岳峰，戴菲，郭晓华 . 基于遥感反演的武汉市空气污染物与植被覆盖度相关性研究 [J]. 风景园林，2019, 26（1）：76-81.

基于遥感反演的武汉市空气污染物与植被覆盖度相关性研究

Study on Correlation Between Air Pollutants and Vegetation Coverage in Wuhan Based on Remote Sensing Inversion

岳峰 戴菲 * 郭晓华
YUE Feng, DAI Fei*, GUO Xiaohua

中图分类号：TU986
文献标识码：A
文章编号：1673-1530(2019)01-0076-06
DOI：10.14085/j.fjyl.2019.01.0076.06
收稿日期：2018-05-10
修回日期：2018-11-20

岳峰 /1988 年生 / 男 / 河南人 / 华中科技大学建筑与城市规划学院在读博士研究生 / 研究方向为绿地规划与 3S 技术应用、风景园林小气候（武汉 430074）
YUE Feng, born in 1988 in Henan Province, is a doctoral student in School of Architecture and Urban Planning, Huazhong University of Science and Technology. His research focuses on green space planning and 3S application, landscape architecture microclimate (Wuhan 430074).

戴菲 /1974 年生 / 女 / 湖北人 / 博士 / 华中科技大学建筑与城市规划学院教授 / 湖北省城镇化工程技术研究中心 / 本刊特约编辑 / 研究方向为城市绿色基础设施、绿地系统规划（武汉 430074）
通信作者邮箱（Corresponding author Email）：58801365@qq.com
DAI Fei, born in 1974 in Hubei Province, Ph.D., is a professor in School of Architecture and Urban Planning, Huazhong University of Science and Technology, Hubei Engineering and Technology Research Center of Urbanization, a contribution eritor of this journal. Her research focuses on urban green infrastructure, green space system planning (Wuhan 430074).

郭晓华 /1984 年生 / 女 / 河南人 / 长江大学园艺园林学院讲师 / 研究方向为风景园林规划与设计、绿色基础设施（荆州 434025）
GUO Xiaohua, born in 1984 in Henan Province, is a lecturer in College of Horticulture and Gardening, Yangtze University. Her research focuses on landscape architecture planning and design, urban green infrastructure (Jingzhou 434025).

摘要：空气污染问题是众多国家在经历城镇化的快速发展过程中，难以回避的问题。以快速城镇化的武汉为研究对象，通过遥感反演大气气溶胶光学厚度、解译土地覆盖类型，进而基于像元二分模型反演归一化植被指数得到植被覆盖度后，分别在 500m×500m、1km×1km、2km×2km、3km×3km 的网格尺度上，探讨大气气溶胶光学厚度与植被覆盖度的相关关系。结果表明：4 种尺度下，都在 0.01 水平上呈现极明显负相关，且 pearson 系数较接近。进而得到 4 种网格尺度的回归模型作为植被覆盖度与大气气溶胶光学厚度的预测模型，揭示了两者的初步变化规律。进一步在 1km 网格尺度下分析发现，植被覆盖度≤ 10% 和＞ 45% 时，两者在 0.01 水平极显著负相关。植被覆盖度≤ 10% 的区域与水体及其周边地区和城乡建设用地具有高度的空间分布一致性，污染整体较严重；植被覆盖度＞ 45% 的区域主要分布在森林、疏林草地、农业用地等植被覆盖较好的生态用地区域，污染程度以中度、轻度和优良为主，说明增加植被覆盖对缓解空气污染具有重要意义。通过遥感反演获取综合反映空气污染物的大气气溶胶光学厚度，并且为更精确的反映植被覆盖度，在归一化植被指数的基础上进一步运用改进后的像元二分模型进行植被覆盖度的遥感反演。从而探究大气气溶胶光学厚度与植被覆盖度之间的相关性规律以及空间分布规律，从缓解综合空气污染物的角度为城乡规划设计提供定量化的参考。

关键词：风景园林；空气污染；植被覆盖度；大气气溶胶光学厚度；归一化植被指数；规划设计
基金项目：国家自然科学基金面上项目（编号 51778254）；国家自然科学基金重点项目（编号 51538004）

Abstract: Air pollution is an unavoidable problem in the rapid development of urbanization in many countries. The paper takes Wuhan, a city of rapid urbanization, as the object of study. Through remote sensing, it has inversion of the atmospheric aerosol optical depth, interpretation of land cover types and, based on the pixel binary model, inversion of NDVI to obtain the vegetation coverage. Then, it explores the correlation between AOD and vegetation cover on the grid scales of 500m×500m, 1km×1km, 2km×2km, and 3km×3km. The results show that under the four scales, they all have extremely negative correlation at the 0.01 level, with close pearson coefficient. Then, it applies four kinds of grid-scale regression models as vegetation coverage and AOD prediction models, to reveal initial changes of the two. Further analysis at a grid scale of 1 km shows that when the vegetation coverage rate is ≤ 10% and >45%, there is a significant negative correlation between the two levels at the 0.01 level. The area with vegetation coverage rate ≤ 10% is highly spatially consistent with the water body and its surrounding areas and urban and rural construction land. The overall pollution is serious. The area with vegetation coverage rate >45% is mainly distributed in forests, open forests, and agricultural land. In ecological land areas where vegetation coverage is good, the pollution is mainly moderate, light, and fine, indicating that increasing vegetation cover is of great significance in alleviating air pollution. In this study, the atmospheric aerosol optical depth comprehensively reflecting air pollutants is obtained by remote sensing inversion, and to inverse the vegetation coverage rate more accurately, the improved pixel bipartite model is used based on NDVI. This paper explores the correlation law and spatial distribution law between AOD and VCR, and provides a quantitative reference for urban and rural planning and design from the perspective of mitigating comprehensive air pollutants.

