DOI: 10.3969/j.issn.1673-6141.2025.05.003
CSTR: 32220.14.gk202505003

夏季气溶胶光学厚度时空变化分析—以辽宁省为例

范 强， 谭雅文*， 史 月

(辽宁工程技术大学测绘与地理科学学院，辽宁 阜新 123000)

摘 要: 气溶胶是大气重要的污染物之一，分析气溶胶的时空分布及其影响因子对大气环境的保护与治理具有重要意义。为揭示辽宁省夏季气溶胶光学厚度 (AOD) 的时空分布格局及其时空分异驱动因子作用，本研究利用全局Moran's *I*指数、空间热点分析法、标准差椭圆法研究了辽宁省夏季AOD的空间分布格局，并利用参数最优地理探测器分析了辽宁省夏季AOD的主要影响因素。结果表明：辽宁省夏季AOD高值主要分布在低海拔的中部平原地区，低值主要分布在东西两侧高海拔的山地和森林地区；城市化、工业化及经济发展不平衡是辽宁省AOD的区域性分布差异的主要原因，社会经济因子正在逐渐成为气溶胶时空分异的主要影响因素。

关 键 词: 气溶胶光学厚度; 时空变化; 标准差椭圆法; 参数最优地理探测器

中 图 分 类 号 : P237; X51 **文 献 标 识 码 :** A **文章编号:** 1673-6141(2025)05-582-016

Spatio-temporal distribution characteristics of aerosol optical depths in summer—A case study in Liaoning Province

FAN Qiang, TAN Yawen, SHI Yue*

(School of Geomatics, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China)

Abstract: Aerosols are one of the important pollutants in the atmosphere, and understanding their spatial and temporal distribution and influencing factors is of great significance for the protection and management of the atmospheric environment. To reveal the spatio-temporal distribution pattern of aerosol optical depth (AOD) in summer in Liaoning Province, China and the role of its spatio-temporal differentiation driving factors, this paper studied the spatial distribution pattern of AOD in summer in Liaoning Province using global Moran's *I* index, spatial hotspot analysis method and standard deviation ellipse method, and analyzed the main influencing factors of summer AOD in Liaoning Province using an optimal parameters-based geographical detector. The results show that the high AOD values in summer in Liaoning Province are mainly in the central plain area of low altitude, while the low AOD values are mainly in the mountain and forest areas of high altitude on east and west sides. In addition, urbanization,

基金项目: 辽宁工程技术大学学科创新团队资助项目 (LNTU20TD-06)

作者简介: 范 强 (1979-), 辽宁锦州人, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事遥感信息提取和专题地理信息系统方面的研究。
E-mail: fanqiang@lntu.edu.cn

收稿日期: 2023-08-09; **修改日期:** 2023-11-20

***通信作者**。E-mail: 357368263@qq.com

industrialization and unbalanced economic development are the main reasons for the regional differences of AOD in Liaoning Province, and social and economic factors are gradually becoming the main influencing factors of spatial and temporal differentiation of aerosols.

Key words: atmospheric aerosol optical depth; spatio-temporal distribution; standard deviational ellipse; optimal parameters based geographical detector

0　引　言

气溶胶是以固态或者液态的形式在大气中均匀稳定分散的悬浮体系，其一方面通过反射或吸收太阳辐射影响着地表温度[1,2]，另一方面可作为云和冰晶的凝结核影响降水和气候[3]。这些作用通过影响地气能量收支平衡，进而对气候变化产生影响[4-9]。气溶胶光学厚度 (AOD) 定义为垂直方向上气溶胶消光系数的积分[10]，是表征大气浑浊程度和气溶胶效应的关键物理量[11]，因此正确认识和研究气溶胶和 AOD 的时空分布特征对于了解大气污染十分必要。

国内外研究人员利用遥感数据对气溶胶开展了大量的联合分析，不同时间尺度的研究显示气溶胶浓度高峰值出现在一年中的夏季[12]，不同驱动力因子如温度、相对湿度、降水、风速、风向等气象因素会对气溶胶微粒的沉降、扩散和转移产生影响[13-16]。此外，有研究表明气溶胶浓度与归一化植被指数表现出较明显的负相关性[17]，而且还与夜间地表温度[18]以及人为因子有关。气溶胶空间分布方面的研究发现气溶胶浓度高值更多出现在海拔较低的平原及大城市群[19]，低值则分布在高海拔、高植被覆盖度的山区和草原，并且人口密度和地形因素对气溶胶的分布有直接关系[20]。研究显示人类工业化进程中产生的气溶胶是导致全球变冷的主要因子[21]，气溶胶浓度的增加会抑制热岛效应[22]。研究进一步发现，城市化进展和经济发展水平等社会经济因子发展不平衡是导致气溶胶时空分布差异的主要因素[23,24]。

辽宁省作为我国重要的重工业基地和粮食产地，随着经济改革，发展进入稳定缓慢的增长态势，伴随城市人口的聚集和工业产业的扩大而来的化石能源消费的增长，导致大气污染物排放量不断增加[25,26]，城市化、工业化进程中 AOD 及其影响因子的关系还未得到充分认识。因此，本文综合前人研究，选择气溶胶高峰值出现的夏季，利用参数最优地理探测器对辽宁省 AOD 时空分异特征进行分析，并探究其驱动力因子的影响及变化情况。

1　数据来源与预处理

1.1　研究区概况

辽宁省 (38°43′N～43°26′N，118°53′E～125°46′E) 位于我国东北地区，是我国重要的交通枢纽和工业基地。辽宁省属温带大陆性季风气候，整个省份的地势呈现南高北低、东西高中间低的状态，即由北向南逐渐升高，而从东西两侧向中间逐渐降低。独特的地理环境导致省内各地区温度差异较大，会对大气环境产生重要影响，因此需要重视辽宁省的大气环境问题。

1.2　数据来源与预处理

气溶胶数据产品为MCD19A2，该产品是基于美国宇航局 (NASA) 于 2018 年推出的多角度大气校正算

法 (MAIAC) 生成的，该算法大大提高了云检测、气溶胶反演和大气校正的精度[27]。该产品包括0.47 μm和0.55 μm AOD、云掩膜以及0.94 μm水汽波段，同时提供了与AOD相关的质量控制文件和不确定性数据。该产品具有良好的时空分辨率 (1 d，1000 m)，这使得表征局域尺度气溶胶特性成为可能。本文研究区域所在航带号为H26V04、H27V04、H27V05。数据可从NASA官方网站 (http://ladsweb.nascom.nasa.gov) 下载，通过ENVI IDL工具对原始数据进行预处理获得AOD日均值、月均值、夏季均值[28]。

影响因子数据：植被覆盖度数据和地表温度数据分别为NASA提供的MOD13A3和MOD11A2产品，对数据进行影像镶嵌、转换投影和掩膜提取等操作后，进行温度转换获得真实的地温值[29]，利用像元二分法得到植被覆盖度信息[30]。将来自于国家地球系统科学数据中心 (www.geodata.cn) 的气象因子数据进行掩膜提取和数值转化，得到研究区的相对湿度、风速和降水数据[31]。人口密度数据来自于WorldPop网站 (https://hub.worldpop.org)[32]。其他人为因子来源于辽宁省统计年鉴，对国民生产总值和第二产业生产总值进行了克里金插值处理[33]。

