多雾霾城市绿地空气净化服务与景观格局的关系
——以河南省安阳市区为例

位贺杰[1], 杨一鸣[1,3], 吴 群[2,3]

(1.河南农业大学 资源与环境学院, 河南 郑州 450002; 2.南京农业大学
不动产研究中心, 江苏 南京 210095; 3.南京农业大学 公共管理学院, 江苏 南京 210095)

摘 要: [目的] 探究多雾霾城市绿地景观格局对空气净化服务的影响,为城市绿地景观的结构优化和布置提供理论指导。[方法] 基于河南省安阳市区 2009 和 2019 年土地利用数据,测算城市绿地景观对二氧化硫 SO_2,氮氧化物 NO_X、可吸入颗粒物 PM_{10} 的净化效能,并从空间角度探索景观格局与空气净化服务之间的关系。[结果] ①2009—2019 年安阳城市绿地景观面积共减少3 492.18 hm^2,主要去向为建设用地。香农多样性指数、景观形状指数、蔓延度指数分别由 0.572 7,44.272 1,78.98%变更为 0.875 8,90.334 5,66.88%。②2009—2019 年初、末期空气净化服务价值分别为 5.65,26.70 亿元,滞尘功能价值比例从 97.19%提高到 99.07%,林地景观对总价值的贡献从 88.99%提升到 94.54%。③绿地景观空气净化服务高、中、低值区呈现镶嵌分布状态,研究时段初期生态价值低值区偏多,末期中、高值区增多。④2009 年香农多样性指数、景观形状指数、蔓延度指数与空气净化服务价值的双变量莫兰指数为0.281,0.458,−0.305,而 2019 年相应值为 0.403,0.411,−0.408。[结论] 城市绿地景观多样性的增加以及景观形状的复杂化会提升空气净化服务,而绿地景观的蔓延度下降则起抑制作用。

关键词: 河南省安阳市; 城市绿地景观; 景观格局; 空气净化; 生态系统服务价值; 双变量莫兰指数; 雾霾
文献标识码: A **文章编号**: 1000-288X(2021)04-0292-08 **中图分类号**: F301.24, X171.1

文献参数: 位贺杰, 杨一鸣, 吴群.多雾霾城市绿地空气净化服务与景观格局的关系[J].水土保持通报, 2021,41(4): 292-299. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2021.04.039; Wei Hejie, Yang Yiming, Wu Qun. Relationship between air purification service and landscape pattern of urban green space in cities with more haze [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021,41(4):292-299.

Relationship Between Air Purification Service and Landscape Pattern of Urban Green Space in Cities with More Haze
—Taking Anyang Urban Area of He'nan Province as an Example

Wei Hejie[1], Yang Yiming[1,3], Wu Qun[2,3]

(1.*College of Resources and Environment, He'nan Agricultural University, Zhengzhou, He'nan* 450002, *China*; 2.*Real Estate Research Center, Nanjing Agricultural University, Nanjing, Jiangsu* 210095, *China*; 3.*College of Public Administration, Nanjing Agricultural University, Nanjing, Jiangsu* 210095, *China*)

Abstract: [Objective] The effects of urban green space landscape pattern on air purification service were studied to provide theoretical guidance for the structural optimization and layout of urban green space landscape. [Methods] Based on the land use data of 2009 and 2019 in the urban area of Anyang City, He'nan Province, the purification efficiency of urban green landscape for SO_2, NO_x and PM_{10} was measured, and the relationship between landscape configuration and airpurification services was explored from a spatial perspective. [Results] ① The landscape area of urban green space in Anyang City decreased by 3 492.18 hm, mainly for construction land. Shannon's diversity index, landscape shape index and contagion index changed from 0.572 7, 44.272 1 and 78.98% to 0.875 8, 90.334 5 and 66.88%. ② The service value of air purification at the

收稿日期:2021-03-16 **修回日期**:2021-04-22
资助项目:河南省软科学计划项目"黄河流域生态服务与经济高质量发展关系演变与优化"(212400410253); 国家自然科学基金项目"生态系统服务供需耦合关系研究:以伊河流域为例"(41901259)
第一作者:位贺杰(1988—),男(汉族),河南省项城市人,博士,校聘教授,硕士生导师,主要从事土地利用变化与生态系统服务研究。Email:hjwei@henau.edu.cn。
通讯作者:杨一鸣(1998—),男(汉族),河南省栾川县人,硕士研究生,研究方向为土地经济与管理。Email:ymyang@stu.edu.cn。

beginning and the end of the studied period was 565 million yuan and 2.67 billion yuan respectively. The proportion of dust retention function value increased from 97.19% to 99.07%, and the contribution of forestland landscape to the total value increased from 88.99% to 94.54%. ③ The high, medium and low value areas of green landscape air purification service presented a mosaic distribution state, and the low value areas of ecological value were more in the early stage, and the medium and high value areas increased significantly in the late stage. ④ The bivariate moran index of Shannon's diversity index, landscape shape index, contagion index and air purification service value was 0.281, 0.458 and −0.305 in 2009, while the corresponding value was 0.403, 0.411 and −0.408 in 2019. [Conclusion] The increase of landscape diversity and the complexity of landscape shape could improve the air purification service, while the decreasing spread of green space landscape would inhibit the air purification service.