Keywords: landscape architecture; air pollution; vegetation coverage rate; atmospheric aerosol optical depth; normalized difference vegetation index; planning and design
Fund Items: The National Natural Science Foundation of China (No. 51778254); The National Natural Science Foundation of China (No. 51538004)

空气污染问题是快速城镇化过程中需要关注的重要问题之一。在欧洲，$PM_{2.5}$污染导致平均预期寿命平均减少 8.6 个月[1]。PM 污染于 20 世纪 50 年代和 60 年代在欧洲和北美地区广泛传播，现在在发展中国家（例如中国、印度）变得更加严重[2]。2013 年，“雾霾”成为中国年度关键词，引起社会强烈关注，全国平均雾霾天数达 52 天之最。2016 年国家环保部门统计中国 338 个地级及以上城市中，空气质量达标率仅 21.6%。根据中国政府的一份报告，2010—2012 年，北京、广州、上海和西安因可吸入颗粒物引起的疾病死亡人数从 7 700 人增加到 8 500 人[3]。空气污染导致中国每年有 120 万人过早死亡[4]。雾霾不仅对公众健康构成直接威胁[5]，而且对动植物有着明显的消极影响[6-7]。随着污染的增加，所有森林层的树叶覆盖以及无脊椎动物的生物量都会减少[8]。为应对空气污染的影响，除源头控制外，如何通过研究来积极缓解已经存在的大气污染是需要思考和面对的问题。

气溶胶是由大气及悬浮在大气中的液体小质点和固体粒子（直径范围 0.001~100μm）组成的胶体分散体系[9]，烟尘、灰尘、雾、霾都属于气溶胶，其中直径小于 2.5μm 的可入肺颗粒物称为 $PM_{2.5}$，大气气溶胶是雾霾形成的基础和前提[10]。除了人类活动直接向大气中排放的气溶胶之外，光化学作用可以将空气中的各种气态污染物（NO_2、SO_2 等）转化成二次气溶胶，导致 $PM_{2.5}$、PM_{10} 等颗粒物浓度的升高，进而演变成雾霾。大气气溶胶光学厚度（Aerosol Optical Depth，简称 AOD）是无云大气铅直气柱中，由于气溶胶散射造成的消光系数在垂直方向上的积分，是描述气溶胶对光衰减作用的一个无量纲正值，是气溶胶的一个重要参数，能在一定程度上反映大气污染程度[11]。由于空气污染物具有复合性和复杂性，单独对一种或者两种空气污染物的作用及缓解的研究具有一定局限性，因此从气溶胶角度结合植被覆盖度进行缓解污染物的研究可以提供一个新的研究视角，具有一定的理论与现实意义。

为进一步研究大气气溶胶与近地面颗粒物浓度的关系，国内外学者将 AOD 与 PM_{10}、$PM_{2.5}$、NO_2 等污染物进行了相关分析。在中国绝大部分地区，AOD 与 NO_2 和 SO_2 空间分布存在显著正相关[12]。在天气状况稳定、O_3 前体物浓度变化不大的情况下，大气颗粒物与 O_3 的浓度变化存在一定的反相关[13]。研究表明 AOD 数据与附近的地面 PM_{10} 浓度相关系数达 0.82[14]。还有研究发现 MODIS 反演的 AOD 与 $PM_{2.5}$ 小时平均质量浓度相关系数为 0.7，月均值相关系数达 0.92，证明用 AOD 估算近地面颗粒物浓度是可行的[15]。有学者利用 MODIS AOD 估算了全美的 $PM_{2.5}$ 浓度分布，进一步证实利用遥感估算近地面颗粒物的适用性[16]。因此，MODIS AOD 产品用于城市空气污染领域研究，具有很好的适用性[17-18]。

植物是缓解大气污染的重要途径之一，研究发现叶表面粗糙且带有密集纤毛或呈现明显脊状褶皱比叶表面光滑更有利于滞尘[19]，众多学者也对不同园林植物的滞尘能力进行了研究[20-22]。2013 年《风景园林》杂志曾专题讨论“$PM_{2.5}$ 和绿色基础设施”，相关专家学者都呼吁通过绿色基础设施来缓解空气污染[23-27]。

