超星·期刊

基于遥感与地理探测器的长江三角洲空气污染风险因子分析

郭春颖[1,2,4]，施润和[1,2,3,4*]，周云云[1,2,4]，张煊宜[1,2,4]

(1. 华东师范大学地理信息科学教育部重点实验室，上海 200241；2. 华东师范大学中国科学院遥感与数字地球研究所环境遥感与数据同化联合实验室，上海 200241；3. 华东师范大学美国科罗拉多州立大学中美新能源与环境联合研究院，上海 200062；4. 华东师范大学地理科学学院，上海 200241)

摘　要：大气颗粒物是目前主要的大气污染物，卫星遥感反演气溶胶光学厚度(AOD)数据可弥补大气颗粒物地面观测站点空间覆盖的不足。以长江三角洲16个主要城市为研究区域，将Terra和Aqua两颗卫星MODIS传感器2013年的AOD产品，经过垂直订正和湿度订正转换成近地面气溶胶消光系数，以此反映该地区的空气污染情况。基于地理探测器方法，定量地分析长江三角洲地区空气污染的主要风险因子以及各因子的影响强度。空气污染风险因子包括GDP、人口、坡度、土地覆盖类型、平均气温、平均降水量和平均风速。结果表明：长江三角洲地区的空气污染分布呈现北高南低的特征；气象类要素对空气污染的空间分布影响显著，其中降水量的影响最大；各个风险因子对空气污染分布的影响有明显的交互增强作用。

关键词：遥感；AOD；地理探测器；风险因子

中图分类号：X87　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1004-8227(2017)11-1805-10

DOI：10.11870/cjlyzyyhj201711009

随着城市化进程的加剧，大中型城市空气污染问题日趋严重。大气颗粒物地面观测站点可以得到较为准确的颗粒物浓度等信息，但其监测范围只是站点及附近的一定范围内，有限的监测站点难以解决区域空气污染的研究。利用卫星遥感技术可以弥补地面监测空间覆盖的不足[1]。大气气溶胶光学厚度(Aerosol Optical Depth，简称AOD)，可被用于空气质量的定量评估[2]，并能在一定程度上反映区域大气的污染程度和地面空气质量[3]。Chu等[4]利用MODIS二级产品AOD数据，研究了全球的大气污染状况，证实了利用遥感技术获得的AOD数据来监测大气污染是可行的，郑有飞等[5]研究该数据在长三角地区有较好的适用性。同时遥感技术的发展和反演精度的提高，为获得连续的空间时间尺度的空气污染状况研究提供了重要保障。

地理探测器基于空间方差分析理论，探测因子变量和结果变量的相关性，能够分析各因子变量对结果变量的影响强度，不同因子变量的影响差异，以及各因子变量对结果变量的影响是单独起作用还是交互起作用[6]。该方法最早被运用在健康风险领域，研究新生儿神经管畸形的环境因子分析、地震中儿童死亡的环境因子分析[7]，也有学者运用该方法解决$PM_{2.5}$污染风险因素[8]、生物宜居度评价等方面问题[9,10]，但是运用遥感技术来监测地面空气污染，对导致空气污染的风险因子进行探测分析还尚未开展。本研究以长江三角洲16个城市为研究区，利用Terra和Aqua两颗卫星MODIS传感器的AOD产品，基于地理探测器方法，定量探测影响区域空气污染的风险

收稿日期：2017-03-07；**修回日期**：2017-04-24

基金项目：国家重点研发计划课题(2016YFC1302602)［National Science and Technology Program of China (2016YFC1302602)］；上海市卫计委环境卫生与劳动卫生重点学科建设项目(15GWZK0201)［Shanghai Municipal Key Discipline Construction Project of Commission of Health and Family Planning Environmental Health and Occupational Health (15GWZK0201)］；上海市科委重大项目课题(15DZ1207805)［the Major Program of Shanghai Science and Technology Committee(15DZ1207805)］

作者简介：郭春颖(1992~)，女，硕士研究生，主要从事大气遥感方面研究. E-mail：guochunying1992@163.com

* 通讯作者 E-mail：rhshi@geo.ecnu.edu.cn

超星·期刊

因子以及各因子的影响强度。选取的风险因子分为社会经济、地类和气象要素 3 类，其中社会经济要素包括 GDP 和人口数据，地类要素包括坡度和土地覆盖类型，气象要素包括平均气温、平均降水量和平均风速。本文将为研究区域尺度的污染风险定量分析提供新方法，为该地区的环境评价提供科学依据，对该地区社会经济与环境的协调发展意义重大。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

长江三角洲是长江入海处冲积形成的三角洲，地形以平原为主，为亚热带季风气候，夏季高温多雨，是我国东部沿海重要的经济核心区域。本文选取了长江三角洲 16 个主要城市(图 1)。包括上海、南京、苏州、无锡、常州、镇江、南通、扬州、泰州、杭州、宁波、嘉兴、湖州、绍兴、舟山、台州。近年来长江三角洲 AOD 较高的区域有着逐年增加的趋势[11,12]，因此，研究本地区的环境效应和风险因子对空气污染的影响强度，具有重要意义。