Keywords: Anyang City of He'nan Province; urban green landscape; landscape pattern; air purification; ecosystem service value; bivariate moran index; haze

随着中国工业化和城镇化的快速推进,汽车尾气及工业废气过量排放导致雾霾天气增多,危害人类的生产、生活活动及生态空间。由于气体污染物释放源的分布特点,城市的空气污染现象要远多于农村等受人为扰动少的生态系统。城市绿地作为城市自然生态系统的主体部分,具有调节小气候、降温增湿、净化空气等生态功能[1-4],对治理雾霾天气有显著作用,探究城市绿地景观与空气净化之间的关系对改善空气质量和保护环境具有重要意义。

国外研究普遍认为城市绿地可以显著减少大气污染物[5-6]且绿地周边的空气污染低于交通设施周边[7],而关于绿地净化污染物的测算方法,以 i-Tree 模型[8]应用较为广泛,部分采取构建单项污染物消减核算模型的方法[9],有研究[10]结果表明空气污染物的清除量与树种的组合及结构有关。国内相关研究主要集中于大气污染物浓度监测[11],不同方法(物质量和价值量模型)对城市绿地空气净化及其气候调节服务评估[12-15]以及影响因素评价[14,16]。研究结果表明同一区域的绿地对不同的大气污染物(例如硫化物、氮氧化物等)或大气成分(例如二氧化碳、氧气等)调节作用有高低区分,不同绿地类型包括不同种类的植被、不同植被的配置组合对大气污染物的削减量有所区别[11-12,16],与季节的关系也被一些学者关注[14]。梳理国内外研究文献发现城市绿地对区域大气环境调节的作用已被广泛关注,但是目前关于城市绿地空气净化作用的量化研究较少且缺少时间跨度分析,有关城市绿地景观格局与空气净化之间的关系鲜有研究。

河南省安阳市作为"2+26"重点监测城市,《河南省生态环境质量年报》显示 2013 年以来安阳市空气质量在河南省持续最低,且污染程度均在轻污染以上。根据生态环境部发布的《2019 年中国生态环境状况公报》,安阳市空气质量指数在 168 个排名城市中位列年度倒数第一。安阳市工业产业结构偏重,传统支柱产业钢铁、建材、煤化工等对能源资源的依赖程度高,又地处京津冀大气污染物传输通道上,加之地形的影响,极易形成污染物的聚集效应。因此,本文以安阳市辖区为例,研究城区绿地空气净化效能并对其价值量进行测算,探究景观格局与其功能发挥的关系,旨在为城市绿地景观的结构优化和布置提供参考。

1　材料与方法

1.1　研究区概况

安阳市位于河南省最北部,地理位置介于 35°41′—36°21′N 和 113°38′—114°59′E。东接濮阳市,南连鹤壁市,西隔大行山与山西长治相望,北濒漳河与河北邯郸毗邻,素有"豫北要冲、四省通衢"之称。地处太行山脉与华北平原交界的过渡地带,地势西高东低,呈阶梯状分布。安阳市地处北暖温带,属大陆性季风气候,四季分明,多年平均气温 12.7～13.7 ℃,多年平均降水量 560.60 mm。研究区域为安阳市市区,含 4 个市辖区,分别为文峰区、北关区、殷都区、龙安区。截至2019 年,市区土地总面积为 54 360.00 hm^2,其中城市绿地面积 31 971.33 hm^2,所占比例为 58.81%。

1.2　数据来源

本研究的主要数据包括:空气质量监测数据为 2009—2019 年 SO_2,NO_X,PM_{10} 的区域总量变化,来源于河南省生态环境厅公布的《河南省环境统计年报》(http://sthjt.henan.gov.cn/);社会经济数据主要为 2009—2019 年安阳市统计年鉴,来源于安阳市统计局;城区 2 期土地利用数据来源于安阳市自然资源局,通过实地调查并结合 Google 遥感影像,验证得到该土地利用数据准确率在 90%以上,根据安阳市区土地利用现状及景观类型特点,将城市景观分为耕地、园地、林地、草地、水域、建设用地、道路 7 类,前 5 类归纳为城市绿地景观;气象数据包括月降水量、蒸发量、月平均温度、太阳总辐射和净辐射等数据,来源

于中国气象数据网(http://data.cma.cn/);土地覆盖数据从中国地区土地覆盖综合数据集中提出,空间分辨率 100 m,来源于寒旱区科学大数据中心(http://bdc.casnw.net/)。

1.3 研究方法

1.3.1 城市空气污染物变化分析 为证明安阳市城区具有空气净化服务的需求,首先分析了安阳市排放的主要空气污染物的变化,选取 2009—2019 年的雾霾主成分〔二氧化硫(SO_2)、氮氧化物(NO_X)及可吸入颗粒物(PM_{10})〕区域总量的面板数据,通过折线图分析各雾霾主成分的变化情况。

1.3.2 城市绿地景观格局变化分析 城市绿地景观数量变化主要采用转移矩阵[17]表征研究时段初、末期景观类型之间的转移状况。景观格局指数是对研究区域内所有景观类型的综合分析,能够通过数据信息反映景观结构组分和空间分布特征[18]。香农多样性指数(Shannon's diversity index, SHDI)能够反映景观异质性和多样性,可以表征景观内部丰度。景观形状指数(Landscape shape index, LSI)主要凸显景观边缘形状的复杂程度,反映景观的形状特性。蔓延度指数(Contagion index, CONTAG)则描述景观斑块类型的团聚程度或延展趋势,可用来探究绿地景观内部及外部的蔓延状况。因此在景观水平上选择 SHDI, LSI, CONTAG 可以较为全面地反映城市绿地景观空间特征。利用 Fragstats 4.2 软件中的移动窗口法[19]计算研究区的空间景观格局指数。

1.3.3 城市绿地景观空气净化服务价值初步评估 首先结合地域特点对已有研究中的城市绿地对雾霾主成分单位吸收量进行修正、计算(表 1),然后利用《中华人民共和国环境保护税法》中的应税污染物和当量值表中相关数据将气体污染物吸收量转化为统一污染当量值,最后根据《河南省人民政府关于提请审议环境保护税我省适用税额和应税污染物项目数方案的议案》中治理大气污染物每污染当量 4.80 元,即可计算出绿地景观所吸收雾霾当量的治理费用,该值即为绿地景观空气净化服务初步评估价值。其中水域景观的减霾效应几乎为零,故本次研究中不做测算。

$$M_{ij}=A_i \cdot G_{ij} \cdot e \tag{1}$$

式中:M_{ij} 为第 i 类绿地景观类型对第 j 类雾霾成分的吸收量的污染当量(kg/a); A_i 为第 i 类景观类型的面积(hm^2); G_{ij} 为单位面积第 i 类绿地景观类型吸收第 j 类雾霾成分的吸收量〔kg/(hm^2 · a)〕; e 为标准污染当量值(SO_2, NO_X, PM_{10} 当量值分别为 0.95, 0.95, 4)。

$$U=\sum_{i=1}^{4}\sum_{j=1}^{3}M_{ij} \cdot K_{ij} \tag{2}$$

式中:U 为绿地景观空气净化生态系统服务初步评估价值(元/a); K_{ij} 为河南省应税大气污染物每污染当量税额,取常数 4.80 元/kg。

表 1 单位面积绿地景观对雾霾主要成分的吸收量 kg/(hm^2 · a)