目前针对绿地缓解空气污染的研究，国内外前期集中在对 PM_{10}、SO_2、NO_2 等污染物的研究，随着近几年世界各国将 $PM_{2.5}$ 纳入检测后，关于 $PM_{2.5}$ 的研究成果才逐渐增多。在研究尺度上，微观尺度的研究较多，主要集中在园林植物单体及叶片吸附污染物[28-29]、不同群落结构的绿地[30]；中观尺度以街区[31]、居住区[32]、道路[33-34]及不同类型绿地[35]的 PM_{10}、$PM_{2.5}$、SO_2 等污染物实测为主；宏观尺度主要以区域污染物的遥感反演结合土地利用为主[36-37]，但对于以植被覆盖与 AOD 为代表的空气污染的深入研究却鲜少涉及。

研究以武汉市为例，从市域尺度研究植被覆盖度与 AOD 的深层量化关系规律，重点揭示：

1）不同植被覆盖度与 AOD 代表的空气污染物浓度是否具有关联性；

2）植被覆盖度与 AOD 代表的空气污染物浓度的规律模型是什么；

3）植被覆盖度的变化与以 AOD 代表的空气污染物浓度变化的空间关系规律是什么。

1 研究对象

1.1 研究区域的确定

武汉是中国中心城市、湖北省会，位于江汉平原东部，地形以平原为主，全市低山、丘陵、垄岗平原与平坦平原的面积分别占 5.8%、12.3%、42.6% 和 39.3%；长江、汉江穿城而过，市域湖泊共有 166 个；自然植被以常绿阔叶、落叶阔叶混交林为主；气候冬冷夏热，属典型的亚热带季风气候，一年中 1 月平均气温最低 4.1℃，冬季长 110d，7 月平均气温最高 29.2℃，夏季长达 135d，春秋两季各约 60d；年降水量为 1 050~1 200mm，空气湿度大，年无霜期 240d[38]。

国家统计局统计数据显示，2014 年武汉市迈入中国城市“万亿 GDP 俱乐部”，居华中地区首位。2017 年武汉 GDP 达 1.34 万亿，全国排名第九。经济高速发展的同时，也产生了空气污染问题。根据中国环境监测总站数据统计发现，武汉市从 2014 年 1 月 1 日—2017 年 12 月 31 日 4 年间，空气质量等级为优的天数仅 154d，1 300d 具有不同程度的污染，首要污染物以 $PM_{2.5}$、PM_{10}、NO_2、O_3（这些物质是气溶胶的前身或者构成部分）为主，污染天数占 89.4%，中度及以上程度污染占 11.35%。同时武汉具有高密度的城市空间形态以及市域较好的植被覆盖，在中国大城市地区具有一定的典型性，因此以中国国家中心城市——武汉市为对象进行研究。

1.2 研究时间的确定

由于归一化植被指数（Normalized Difference Vegetation Index，简称 NDVI）、大气气溶胶光学厚度（AOD）与土地利用遥感影像的选取受植被生长周期、植被覆盖状况、天气情况及卫星运行周期及轨迹的制约，因此数据时间的选取需要协调其在空间和时间上的互相匹配问题。由于 2017 年研究区域的部分数据还无法完整获取或者数据质量不理想，因此研究选取 2014—2016 年的数据进行分析。

1）大气气溶胶光学厚度（AOD）。

由于携带 MODIS 传感器的 Terra 卫星

的遥感影像获取周期为1d，大大降低了多数遥感卫星影像获取数据的时间周期难度，并且MODIS是具有36个观测通道的先进多光谱遥感传感器，覆盖了当前遥感卫星的主要观测波段。因此选取气溶胶产品MOD021KM，空间分辨率为1km。由于AOD受云雾降水天气的影响较大，为减小因素干扰及减小数据误差、增加数据的科学稳定性，更客观、准确地研究AOD的浓度分布，通过统计2014年至2016年5—9月无雨雪、风力≤3级（武汉常规风力大小）、连续4d及以上晴朗天气，发现仅有2016年7月25—31日满足天气要求。然后筛选出7d中的第5天即7月29日的AOD数据作为理想的研究对象，数据可在美国国家航空航天局（NASA）获取。

