

DOI: 10.3969/j.issn.1673-6141.2019.06.002

基于聚类分析的气溶胶光学厚度时间变化特征研究

刘 状¹, 石晨烈¹, 张 萌¹, 高志远¹, 祝新明¹, 王旭红^{1,2}

(1 西北大学城市与环境学院, 陕西 西安 710127;

2 陕西省地表系统与环境承载力重点实验室, 陕西 西安 710127)

摘 要: 利用 2008 年 3 月~2018 年 2 月中分辨率成像光谱仪 (Moderate resolution imaging spectroradiometer, MODIS) MOD08M3 遥感反演气溶胶光学厚度 (Aerosol optical depth, AOD) 产品数据, 结合 K-means 聚类分析方法, 对中国中部和东部的气溶胶光学厚度时间序列进行分析。结果表明: 1) 从像元尺度分析气溶胶光学厚度的时间序列变化特征, 避免了规律混杂问题, 得到了准确的变化规律和波动尺度。2) 在年际间变化尺度上得到 4 个分区结果, AOD 长期变化情况受人口分布的因素影响较大。3) 在季节间变化尺度上得到 9 种变化类型区, 分别是: 华北平原区、长江中下游区、高原山脉区、云贵区、兰州 - 银川 - 阿拉善盟区、四川盆地、关中陕南区、两广 - 湖南南部 - 江西南部区、东南沿海区, 同时由一些变化分区的地理位置得到了该区 AOD 季节性波动的主导影响因素。这些结果有助于研究 AOD 时间序列的准确变化和东部地区的气候环境。

关键词: MODIS; 气溶胶光学厚度; 聚类分析; 时变特征; 中国东部

中图分类号: X87 **文献标识码:** A **文章编号:** 1673-6141(2019)06-0411-08

Temporal Characteristics of Aerosol Optical Depth Based on Cluster Analysis Method

LIU Zhuang¹, SHI Chenlie¹, ZHANG Meng¹, GAO Zhiyuan¹,
ZHU Xinming¹, WANG Xuhong^{1,2}

(1 College of Urban and Environmental Sciences, Northwest University, Xi'an 710127, China;

2 Shaanxi Key Laboratory of Earth Surface System and Environmental Carrying Capacity, Xi'an 710127, China)

Abstract: Using the K-means cluster analysis method, the times series of aerosol optical depth (AOD) over central and eastern China from March 2008 to February 2018 were analyzed based on the data of moderate resolution imaging spectroradiometer (MODIS) MOD08M3. The results show that: 1) The characteristics of time series of AOD were analyzed from the pixel scale, which avoided the problem of rules mixing and

基金项目: Supported by National Natural Science Foundation of China (国家自然科学基金, 41971387), Shaanxi Province Natural Science Foundation (陕西省自然科学基金, 2015JM4132)

作者简介: 刘 状 (1994 -), 男, 陕西渭南人, 研究生, 主要从事遥感时间序列数据处理, 气溶胶光学厚度反演与应用的研究。

E-mail: 1065661608@qq.com

导师简介: 王旭红 (1968 -), 男, 陕西咸阳人, 博士, 教授, 主要从事城市环境遥感的研究。

E-mail: jqy_wxh@nwu.edu.cn

收稿日期: 2018-12-14; **修改日期:** 2019-01-07

leaded to the acquisition of accurate variation rules and fluctuation scales. 2) Four regional results were obtained on the inter-annual change scale, and the inter-annual variation of AOD was mainly influenced by the factor of population distribution. 3) There are 9 types of change zones on the inter-seasonal fluctuation scale, namely, North China plain region, Middle-Lower Yangtze River region, Plateau Mountain region, Yunnan-Guizhou region, Lanzhou-Yinchuan-Alxa region, Sichuan Basin region, Guanzhong-Shaannan region, Guangdong-Guangxi-Southern Hunan-Southern Jiangxi region, and the Southeast Coastal region. And the dominant influencing factors of seasonal fluctuations of AOD in the areas have been obtained based on the geographical location of some changes in the sub-regions. These results are helpful to study the precise changes of the AOD time series and the climatic environment in the central and eastern regions.

