

文章编号: 2096-1618(2022)02-0221-13

土地利用变化与大气污染物的相关性研究

李浩楠, 曾胜兰

(成都信息工程大学大气科学学院, 四川 成都 610225)

摘要:利用 2015 年和 2018 年两期四川省土地利用数据及 2015–2018 年四川省 17 个城市环境监测站的 SO_2 、 NO_2 、 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 的逐日质量浓度监测资料, 分析了研究区土地利用结构、景观格局和 4 种污染物的时空变化及各土地类型和景观格局与 4 种污染物的相关关系。结果表明: (1) 草地、耕地和林地 of 研究区域内优势景观, 从 2015–2018 年土地利用变化主要是建设用地大面积增加而耕地面积大幅度减小; 研究区内景观类型趋于均衡化分布, 景观破碎化增加且连通性降低, 其中耕地、林地、水域和建设用地的破碎度增加, 草地的破碎度减小。 (2) 空间分布上, 成都、达州和眉山的 NO_2 污染比较严重, 宜宾、眉山、南充、自贡、泸州、成都和乐山 $\text{PM}_{2.5}$ 污染比较严重; 成都、德阳、资阳、眉山、达州和自贡 PM_{10} 比较严重; 资阳、广元、泸州、内江、宜宾和广安 SO_2 污染比较严重。时间分布上, 4 种污染物的月均浓度呈现夏季低冬季高, 就污染物浓度的时序趋势而言, $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 和 SO_2 呈显著下降趋势, NO_2 下降趋势不明显。 (3) 建设用地和耕地面积增加会加剧 PM_{10} 和 NO_2 污染; 草地对于 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 有沉降作用。整体景观破碎度越高越有利于 PM_{10} 浓度的降低, 景观破碎度和均匀度越高, NO_2 污染越严重。

关键词:土地利用; 景观格局; 大气污染物; 时空变化; 相关性分析

中图分类号: X511

文献标志码: A

doi: 10.16836/j.cnki.jcuit.2022.02.017

0 引言

随着中国城市化、工业化的快速推进, 随之而来的城市大气污染问题也日益突出, 研究城市大气污染物的分布情况及其与土地利用变化的相关性对解决城市大气污染有重要意义。很多研究已经证明了下垫面对城市气候有影响, 而且已经成为城市气候学的重点研究方向之一。水面、绿地和人工建筑等各种类型的下垫面组成了城市下垫面, 城市景观格局又是由各类型下垫面的空间形态及结构布局所构成。景观格局在某种程度上能够对城市大气污染物和气象场的空间分布等大气环境特征起决定性作用^[1]。随着经济社会的不断发展, 中国居民生活水平越来越高, 车辆和其他交通工具的数量逐年增加, 排放的氮氧化物、硫氧化物和碳氧化物直接危害城市环境。城市绿地面积逐年增加, 但是绿化率仍然很低, 导致空气中有大量的颗粒物。目前, 城市污染已得到一定程度的缓解, 空气污染治理取得一定成果, 但检测结果表明, 城市空气中仍有许多悬浮颗粒物。在中国许多城市, 颗粒总悬浮物的浓度符合国家二次空气质量标准, 约占总量的 60%^[2]。

孙继平等^[3]研究指出, 在成渝地区, 从时间变化来看, 2015–2018 年的年平均 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度呈下降趋势。就

空间分布而言, 研究区域的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度总体表现为中低, 西部和北部边缘地区高, 西南低。连俊标^[4]研究指出, 2015–2018 年, 四川盆地主要污染物是颗粒物和 O_3 , 严重污染主要由细颗粒物引起的。近四年来, SO_2 、 CO 、 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 的年平均浓度显著下降, 但颗粒物的年平均浓度仍高于国家标准。在冬季颗粒物污染最严重, 成都、自贡、达州和重庆是污染物浓度日变化高值的中心。近些年来, 随着 GIS 技术和遥感的进步, 大气污染物与土地利用类型^[5]、城市结构^[6]及某些特定土地类型^[7]的相关研究也相继展开。Sarrat 等^[8]在研究中提出巴黎城市建筑物的结构对 O_3 和 NO_x 等大气污染物的浓度影响显著。城市绿地不仅能够维持城市生态系统平衡, 而且也能改善生态环境。合理的城市绿地规划和布局能够降温 and 增湿, 吸收有害气体等^[9]。Currie 等^[10]应用 UFORE 模型, 通过对比不同城市绿地组合对降低大气颗粒物浓度的程度, 找到了最合理的城市绿地配置; 吴志萍等^[11]研究表明, 合理规划绿化结构和增加城市绿化数量可以提高空气质量。袁杨森等^[12]研究表明, 北京市 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 的空间分布存在明显差异。 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 的浓度随商业区、居民区、风景区、交通干线区和工业区的地理位置而变化。唐昀凯等^[13]研究表明, 武汉市的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度空间分布特征明显, 建设用地比例增大将增加 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度, 绿地比例增大则将降低 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度, 耕地和水域对 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度无显著影响。万伟华^[14]研究

指出建设用地、耕地、建设用地和水域面积的增加对 $PM_{2.5}$ 的积累具有积极作用,林地和草地对城市 $PM_{2.5}$ 的沉降有显著影响。从不同景观类型的角度来看,耕地斑块越零散,越复杂,越有利于降低 $PM_{2.5}$ 浓度。林地和草地斑块面积越大、与其他景观类型的接触边界越大,越有利于 $PM_{2.5}$ 沉降,连续大规模的城市建设用地和水域更有利于加剧 $PM_{2.5}$ 污染。Weber 等^[15] 研究指出,在没有实际监测数据的时候,城市景观指数可以作为 PM_{10} 的良好指标。

目前对于土地利用与大气颗粒物的研究比较多,但鲜有土地利用与其他大气污染物的研究,因此,开展土地利用和景观格局与 SO_2 、 NO_2 、 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 4 种大气污染物的相关性研究是必要的。在展开研究之前首先提出假设:当耕地面积减小时,草地和林地面积增加时对 4 种污染物有沉降作用,当建设用地面积增加时会加剧大气污染;整体景观趋于破碎化和均匀化时使污染物浓度降低。为证明此假设,本文针对四川省所选研究区,分析其土地利用结构和景观格局及其 4 种污染物的时空变化,探讨土地利用和景观格局与污染物的相关性,为城市未来土地资源发展规划及景观的合理配置提供科学依据。

1 资料来源和研究方法

1.1 研究区域

选取四川省 17 个城市,如图 1 所示。包括泸州市、

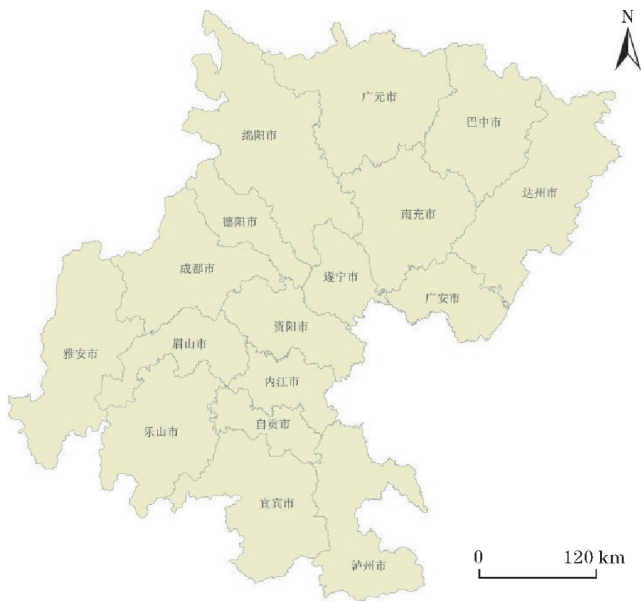


图 1 研究区域图

资阳市、南充市、德阳市、眉山市、遂宁市、雅安市、绵阳市、广元市、内江市、广安市、达州市、巴中市、自贡市、宜宾市、乐山市和成都市。

1.2 资料来源

选取四川省 17 个城市环境监测站的 2015 年 1 月 1 日–2018 年 12 月 31 日的 SO_2 、 NO_2 、 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 的逐日质量浓度监测资料,来源于中华人民共和国生态环境部。2015 年和 2018 年两期四川省土地利用数据及 2015 年中国地市行政边界数据来源于中国科学院资源环境科学与数据中心。