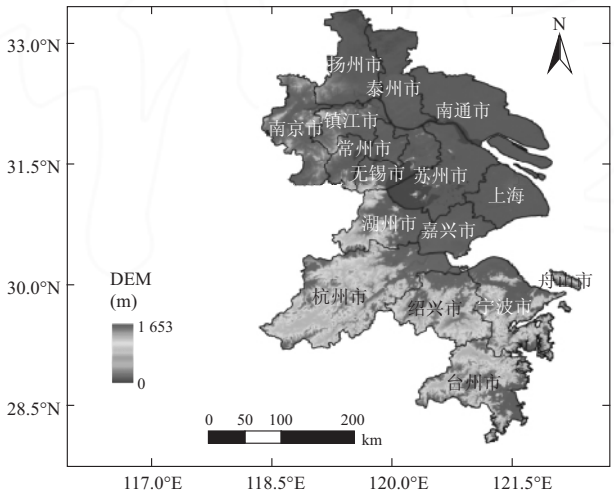

图 1 研究区高程示意

Fig. 1 Study Area

1.2 数据来源及处理

1.2.1 AOD 数据

MODIS 全称 Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer，是搭载于极轨卫星 Terra(上午星)和 Aqua(下午星)上的中分辨率成像光谱仪，提供了反演地球物质的丰富信息[13]。经过多次算法的改进，2014 年 NASA 推出了 Collection 006 版本 3 km×3 km 的高空间分辨率 AOD 产品[14]，该产品整体精度略优于 C005[15]，且产品质量稳定，Remer 等[16]基于全球陆地 AERONET 站点的 6 个月的资料进行验证，MODIS 3 km AOD 产品有 ±0.05±0.25 AOD 的期望误差，且在中国部分地区有较好的适应性[17,18]。本研究利用 2013 年长江三角洲的 MODIS 3km AOD 产品，提取 550 μm 波长处 AOD 数据集，为了提高数据的空间覆盖，将每日上、下午的卫星数据结合使用。

对 AOD 进行订正的数据是欧洲中期天气预报中心(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts，ECMWF)发布的再分析边界层高度和相对湿度数据(http://apps.ecmwf.int/datasets/)空间分辨率为 0.125°×0.125°，重采样到与 AOD 相同的空间分辨率且时间接近、空间位置匹配后进行订正。该模式有较高的预报性能，被广泛应用于气象领域[19~21]。

1.2.2 风险因子数据

区域的污染气体排放与人类活动密切相关，GDP 和人口数据表征区域的发达水平和规模；土地覆盖类型能够在一定程度上代表研究区的自然状况，坡度直接影响了污染物的输送过程；结合学者的研究[22~24]和中国气象数据网的提供的气象数据，选取对空气污染影响较为重要的降水量、风速和温度作为本研究中的气象类要素。各风险因子分类、来源及处理如表 1。

2013 年土地覆盖类型数据 MCD12Q1[25]包含 5 种数据集，本文采用马里兰大学修订版国际地圈生物圈计划—UMD 分类数据集。气象要素数据是研究区域 2013 年监测站点每日的降水量、平均风速和平均气温，计算得到日均值，空间插值得到空间分布结果。为了使人口数据和 GDP 在空间分布上满足分类区域具有显著差异性，采用分位数法进行分类，得到研究区域的分类结果。其余风险因子反复尝试分位数分类法、自然断点分级法、标准差分类法进行数据分类[26]，达到较好的分类效果以满足分类区域有显著差异性，获得各风险因子分类结果(图 2)。

1.3 研究方法

本研究技术流程如图 3 所示，将 AOD 数据进行垂直订正和湿度订正，结合社会经济要素、地类要素和气象要素 3 类共 7 种风险因子，利用地理探测器的方法，得到空气污染风险因子探测结果。

超星·期刊

表 1　风险因子数据分类及来源信息

Tab. 1　Risk factors Data Classification and Sources Information

类别	名称	来源	空间分辨率	图 2 中编号
社会经济要素	GDP	中国科学院资源环境科学数据中心	1 km×1 km	(c)
	人口			(d)
地类要素	土地覆盖类型	MODIS 产品 MCD12Q1	500 m×500 m	(a)
	坡度	SRTM 的 DEM 生成结果	90 m×90 m	(b)
气象要素	降水量	中国气象数据网	0.016°×0.016° (由 23 个气象站点经过反距离加权插值结果)	(e)
	风速			(f)
	温度			(g)