Key words: MODIS; aerosol optical depth; cluster analysis; temporal characteristics; East China

1 引言

气溶胶通常是指悬浮在大气中直径小于 $10\ \mu\text{m}$ 的固态或液态粒子^[1]。一方面气溶胶对区域环境具有辐射强迫作用^[2], 气溶胶的辐射强迫作用可以进一步影响降水等多种气候要素。另一方面, 雾霾等大气污染问题不断受到人们关注, 气溶胶可以通过呼吸作用进入肺部, 影响人类的健康生活。因此气溶胶的时空特征对于研究不同区域气候变化特征以及人类健康有着重要的意义。由于气溶胶监测站的数量有限, 且只能监测局地气溶胶, 不能获得大范围连续分布的气溶胶数据, 气溶胶光学厚度是消光系数在垂直方向上的积分, 不仅可以从地基监测站获取, 还可以从卫星影像中反演获得。气溶胶光学厚度是表征大气中气溶胶特性的重要参量, 是目前可以方便获取的气溶胶数据中覆盖范围广、较准确的数据^[3]。

关于气溶胶光学厚度时间序列的变化特征已经有了较多的研究^[4-10], 这些研究分别研究了不同区域的 AOD 时间序列变化特征。通过统计研究区内不同时间段的 AOD 均值, 总结出不同的变化规律, 均有一定的研究意义与价值。但是其研究过程都存在一个问题, 即无法保证研究区内所有像元都具有相似的 AOD 时间序列变化规律, 如果研究区内有一部分像元属于其他变化规律, 那么这两种变化规律混杂在一起的平均变化规律就不能说明该研究区的时间序列变化特征。部分研究通过气候、地形、行政区划对研究区进一步分解, 但本质上并没有解决这个问题, 没有依据显示某种气候因素能单独决定 AOD 的时间变化规律, 无论是研究某个国家、某个大区, 某个省份, 均未能避免 AOD 时间序列变化规律的规律混杂问题。而本文通过聚类分析, 从像元尺度分析 AOD 时间序列的变化规律, 将有相似变化规律的像元归为一类, 达到空间上分区的目的, 在这些分区的基础上进一步统计 AOD 均值, 并研究该分区内 AOD 时间序列变化规律, 解决了规律混杂问题。

2 数据与方法

2.1 数据源

目前, 获得气溶胶光学厚度连续分布的方法主要是遥感反演方法。2014 年发布的 MODIS C6 版产品, 包括第二代暗像元 (DT) 和深蓝 (DB) 两种算法。DT 算法的原理是基于暗像元处的波段关系, 反演效果更好, 但是在低植被覆盖地区缺失值太多, DB 算法在亮地表处有较好的反演效果^[11]。选取 2008 年 3 月~2018 年 2 月的 MODIS C6 版 MOD08M3 “AOD_550_Dark_Target_Deep_Blue_Combined_Mean_Mean” 数据集, 它通过 $\text{NDVI} > 0.3$ 、 $0.2 \leq \text{NDVI} \leq 0.3$ 和 $\text{NDVI} < 0.2$ 三个判断条件对像元进行分类, 采用两种算法

对不同类别像元进行反演, 得到基于两种算法融合的全球月平均气溶胶产品^[12-13]。

2.2 处理过程与分析方法

聚类分析实质上就是非监督分类, 传统的非监督分类一般针对光谱数据对像元进行分类, 而此处是应用 K -means 聚类算法, 对时间域的像元进行非监督分类。 K -means 算法是聚类分析的一种经典算法^[14], 该算法简单有效, 能够有效处理大量数据, 已经成功应用于多个行业。

K -means 算法的基本步骤如下^[14-16]:

- 1) 从所有数据中随机选择 K 个样本作为初始聚类中心;
- 2) 计算每个样本到这 K 个聚类中心的欧氏距离, 将每个样本分到欧氏距离最小聚类中心的类中;
- 3) 从 2) 分好的类中, 重新计算它更合理的聚类中心;
- 4) 重复 2) 与 3) 直到样本归属不再发生变化 (或设定重复次数)。