1.3 研究方法

1.3.1 土地利用和景观格局变化分析

基于 ArcGIS10.2 完成对所研究区域土地利用数据的空间提取、重分类和制图,将地类重分为 6 大类:建设用地、林地、草地、水域、耕地和未利用地;基于 Fragstats4.2,选用斑块密度(PD)、香农多样性指数(SHDI)、香农均匀性指数(SHEI)、蔓延度指数(CONTAG)、形状指数(LSI)、边缘密度(ED)共 6 个景观指数分析研究区 2015–2018 年景观格局变化特征,景观格局指数生态学意义如表 1 所示。

1.3.2 污染物时空变化分析

利用 2015–2018 年研究区 17 个城市 4 种大气污染物逐日质量浓度资料,分析了污染物的月、季节和年变化特征,再分别统计各城市 2015–2018 年的年均浓度来探讨研究区各城市各污染物的空间分布特征。

1.3.3 相关性分析

使用 SPSS 软件的皮尔森相关分析方法,分析了研究区污染物浓度与土地利用面积和景观格局指数的相关关系。

2 土地利用时空格局变化分析

2.1 土地利用结构时空变化

研究区土地利用现状如图 2 所示,2015–2018 年各地类面积统计表见表 2,研究区面积共计 18.5590 万 km^2 。从整个研究区可以看出耕地、林地和草地是优势景观,而水域、建设用地和未利用地则占比较小。其中耕地主要分布在研究区中部、南部和东部;而林地和草地则主要半包围着耕地分布在研究区南部、西部、北部及东北部边缘;建设用地呈以成都市为中心向周边城市逐渐发展的趋势。

表 1 景观格局指数及生态学意义

指数	缩写	计算公式	公式简述	生态学意义
斑块密度	PD	$PD=\frac{n_i}{A}\times10000\times100$	n_i 为 i 景观类型斑块个数	每百公顷斑块的数量,可用于表征景观和类型水平斑块的破碎度
边缘密度	ED	$ED=\frac{\sum_{i=1}^n e_{ij}}{A}\times1000$	e_{ij} 为 j 景观类型斑块的边缘长度总和	表征斑块被分割的程度,也可用于表示景观破碎度
形状指数	LSI	$LSI=\frac{C}{2\sqrt{\pi A}}$	C 为斑块总周长, A 为斑块面积	表示斑块形状复杂度,反映景观或类型水平内部斑块组合复杂度
蔓延度指数	CONTAG	$CONTAG=\left\{ \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^m \left[P_i \left(\frac{g_{ik}}{\sum_{k=1}^m g_{ik}} \right) \right] \left[\ln P_i \left(\frac{g_{ik}}{\sum_{k=1}^m g_{ik}} \right) \right]}{2\ln m} \right\} \times 100$	g_{ik} 表示景观类型 i 与 k 之间的节点数	反应不同景观类型的团聚程度和连接性,值高则景观连接性好,反之连通性差,景观分布散乱
香农多样性指数	SHDI	$SHDI=-\sum_{i=1}^n (P_i \ln P_i)$	P_i 为 i 景观类型面积所占的比重	用于描述景观类型分布的均衡程度
香农均匀性指数	SHEI	$SHEI=\frac{\sum_{i=1}^n (P_i \ln P_i)}{\ln n}$	N 指景观类型数	表征景观多样性,与优势度指标可相互转换,其值趋于 1 时景观优势度低,景观类型均匀分布
景观所占比例	PLAND	$PLAND=\frac{\sum_{j=1}^n a_{ij}}{A}\times100$	A 为景观总面积, a_{ij} 为 j 景观类型斑块总面积	表征景观类型占景观的比例,判断优势景观类型
平均斑块面积	AREA_MN	$AERA_MN=\frac{A_i}{n_i}$	A_i 表示景观类型 i 斑块总面积, n_i 为 i 类型斑块总数	表征景观或斑块类型破碎度

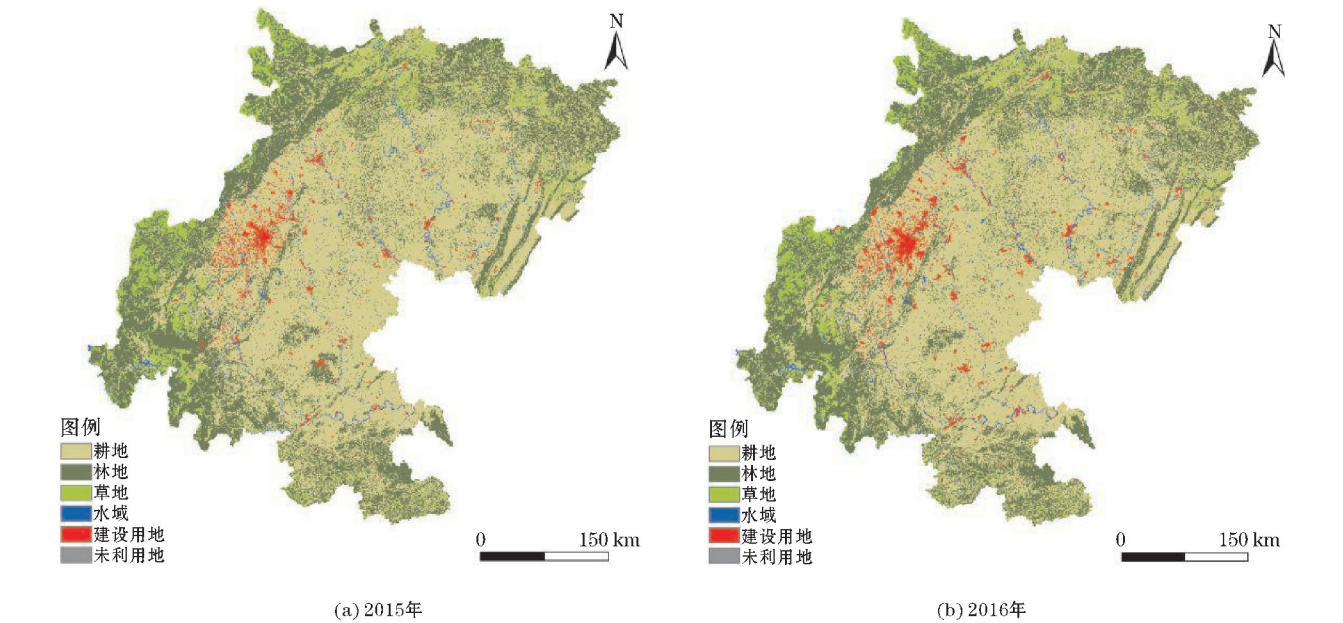


图 2 研究区土地利用现状图

从表 2 可以看出研究区土地利用结构在 2015–2018 年耕地和草地大面积减少,林地、水域和建设用地面积增加,其中建设用地面积增加尤其明显。2015 年研究区耕地面积为 104267 km²,占总面积的 56.18%,2018 年耕地面积减少 965 km²;2015 年草地面积为 17930 km²,至 2018 年草地面积减少 838 km²,与此同时建设用地面积增加 1294 km²,面积比例从 2.24% 上升至 2.94%。

表2 研究区 2015–2018 年各地类面积统计表

年份	统计量	耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地
2015	面积/km ²	104267	56392	17930	2538	4156	307
	比例/%	56.18	30.39	9.66	1.37	2.24	0.17
2018	面积/km ²	103302	56791	17092	2655	5450	300
	比例/%	55.66	30.60	9.21	1.43	2.94	0.16
	变化量	−965	399	−838	117	1294	−7

