP	0.761	0.772	0.735	0.559	
平均最高温	0.803	0.743	0.779	0.759	0.271

2.2.2 分区域空气质量风险因子分析

根据城市化与空气质量耦合协调度计算结果, 分别对协调发展地区、转型过渡地区、不协调发展地区进行空气质量风险因子探测, 进一步探究不同耦合协调类型下风险因子的差异.

2.2.2.1 因子探测结果

对三大耦合协调分区域分别使用因子探测器, 与年均 AQI 关联度排名前 5 的因子及其决定力值如表 7. 如图 5 所示, 各分区主要风险因子与该地区年均 AQI 值在空间分布上有较强的相似性.

整理各区探测结果发现, 三大分区的强相关因素与全省一致, 基本都是城市化因子, 除了人均用电、三废排放企业数、人均民用汽车数等社会城市化指标外, 还包括人均第二产业固定资产投资、人均 GDP 等经济城市化指标, 及建制镇面积占比、二三产业从业人员占比等土地城市化、人口城市化指标. 其中, 全年人均用电、三废排放企业数、人均第二产业固定资产投资、人均 GDP、人均固定资产投资上榜次数最多. 但不同耦合协调地区的风险因子仍有差异, 各因子在不同耦合协调状态下, 对空气质量的决定力也不同.

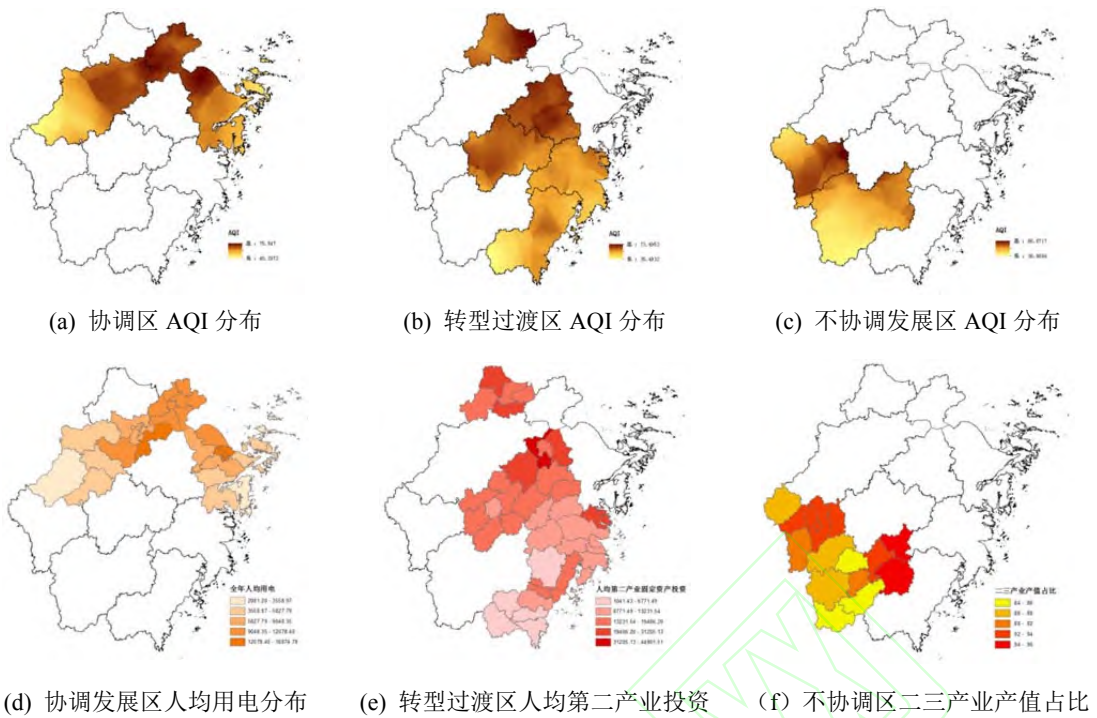


图 5 各耦合协调区空气质量水平及其首要风险因子分布图

Fig.5 Distribution of air quality and the primary risk factors in each coupling coordination zone

表 7 2015 年全省各耦合协调分区主要风险因子及其决定力

Table 7 Main risk factors and their power of determinant of coupling coordination zones in Zhejiang province, 2015