由于整体时间序列过长, 容易忽视时间序列中的重要信息, 可以对时间序列进行降维处理。由于气溶胶光学厚度显著地受到太阳辐射造成的直接或间接影响, 因此将 AOD 时间变化规律分为季节性变化规律和年际间变化规律是合理的。2008年3月~2018年2月的 MOD08M3 包括 10 年 120 个月的数据, 利用栅格计算器将 120 个月的数据统计为月份均值和年份均值图像, 月份均值图像包括 12 个波段, 年份均值图像包括 10 个波段, 由这两个图像进一步计算出多波段的斜率图像。利用 K -means 算法对斜率图像进行处理, 得到合理的分区结果, 同一分区内的每个像元都具有相似的变化规律, 在合理分区结果的基础上统计每个区域的变化曲线。

3 结果与分析

3.1 月份变化分区及规律

图 1(a) 为 1-12 月的月份变化分区结果, 月份变化分区共有 10 个区域, 可以看出其空间自相关性较强, 每个分区空间离散点很少, 有较好的空间连续性。

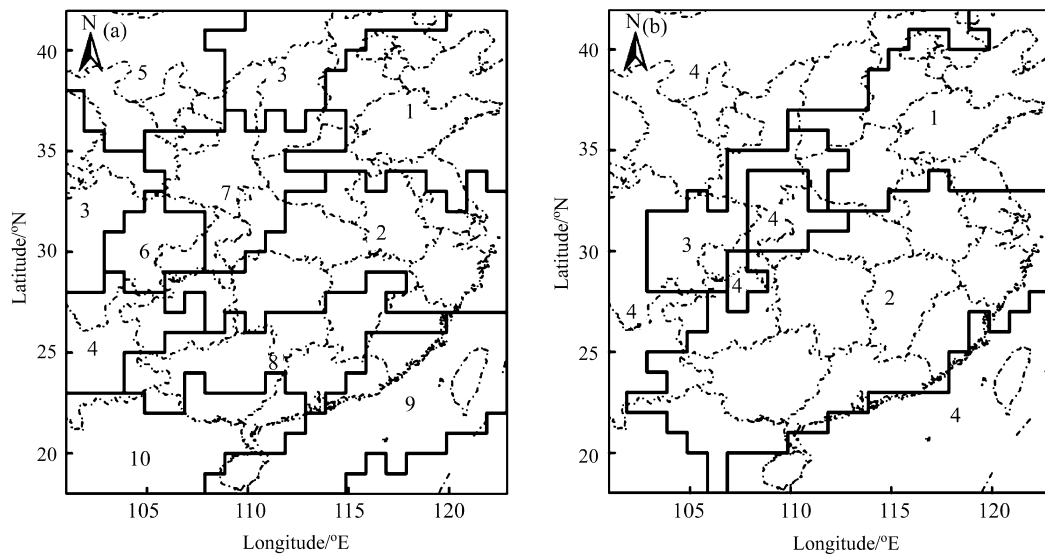


图 1 时间序列聚类分析分区结果。(a) 月份变化分区结果; (b) 年份变化分区结果

Fig.1 Partition results of time series cluster analysis. (a) Region of monthlyly change;(b) Region of interannual change

10 个区域的月份均值统计如图 2 所示, 显示了不同区域的 AOD 季节性变化规律。

区域 1 如图 2(a) 所示, 位于淮河以北, 燕山以南, 太行山以东, 基本位于华北平原边界内, AOD 最低的月份是 12 月份, 从 12 月到 7 月 AOD 值逐渐增高, 在 7 月达峰值, 6 月和 7 月的 AOD 值突破至 1 以上。华北平原大量的耕地、人口产生大量的气溶胶, 使得区域 1 的 AOD 值处于所有分区中最高的水平。区域 2 如图 2(b) 所示, 位于长江中下游地区, 以平原地形为主, 同时分布部分丘陵、小山脉。与华北平原区相比, 长江中下游地区的 AOD 值在 6 月至 7 月有一个急剧下降的阶段, 其他月份的波动情况与华北平原相似。考虑到长江中下游平原与华北平原相接, 其夏季 AOD 达到最高值的原因可能是相同的, 但不同的是长江中下游地区从 6 月下旬开始普遍进入梅雨期, 直到 7 月中旬才结束, 这导致长江中下游地区的 AOD 值在 6 月达到峰值后急剧下降, 形成了长江中下游地区的独特变化特征。