2.2 城市土地利用结构时空变化

研究区各城市 2018 年地类面积及占比如表 3 所示。

表3 研究区各城市 2018 年各地类面积及占比

城市	耕地/km ²	占比/%	林地/km ²	占比/%	草地/km ²	占比/%	水域/km ²	占比/%	建设用地/km ²	占比/%
巴中	6025	48.97	4642	37.73	1403	11.40	127	1.03	106	0.86
成都	6122	50.49	3022	24.93	566	4.67	202	1.67	2182	18.00
达州	8828	53.30	6126	36.99	1257	7.59	170	1.03	181	1.09
德阳	4137	69.87	1013	17.11	228	3.85	101	1.71	393	6.64
广安	4658	73.45	1219	19.22	146	2.30	150	2.37	161	2.54
广元	7178	44.03	5634	34.56	3045	18.68	230	1.41	180	1.10
乐山	5714	44.84	5584	43.82	1021	8.01	205	1.61	214	1.68
泸州	6931	56.87	4564	37.45	394	3.23	148	1.21	145	1.19
眉山	4669	65.18	1687	23.55	381	5.32	138	1.93	285	3.98
绵阳	8936	44.07	7540	37.18	3209	15.83	187	0.92	353	1.74
南充	10323	82.60	1362	10.90	253	2.02	270	2.16	288	2.30
内江	4605	85.53	541	10.05	8	0.15	93	1.73	137	2.54
遂宁	4305	80.83	632	11.87	77	1.45	128	2.40	179	3.36
雅安	2200	14.62	7934	52.74	4564	30.34	141	0.94	74	0.49
宜宾	7977	60.12	4398	33.15	468	3.53	202	1.52	222	1.67
自贡	3715	90.81	153	3.74	20	0.49	54	1.32	147	3.59
资阳	7111	89.20	485	6.08	58	0.73	113	1.42	205	2.57

由表 3 可知,在研究区有 12 个城市主要以耕地分布为主,其中成都、达州、德阳、广安、泸州、眉山和宜宾 7 个城市其耕地面积占比超过市面积的 50%,而南充、内江、遂宁、自贡和资阳 5 个城市其耕地面积占比更是超过市面积的 80%。从林地分布来看,只有雅安林地面积占比超过全市面积的 50%,占比达52.74%,自贡林地面积占比市面积比例最小,只有3.74%。从草地分布来看,研究区大部分城市草地面积占比都不到 10%,其中内江草地面积占比只有全市面积的0.15%,只有巴中、广元、绵阳和雅安草地面积占比超过了 10%,尤其以雅安最高,草地面积占比达到了全市面积的30.34%。从水域分布来看,各城市水域面积占比都没有超过市面积的 5%,由此可知研究区水体景观较为匮乏。从建设用地来看,成都建设用地面积占比最高,达到了全市面积的 18%,远远高过其他城市,由此可见比研究区其他城市,

成都土地开发利用强度最大。

研究区各城市 2015–2018 年各地类面积变化如表 4 所示。从表 4 可知,广元耕地面积没有变化,达州、乐山、绵阳、雅安和自贡耕地面积增加,其他城市耕地面积都减少,其中自贡耕地面积增加最多,增加了412 km²,而林地面积减少最多,减少了760 km²;成都耕地面积减少最多,减少了469 km²,建设用地面积增加最多,增加了467 km²。各城市林地面积变化也大不相同,其中巴中、广元、南充、雅安和宜宾林地面积都大幅度增加,而达州、乐山和自贡林地面积都大幅度减少。大部分城市草地面积都减少,其中广元和雅安减小幅度较大,分别减少了301 km²和292 km²,只有个别城市草地面积有小幅增加。除广元、绵阳、自贡和资阳外其他城市水域面积都有小幅度增加。而研究区所有城市建设用地面积都增加,这与推进城镇化进程分不开。

表 4 研究区各城市 2015–2018 年各地类面积变化

单位:km²

城市	耕地	林地	草地	水域	建设用地
巴中	−428	339	39	35	11
成都	−469	58	−79	9	467
达州	103	−134	−40	2	72
德阳	−85	−89	36	2	104
广安	−98	21	−6	22	66
广元	0	263	−301	−6	40
乐山	130	−153	−25	19	22
泸州	−8	26	−56	9	40
眉山	−47	45	−59	8	52
绵阳	24	−31	−29	−18	51
南充	−294	149	39	15	95
内江	−48	−18	2	21	35
遂宁	−22	−19	0	15	37
雅安	78	208	−292	6	13
宜宾	−129	108	−64	17	70
自贡	412	−760	9	−16	41
资阳	−115	75	−10	−22	79

2.3 景观格局变化特征

研究区 2015–2018 年景泰蓝观水平景观格局指数见表 5。由表 5 可知,研究区在研究期间景观蔓延度指数减小,表明景观连通性降低,且景观破碎化增加;香农

多样性指数增加且香农均匀性指数值逐渐趋近于 1,表明景观类型趋于均衡化分布且景观优势度降低,景观类型分布均匀化。整体景观斑块密度增加表明景观整体呈现破碎化趋势,边缘密度和形状指数增加表明整体景观水平上斑块割裂程度增加,形状也趋于复杂。

表 5 研究区 2015–2018 年景观水平景观格局指数

年份	PD	ED	LSI	CONTAG	SHDI	SHEI
2015	0.0624	6.5635	73.6125	45.8707	1.0660	0.5950
2018	0.0636	6.6433	74.4896	45.0877	1.0838	0.6049

研究区 2015–2018 年类型水平景观格局指数见表 6。根据表 6,综合景观和类型水平指标变化可知,在研究期间研究区草地、水域和建设用地的类型斑块密度增加;而耕地和林地斑块密度有减小趋势。耕地、林地、

水域和建设用地的边缘密度和形状指数都有增加,表明这些景观类型斑块被割裂的程度在增加,其中耕地增加幅度较大,由于受人为活动干扰较大,所以斑块形状愈加不规则;草地的边缘密度和形状指数则呈减小趋势。

表 6 研究区 2015–2018 年类型水平景观格局指数

景观类型	年份	PLAND	PD	ED	LSI
耕地	2015	56.1814	0.0100	5.2705	76.8266
	2018	55.6458	0.0097	5.3306	77.9829
林地	2015	30.3853	0.0219	4.7155	94.4947
	2018	30.5991	0.0217	4.7673	95.2432
草地	2015	9.6611	0.0151	2.0615	73.6455
	2018	9.2092	0.0165	2.0018	73.1336
水域	2015	1.3675	0.0071	0.4499	41.8199
	2018	1.4305	0.0072	0.4650	41.9519
建设用地	2015	2.2393	0.0074	0.5868	42.2791
	2018	2.9365	0.0079	0.6750	42.4189

研究区各城市 2015 和 2018 年景观水平景观格局指数见表 7。根据表 7 可知,从各城市景观水平格局指数来看,就景观破碎度而言,广元斑块密度、边缘密度和形状指数最大,蔓延度指数较小,香农多样性指数和香农均匀性指数都较高,由此可知广元景观破碎度较大,斑块被割裂程度较高,斑块形状也较复杂,各景观类型分布比较均匀。广元、泸州和雅安的斑块密度、边缘密度和形状指数均减小,而蔓延度指数有增加趋势,表明在研究期间景观破碎度减小,景观连通性增加。巴中、成都、达州、广安、乐山、绵阳、南充、内江、遂宁等城市在研究期间斑块密度、边缘密度、形状指数都增加,景观破碎度增大,而蔓延度指数都减小,表明景观连通性降低,

斑块破碎化趋势显著。从各城市香农多样性指数来看,除南充、内江、遂宁、自贡和资阳香农多样性指数比较低外,其他城市的香农多样性指数都比较高,说明这些城市景观类型丰富。从各城市香农均匀性指数可知,除广元、宜宾和自贡在研究期间香农均匀性指数减小外,其他城市都增加,说明这些城市景观类型分布更加均匀。其中,资阳斑块密度和形状指数都较小,香农多样性指数和香农均匀性指数最小,边缘密度和蔓延度指数最大,可能与资阳耕地面积占比高达89.20%有关,资阳市耕地是优势景观,其他地类占比都较小,耕地分布较集中,斑块密度小,被分割程度低,斑块形状较规则,故其破碎度小且形状指数小。