为了保证本文研究的充分性和可靠性，本文选用2005、2010、2015、2020年6—8月的数据进行研究。

2 研究方法

2.1 全局空间自相关

全局空间自相关的作用是描述整个空间内要素之间的关联程度，以判断空间要素是否存在随机、集聚或离散的空间分布特征[34]。本文利用全局Moran's I指数衡量辽宁省夏季AOD全局空间自相关情况，计算公式为

$$I=\frac{n\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}\omega_{i,j}\left(x_i-\bar{x}\right)\left(x_j-\bar{x}\right)}{\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}\omega_{i,j}\sum_{i=1}^{n}\left(x_i-\bar{x}\right)^2}, \tag{1}$$

式中n为AOD空间格点数目，$\omega_{i,j}$为空间权重系数，x_i和x_j分别为网格点的AOD值，$\bar{x}$为AOD平均值。

2.2 空间热点探测

冷热点分析[35]用于研究AOD高值和低值空间聚集现象，空间中以Getis-Ord G_i^*指数表示。G_i^*为冷热点检验值，用于指示空间分布上的高值与低值。显著的正G_i^*值表示该位置及其周围趋于AOD高观测值集聚，判断为热点区域；显著的负G_i^*值表示AOD低观测值集聚，判断为冷点区域。G_i^*的计算公式为

$$G_i^*=\frac{\sum_{j=1}^{n}\omega_{i,j}x_j-\bar{X}\sum_{j=1}^{n}\omega_{i,j}}{S\sqrt{\frac{n\sum_{j=1}^{n}\omega_{i,j}^2-\left(\sum_{j=1}^{n}\omega_{i,j}\right)^2}{n-1}}}, \tag{2}$$

$$\bar{X}=\frac{\sum_{j=1}^{n}x_j}{n}, \tag{3}$$

$$S=\sqrt{\frac{\sum_{j=1}^{n}x_j^{\,2}}{n}-\left(\overline{X}\right)^2}\,. \tag{4}$$

2.3　标准差椭圆

标准差椭圆 (SDE) 是用于揭示数据变化规律的空间统计工具[36]，该方法用于度量AOD的方向分布，表示AOD的空间离散程度、方向趋势等空间特征，椭圆圆心的计算公式为

$$\begin{cases} x_{\mathrm{SDE}}=\sqrt{\dfrac{\sum_{s=1}^{n}\left(x_s-\overline{X}\right)^2}{n}} \\ y_{\mathrm{SDE}}=\sqrt{\dfrac{\sum_{s=1}^{n}\left(y_s-\overline{Y}\right)^2}{n}} \end{cases}, \tag{5}$$

式中x_s和y_s为要素的坐标，$\overline{X}$和$\overline{Y}$为要素的加权平均中心，n为要素总和。

标准差椭圆方位角公式为

$$\tan\alpha=\frac{\sum_{s=1}^{n}\tilde{x}_s^{\,2}-\sum_{s=1}^{n}\tilde{y}_s^{\,2}+\sqrt{\left(\sum_{s=1}^{n}\tilde{x}_s^{\,2}-\sum_{s=1}^{n}\tilde{y}_s^{\,2}\right)^2+4\left(\sum_{s=1}^{n}\tilde{x}_s\tilde{y}_s\right)^2}}{2\sum_{s=1}^{n}\tilde{x}_s\tilde{y}_s}, \tag{6}$$

式中$\tilde{x}_s$和$\tilde{y}_s$为要素坐标与加权平均中心坐标的差。

标准差椭圆X轴、Y轴标准差σ_x、σ_y的计算公式为

$$\begin{cases} \sigma_x=\sqrt{2}\sqrt{\dfrac{\sum_{s=1}^{n}\left(\tilde{x}_s\cos\alpha-\tilde{y}_s\sin\alpha\right)^2}{n}} \\ \sigma_y=\sqrt{2}\sqrt{\dfrac{\sum_{s=1}^{n}\left(\tilde{x}_s\sin\alpha+\tilde{y}_s\cos\alpha\right)^2}{n}} \end{cases}, \tag{7}$$

2.4　参数最优地理探测器

地理探测器是用于探测因子空间分异性并研究其背后驱动力的统计学方法[37,38]，本文选择参数最优地理探测器 (OPGD) 对连续变量进行离散化，通过评价解释因子的评价值q得到离散效果最好的参数组合 (分级方式和间断数) 进行空间离散化[39]，可以有效避免传统地理探测器在对连续变量进行离散化时人为设定参数可能存在的主观性和离散不合理等问题，本研究使用因子探测和交互探测两个模块。

(1) 因子探测

因子探测通过探测因变量 (影响因子) 对自变量 (AOD) 的空间分异性的影响程度，来度量自变量对因变量的影响，该影响使用q值来量化[40]，计算公式为

$$q=1-\frac{\sum_{h=1}^{L}N_h\sigma_h^{\,2}}{N\sigma^2}, \tag{8}$$

式中$h=1,2,\ldots,L$为变量的分类或分区，N_h为层h的单元数，σ_h^2为因变量在h层的方差，N为全区的单元数，σ^2为因变量在全区的方差。

(2) 交互探测

交互探测用于识别不同自变量因子之间的交互作用[41]。评估方法是计算两种自变量因子X_1、X_2单独对因变量作用时的q值$q(X_1)$和$q(X_2)$，以及两个自变量交互作用时的q值$q(X_1\cap X_2)$，根据$q(X_1)$、$q(X_2)$和$q(X_1\cap X_2)$之间比较结果的不同，将交互作用划分为不同类型。集体交互作用类型以及划分标准见表1。

表 1 交互作用探测划分标准

Table 1 Classification criteria of interaction probe

Interaction type	Standard of judgement
Nonlinear attenuation	$q(X_1\cap X_2)<\mathrm{Min}\left[q(X_1),q(X_2)\right]$
Single-factor nonlinear attenuation	$\mathrm{Min}\left[q(X_1),q(X_2)\right]<q(X_1\cap X_2)<\mathrm{Max}\left[q(X_1),q(X_2)\right]$
Independent	$q(X_1\cap X_2)=q(X_1)+q(X_2)$
Two-factor enhancement	$q(X_1\cap X_2)>\mathrm{Max}\left[q(X_1),q(X_2)\right]$
Nonlinear enhancement	$q(X_1\cap X_2)>q(X_1)+q(X_2)$

注: $\mathrm{Min}\left[q(X_1),q(X_2)\right]$为$q(X_1)$、$q(X_2)$两者中的最小值，$\mathrm{Max}\left[q(X_1),q(X_2)\right]$为$q(X_1)$、$q(X_2)$两者中的最大值，$q(X_1)+q(X_2)$为$q(X_1)$、$q(X_2)$两者之和。

3 结果分析

3.1 辽宁省夏季AOD时空分布特征

图1为辽宁省夏季AOD整体分布图。从图中可以看出，辽宁省夏季气溶胶空间分布不均匀，区域间差异较大，整体呈现由西南向东北方向逐渐降低的趋势。表2为辽宁省各市夏季平均AOD情况，与图1反映的