协调发展区		转型过渡区		不协调发展区	
因子	q 值	因子	q 值	因子	q 值
全年人均用电	0.682	人均第二产业固定资产投资	0.562	二三产业产值占比	0.614
二三产业产值占比	0.619	工业产值占比	0.444	全年人均用电	0.609
万人拥有汽车数	0.602	降水等级	0.424	总人口	0.598
人均固定资产投资	0.588	人均固定资产投资	0.399	人均 GDP	0.591
平均最高温	0.566	全年人均用电	0.398	建制镇面积占比	0.590
三废排放厂	0.524	两废排放厂	0.387	三废排放厂	0.590
人均第二产业固定资产投资	0.520	废水排放厂数	0.377	人口密度	0.570

协调发展区		转型过渡区		不协调发展区	
因子	q 值	因子	q 值	因子	q 值
危险固体废物排放	0.507	人均 GDP	0.369	污水处理厂数	0.561

例如, 二三产业产值占比在协调地区和不协调地区的决定力 q 值为 0.619、0.614, 而在转型过渡地区仅为 0.172; 总人口数在不协调地区的决定力 q 值为 0.598, 而在协调地区和转型过渡地区仅为 0.258, 0.249; 危险固体废物排放厂在协调地区 q 值达到 0.507, 而在其他两个分区仅为 0.115, 0.281. 相比其他分区, 协调发展城市与全年人均用电、万人拥有汽车数、平均最高温、危险固体废物排放厂数相关度更高; 转型过渡城市人均第二产业固定资产投资、工业产值占比、降水等级决定力值高; 总人口、建制镇面积占比、人口密度则在不协调城市有着更强的解释力. 协调发展区的空气质量水平与社会城市化, 尤其是人们生产生活相关的用电、用车、污染工厂的相关性更强; 转型过渡区与经济城市化, 尤其是第二产业相关的投资、生产的关联度越高; 而人口城市化、土地城市化在不协调区解释力大.

综合被探测因子整体的决定力结果, 发现协调

与降水等级有着较强相关性;衢丽不协调地区的空气质量还与总人口、建制镇面积占比、人口密度有

强相关性.自然、气象因素在全省范围及各分区的决定力都明显弱于城市化因素.

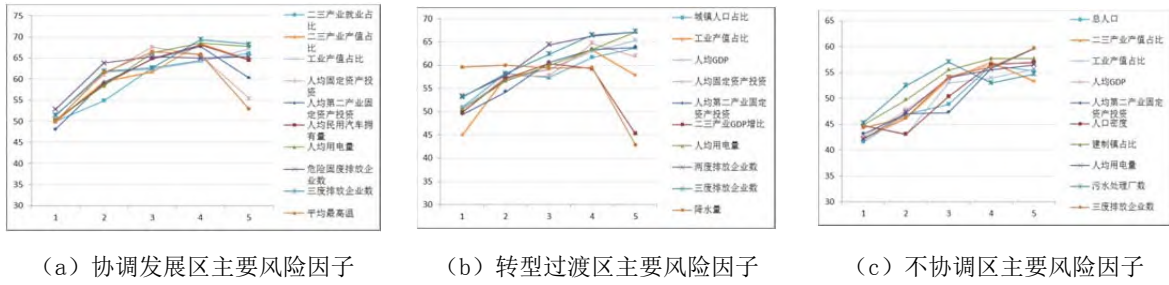


图7 各耦合协调区主要风险因子不同分级空气质量水平变化图

Fig.7 Variation of air quality of main risk factors in coupling coordination zones

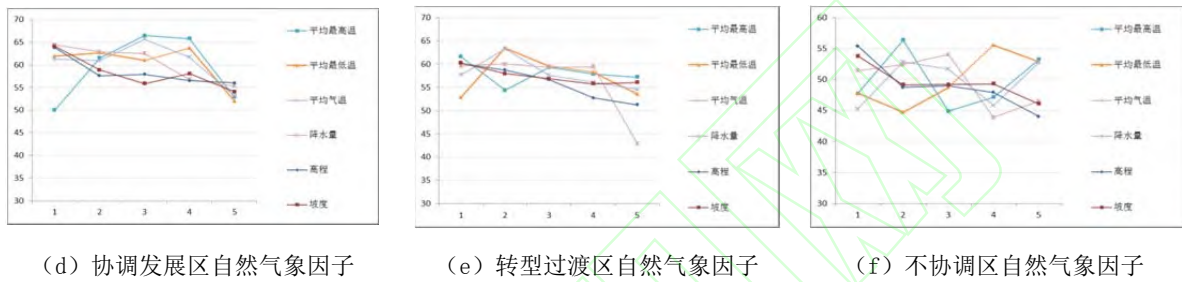


图8 各耦合协调区自然气象因子不同分级空气质量水平变化图

Fig.8 Variation of air quality of natural, meteorological factors in coupling coordination zones