表 7 研究区各城市 2015 年和 2018 年景观水平景观格局指数

城市	年份	PD	ED	LSI	CONTAG	SHDI	SHEI
巴中	2015	0.0774	8.6398	25.8941	38.4207	1.0239	0.6362
	2018	0.0776	8.8214	26.3986	36.7269	1.0532	0.6544
成都	2015	0.0687	6.7491	20.6561	41.9868	1.1853	0.6615
	2018	0.0692	6.7709	20.7534	40.3325	1.2261	0.6843
达州	2015	0.0612	7.7903	27.4709	47.3946	0.9865	0.5506
	2018	0.0648	7.9080	27.8798	46.7705	0.9959	0.5558
德阳	2015	0.0556	4.0230	10.0130	58.0889	0.8979	0.5011
	2018	0.0605	4.2577	10.4578	55.0450	0.9671	0.5398
广安	2015	0.0620	4.7618	11.7031	60.0581	0.7727	0.4313
	2018	0.0675	5.0694	12.2719	57.5730	0.8207	0.4580
广元	2015	0.0841	9.4181	32.1543	37.3330	1.1685	0.6522
	2018	0.0820	9.3609	32.0039	37.5674	1.1654	0.6504
乐山	2015	0.0556	6.0521	19.3473	47.4467	1.0545	0.5885
	2018	0.0565	6.3481	20.1726	46.7186	1.0621	0.5928
泸州	2015	0.0559	6.4693	20.5226	52.7387	0.9054	0.5053
	2018	0.0547	6.3313	20.1855	52.9029	0.9092	0.5074
眉山	2015	0.0693	5.2902	13.8588	51.5729	0.9752	0.5443
	2018	0.0669	5.5396	14.4471	50.6637	0.9832	0.5487
绵阳	2015	0.0695	6.5826	26.0228	43.0726	1.1448	0.6389
	2018	0.0709	6.6440	26.2456	42.7730	1.1498	0.6417
南充	2015	0.0714	4.4711	14.5938	68.4386	0.5821	0.3249
	2018	0.0782	4.8552	15.6964	65.1415	0.6496	0.3625
内江	2015	0.0458	3.0990	8.2211	70.7378	0.5024	0.3122
	2018	0.0461	3.3321	8.7279	68.6031	0.5378	0.3341
遂宁	2015	0.0758	5.2879	11.5753	63.5179	0.6700	0.3739
	2018	0.0768	5.2948	11.6507	62.4891	0.6964	0.3887
雅安	2015	0.0573	7.2457	24.3984	44.1041	1.0917	0.6093
	2018	0.0572	7.1543	24.0955	44.2017	1.0917	0.6093
宜宾	2015	0.0612	7.4082	23.5043	46.0170	0.9058	0.5628
	2018	0.0644	7.4495	23.6710	50.6931	0.9228	0.5150
自贡	2015	0.0579	4.6788	10.4474	62.6514	0.7160	0.3996
	2018	0.0581	3.7896	8.9850	69.6626	0.5716	0.3190
资阳	2015	0.0560	2.8537	8.6453	74.7824	0.4164	0.2587
	2018	0.0506	3.0519	9.1257	72.4813	0.4626	0.2874

3 大气污染物时空变化分析

3.1 大气污染物空间分布的年际差异

研究区各城市 $\text{PM}_{2.5}$ 年均浓度分布如图3所示。由图3可知,2015年只有广元的 $\text{PM}_{2.5}$ 年均浓度($22\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$)达到国家空气质量二级标准(年均浓度标准限值 $35\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$),其他城市的 $\text{PM}_{2.5}$ 年均浓度值均超标,其中达州、南充、成都、眉山、内江、自贡和泸州 $\text{PM}_{2.5}$ 污染较严重,尤其以自贡 $\text{PM}_{2.5}$ 污染最严重, $\text{PM}_{2.5}$ 年均浓度达到了 $73.58\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$,是年均浓度标准限值的2倍多。2016年除广元 $\text{PM}_{2.5}$ 年均浓度($27.75\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$)达标,其他城市均不达标,成都、眉山、自贡和泸州 $\text{PM}_{2.5}$ 污染较严重,其中自贡依然是 $\text{PM}_{2.5}$ 污染最严重的城市。2017年只有巴中和广元 $\text{PM}_{2.5}$ 年均浓度达标,分别为 $32.75\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、 $22.92\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$,其他城市均未达标,自贡依然是 $\text{PM}_{2.5}$ 污染最严重的城市,但浓度有所下降。2018年眉山、资阳、遂宁、广元和巴中 $\text{PM}_{2.5}$ 年均浓度达到了标准,研究区各城市的 $\text{PM}_{2.5}$ 年均浓度较前几年有明显

下降。

图4为研究区各城市 PM_{10} 年均浓度分布图。

从图4可看出,2015年只有广元、巴中和雅安的 PM_{10} 年均浓度达到了国家空气质量二级标准(年均浓度标准限值 $70\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$),浓度分别为 $54.6\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、 $59.83\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$ 和 $65.42\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$,而达州、南充、成都、眉山和自贡 PM_{10} 年均浓度都比较高,污染比较严重,尤其以自贡最严重, PM_{10} 年均浓度达到了 $107.75\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$,几乎是广元的2倍。2016年除广元、巴中和遂宁的 PM_{10} 年均浓度达到了国家空气质量二级标准,其他城市均未达标,德阳、成都、资阳、眉山和自贡 PM_{10} 污染都比较严重,其中自贡依然是最严重的, PM_{10} 年均浓度达到了 $101.42\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$,但比前一年减小。2017年除宜宾的 PM_{10} 年均浓度较前一年增加外,其他城市均减小,但也只有广元、巴中、遂宁、雅安和内江 PM_{10} 年均浓度达到了国家空气质量二级标准。2018年除成都和自贡的 PM_{10} 年均浓度没有达到国家空气质量二级标准外,其他城市均已达标,但成都、自贡两市的 PM_{10} 年均浓度较前几年明显减小。