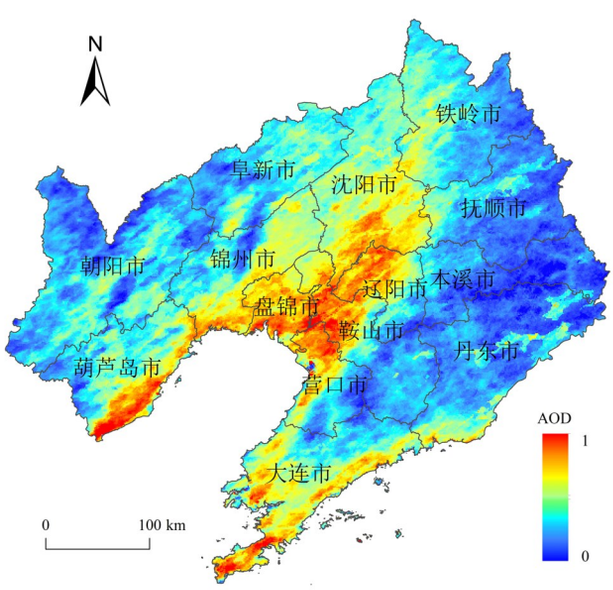


图1 辽宁省夏季多年平均AOD整体分布

Fig. 1 Overall distribution of summer multi-year average AOD in Liaoning Province

AOD 高低值分布情况一致。AOD 高值区主要分布在由盘锦市、辽阳市、沈阳市、锦州市、营口市、鞍山市、葫芦岛市以及大连市等人口众多、经济发达以及重工业城市构成的辽宁省沿海经济带。AOD 低值区主要分布在本溪市、抚顺市东部大部分地区以及丹东市东北部，这些地区与吉林省接壤，植被茂密，地表覆盖度高，地势较高。而与内蒙古沙漠区相邻的朝阳市和阜新市虽然同样地势较高，却易受到来自内蒙古输送的沙尘气溶胶影响。

表 2　辽宁省各市夏季平均 AOD 情况

Table 2　Summer average AOD in various cities of Liaoning Province

城市	AOD			
	2005	2010	2015	2020
鞍山市	0.4977	0.3394	0.4927	0.3164
本溪市	0.2833	0.2475	0.3470	0.2343
朝阳市	0.3302	0.3658	0.3714	0.2421
大连市	0.5311	0.3528	0.4960	0.4188
丹东市	0.3776	0.2560	0.3587	0.2539
抚顺市	0.3223	0.2560	0.3831	0.2580
阜新市	0.4225	0.3131	0.4147	0.2778
葫芦岛市	0.4270	0.4881	0.4733	0.3324
锦州市	0.5038	0.3711	0.4935	0.3468
辽阳市	0.5350	0.3651	0.6155	0.3410
盘锦市	0.6853	0.4856	0.6423	0.4068
沈阳市	0.5693	0.3384	0.5810	0.3493
铁岭市	0.4366	0.2823	0.4394	0.2762
营口市	0.4812	0.3838	0.4974	0.3505

2005、2010、2015、2020 年辽宁省夏季 AOD 分布情况如图 2 所示，采用均值标准差法将 AOD 划分为极低值、低值、中值、高值、极高值 5 个等级[42]。该方法利用均值和不同倍数标准差的组合表示 AOD 的高低情况，并给出每间隔 5 年辽宁省夏季 AOD 不同划分等级占比情况，如表 3 表示。由图 2 和表 3 可以看出，4 个年份中 2010 年和 2020 年稍有不同。2010 年气溶胶分布、浓度以及划分等级增长率均与其他年份不同，从整体上看，辽宁省 AOD 年均值变化不大，人为影响相对稳定，主要是气象因素导致的小幅度波动。辽宁省属温带大陆性季风气候，亚洲是受季风影响最显著的地区之一[43]，季风活动会影响区域风场，风场的变化影响着气溶胶的分布[44]，这可能是造成 2010 年该区域气溶胶分布差异的主要原因。2020 年各城市、区县 AOD 值以及 AOD 占比低于其他年份。辽宁省气溶胶主要是来自城市居民生产生活的排放，并在地面风的作用下将城市群的气溶胶扩散至非城市区。因此，不排除造成这一现象是疫情下居民生活、工业生产等活动减弱，导致气溶胶排放减少所造成的结果[45]。

3.2　辽宁省夏季 AOD 空间相关性分析

利用 ArcGIS 空间统计分析得到辽宁省 2005、2010、2015、2020 年夏季 AOD 空间分布的全局 Moran's *I* 指数，如表 4 所示。由表可知，各年份全局 Moran's *I* 指数均为正值，且均通过 99% 显著性检验 (z-score ≥ 2.58)，说明辽宁省夏季 AOD 分布表现为明显的空间正相关关系，存在相似聚集。

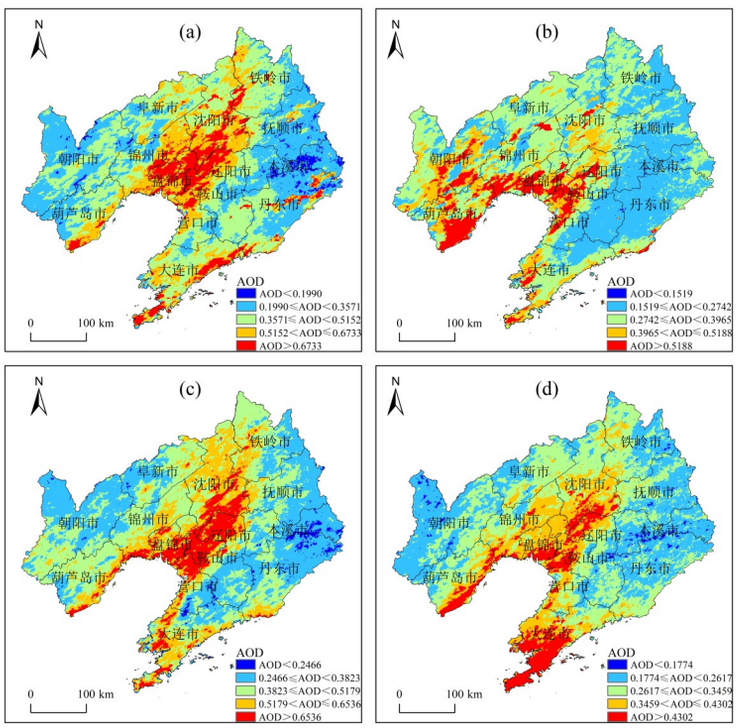


图 2 辽宁省不同年份夏季AOD分布。(a) 2005年; (b) 2010年; (c) 2015年; (d) 2020年

Fig. 2 Distribution of summer AOD in Liaoning Province in different years. (a) 2005; (b) 2010; (c) 2015; (d) 2020

表 3 辽宁省不同年份夏季AOD划分等级占比情况

Table 3 The proportion of AOD classification in summer in Liaoning Province in different years

Grade	Percentage of AOD classifications/%			
	2005	2010	2015	2020
Very low value	1.89	0.14	1.62	1.21
Low value	33.85	36.44	35.34	35.71
Medium value	37.02	41.18	35.60	37.10
High value	17.67	13.24	18.27	17.05
Very high value	9.56	9.00	9.18	8.94