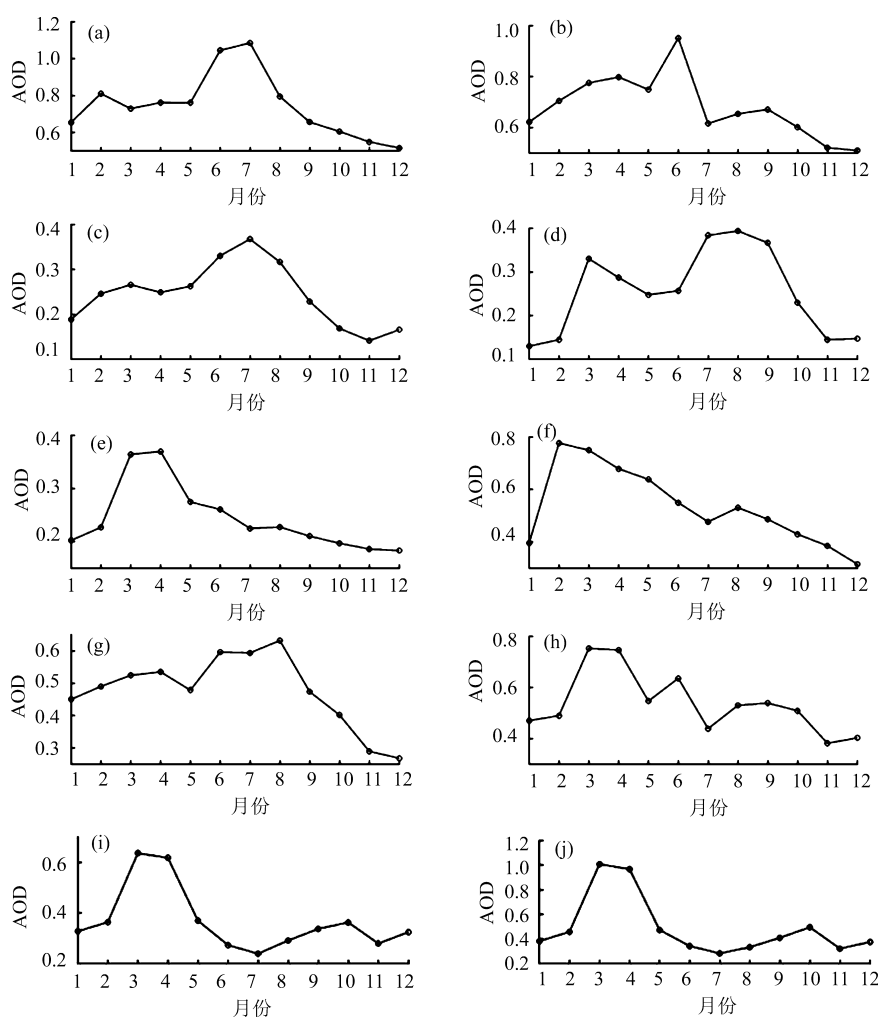


图 2 2008~2018 年 AOD 月份统计变化图 (a) 区域 1~(j) 区域 10

Fig.2 Monthly AOD time series from 2008 to 2018(a)region1~(j)region10

区域 3 如图 2(c) 所示, 由两部分组成, 一部分包括黄土高原北部, 阴山山脉; 另一部分包括成都以西的岷山, 邛崃山, 大雪山, 阿尼玛卿山。区域 3 是研究区中海拔最高的区域, 区域 3 的两个部分在空间上不相邻, 同时区域 4 如图 2(d) 所示也基本位于研究区中海拔较高的云南昆明周边。从图 2(c) 和 (d) 可以看出, 区域 4 与区域 3 除了春季 AOD 变化有所不同外, 其整体有着相似的值域和特征, 这说明有一定高

度海拔的地区有着相似的 AOD 变化规律。区域 4 与区域 3 在夏季达到 AOD 的峰值, 接近 0.4, 从夏季到秋季不断降低, 到初冬达到全年最低值, 最低达到 0.15, 不同的是, 区域 3 从初冬起 AOD 不断增高, 区域 4 的冬季 AOD 则基本保持稳定。