表8 协调发展区主要风险因子交互作用决定力

Table 8 Determinant power of two-factor interaction in coordinated zone

双因子交互作用决定力	二三产业产值占比	人均固定资产投资	万人拥有汽车数	全年人均用电	平均最高温
二三产业产值占比	0.619				
人均固定资产投资	0.810	0.588			
万人拥有汽车数	0.704	0.793	0.602		
全年人均用电	0.718	0.819	0.756	0.682	
平均最高温	0.850	0.782	0.748	0.822	0.566

表9 转型过渡区主要风险因子交互作用决定力

Table 9 Determinant power of two-factor interaction in transitional zone

双因子交互作用决定力	工业占比	人均固定资产投资	人均第二产业固定资产投资	全年人均用电	平均最低温
工业占比	0.444				
人均固定资产投资	0.734	0.399			
人均第二产业固定资产投资	0.753	0.764	0.562		
全年人均用电	0.725	0.540	0.668	0.398	
平均最低温	0.790	0.677	0.815	0.685	0.303

表 10 不协调区主要风险因子交互作用决定力

Table 10 Determinant power of two-factor interaction in uncoordinated zone

双因子交互作用决定力	总人口	二三产业产值占比	人均 GDP	建制镇占比	平均最高温
总人口	0.598				
二三产业产值占比	0.738	0.614			
人均 GDP	0.813	0.783	0.591		
建制镇占比	0.776	0.738	0.722	0.590	
平均最高温	0.756	0.843	0.730	0.755	0.429

3.1.2 不同风险因子与风险事件的相关性质不同

在各分区,以城市化特征的人为因素如全年人均用电量、三废排放企业数、工业产值占比通常与年均 AQI 值呈正相关关系;降水量、高程、坡度与年均 AQI 值呈负相关关系,且降水量的负相关性最为明显。而人均固定资产投资、人均第二产业固定资产投资、平均最高温、平均最低温、平均气温与风险事件的相关关系趋势在不同耦合协调分区有所差异:杭州、嘉兴、宁波、舟山组群年均 AQI 随着人均第二产业固定资产投资、气温增加,先波动升高后降低;湖州、绍兴、金华、温州、台州组群年均 AQI 与人均第二产业固定资产投资呈正相关,与气温因素呈负相关;衢州、丽水区域年均 AQI 随人均第二产业固定资产投资增加而增加,与气温没有明显规律。

3.1.3 风险因子的两两共同作用加强了对风险事件空间分布的解释力

主要风险因子及自然气象因子交互后的决定力均得到了双线性或非线性的增加,部分双因子交互后对风险事件的解释力超过 80%。局部最强的双因子交互增强效应往往出现在城市化因子和自然气象因子组合时。

3.2 对策建议

随着内外部环境和条件的深刻变化,我省城市化已经进入以提升质量为主的转型发展阶段。针对全省空气质量指数(AQI)的风险因子分析结果,提出对策建议如下:

3.2.1 在全省及三分区,全年人均用电、三废排放企业数与空气质量指数(AQI)有强相关性,而耗电工厂和污染排放企业又是城市化、特别是第二产业发展不可避免的产物。因此,我省应坚持集约型社会发展

思路,一来清理整治“低小散”企业,淘汰落后产能企业,规划建设工业集中区域,做好工业集中区域周边地区的治污排污工作;二来推进产业结构调整,因地制宜得调整、控制第二产业规模,加大城市第三产业发展力度;三来,加大科研力度,助力绿色环保材料的发展和清洁能源的利用,降低煤炭使用量,提高生产、生活用电效率。

3.2.2 协调发展地区的万人拥有民用汽车数对空气质量指数决定力也较高。随着近年来人均收入增加,汽车普及度增大,机动车尾气也是空气污染的一大来源。应有效控制人均汽车持有量,尤其对于杭州、嘉兴、宁波、舟山等协调发展地区,一方面继续施行错峰限行、车牌限号等举措,限制尾气排放不合格的车辆上牌上路,淘汰黄标车和老旧车;另一方面提高公共交通设施的便利度、舒适度,鼓励并吸引群众低碳出行。

3.2.3 主要风险因子与风险事件空间分布上有一定的相似度,部分双因子交互后与风险事件的相关度甚至超过 80%,因此,把握这些高决定力的因子或因子组合能在很大程度上了解风险事件的空间分异特征;探索主要风险因子的空间分布规律,监测其动态变化,有助于空气污染的预防、治理。例如人均第二产业固定资产投资、工业产值占与对全省空气质量指数有较强的正相关,因此对于一些以乡镇为单元集中发展工业制造业、工厂企业较为密集的地区,应重点实施空气质量监测,向民众提供实时的空气质量指数查询,完善污染事件预警机制,加强联防联控,保障空气污染的及时治理。