城市绿地景观类型	物质吸收量		
	吸收 SO_2	吸收 NO_X	阻滞 PM_{10}
耕 地	45.00	33.50	0.95
园 地	88.65	380.00	10 110.00
林 地	152.13	380.00	21 655.00
草 地	279.03	6.00	1.20

注:单位面积耕地吸收 SO_2,吸收 NO_X、阻滞 PM_{10} 能力,根据马新辉等[20-21]、杨志新等[22]研究结果;单位面积园地吸收 SO_2,吸收 NO_X、阻滞 PM_{10} 能力取阔叶林相关参数[23];单位面积林地吸收 SO_2,阻滞 PM_{10} 能力取针叶林和阔叶林相关参数的均值[24-25],吸收 NO_X 能力,根据彭建等[26]研究结果;单位面积草地吸收 SO_2,吸收 NO_X、阻滞 PM_{10} 能力,根据柳碧晗等[27]、韩晔等[28]研究结果。

1.3.4 城市绿地景观空气净化服务价值修正 植被净初级生产力(NPP)能够体现植物群落生产能力的强弱,较好反映同一地类植物丰度的差异。为凸显同一地类因植被差异所导致的空气净化服务价值的变动,采用 CASA 模型[29]计算出初期和末期的 NPP 后,分别进行标准化处理求得修正系数,利用修正系数对初步评估的空气净化价值进行修正(图 1)。

$$\mathrm{NPP}(x,t)=\mathrm{APAR}(x,t)\times\varepsilon(x,t) \tag{3}$$

式中:$\mathrm{NPP}(x,t)$ 为植物 t 月份在像元 x 处的净初级生产力〔g/(m^2 · a)〕; $\mathrm{APAR}(x,t)$ 为 t 月份像元 x 处的光合有效辐射〔MJ/(m^2 · a)〕; $\varepsilon(x,t)$ 为 t 月份像元 x 处的实际光能利用率(g/MJ)。

$$T=\frac{\mathrm{NPP}(x,t)}{\overline{\mathrm{NPP}(x,t)}} \tag{4}$$

$$U_T=U \cdot T \tag{5}$$

式中:T 为修正系数; $\overline{\mathrm{NPP}(x,t)}$ 为研究区域净初级生产力的均值〔g/(m^2 · a)〕; U_T 为修正后的绿地景观空气净化生态系统服务总价值(元)。

1.3.5 空间自相关分析 空间自相关分为全局空间自相关与局部空间自相关,全局空间自相关可以探究整个研究区域变量之间的相关度,而双变量全局空间自相关分析则可以揭示研究区域内不同变量之间的空间关联性和显著性[30-31],借助 GeoDa1.16.0.16 计算研究区域内城市绿地空气净化服务价值与其景观格局指数的空间自相关性。一般采用 Moran's I 指数来描述空间自相关性[32]。

$$I=\frac{\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}w_{ij}(x_i-\bar{y})(x_j-\bar{y})}{S^2S_0} \tag{6}$$

式中:I 为双变量莫兰指数;n 为空间单元总个数;w_{ij} 为空间权重;x_i,x_j 分别为第 i 个空间单元、第 j 个空间单元第一变量的属性值;$\bar{y}$ 为第二变量属性值的均值;$S^2=\frac{1}{n}\times\sum_{i=1}^{n}(x_i-\bar{y})^2$;$S_0=\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}w_{ij}$ 是所有变量的空间权重之和。

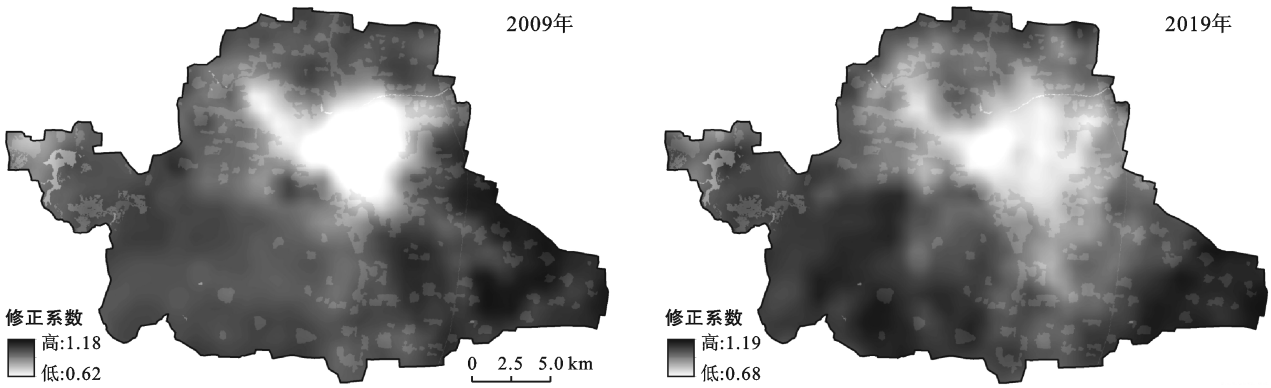


图 1　基于 NPP 的安阳市区空气净化服务价值修正系数空间分布

2　结果与分析

2.1　城市空气污染物排放变化

通过二氧化硫、氮氧化物和可吸入颗粒物的区域总量反映安阳市空气污染物排放状况(图 2)。SO_2 除 2011 和 2014 年有小幅增长外,整体变化趋势呈现为下降,末期较初期减少了 140 025.85 t,减幅 92.06%。NO_X 变化趋势大体呈现先增加后下降,末期较初期减少了 9 607.56 t,减幅 26.11%。由于初期 NO_X 的区域总量并不多,所以末期减幅不明显,但是与峰值年 2015 年相比,4 a 期间减少了 77 761.88 t。PM_{10} 变化呈现先下降后上升再下降的“几”字形状趋势,在 2014 和 2015 年区域总量达到顶峰之后开始急速下降。整体来说,PM_{10} 末期较初期减少了 104 473.65 t,减幅79.03%。SO_2,NO_X,PM_{10} 这 3 类指标的区域总量均在 2014 和 2015 年达到重要“拐点”,“拐点”之后 3 类指标的排放都呈现下降态势。受环保政策影响,以安钢集团为代表的重工业企业工厂迁出或停产是空气污染物区域总量下降的主要原因。由于以上数据未考虑到空气污染物的传输,所以下降态势并不意味着安阳城区空气质量的明显好转。安阳市空气污染物的排放及带来的环境风险说明市区公众有空气净化服务的需求,为下一步市区绿地景观空气净化服务具有价值评估的潜力提供了基础。