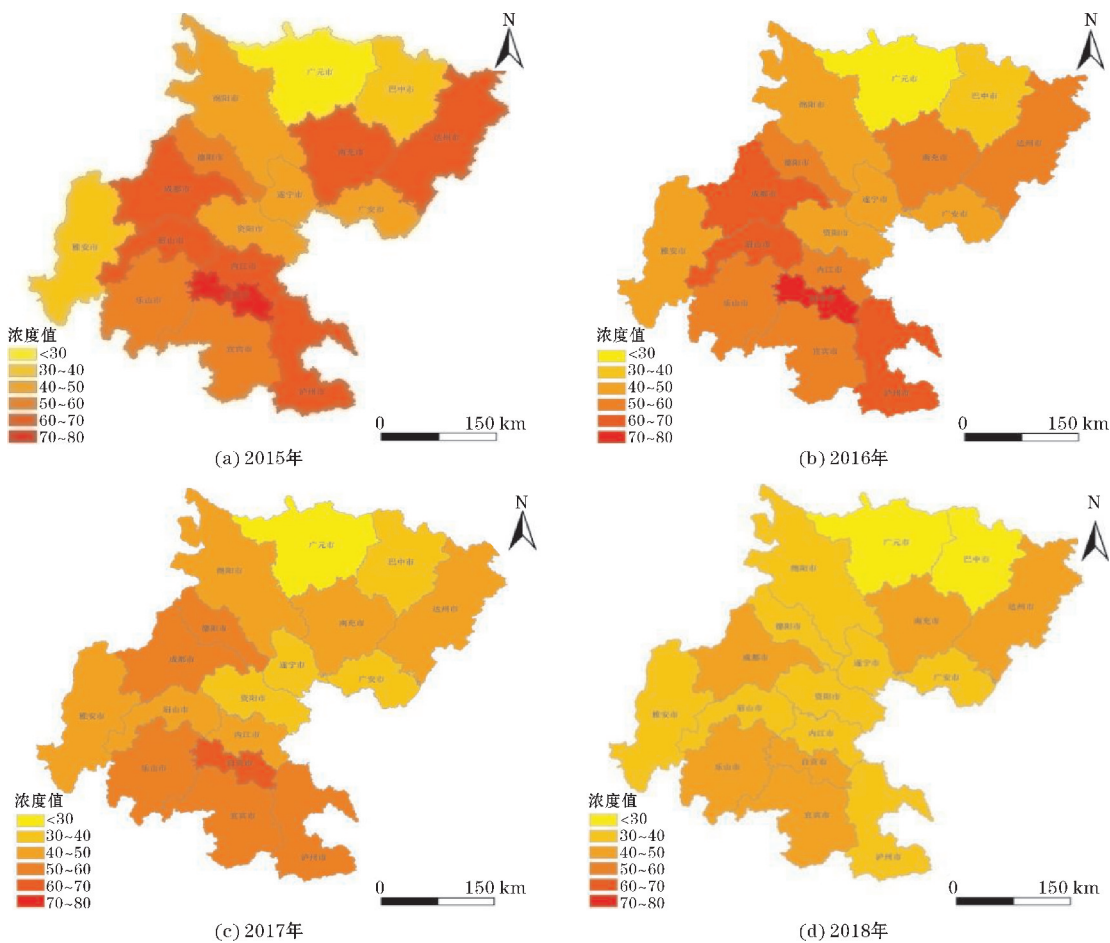


图3 研究区各城市 $\text{PM}_{2.5}$ 年均浓度分布图

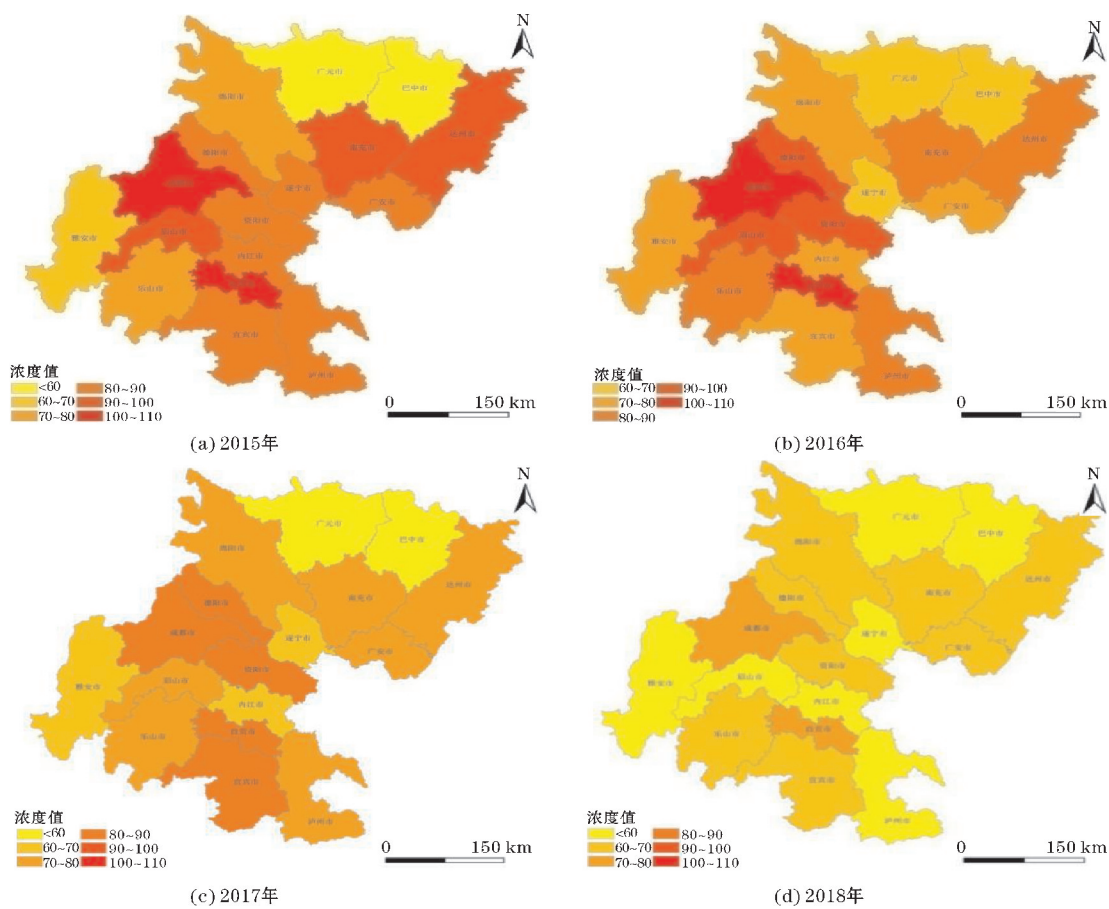


图 4 研究区各城市 PM_{10} 年均浓度分布图

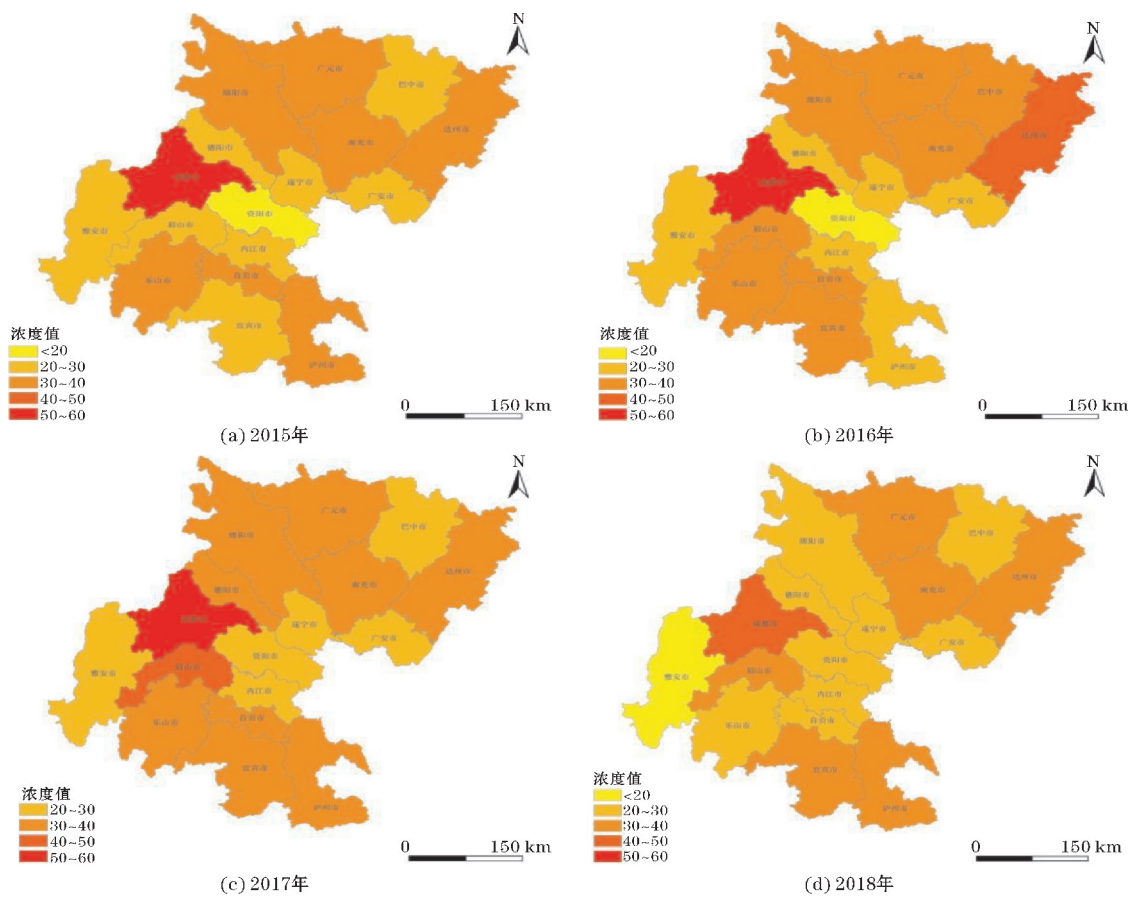


图 5 研究区各城市 NO_2 年均浓度分布图

研究区各城市 NO₂ 年均浓度分布如图 5 所示。从图 5 可看出,2015 年除成都的 NO₂ 年均浓度 (50.58 μg/m³) 没有达到国家空气质量二级标准(年均浓度标准限值40 μg/m³)外,其他城市均达标,其中资阳的 NO₂ 年均浓度最低,只有18.83 μg/m³。2016 年成都和达州是 NO₂ 污染较严重的两个城市,NO₂ 年均浓度分别为53.58 μg/m³和41.33 μg/m³,均未达到国家空气质量二级标准,而且较前一年 NO₂ 年均浓度有所增加,资阳市依然是 NO₂ 年均浓度最低的城市,浓度只有 19.75 μg/m³,但较前一年也有所增加。2017 年 NO₂ 污染较严重的城市是成都和眉山,NO₂ 年均浓度分别为 52.58 μg/m³和42.08 μg/m³,另外眉山、资阳和泸州 NO₂ 年均浓度较前一年明显增加。2018 年成都依然是 NO₂ 污染最严重的城市,但 NO₂ 年均浓度为 44.08 μg/m³,较前几年明显下降,雅安

