

DOI: 10.5846/stxb201404240816

韦晶, 孙林, 刘双双, 段德宏, 郭亚敏, 米雪婷, 田信鹏, 于会泳. 大气颗粒物污染对土地覆盖变化的响应. 生态学报, 2015, 35(16): 5495-5506.
Wei J, Sun L, Liu S S, Duan D H, Guo Y M, Mi X T, Tian X P, Yu H Y. Response analysis of particulate air pollution to Land-use and land-cover change. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(16): 5495-5506.

大气颗粒物污染对土地覆盖变化的响应

韦 晶¹, 孙 林^{1,*}, 刘双双¹, 段德宏², 郭亚敏³, 米雪婷¹, 田信鹏¹, 于会泳¹

1 山东科技大学测绘科学与工程学院, 青岛 266590

2 山东科技大学科研处, 青岛 266590

3 北京师范大学全球变化与地球系统科学研究院, 北京 100875

摘要: 土地利用-覆盖变化(LUCC)直接或间接影响颗粒物污染。了解颗粒物污染对 LUCC 的响应, 对维护和改善生态环境具有重要的意义。基于卫星遥感技术, 从广域的空间尺度分析颗粒物污染对 LUCC 的响应。使用 MODIS 数据分别提取与颗粒物污染相关性较高的城市用地、林地等土地利用类型, 确定土地利用类型的变化趋势, 利用长时间序列 MODIS 气溶胶光学厚度(AOD, Aerosol optical depth)产品分析颗粒物污染与土地利用类型的变化的相关性。以山东省青岛市、淄博市、济南市 3 个典型城市为例, 研究了 AOD 随土地利用类型的变化趋势。同时, 考虑并分析了颗粒物污染对土地利用变化响应的敏感性, 以及城市区域变化对环境的影响。研究结果表明, 不同的城市类型, 由于决定环境变化主导因素的差异, 颗粒物污染对 LUCC 的响应具有明显的差异。青岛市地区, 由于受海洋影响显著, 大气颗粒物污染与 LUCC 的相关性较低, 如中度污染天气与林地的相关系数为-0.451; 而淄博市和济南市的相关系数分别为-0.473、-0.507。

关键词: 土地利用-覆盖变化(LUCC); 颗粒物污染; MODIS; 气溶胶光学厚度(AOD); 相关性分析

Response analysis of particulate air pollution to Land-use and land-cover change

WEI Jing¹, SUN Lin^{1,*}, LIU Shuangshuang¹, DUAN Dehong², GUO Yamin³, MI Xueting¹, TIAN Xinpeng¹, YU Huiyong¹

1 Geomatics College, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China

2 Department of Science and Technology, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China

3 College of Global and Earth System Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

Abstract: Land-use and land-cover change (LUCC) affects particulate matter pollution in the atmosphere, directly or indirectly. Atmospheric particulate matter is now the primary type of air pollutant and can seriously affect the life of people in the city. It is very important for ecological and environmental protection to understand and determine the atmospheric particulate matter pollution response to LUCC. In this paper, based on satellite remote sensing technology, we analyzed the responses of particle pollution to LUCC on a large scale. The experiments were carried out in three typical cities, Qingdao, Zibo, and Jinan, in Shandong Province. The aerosol optical depth (AOD) data in the last ten years from 2001 to 2010 from MODIS L1B products were chosen to define atmospheric particulate matter pollution. The main land use types including forest land and urban land were obtained from MODIS land use classification product (MOD12) to estimate the land cover change of each city. According to the atmospheric visibility, the particle pollution was divided into four levels: no pollution, slight pollution, medium pollution, and heavy pollution. The numbers of effective days for each air pollution level and the areas of each land use type in the three cities were counted to analyze the correlation of particle pollution with LUCC. The

基金项目: 山东省中青年科学家奖励基金(2011BSB01500); 山东省杰出青年基金(2012JQB01025); 国家科技支撑计划课题(2012BAH27B00); 研究生科技创新基金(YC140307)

收稿日期: 2014-04-24; **网络出版日期:** 2014-11-04

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: sunlin6@126.com

sensitivity of particle pollution to LUCC and the impact of urban change on particle pollution were also considered. There are three main conclusions: (1) the correlation between atmospheric particle matter pollution and LUCC is lower in Qingdao ($R = -0.451$) but higher in Jinan ($R = -0.473$) and Zibo ($R = -0.507$). (2) The influence of urban land on Zibo's atmospheric particulate matter pollution is higher than that of Qingdao. Forest land is the most important factor on particulate matter pollution in Jinan, with the correlation coefficient between the scale of forest land change and the four air pollution level weather changes of 0.176, 0.859, 0.753, and 0.309 respectively. (3) The response of atmospheric particle matter pollution to LUCC is obviously different in different cities due to different dominant factors.

Key Words: LUCC (Land-use and land-cover change); particle pollution; MODIS; AOD (aerosol optical depth); correlation analysis

近年来,随着我国城市化进程的加快,土地利用变化的快速发展,尤其是植被覆盖被建筑物所替代,导致地表吸附、阻挡扬尘的能力降低,带来一系列的生态环境问题,其中大气污染问题日益严重,城市建设、工业生产等都直接导致了空气中颗粒物的增加。大气颗粒物已经成为影响我国城市空气质量的首要污染物^[1-3],颗粒物污染问题愈发严重且来源比较复杂^[4-5],目前已经严重影响到人们的正常生产生活。

国内外学者利用遥感技术研究土地利用-覆盖变化的历史较长,并取得了较多成果,土地利用信息提取、过程趋势及驱动力分析是当前研究的重点内容,目前,土地利用-覆盖变化(LUCC)的研究主要集中在空间分布规律及变化趋势探讨^[6-9]、多源遥感数据的 LUCC 过程动态监测^[6,10]及 LUCC 对全球气候变化的影响、机理研究^[11-15]等方面。同时,气溶胶的研究在国内外已经广泛开展,其信息获取经历了由最初的地面实时监测到利用卫星遥感数据定量反演的过程。研究学者在气溶胶光学特性及时空分布规律^[16-18]、近地表颗粒物浓度预测与模拟^[19-21]、大气污染动态监测^[22-24]、全球气候变化影响^[25-26]等方面做了大量研究,并取得了较大进展。以往的研究对 LUCC、气溶胶的进一步发展具有重要的推动作用,然而对于 LUCC 与气溶胶之间关系的研究相对较少^[22],多针对短时间内的特定区域,缺乏长时间序列的研究。卫星遥感技术的不断发展为长时间土地覆盖信息及大气颗粒物污染信息的提取提供了便利。本文利用长时间序列 MODIS 数据研究大气颗粒物污染对 LUCC 的响应,探讨气溶胶随土地利用类型的变化趋势。