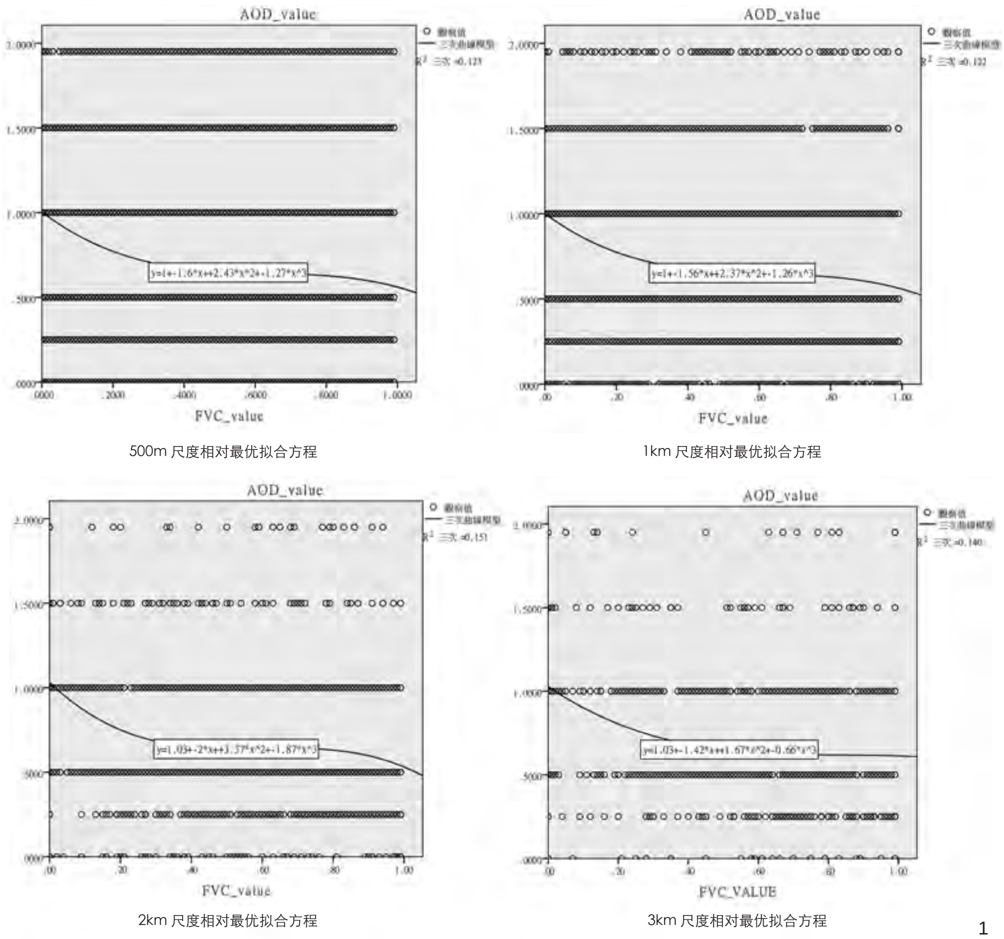
2）归一化植被指数（NDVI）。

由于归一化植被指数（NDVI）对植物生长状况有着较强的敏感性，表现为在植物生长初期，通过NDVI指数分析会使植被盖度预估值偏高；而在植物生长后期，则会偏低，因此，NDVI更适用于处在发育中期的植被情况监测。研究证明，每年5—9月为植物的生长旺季[39]。所以，研究以研究区域5—9月遥感图像数据作为分析对象进行研究[40]。

为提高植被覆盖度的精确性及方便进行地理校正等操作，研究选用相较其他卫星地理定位准确的landsat8 30m精度的数据。由于landsat8卫星的过境周期约为16d，为尽可能获得与AOD数据的时空一致性，研究筛选后发现，天气晴朗且最接近选取的AOD数据时间是2016年7月23日的数据，该日基本覆盖研究区域的两幅不同条带的数据云量少于0.8%，最满足研究需要。少量未覆盖区域由landsat8拍摄的紧邻时间的满足要求的2016年8月1日的影像数据作为补充，数据可由美国地质勘探局（USGS）官网获取。

3）土地覆盖数据。

研究采用改进的像元二分模型以获取更准确的NDVI数据，过程中需要利用土地覆盖数据制作掩膜文件，为增加数据的准确度，土地覆盖数据选用与NDVI同样的数据。



1 不同尺度下植被覆盖度与大气气溶胶光学厚度的相对最优拟合方程

The relatively optimal equation of vegetation coverage and atmospheric aerosol optical depth at different scales

2 研究方法

2.1 AOD遥感反演

目前陆地上空大气气溶胶光学厚度的遥感算法中暗像元算法是最重要也是使用频率最高的一种方法，此算法最初是Kaufman等（1997）建立的，又叫浓密植被算法[41]。此后经过不断改进，现已成为全球陆地上空利用卫星遥感获取气溶胶参数应用最为广泛的算法。研究使用的NASA发布的气溶胶遥感产品，也是采用该算法[42]。

研究运用ENVI 5.4对AOD数据进行辐射定标、几何校正、云检测、气溶胶反演、掩膜裁剪得到研究区的AOD空间分布图，并将污染级别划分为严重、重度、中度、轻度、良、优、无7个等级。然后在Arc GIS中将其重分类后建立500m×500m、1km×1km、2km×2km、3km×3km的网格，将重分类后的新值提取到不同尺度网格中心点的属性字段中。

2.2 土地覆盖的数据处理

首先运用ENVI 5.4对Landsat8原始数据进行辐射定标、大气校正、图像镶嵌与裁剪，得到土地覆盖基础数据。参考国内外多数学者的常用分类方法及武汉市的实际，研究根据监督分类将土地覆盖划分为6类：森林、疏林草地、城乡建设用地、水体、农业用地、其他。使各用地的可分离性达到1.95以上（大于1.9为分离良好），分类后Kappa系数达到0.976 3，解译结果满足研究要求。