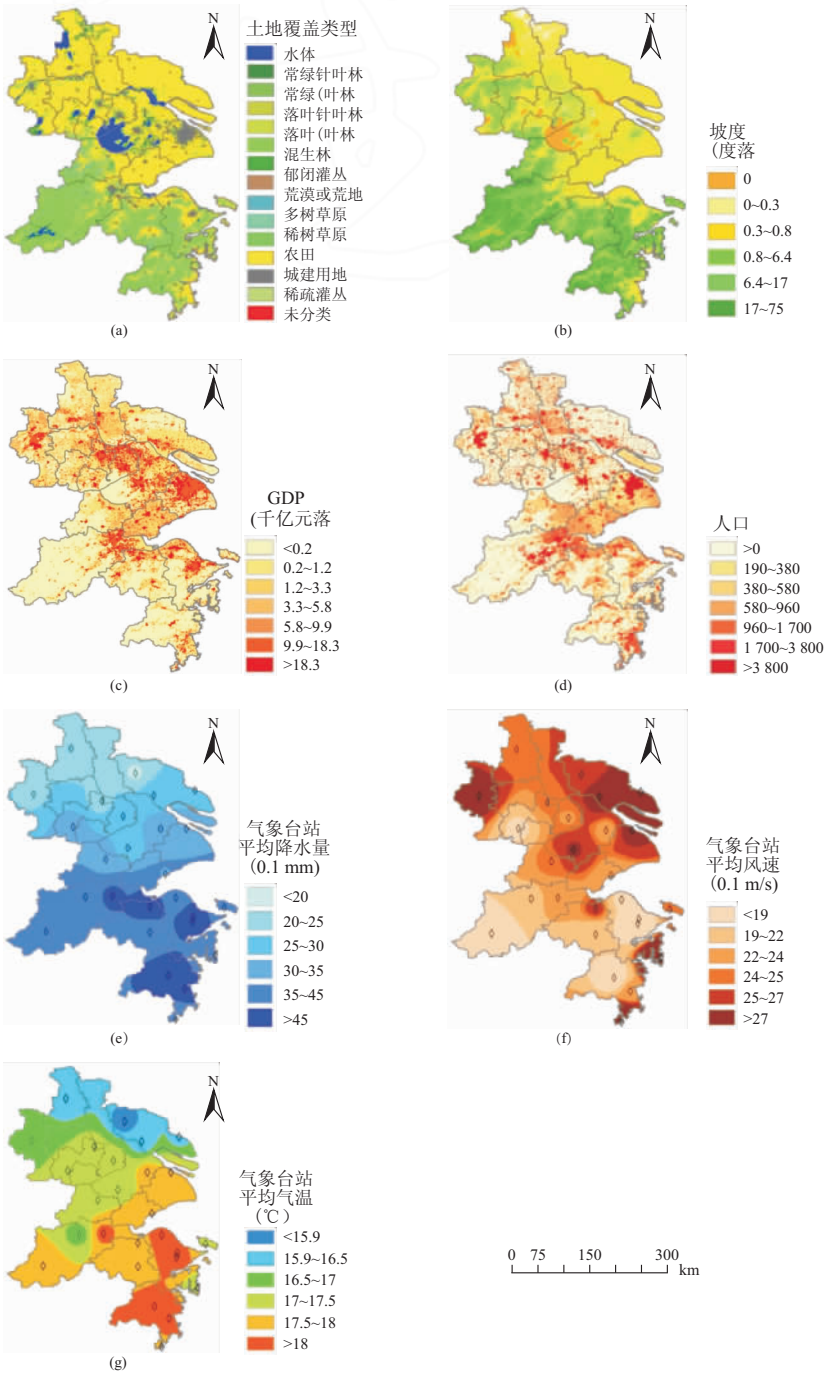

图 2　风险因子分类结果

Fig. 2　Risk Factors Classification Results

超星·期刊

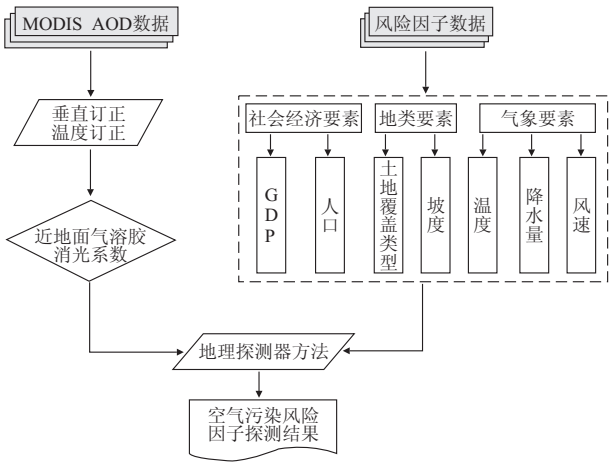

图 3 技术流程图

Fig. 3 Technology Flow Chart

1.3.1 AOD 订正

AOD 与近地面的 $PM_{2.5}$、PM_{10}等气溶胶颗粒物有着一定的相关性[27]，在经过垂直订正和湿度订正后，线性关系显著增强[28,29]。因此需要对卫星监测到的 AOD 数据进行垂直订正和湿度订正。

垂直订正旨在消除 AOD 受气溶胶标高的影响。AOD 描述了气溶胶对光的衰减作用，整层大气柱的 AOD 可以近似表示为[29,30]：

$$\tau_a(\lambda) \approx k_{a,0}(\lambda)\int_0^{\infty} exp(-z/H_A)\,dz = k_{a,0}(\lambda)\,H_A \quad (1)$$

式中：τ_a为 AOD，$k_{a,0}(\lambda)$为近地面处的消光系数，H_A为气溶胶标高[28]。因此，AOD 可以利用气溶胶标高进行垂直订正后，得到近地面的气溶胶消光系数。气溶胶标高可近似用大气边界层高度(Boundary Layer Height，BLH)代替[31,32]。

由于 AOD 在垂直方向上的分布随着季节而变化[33]，因此本文求取 2013 年 ECMWF 的 BLH 数据季节平均值，如图 4，(a)、(b)、(c)、(d)分别是 BLH 春夏秋冬平均结果，研究区 4 个季节 BLH 的平均值为：春季 1 068.64 m、夏季 1 311.43 m、秋季 1 157.98 m、冬季 792.99 m。再利用公式(1)，对 AOD 进行垂直订正。

湿度订正旨在消除 AOD 受空气湿度的影响。由于空气中的部分气溶胶粒子具有一定的吸湿性，粒子吸收水汽膨胀后，其物理、光学特性会发生改变[34]，而实际的大气环境具有一定的湿度，因此需要消除空气湿度对 AOD 的影响。

利用湿度订正因子对近地面的气溶胶消光系数进行湿度订正，订正公式为[29]：

$$k_{a,0,dry}(\lambda) = \frac{k_{a,0}(\lambda)}{1/(1-RH/100)} \quad (2)$$

$k_{a,0,dry}$为湿度订正后近地面的气溶胶消光系数；RH 为相对湿度(Relative Humidity)。

结合 ECMWF 发布的 2013 年相对湿度数据，对垂直订正后的近地面气溶胶消光系数做进一步的湿度订正。孙晓雷等[17]研究 MODIS 3 km AOD 在经过垂直订正和湿度订正后与近地面的颗粒物的相关系数得到显著提高。

1.3.2 地理探测器

为定量地分析具有地理空间属性的问题需要用到空间统计的方法[35]，空间数据分析技术能够对空间信息进行认知、解释和预测[36]。地理探测器最初是应用于地理空间因素对地方性疾病风险影响的一种技术方法，基于空间方差分析理论，其理论的假设是：如果某种风险因子对地理事物的分布有重要影响，那么该地理事物的空间分布和风险因子的空间分布应该具有空间上的一致性[6]。

探测风险因子是否是导致空气污染物空间分布的主要因素，可以基于上述假设，运用地理探测器的方法，定量研究风险因子对空气污染的影响强度。本研究主要利用地理探测的风险因子探测、生态探测和交互探测，方法如下[6,37,38]：

(1) 因子探测

衡量风险因子对空气污染的影响强度用风险探测，探测方法是[37]：

$$q = 1 - \frac{\sum_{k=1}^{n} N_k \sigma^2{}_k}{N\sigma^2} \quad (3)$$

式中：q 为某风险因子对空气污染空间分布的影响力。$k=1$，…，n 为该风险因子的分类，N_k、N 为子区域和全区的气溶胶消光系数的总值，$\sigma^2{}_k$、σ^2为子区域和全区的气溶胶消光系数的离散方差。用 q 值可以衡量风险因子对空气污染的影响强度，q 值在 0~1 之间，q 值越大，说明该风险因子对空气污染的影响强度越大，反之，则影响越小。