文中考虑到沿海地区由于受海洋环境的直接调节,空气质量受海洋影响比较明显,大气污染相对较轻;内陆地区远离海洋,空气质量受海洋影响较小,而城市扩张、森林砍伐等人为因素使绿色植被大面积减少,导致地表吸附颗粒物的能力降低,空气污染加重,森林、城市的变化对内陆地区空气质量的影响相对较大,初步推测城市大气颗粒物污染与土地覆盖变化存在着密切关系。因此,为探讨 LUCC 对大气颗粒物污染的影响,本文分别选取山东省青岛市、淄博市和济南市 3 个典型城市作为研究区,模拟沿海到内陆城市区域的变化,以 RS 和 GIS 为技术支撑,利用广尺度、长时间序列 MODIS 标准产品分别提取各城市近 10 年来土地覆盖信息与大气颗粒物污染时空分布信息,分析大气颗粒物污染与 LUCC 之间的相关性,确定 LUCC 对大气颗粒物污染的响应机制,该研究不但可以为区域和周边经济发展以及环境保护提供决策依据,而且对维持城市群生态环境安全也具有重要的理论和现实意义。

1 研究区与数据源介绍

1.1 研究区概况

本文以山东省的 3 个典型城市,青岛市、淄博市和济南市为研究对象,开展大气颗粒物污染与土地覆盖变化的响应分析研究。青岛市位于山东省东南部,太平洋西岸,东、南濒临黄海,由于海洋环境的直接调节,青岛受东南季风及海流等因素的影响比较明显,海洋性气候显著,属于典型的东部沿海城市;该市经济发展迅速,人口分布比较集中。淄博市位于山东省中部,地处暖温带,属半湿润、半干旱的温带季风气候;是全国重要的石油化工基地,重工业发展迅速、经济发达。济南市位于山东省西部,南依泰山,北跨黄河,属于暖温带半湿润

季风型气候;全市工业、软件等产业快速发展,旅游资源非常丰富,人口分布集中。3 个城市横向分布,由沿海到内陆延伸,空间分布规律明显(图 1)。

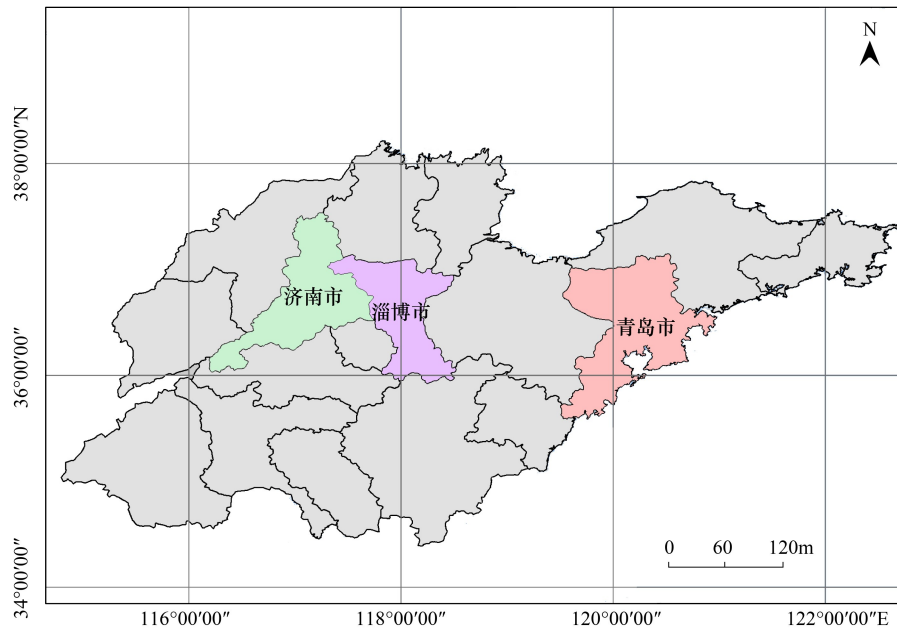


图 1 研究区地理位置示意图

Fig.1 Location of the research area

1.2 数据源及预处理

1.2.1 数据源介绍

文章所需的数据源主要包括 2001—2010 年山东省青岛、淄博和济南 3 个城市的大气颗粒物污染数据和土地覆盖分类数据,两种数据主要来源于 MODIS 标准产品,其中还包括 Landsat TM、ETM+、MODIS 地表反射率产品等辅助数据,以上数据均统一到同一投影和坐标系中,采用的投影为阿尔伯斯圆锥等面积投影(Albers conical equal area projection),简称阿尔伯斯投影,坐标系为 WGS-1984,所有数据在处理过程中保证像元大小一致。本文研究所采用的数据统一来源于 <http://ladsweb.nascom.nasa.gov/data/search.html>,具体介绍如表 1 所示。

表 1 数据源介绍

Table 1 The introduction of data sources

数据源 Data sources	数据产品 Data product	数据描述 Data description	时间序列 Time series
MODIS 产品	MOD04	10km 大气气溶胶产品	2001—2010 年第 150—245 天数据
MODIS product	MOD09A1	500m 地表反射率 8d 合成数据产品	2001—2010 年夏季 8 月份各四景数据
	MOD12Q1	1km 地表覆盖类型 96d 合成 产品	2001—2010 年土地覆盖分类数据
其他数据 Other data	Landsat TM、ETM+等	30m 卫星数字产品	2001—2010 年 8 月份数据

本文使用的大气颗粒物污染数据是 MODIS Level 2 中的气溶胶产品(MOD04)。MODIS(中分辨率成像光谱仪)是搭载在 Terra 和 Aqua 上的重要传感器,具有 36 个光谱通道,分布在可见光、近红外到热红外波谱范围内,刈幅宽达到 2330km。MODIS 数据因重访周期短、数据质量高的特点,被广泛应用到资源环境监测、全球气候变化等多个方面;同时,基于 MODIS 的提取结果,NASA 业务化提供了表观反射率、云、气溶胶、土地覆盖等多种标准产品,其中 MOD04 是 NASA 提供的气溶胶产品,该产品包括 470、550、660nm 等 7 个波长处逐日

的气溶胶数据,陆地地区的气溶胶数据是通过浓密植被法反演获得,该产品在近地面颗粒物浓度模拟转换、大尺度地区气溶胶研究等方面得到广泛应用^[16-20,27]。文中分别提取青岛、淄博、济南 3 个城市 2001—2010 年夏季的 MOD04 数据,时间为每年第 150—245 天,共 96d。

土地覆盖数据是根据山东省 3 个典型城市近年来的土地利用变化特点,以林地、城市用地 2 种主要土地利用类型来分析二者的相关性。林地是使用 MODIS 土地覆盖分类产品(MOD12Q1),该数据主要根据国际生物圈计划的分类系统,利用决策树和人工神经网络的分类算法分类得到^[28],共包含 5 种土地利用分类方案,空间分辨率为 500m。该产品是区域土地覆盖变化监测的重要数据源,已被广泛应用到土地利用变化动态监测、土地覆盖及土地利用分类研究中,研究表明,MODIS 土地覆盖产品在中国区域有较高的整体分类精度^[29],尤其对于大面积的主要自然植被类型如作物、林地、草地等,分类精度较高。城市用地选用 MODIS 8d 合成的地表反射率产品(MOD09A1),该数据是经过大气校正和气溶胶订正后作进一步处理后生成的栅格化 3 级数据产品(L3G),是表面波谱的反射估计,包含了 8d 之内最有可能的 L2G 观测数值,空间分辨率为 500m。文中分别提取青岛、淄博、济南 3 个城市 2001—2010 年 MOD12Q1 数据及每年 8 月份各四景 MOD09A1 数据。