表 4 辽宁省不同年份AOD全局空间自相关

Table 4 AOD global spatial autocorrelation in Liaoning Province in different years

Year	Moran's I	z-score
2005	0.65**	10.49
2010	0.62**	10.00
2015	0.72**	11.52
2020	0.75**	12.15

注: **表示通过置信度99%显著性检验。

Moran's I指数分析是针对辽宁省AOD全局集聚性质的整体分析，而冷热点分析能够显示出区域内高低值的具体位置[46]。2005、2010、2015、2020年冷热点分析结果如图3所示，其中G_i_Bin代表置信区间。由图可知，2005年辽宁省夏季AOD热点聚集区分布在沈阳市南部、盘锦市、鞍山市西北、营口市北部，冷点聚集区

主要分布在边缘高海拔地区；2010年热点聚集区分布有明显向西辐射的态势，辐射范围达到葫芦岛市以及朝阳市中部，冷点聚集区继续从东部与吉林省接壤处向北部扩大；2015年热点聚集区主要分布在辽宁省中部地区，聚集区扩散到本溪市西部，冷点聚集区依旧分布于东西两侧高海拔地区；2020年热点聚集区面积为4个时间段最小，分布在盘锦市、锦州市南部以及鞍山市西北部，大连市热点聚集区的面积最大，冷点聚集区与其他时间基本保持一致。

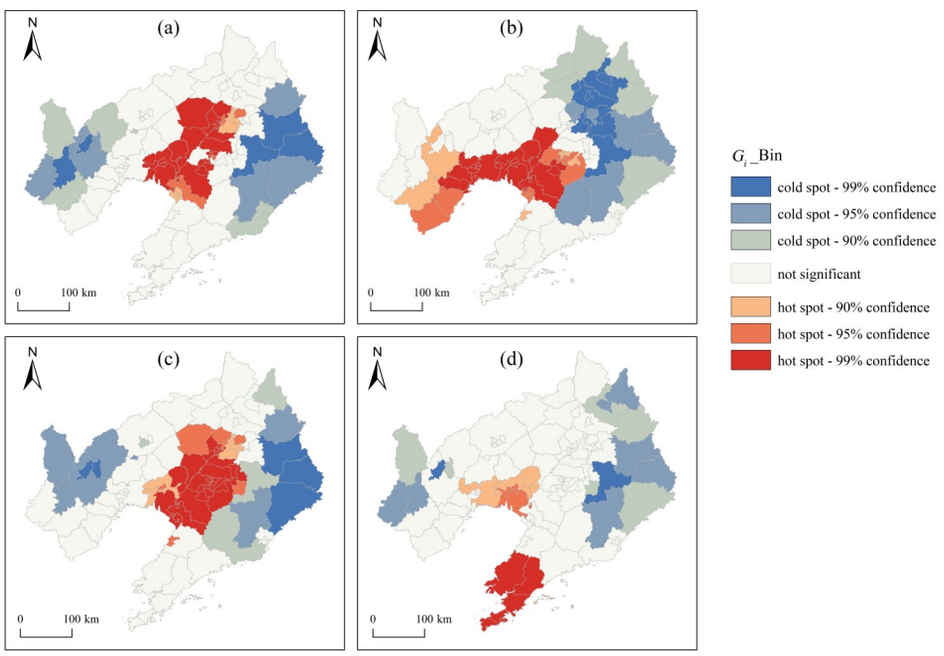


图 3　辽宁省不同年份夏季AOD冷热点空间分布图。(a) 2005年; (b) 2010年; (c) 2015年; (d) 2020年

Fig. 3　Spatial distribution of hot and cold spots of summer AOD in Liaoning Province in different years. (a) 2005; (b) 2010; (c) 2015; (d) 2020

利用自然间断点分级法将AOD的冷热点指数由高到低划分为4个等级，得到辽宁省历年夏季AOD冷热点百分比堆积图，如图4所示。根据冷热点分析的冷热点相对面积占比发现，辽宁省2015年夏季AOD冷

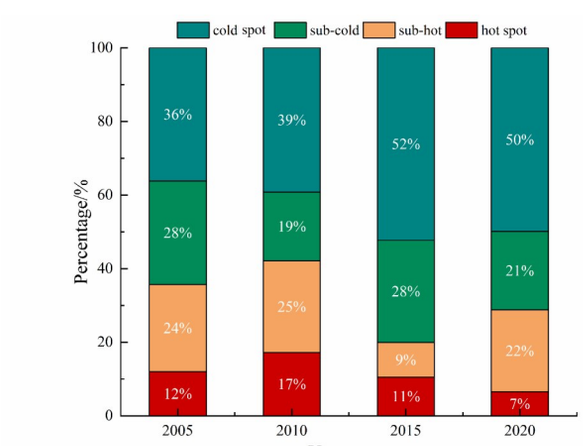


图 4　辽宁省不同年份夏季AOD冷热点百分比堆积图

Fig. 4　Stacked chart of the percentage of AOD cold and hot spots in summer of different years in Liaoning Province

热点占比呈现出明显的冷点面积占比增加、热点面积占比降低趋势，次冷点和次热点的面积占比则下降不明显。

3.3 辽宁省夏季AOD中心迁移

统计2005、2010、2015、2020年的标准差椭圆参数，结果如表5所示。标准差椭圆中心移动轨迹如图5所示。其中，2010年相较其他3个年份，中心明显向西南方向偏移，并且标准差椭圆扁率最小，长半轴最短，短半轴最长，AOD分布离散；2020年标准差椭圆长半轴最长，方向性最明显；2015年和2005年标准差椭圆中心、椭圆范围以及扁率基本保持一致，对比其他两个年份变化较稳定，表现出微弱的西南方向偏移。总体看，辽宁省夏季AOD分布在逐渐扩大，并且扁率也在逐渐增大，且质心在向西南沿海方向迁移，AOD中心经纬度迁移变化表明，辽宁省夏季AOD受纬度方向的影响大于经度方向的影响。

表5 辽宁省不同年份夏季AOD区县尺度标准差椭圆参数

Table 5 Standard deviation ellipse parameters of county-scale annotation in summer AOD area of Liaoning Province in different years

Year	Longitude/(°E)	Latitude/(°N)	Short semi-axis/km	Long semi-axis/km	Oblate
2005	122.61	41.18	118.71	168.73	0.296
2010	122.38	41.13	167.70	119.24	0.289
2015	122.59	41.17	117.14	167.33	0.300
2020	122.52	41.08	123.25	175.92	0.299