3.2.4 实验结果表明,降水量较大、高程与坡度较高的地区空气质量相对较好,但总得来说自然因子的决定力普遍弱于城市化因子。因此尽管浙江省有着相对充沛的降水量、多变的地形,是全国海岸线最

长的省,然而仅依靠自然因素对空气质量的调节作用还并不够,仍须走可持续发展道路,坚持绿色发展,加快形成人与自然和谐发展的现代化建设新格局。

参考文献(References):

- [1] HAO J, KEBIN H E, LEI D, et al. Air pollution and its control in China[J]. *Frontiers of Environmental Science & Engineering*, 2007, 1(2): 129-142.
- [2] GROSSMAN G M, KRUEGER A B. Environmental impacts of a North American free trade agreement[J]. *Social Science Electronic Publishing*, 1992, 8(2): 223-250.
- [3] PANAYOTOU T. Empirical tests and policy analysis of environmental degradation at different stages of economic development[J]. *Ilo Working Papers*, 1993, 4.
- [4] JERRETT M. Atmospheric science: The death toll from air-pollution sources[J]. *Nature*, 2015, 525(7569): 330-331.
- [5] FAN J, ROSENFELD D, YANG Y, et al. Substantial contribution of anthropogenic air pollution to catastrophic floods in Southwest China[J]. *Geophysical Research Letters*, 2015, 42(14): 6066-6075.
- [6] LELIEVELD J, EVANS J S, FNAIS M, et al. The contribution of outdoor air pollution sources to premature mortality on a global scale[J]. *Nature*, 2015, 525(7569): 367-371.
- [7] 范洪敏. 人口年龄、城乡结构与空气污染关系研究[D]. 沈阳: 辽宁大学, 2015.
- FAN H. *Research on the Relation between Population Age and Urban-rural Structure and Air Pollution* [D]. Shenyang: Liaoning University, 2015
- [8] 王庆松. 山东城市化发展战略对大气环境影响研究[D]. 济南: 山东大学, 2010.
- WANG Q S. *Research on Air Environmental Impact of Urbanization Development Strategy in Shandong Province* [D]. Jinan: Shandong University, 2010
- [9] 丁镭. 中国城市化与空气环境的相互作用关系及EKC检验[D]. 北京: 中国地质大学, 2016.
- DING L. *Investigating the Environment Kuznets Curve and Interaction Relationship between China's Urbanization and Air Environment*[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2016
- [10] FARZANEGAN M R, BUEHN A. Hold Your Breath: A New Index of Air Quality[J]. *Working Papers*, 2011, 11(24).
- [11] 李玉敏, 李明丽, 焦智康. 北京市空气质量影响因素计量经济分析[J]. *中国城市经济*, 2011(9): 260-261.
- LI Y M, LI M L, JIAO Z K. Econometric analysis of influencing factors of air quality in Beijing [J]. *China Urban Economy*. 2011(9): 260-261
- [12] 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.
- ZHANG Y P, XU J L, ZHAO X P, et al. Grey Correlation Analysis of Air Quality and Its Affection Factors in Luoyang City[J]. *Journal of Henan University of Science & Technology: Natural Science*, 2012, 33(1): 100-104.
- [13] 王洪礼, 李怀宇, 郭嘉良. 城市空气污染治理策略研究[J]. *统计与决策*, 2009(23): 31-33.
- WANG H L, LI H Y, GUO J L. Study on urban air pollution control strategy [J]. *Statistics & Decision*, 2009(23): 31-33.
- [14] LI Q, SONG J, WANG E, et al. Economic growth and pollutant emissions in China: a spatial econometric analysis[J]. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*. 2014, 28(2): 429-442.
- [15] 周宏. 现代汉语辞海.上[M]. 北京: 光明日报出版社, 2003.
- ZHOU H. *Modern Chinese Dictionary*[M]. Beijing: Guangming Daily Press, 2003
- [16] 刘耀彬, 宋学锋. 城市化与生态环境的耦合度及其预测模型研究[J]. *中国矿业大学学报*, 2005, 34(1): 91-96.
- LIU Y B, SONG X F. Coupling degree model and its forecasting model of urbanization and ecological environment [J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2005, 34(1): 91-96.
- [17] 凌立文, 余平祥. 广东省城镇化与生态环境耦合水平分析与预测[J]. *西北农林科技大学学报: 社会科学版*, 2016, 16(4): 138-145.
- LING L W, YU P X. Analysis and prediction of coupled coordination level of urbanization and eco-environment in Guangdong province [J]. *Journal of Northwest A&F University: Social Science Edition*, 2016, 16(4): 138-145.
- [18] 王少剑, 方创琳, 王洋. 京津冀地区城市化与生态环境交互耦合关系定量测度[J]. *生态学报*, 2015, 35(7): 2244-2254
- WANG S J, FANG C L, WANG Y. Quantitative investigation of the interactive coupling relationship between urbanization and eco-environment [J]. *ACTA ECOLOGICA SINICA*, 2015, 35(7): 2244-2254.
- [19] 程艳. 徐州市城市化与生态环境耦合协调发展研究[D]. 北京: 中国矿业大学, 2014.
- CHENG Y. *Study on Coupling Coordination Development*