(2) 生态探测

反映各风险因子对影响空气污染空间分布的程度方面是否有显著差异，通过 F 检验来衡量[37]：

$$F = \frac{N_{n=1}(N_{n=2}-1)\,\sigma^2{}_{n=1}}{N_{n=2}(N_{n=1}-1)\,\sigma^2{}_{n=2}} \quad (4)$$

超星·期刊

式中: $N_{n=1}$、$N_{n=2}$表示两个风险因子分区中的样本量，零假设$\sigma^2{}_{n=1}=\sigma^2{}_{n=2}$。如果在显著性水平上拒绝零假设，则表明两因子在影响空气污染的空间分布方面存在显著差异性。

(3) 交互探测

探测不同风险因子在影响空气污染的空间分布方面是否有交互作用，通过两种风险因子 A 和 B 对空气污染的影响力的交互比较，来判断二者对影响空气污染的空间分布是单独起作用还是有着交互作用关系，包括以下 5 种关系:

若 q(A∩B) < Min(q(A) ,q(B)) ，则说明两个因子非线性减弱;

若 Min(q(A) ,q(B)) < q(A∩B) < Max(q(A) ,q(B)) ，则说明单因子非线性减弱;

若 q(A∩B) > Max(q(A) ,q(B)) ，则说明双因子增强;

若 q(A∩B) = q(A) + q(B) ，则说明两个因子相互独立;

若 q(A∩B) > q(A) + q(B) ，则说明两个因子非线性增强。

本研究主要利用上述探测方法，分析各风险因子对空气污染的影响强度，各风险因子是否有显著差异，以及各风险因子是单独起作用还是交互起作用。

2　结果与分析

2.1　长江三角洲地区空气污染情况

根据长江三角洲地区 2013 年的 AOD 数据，经过季节的垂直订正和湿度订正后，求取日均值，得到研究区域 2013 年近地面气溶胶消光系数的分布，结果如图 5 所示。

长江三角洲地区的空气污染状况呈现北高南低的特征，图 5 中上海市、南京市是空气污染的高值区; 江苏省的泰州市、扬州市、南通市、镇江市、常州市的数值较高，集中在 0.2~0.5 之间; 江苏省的无锡市、湖州市以及浙江省的台州市东南部数值相对较低，不是主要的污染城市; 杭州市北部、绍兴市、宁波市和舟山市的空气质量最好，小于 0.1。从季节的分布上来看也有类似特征，尤以春季污染最严重，夏季空气质量最好，但冬季受天气和暗像元反演 AOD 的算法限制，AOD 空间覆盖不全，未给出季节分布图。

2.2　地理探测结果

近地面气溶胶消光系数的分布代表区域的空气污染状况，结合地理探测器的方法定量探测相应指标，结果如下。

2.2.1　风险因子探测

衡量风险因子对空气污染分布的影响强度通过因子探测来实现，q 值越大，说明该风险因子对空气污染的影响强度越大。探测结果如图 6 所示。在 7 个风险因子中，长江三角洲地区空气污染风险因子探测结果 q 值依次是，降水量(0.488 4) >风速(0.332 7) >温度(0.271 9) >土地覆盖类型(0.256 6) >坡度(0.219 8) > GDP(0.131 6) >人口(0.049 2) ，且 p-value<0.01。

降水量对该地区的空气污染分布影响最大。从空间上看，图 2(e) 为研究区降水量的分布，北部地区降水量较低，同时污染也相对较重; 从时间上看，长江三角洲多年平均年降水量为 1 183 mm，夏季降水量最大[39]，且空气质量也最好。事实上，气溶胶颗粒物会受到降水的影响被雨水冲刷掉，雨后空气质量一般都良好，因此降水量较高的地区空气质量一般较好[40,41]。风的输送和温度的变化对空气污染的分布也有影响，但污染过程的较为复杂，本文着重研究污染空间位置上的关系，对空气污染过程的风险分析还需要进一步研究。

气溶胶颗粒物还会受到自然条件的影响。植被对空气有着一定程度的净化，气溶胶颗粒物会被叶表面吸附，且无污染排放。图 2(a) 展示了研究区的土地覆盖类型，其中湖州、杭州、绍兴、宁波、台州、舟山 6 所城市，土地覆盖类型以混生林为主，6 所城市的空气质量也较好(图 5) ，植被覆盖与空气污染分布具有较好的一致性; 而城市建成区的工地施工扬尘、大量汽车尾气和居民生活废气等的排放，加剧了空气污染，如上海市用地类型为城建用地的区域，空气污染情况也较严重。许珊等[42]对土地利用类型与空气污染的效应分析中也有类似的结论。

社会经济因素是污染物排放的根源，长江三角洲地区第三产业占 GDP 总值近 50%[43]，且相对第二产业污染排放较少。本文研究结果显示空气污染分布受到 GDP、人口的影响强度探测结果低于地类和气象要素，与该地区的产业结构实际情况有关，重工业的污染排放源并不集中在人口密集和 GDP 高值区域，但 GDP、人口数据对空气