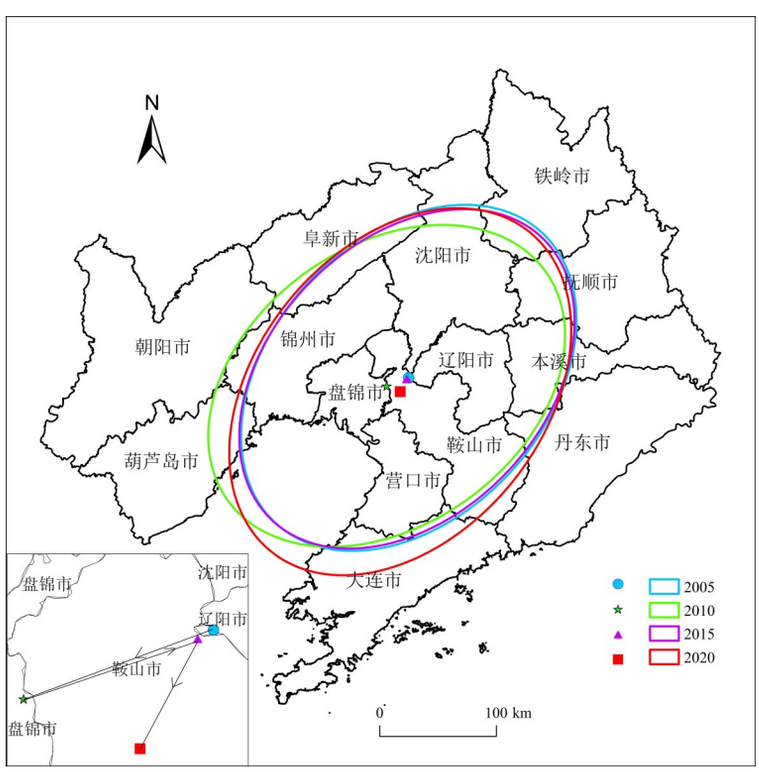


图5 辽宁省不同年份夏季AOD标准差椭圆分布 (内插图为辽宁省AOD中心迁移轨迹)

Fig. 5 Elliptical distribution of standard deviation of summer AOD in Liaoning Province in different years (The inset shows the migration trajectory of AOD center in Liaoning Province)

4　辽宁省夏季AOD驱动力分析

根据前文所述，选取夜间地表温度 (LST)、植被覆盖度 (FVC)、海拔 (DEM)、风速 (WV)、降水 (PRE)、相对湿度 (RH)、人口密度 (PD)、建筑密度 (BD)、国民生产总值 (GNP)、第二产业生产总值 (GSP) 共计 10 个能够引起气溶胶的形成及转移变化的驱动力因子，构建辽宁省夏季 AOD 驱动力因子评价体系。以辽宁省夏季 AOD 作为因变量，探测 10 个因子对气溶胶的驱动力作用情况。q 值范围在 [0，1] 之间，值越大表示影响因素对气溶胶光学厚度的解释 (影响) 力越强，反之则越弱。

4.1　因子探测结果

统计 2005、2010、2015、2020 年的辽宁省夏季 AOD 各影响因素 q 值，结果如表 6 所示。从单个影响因子来看，DEM 的平均 q 值为 0.61，且在不同时期 DEM 都对辽宁省夏季 AOD 有着较强的解释力，其次是 LST，再其次是 BD、GNP、GSP，这 5 个因素对 AOD 的影响值都在 0.40 以上，明显高于其他影响因素。说明 DEM、LST、BD、GNP、GSP 是影响辽宁省夏季气溶胶的主要因素。从影响因子的类型来看，地形地貌因素 (LST、FVC、DEM) 的平均 q 值最大 (q = 0.46)，其次是社会经济因素 (PD、BD、GNP、GSP) (q = 0.43)，最后是气象因素 (WV、PRE、RH) (q = 0.32)。说明在辽宁省夏季，地形地貌对 AOD 的影响最大，其次是社会经济因素，当然气象因子也是重要的影响因素。

表 6　辽宁省不同年份夏季 AOD 各影响因素 q 值

Table 6　Values of various influencing factors of summer AOD in Liaoning Province in different years

Year	Influencing factors of AOD q values									
	LST	FVC	DEM	WV	PRE	RH	PD	BD	GNP	GSP
2005	0.48	0.30	[1]0.77	0.29	[3]0.52	0.27	0.36	0.50	0.40	[2]0.53
2010	[1]0.43	0.36	[2]0.39	0.29	[3]0.36	0.26	0.27	0.30	0.20	0.14
2015	[3]0.50	0.38	[1]0.67	0.35	0.35	0.13	0.48	[2]0.54	0.46	0.41
2020	0.38	0.26	[3]0.61	0.28	0.45	0.24	0.43	0.42	[2]0.68	[1]0.69
Single-factor mean	[2]0.45	0.33	[1]0.61	0.30	0.42	0.23	0.39	[3]0.44	[3]0.44	[3]0.44

注: 表中左上角数字表示当年单因子影响力排名。

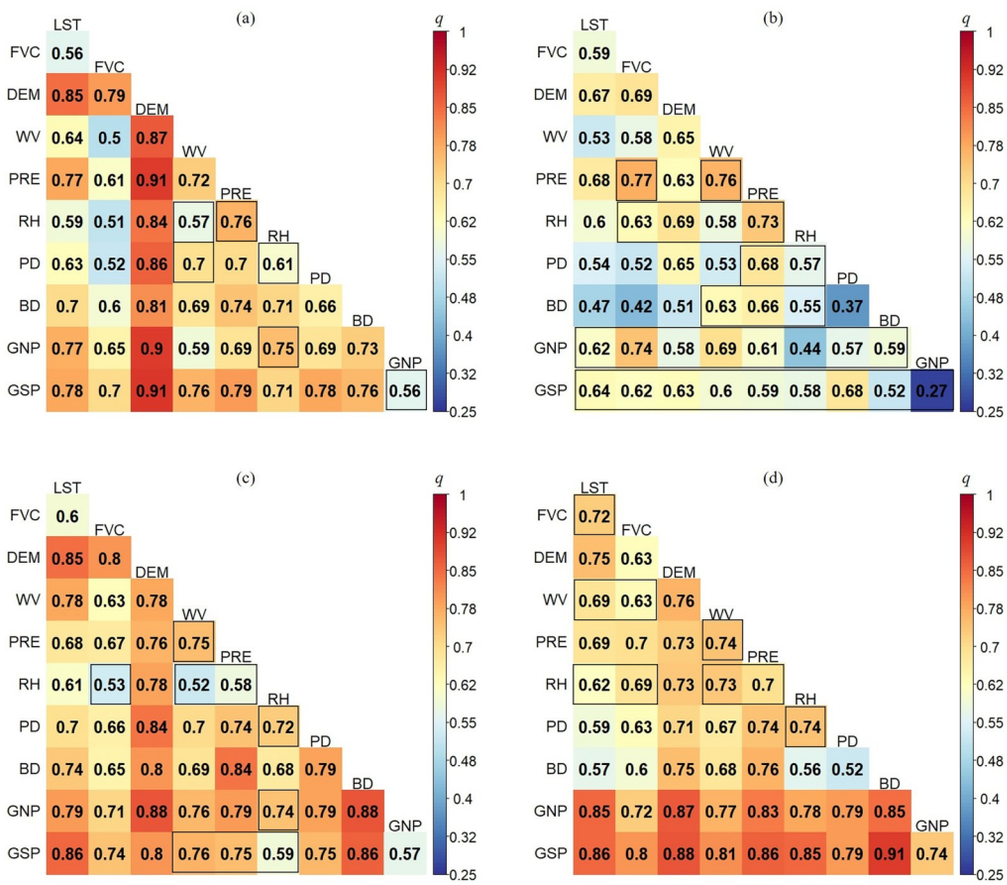
4.2　交互探测分析结果

交互探测可以评估影响因素两两之间共同作用时对 AOD 的解释力和作用关系。图 6 中各年份的因子交互探测结果显示，当因子之间共同发生作用时，只发现双因子增强和非线性增强的情况，没有发现单独起作用的影响因素。此外，当两种影响因素同时作用时，对 AOD 的影响大于单个因素的影响。