1.2.2 数据预处理

本文涉及到的数据处理主要包括气溶胶数据及土地覆盖类型数据的获取、投影转换、影像裁剪、数据合成、类别合并及信息统计等。对于 MOD04 气溶胶数据,文中研究采用的是 550nm 波长处的 AOD 数据集,为保证投影信息一致,首先对 AOD 数据进行投影转换,即由原来的正弦曲线投影转为 Albers 投影,AOD 数据处理主要包括两个方面:季度合成和日均 AOD 计算。在数据处理过程中,获取的 MOD04 气溶胶产品中普遍存在两个问题:部分数据有效观测值较少及数据中存在奇异值,因此,为保证本文研究的精度,文中对获取的气溶胶数据逐一进行筛选,仅保留有效气溶胶数据(影像中有效像元数大于等于 50% 视为有效数据),利用公式(1)和(2)对气溶胶数据进行季度合成和日均 AOD 计算,在计算过程中剔除数据中的无效像元值及奇异值。

$$AOD_{QS} = \left[\sum_{s=1}^S (AOD(s)) \right] / S \quad (1)$$

$$AOD_{Avg} = \left[\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (AOD(i,j)) \right] / N \quad (2)$$

式中, AOD_{QS} 表示气溶胶季度合成数据, AOD 表示有效气溶胶数据,总数为 S , s 表示第 s 幅数据; AOD_{Avg} 表示日均 AOD 值, $AOD(i,j)$ 表示数据中第 i 行 j 列像元值, N 表示有效像元总数,其中 $N=m \times n$ 。

图 2 为青岛、淄博、济南 2001—2010 年夏季气溶胶空间分布图,可以看出 10 年间 3 个城市夏季气溶胶的空间分布现状和变化规律:青岛市 AOD 浓度整体较低,空气污染程度较小,淄博市、济南市的 AOD 浓度明显高于青岛市,空气污染相对严重;同时,各城市 AOD 浓度的年际变化规律不稳定,波动起伏较大,不同城市的空气污染年际变化情况也有所不同。

文中考虑到大气能见度(V)与空气污染之间的相关关系,把能见度分为 4 个等级。 V 在 10km 以上时,颗粒物浓度低,大气污染轻,可视为无污染天气; V 在 5—10km 时,大气污染较轻,空气质量稍差,为轻微污染天气; V 在 2.5—5km 时,大气污染较为严重,空气质量较差,为中度污染天气;然而在 V 不足 2.5km 时,空气质量差,为重度污染天气。根据 Koschmieder 提出的能见度与光学厚度的相关关系^[30],

$$AOD_{TH} = \frac{3.91H}{V} \quad (3)$$

式中, H 为标高(km), V 为大气能见度, AOD_{TH} 为计算得到的 AOD 划分阈值。以上能见度可与本文使用的光学厚度直接对应(表 2),对日均 AOD 数据按照表 2 进行分段处理,分别统计青岛、淄博、济南 3 个城市各空气等级污染天气出现的天数,并计算其有效百分比,表 3 为统计结果。

对于 MOD12Q1 土地覆盖分类数据,本文选择国际地圈生物圈计划(IGBP)全球植被分类方案,数据处理主要包括投影转换和土地利用类型合并。文中参照中国土地资源分类系统对 IGBP 分类体系进行类别合并(表 4),最终分为水体、林地、草地、耕地、城市用地及未利用地 6 类,以此提取林地信息。MOD09A1 地表反射