超星·期刊

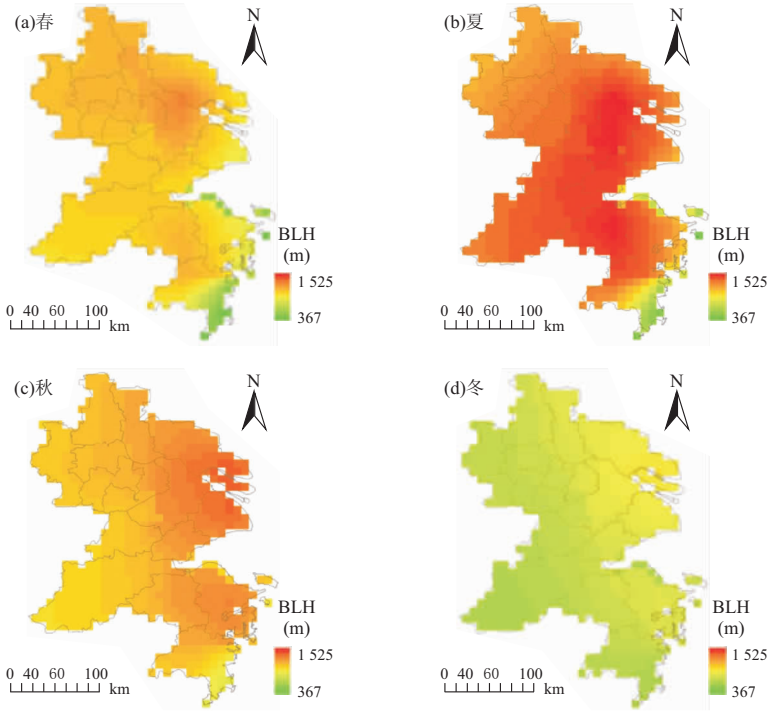

图 4 边界层高度季节分布

Fig. 4 BLH Seasonal Distribution

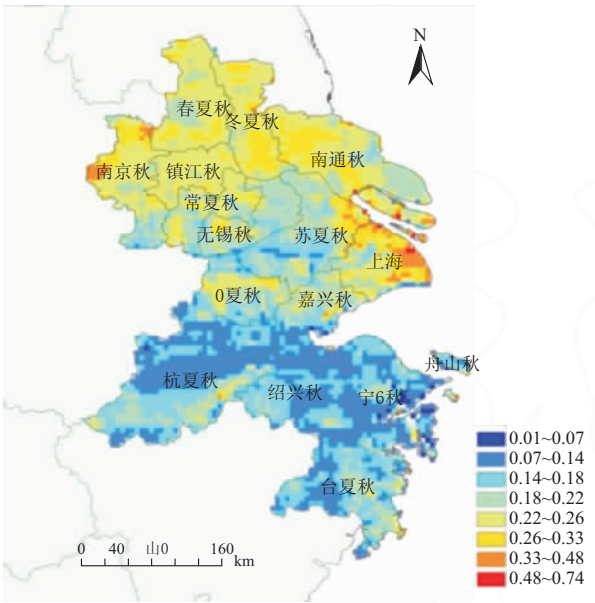

图 5 2013 年长江三角洲地区近地面气溶胶消光系数分布

Fig. 5 Distribution of Aerosol Extinction Coefficient in Yangtze River Delta in 2013

污染空间分布的影响都通过了显著性检验，说明人类活动对于空气污染有着一定的影响，机动车尾气排放的增加、城市施工扬尘等人为活动，进一步加剧了污染[40]。

2.2.2 风险因子生态探测

探测风险因子对影响空气污染的空间分布是否有显著差异通过生态探测来实现。通过显著性水平为 0.05 的检验说明两个因子在影响空气污染分布方面是有差异的，否则说明无显著差异。探测结果如表 2 所示。

探测结果发现，社会经济要素、地类要素和气象要素，各要素内的每个风险因子，在影响空气污染的空间分布方面均无显著性差异，见表 2 中加* 号(4，3)、(6，5)、(8，7)、(9，7)、(9，8)。说明这三类要素对于空气污染分布的影响是各自发挥作用，也说明每一种类的风险要素对于空气污染的空间分布影响是类似的。

另外 GDP 除与人口外，与其他任意风险因子

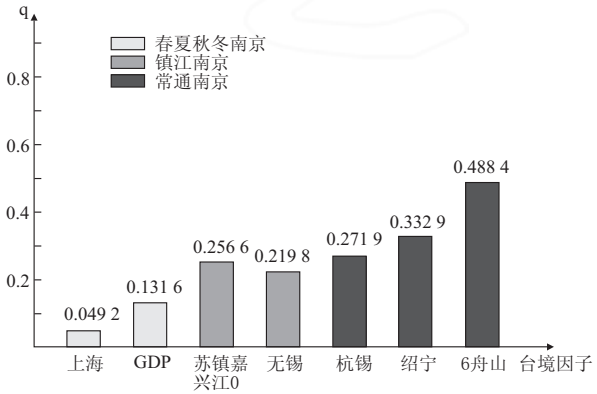

图 6 风险因子探测结果

Fig. 6 Result of Risk Factor Detector

超星·期刊

表 2　风险因子生态探测结果

Tab. 2　Results of Risk Ecological Detector

类别	名称	社会经济要素		地类要素		气象要素		
		GDP	人口	土地覆盖类型	坡度	降水	风速	温度
社会经济要素	GDP							
	人口	N*						
地类要素	土地覆盖类型	Y	Y					
	坡度	Y	Y	N*				
气象要素	降水	Y	Y	Y	Y			
	风速	Y	Y	Y	Y	N*		
	温度	Y	Y	N	Y	N*	N*	

注: Y 表示两个风险因子对空气污染空间分布具有显著差异性, N 表示无显著差异, 置信度为 95%.

对空气污染的空间分布影响均存在显著差异。降水量和风速与社会经济要素和地类要素类别的风险因子对空气污染分布均有显著差异。

2.2.3　风险因子交互探测

探测不同风险因子在影响空气污染的空间分布方面是否有交互作用, 利用交互探测的方法, 结果如表 3 所示。

表 3 显示, 仅人口与温度在影响空气污染分布方面有着非线性增强的作用(加#处) , 其余因子有着双因子增强的作用。交互作用探测结果说明, 任意两个风险因子的交互作用都大于单个因子的影响, 也就是说, 影响区域空气污染的分布并不是由单一因子起作用, 而是在不同风险因子的相互作用下共同影响的。

表 3　风险因子交互式探测结果

Tab. 3　Results of Risk Interaction Detector

风险因子	GDP	人口	土地覆盖类型	坡度	降水	风速	温度
GDP	0.131 6						
人口	0.170 9*	0.049 2					
土地覆盖类型	0.296 0*	0.295 4*	0.256 6				
坡度	0.266 6*	0.258 9*	0.292 6*	0.219 8			
降水	0.528 2*	0.520 6*	0.537 5*	0.517 4*	0.488 5		
风速	0.371 8*	0.359 5*	0.423 6*	0.382 3*	0.540 7*	0.332 8	
温度	0.393 7*	0.335 6#	0.420 9*	0.393 7*	0.529 1*	0.431 8*	0.271 9

注: 黑色字体为因子风险探测结果,加* 交互作用为双因子增强,加#为非线性增强.

