

空气污染治理与霾天气

——以重庆市主城区为例


周国兵 编著



空气污染与霾天气

——以重庆市主城区为例

周国兵 编著

 气象出版社
China Meteorological Press

内 容 简 介

本书详细介绍了重庆主城区近十年来主要空气污染物的时空分布和变化特征,重点分析了大气环流、局地大气边界层气象条件及降水等气象因素对重庆主城区空气污染的影响,分析了重庆主城区霾天气的变化特征及与污染的关系,研究并建立了适合本地的霾天气判别标准,并利用数值模拟方法初步揭示了气象条件对污染的影响机制,探索建立了空气污染扩散气象条件预报方法,提出了减轻重庆主城区空气污染与霾天气的防治对策措施。

本书可供气象、环境、城市规划等领域从事科研、业务、教学和管理等工作的有关人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

空气污染与霾天气:以重庆市主城区为例 / 周国兵
编著. —北京:气象出版社,2018.12

ISBN 978-7-5029-6900-4

I. ①空… II. ①周… III. 空气污染-研究-重庆
IV. ①X51

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 289141 号

Kongqi Wuran yu Maitianqi——Yi Chongqingshi Zhuchengqu Weili

空气污染与霾天气——以重庆市主城区为例

周国兵 编著

出版发行:气象出版社

地 址:北京市海淀区中关村南大街46号 邮政编码:100081

电 话:010-68407112(总编室) 010-68408042(发行部)

网 址:<http://www.qxcbs.com>

E-mail: qxcbs@cma.gov.cn

责任编辑:杨泽彬

终 审:吴晓鹏

责任校对:王丽梅

责任技编:赵相宁

封面设计:楠竹文化

印 刷:北京中石油彩色印刷有限责任公司

开 本:787 mm×1092 mm 1/16

印 张:9

字 数:220千字

版 次:2018年12月第1版

印 次:2018年12月第1次印刷

定 价:48.00元

本书如存在文字不清、漏印以及缺页、倒页、脱页等,请与本社发行部联系调换。

前 言

为全面贯彻党的十九大精神,认真落实习近平总书记在全国生态环境保护大会上关于“坚决打赢蓝天保卫战是重中之重,要以空气质量明显改善为刚性要求,强化联防联控,基本消除重污染天气,还老百姓蓝天白云、繁星闪烁”的讲话精神,深化落实习近平总书记对重庆提出的“两点”定位、“两地”“两高”目标和“四个扎实”要求,支撑重庆“生态优先绿色发展战略行动计划”“污染防治攻坚战实施方案”,把重庆建设成“山清水秀美丽之地”,推动高质量发展,创造高品质生活。重庆市气象与环保部门在已有的科研、业务合作的基础上,就全面实施“大气污染防治环境与气象合作打赢蓝天保卫战”进行了更加深入、务实的合作。

重庆市作为长江上游的重要工业城市,20世纪80年代以来,一直是全国空气污染较为严重的城市之一,这不仅给居民生活与健康带来诸多不利影响,同时也影响了重庆市的城市投资环境和竞争力。重庆市政府高度重视城市空气污染问题,十多年来,市政府采取了一系列行之有效的强制措施,极大地改善了重庆主城区的空气质量。诸多研究文献表明,重庆主城区特殊的地形、不利的气象条件以及大量的污染物排放是造成重庆主城区空气污染较重的主要因素,本书作者作为气象工作者,对此十分关注,在工作中针对重庆主城区污染与气象关系开展了一些研究,形成了一些成果。本书是作者博士论文、重庆市应用开发计划项目“山地城市气象条件对雾霾影响分析与数值模拟研究”(cstc2014yykfA20004)、国家自然科学基金重大研究计划重点支持项目“冬春季四川盆地西南涡活动对大气复合污染影响与机制研究”(91644226)的研究成果以及重庆市气象局针对重庆主城区开展的大气污染气象条件预报业务建设成果的总结。本书在撰写过程中得到了王式功教授以及向波、胡春梅、江文华、吴钲、芦华、白莹莹、董新宁、曾艳等同事的支持和帮助,在此表示诚挚的感谢。

本书详细介绍了重庆主城区近十年来主要空气污染物的时空分布和变化特征,重点分析了大气环流、局地大气边界层气象条件及降水等气象因素对重庆主城区空气污染的影响,分析了重庆主城区霾天气的变化特征及其与空气污染的关系,研究并建立了适合本地的霾天气判别标准,并利用数值模拟方法初步揭示了气象条件对空气污染的影响机制,探索建立了空气污染扩散气象条件预报方法,还简要介绍了重庆市政府在减轻重庆主城区空气污染方面的对策措施及成效。

全书共分七章。内容包括重庆主城区基本概况、空气污染特征、空气污染天气特征、霾天气特征、空气污染数值模拟研究、空气污染扩散气象条件预报方法初探及空气污染与霾天气防治对策措施。