的 NO₂ 年均浓度只有19.088 μg/m³,较前一年明显下降,其他城市的 NO₂ 年均浓度较前一年也都

有所下降。

研究区各城市 SO₂ 年均浓度分布如图 6 所示。由图 6 可看出,2015 年 SO₂ 污染较严重的城市有广元、广安、资阳、内江、乐山、宜宾和泸州,其中资阳 SO₂ 污染最严重,SO₂ 年均浓度为30.08 μg/m³,巴中的 SO₂ 年均浓度最低,浓度为6.75 μg/m³。2016 年 SO₂ 年均浓度比较高的城市有广元、广安、资阳、眉山、内江、乐山、宜宾和泸州,且较前一年 SO₂ 年均浓度均有所下降,其中资阳下降程度最明显,巴中的 SO₂ 年均浓度最低。2017 年 SO₂ 年均浓度比较高的城市为广元、自贡、宜宾和泸州,其中广元的 SO₂ 年均浓度较前一年明显增加;巴中的 SO₂ 年均浓度最低。2018 年广元的 SO₂ 年均浓度最高,巴中的 SO₂ 年均浓度依然最低,除雅安其他各城市的 SO₂ 年均浓度较前几年均有明显下降。

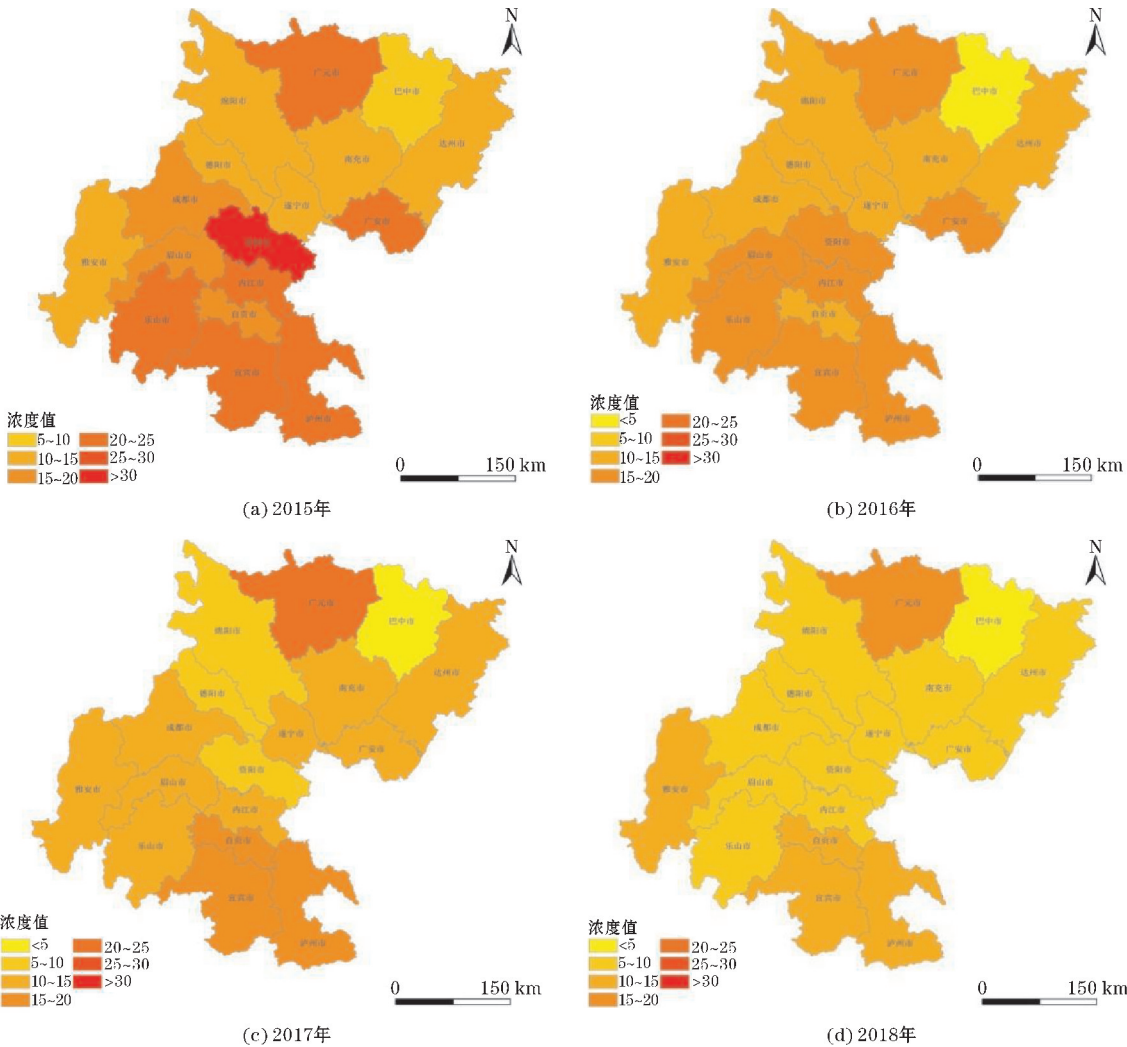


图6 研究区各城市 SO₂ 年均浓度分布图

3.2 大气污染物时间变化特征

研究区 4 种污染物月均浓度变化如图 7 所示。由

图 7 可知,从整体上看,4 种大气污染物的月均浓度呈明显的季节性波动规律。研究区 PM_{2.5} 月均浓度 1 月最高,近 4 年的平均值为87.71 μg/m³;7 月最低,近 4 年的

平均值为 $26.21\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$,仅为 1 月的 29.88% 。 PM_{10} 月均浓度 1 月最高,近 4 年的平均值为 $126.97\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$;7 月最低,近 4 年的平均值为 $45.72\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$,仅为 1 月的 36.01% 。 SO_2 月均浓度 1 月最高,近 4 年的平均值为 $17.51\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$;9 月最低,近 4 年的平均值为 $11.35\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$,仅为 1 月的 64.82% 。 NO_2 月均浓度 12 月

最高,近 4 年的平均值为 $40.87\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$;7 月最低,近 4 年的平均值为 $23.74\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$,仅为 12 月的 58.09% 。

就污染物浓度的时序趋势而言, $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 和 SO_2 呈显著下降趋势,2018 年年均浓度较 2015 年分别下降 27.74% 、 27.04% 和 42.65% , NO_2 下降趋势不明显,2018 年年均浓度较 2015 年下降 2.21% 。