其中, 降水与风速交互作用对空气污染的风险因子探测 q 值最高为 0.540 7。此外, 影响较大的交互因子有: 降水与土地覆盖类型(0.537 5) , 降水与温度(0.529 1) , 降水与 GDP(0.528 2) , 降水与人口(0.520 6) 。

综上, 气象要素是影响长江三角洲地区空气污染空间分布的主要风险要素, 降水量的影响最大, 但各气象要素对空气污染过程的影响还需要进一步具体分析, 地类要素的影响次之; 社会经济要素、地类要素和气象要素的影响各自独立起作用; 不同风险因子交互作用均大于单因子的作用值, 各风险因子共同影响了该地区的空气污染分布。

3　结论与讨论

(1) 本研究利用卫星遥感反演产品 AOD 数据, 结合垂直订正和湿度订正的方法, 得到 2013 年长江三角洲 16 个城市的空气污染状况。污染总体呈现北高南低的特征; 上海市、南京市是空气污染的高值区; 江苏省的泰州市、扬州市、南通市、镇江市、常州市的气溶胶消光系数数值较高, 集中在 0.2~0.5 之间, 江苏省的无锡市、湖州市以及浙江省的台州市东南部的数值相对较低, 不是主要的污染城市; 杭州市北部、绍兴市、宁波市和舟山市的空气质量最好, 小于 0.1。

(2) 利用地理探测器定量研究 7 个风险因子对空气污染的影响情况。平均降水量是对空气污染分布影响最重要的因子; 同时, 社会经济要素、地类要素和气象要素中, 各要素内的每个风险因子, 在影响空气污染的空间分布方面均无显著性差异, 这说明, 这 3 类要素的影响各自发挥作用; 不同风险因子影响空气污染的空间分布交互增强起作用, 不是单一因子的影响。

(3) 本研究所使用的 AOD 遥感反演产品, 由于受到天气原因等影响, 冬季部分地区没有覆盖, 因此本研究选取日均值作为空气污染的研究数据, 未进行季节的风险因子分析, 对季节性空气污染的风险因子探测还要完善。同时, 本文以气溶胶消光系数近似代表近地面污染情况, 其与

超星·期刊

空气污染物浓度的实际相关性研究还需进一步开展。

(4) 由于空气污染的形成、传输机制复杂，其影响因素也众多，本文以地理探测器这种与地物空间属性有关的方法进行分析讨论，还需要利用其他数学方法进行接下来的深入研究。

参考文献:

[1] 杨一鹏，韩福丽，王 桥，等. 卫星遥感技术在环境保护中的应用: 进展、问题及对策[J]. 地理与地理信息科学，2011，27(6)：84-89.
【YANG Y P，HAN F L，WANG Q，et al. Application of remote sensing technique in environment protection: progress，problems and countermeasures[J]. Geography and Geo-Information Science，2011，27(6)：84-89.】

[2] 李成才，毛节泰，刘启汉，等. MODIS 卫星遥感气溶胶产品在北京市大气污染研究中的应用[J]. 中国科学(D 辑: 地球科学)，2005，35(S1)：177-186.
【LI C C，MAO J T，LIU Q H，et al. Application of MODIS aerosol product in the study of air pollution in Beijing[J]. Ser: D Earth Science，2005，35(S1)：177-186.】

[3] ENGEL-COX J A，HOLLOMAN C H，COUTANT B W，et al. Qualitative and quantitative evaluation of MODIS satellite sensor data for regional and urban scale air quality[J]. Atmospheric Environment，2004，38(16)：2495-2509.

[4] CHU D A，KAUFMAN Y J，ZIBORDI G，et al. Global monitoring of air pollution over land from the Earth Observing System-Terra Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS)[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres，2003，108(D21)：1-17.

[5] 郑有飞，董自鹏，吴荣军，等. MODIS 气溶胶光学厚度在长江三角洲地区适用性分析[J]. 地球科学进展，2011，26(02)：224-234.
【XHENG Y F，DONG Z P，WU R J，et al. Validation of modis aerosol optical thickness retrieval over Yangtze delta region of China[J]. Advances in Earth Science，2011，26(02)：224-234.】

[6] WANG J，LI X，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.

[7] HU Y，WANG J，LI X，et al. Geographical detector-based risk assessment of the under-five mortality in the 2008 Wenchuan Earthquake，China[J]. PLOS ONE，2011，6(6)：e21427.

[8] 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 PM2.5 pollution in Beijing-Tianjin-Hebei area[J]. Research of Environmental Sciences，2016，29(4)：483-493.】

[9] 湛东升，张文忠，余建辉，等. 基于地理探测器的北京市居民宜居满意度影响机理[J]. 地理科学进展，2015，34(08)：966-975.
【ZHANG D S，ZHANG W Z，YU J H，et al. Analysis of influencing mechanism of residents' livability satisfaction in Beijing using geographical detector[J]. Progress in Geography，2015，34(08)：966-975.】

[10] 廖 颖，王心源，周俊明. 基于地理探测器的大熊猫生境适宜度评价模型及验证[J]. 地球信息科学学报，2016，18(06)：767-778.
【LIAO Y，WANG X Y，ZHOU J. Suitability assessment and validation of giant panda habitat based on geographical detector[J]. Journal of Geo-information Science，2015，34(08)：966-975.】

[11] 段 婧，毛节泰. 长江三角洲大气气溶胶光学厚度分布和变化趋势研究[J]. 环境科学学报，2007，27(04)：537-543.
【DUAN J，MAO J T. Study on the distribution and variation trends of atmospheric aerosol optical depth over the Yangtze River Delta[J]. Acta Scientiae Circumstantiae，2007，27(04)：537-543.】

[12] 关佳欣，李成才. 我国中、东部主要地区气溶胶光学厚度的分布和变化[J]. 北京大学学报(自然科学版)，2010，46(2)：185-191.
【GUAN J X，LI C C. Spatial distributions and changes of aerosol optical depth over eastern and central China[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis，2010，46(2)：185-191.】

[13] KING M D，KAUFMAN Y J，MENZEl W P，et al. Remote sensing of cloud，aerosol，and water vapor properties from the Moderate Resolution Imaging Spectrometer (MODIS)[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing，1992，30(1)：2-27.