2.3 植被覆盖度的数据处理

作为最常用的一种植被指数，归一化植被指数（NDVI）能够有效消除或降低由于地形、大气辐射以及云层、仪器标定误差所带来的消极影响，且与植被覆盖度以及植物生长情况呈现较为明显的正相关关系[43]。所以，

表 1 不同网格尺度下植被覆盖度与大气气溶胶光学厚度的关系研究
Tab. 1 Relationship between vegetation coverage rate and atmospheric aerosol optical depth at different grid sizes

尺度	500m×500m		1km×1km		2km×2km		3km×3km	
相关性参数	Pearson系数	显著性Sig	Pearson系数	显著性Sig	Pearson系数	显著性Sig	Pearson系数	显著性Sig
参数值	−0.326**	0.000	−0.325**	0.000	−0.351**	0.000	−0.341**	0.000

注：** 代表 Sig 在 0.01 水平极显著，R 的绝对值越大相关性越高。

表 2 不同网格尺度下相对最优拟合方程
Tab. 2 Relatively best fit models at different grid scales

尺度	拟合方程	Sig	R^2
500m	$Y=1.0-1.6X+2.43X^2-1.27X^3$	0.000	0.125
1km	$Y=1.0-1.56X+2.37X^2-1.26X^3$	0.000	0.122
2km	$Y=1.03-2.0X+3.37X^2-1.87X^3$	0.000	0.151
3km	$Y=1.03-1.42X+1.67X^2-0.66X^3$	0.000	0.140

研究选取 NDVI 作为植被覆盖度（Vegetation Coverage Rate，简称 VCR）反演的基础数据。

常用的 NDVI 计算方法是运用 ArcGIS 的 NDVI 功能计算土地覆盖区的植被覆盖度，研究进一步利用改进后的像元二分模型进行植被覆盖度的反演 [44]。其表达式为：

$$VCR=\frac{(NDVI-NDVI_{soil})}{(NDVI_{veg}-NDVI_{soil})} \quad (1)$$

其中 $NDVI_{soil}$ 是无植被覆盖区域的 NDVI 值，$NDVI_{veg}$ 代表完全被植被覆盖的像元 NDVI 值 [45]。

为保证植被覆盖信息 $NDVI_{veg}$ 和 $NDVI_{soil}$ 的一致性，研究在 5%~95% 的置信区间内用 NDVI 分别掩膜提取上述章节生成的 6 类土地覆盖类型中的 NDVI 最小值 $NDVI_{min}$ 和最大值 $NDVI_{max}$，统计其 $NDVI_{min}$ 和 $NDVI_{max}$。然后计算 $NDVI_{soil}$ 和 $NDVI_{veg}$。去除异常值后再分类得到研究区的植被覆盖度。同样将植被覆盖度分布图的属性提取到不同尺度的网格中心点的属性字段中，在 SPSS 软件中进行 AOD 与植被覆盖度的相关性分析。

3 结果与分析

3.1 相关性分析

运用 SPSS 软件进行双变量相关分析，并运用 pearson 双尾检验发现，整体水平上 4 种网格尺度下显著性 Sig<0.01，pearson 系数都为负值（表 1），证明 AOD 与 VCR 呈极显著负相关。并且在这 4 种尺度下，pearson 系数绝对值较接近。因此本文在较精细尺度的 1km 或者 500m 网格尺度探讨 VCR 与 AOD 代表的空气污染物的关系可能更有意义。

3.2 规律模型的选取

为进一步研究两者的相关性，建立不同尺度拟合精度最高的两者的关系模型，运用 SPSS 曲线估计功能，每种尺度下通过指数函数、对数函数、幂函数、线性函数等的方程建模，通过筛选得到 4 种尺度下拟合度相对最好的拟合模型，发现 4 种尺度的相对最优拟合模型均为一元三次方程，且都在 0.01 显著性水平上，4 种尺度中 2km 尺度的回归系数 R^2 最高，1km 尺度的最低，但 4 种尺度的回归系数 R^2 比较接近，从而得到 4 种尺度下的 4 个相对最优拟合模型作为 VCR 与 AOD 的规律解释模型（图 1、表 2）。

3.3 植被覆盖度（VCR）与大气气溶胶光学厚度（AOD）空间分布规律分析

通过 4.1 章节的研究发现，在 1km 或者 500m 网格尺度探讨 VCR 与 AOD 的关系可能更有意义。这 2 种尺度的 pearson 系数很接近，但 500m 的网格尺度探讨植被覆盖度对市域规划设计来讲可能过于精细、琐碎，相比较而言，市域范围在 1km 网格尺度探讨两者规律对市域规划设计可能更有参考价值，因此研究对 VCR 与 AOD 两者的空间分布规律以 1km 网格尺度进行进一步的探讨。

结合遥感反演得到的 AOD 空间分布图（图 2）、土地覆盖空间分布图（图 3）以及遥感反演植被覆盖度（VCR）空间分布图（图 4），并将植被覆盖情况依照国际通用标准分为 5 个等级 [32]，分别为≤ 10%、10%~30%、30%~45%、45%~60% 以及＞ 60% 与 AOD 在空间上进行相关性分析（表 3）。