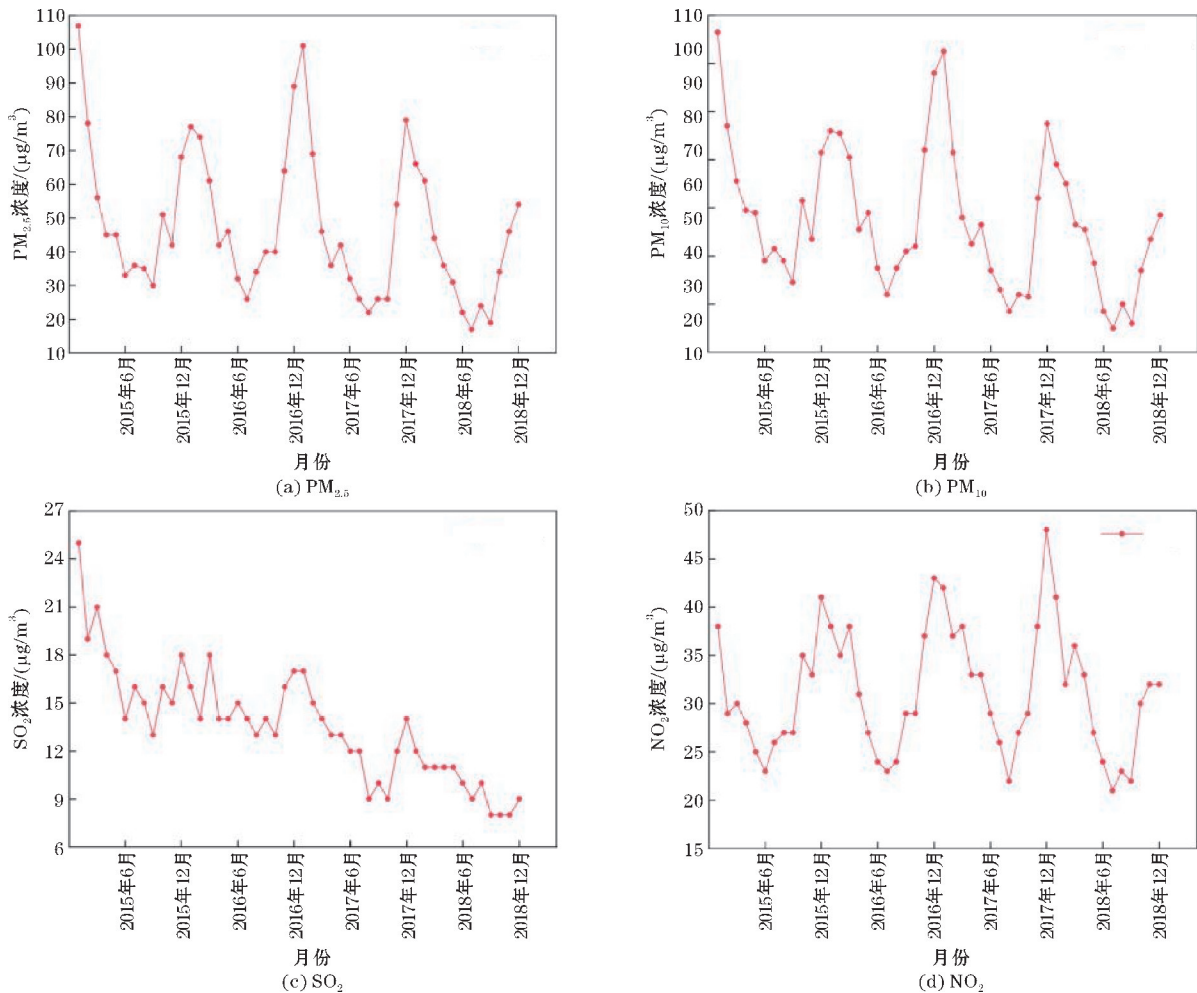


图 7 研究区 4 种污染物月均浓度变化图

4 污染物与土地利用类型及景观格局的相关性分析

4.1 土地利用变化与污染物的相关性分析

表 8 各土地利用类型面积占比与污染物浓度的相关关系

年份	污染物	耕地	林地	草地	水域	建设用地
2015	$\text{PM}_{2.5}$	0.376	-0.223	-0.637 **	0.230	0.301
	PM_{10}	0.485 *	-0.419	-0.683	0.465	0.523 *
	SO_2	0.370	-0.315	-0.343	0.265	-0.083
	NO_2	-0.325	0.293	0.054	-0.205	0.679 **
2018	$\text{PM}_{2.5}$	0.152	-0.118	-0.316	0.004	0.288
	PM_{10}	0.373	-0.377	-0.521 *	0.175	0.488 *
	SO_2	-0.186	0.177	0.249	-0.109	-0.180
	NO_2	-0.047	0.036	-0.266	0.059	0.638 **

注: ** 在 0.01 水平 (双侧) 显著相关; * 在 0.05 水平 (双侧) 显著相关

各土地利用类型面积占比与污染物浓度的相关关系如表 8 所示。由表 8 可知,建设用地面积占比与 PM_{10} 和 NO_2 浓度呈显著正相关,表明建设用地对 PM_{10} 和 NO_2 的积累有正向促进作用,耕地面积占比与 PM_{10} 浓度呈显著正相关,表明耕地对 PM_{10} 的积累有正向促进作用,即城市建设用地和耕地面积越大,城市 PM_{10} 和 NO_2 污染越严重;草地面积占比与 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 浓度呈显著负相关,说明草地对于 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 有沉降作用。

4.2 景观格局与污染物相关性分析

景观水平景观格局指数与污染物浓度的相关关系如表 9 所示。由表 9 可知,在景观水平上,边缘密度和形状指数均与 PM_{10} 浓度呈显著负相关,表明斑块被分割程度越大、形状越复杂,越有利于 PM_{10} 浓度的降低。蔓延度指数与 NO_2 浓度呈显著负相关,表明斑块之间的连通性降低或景观破碎度的增加会加剧 NO_2 的污染程度。香农多样性指数和香农均匀性指数均与 NO_2 浓度呈显著正相关,表明景观类型分布越均匀越有利于 NO_2 浓度的增加。

表 9 景观水平景观格局指数与污染物浓度的相关关系

年份	污染物	PD	ED	LSI	CONTAG	SHDI	SHEI
2015	$PM_{2.5}$	-0.467	-0.417	-0.439	0.349	-0.260	-0.291
	PM_{10}	-0.352	-0.509 *	-0.557 *	0.440	-0.310	-0.368
	SO_2	-0.459	-0.403	-0.350	0.427	-0.449	-0.433
	NO_2	0.145	0.375	0.415	-0.497 *	0.586 *	0.552 *
2018	$PM_{2.5}$	-0.220	-0.216	-0.155	0.205	-0.101	-0.160
	PM_{10}	-0.080	-0.324	-0.273	0.255	-0.124	-0.183
	SO_2	-0.005	0.280	0.274	-0.073	0.079	0.018
	NO_2	0.230	0.254	0.251	-0.317	0.408	0.358

注: * 在 0.01 水平(双侧)显著相关; * 在 0.05 水平(双侧)显著相关

表 10 类型水平景观格局指数与污染物浓度的相关关系

地类	污染物	PD		ED		LSI		AREA_MN	
		2015	2018	2015	2018	2015	2018	2015	2018
耕地	$PM_{2.5}$	-0.337	-0.201	-0.160	-0.134	-0.414	-0.169	0.011	-0.090
	PM_{10}	-0.474	-0.370	-0.240	-0.092	-0.533 *	-0.250	0.150	0.119
	SO_2	-0.268	0.279	-0.254	0.200	-0.317	0.281	0.144	-0.214
	NO_2	0.354	0.136	0.380	0.453	0.421	0.301	-0.368	-0.299
林地	$PM_{2.5}$	-0.040	0.017	-0.280	-0.703 **	-0.064	-0.612 **	-0.017	-0.451
	PM_{10}	0.053	0.122	-0.491 *	-0.384	-0.517 *	-0.219	-0.261	-0.355
	SO_2	-0.020	-0.162	-0.347	0.265	-0.284	0.236	0.270	-0.351
	NO_2	-0.444	-0.163	0.164	0.043	0.208	0.149	0.255	-0.165
草地	$PM_{2.5}$	-0.561 *	-0.309	-0.703 **	-0.384	-0.612 **	-0.266	-0.451	-0.195
	PM_{10}	-0.677 **	-0.443	-0.759 **	-0.554 *	-0.706 **	-0.402	-0.458	-0.322
	SO_2	-0.407	0.281	-0.338	0.316	-0.359	0.291	-0.351	0.051
	NO_2	0.137	-0.036	0.070	-0.198	0.222	0.027	0.197	-0.77
水域	$PM_{2.5}$	0.229	0.048	0.254	-0.020	-0.266	-0.102	-0.195	-0.117
	PM_{10}	0.447	0.323	0.493 *	0.225	-0.069	0.132	-0.151	-0.354
	SO_2	0.332	-0.281	0.302	-0.189	0.026	0.019	-0.073	0.334
	NO_2	-0.203	0.095	-0.181	0.108	0.490 *	0.510 *	-0.77	-0.229
建设用地	$PM_{2.5}$	0.313	0.211	0.310	0.264	0.184	0.251	0.414	0.323
	PM_{10}	0.517 *	0.499 *	0.530 *	0.498 *	0.337	0.476	0.643 **	0.490 *
	SO_2	-0.020	-0.266	-0.090	-0.205	-0.149	-0.180	-0.194	-0.123
	NO_2	0.531 *	0.566 *	0.656 **	0.638 **	0.806 **	0.822 **	0.595 *	0.522 *