2.2　城市绿地景观数量及格局变化

表 2 表征了 2009—2019 年安阳市区各景观类型之间相互转移的情况。2009 和 2019 年安阳城市绿地景观面积分别为 35 463.51 hm^2 和 31 971.33 hm^2,共减少了 3 492.18 hm^2,减幅 9.85%。城市绿地转出面积 6 991.28 hm^2,其中 76.59% 转为建设用地、23.41%转为道路,这与城市建成区的扩张、大型基础设施的修建、城市路网的完善密切相关。城市绿地转入面积 3 499.09 hm^2,87.09% 来源于建设用地,12.91%来源于道路。就绿地景观内部转移情况来看,耕地的转出面积最大为 11 320.97 hm^2,转移的主要绿地景观去向为林地,比例 33.71%。从转出比例来看,草地的转出比例最大,87.74%的草地转为其他景观类型,其中有 53.61%转移为耕地。转入面积最多的是林地,共有 5 660.49 hm^2,其来源比例大小依次为耕地、水域、草地、园地。转入比例分列首次的是园地和林地,两者的比例分别为 91.66%和 91.61%,其他均不足 90%。

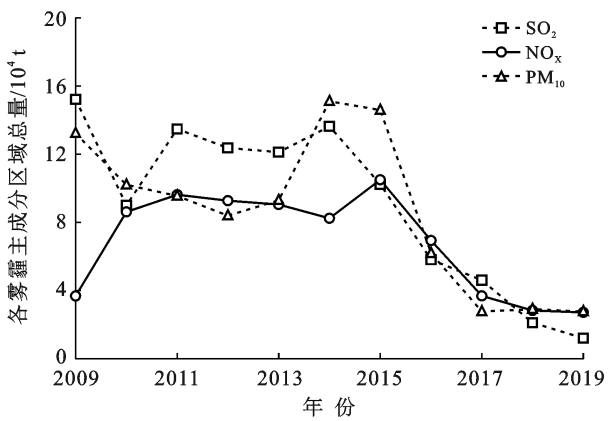


图 2　安阳市 2009—2019 年雾霾主成分区域总量变化

香农多样性指数是景观丰富度的表征(表 3),其值由初期 0.572 7 提升到末期 0.875 8,说明安阳市绿地景观异质性不断提高,城区扩张和植树造林不断削减耕地的景观比例,从而改变较为单一景观类型的状态。景观形状指数大幅上升,由 44.272 1 增长为

90.334 5,说明安阳市内的斑块形状趋于复杂化,这是由于土地利用的多样性增多,造林绿化形成的疏林地散乱镶嵌在其他景观上,以及路网的丰富破坏了原有斑块形状。城市绿地的蔓延度指数自初期 78.98%下降到末期 66.88%,这是由于在经济发展和城市建设中,城乡建设用地不断侵占、蔓延其周边的绿地,导致城乡建设用地的蔓延程度超过了绿地,在一定程度上抑制绿地景观的蔓延。

表 2 安阳市区 2009—2019 年景观类型转移矩阵 hm^2

土地利用类型		2019 年						
		耕 地	园 地	林 地	草 地	建设用地	水 域	道 路
2009 年	耕 地	19 222.32	500.78	3 816.49	233.92	4 662.22	635.98	1 471.57
	园 地	59.19	60.82	46.55	2.50	58.60	15.94	11.26
	林 地	342.99	13.63	518.32	13.49	241.72	59.85	56.53
	草 地	624.95	13.33	314.41	162.86	143.96	31.30	37.78
	建设用地	1 725.31	100.77	927.57	76.60	12 831.87	217.28	1 435.65
	水 域	560.32	24.93	347.58	20.84	248.20	828.92	59.45
	道 路	196.98	14.68	207.88	5.48	597.50	26.54	532.37

表 3 安阳市区 2009 和 2019 年绿地景观格局指数变化

年份	香农多样性指数(SHDI)	景观形状指数(LSI)	蔓延度指数(CONTAG)/%
2009	0.572 7	44.272 1	78.980 6
2019	0.875 8	90.334 5	66.879 3

2.3 城市绿地景观空气净化服务价值数量变化

安阳城市绿地景观研究期初、末空气净化服务价值分别为 5.65 亿元和 26.70 亿元,按价值量计算可分别达到当年地区生产总值的 1.81%和 4.13%。纵向来看,安阳城市绿地景观空气净化服务主要体现在阻滞 PM_{10}上,其对生态服务总价值的贡献率从 2009 年的 97.19%提升到了 2019 年的 99.07%,而吸收 SO_2 和吸收 NO_X 的生态系统服务价值对总价值的贡献始终处于微弱状态,无论是在研究期初或末,两者之和均不足 3%。由此可见,城市绿地景观空气净化的主要功能是滞尘,其次才是吸收硫化物和氮氧化物。各绿地景观对空气净化服务的价值贡献差异较大,林地景观对总价值的贡献最大,从 88.99%提升为 94.54%,其次为园地、耕地,最少为草地。研究期初和末,安阳市区各绿地景观面积虽有变化,但服务价值构成结构较为稳定。2019 年城市绿地面积较 2009 年减少3 492.18 hm^2,减幅 9.85%,服务总价值却增长了 3.73 倍。原因在于林地和园地面积的大幅增加,尤其是林地结构比例的提升。林地景观单位面积空气净化价值最大,为 41.82 万元/hm^2,而园地、耕地、草地的依次为 19.62,0.04,0.13 万元/hm^2。林地空气净化服务价值增长 20.22 亿元,占新增总价值的 96.03%。安阳市区新增林地上的树木多为乔木,乔木往往枝干高大,树冠茂密,对可吸入颗粒物的阻挡、停滞作用十分显著,同时由于枝叶茂盛,对氮、硫等气体污染物吸收作用明显。另外,以林地为基础的林地生态系统植被丰富且密度大,植物的蒸腾作用强烈,导致其上空的大气湿度要高于其他地区,这对其生态系统功能的发探具有积极作用(表 4)。