由于作者学识有限,时间仓促,书中错误在所难免,敬请批评指正。

作者

2018年9月

目 录

前言

第 1 章 重庆主城区基本概况	1
1.1 地理概况	1
1.2 经济状况	3
1.3 能源消耗	4
1.4 气候概况	5
第 2 章 重庆主城区空气污染时空变化	7
2.1 空气污染监测	7
2.2 空间分布特征	9
2.3 时间变化特征	15
2.4 主要污染物来源	23
第 3 章 重庆主城区空气污染气象学特征	25
3.1 污染天气大气环流特征	25
3.2 污染天气过程特征	29
3.3 气象要素与污染物浓度的相关性	33
3.4 边界层气象条件对污染的影响机制	38
3.5 降水对空气污染物的影响	51
第 4 章 重庆主城区霾天气	65
4.1 重庆霾天气判别指标的建立	65
4.2 霾天气特征	77
4.3 霾与空气污染的关系	83
第 5 章 重庆主城区空气污染与霾数值模拟研究	84
5.1 典型污染天气个例模拟	84
5.2 典型霾天气个例模拟	108
第 6 章 重庆主城区空气污染气象条件预报方法初探	121
6.1 空气污染数值模式预报方法	121

6.2 空气污染统计预报方法	123
第7章 重庆应对主城区空气污染措施与成效	129
7.1 实施清洁能源工程	129
7.2 实施五管齐下净空工程	129
7.3 实施主城蓝天行动计划	130
7.4 实施四控一增举措	131
参考文献	133

区、北碚区、渝北区、巴南区、长寿区、江津区、合川区、永川区、南川区、綦江区、大足区、璧山区、铜梁区、潼南区、荣昌区、开州区、梁平区、武隆区)；12个县(自治县)(城口县、丰都县、垫江县、忠县、云阳县、奉节县、巫山县、巫溪县、石柱土家族自治县、秀山土家族苗族自治县、酉阳土家族苗族自治县、彭水苗族土家族自治县)，是中国目前行政辖区最大、人口最多、管理行政单元最多的特大型城市。辖区内山脉纵横，水系发达，植被丰富，地貌类型多样，天气气候独特。

重庆主城区包括渝中区、大渡口区、江北区、沙坪坝区、九龙坡区、南岸区、北碚区、渝北区、巴南区 9 个行政区，总面积 5472.7 km²，常住人口 851.8 万(2016 年)。渝中区、大渡口区、江北区、沙坪坝区、九龙坡区、南岸区为重庆主城核心 6 区，面积 1440.5 km²(图 1.2)。从地形图上看，主城核心区主要位于中梁山、铜锣山和真武山之间的小盆地内，其中中梁山、铜锣山和真武山呈南北走向，平均海拔为 500~650 m。从地形剖面图看(图 1.3、图 1.4)，主城区除东西面有南北向高山包围以外，南北亦有平均海拔 500 m 左右高山阻挡，城区盆地内东西宽约 20 km，南北长约 60 km，地势西高东低，北高南低，平均海拔高度在 200~400 m。城区内长江、嘉陵江穿城而过，交汇于渝中区朝天门。主城核心六区为重庆主城工商业的主