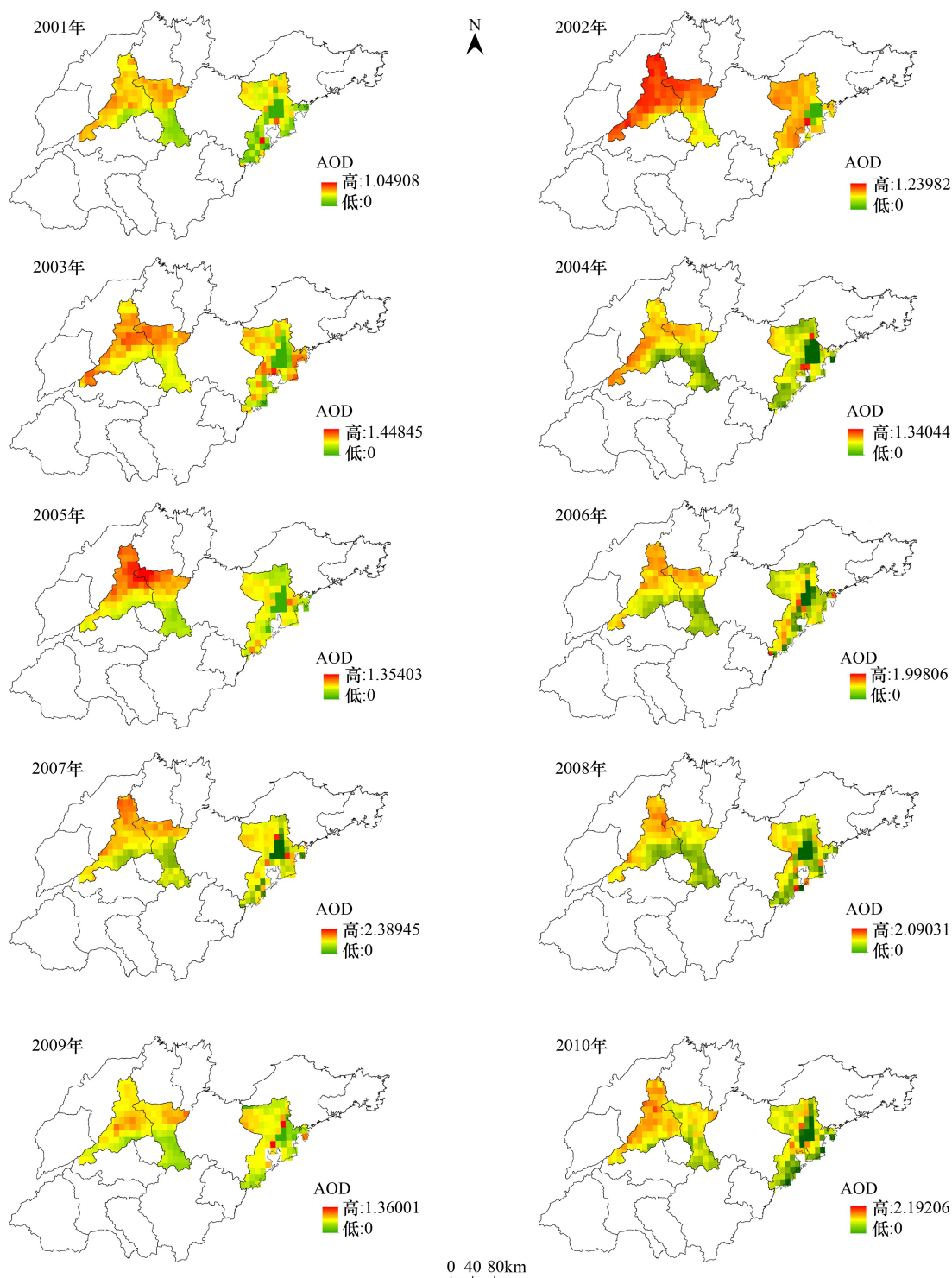


图2 山东省典型城市 2001—2010 年夏季气溶胶空间分布图

Fig.2 The summer aerosol space distribution of Shandong typical cities from 2001 to 2010

率数据的处理主要为去云处理,文中对每年获取的 4 景 MOD09A1 数据利用最小值合成法合成一幅无云影像,计算归一化建筑指数(NDBI)^[31],突出影像中的城市用地信息;城市信息提取,文中考虑到城市用地面积相对较小,具有整体集中、局部分散的特点,分布散落的城市在遥感影像中受周围地物的影响较大,在分类过程中容易出现错分现象,导致分类精度较低。因此,为保证城市用地的提取精度,本文采用遥感目视解译与参考研究区 NDBI、高分辨率遥感影像等辅助数据相结合的手段提取城市用地信息。NDBI 的计算公式如下所示:

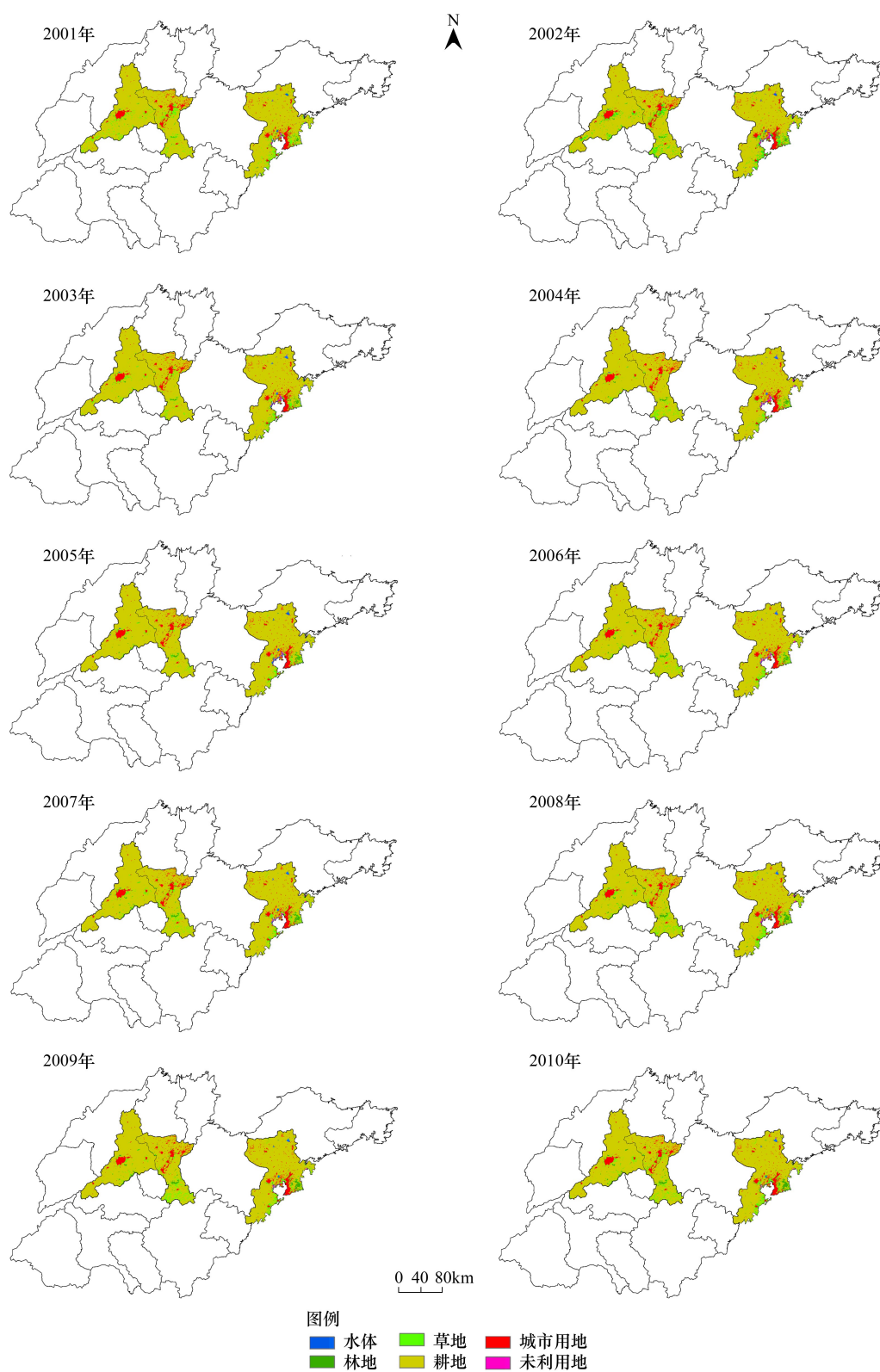


图3 山东省典型城市 2001 年—2010 年土地利用分类图

Fig.3 The land use classification of Shandong typical cities from 2001 to 2010

$$NDBI = \frac{R_{SWIR} - R_{NIR}}{R_{SWIR} + R_{NIR}} \quad (4)$$

式中, R_{SWIR} 和 R_{NIR} 表示短波红外和近红外波段的光谱反射率, 分别对应 MOD09A1 数据的第 6 和第 2 波段。

表 2 空气质量等级划分标准
Table 2 Air pollution level division standard

气溶胶光学厚度阈值 AOD _{TH} Aerosol optical depth threshold	级别 Level	描述 Description
≤ 0.3	I	V>10km, 大气污染轻, 空气质量好
0.3—0.8	II	5<V≤10km, 大气污染较轻, 空气质量一般
0.8—1.5	III	2.5<V≤5km, 大气污染较严重, 空气质量较差
> 1.5	IV	V≤2.5km, 大气污染严重, 空气质量差, 多为沙尘、灰霾天气

表 3 山东省典型城市 2001—2010 年空气污染天数有效百分比统计/%
Table 3 Air pollution level effective percentage statistics in the typical cities of Shandong from 2001 to 2010