区域 5 如图 2(e) 所示, 位于兰州、银川及其西北方向的大部分地区, AOD 值在春季急剧增高, 夏季起又缓慢下降, 在 12 月份达到最低值, 秋季与冬季 AOD 值在 0.2 左右。该区域人口主要分布于黄河沿线的冲积平原中, 但是河流上游侧向侵蚀不强烈, 主要以下切侵蚀为主, 平原面积不大, 人口较少, 人为源的污染并不严重, 因此 AOD 值均处于较低的水平, 最高不超过 0.4。该区域 AOD 值季节性变化主要与沙尘暴有关, 该区域西北部分布有巴丹吉林、腾格里、乌兰布三大沙漠, 春季盛行西北风, 沙尘暴频繁袭扰, 致使春季的 AOD 值急剧增高, 而秋季西北风较少, 适于旅游, AOD 值处于最低的水平。

区域 6 如图 2(f) 所示, 位于四川盆地, AOD 在 12 月份最低, 从 12 月到 2 月 AOD 值急剧增高 0.4 以上, 从 3 月到 12 月又缓慢下降。四川盆地聚居大量人口, AOD 值最高可达 1 左右, 仅次于华北平原区。四川盆地夏季与秋季降水量大, 减轻了大气污染, 而冬季与春季降水量较少, AOD 值处于全年中较高的水平。区域 7 如图 2(g) 所示, 以陕西关中和陕南地区为主, 并包括周边部分城市。该区域包括多种地貌类型, 跨越不同的气候类型区, 造成这样分区结果的原因尚不明确。该区域在夏季 AOD 值最高, 秋季最低, 总体处于中等的水平, 月份间 AOD 波动较为频繁。区域 8 如图 2(h) 所示位于两广北部以及湖南、江西南部的大片地区, 从春季到秋季, AOD 值反复波动, 总体呈下降趋势, 从冬季到春季 AOD 急剧增高, 达到 0.7 以上。

区域 9 如图 2(i) 位于东南沿海地区, 包括台湾省、海南省和福建省。该区域主要受季风的影响较大, 5 月份起风从高压的海洋吹来, 带来了较纯净的空气, 夏季 AOD 普遍在 0.3 左右; 冬季春季受东南季风影响较小, 从陆地吹往海洋的风带来了内陆大量的污染物, 使得 AOD 处于较高的水平。区域 10 如图 2(j) 位于广东沿海、广西沿海及越南沿海, 与区域 9 的波动规律基本相同, 聚类分析将其分为两个变化类型的原因是区域 10 四个季节的 AOD 值均比区域 9 高 0.1 左右, 但是其波动规律基本相同, 是同一种变化规律。

3.2 年份变化分区及规律

图 1b 为年份变化分区结果, 年份变化分区共有 4 个区域。4 个区域的年份均值统计如图 3 所示, 显示了不同区域的 AOD 年际间变化规律。区域 1 如图 3(a), 包括华北平原, 太行山脉南部; 区域 2 如图 3(b),