图 1.2 重庆市主城地形图

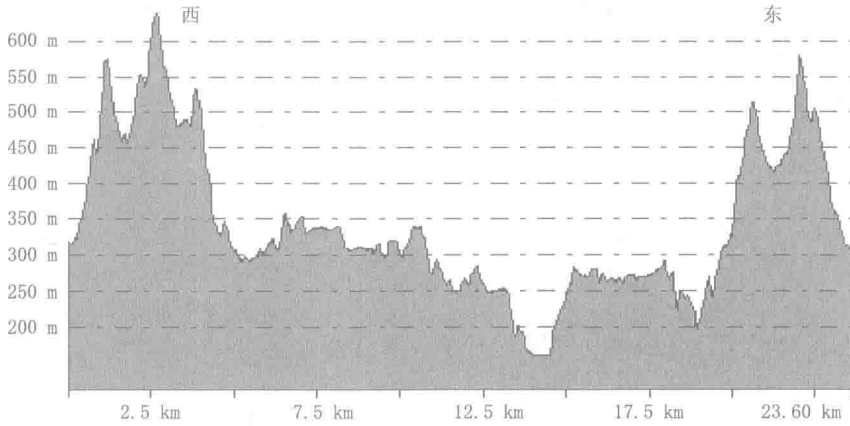


图 1.3 重庆市主城区东西向剖面图

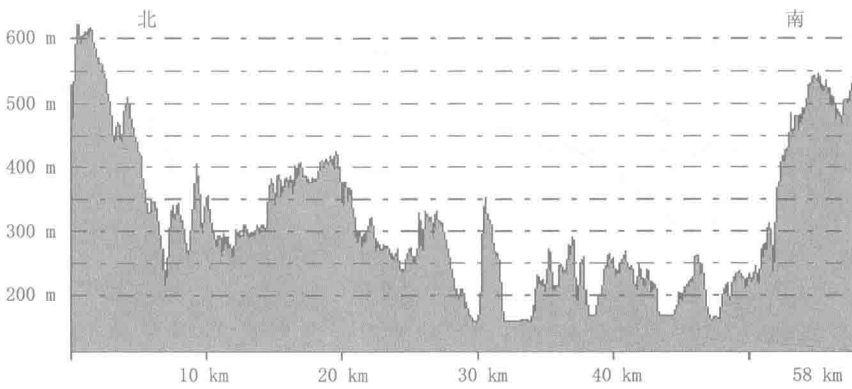


图 1.4 重庆市市主城区南北向剖面图

要聚集区,是污染排放的主要区域,其中位于大渡口区的重庆钢铁集团(目前已搬迁至长寿区)、九龙坡区重庆火力发电厂和江津区洛璜火力发电厂(主城边)是影响主城区三个最大污染排放源。特殊的地形和大量污染的排放,使得主城六区成为重庆污染最为严重的区域。

1.2 经济状况

近十年来(2006—2016年),重庆经济保持良好发展势头,2011年突破10000亿元大关,十年GDP平均增幅超过10%,高于全国平均水平(图1.5)。2016年全市实现地区生产总值17558.76亿元,排名全国第二十位,按可比价格计算,比上年增长10.7%,较2016年全国GDP增速6.7%高出4个百分点,增幅排名全国第一。重庆主要经济指标持续向好,规模以上工业增加值增长10.3%、利润增长12%,固定资产投资增长12.1%,社会消费品零售总额增长13.2%,一般公共预算收入达到2228亿元,增长7.1%。2016年,面积仅占全市不到7%、人口占全市27.94%的重庆主城九区,GDP达到7646.74亿元,贡献全市GDP达到43.55%,可见重庆主城区是重庆经济最为活跃的区域。

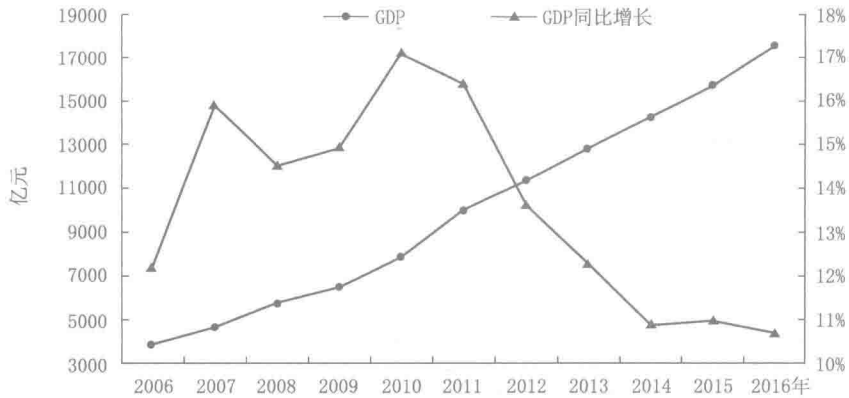


图 1.5 重庆近十年 GDP 及增长率(数据来源:《2017 年重庆统计年鉴》)

1.3 能源消耗

近十年来(2006—2015 年,数据来源:《2016 年重庆统计年鉴》)重庆市的能源消耗总量呈逐年稳步上升趋势,平均每年以 8.7% 的速度增长,重庆市能源年消耗总量从 2006 年 3891 万 t(万吨标准煤,下同),上升到 2015 年的 8068 万 t,增幅达 107.4%(图 1.6)。其中,煤炭的消耗总量平均每年以 7.6% 的速度增长,煤炭年消耗总量从 2006 年 2555 万 t,上升到 2015 年的 4654 万 t,增幅为 82.2%,低于总能源消耗;天然气的消耗总量平均每年以 9.7% 的速度增长,天然气年消耗总量从 2006 年 533 万 t,上升到 2015 年的 1175 万 t,增幅为 120.5%;油料的消耗总量平均每年以 11.2% 的速度增长,油料年消耗总量从 2006 年 469 万 t,上升到 2015 年的 1164 万 t,增幅为 148.2%;电力的消耗总量平均每年以 15.9% 的速度增长,煤炭年消耗总量从 2006 年 335 万 t,上升到 2015 年的 1075 万 t,增幅为 220.9%(图 1.7)。由此可见,重庆近十年来煤炭消耗的增幅明显减少,而属于清洁能源的天然气和电力消耗的大幅增加。