注: * 在 0.01 水平(双侧)显著相关; * 在 0.05 水平(双侧)显著相关

类型水平景观格局指数与污染物浓度的相关关系见表10。由表10可知,耕地的形状指数与 PM_{10} 浓度呈显著负相关,表明耕地斑块形状越复杂,越有利于 PM_{10} 浓度的降低。林地的边缘密度和形状指数与 PM_{10} 浓度呈显著负相关,表明林地斑块被分割程度越大、形状越复杂,越有利于 PM_{10} 浓度的降低。草地的斑块密度、边缘密度和形状指数与 PM_{10} 浓度呈显著负相关,表明草地斑块密度越大、分割程度越大、形状越复杂,越有利于 PM_{10} 浓度的降低; $PM_{2.5}$ 浓度与草地的斑块密度、边缘密度和形状指数呈显著负相关,与平均斑块面积相关性没有通过显著性检验,表明草地斑块密度越大、分割程度越大、形状越复杂,越有利于 $PM_{2.5}$ 浓度的降低,其他地类的景观格局指数与 $PM_{2.5}$ 均未通过显著性检验。水域的边缘密度与 PM_{10} 浓度呈显著正相关,表明水域斑块分割程度越大越加重 PM_{10} 污染;水域的形状指数与 NO_2 浓度呈显著正相关,表明水域斑块形状越复杂越加重 NO_2 污染。建设用地的斑块密度、边缘密度和平均斑块面积均与 PM_{10} 浓度呈显著正相关,表明建设用地的斑块破碎度越大,斑块面积越大越加重 PM_{10} 污染;建设用地的斑块密度、边缘密度、形状指数和平均斑块面积均与 NO_2 浓度呈显著正相关,表明建设用地斑块破碎度于大、形状越复杂、斑块面积越大越加重 NO_2 污染。各地类景观格局指数与 SO_2 浓度相关性均未通过显著性检验,说明类型水平上的各景观格局指数均不能解释 SO_2 浓度在空间上的差异性。

5 结束语

(1)土地利用变化特征:从整体分布空间来看,研究区主要以耕地、林地和草地为优势景观类型,而水域、建设用地和未利用地则占比较小。其中耕地主要分布在研究区中部、南部和东部;林地和草地则半包围着耕地分布在研究区南部、西部、北部及东北部边缘;建设用地呈以成都市为中心向周边逐渐发展的趋势。土地利用结构变化方面,主要表现为耕地和草地大面积减少,而林地、水域和建设用地面积都相应增加了,其中建设用地面积增加尤其明,其中成都建设用地面积增加最多。

(2)景观格局变化特征:研究期间研究区景观连通性降低,且景观破碎化增加,景观类型趋于均衡化分布。具体到景观类型表现为耕地、林地、水域和建设用地的斑块破碎度在增加,草地的斑块破碎度减小。巴中、成都、达州、广安、乐山、绵阳、南充、内江、遂宁等城市在研究期间,景观破碎度增大,景观连通性降低,斑块破碎化趋势显著。

(3)污染物变化特征:空间分布上,成都、达州和眉山的 NO_2 污染比较严重,成都、眉山、自贡、泸州、宜宾、南充和乐山 $PM_{2.5}$ 污染比较严重;成都、德阳、资阳、眉

山、达州和自贡 PM_{10} 比较严重;资阳、广元、泸州、内江、宜宾和广安 SO_2 污染比较严重。时间分布上,4种污染物的月均浓度呈夏季低冬季高,就污染物浓度的时序趋势而言, $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 和 SO_2 呈显著下降趋势, NO_2 下降趋势不明显。

(4)污染物与土地利用和景观格局的相关性:土地利用方面,建设用地和耕地面积越大, PM_{10} 和 NO_2 污染越严重;草地对于 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 有沉降作用。景观格局方面,整体景观破碎度越高越有利于 PM_{10} 浓度的降低,景观破碎度和均匀度越高, NO_2 污染越严重。草地景观破碎度越高越能降低 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 浓度;林地斑块被分割程度越大、形状越复杂,越有利于 PM_{10} 浓度的降低;耕地斑块形状越复杂,越有利于 PM_{10} 浓度的降低;水域斑块分割程度越大越加重 PM_{10} 污染;水域斑块形状越复杂,越加重 NO_2 污染;建设用地斑块破碎度越高,斑块面积越大,越加重 PM_{10} 和 NO_2 污染。

参考文献:

- [1] 张惠远,饶胜,迟妍妍,等.城市景观格局的大气环境效应研究进展[J].地球科学进展,2006(10):1025-1032.
- [2] 张丹.我国城市大气污染现状及防治对策[J].中国资源综合利用,2019,37(12):156-158.
- [3] 孙继平,侯兰功.成渝城市群 $PM_{2.5}$ 时空分布及影响因素研究[J].江苏农业科学,2020,48(13):297-302.
- [4] 连俊标.四川盆地大气污染物时空分布特征及典型重污染过程研究[D].成都:成都信息工程大学,2019.
- [5] Gerard Hoek, Rob Beelen, Kees de Hoogh, et al. A review of land-use regression models to assess spatial variation of outdoor air pollution[J]. Atmospheric Environment, 2008, 42(33).
- [6] U W Tang, Z S Wang. Influences of urban forms on traffic-induced noise and air pollution: Results from a modelling system [J]. Environmental Modelling and Software, 2007, 22(12).
- [7] 丁宇,李贵才,路旭,等.空间异质性及绿色空间对大气污染的削减效应——以大珠江三角洲为例[J].地理科学进展,2011,30(11):1415-1421.
- [8] C Sarrat, A Lemonsu, V Masson, et al. Impact of urban heat island on regional atmospheric pollution [J]. Atmospheric Environment, 2005, 40(10).
- [9] Fanhua Kong, Haiwei Yin, Nobukazu Nakagoshi, et al. Urban green space network development for biodiversity conservation: Identification based on graph

- theory and gravity modeling [J]. *Landscape and Urban Planning*, 2009, 95(1).
- [10] Currie B A, Bass B. Estimates of air pollution mitigation with green plants and green roofs using the UFORE model [J]. *Urban Ecosystems*, 2008, 11(4): 409–422.
- [11] 吴志萍, 王成, 侯晓静, 等. 6种城市绿地空气PM_{2.5}浓度变化规律的研究[J]. *安徽农业大学学报*, 2008(4): 494–498.
- [12] 袁杨森, 刘大锰, 车瑞俊, 等. 北京市秋季大气颗粒物的污染特征研究[J]. *生态环境*, 2007, 16(1): 18–25.
- [13] 唐昀凯, 刘胜华. 城市土地利用类型与PM_{2.5}浓度相关性研究——以武汉市为例[J]. *长江流域资源与环境*, 2015, 24(9): 1458–1463.
- [14] 万伟华. 土地利用变化对PM_{2.5}浓度的影响及空间效应研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2019.
- [15] Nicole Weber, Dagmar Haase, Ulrich Franck. Assessing modelled outdoor traffic-induced noise and air pollution around urban structures using the concept of landscape metrics [J]. *Landscape and Urban Planning*, 2014, 125.

Research on the Correlation between Land Use Changes and Air Pollutants

LI Haonan, ZENG Shenglan

(College of Atmospheric Sciences, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China)

Abstract: Using the land use data of Sichuan Province in 2015 and 2018 and the daily mass concentration monitoring data of SO₂, NO₂, PM_{2.5} and PM₁₀ of 17 urban environmental monitoring stations in Sichuan Province from 2015 to 2018, analyzed the land use structure, landscape pattern and the temporal and spatial changes of four pollutants in the study area, and the relationships between land types, landscape pattern and four pollutants were analyzed. The results show that: (1) Cultivated land, woodland and grassland are the dominant landscapes in the study area. During the study period, land use changes were mainly due to the sharp decline of cultivated land and the expansion of construction land; the connectivity of landscapes in the study area decreased greatly and the fragmentation of landscapes is increased. The landscape types tend to be distributed in a balanced manner. Among them, the patch fragmentation of cultivated land, woodland, water area and construction land is increasing, and the patch fragmentation of grassland is decreasing. (2) In terms of spatial distribution, the NO₂ pollution in Chengdu, Dazhou and Meishan is relatively serious, while the PM_{2.5} pollution in Chengdu, Meishan, Zigong, Luzhou, Yibin, Nanchong and Leshan is relatively serious; Chengdu, Deyang, Ziyang, Meishan, The cities of Dazhou and Zigong have more serious PM₁₀; Ziyang, Guangyuan, Luzhou, Neijiang, Yibin and Guang'an have more serious SO₂ pollution. In terms of time distribution, the monthly average concentrations of the four pollutants are low in summer and high in winter. As far as the time-series trend of pollutant concentrations is concerned, PM_{2.5}, PM₁₀ and SO₂ show a significant downward trend, while the downward trend of NO₂ is not obvious. (3) The increase of construction land and cultivated land will aggravate the pollution of PM₁₀ and NO₂; and grassland has a sedimentation effect on PM_{2.5} and PM₁₀. The higher the overall landscape fragmentation, the better the reduction of PM₁₀ concentration. The higher the landscape fragmentation and uniformity, the more severe NO₂ pollution.

Keywords: land use; landscape pattern; air pollutants; spatiotemporal changes; correlation analysis