

A Study on the Atmospheric Environmental Capacity Accounting in Guiyang

Jinying Tang¹, Yulei Zhu², Lei Cui²

¹Plateau Atmosphere and Environment Key Laboratory of Sichuan Province, College of Atmospheric Sciences, Chengdu University of Information Technology, Chengdu Sichuan

²Guizhou Meteorological Observatory, Guiyang Guizhou

Email: 13143467@qq.com

Received: Dec. 1st, 2018; accepted: Dec. 21st, 2018; published: Dec. 28th, 2018

Abstract

Through the box model-based macro total control valve ("A" value method), this study analyzes the seasonal variations in "A" value and environmental capacity of the four pollutants (SO₂, NO₂, PM₁₀ and PM_{2.5}) in Guiyang city, using ground-based observation data from March 2015 to February 2016 provided by the Guizhou Meteorological Bureau. The conclusions are as follows: 1) Seasonal "A" values are 0.75, 0.61, 0.64 and 0.59 in Guiyang for spring, summer, autumn and winter, respectively. In contrast, the annual total atmospheric environment capacity was 100.1, 19.1, 55.0 and 26.3 (10⁴ t·a⁻¹) for SO₂, NO₂, PM₁₀ and PM_{2.5}, respectively. 2) Seasonal atmospheric environmental capacity for all pollutant reached the maximum in summer and reached its minimum in winter. Among the four pollution factors, SO₂ has the largest environmental capacity. 3) Among the four removal methods, wet deposition is the main one, while dry sedimentation and chemical removal accounted for the smallest proportion. 4) The uneven distribution of seasonal ventilation and wet deposition time is the main factor causing the difference of atmospheric environmental capacity in different seasons in Guiyang.

Keywords

Guiyang City, "A" Value Method, Seasonal Atmospheric Environmental Capacity

贵阳市大气环境容量核算研究

汤津赢¹, 朱育雷², 崔 蕾²

¹成都信息工程大学, 大气科学学院, 高原大气与环境四川省重点实验室, 四川 成都

²贵州省气象台, 贵州 贵阳

Email: 13143467@qq.com

收稿日期: 2018年12月1日; 录用日期: 2018年12月21日; 发布日期: 2018年12月28日

摘要

本文利用贵州省气象局提供的2015年3月~2016年2月的地面观测资料,基于箱模型的宏观总量控制阀(A值法)对贵阳地区季节A值和贵阳市的四项污染物(SO₂、NO₂、PM₁₀和PM_{2.5})季节环境容量进行核算研究。研究表明:1) 贵阳市春夏秋冬A值分别为0.75、0.61、0.64、0.59; SO₂、NO₂、PM₁₀和PM_{2.5}的年总大气环境容量分别为100.1、19.1、55.0和26.3 (10⁴ t·a⁻¹)。2) 各污染物季节大气环境容量,皆以夏季最大,冬季最小。而四项污染因子中,SO₂的环境容量最大。3) 四种清除方式中,均以湿沉降为主要,干沉降和化学清除项所占比例最小。4) 各季节通风量和湿沉降时间分布不均匀是造成贵阳市各个季节大气环境容量差异的主要因素。

关键词

贵阳市, A值法, 季节大气环境容量

Copyright © 2018 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

大气环境是人类赖以生存的必要条件之一。大气环境容量是在人类生存和自然生态系统不致受害的前提下,大气环境所能容纳的污染物的最大负荷量[1]。大气环境容量核算是实现目标总量向环境容量总量的管理过度的关键,也是地区产业布局和污染物排放总量控制及地区环保政策制定的主要因素[2]。近年来,在全国大范围都处在严重污染的情况下,贵阳市作为贵州省的省会,西南地区主要的工业基地之一,也正面临着严重的空气污染问题。

大气环境容量核算方法是大气环境容量研究的核心,目前主要有箱模式法和多源模式模拟法两大类。箱模式是一种最简单的城市空气质量模式,其原理是把整个区域空间看作由一个或多个矩形的箱体组成,箱底和箱顶分别为城市下垫面和混合层顶,四周由区域的范围确定[3]。国标A值法是基于箱模式理论推导而来,它仅考虑污染物平流输送和扩散,而忽略污染物的干、湿沉积和化学转化过程。欧阳晓光[4]等基于单箱模型A值法,通过《环境影响评价技术导则大气环境》(HJ/T2.2-93)计算混合层厚度(Hi),并对不同大气稳定度下A值的单箱模型法进行修正;以《制定地方大气污染物排放标准的技术方法》(GBPT13201-91)中给出的各地区A值的取值范围为基础,提出计算A值的达标保证率法,并以确定达标保证率方法的不同细分作为概率公式法。韩薇等[5]以测算东北SO₂的大气环境容量为例,说明要科学合理地确定某一区域的大气环境容量需综合采用A-P值法、平权法和源强优化法。匡耀求等[6]应用A值法计算了珠江三角洲二氧化硫的环境容量,并探讨了二氧化硫排放的控制政策。张少骞等[7]和李文慧[8]等利用A值法分别得到长春市以及西安市各区县主要污染物的大气环境容量。崔锡训等[9]利用鞍山市空气污染源排放清单,对A值法进行改进,克服了原A-P值法的不足,优化了该市分配方案。