表 4 安阳城市绿地景观空气净化服务价值量 10^4 元/a

生态系统服务	吸收 SO_2		吸收 NO_X		阻滞 PM_{10}		总价值	
	2009 年	2019 年	2009 年	2019 年	2009 年	2019 年	2009 年	2019 年
耕 地	617.15	466.70	459.43	347.43	57.28	41.48	1 133.86	855.62
园 地	9.73	28.13	41.73	120.57	4 867.64	13 506.88	4 919.10	13 655.59
林 地	83.42	418.78	208.39	1 046.09	50 001.33	251 003.55	50 293.14	252 468.42
草 地	165.09	67.68	3.55	1.46	2.99	1.17	171.63	70.30
合 计	875.40	981.29	713.10	1 515.55	54 929.24	264 553.09	56 517.74	267 049.93

2.4 城市绿地景观空气净化服务价值空间变化

利用自然断点法对城市绿地景观空气净化服务价值强弱进行分级,在整个研究时期中,价值分布呈现南多北少,西南部龙安区的空气净化服务价值始终居 4 区首位。绿地景观空气净化服务高、中、低值区呈现镶嵌分布状态,并未有明显的分界现象,研究末期较初期空气净化服务空间差异明显,整体提升幅度较大,不同等级功能区的镶嵌现象更为凸显(图 3)。

2009 年安阳城市绿地景观空气净化服务低值区域集中连片,占据全区大部分面积,这是由于耕地景观作为基质绿地景观,其覆盖的作物往往茎杆低矮致使滞尘能力低下,使整体的净化能力不够凸显。栅格尺度空气净化服务中值区主要聚集在安阳河上、中游以及南水北调中线渠中段东侧三片区域。安阳河上游中值区的形成源于多个传统村庄所属的耕地集聚,田块规整、植被丰富,该处以耕地为基础的生态系统规模大且稳定性高,除了粮、经农作物外还有防护林、果树等多种植被。安阳河中游中值区与殷墟王陵遗址区域基本套合,遗址景区的修建改变了原本单一生态系统,使景观及植被多样性增加,提升了空气净化服务效能。而南水北调中线渠中段东侧由于洹水湾温泉旅游区项目的建设,通过人工定向植树造林营造的园林生态系统显著提高空气净化功能。高值区域主要破碎地分布在西南部龙安区,此处海拔较高且多为丘陵地形受人为扰动少,自然状态下树木散乱生长,其叶片吸收氮硫气体污染物、枝干相互遮挡滞尘效果好。

2019 年空气净化服务价值显著提升,中、高值区呈现多点高密度式增加。栅格尺度新增中值区城市环线内少有分布,以近郊分布居多,其中北部最为明显。这与城市功能区的划定关系密切,安阳河以北地区并非城市扩展主方向,作为郊区承担生态涵养与调节功能,北部出现了农家乐、采摘园等新型农业休闲区,形成了耕、园、林 3 种地类交织的现象,景观及植被的替换提升了空气净化服务价值,京港澳高速北部沿线的新增中值区的形成机制与此处相似。研究时段末期新增高值区的分布具有明显“贴附”现象,即以南林高速、京港澳高速和南水北调中线渠 3 条带状景观外侧最为明显。实地调研发现,由于京港澳、南林高速贴近居住区,其噪声、污染严重,市政府增加了周边防护林。为了涵养水源、保障饮水水质安全,在南水北调中线干渠两侧加强了防护林带建设,形成了沿线生态保育带。另外龙安区的高值区增加点较多,此处属太行山余脉的低山丘陵区,原有大量无立木林地和疏林地,10 a 间通过人工造林、封山育林、飞播造林等措施,显著地促进了空气净化服务价值的提升。