年份 Year	青岛市				淄博市				济南市			
	I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II	III	IV
2001	32.61	52.17	13.04	2.17	34.55	49.09	16.36	0.00	15.79	70.18	12.28	1.75
2002	29.23	38.46	27.69	4.62	23.61	34.72	34.72	6.94	21.13	30.99	39.44	8.45
2003	34.55	34.55	18.18	12.73	21.05	38.60	29.82	10.53	9.09	45.45	34.55	10.91
2004	28.85	48.08	23.08	0.00	40.74	46.30	12.96	0.00	31.15	40.98	24.59	3.28
2005	24.07	50.00	20.37	5.56	13.79	55.17	27.59	3.45	19.05	49.21	19.05	12.70
2006	50.00	26.79	19.64	3.57	17.86	50.00	26.79	5.36	7.94	58.73	25.40	7.94
2007	25.93	50.00	12.96	11.11	18.52	51.85	25.93	3.70	11.32	41.51	37.74	9.43
2008	23.40	55.32	17.02	4.26	20.00	58.00	20.00	2.00	20.00	40.00	32.00	8.00
2009	35.29	54.41	8.82	1.47	29.03	53.23	12.90	4.84	32.84	46.27	13.43	7.46
2010	20.45	54.55	20.45	4.55	20.00	54.29	20.00	5.71	18.60	48.84	18.60	13.95

表 4 土地利用分类标准
Table 4 Land use classification standard

分类标准 Classification standard	类别合并 Class merge	国际地圈生物圈计划分类体系 IGBP (International Geosphere Biosphere Programme) classification system	土地利用类别描述 Land use type description
土地利用类型 Land use type	水体	水体	江、河、湖泊、海及水库等
	林地	常绿阔叶林	以木本为主, 植被覆盖率大于 60%, 高度大于 2m
		常绿针叶林	
		落叶阔叶林	
		落叶针叶林	
	草地	混交林	地表主要是草本植被覆盖
		草地	
耕地	耕地	农田	土地表面为作物所覆盖
		农田/自然植被混合用地	由农用地、林地、灌丛和草地混合而成
	城市用地	建筑用地	地表为建筑物或其他人为结构覆盖
	未利用地	裸土、沙地、岩石、冰雪等	一年中植被覆盖不超过 10%

土地分类结果更新, 文中将遥感目视解译提取的城市用地替代 MOD12Q1 中的城市用地, 同时更新分类结果, 得到山东省 3 个典型城市 2001—2010 年土地利用分类图(图 3), 由图 3 可以看出, 3 个城市主要以耕地为主, 所占面积达到 80% 以上, 分布较为稳定; 水体、草地、未利用地所占面积较小, 年际变化不明显, 而林地与城市用地的变化相对较为明显; 信息统计, 文中分别统计青岛、济南、淄博 10 年间林地和城市用地的面积, 进行百分比统计, 表 5 为统计结果。

表 5 山东省典型城市 2001—2010 年土地覆盖类型面积百分比统计/%

Table 5 Land use cover area percentage statistics in the typical cities of Shandong from 2001 to 2010

年份 Year	青岛市		淄博市		济南市	
	林地 Forest land	城市用地 Urban land	林地 Forest land	城市用地 Urban land	林地 Forest land	城市用地 Urban land
2001	1.04	7.87	1.65	8.57	1.26	4.65
2002	0.72	7.34	1.07	9.95	0.53	4.60
2003	0.89	10.35	1.27	9.02	0.79	5.79
2004	0.93	9.48	1.37	8.77	0.77	5.70
2005	1.30	10.02	1.70	9.56	1.07	5.47
2006	1.30	10.19	2.17	9.79	1.39	5.65
2007	1.48	10.00	2.09	9.39	1.27	5.74
2008	2.05	10.69	3.03	9.78	1.82	6.14
2009	1.95	10.29	2.93	9.37	2.07	6.25
2010	2.23	10.77	2.81	10.77	2.04	6.46

2 颗粒物污染对 LUCC 的响应分析

本文选用皮氏积矩相关系数 (PPCC) 分析 LUCC 与大气颗粒物污染之间的相关性,该数值是用来衡量两个随机变量之间线性相关程度的指标,取值范围为 $[-1, 1]$,通常 R 表示样本的相关系数,该方法简单灵活,已被广泛的应用于各个领域。相关系数的具体计算公式如下所示:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \cdot \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (5)$$

2.1 LUCC 对颗粒物污染的影响趋势分析

为了探讨城市颗粒物污染随土地覆盖变化的发展趋势,分别计算 2001—2010 年青岛、淄博、济南三个城市各空气污染等级天气与林地、城市用地之间的相关系数(表 6),结合表 3、表 5 中的统计数据,分析两者之间的相关性,确定青岛、淄博、济南颗粒物污染随 LUCC 的变化趋势。

表 6 LUCC 与颗粒物污染相关系数表

Table 6 The correction coefficient statistics between LUCC and particulate matter pollution change

城市 City	地类 Land types	I	II	III	IV
青岛市	林地	-0.328	0.590	-0.451	-0.132
	城市用地	-0.075	0.146	-0.322	0.241
淄博市	林地	0.239	0.808 **	-0.473	-0.151
	城市用地	-0.615 *	0.224	0.312	0.367
济南市	林地	0.177	0.252	-0.507	-0.206
	城市用地	-0.171	-0.169	-0.138	0.465

* 表示在 0.05 水平(双侧)上显著相关; ** 表示在 0.01 水平(双侧)上显著相关

由表 3 可以看出青岛市各空气污染等级天气的年际变化不稳定,起伏变化较大,其中城市高污染天气(包含中度污染、重度污染天气)所占比例明显低于淄博市和济南市,空气污染相对较低。由表 5 可以发现青岛市林地、城市用地整体呈现增长的趋势,其中城市扩张速度较快,10 年来城市面积增加了 3 个多百分点,而由表 6 可以看出林地、城市用地与颗粒物污染之间的相关性相对较差,尤其与极端的无污染、重度污染天气间的相关性整体偏低,相关性多出现相反交叉的情况。产生该现象的原因主要是青岛市作为典型的沿海城市,

受海洋性季风气候影响明显,气候湿润,夏季受西太平洋副热带高压控制,东南季风显占优势,降水、风速等因素可显著稀释城市空气中的污染物,有效降低城市的大气污染^[32],林地、城市用地对颗粒物污染的影响低于海洋的直接调节作用,致使两者之间的相关性较差。