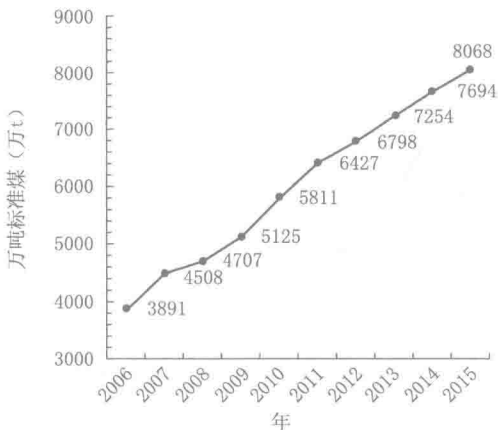


图 1.6 能源消耗总量

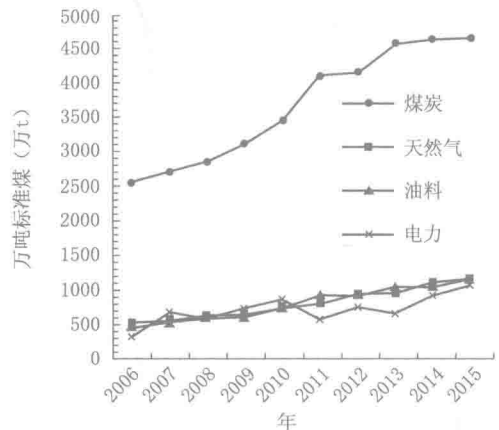


图 1.7 煤炭、天然气、油料和电力消耗

从重庆市近十年来能源消耗的构成比例(图 1.8)可以看出,煤炭仍然是主要能源消耗。自 2006 年以来,煤炭在重庆市能源构成中所占的比例总体呈波动下降状态,基本维持在 60%~70%,其中 2013—2015 年所占比例降到 60%左右。天然气在能源结构中的比例逐年总体呈缓慢上升趋势,由 2006 年的 8.4% 上升到 2015 年的 12.1%,上升了 3.7%。电力消耗在能源构成中的比例是先降后升,从 2006 年的 12.3% 降到 2012 年的 8.6%,下降了 3.7%,但是从 2013 年开始出现大幅上升,2013—2015 年所占比例达到 13.3%~15.0%。油料消耗在能源构成中的比例则是先缓降后快速上升趋势,由 2006 年的 8.4% 下降到 2009 年的 7.0%,但是到 2010 年则快速上升到 11.3%,之后逐年缓慢上升,2015 年占比为 12.1%。2009 年之后,油料消耗在能源构成中的比例的明显提升,与近几年汽车的大幅度增加有直接关系。

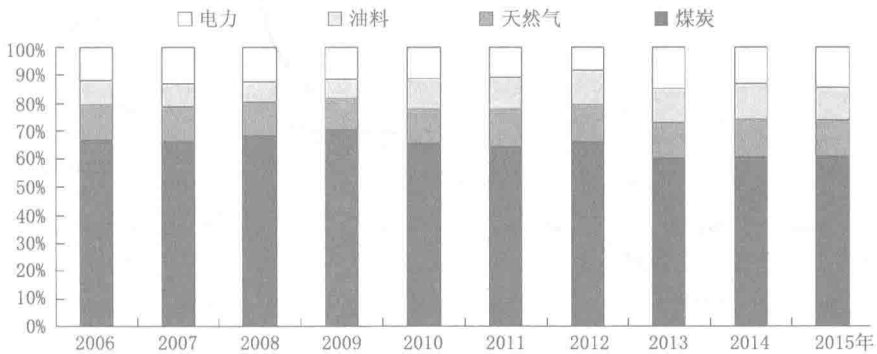


图 1.8 重庆近十年能源消耗构成比例

总之,在 2006—2015 年,重庆市能源消费中油料、电力的消费总量和在整个能源结构中的比例均呈上升趋势,煤炭消费总量也在增加,但在能源结构中的比例在缓慢下降(在主城区下降比例比较明显)。目前,重庆市仍存在能源消费结构不合理的现象,即天然气和电力等优质能源消费比例偏低,而高硫高灰分煤炭终端消费比例依然较高。与此同时,水电、风电开发程度低,火电比重大,洁净煤消费量小,能源利用效率低及资源浪费大等问题,仍然是导致大气环境污染严重的根本原因。

1.4 气候概况

重庆市属亚热带湿润季风气候区,主要气候特点可以概括为:冬暖春早,夏热秋凉,四季分明,无霜期长;空气湿润,降水丰沛;太阳辐射弱,日照时间短;多云雾,少霜雪;光温水同季,立体气候显著,气候资源丰富,气象灾害频繁。重庆市年平均气温 17.5℃(1981—2010 年 30 年平均资料,下同),长江河谷的巴南、綦江、云阳等地达 18.5℃ 以上,东南部的黔江、酉阳等地 15~17℃,东北部海拔较高的城口仅 13.9℃,冬季 7.9℃,夏季 26.4℃,春、秋季分别为 17.4℃、18.2℃。重庆市年平均降水量较丰富,全市平均年降水量为 1125.3 mm,降水主要集中在汛期(5—9 月),达 774.6 mm,总量占全年的 69%。重庆市年平均相对湿度为 80%,在全国属高湿区。重庆各地年日照时数在 888.5~1539.6 h,日照百分率仅为 25%~35%,为全国年日照最少的地区之一,冬季日照更少,仅占全年的 10% 左右。