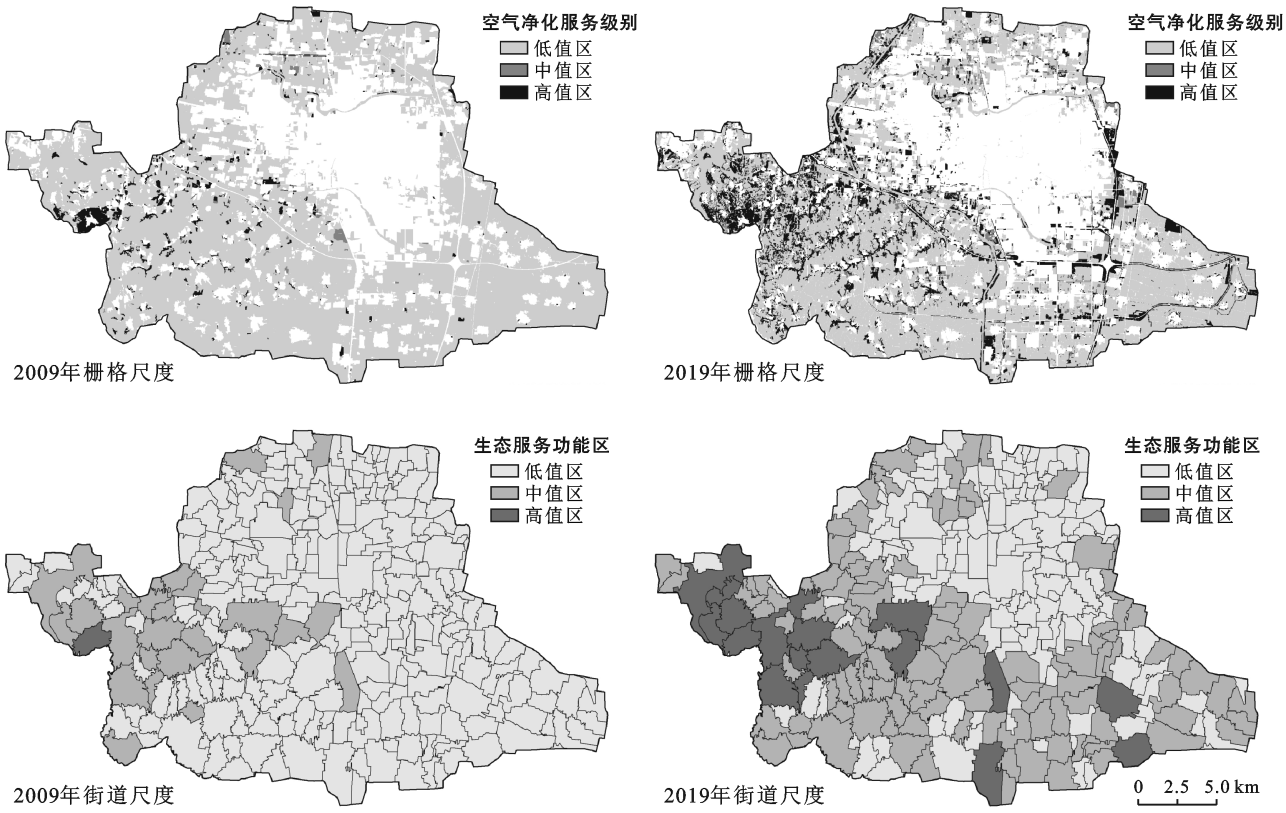


图 3　安阳城市绿地空气净化服务价值栅格尺度及街道尺度分布

2.5　空气净化服务与景观格局的关系

为明晰绿地景观格局的组成及构型对空气净化服务价值的影响,采用两期的景观指数分别与对应的空气净化服务价值进行空间自相关分析。结果显示 2009 年 SHDI,LSI,CONTAG 与生态系统服务价值(ESV)的双变量莫兰指数分别为 0.281,0.458 和 −0.305,而

2019 年相应双变量莫兰指数分别为 0.403，0.411 和 −0.408，置信度均大于 90%（表 5），说明 SHDI，LSI 与 ESV 始终呈现显著的正向空间自相关，而 CONTAG 则与 ESV 始终呈现显著的负向空间自相关。①香农多样性与空气净化服务价值始终呈现正相关，说明景观多样性的增加有利于空气净化能力的提升，这也反映了单一绿地景观对空气的净化效能不如景观类型多样、植被类型复杂的绿地景观。2009 年耕地景观的景观类型比例为 86.10%，2019 年下降为 71.11%，而林地景观由初期的 3.51%增长为末期的 19.32%，增幅高达 4.5 倍。安阳市城市绿地景观的景观多样性显著增加，其植被类型也有了较大改观，由低矮农作物变更为高大乔木或灌木。景观多样性的增加促进生物多样性的提高，使生态系统更稳定、生态功能更显著。②景观形状指数与空气净化服务价值也始终为正相关，随着景观形状指数的提高空气净化服务价值提升，可见形状规则的绿地景观不如形状复杂的绿地景观空气净化功能强。安阳市的国土绿化工程显著提升了整个市区的绿植覆盖率，但由于技术和地质特点，新增林地难以成块规整地出现而是零星点缀在固有景观上，以西南部龙安区为例，林地斑块的出现极大地破坏了耕地景观的形状。随着安阳市产业转型以及生态文明的推进，安阳市整治了许多小块的工业用地，将其转化为各种类型的绿地，另外在工业、交通用地周围增加了许多绿地，这些整理措施使原有地类斑块形状的完整性造成了破坏，但提高了整体景观空气净化服务。③蔓延度指数与空气净化服务价值始终为负相关，可见一种景观对另一种景观的蔓延对于景观整体空气净化的能力会产生抑制作用。在城市生态系统中不同地类景观相互交织、交错，景观之间相互蔓延，在安阳市的具体表征为城乡建设用地的蔓延侵占了其周边原有的绿地景观，而城市绿地景观的蔓延程度要低于建设用地景观，直接削减绿地景观的规模，不利于空气净化服务功能的发挥。

表 5 空气净化服务价值与景观指数的双变量莫兰指数变化

年份	ESV 与 SHDI		ESV 与 LSI		ESV 与 CONTAG	
	Moran's I	Z 得分	Moran's I	Z 得分	Moran's I	Z 得分
2009	0.281	1.821 4	0.458	2.920 5	−0.305	1.950 4
2019	0.403	2.440 7	0.411	2.726 8	−0.408	2.458 1

3 讨 论

本研究基于功能价格法测算安阳城市绿地空气净化服务价值，根据 2018 年实施的《中华人民共和国环境保护税法》和《河南省人民政府关于提请审议环境保护税我省适用税额和应税污染物项目数方案的议案》对空气净化物质量定价，并利用 NPP 对评估结果进行修正。研究揭示了安阳城市绿地景观空气净化的价值较高，按价值量计算最高可达当年地区生产总值的 4.13%。利用 GIS 的空间分析功能呈现了绿地景观空气净化高、中、低值区的镶嵌分布，并非高、中、低之间界线明显，尤其高值区具有明显的“贴附”现象。在空间依赖度分析上，利用双变量莫兰指数探讨了景观格局对空气净化服务的影响，空间自相关分析考虑了空间上各因素间的相互作用性，使结果更加科学准确。

景观格局指数可以定量化、直观表征景观构型，但由于地域性差异，等量的景观指数可能反映出不同的空间格局特征，其对生态系统服务的影响存在显著差异，甚至完全相反，如孙滢展等[33]与杨延成等[34]的研究中散布与并列指数增幅均在 6%～7%，前者具体表现为与耕地地块临近的沟渠、农村道路增多，而后者则表征草地、林地等景观受制于水的分布与体量增大彼此邻近。在本研究中，由于单位面积空气净化效能最高的林地景观面积不断提升、分布不断扩张，导致整体景观的异质性增加，其他地类斑块的形状破损，使得 SHDI，LSI 始终对 ESV 表现为正向影响。而绿地景观的扩张、蔓延的程度不及建设用地景观，致使 CONTAG 对 ESV 表现为负向影响。因此，要结合地域性特征和实际情况，探讨绿地景观构型对空气净化效能的影响，从而选择最佳的景观构型。