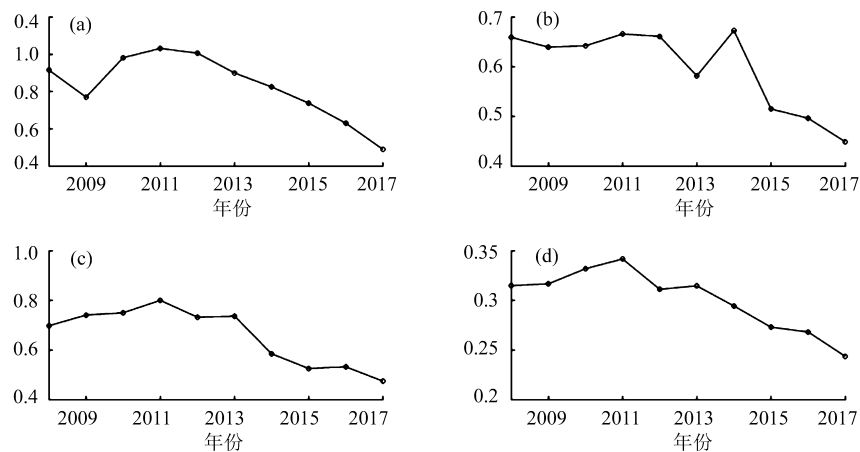


图 3 (a) 区域 1~(d) 区域 4 的 AOD 年份统计变化图

Fig.3 Interannual variation of AOD for (a) region 1~(d) region 4

主要包括淮河以南的南方地区; 区域 3 如图 3(c), 主要包括四川盆地, 关中平原, 汾河平原; 区域 4 如图 3(d), 包括黄河中上游, 陕南, 大部分高原山脉, 台湾省等剩余部分。总体来看, 四个分区的 AOD 值总体均呈下降趋势, 尤其是从 2012 年开始, 除了区域 2 外 AOD 值均不断降低, 区域 2 在 2014 年出现了反弹情况, 可能与 2014 年南方空气层稳定, 不利于污染物扩散有关。区域 4 一直处于 AOD 值较低的范围, 因此其下降幅度最小, 其余区域的 AOD 值均下降 0.3 左右, 这说明长期的环境治理有一定的效果。

4 讨论

从研究的结果来看, AOD 变化规律不仅与气候有关, 还与海拔地形、海陆分布及人口分布有关, 某个地区的变化规律并不可以单独由气候决定, 因此在之前的研究中, 单纯通过气候或地形来统计气溶胶光学厚度的均值略有不妥, 而统计某个行政区划内的气溶胶光学厚度就更加偏离 AOD 的本质变化规律。本研究从像元尺度分析气溶胶光学厚度的时间序列变化特征, 根据每个像元的时间变化情况进行分区, 再进一步统计 AOD 均值曲线, 避免了规律混杂问题, 得到了更准确的变化规律和波动尺度。但是每个像元的 AOD 时间序列曲线是多种驱动力共同作用的结果, 可能存在驱动力组合不同但 AOD 变化曲线相同的情况, 这就使得一些分区的结果没有实际意义(如月份变化区域 7)。同时由于这里选用的 MODIS MOD08M3 气溶胶产品分辨率为 1 度, 只适用于大尺度的时空研究, 因此分区结果也是在大尺度范畴内, 每一个分区中也可能包含很多更精细的时间变化规律, 有待进一步的研究。

5 结论

1) 基于聚类分析对 AOD 时间序列进行分析, 在季节间变化尺度上, 得到了 10 个分区结果, 主要包括 9 种变化类型区, 分别是: 华北平原区、长江中下游区、高原山脉区、云贵区、兰州 - 银川 - 阿拉善盟区、四川盆地区、关中陕南区、两广 - 湖南南部 - 江西南部区、东南沿海区。

2) 基于聚类分析对 AOD 时间序列进行分析, 在年际间变化尺度上, 得到 4 个分区结果, 第一个区域包括华北平原, 太行山脉南部; 第二个区域主要包括淮河以南的南方地区; 第三个区域主要包括四川盆地, 关中平原, 汾河平原; 第四个区域包括黄河中上游, 陕南, 大部分高原山脉, 台湾省等剩余部分。

3) 华北平原与长江中下游的 AOD 季节性时间序列变化规律较相似, 可能具有很多相同的影响因子, 不同的是长江中下游地区在 6 月中旬到 7 月中旬受梅雨影响较大, AOD 值急剧降低。

4) 空间上不相邻的多个高原山脉地区具有相似的季节性 AOD 时间序列变化规律, 说明 AOD 时间变化与海拔地形有关。

5) AOD 时间序列受东南季风强烈影响的省份主要有广西省、广东省和福建省, 受强烈影响的陆地纵深可能大约在 100~200 km 左右。

6) 10 年以来(2008 年 3 月至 2018 年 3 月), 中国中部和东部地区 AOD 显著降低, 尤其是人口稠密地区 AOD 降低幅度大, 这说明长期的环境治理有一定的效果。

参考文献:

- [1] Zhang C C, Zhou W X. *Atmospheric Aerosol Tutorial* [M]. Beijing: China Meteorological Press, 1995(in Chinese).
章澄昌, 周文贤. 大气气溶胶教程 [M]. 北京: 气象出版社, 1995.
- [2] Zhang H, Huang J P. Interpretation of the IPCC Fifth assessment report on anthropogenic and natural radiative forcing [J]. *Progressus Inquisitiones De Mutatione Climatis*, 2014, **10**(1): 40-44(in Chinese).
张 华, 黄建平. 对 IPCC 第五次评估报告关于人为和自然辐射强迫的解读 [J]. 气候变化研究进展, 2014, **10**(1): 40-44.
- [3] Ramachandran S. Aerosol optical depth and fine mode fraction variations deduced from moderate resolution imaging spectroradiometer (MODIS) over four urban areas in India [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2007, **112**(D16): D16207.
- [4] Zhao S W, Gao X Q. Analysis of spatio-temporal distribution and variation characteristics of aerosol Optical Depth over the Northwest of China by MODIS C6 Product [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(7):2637-2646(in Chinese).
赵仕伟, 高晓清. 利用 MODIS C6 数据分析中国西北地区气溶胶光学厚度时空变化特征 [J]. 环境科学, 2017, **38**(07): 2637-2646.
- [5] Deng X L, Deng W T, He D Y. Spatial-temporal features of atmospheric aerosol in east china in recent years [J]. *Transactions of Atmospheric Sciences*, 2010, **33**(03): 347-354(in Chinese).
邓学良, 邓伟涛, 何冬燕. 近年来华东地区大气气溶胶的时空特征 [J]. 大气科学学报, 2010, **33**(03): 347-354.
- [6] Bai S Y, Shi J Q, Pu J, et al. Spatio-temporal variations of aerosol optical depth in the Yangtze River Basin during 2000-2011 [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2012, **21**(09): 1567-1573(in Chinese).
白淑英, 史建桥, 卜 军, 等. 近年来长江流域气溶胶光学厚度时空变化特征分析 [J]. 生态环境学报, 2012, **21**(09): 1567-1573.
- [7] 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**(08): 3177-3184(in Chinese).
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**(08): 3177-3184.
- [8] Li X J, Gao L, Zhang X Y, et al. Global change of aerosol optical depth based on satellite remote sensing data [J]. *Science & Technology Review*, 2015, **33**(17): 30-40(in Chinese).
李晓静, 高 玲, 张兴赢, 等. 卫星遥感监测全球大气气溶胶光学厚度变化 [J]. 科技导报, 2015, **33**(17): 30-40.
- [9] Zhang X Y, Hu H B. Spatio-temporal characteristics of aerosol optical depth and their relationship with urbanization over Beijing-Tianjin-Hebei region [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2017, **41**(4): 797-810(in Chinese).
张西雅, 扈海波. 京津冀地区气溶胶时空分布及与城市化关系的研究 [J]. 大气科学, 2017, **41**(04): 797-810.
- [10] Xue W B, Wu W L, Wang J N, et al. Analysis on space-time characteristics of aerosol optical depth in china [J]. *Environment and Sustainable Development*, 2013, **38**(04): 17-20(in Chinese).
薛文博, 武卫玲, 王金南, 等. 中国气溶胶光学厚度时空演变特征分析 [J]. 环境与可持续发展, 2013, **38**(04): 17-20.
- [11] Levy R C, Mattoo S, Munchak L A, et al. The collection 6 MODIS aerosol products over land and ocean [J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2013, **6**(11): 2989-3034.

- [12] Hsu N C, Jeong M J, Bettenhausen C, *et al.* Enhanced deep blue aerosol retrieval algorithm:the second generation [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2013, **118**(16): 9296-9315.
- [13] Remer L A, Mattoo S, Levy R C, *et al.* MODIS 3 km aerosol product: algorithm and global perspective [J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2013, **6**(1): 69-112.
- [14] Wu D, Hou Y T, Zhang Y Q. Transporting real-time video over the internet challenges and approaches [J]. *Proceeding of the IEEE*, 2000, **88**(12): 1855-1875.
- [15] Zhou S B, Xu Z Y, Tang X Q. New method for determining optimal number of clusters in K-means clustering algorithm [J]. *Computer Engineering and Applications*, 2010, **46**(16): 27-31(in Chinese).
周世兵, 徐振源, 唐旭清. 新的 K-均值算法最佳聚类数确定方法 [J]. 计算机工程与应用, 2010, **46**(16): 27-31.
- [16] Zhang W J, Gu X F, Chen L F, *et al.* An algorithm for initalizing of K-means clustering based on mean-standard deviation [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2006, (05): 715-721(in Chinese).
张文君, 顾行发, 陈良富, 等. 基于均值 - 标准差的 K 均值初始聚类中心选取算法 [J]. 遥感学报, 2006, (05): 715-721.