本文选取贵州省作为研究对象,利用2015年3月~2016年2月一整年的地面基本气象要素资料,利用A值法对贵阳市PM_{2.5}、PM₁₀、SO₂和NO₂等污染物日和季节尺度的大气环境容量进行核算,并对其特点进行分析。该研究将有助于加深对贵阳市大气环境容量的认识,并能为区域联防联控治理大气污染提供理论参考。

2. 数据与研究区域概况

2.1. 数据来源

本文所用气象观测资料均来自贵州省气象局(106°72'E, 26°58'N)。地面气象数据, 包括逐小时风速、总云量、低云量、气温、露点温度和降雨量, 时间分辨率为5小时(观测时间分别为北京时间08时、11时、14时、17时和20时)。本文季节定义为春季(3~5月)、夏季(6~8月)、秋季(9~11月)和冬季(12~2月)。

2.2. 研究区域概况

贵州省贵阳市属于亚热带湿润温和型气候, 常年降水充沛, 年均相对湿度77%, 年均气温15.3℃。研究区总面积为8034 km²。根据《中华人民共和国大气污染防治法》[10]、《中华人民共和国环境空气质量标准》(GB3095-1996)、《环境空气质量功能区划分原则与技术方法》(GJ14-1996) [11]等法律及标准的规定, 一类环境空气质量功能区是指自然保护区、风景名胜区和需要特殊保护的地区, 同时规定其面积不得小于4平方公里。在对贵阳市进行区域划分之后, 这里将黔灵山公园、花溪青岩油杉保护区和阿哈湖湿地公园划为一类功能区, 具体的一类功能区面积请参考表1; 将不超过4 km²的花溪湿地公园和贵阳市森林公园等划为二类功能区。超过4 km²的一类功能区总面积为191.72 km², 而二类功能区面积为7842.28 km², 分别占研究区总面积的2.3%和97.7%。

Table 1. Area statistics of a type of functional area

表 1. 一类功能区面积统计

名称	黔灵山公园	花溪青岩油杉保护区	阿哈湖湿地公园
面积(km ²)	4.26	106.26	81.2

3. 研究方法

3.1. 大气稳定度计算

本文选取国标法计算大气混合层高度。大气稳定度计算原理如下: 首先利用观测时刻的太阳倾角和站点经纬度, 根据式(1)计算出该站点的太阳高度角 h_0 。

$$h_0 = \arcsin[\sin \varnothing \sin \sigma + \cos \varnothing \cos \sigma \cos w] \quad (1)$$

其中式(1)中 w 为时角, 公式如下:

$$w = 15 \times (ST - 12) \quad (2)$$

ST 为真太阳时, 公式如下:

$$ST = \text{hour} + \frac{\min}{60} + \frac{\text{lon} - 120}{15} \quad (3)$$

这里考虑到研究区域范围处于同一时区, 不同区域受太阳高度角的影响较小, 故本文对 \min 取0值进行计算, 式(1)简化后为:

$$h_0 = \arcsin[\sin \varnothing \sin \sigma + \cos \varnothing \cos \sigma \cos(15t + \lambda - 300)] \quad (4)$$

式(4)中, h_0 为太阳高度角; \varnothing 为观测点的纬度; t 为观测进行时的北京时间; λ 为观测点的经度; σ 为太阳赤纬, 其计算公式如下:

$$\sigma = [0.006918 - 0.39912 \cos \theta_0 + 0.70257 \sin \theta_0 - 0.006758 \cos \theta_0 + 0.000907 \sin 2\theta_0 - 0.002697 \cos 3\theta_0 + 0.001480 \sin 3\theta_0] \times \frac{180}{\pi} \quad (5)$$

式(5)中, $\theta_0 = 360 \times d_0 / 365$, d_0 为一年中日期序数, 依次为 0、1、2、...、364。

通过太阳高度角以及总云量和低云量的等级分类计算出太阳辐射等级(表 2)。结合太阳辐射等级和近地面 10 米风速确定大气稳定度等级(表 3)。

Table 2. Solar radiation level

表 2. 太阳辐射等级

云量		太阳辐射等级				
总云量/低云量	夜间	$h \leq 15^\circ$	$15^\circ < h \leq 35^\circ$	$35^\circ < h \leq 65^\circ$	$H > 65^\circ$	
$\leq 4/\leq 4$	-2	-1	+1	+2	+3	
5~7/ ≤ 4	-1	0	+1	+2	+3	
$\geq 8/\leq 4$	-1	0	0	+1	+1	
$\geq 5/5\sim 7$	0	0	0	0	+1	
$\geq 8/\geq 8$	0	0	0	0	0	