2005 年，除 RH 与 PD、GNP、WV，GNP 与 GSP 以及 WV 与 PD 交互时表现为非线性增强外，其他因素的交互均表现为双因子增强。DEM 与其他各因素交互时效果最为显著 (q > 0.80)，其中与 PRE、GSP 交互时的 q 值最大 (q = 0.91)。2010 年，大部分因素交互作用关系为非线性增强，且多数发生在经济社会因素之间或与其他因素交互时，其中 PRE 与 FVC 交互效果最为显著 (q = 0.77)，其次是 PRE 与 WV 交互时 (q = 0.76)，且均表现为非线性增强。2015 年，DEM 与其他因素的交互效果仍最显著 (q > 0.70)，其中 DEM 与 GNP 交互时 q 值最大 (q = 0.88)，另外 BD 与 GNP 交互时 q 值也为 0.88。2020 年，经济社会因素的交互效果逐渐显著，

GSP和GNP与其他因素交互的效果最为明显 ($q > 0.70$)，DEM与其他因子的交互效果依旧明显 ($q > 0.70$)。交互最明显的是GSP和BD交互 ($q = 0.91$)，其次是DEM与GNP交互 ($q = 0.88$)。

辽宁省夏季大气混合层发展较高，水平风速小，颗粒物不易扩散，降水充沛[47]，相对湿度增大，温度达到年内最高，会促进气溶胶的吸湿增长和气粒转化，从而增加气溶胶光学厚度[48]。此外，当夏季副热带高压北移时，华北地区的污染物会在东亚夏季风的输送作用下影响到辽宁省[49]；第二产业直接与环保相关，并且第二产业的发达程度反映一个地区的经济实力、城市化进展以及人口密集程度，高度城市化带来的是城市建筑密度的增长，由此引发的热岛效应不利于城市中气溶胶颗粒物的扩散，进而导致气溶胶汇集，因此经济发达地区较其他地区更易出现气溶胶高值。



注：黑色框表示非线性增强，其余为双因子增强。

图 6 辽宁省不同年份夏季AOD各影响因素交互作用效果。(a) 2005年; (b) 2010年; (c) 2015年; (d) 2020年

Fig. 6 Interaction effect of various influencing factors on summer AOD in Liaoning Province in different years. (a) 2005; (b) 2010; (c) 2015; (d) 2020

5 结 论

本研究对2005、2010、2015、2020年辽宁省夏季气溶胶时空分布特征进行了分析，运用参数最优地理探测器的参数最优组合选择最佳离散方法和间断数参数，对驱动力因子进行由连续变量向离散变量转化。基于部分时段和地区的数据统计分析，得到如下结论：

1) 辽宁省夏季AOD存在由人口众多以及重工业城市构成的高值区，由东北向西南方向逐渐升高，主要以沿渤海和黄海辽东湾经济区城市构成“Y”型分布。2020年疫情原因导致低值和高值占比有所下降，其他年份则均为不同程度的升高。其中，2010年气溶胶因受季风影响作用较大，与其他年份相比气溶胶分布及高低值数据表现略有不同，进而导致2015年低值、高值的同期增长率均表现为正值。

2) 空间自相关分析结果表明，辽宁省夏季AOD的分布具有显著的聚集性规律。空间热点分析显示，辽宁省夏季AOD热点聚集区分布呈片状，且以中部平原、沿海经济贸易发达城市为主要分布区域。标准差椭圆分析结果显示，辽宁省夏季AOD标准差椭圆的中心有向西南方向偏移的趋势。

3) 参数最优地理探测器分析结果表明，2005－2020年辽宁省夏季AOD的空间分异主要源于城市化和工业化的发展，随着经济发展的加快，社会经济因素的影响力逐渐上升。2005－2020年辽宁省夏季AOD自然因子的驱动力影响有所减小，其中海拔、地表温度、植被覆盖度是减小最显著的3个因子。

本文选择长时间间隔节点形式对辽宁省夏季气溶胶进行分析，意在根据城市、人口、工业发展等因素，探讨上述因素的变化对于气溶胶的影响变化。未来，可以利用MCD19A2数据的高时空分辨率，选择长时间、连续序列，开展更精细、更全面的影响因素对于辽宁省气溶胶的贡献以及气溶胶对于影响因素的响应机制方面的研究。

参考文献:

[1] Pandey A K, Singh S, Berwal S, *et al*. Spatio-temporal variations of urban heat island over Delhi [J]. *Urban Climate*, 2014, 10: 119-133.

[2] Wu H, Wang T J, Riemer N, *et al*. Urban heat island impacted by fine particles in Nanjing, China [J]. *Scientific Reports*, 2017, 7: 11422.

[3] Chen D H, Tong X H, Guo G, *et al*. Trends in summer precipitation and causes of decreasing light rain precipitation in Northeast China [J]. *Climatic and Environmental Research*, 2020, 25(5): 531-542.
陈东辉, 佟晓辉, 郭 刚, 等. 东北地区夏季不同等级降水变化特征及小雨雨量减少成因分析 [J]. 气候与环境研究, 2020, 25(5): 531-542.

[4] Mao J T, Zhang J H, Wang M H. Summary comment on research of atmospheric aerosl in China [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2002, 60(5): 625-634.
毛节泰, 张军华, 王美华. 中国大气气溶胶研究综述 [J]. 气象学报, 2002, 60(5): 625-634.

[5] Li Z Q. Impact of aerosols on the weather, climate and environment of China: An overview [J]. *Transactions of Atmospheric Sciences*, 2020, 43(1): 76-92.
李占清. 气溶胶对中国天气、气候和环境影响综述 [J]. 大气科学学报, 2020, 43(1): 76-92.

[6] Paciorek C J, Liu Y, Moreno-Macias H, *et al*. Spatiotemporal associations between GOES aerosol optical depth retrievals and ground-level $PM_{2.5}$ [J]. *Environmental Science & Technology*, 2008, 42(15): 5800-5806.

[7] Xue Y, He X W, de Leeuw G, *et al*. Long-time series aerosol optical depth retrieval from AVHRR data over land in North China and Central Europe [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2017, 198: 471-489.

[8] Kaufman Y J, Tanré D, Boucher O. A satellite view of aerosols in the climate system [J]. *Nature*, 2002, 419(6903): 215-223.

[9] Jiang M D, Chen L, He Y Q, *et al*. Nighttime aerosol optical depth retrievals from VIIRS day/night band data [J]. *National Remote Sensing Bulletin*, 2022, 26(3): 493-504.
姜梦蝶, 陈 林, 何玉青, 等. 利用NPP/VIIRS微光数据反演夜间气溶胶光学厚度 [J]. 遥感学报, 2022, 26(3): 493-504.