重庆主城区(以沙坪坝气象观测站为基准)年平均气温为 $18.4\text{ }^{\circ}\text{C}$,最热月在7—8月,最冷月在1月,春秋为冬、夏之间的过渡性季节,温度适中;降水量丰富,年均降水日数为151 d,年平均降水量为1108.2 mm,主要集中在5—9月,约占全年降水总量的70%,其中6月最多,1月最少;日照资源分布不均,年平均日照时数为962.5 h,夏季最多,占全年的44%,春、秋季次之,分别占28%与22%;冬季最少,仅占8%;年平均相对湿度为80%,在全国属高湿区,相对湿度秋、冬季高,达83%,春夏季低,约为77%;重庆市主城区为两山所夹槽谷,全年近地风速很小,年平均风速为1.4 m/s,7、8月最大,为1.6 m/s,冬半年(10月至次年1月)平均风速为1.1 m/s。

第 2 章 重庆主城区空气污染时空变化

2.1 空气污染监测

从 1996 年开始,重庆市环保局在主城区建设空气质量监测站开展空气质量自动监测,监测项目有 PM_{10} 、 SO_2 、 NO_2 。2002 年对外公布的监测点有渝中区的解放碑、大渡口区的新山村、沙坪坝的高家花园和天星桥、九龙坡的杨家坪、南岸区的南坪、渝北区的人和站点以及北碚区的缙云山清洁对照点。2006 年取消沙坪坝的天星桥,增加了渝北区的两路、北碚区的天生、巴南区的鱼洞站点;2007 年增加渝北区的礼嘉和沙坪坝区的虎溪站点;2008 年增加江北区的唐家沱站点;2009 年增加南岸区的茶园站点;2011 年增加九龙坡区的白市驿站点。截至 2012 年,主城区共设置环境空气质量自动监测点位 16 个。2013 年,根据环境保护部统一部署和要求,重庆市(主城区)作为全国首批 74 个城市(京津冀、长三角、珠三角等重点区域以及直辖市和省会城市)之一开始实施空气质量新标准(《环境空气质量标准——GB3095—2012》),在重庆市生态环境监测中心网站上对外公开发布细粒子颗粒物 $PM_{2.5}$ 、可吸入颗粒物 PM_{10} 、 NO_2 、 SO_2 、 CO 、 O_3 等大气污染物监测数据(<http://www.cqemc.cn/>)。2013 年,主城区共设空气质量自动监测国控点 17 个(其中城市点 16 个,包括解放碑、新山村、唐家沱、高家花园、虎溪、杨家坪、白市驿、南坪、茶园、天生、蔡家、两路、空港、鱼洞、南泉、礼嘉及缙云山清洁对照点),2016 年取消了高家花园、杨家坪、鱼洞、南泉等国控点,随后新增了龙井湾、歇台子、龙洲湾、鱼新街等国控点。截至 2016 年 12 月,重庆市主城 9 区共设置空气质量自动监测国控点 17 个(表 2.1),监测项目有 PM_{10} 、 $PM_{2.5}$ 、 SO_2 、 NO_2 、 CO 、 O_3 等。

表 2.1 重庆市主城区空气质量自动监测国控点

点位名称	行政区	所在功能区	
		类型	名称
解放碑	渝中区	二类	居商混合区
龙井湾	沙坪坝区	二类	居商混合区
虎溪	沙坪坝区	二类	居商文教混合区
南坪	南岸区	二类	居商文教混合区
茶园	南岸区	二类	居商混合区
白市驿	九龙坡区	二类	居商混合区
歇台子	九龙坡区	二类	居商混合区
新山村	大渡口区	二类	居商混合区
唐家沱	江北区	二类	居商混合区

续表

点位名称	行政区	所在功能区	
		类型	名称
两路	渝北区	二类	居商文教混合区
礼嘉	渝北区	二类	居商混合区
空港	渝北区	二类	居商混合区
鱼新街	巴南区	二类	居商文教混合区
龙洲湾	巴南区	二类	居商混合区
缙云山	北碚区	一类	自然保护区
天生	北碚区	二类	居商文教混合区
蔡家	北碚区	二类	居商混合区