由表 3 可以看出淄博市整体呈现无污染天气减少、重度污染天气增加的趋势,空气质量逐渐恶化。由表 5 可以发现淄博市城市用地整体呈现增加的趋势,林地面积在近几年来逐渐减少。结合表 6 可以看出林地、城市用地与颗粒物污染之间具有较高的相关性,林地与低污染天气(包含无污染、轻微污染天气)均表现为正相关,而与高污染天气均表现为负相关,其中林地与轻微污染天气的响应系数达到 0.808,在置信度为 99%(双侧)显著相关;同时,城市用地与无污染天气存在明显的负相关性,相关系数为 0.615,而与其他天气均呈为正相关,且相关性逐渐增加(R 分别为 0.224、0.312 和 0.367)。可以说明,随着城市用地不断扩张,特别是近年来林地减少,导致地表吸附颗粒物的能力下降,城市高污染天气有明显增加、低污染天气有明显减少的趋势,城市空气污染进一步加重。

由表 3 可以看出,济南市高污染天气所占比例明显高于青岛市和淄博市,空气污染较为严重,但整体呈现减少的趋势,空气质量逐渐得到改善。由表 5 可以看出,济南市林地、城市用地面积均呈现稳定增加的趋势,10a 内林地和城市用地的面积分别增加了 1.5、1.8 个百分点左右。结合表 6 可以看出林地与低污染天气均存在正相关性,而与高污染天气均存在较高的负相关性,相关系数分别为-0.507、-0.206;而城市用地与重度污染天气存在较高的正相关性,相关系数为 0.465,而与其他空气污染天气均表现为负相关。林地与颗粒物污染之间的相关性整体高于城市用地,可以说明,随着济南市林地面积的不断增加,地表吸附颗粒物的能力有所提高,高污染天气有明显减少,低污染天气有不断增加的趋势,城市空气污染逐步减轻,空气质量得以改善。

2.2 LUCC 对颗粒物污染的影响程度分析

由于地理位置、自然和人文条件等因素的不同,不同的土地覆盖类型对城市颗粒物污染的影响程度可能存在较大的差异,为进一步探讨颗粒物污染对 LUCC 的响应程度,文中分别计算了 2001—2010 年青岛、淄博、济南各空气污染等级天气与林地、城市用地变化幅度之间的相关性(表 7),同时,绘制 3 个城市各空气污染天气与土地覆盖变化幅度曲线图(图 4),结合表 7 和图 4 具体展开 LUCC 对颗粒物污染影响程度的分析。

尽管青岛市 LUCC 与颗粒物污染之间的变化趋势不明显,两者间相关性较低,但城市用地对颗粒物污染仍具有一定的影响。结合表 7 和图 4 可以得出,城市用地与重度污染天气变化幅度之间呈现较高的正相关性,相关系数为 0.511,图中除 2007 年外,两条曲线的变化趋势基本一致;而与轻微污染、中度污染天气均存在负相关性,由图中可以明显看出,除少数年份外,轻微污染、中度污染天气与城市用地的变化趋势整体相同,即城市用地与重度污染天气的变化规律存在较好的一致性,与其他空气污染等级天气基本相反,可以说明城市的不断扩张对青岛市颗粒物污染产生了一定的副作用,在一定程度上增加了空气中的颗粒物浓度。

表 7 LUCC 与颗粒物污染变化幅度相关系数表

城市 City	地类 Land types	ΔI	ΔII	ΔIII	ΔIV
青岛市	林地	-0.309	0.415	-0.159	0.028
	城市用地	0.146	-0.163	-0.403	0.511
淄博市	林地	0.102	-0.260	0.006	0.106
	城市用地	-0.561	-0.389	0.759 *	0.374
济南市	林地	-0.176	0.859 **	-0.753 *	-0.309
	城市用地	-0.325	0.413	-0.161	-0.072

* 表示在 0.05 水平(双侧)上显著相关; ** 表示在 0.01 水平(双侧)上显著相关

由上述分析可知林地、城市用地均能较好地反映淄博市颗粒物污染的变化趋势,其中城市用地对颗粒物污染的影响最为明显。由表 7 和图 4 可以得出,城市用地与高污染天气变化幅度之间存在明显的正相关性,其中城市用地与中度污染天气的相关系数达到 0.759,在置信度为 95%(双侧)显著相关,图中城市用地与中