[10] Zhang L L, Pan J H, Zhang D H. Spatio-temporal distribution characteristics of aerosol optical depths in China based on MODIS data [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2018, 38(11): 4431-4439.
张亮林, 潘竟虎, 张大弘. 基于MODIS数据的中国气溶胶光学厚度时空分布特征 [J]. 环境科学学报, 2018, 38(11): 4431-4439.

[11] Fan J, Guo B F, He H C. Retrieval of aerosol optical thickness with MODIS data over Hangzhou [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(1): 101001.
范 娇, 郭宝峰, 何宏昌. 基于MODIS数据的杭州地区气溶胶光学厚度反演 [J]. 光学学报, 2015, 35(1): 101001.

[12] Liu Y H, Zheng X S. Analysis of temporal and spatial characteristics and data selection of aerosol optical depth in the Bohai Rim Region [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2020, 40(5): 1621-1628.
刘雨华, 郑小慎. 环渤海地区气溶胶光学厚度数据选取及时空特征分析 [J]. 环境科学学报, 2020, 40(5): 1621-1628.

[13] Song X N, Chi G Y, Shi Y, *et al*. Study on influencing factors of spatial heterogeneity of land surface temperature in coastal areas [J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2022, 17(3): 317.
宋筱楠, 迟广源, 史 月, 等. 滨海地区地表温度空间异质性影响因素探究 [J]. 大气与环境光学学报, 2022, 17(3): 317.

[14] Han Y, Kang L, Song Y. Spatial-temporal distribution of aerosol optical depth over northeastern China during 2000−2019 [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2021, 57(6): 1027-1034.
韩 阳, 康 凌, 宋 宇. 2000－2019年东北三省气溶胶光学厚度的时空分布特征 [J]. 北京大学学报 (自然科学版), 2021, 57(6): 1027-1034.

[15] Luo Y X, Chen J, Zheng X B. Climatology of aerosol optical depth over China from recent 10 years of MODIS remote sensing data [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2012, 21(5): 876-883.
罗宇翔, 陈 娟, 郑小波. 近10年中国大陆MODIS遥感气溶胶光学厚度特征 [J]. 生态环境学报, 2012, 21(5): 876-883.

[16] Ma Y J, Zuo H C, Zhang Y H, *et al*. Analyses on variation trends of atmospheric visibility and its effect factor in muilt-cities in central Liaoning [J]. *Plateau Meteorology*, 2005, 24(4): 623-628.
马雁军, 左洪超, 张云海, 等. 辽宁中部城市群大气能见度变化趋势及影响因子分析 [J]. 高原气象, 2005, 24(4): 623-628.

[17] Zhang M M, Liu Z B, Ge Y J. Spatio-temporal distribution of atmospheric aerosol optical depth in Jiangsu province [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2014, 23(12): 1775-1782.
张明明, 刘振波, 葛云健. 江苏省大气气溶胶光学厚度时空分布研究 [J]. 长江流域资源与环境, 2014, 23(12): 1775-1782.

[18] Liang H W, Kasimu·Alimujiang, Zhang X L, *et al*. Spatio-temporal change and influencing factors of land surface temperature in oasis urban agglomeration in arid region: A case study in the urban agglomeration on the northern slope of Tianshan Mountains [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(9): 3650-3664.
梁洪武, 阿里木江·卡斯木, 张雪玲, 等. 干旱区绿洲城市群地表温度时空变化及其影响因素: 以天山北坡城市群为例 [J]. 生态学报, 2023, 43(9): 3650-3664.

[19] Yang G, Ma J J, Sun E C, *et al*. Spatio-temporal characteristics of aerosols in China during 2004－2018 [J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2021, 16(5): 443-456.
杨 光, 麻金继, 孙二昌, 等. 2004－2018年间中国区域气溶胶时空变化特征研究 [J]. 大气与环境光学学报, 2021, 16(5): 443-456.

[20] Liu Z, Sun X L, Liu D, *et al*. Spatio-temporal characteristics of aerosol optical depth over Beijing-Tianjin-Hebei-Shandong-Henan-Shanxi-Shaanxi region during 2001−2017 [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2018, 38(8): 3177-3184.

刘 状, 孙曦亮, 刘 丹, 等. 2001－2017年中国北方省份气溶胶光学厚度的时空特征 [J]. 环境科学学报, 2018, 38(8): 3177-3184.

[21] Shi G Y, Wang B, Zhang H, *et al*. The radiative and climatic effects of atmospheric aerosols [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2008, 32(4): 826-840.
石广玉, 王 标, 张 华, 等. 大气气溶胶的辐射与气候效应 [J]. 大气科学, 2008, 32(4): 826-840.

[22] Li H D, Meier F, Lee X H, *et al*. Interaction between urban heat island and urban pollution island during summer in Berlin [J]. *Science of The Total Environment*, 2018, 636: 818-828.

[23] Wang A Y, Kang P, Zhang Y, *et al*. Spatial differentiation and driving factors of aerosol optical depth in Sichuan Basin from 2003 to 2018 [J]. *China Environmental Science*, 2022, 42(2): 528-538.
王安怡, 康 平, 张 洋, 等. 2003－2018年四川盆地气溶胶光学厚度空间分异及驱动因子 [J]. 中国环境科学, 2022, 42(2): 528-538.

[24] Jonsson P, Bennet C, Eliasson I, *et al*. Suspended particulate matter and its relations to the urban climate in Dar es Salaam, Tanzania [J]. *Atmospheric Environment*, 2004, 38(25): 4175-4181.

[25] Deng X L, Shi C E, Wu B W, *et al*. Analysis of aerosol characteristics and their relationships with meteorological parameters over Anhui province in China [J]. *Atmospheric Research*, 2012, 109: 52-63.

[26] Lü F, Yang Y X, Yang J. Spatiotemporal distribution characteristics and relationship analysis of aerosol optical depth and $PM_{2.5}$ concentration: Taking the "2+26" urban agglomeration as an example [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(1): 153-165.
吕 芳, 杨宇鑫, 杨 俊. 气溶胶光学厚度与$PM_{2.5}$浓度的时空分布特征及其关系: 以京津冀大气污染传输通道城市群为例 [J]. 生态学报, 2023, 43(1): 153-165.

[27] Chen X Y, Ding J L, Wang J Z, *et al*. Validation of the fine resolution of the MODIS MAIAC aerosol optical depth product over arid areas [J]. *National Remote Sensing Bulletin*, 2023, 27(2): 406-419.
陈香月, 丁建丽, 王敬哲, 等. MODIS MAIAC高分辨率气溶胶光学厚度产品在干旱区的适用性研究 [J]. 遥感学报, 2023, 27(2): 406-419.

[28] Wang X H, Dong J Y, Ma M H, *et al*. Spatial and temporal distribution characteristics of aerosols in mining areas based on ecological restoration: A case of Qian'an mining area [J]. *Mining Research and Development*, 2023, 43(9): 194-200.
王晓红, 董建勇, 马明浩, 等. 基于生态修复的矿区气溶胶时空分布特征: 以迁安矿区为例 [J]. 矿业研究与开发, 2023, 43(9): 194-200.