政府行为对安阳市绿地景观格局变化及其空气净化服务价值具有重要影响，无论在空气质量的改善还是景观格局变动中政府行为均发挥了重要的作用。以政府为主导的城区扩张、大型基础设施修建和路网完善，导致城市绿地景观大量向建设用地和道路转移，致使景观的形状趋于复杂、绿地的蔓延度不断下降。道路绿化、植树造林、森林城市等政府措施增加了林地等绿地景观比例，改变了原有较为单一的景观结构，提高了景观的异质性和多样性。由于政府行为的影响，单位面积空气净化效能较大的林地和园地景观面积不断增加，促进安阳市区整体景观空气净化能力的提升。南林高速、京港澳高速和南水北调中线渠等大型基础设施及其周边立体绿化和生态保育带的修建，形成了空气净化服务高值区“贴附”在其周边的现象，另外，遗址公园、温泉旅游区、休闲农业区等项目营造的人工园林生态系统对于提升景观空气净化服务有重要作用。政府的耕地占补平衡制度、退耕还林制度、蓝天工程实施方案、大气污染防治攻坚战实施方案等深刻影响着安阳市绿地景观变化和空气净

化服务价值。因此,政府行为是城市生态系统改变的主导性因素,在城市建设和管理中通过政策措施直接或间接影响着城市景观格局及其生态服务功能。

4 结 论

(1) 从 2009 年到 2019 年,安阳城市绿地景观总面积减少 3 492.18 hm^2,而绿地景观内部林地转入面积最多,为 5 660.49 hm^2,其中由耕地转变为林地的面积为 3 816.49 hm^2。景观的异质性和多样性增加,斑块形状趋于复杂,而蔓延度下降。

(2) 安阳城市绿地景观空气净化服务价值由5.65 亿元提升到 26.70 亿元,其功能主要体现在滞尘上,林地景观对空气净化服务的贡献最大。研究期内绿地景观面积减少,但空气净化服务价值却增长了 3.73 倍,说明景观规模不是影响空气净化的主要因素。

(3) 绿地景观空气净化服务高、中、低值区呈现镶嵌分布状态,研究时段初期低值区占据大部分面积,末期中、高值区面积有了显著增长。其中新增高值区对带状景观有明显向周边"贴附"的现象,源于其周边乔灌草立体绿化形成的生态廊道。

(4) 景观多样性的增加以及景观形状的不规则有助于提升空气净化服务,具体表现为林地等空气净化服务较强的绿地景观比例提升并破坏了固有景观形状。作为空气污染源的建设用地景观蔓延度超过了绿地景观,不利于空气净化服务功能的发挥。

[参 考 文 献]

[1] 钮子鹏,章皖秋,岳彩荣.昆明市绿地斑块特征对地表降温的影响[J].西南林业大学学报(自然科学版),2018,38(6):151-158.

[2] 薛雪,张金池,孙永涛,等.上海常绿树种固碳释氧和降温增湿效益研究[J].南京林业大学学报(自然科学版),2016,40(3):81-86.

[3] 谢紫霞,张彪,余欣璐,等.上海城市绿地夏季降温效应及其影响因素[J].生态学报,2020,40(19):6749-6760.

[4] 王琴,谢梦婷,沈秋月,等.城市园林绿地消减大气 PM_(2.5)浓度研究进展[J].世界林业研究,2021,34(3):46-51.

[5] Shirkou J, Afshin A S, Mazaher M, et al. Applying landscape metrics and structural equation modeling to predict the effect of urban green space on air pollution and respiratory mortality in Tehran [C]// Environmental Monitoring and Assessment: An International Journal Devoted to Progress in the Use of Monitoring Data in Assessing Environmental Risks to Man and the Environment, 2020,192(7):412.

[6] Maryam M, Vahid H. An investigation into the effects of green space on air quality of an urban area using CFD modeling [J]. Urban Climate, 2020,34:100686.

[7] Jenny K, Malin B, Bo Strandberg, et al. Influence of urban vegetation on air pollution and noise exposure: A case study in Gothenburg, Sweden [J]. Science of the Iotal Environment, 2017,599/600:1728-1739.

[8] Wissal S, Christiane W, Emmanuel R, et al. Air pollution removal by trees in public green spaces in Strasbourg City, France [J]. Urban Forestry & Urban Greening, 2016,17:192-201.

[9] Sebastiani A, Buonocore E, Franzese P P, et al. Modeling air quality regulation by green infrastructure in a Mediterranean coastal urban area: The removal of PM_{10} in the Metropolitan City of Naples(Italy) [J]. Ecological Modelling, 2021,440:109383.

[10] Vahid A P, Esmail S, Ahmad R Y, et al. Analyzing temporal changes in urban forest structure and the effect on air quality improvement [J]. Sustainable Cities and Society, 2019,48:101548.

[11] 俞琳琳,胡海波,余伟.城市绿地类型对大气 PM_(2.5)浓度的影响[J].南京林业大学学报(自然科学版),2020,44(3):179-184.

[12] 王科朴,张语克,刘雪华.北京城市绿地对大气颗粒物的削减量计算[J].环境科学与技术,2020,43(4):121-129.

[13] 胡小飞,傅春.南昌城市绿地系统生态调节服务功能价值动态分析[J].江西农业大学学报,2014,36(1):230-237.

[14] 杨曼,黄华芳,张兆奇,等.石家庄裕西公园绿地春季增湿效应[J].应用与环境生物学报,2017,23(2):333-342.

[15] 张超,吴群,彭建超,等.城市绿地生态系统服务价值估算及功能评价:以南京市为例[J].生态科学,2019,38(4):142-149.

[16] 孙晓丹,李海梅,刘霞,等.不同绿地结构消减大气颗粒物的能力[J].环境化学,2017,36(2):289-295.

[17] 王宁,杨光,韩雪莹,等.内蒙古 1990—2018 年土地利用变化及生态系统服务价值[J].水土保持学报,2020,34(5):244-250.