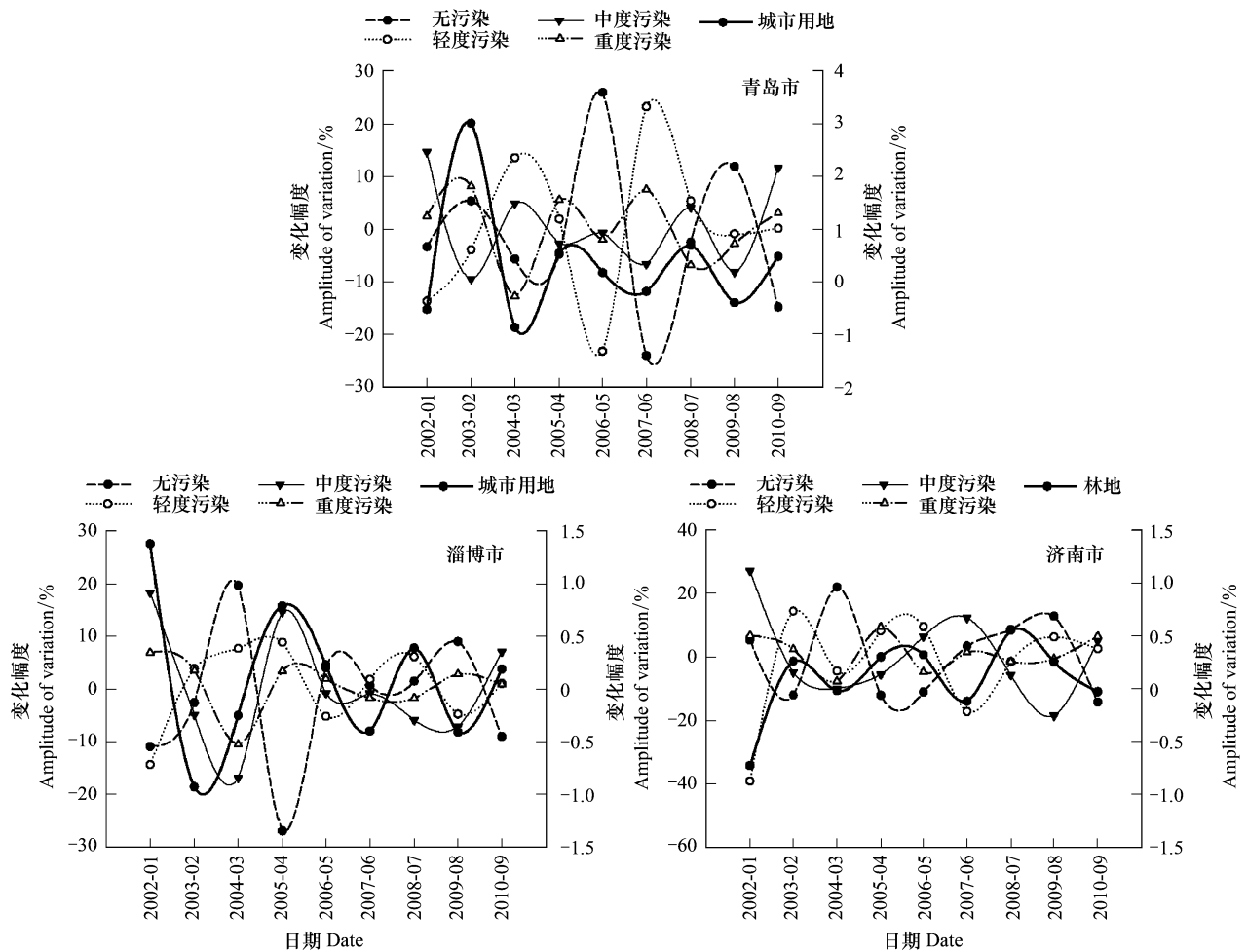


图4 空气污染天气与土地覆盖变化幅度曲线图

Fig.4 The graph of the scale of air pollution weather change and LUCC

度污染、重度污染天气的变化趋势几乎一致;与低污染天气呈现明显的负相关性,图中可以看出两条曲线变化趋势正好相反,即城市用地与高污染天气的变化规律比较一致,而与低污染天气的变化规律刚好相反。造成该现象的原因主要是淄博市作为全国重要的重工业生产基地,近年来城市用地面积的不断增长,主要体现在工业用地的不断扩张,然而工业扩张建设、工业生产等人为活动直接导致空气中颗粒物浓度的增加,带来严重的颗粒物污染,进一步加重了城市的大气污染程度。

由上述分析可知林地、城市用地对济南市颗粒物污染的影响趋势均比较明显,其中林地对颗粒物污染的影响程度最大。由表7和图4可以得出,林地与无污染天气变化幅度之间呈现负相关性,而由图中可以看出2006年后两条曲线的变化趋势基本相同;与轻度污染天气存在非常高的正相关性,相关系数达到0.859,在置信度为99%(双侧)显著相关,两条曲线变化趋势几乎一致;而与高污染天气均呈现明显的负相关性,相关系数分别为-0.753(在置信度为95%(双侧)显著相关)、-0.309,图中除极少数年份外,两者之间的变化趋势正好相反,即林地与高污染天气的变化规律基本一致,而与低污染天气的变化规律正好相反。造成该现象的原因主要是济南市城市空间格局较为稳定,城市扩张缓慢,而济南林业建设成为该市发展规划的重要产业,近年来呈现出持续、快速发展的良好态势,林地的不断增加,对颗粒物的吸收、净化作用增强,有效降低了空气中的颗粒物污染。

2.3 影响颗粒物污染的主导因素变化分析

考虑到不同的地区,影响颗粒物污染的主导因素可能不同,文中通过分析在城市类型由沿海到内陆的变

化中,颗粒物污染与 LUCC 之间的相关性变化,探讨影响和决定城市环境主导因素的变化规律。

由表 6 可以看出,青岛市、淄博市、济南市林地与高污染天气均呈现负相关性,相关系数逐渐增加,其中林地与中度污染天气的相关性变化比较明显,相关系数分别为 -0.451 、 -0.473 、 -0.507 ;城市用地与重度污染天气均呈现正相关性,相关性逐渐增加,响应系数分别为 0.241 、 0.367 、 0.465 。林地、城市用地与青岛市颗粒物污染之间的相关性相对较低,在由沿海到内陆城市类型的变化中,两者之间的相关性逐渐提高。由表 7 可以得出,城市用地的变化对淄博市颗粒物污染的影响明显高于济南市和青岛市,两者之间存在更高的相关性,相关系数分别为 -0.561 、 -0.389 、 0.759 和 0.374 ;林地的变化对济南市颗粒物污染的影响最明显,两者之间的相关性最高,响应系数分别为 -0.176 、 0.859 、 -0.753 和 -0.309 ,整体来看,林地、城市用地对淄博市、济南市颗粒物污染的影响程度明显高于青岛市。

综合上述,青岛市作为典型的东部沿海城市,海洋成为影响该市空气污染的主导因素,受海洋的影响显著,颗粒物污染对林地、城市用地对的响应不敏感;淄博市、济南市作为典型的内陆城市,距海较远,受海洋影响较小,城市用地对淄博市颗粒物污染的影响比较明显,两者存在较好的相关性;林地对济南市颗粒物污染的影响非常明显,两者之间的相关性较高。LUCC 对城市颗粒物污染的影响具有较大的差异,在由沿海到内陆城市类型的变化中,颗粒物污染的对城市用地、林地变化的响应逐步增强。

3 结论与讨论

文中利用长时间序列的 MODIS 标准产品数据,分别提取青岛、淄博、济南 3 个城市 2001—2010 年夏季的气溶胶数据及林地、城市用地两种主要土地利用类型,对气溶胶数据进行分段、分级处理。分别从林地、城市用地对城市颗粒物污染的影响趋势、影响程度及城市颗粒物污染的主导因素变化 3 个方面进行相关性分析,最终得出以下结论:(1)由于受海洋因素的直接调节,土地覆盖变化与青岛市颗粒物污染之间的相关性较低;而林地、城市用地与济南市、淄博市颗粒物污染存在较高的相关性。(2)城市用地对淄博市颗粒物污染的影响程度整体高于青岛市,而林地对济南市颗粒物污染的影响最大,其中林地与各空气污染等级天气变化幅度之间的相关系数分别达到 -0.176 、 0.859 、 -0.753 、 -0.309 ,相关性显著。(3)不同的城市类型,颗粒物污染对 LUCC 的响应存在明显的差异,在由沿海到内陆城市类型的变化中,影响和决定城市环境的主导因素由海洋因素逐渐转变为城市用地、林地。

本文的分析结果较好地解释了大气颗粒物分布与不同类型区域地表覆盖变化的相关性,在一定程度上可以为区域发展规划提供借鉴作用。本文的研究同时存在以下几个问题:(1)在颗粒物空间分布与地表覆盖变化相关性因素的表达上,本文对地表类型的分析,受数据源以及分析手段的限制,仅使用了选择区域内几个主要的地表类型,探讨其变化与颗粒物空间分布的相关性,而实际上对颗粒物空间分布影响的地表因素很多,且随区域的空间位置和职能特征有较大的相关性,因此,在该方法向其它区域的推广上受到一定限制。基于更为复杂地表系统的分析有待于以后的工作中继续完善;(2)尽管在研究的过程中,对数据源进行了精心的筛选和严密的质量控制,但受当前定量遥感以及地物类型信息提取技术水平的限制,大气颗粒物污染数据和地表覆盖类型数据仍存在一定的误差,会对分析的相关性结果有相应的影响,所以在使用不同时期、不同数据源分析时,在相似趋势的框架下,相关性大小上可能会有相当的差异;(3)本文在分析二者的相关性时,用到的颗粒物污染数据是整层大气颗粒物的光学参数,而人类所接触最多的是近地表颗粒物数据,尽管当前的研究表明二者具有较高的相关性,但却并不十分吻合,所以分析的结果与常识性的感受可能会有一定的差异。