- between Urbanization and Eco-environment of Xuzhou City** [D]. Beijing: China University of Mining and Technology, 2014
- [20] 刘耀彬, 李仁东, 宋学锋. 中国区域城市化与生态环境耦合的关联分析[J]. *地理学报*, 2005, 60(2): 237-247.
- LIU Y B, LI R D, SONG X F. Grey Associative Analysis of Regional Urbanization [J]. *ACTA ECOLOGICA SINICA*, 2005, 60(2): 237-247.
- [21] 陈晓红, 吴广斌, 万鲁河. 基于BP的城市化与生态环境耦合脆弱性与协调性动态模拟研究——以黑龙江省东部煤电化基地为例[J]. *地理科学*, 2014, 34(11): 1337-1343.
- CHEN X H, WU G B, WAN L H. Dynamic simulation of vulnerability and coordination of the coupling of urban and ecological environment based on BP: A case of the coal-electricity base in the Eastern Heilongjiang Province [J]. *SCIENTIA GEOGRAPHICA SINICA*, 2014, 34(11): 1337-1343
- [22] 廖重斌. 环境与经济协调发展的定量评判及其分类体系[J]. *热带地理*, 1999, 19(2): 171-177.
- LIAO Z B. Quantitative judgement and classification system for coordinated development of environment and economy -A case study of the city group in the pearl river delta [J]. *TROPICAL GEOGRAPHY*, 1999, 19(2): 171-177.
- [23] 方倩. 鄱阳湖地区城镇化和土地生态环境耦合关系研究[D]. 南昌: 江西农业大学, 2015.
- FANG Q. **Study on Relationship between the Urbanization and Ecological Environment of Poyang Lake Area** [D]. Nanchang: Jiangxi Agricultural University, 2015.
- [24] WANG J F, LI X H, CHRISTAKOS G, et al. **Geographical detectors-based health risk assessment and its application in the neural tube defects study of the Heshun Region, China**[J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 2010, 24(1): 107-127.
- [25] 陈昌玲, 张全景, 吕晓, 等. 江苏省耕地占补过程的时空特征及驱动机理[J]. *经济地理*, 2016, 36(4): 155-163.
- CHEN C L, ZHANG Q J, LU X, et al. Analysis on spatial-temporal characteristics and driving mechanisms of cropland occupation and supplement in Jiangsu province [J]. *Economic Geography*, 2016, 36(4): 155-163
- [26] 刘彦随, 杨忍. 中国县域城镇化的空间特征与形成机理[J]. *地理学报*, 2012, 67(8): 1011-1020.
- LIU Y S, YANG R. The spatial characteristics and formation mechanism of the county urbanization in China [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2012, 67(8): 1011-1020
- [27] 张彦. 山西省神经管畸形发生的时空分布研究及其环境影响因子探测[D]. 北京: 中国矿业大学, 2015.
- ZHANG Y. **Temporal and Spatial Analysis of Neural Tube Defects and Detection of Environmental Factors in Shanxi Province** [D]. Beijing: China University of Mining and Technology, 2015
- [28] LI X, XIE Y, WANG J, et al. Influence of planting patterns on fluoroquinolone residues in the soil of an intensive vegetable cultivation area in northern China[J]. *Science of the Total Environment*, 2013, s 458-460(3): 63-69.
- [29] 周磊, 武建军, 贾瑞静, 等. 京津冀PM2.5时空分布特征及其污染风险因素[J]. *环境科学研究*, 2016, 29(4): 483-493.
- ZHOU L, WU J J, JIA R J, et al. Investigation of temporal-spatial characteristics and underlying risk factors of PM_{2.5} pollution in Beijing-Tianjin-Hebei Area [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2016, 29(4): 483-493.
- [30] WIKIPEDIA. Zhejiang. 2017. <https://en.wikipedia.org/wiki/Zhejiang?>