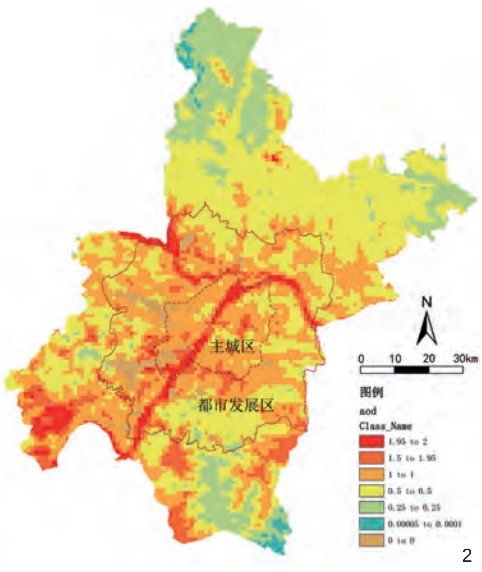
分析发现，植被覆盖度≤ 10% 时，该值域的植被覆盖度空间分布区域与水体及其周边地区和城乡建设用地特别是主城区的建设用地具有高度的空间分布一致性，污染整体较严重，且 VCR 与 AOD 极显著负相关性最高（表 3），说明建设用地周围植被以及水体的增加可以明显缓解空气污染。当植被覆盖度＞ 45% 时，该值域区间主要分布在市域的森林、疏林草地、农业用地和主城区的植被覆盖较好的山体等生态用地区域，污染程度以中度、轻度和优良为主，且该值域区间 VCR 与 AOD 极显著负相关，说明增加植被覆盖对缓解空气污染具有重要意义。

4 结论与讨论

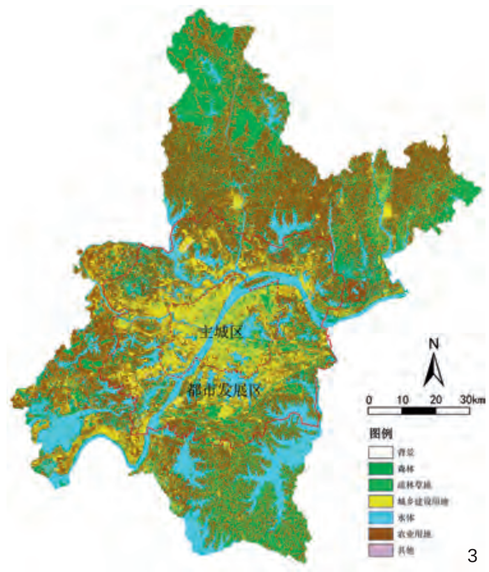
4.1 结论

本文主要从以 AOD 为代表的空气污染物的视角，结合遥感解译土地覆盖，基于像元二分模型遥感反演 NDVI 得到植被覆盖度，对 AOD 与 VCR 的相关性进行研究。研究发现，植被覆盖度与 AOD 代表的空气污染物浓度在 500m×500m、1km×1km、2km×2km、3km×3km 4 种网格尺度下都在 0.01 水平上显著负相关，进而得出 4 种尺度的相对最优拟合规律模型作为 VCR 与 AOD 的规律解释模型，规律模型均为在 0.01 水平上极显著的一元三次方程，从而揭示了两者的初步变化规律。

通过进一步在 1km 网格尺度下研究两者的空间规律，发现植被覆盖度较低的区域（VCR ≤ 10%）主要分布在水体及其周边地区和城乡建设用地区域，污染整体较严重，且 VCR 与 AOD 在 0.01 水平极显著负相关，说明当植被覆盖从无到有时，少量的绿地即可发挥明显的缓解污染的作用；植被覆盖度较高的区域（VCR ＞ 45%），AOD 空间分布的污染程度以中度、轻度和优良为主，且两者在 0.01



2 遥感反演 AOD 空间分布图
Remote sensing inversion of AOD spatial distribution



3 土地利用空间分布图
Spatial distribution of land use

4 遥感反演植被覆盖度空间分布图
Remote sensing inversion of vegetation coverage rate (VCR) spatial distribution

水平极显著负相关，并与森林、疏林草地、农业用地等植被覆盖较好的自然属性为主的生态用地区域具有高度空间一致性，其用地类型较单一、用地本身产污少，相较于高密度的城市空间，广阔的市域空间也有利于污染物的扩散，并且植物具有较强的吸附污染的作用；植被覆盖度在10%＜VCR ≤ 45%的区间内与AOD相关性不显著，可能是该植被覆盖度的区域主要分布在主城区，城市用地功能较复杂，工业用地的类型及比例、交通流量及强度、城市建设强度、地形等经济、社会、自然影响因素众多，导致两者相关性不显著。

4.2 缓解空气污染的规划设计对策

市域范围内应通过城市总体规划及绿地系统规划等规划管控，切实保护、提升生态用地的质与量，营造良好的生态基质。在有条件的区域如山体及部分疏林草地地区将植被覆盖度提高到45%以上，同时注意对郁闭度过高的林地进行间伐及补种轮替，以构建可持续的稳定的植物群落，同时注意通风廊道的构建，充分发挥植被吸附污染物的作用。需要指出的是，在农作物生长季应充分发挥农作物吸附缓解空气污染的作用，通过美丽乡村规划建设等措施，适度引导种植高吸污性和经济性的作物，同时推广补贴环保农业机械，严格禁止农作物的焚烧作业。