[18] 吕金霞,蒋卫国,王文杰,等.近 30 年来京津冀地区湿地景观变化及其驱动因素[J].生态学报,2018,38(12):4492-4503.

[19] 梅昭容,李云驹,康翔,等.基于移动窗口分析法的矿区景观格局时空演变研究[J].国土资源遥感,2019,31(4):60-68.

[20] 马新辉,任志远,孙根年.城市植被净化大气价值计量与评价:以西安市为例[J].中国生态农业学报,2004,12(2):185-187.

[21] 马新辉,孙根年,任志远.西安市植被净化大气物质量的测定及其价值评价[J].干旱区资源与环境,2002,16(4):83-86.

(下转第 309 页)

[7] Abdullahi S, Pradhan B, Jebur M N. GIS-based sustainable city compactness assessment using integration of MCDM, Bayes theorem and RADAR technology [J]. Geocarto International, 2015,30(4):365-387.

[8] Posada H M. Informal housing, spatial structure, and city compactness [J]. Journal of Regional Science, 2018,58(4):822-836.

[9] Abdullahi S, Pradhan B, Mojaddadi H. City compactness: Assessing the influence of the growth of residential land use [J]. Journal of Urban Technology, 2018,25(1):21-46.

[10] Salvati A, Coch H, Morganti M. Effects of urban compactness on the building energy performance in Mediterranean climate [J]. Energy Procedia, 2017, 122: 499-504.

[11] Echenique M H, Hargreaves A J, Mitchell G, et al. Growing cities sustainably: Does urban form really matter? [J]. Journal of the American Planning Association, 2012,78(2):121-137.

[12] 潘竟虎,韩文超.近 20 年中国省会及以上城市空间形态演变[J].自然资源学报,2013,28(3):470-480.

[13] 唐尧,宋瑜,谢俊杰.2000—2010 年中国城市空间形态紧凑度变化特征分析[J].生态科学,2016,35(3):134-139.

[14] Zhao Fangqi, Tang Lina, Qiu Quanyi, et al. The compactness of spatial structure in Chinese cities: Measurement, clustering patterns and influencing factors [J]. Ecosystem Health and Sustainability, 2020,6(1):743-763.

[15] 黄永斌,董锁成,白永平.中国城市紧凑度与城市效率关系的时空特征[J].中国人口·资源与环境,2015,25(3):64-73.

[16] 田成诗,李金.大型城市紧凑度与能源效率的关系研究[J].自然资源学报,2018,33(10):1781-1795.

[17] 曹小曙,梁斐雯,陈慧灵.特大城市空间形态差异对交通网络效率的影响[J].地理科学,2019,39(1):41-51.

[18] 刘润佳,把多勋.中国省会城市紧凑度与城镇化水平关系[J].自然资源学报,2020,35(3):586-600.

[19] 杨丽霞,夏浩,苑韶峰.基于耦合协调度的土地利用经济效益空间差异分析:以浙江省为例[J].中国土地科学,2015,29(11):83-88.

[20] 朱文娟,孙华.江苏省城市土地利用效益时空演变及驱动力研究[J].中国土地科学,2019,33(4):103-112.

[21] 刘畅,师学义,梁旭琴,等.基于物元模型的资源型城市土地利用效益动态评价研究[J].水土保持研究,2015,22(4):122-126.

[22] 梁红梅,刘卫东,刘会平,等.深圳市土地利用社会经济效益与生态环境效益的耦合关系研究[J].地理科学,2008,28(5):636-641.

[23] 朱从谋,李武艳,徐保根.长三角城市群城乡建设用地时空关联特征及其利用效益研究[J].中国土地科学,2019,33(8):63-70.

[24] 薛建春,郑海潮,王雅荣.基于熵值法的呼包鄂区域土地利用效益与城市化水平耦合协调研究[J].水土保持通报,2019,39(3):256-262.

[25] 唐永超,王成新,王瑞莉,等.基于精明发展的城市扩张与土地利用效益的耦合研究:以济南市主城区为例[J].人文地理,2020,35(4):91-98.

(上接第 299 页)

[22] 杨志新,郑大玮,文化.北京郊区农田生态系统服务功能价值的评估研究[J].自然资源学报,2005,20(4):564-571.

[23] 张绪良,徐宗军,张朝晖,等.青岛市城市绿地生态系统的环境净化服务价值[J].生态学报,2011,31(9):2576-2584.

[24] 中华人民共和国国家环境保护局.中国生物多样性国情研究报告[M].北京:中国环境科学出版社,1998.

[25] 赵忠宝,李克国,曾广娟,等.秦皇岛市森林生态系统服务功能评价研究[J].干旱区资源与环境,2012,26(2):31-36.

[26] 彭建,王仰麟,陈燕飞,等.城市生态系统服务功能价值评估初探:以深圳市为例[J].北京大学学报(自然科学版),2005,41(4):594-604.

[27] 柳碧晗,郭继勋.吉林省西部草地生态系统服务价值评估[J].中国草地,2005(1):13-17,22.

[28] 韩晔,周忠学.西安市绿地景观吸收雾霾生态系统服务测算及空间格局[J].地理研究,2015,34(7):1247-1258.

[29] 朱文泉,潘耀忠,张锦水.中国陆地植被净初级生产力遥感估算[J].植物生态学报,2007,31(3):413-424.

[30] 王永琪,马姜明.基于县域尺度珠江—西江经济带广西段土地利用变化对生态系统服务价值的影响研究[J].生态学报,2020,40(21):7826-7839.

[31] 卢新海,唐一峰,易家林,等.基于空间计量模型的耕地利用转型对农业经济增长影响研究[J].中国土地科学,2019,33(6):53-61.

[32] 李振瑜,张建军,耿玉环.基于空间关系的长江经济带城市群生态效应扩散研究[J].中国农业大学学报,2017,22(1):161-171.

[33] 孙滢展,张蚌蚌,陈海滨.合作社自主型土地整治对耕地格局及其利用的影响[J].中国农业大学学报,2020,25(11):199-208.

[34] 杨延成,阿里木江·卡斯木,祖拜旦·阿克木,等.干旱区绿洲灌溉条件下生态服务价值研究:以新疆轮台县为例[J].冰川冻土,2019,41(4):1005-1014.