[14] LEVY R C，MATTOO S，MUNCHAK L A，et al. The collection 6 MODIS aerosol products over land and ocean[J]. Atmos. Meas. Tech，2013，6(11)：159-259.

[15] 杨以坤，孙 林，韦 晶，等. MODIS C5、C6 气溶胶产品验证及区域适应性评价[J]. 山东科技大学学报(自然科学版)，2016，35(05)：17-27.
【YANG Y K，XUN L L，WEI J，et al. Verification of MODIS C5 and C6 and their regional adaptability evaluation[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology，2016，35(05)：17-27.】

[16] REMER L A，MATTOO S，LEVY R C，et al. MODIS 3km aerosol product: algorithm and global perspective[J]. Atmos Meas Tech，2013，6(1)：69-112.

[17] 孙晓雷，甘 伟，林 燕，等. MODIS 3km 气溶胶光学厚度产品检验及其环境空气质量指示[J]. 环境科学学报，2015，35(06)：1657-1666.

超星·期刊

【SUN X L, GAN W, LIN Y, et al. Validation of MODIS 3 km aerosol optical depth product and its air quality indication[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2015, 35(06): 1657-1666.】

[18] 王伟齐, 张成网, 臧增亮, 等. Terra 和 Aqua 卫星 MODIS 3 km AOD 与北京 PM2. 5 对比分析[J]. 气象科学, 2017, 1(37): 93-100.
【WANG W Q, ZHANG C W, ZANG Z L, et al. Comparative analysis between hourly PM2. 5 concentration and MODIS 3km aerosol optical depth derived from Terra and Aqua satellites in Beijing[J]. Journal of the Meteorological Science, 2017, 1(37): 93-100.】

[19] PINSON P, HAGEDORN R. Verification of the ECMWF ensemble forecasts of wind speed against analyses and observations[J]. Meteorol Appl, 2009, 1-20.

[20] 潘留杰, 张宏芳, 朱伟军, 等. ECMWF 模式对东北半球气象要素场预报能力的检验[J]. 气候与环境研究, 2013, 18(01): 111-123.
【PAN L J, ZHANG H F, ZHU W J, et al. Forecast performance verification of the ECMWF model over the Northeast Hemisphere[J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 2013, 18(01): 111-123.】

[21] 陈钦明, 宋淑丽, 朱文耀. 亚洲地区 ECMWF/NCEP 资料计算 ZTD 的精度分析[J]. 地球物理学报, 2012, 55(5): 1541-1548.
【CHEN Q M, SONG S L, ZHU W R, et al. An analysis of the accuracy of zenith tropospheric delay calculated from ECMWF/NCEP data over Asia area[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2012, 55(5): 1541-1548.】

[22] 李德平, 程兴宏, 于永涛, 等. 北京地区三级以上污染日的气象影响因子初步分析[J]. 气象与环境学报, 2010, 26(03): 7-13.
【LI D P, CHENG X H, YU Y T, et al. Effects of meteorological factors on air quality above the third grade pollution in Beijing[J]. Journal of Meteorology and Environment, 2010, 26(03): 7-13.】

[23] 李文杰, 张时煌, 高庆先, 等. 京津石三市空气污染指数(API)的时空分布特征及其与气象要素的关系[J]. 资源科学, 2012, 34(08): 1392-1400.
【LI W J, ZHANG S H, GAO Q X, et al. Relationship between temporal-spatial distribution pattern of air pollution index and meteorological elements in Beijing, Tianjin and Shijiazhuang[J]. Resources Science, 2012, 34(08): 1392-1400.】

[24] 赵敬国, 王式功, 王嘉媛, 等. 兰州市空气污染与气象条件关系分析[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2013, 49(04): 491-496.
【ZHAO J G, WANG S G, WANG J Y, et al. Analysis of the relationship between pollution in Lanzhou City and ground meteorological factors[J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences), 2013, 49(04): 491-496.】

[25] FRIEDL M A, SULLA-MENASHE D, TAN B, et al. MODIS Collection 5 global land cover: Algorithm refinements and characterization of new datasets[J]. Remote Sensing of Environment, 2010, 114(1): 168-182.

[26] 毕硕本, 计　晗, 陈昌春, 等. 地理探测器在史前聚落人地关系研究中的应用与分析[J]. 地理科学进展, 2015, 34(01): 118-127.
【BI S B, JI H, CHEN C C, et al. Application of geographical detector in human-environment relationship study of prehistoric settlements[J]. Progress in Geography, 2015, 34(01): 118-127.】

[27] VAN DONKELAAR A, MARTIN R V, PARK R J. Estimating ground-level PM2. 5 using aerosol optical depth determined from satellite remote sensing[J]. J. Geophys. Res, 2006, 111: D21201.

[28] EMILI E, POPP C, PETITTA M, et al. PM10 remote sensing from geostationary SEVIRI and polar-orbiting MODIS sensors over the complex terrain of the European Alpine region[J]. Remote Sensing of Environment, 2010, 114(11): 2485-2499.

[29] WANG Z, CHEN L, TAO J, et al. Satellite-based estimation of regional particulate matter (PM) in Beijing using vertical-and-RH correcting method[J]. Remote Sens Environ, 2010, 114(1): 50-63.

[30] CHARLSON R J, SCHWARTZ S E, HALES J M, et al. Climate Forcing by Anthropogenic Aerosols[J]. Science, 1992, 255(5043): 423-430.