结合城乡建设用地，特别是主城区及都市发展区，在规划设计层面，积极落实城市控制性详细规划等规划中关于生态类指标的规划管控。在建设层面，对没有植被的区域采取见缝插绿的措施，在植被覆盖度很低的区域，努力将植被覆盖度提高到10%。同时丰富植被的竖向设计，注重屋顶、墙面、桥下、道路等空间的植被覆盖的提高及优化，注重乔灌草的合理搭配，在有限的城市用地内通过绿地的精细化布局和搭配争取在最大程度上发挥绿地改良小气候的作用。

4.3 展望

本文主要以AOD为代表的空气污染物与植被覆盖度在总量上进行了相关研究，后续深入的研究可从两个维度进行探讨。一方面对植被覆盖的具体林地、草地等类型及其比重等方面进行进一步的探讨，以形成植被覆盖从总量到类型、比重等较为完善的调控空气污染的定量化的调控策略。另一方面可从$PM_{2.5}$、PM_{10}等颗粒物以及氮氧化物、臭氧等众多污染物与土地利用特别是三维绿量的规律研究以及污染物与土地利用模型的相关研究入手，提出面向众多污染物的综合调控机制，以更有针对性，更好地缓解空气污染。

表3 不同的植被覆盖度与大气气溶胶光学厚度的相关性
Tab. 3 Correlation between different vegetation coverage rate and atmospheric aerosol optical depth

VCR 值域区间	Pearson 系数	显著性 Sig
≤ 10%	−0.178**	<0.01
10%<VCR ≤ 30%	−0.036	>0.05
30%<VCR ≤ 45%	−0.037	>0.05
45%<VCR ≤ 60%	−0.109**	<0.01
VCR>60%	−0.055**	<0.01

注：** 代表 Sig 在 0.01 水平极显著。

注释：
文中图表均由作者自绘。

参考文献 (References)：
[1] PRENDES P, ANDRADE JM, LOPEZ-MAHIA P, et al. Source Apportionment of Inorganic Ions in Airborne Urban Particles from Coruna city (NW of Spain) Using Positive Matrix Factorization[J]. Talanta, 1999, 49(1): 165-178.
[2] ROHDE RA, MULLER RA. Air Pollution in China: Mapping of Concentrations and Sources[J]. Plos One, 2015, 10(8).
[3] LIU S, SONG G. Dose-response Relationship between Daily PM (2.5) Concentration and Mortality Rate: A Meta-analysis[J]. China Journal of Public Health, 2017, 33(1): 14-17.
[4] LIM SS, VOS T, Flaxman AD, et al. A Comparative Risk Assessment of Burden of Disease and Injury Attributable to 67 Risk Factors and Risk Factor Clusters in 21 Regions, 1990-