致谢:美国 NASA 网站提供大气气溶胶数据和地表覆盖类型数据,北京林业大学黄华国教授对写作给予帮助,特此致谢。

参考文献 (References):

- [1] Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China. 2011 Report on the State of the Environment in China. Beijing: Ministry of

- Environmental Protection of the People's Republic of China, 2011.
- [2] Huang D S, Xu J H, Zhang S Q. Valuing the health risks of particulate air pollution in the Pearl River Delta, China. *Environmental Science and Policy*, 2012, 15(1): 38-47.
- [3] 范雪波, 刘卫, 王广华, 林俊, 伏晴艳, 高松, 李燕. 杭州市大气颗粒物浓度及组分的粒径分布. *中国环境科学*, 2011, 31(1): 13-18.
- [4] Wang H, Zhuang Y, Wang Y, Sun Y, Yuan H, Zhuang G, Hao Z. Long-term monitoring and source apportionment of PM_{2.5}/PM₁₀ in Beijing, China. *Journal of Environmental Sciences*, 2008, 20(11): 1323-1327.
- [5] Gu J X, Bai Z P, Li W F, Wu L P, Liu A X, Dong H Y, Xie Y Y. Chemical composition of PM_{2.5} during winter in Tianjin, China. *Particulology*, 2011, 9(3): 215-221.
- [6] Turner B L II, Lambin E F, Reenberg A. The emergence of land change science for global environmental change and sustainability. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2007, 104(52): 20666-20671.
- [7] Lambin E F, Turner B L II, Geist H, Agbola S, Angelsen A. The causes of land use and cover change: Moving beyond the myths. *Global Environmental Change*, 2001, 11(4): 261-269.
- [8] Ojima D S, Galvin K A, Turner B L II. The global impact of land use change. *BioScience*, 1994, 44(5): 300-304.
- [9] DeFries R, Bounoua L, Collatz G J. Human modification of the landscape and surface climate in the next fifty years. *Global Change Biology*, 2002, 8(5): 438-458.
- [10] Garik G, Janetos A C, Justice C O, Moran E F, Mustard J F, Rindfuss R R, Skole D, Turner B L II, Cochrane M A. *Land Change Science: Observing, Monitoring and Understanding Trajectories of Change on the Earth's Surface*. Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 2004.
- [11] 刘纪远, 张增祥, 庄大方, 王一谋, 周万村, 张树文, 李仁东, 江南, 吴世新. 20 世纪 90 年代中国土地利用变化时空特征及其成因分析. *地理研究*, 2003, 22(1): 1-12.
- [12] 刘纪远, 张增祥, 徐新良, 匡文慧, 周万村, 张树文, 李仁东, 颜长珍, 于东升, 吴世新, 江南. 21 世纪初中国土地利用变化的空间格局与驱动力分析. *地理学报*, 2009, 64(12): 1411-1420.
- [13] 刘纪远, 邵全琴, 延晓冬, 樊江文, 邓祥征, 战金艳, 高学杰, 黄麟, 徐新良, 胡云峰, 王军邦, 匡文慧. 土地利用变化对全球气候影响的研究进展与方法初探. *地球科学进展*, 2011, 26(10): 1015-1022.
- [14] Lambin E F, Linderman M. Time series of remote sensing data for land change science. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2006, 44(7): 1926-1928.
- [15] Pongratz J, Reick C H, Raddatz T, Claussen M. Biogeophysical versus biogeochemical climate response to historical anthropogenic land cover change. *Geophysical Research Letters*, 2010, 37(8): L08702.
- [16] 李成才, 毛节泰, 刘启汉, 陈介中, 袁自冰, 刘晓阳, 朱爱华, 刘桂青. 利用 MODIS 研究中国东部地区气溶胶光学厚度的分布和季节变化特征. *科学通报*, 2003, 48(19): 2094-2100.
- [17] 李成才, 毛节泰, 刘启汉, 袁自冰, 王美华, 刘晓阳. MODIS 卫星遥感气溶胶产品在北京市大气污染研究中的应用. *中国科学 D 辑-地球科学*, 2005, 35(增刊): 177-186.
- [18] 陈好, 顾行发, 程天海, 余涛, 李正强. 中国地区气溶胶类型特性分析. *遥感学报*, 2013, 17(6): 1559-1571.
- [19] Wang J, Christopher S A. Intercomparison between satellite-derived aerosol optical thickness and PM_{2.5} mass: Implications for air quality studies. *Geophysical Research Letters*, 2003, 30(21): doi: 10.1029/2003GL018174.
- [20] Lau K H, Li C C, Mao J T, Chen J C. A new way of using MODIS data to study air pollution over Hong Kong and the Pearl River Delta. *Proceedings of the SPIE*, 2003, 4891: 105-114.
- [21] 孙娜. 珠三角地区可吸入颗粒物的遥感监测及其与下垫面的相关性分析. 北京: 中国地质大学(北京), 2013.
- [22] Chu D A, Kaufman Y J, Zibordi G, Chem J D, Mao J T, Li C C, Holben B N. Global monitoring of air pollution over land from the earth observing system-terra moderate resolution imaging spectroradiometer (MODIS). *Journal of Geophysical Research*, 2003, 108(D21): 4661, doi: 10.1029/2002JD003179.
- [23] Engel-Cox J A, Christopher H H, Basil W C, Raymond M H. Qualitative and quantitative evaluation of MODIS satellite sensor data for regional and urban scale air quality. *Atmospheric Environment*, 2004, 38(16): 2495-2509.
- [24] 余梓木, 周红妹, 郑有飞. 基于遥感和 GIS 的城市颗粒物污染分布研究. *自然灾害学报*, 2004, 13(3): 58-64.
- [25] Tsai Y I, Kuoc S C, Lee W J, Chen C L, Chen P T. 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.
- [26] Buseck P R, Posfai M. Airborne minerals and related aerosol particles: Effects on climate and the environment. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 1999, 96(7): 3372-3379.
- [27] 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与变化. *北京大学学报: 自然科学版*, 2010, 46(2): 185-191.
- [28] 卫亚星, 王莉雯. MODIS 土地覆盖产品研究进展. *光谱学与光谱分析*, 2010, 30(7): 1848-1852.
- [29] 冉有华, 李新. 四种常用的全球 1KM 土地覆盖数据中国区域的精度评价. *冰川冻土*, 2009, 31(3): 490-500.
- [30] 盛立芳, 申莉莉, 李秀镇, 刘飞. 水平能见度经验公式在青岛沿海地区的应用. *中国海洋大学学报*, 2009, 39(5): 877-882.
- [31] Yang S. On extraction and fractal of urban and rural residential spatial pat tern in developed area. *Acta Geographica Sinica*, 2000, 55(6): 671-678.
- [32] 王斌, 高会旺. 中国沿海城市空气污染指数的分布特征. *生态环境*, 2008, 17(2): 542-548.