[31] LIU Y, SARNAT J A, KILARU V, et al. Estimating Ground-Level PM2. 5 in the Eastern United States Using Satellite Remote Sensing[J]. Environmental Science and Technology, 2005, 39(9): 3269-3278.

[32] KOELEMEIJER R, HOMAN C D, MATTHIJSEN. Comparison of spatial and temporal variations of aerosol optical thickness and particulate matter over Europe[J]. Atmospheric Environment, 2006, 40: 5304-5315.

[33] 李成才, 毛节泰, 刘启汉, 等. 利用 MODIS 光学厚度遥感产品研究北京及周边地区的大气污染[J]. 大气科学, 2003, 27(05): 869-880.
【LI C C, MAO J T, LIU Q H, et al. Research on the Air Pollution in Beijing and Its Surroundings with MODIS AOD Products[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2003, 27(05): 869-880.】

[34] 张立盛, 石广玉. 相对湿度对气溶胶辐射特性和辐射强迫的影响[J]. 气象学报, 2002, 60(02): 230-237.
【ZHANG L S, SHI G Y. The impact relative humidity on the radiative property and radiative forcing of sulfate aerosol[J]. Acta meteorological sinica, 2002, 60(02): 230-237.】

[35] 倪书华. 空间统计学及其在公共卫生领域中的应用[J]. 汕头大学学报(自然科学版), 2014, 29(04): 61-67.
【NI S H. Elementary prime tight decomposion of harmonic frames and their applications[J]. Journal of Shantou University (Natural Science), 2014, 29(04): 61-67.】

[36] 武继磊, 王劲峰, 郑晓瑛, 等. 空间数据分析技术在公共卫生领域的应用[J]. 地理科学进展, 2003, 22(03): 119-128.
【WU J L, WANG J F, ZHENG X Y, et al. A review on appli-

超星·期刊

cation of spatial data analysis technology in public Health [J]. Progress in Geography, 2003, 22(03): 119-128.】

[37] 施 迅, 王法辉. 地理信息技术在公共卫生与健康领域的应用[M]. 北京: 高等教育出版社, 2016, 166-180.
【SHI X, WANG F H. Application of geospatial information technologies in public health [M]. Beijing: Higher Education Press, 2016, 166-180.】

[38] JIN-FENG WANGA T Z B F. A measure of spatial stratified heterogeneity [J]. Ecological Indicators. 2016, 67: 250-256.

[39] 潘敖大, 王珂清, 曾 燕, 等. 长江三角洲近 46a 气温和降水的变化趋势[J]. 大气科学学报, 2011(02): 180-188.
【PAN A D, WANG K Q, ZENG Y, et al. Trends of temperature and precipitation variation in the Yangtze River Delta from 1961 to 2006 [J]. Transactions of Atmospheric Sciences, 2011(02): 180-188.】

[40] 李小飞, 张明军, 王圣杰, 等. 中国空气污染指数变化特征及影响因素分析[J]. 环境科学, 2012, 33(06): 1936-1943.
【LI X F, ZHANG M J, WANG S J, et al. Variation characteristics and influencing factors of air pollution index in China [J]. Environmental Science, 2012, 33(06): 1936-1943.】

[41] 韩 燕, 徐 虹, 毕晓辉, 等. 降水对颗粒物的冲刷作用及其对雨水化学的影响[J]. 中国环境科学, 2013, 33(2): 193-200.
【HAN Y, XU H, BI X H, et al. Changes of particulate matters during rain process and influence of that on chemical composition of precipitation in Hangzhou, China [J]. China Environmental Science, 2013, 33(2): 193-200.】

[42] 许 珊, 邹 滨, 蒲 强, 等. 土地利用/覆盖的空气污染效应分析[J]. 地球信息科学学报, 2015, 17(3): 290-299.
【XU S, ZOU B, P Q, et al. Impact analysis of land use/cover on air pollution [J]. Journal of Geo-information Science, 2015, 17(3): 290-299.】

[43] 马燕坤, 肖金成. 长江中游城市群与长江三角洲城市群的比较分析[J]. 中国物价, 2016, 2: 15-18.
【MA Y K, XIAO J C. Comparative analysis of middle reaches of Yangtze River Urban agglomeration and Yangtze River Delta Urban Agglomeration [J]. China Price, 2016, 2: 15-18.】

ANALYSIS ON RISK FACTORS OF AIR POLLUTION OVER THE YANGTZE RIVER DELTA USING REMOTE SENSING AND GEOGRAPHICAL DETECTOR

GUO Chun-ying [1,2,4], SHI Run-he [1,2,3,4], ZHOU Yun-yun [1,2,4], ZHANG Xuan-yi [1,2,4]

(1. Key Laboratory of Geographic Information Science, Ministry of Education, East China Normal University, Shanghai 200241, China; 2. Joint Laboratory for Environment Remote Sensing and Data Assimilation, ECNU and RADI, Shanghai 200241, China; 3. Joint Research Institute for New Energy and Environment, East China Normal University and Colorado State University, Shanghai 200062, China; 4. School of Geographic Sciences, East China Normal University, Shanghai 200241, China)

Abstract: The atmospheric particulate matter is the main pollutant in the atmosphere at present. Aerosol optical depth data and satellite remote sensing retrieval products can make up the surface observation stations' inadequate space coverage. In this study, we analyze the 2013 aerosol optical depth product of Terra and Aqua MODIS sensor of the16 cities in Yangtze River Delta, correct the vertical and humidity deviations, and convert those data to ground layer's aerosol extinction coefficient which can reflect region's air pollution. Through the geographical detector's method, we quantify the main risk factors of air pollution and the impact strength of each factor in the Yangtze River Delta. These risk factors include GDP, population, gradient, land cover types, annual average temperature, annual average precipitation and annual average wind speed. The result shows that: the air pollutions of the studied area were lower in the north and higher in the south. The meteorological factors significantly affected the spatial distribution of air pollutions, and the effect of precipitation is the highest one, each risk factor exhibited a clearly interactive influence on the spatial distribution of air pollutions.

Key words: remote sensing; AOD; geographical detector; risk factors