2010. A Systematic Analysis for the Global Burden of Disease Study 2010[J]. Lancet, 2012, 380(9859): 2224-2260.
[5] JIANG C, HE X, LE Y, et al. Spatiotemporal Pattern and Driving Force of Air Quality in Jiangsu Province, China, 2014[J]. Fresenius Environmental Bulletin, 2018, 27(6): 4076-4083.
[6] HANDIQUE D, BHATTACHARYYA KG. Air Quality Deterioration in a Pristine Area due to a Petroleum Refinery and Associated Activities[J]. Asian Journal of Atmospheric Environment, 2017, 11(4): 254-269.
[7] WU W, ZHANG Y. Effects of Particulate Matter (PM2.5) and Associated Acidity on Ecosystem Functioning: Response of Leaf Litter Breakdown[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2018, 25(30): 30720-30727.
[8] BELSKII EA, BELSKAYA EA. Bird Population in Birch Forests of the Southern Urals Affected by Industrial Pollution: Report 2. Relationship with habitat variables[J]. Contemporary Problems of Ecology. 2013, 6(3): 323-329.
[9] 刘玉杰 . 利用新型全自动太阳光度计研究气溶胶光学和物理特性 [D]. 南京：南京气象学院，2004.
[10] 范辰乾 . 基于 MODIS 数据的气溶胶光学厚度与 $PM_{2.5}$ 浓度关系研究 [D]. 济南：山东师范大学，2014.
[11] 石勇 . 武汉市 MODIS 气溶胶光学厚度与空气 PM_{10} 浓度的关系研究 [D]. 武汉：华中农业大学，2012.
[12] 李锐，李俊伟，刘之杰，等 . 卫星遥感研究中国气溶胶光学厚度、NO_2 和 SO_2 的相关性 [J]. 科学通报，2016，61（22）：2524-2535.
[13] 蔡彦枫 . 长三角城市地区大气颗粒物与臭氧相互作用的观测和数值模拟研究 [D]. 南京：南京大学，2012.
[14] 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 Spectroadiometer (MODIS)[J]. Journal of Geophysics Research, 2003, 108(D21) 4661.
[15] WANG J, CHRISTOPHER S A. Intercomparison between Satellite-derives Aerosol Optical Thickness and PM2.5 Mass: Implication for Air Quality Studies[J]. Geophysical Reserch Letters, 2003, 30(21): 465-471.
[16] ENGLE-COX J A, YONG 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: 2495-2509.
[17] 赵秀娟，陈长和，张武，等 . 利用 MODIS 资料反演兰州地区气溶胶光学厚度 [J]. 高原气象，2005（1）：97-103.
[18] 毛节泰，李成才，张军华，等 . MODIS 卫星遥感北京地区气溶胶光学厚度及与地面光度计遥感的对比 [J]. 应用气象学报，2002（S1）：127-135.
[19] 李海梅，刘霞 . 青岛市城阳区主要园林树种叶片表皮形态与滞尘量的关系 [J]. 生态学杂志，2008（10）：1659-1662.
[20] 王兵，张维康，牛香，等 . 北京 10 个常绿树种颗粒物吸附能力研究 [J]. 环境科学，2015，36（2）：408-414.
[21] 张维康，王兵，牛香 . 北京不同污染地区园林植物对空气颗粒物的滞纳能力 [J]. 环境科学，2015，36（7）：2381-2388.
[22] 王赞红，李纪标 . 城市街道常绿灌木植物叶片滞尘能力及滞尘颗粒物形态 [J]. 生态环境，2006（2）：327-330.
[23] 王浩 . 明确学科定位融入治理体系立足绿色基础 [J]. 风景园林，2013（2）：148-149.
[24] 杜春兰 . 降减 $PM_{2.5}$ 的绿色基础设施途径的思索 [J]. 风景园林，2013（2）：147.
[25] 朱祥明 . $PM_{2.5}$ 与绿色基础设施之我见 [J]. 风景园林，2013（2）：151.
[26] 孟勇 . 浅谈城市园林绿化对 $PM_{2.5}$ 的防控作用 [J]. 风景园林，2013（2）：147-148.
[27] 余新晓 . 城市森林让城市更加清洁、健康的“肺”[J]. 风景园林，2013（2）：150-151.
[28] 王蕾，刘连友，王志，等 . 北京市园林植物吸附 PM_{10} 与 SO_2 总量及其健康效益 [J]. 环境科学与技术，2006（9）：1-3，115.
[29] 李余 . 绿化植物叶表皮蜡质与城市空气环境的关系 [D]. 西安：西安建筑科技大学，2016.
[30] 罗曼 . 不同群落结构绿地对大气污染物的消减作用研究 [D]. 武汉：华中农业大学，2013.
[31] 戴菲，陈明，朱晟伟，等 . 街区尺度不同绿化覆盖率对 PM_{10}、$PM_{2.5}$ 的消减研究：以武汉主城区为例 [J]. 中国园林，2018，34（3）：105-110.
[32] 韩世明 . 南昌市红谷滩新区居住绿地的生态效应研究 [D]. 南昌市：东华理工大学，2017.
[33] 牟浩 . 城市道路绿带宽度对空气污染物的削减效率研究 [D]. 武汉：华中农业大学，2013.
[34] 徐欢，赵晶晶，李红 . 道路绿地植物配置对 $PM_{2.5}$ 浓度分布与消减作用的影响 [J]. 北方园艺，2016（24）：65-69.
[35] 何亮 . 城市不同功能类型绿地的降温增湿和空气净化效应研究 [D]. 武汉：华中农业大学，2013.
[36] 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 [D]. 北京：中国地质大学，2013.
[37] 王嫣然，张学霞，赵静瑶，等 . 2013—2014 年北京地区 $PM_{2.5}$ 时空分布规律及其与植被覆盖度关系的研究 [J]. 生态环境学报，2016，25（1）：103-111.
[38] 戴菲，岳峰，贾行飞，等 . 武汉市景观格局演变及绿道优化策略研究 [J]. 中国城市林业，2017，15（6）：17-22.
[39] 胡晓，马耀明，王介民，等 . 大气订正对 MODIS 植被参数的影响研究 [J]. 高原气象，2007（4）：732-740.
[40] 胡承江，李雄 . 1979—2013 年北京市永定河流域平原城市段核心区域植被盖度演变分析 [J]. 中国园林，2015，31 (9)：12-16.
[41] 岳辉 . 武汉市大气 PM_{10} 浓度空间分布特征及其影响因素研究 [D]. 武汉：华中农业大学，2012.
[43] 温庆可，张增祥，刘斌，等 . 草地覆盖度测算方法研究进展 [J]. 草业科学，2009，26（12）：30-36.
[44] 贾坤，姚云军，魏香琴，等 . 植被覆盖度遥感估算研究进展 [J]. 地球科学进展，2013，28（7）：774-782.
[45] 李苗苗，吴炳方，颜长珍，等 . 密云水库上游植被覆盖度的遥感估算 [J]. 资源科学，2004（4）：153-159.

（编辑 / 陈燕茹）