根据环保部门的相关规定,环境空气质量监测与评价在 2013 年以前采用的是《环境空气质量标准——GB3095—1996》,用空气污染指数 API(Air Pollution Index)来表征空气质量的优劣,API 由 PM₁₀、SO₂、NO₂ 等 3 项的污染指数取最大值来确定,其空气污染指数对应的污染物浓度限值及空气质量状况如表 2.2、表 2.3 所示。2013 年之后采用的是《环境空气质量标准——GB3095—2012》,以空气质量指数 AQI(Air Quality Index)来表征空气质量的优劣,AQI 由 PM₁₀、PM_{2.5}、SO₂、NO₂、O₃、CO 等 6 项的污染指数取最大值来确定,其空气质量指数对应的污染物浓度限值及空气质量状况如表 2.4、表 2.5 所示。新标准中空气质量指数级别由 5 级调整为 6 级。由于 AQI 采用分级限制标准更严,AQI 较 API 监测的污染物指标更多,其评价结果更加客观。

表 2.2 空气污染指数对应的污染物浓度限值(GB3095—1996)

污染指数	污染物浓度(μg/m ³)		
	SO ₂ (日均值)	NO ₂ (日均值)	PM ₁₀ (日均值)
API			
50	50	80	50
100	150	120	150
200	800	280	350
300	1600	565	420
400	2100	750	500
500	2620	940	600

表 2.3 空气污染指数范围及相应的空气质量类别(GB3095—1996)

空气污染指数 API	空气质量级别	空气质量状况
0~50	I	优
51~100	II	良
101~200	III	轻度污染
201~300	IV	中度污染
>300	V	重污染

表 2.4 空气质量分指数及对应污染物项目浓度限值(GB3095—2012)

空气质量分指数 (IAQI)	二氧化硫 (SO ₂) 24 h 平均/ (μg/m ³)	二氧化硫 (SO ₂) 1 h 平均/ (μg/m ³) ⁽¹⁾	二氧化氮 (NO ₂) 24 h 平均/ (μg/m ³)	二氧化氮 (NO ₂) 1 h 平均/ (μg/m ³) ⁽¹⁾	颗粒物 (粒径小于等于 10 μm) 24 h 平均/ (μg/m ³)	一氧化碳 (CO) 24 h 平均/ (mg/m ³)	一氧化碳 (CO) 1 h 平均/ (mg/m ³) ⁽¹⁾	臭氧(O ₃) 1 h 平均/ (μg/m ³)	臭氧(O ₃) 8 h 滑动平均/ (μg/m ³)	颗粒物 (粒径小于等于 2.5 μm) 24 h 平均/ (μg/m ³)
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
50	50	150	40	100	50	2	5	160	100	35
100	150	500	80	200	150	4	10	200	160	75
150	475	650	180	700	250	14	35	300	215	115
200	800	800	280	1200	350	24	60	400	265	150
300	1600	⁽²⁾	565	2340	420	36	90	800	800	250
400	2100	⁽²⁾	750	3090	500	48	120	1000	⁽³⁾	350
500	2620	⁽²⁾	940	3840	600	60	150	1200	⁽³⁾	500

说明

⁽¹⁾ 二氧化硫(SO₂)、二氧化氮(NO₂)和一氧化碳(CO)的 1 h 平均浓度限值仅用于实时报,在日报中需使用相应污染物的 24 小时平均浓度限值。

⁽²⁾ 二氧化硫(SO₂)1 h 平均浓度值高于 800 μg/m³的,不再进行其空气质量分指数计算,二氧化硫(SO₂)空气质量分指数按 24 h 平均浓度计算的分指数报告。

⁽³⁾ 臭氧(O₃)8 h 平均浓度值高于 800 μg/m³的,不再进行其空气质量分指数计算,臭氧(O₃)空气质量分指数按 1 h 平均浓度计算的分指数报告。

表 2.5 空气质量指数范围及相应的空气质量类别(GB3095—2012)

空气质量指数 AQI	空气质量级别	空气质量状况
0~50	I	优
51~100	II	良
101~150	III	轻度污染
151~200	IV	中度污染
201~300	V	重度污染
>300	VI	严重污染

2.2 空间分布特征

2.2.1 PM₁₀ 空间分布特征

从 2002—2016 年 PM₁₀ 年平均浓度空间分布变化图可以看出(图 2.1、2.2、2.3),2002、2005 年高浓度值区为大渡口区新山村监测点和江北区观音桥监测点,其次为九龙坡区杨家坪监测点、渝中区解放碑监测点、沙坪坝区高家花园监测点,再次为南岸区南坪监测点、巴南

区鱼洞监测点、渝北区人和监测点,浓度最低的是北碚区天生监测点。2008年以后,重庆主城区PM₁₀高浓度中心发生转移,沙坪坝区高家花园监测站PM₁₀年平均高浓度值超过大渡口区的新山村,成为新的高浓度值区。2011年,PM₁₀的高浓度值分布区域有所北移和扩大,高浓度值主要分布在沙坪坝区、江北区和渝中区,其次为大渡口区、九龙坡区和南岸区,相对较低的是巴南区 and 渝北区,浓度最低的区域仍然是北碚区。2014、2016年,PM₁₀的高浓度值区主要分布在沙坪坝区、江北区、渝中区、大渡口及九龙坡等主城核心区域。随着重庆市政府在全市范围内大力实施“蓝天行动计划”,到2016年,主城各区PM₁₀的浓度下降到历史以来的最低值,重庆主城区PM₁₀的分布逐渐趋于一致,高浓度区域特征不再显著。