[29] Hu Z L, Dai H, Hou F, *et al*. Spatio-temporal change of urban-rural vegetation phenology and its response to land surface temperature in Northeast China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(12): 4137-4145.
胡召玲, 戴 慧, 侯 飞, 等. 中国东北城乡植被物候时空变化及其对地表温度的响应 [J]. 生态学报, 2020, 40(12): 4137-4145.

[30] Miao Z H, Liu Z M, Wang Z M, *et al*. Dynamic monitoring of vegetation fraction change in Jilin Province based on MODIS NDVI [J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2010, 25(3): 387-393.
苗正红, 刘志明, 王宗明, 等. 基于MODIS NDVI的吉林省植被覆盖度动态遥感监测 [J]. 遥感技术与应用, 2010, 25(3): 387-393.

[31] Ai Z, Chen Q L. Temporal and spatial distribution of aerosol optical depth in Sichuan and its correlation with meteorological factors [J]. *Sichuan Environment*, 2019, 38(4): 79-86.
艾 泽, 陈权亮. 四川地区气溶胶光学厚度时空分布及其与气象因子的相关性分析 [J]. 四川环境, 2019, 38(4): 79-86.

[32] Lin D C, Tan M, Liu K, *et al*. Accuracy comparison of four gridded population datasets in Guangdong Province, China [J]. *Tropical Geography*, 2020, 40(2): 346-356.
林丹淳, 谭 敏, 刘 凯, 等. 代表性人口空间分布数据集的精度评价: 以2010年广东省为例 [J]. 热带地理, 2020, 40(2):

346-356.

[33] Zhang J Y, Lu X N, Hong J, *et al*. Quantitative study on temporal and spatial patterns of aerosol optical depth and its driving forces in Sichuan Province during 2000–2014 [J]. *Journal of Natural Resources*, 2016, 31(9): 1514-1525.
张静怡, 卢晓宁, 洪 佳, 等. 2000－2014年四川省气溶胶时空格局及其驱动因子定量研究 [J]. 自然资源学报, 2016, 31(9): 1514-1525.

[34] Wang H, Guo Y J, Hong S, *et al*. Spatial pattern characteristics of aerosol optical depth in a region based on spatial autocorrelation [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2013, 38(7): 869-874.
王 华, 郭阳洁, 洪 松, 等. 区域气溶胶光学厚度空间格局特征研究 [J]. 武汉大学学报 (信息科学版), 2013, 38(7): 869-874.

[35] Wang Z, Li L, Yu Y J. Temporal and spatial variation characteristics of MODIS aerosol optical depth in Changzhou from 2000 to 2019 [J]. *Environmental Monitoring in China*, 2023, 39(1): 223-230.
王 振, 李 璐, 余益军, 等. 2000－2019年常州市MODIS气溶胶光学厚度时空变化特征研究 [J]. 中国环境监测, 2023, 39(1): 223-230.

[36] Feng Z Y, Shi R H. Spatio-temporal features and the association of ground-level $PM_{2.5}$ concentration and its emission in China [J]. *Journal of Geo-Information Science*, 2021, 23(7): 1221-1230.
冯子钰, 施润和. 中国近地面$PM_{2.5}$浓度与排放的时空分布及其关联分析 [J]. 地球信息科学学报, 2021, 23(7): 1221-1230.

[37] Wang J F, Xu C D. Geodetector: Principle and prospective [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(1): 116-134.
王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望 [J]. 地理学报, 2017, 72(1): 116-134.

[38] Fan Q, Shi Y, Song X N, *et al*. Study on factors affecting remote sensing ecological quality combined with Sentinel-2 [J]. *Remote Sensing*, 2023, 15(8): 2156.

[39] Song Y Z, Wang J F, Ge Y, *et al*. An optimal parameters-based geographical detector model enhances geographic characteristics of explanatory variables for spatial heterogeneity analysis: Cases with different types of spatial data [J]. *GIScience & Remote Sensing*, 2020, 57(5): 593-610.

[40] Liu Y S, Yang Z S, Huang Y H, *et al*. Spatiotemporal evolution and driving factors of China's flash flood disasters since 1949 [J]. *Scientia Sinica (Terrae)*, 2019, 49(2): 408-420.
刘业森, 杨振山, 黄耀欢, 等. 建国以来中国山洪灾害时空演变格局及驱动因素分析 [J]. 中国科学: 地球科学, 2019, 49(2): 408-420.

[41] Zhang R J, Chen Y H, Zhang X X, *et al*. Spatial-temporal pattern and driving factors of flash flood disasters in Jiangxi Province analyzed by optimal parameters-based geographical detector [J]. *Geography and Geo-Information Science*, 2021, 37(4): 72-80.
张若婧, 陈跃红, 张晓祥, 等. 基于参数最优地理探测器的江西省山洪灾害时空格局与驱动力研究 [J]. 地理与地理信息科学, 2021, 37(4): 72-80.

[42] Ha S C, Alimujiang Kasimu. Analysis of the impact factors of urban heat island effect based on the intensive land use level [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2016, 38(1): 270-278.
哈尚辰, 阿里木江·卡斯木. 基于土地集约利用水平的城市热岛效应影响因子分析 [J]. 冰川冻土, 2016, 38(1): 270-278.

[43] Wang B, Fan Z. Choice of South Asian summer monsoon indices [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1999, 80(4): 629-638.

[44] Liu X D, Yan L B, Yang P, *et al*. Influence of Indian summer monsoon on aerosol loading in east Asia [J]. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2011, 50(3): 523-533.

[45] Wei G, Hou Y Q, Zha Y. Analysis of aerosol type changes in Wuhan City under the outbreak of COVID-19 epidemic [J]. *Remote Sensing for Natural Resources*, 2021, 33(3): 238-245.

韦 耿, 侯钰俏, 查 勇. 新冠疫情影响下武汉市气溶胶类型变化分析 [J]. 自然资源遥感, 2021, 33(3): 238-245.

[46] Zhang X, Wang X H, Zheng Y R, *et al*. Effects of aerosol optical depth and impervious surface percentage on urban heat island intensity: A case study in Guanzhong Region [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(22): 8965-8976.
张 秀, 王旭红, 郑玉蓉, 等. 气溶胶光学厚度和不透水地表覆盖度对城市热岛强度的影响: 以关中地区为例 [J]. 生态学报, 2021, 41(22): 8965-8976.

[47] Ding T, Chen L J, Cui D H. Decadal variations of summer precipitation in Northeast China and the associated circulation [J]. *Plateau Meteorology*, 2015, 34(1): 220-229.
丁 婷, 陈丽娟, 崔大海. 东北夏季降水的年代际特征及环流变化 [J]. 高原气象, 2015, 34(1): 220-229.

[48] Schaap M, Apituley A, Timmermans R M A, *et al*. Exploring the relation between aerosol optical depth and $PM_{2.5}$ at Cabauw, the Netherlands [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2009, 9(3): 909-925.

[49] Liu Z, Zheng Y F, Liu J J, *et al*. Research on the distribution of the northern region of China aerosol based on A-train satellite [J]. *China Environmental Science*, 2015, 35(10): 2891-2898.
刘 贞, 郑有飞, 刘建军, 等. 基于 A-train 卫星对中国北方地区气溶胶分布的研究 [J]. 中国环境科学, 2015, 35(10): 2891-2898.