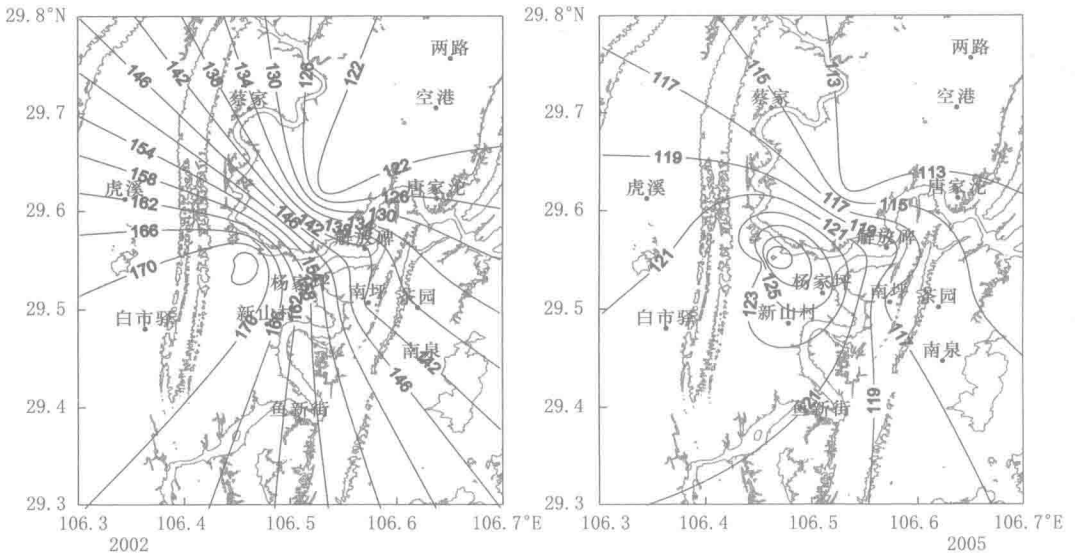


图 2.1 2002、2005 年 PM₁₀ 年平均浓度($\mu\text{g}/\text{m}^3$)空间分布

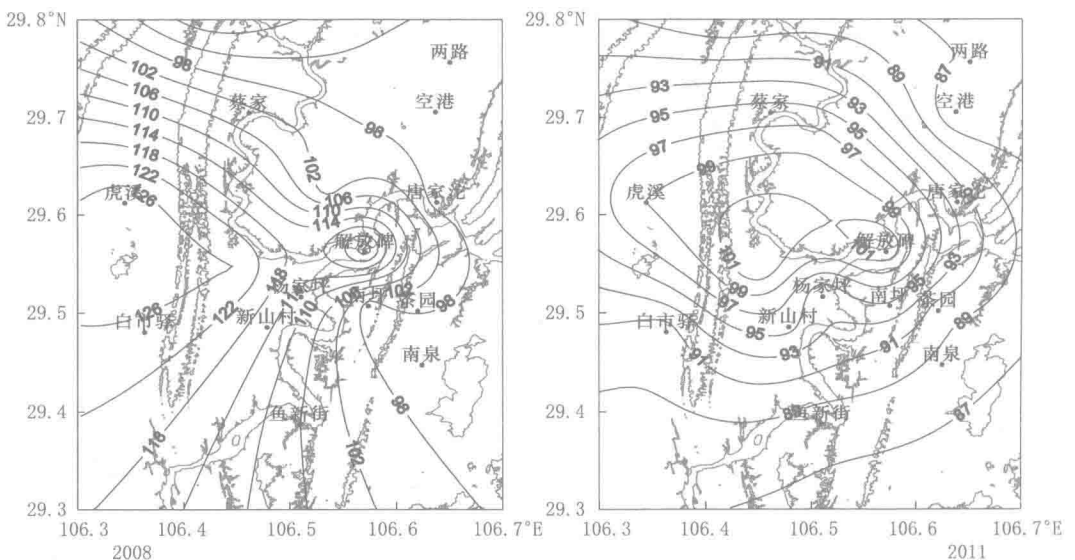
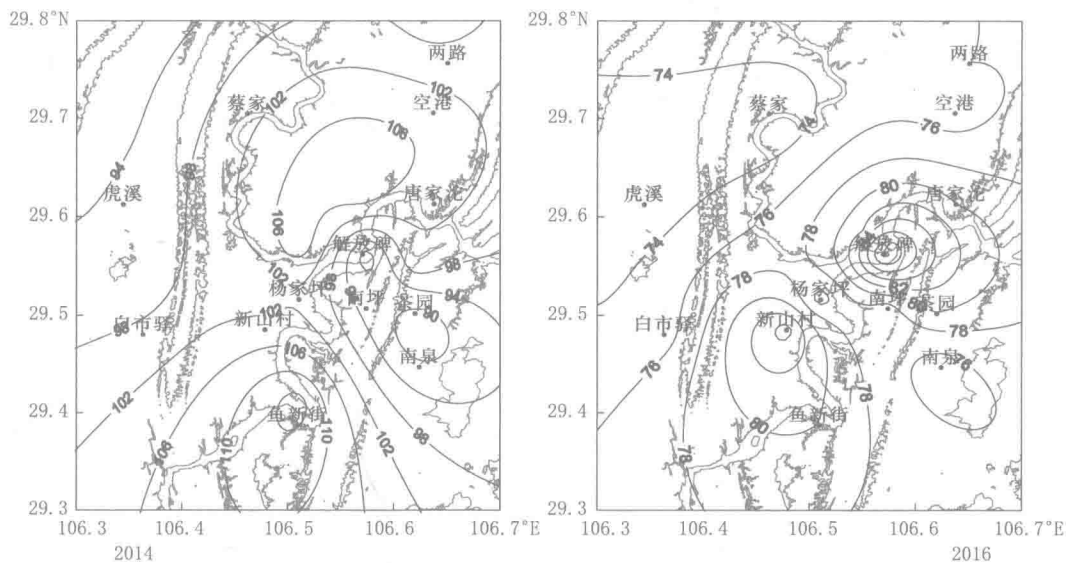
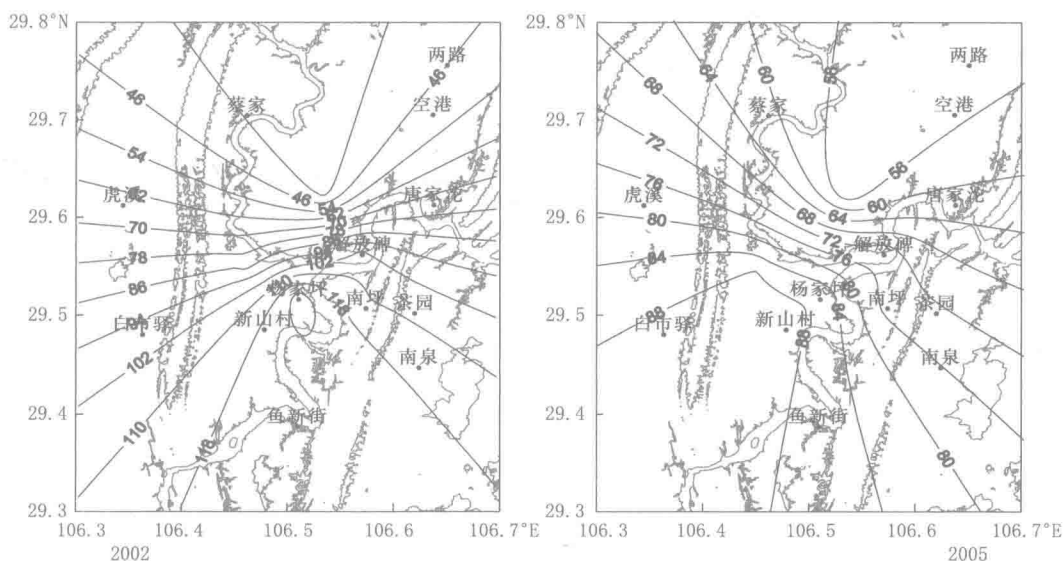


图 2.2 2008、2011 年 PM₁₀ 年平均浓度($\mu\text{g}/\text{m}^3$)空间分布

图 2.3 2014、2016 年 PM_{10} 年平均浓度($\mu\text{g}/\text{m}^3$)空间分布

2.2.2 SO_2 空间分布特征

从 2002—2016 年 SO_2 年平均浓度空间分布变化图可以看出(图 2.4、2.5、2.6),2002、2005 年,大渡口区新山村监测点一直是 SO_2 年均浓度高值中心,在 2003 年大渡口区新山村监测点 SO_2 年均浓度值达到了 $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$, SO_2 一度成为重庆主城区的首要污染物,其次是九龙坡区的杨家坪监测点、南岸区的南坪监测点,再次是江北区观音桥、沙坪坝区高家花园,浓度较低的依次是巴南区鱼洞监测点、渝北区两路监测点和北碚区天生监测点。从 2008 年开始, SO_2 年均浓度高值区为南岸区的南坪监测点和九龙坡区的杨家坪监测点,其次是沙坪

图 2.4 2002、2005 年 SO_2 年平均浓度($\mu\text{g}/\text{m}^3$)空间分布