Table 3. Atmospheric stability level

表 3. 大气稳定度等级

地面风速(m/s)	太阳辐射等级					
	+3	+2	+1	0	-1	-2
≤ 1.9	A	A~B	B	D	E	F
2~2.9	A~B	B	C	D	E	F
3~4.9	B	B~C	C	D	D	E
5~5.9	C	C~D	D	D	D	D
≥ 6	D	D	D	D	D	D

3.2. 混合层厚度计算

在上表中确定了大气稳定度等级之后, 通过下列方法对混合层厚度进行分类计算。首先在不稳定和中性气象条件下, 即大气稳定度为 A、B、C 和 D 时,

$$L = \frac{a_0 u_{10}}{f} \quad (6)$$

然后, 在稳定的大气条件下, 即大气稳定度为 E 和 F 时,

$$L = b_0 \times \frac{\sqrt{u_{10}}}{f} \quad (7)$$

上式中 L 为混合层高度; u_{10} 表示 10 m 高度的上平均风速, 若大于 6 m/s 时取 6 m/s; a_0 和 b_0 为混合层系数, a_0 和 b_0 取值均与稳定度相关, 其中 a_0 取值和稳定度对应分别为 A: 0.073、B: 0.048、C: 0.031 和 D: 0.022, 而 b_0 取值和稳定度对应分别为 E: 1.66 和 F: 0.70; f 为地转参数($f = 2\Omega \sin \Phi$), Ω 为地转角速度, 取为 $7.29 \times 10^{-5}/s$, Φ 为观测点地理纬度。

3.3. A 值法

A 值法更适用于地区级范围的容量计算，其原理是通过算出控制区的总面积和其中各功能区的面积，以及当地的基本限值系数，就能估算出该研究区允许排放的总量。A 值法是以地面大气环境质量为目标值，使用简便的箱模式而实现的具有宏观意义的总量控制。A 值的计算将通风量和天数结合在一起，简化输送扩散项的计算。

3.4. 季节大气环境容量核算

在国家环保局颁布的《制定地方大气污染物排放标准的技术方法》(GB/T13201-91) [12]中，规定大气污染物排放总量的测算方法是以箱模型为基本模型推导出的宏观总量控制值法。在这个模型里，距城市上风向边缘处箱中平均浓度可以表示为：

$$C = \frac{q_a \Delta x}{u H_F} \quad (8)$$

式(8)中：C 为箱内混合层内平均浓度(mg/m³)；q_a为箱内单位面积平均源强(mg/(m²·s))；Δx为风向的边界长度，单位 m；u 为风速(m/s)；H_F为城市上空混合层高度(m)。

如果考虑到干、湿沉降及化学衰变因素，箱体中污染物平均质量浓度为：

$$\bar{c} = \frac{\bar{u}c_b + \frac{\Delta x q_a}{H_i}}{\bar{u} + \frac{\left(u_d + w_r R + \frac{H_i}{T_c}\right) \Delta x}{H_i}} \quad (9)$$

式(9)中：q_a为污染物排放量(mg·m⁻³·s⁻¹)； \bar{u} 为平均风速(m/s)；H_i为污染物可到达的高度，即各观测时次下的混合层厚度(m)；c_b为通过上风向进入箱内的大气污染物本底质量浓度(mg/m³)；u_d为干沉降速度(m/s)；R为降水率；Δx为箱内顺风长度(m)；T_c为污染物转化时间常数，T_c = T_{1/2}/0.693；w_r为清洗比(无量纲)，一般取值 1.9×10⁻⁵。

如果给定的平均浓度等于大气污染物浓度的标准限值，且污染物半衰期足够大，那么由(9)式可解得允许排放率密度为：

$$q_s = c_s \left(\frac{\bar{u} H_i}{\Delta x} + u_d + w_r R \right) \quad (10)$$

设城市面积为 S，其等效直径应为：

$$\Delta x = 2\sqrt{\frac{S}{\pi}} \quad (11)$$

在控制周期 T 时间内，允许全市排放的污染物总量应为：

$$Q_a = q_s \cdot S \cdot T \quad (12)$$

若 T 取为一年，结合式(11)~(12)，可得：

$$Q_a = 3.1536 \times 10^{-3} c_s \sqrt{\pi} \frac{v_E \sqrt{S}}{2} + 3.1536 \times c_s S (u_d + u_w) + c_s S \times 0.639 \times \frac{H_i}{T_1^{\frac{1}{2}}} \quad (13)$$

式(13)中，Q_a的单位为 10⁴t/a；v_E表示通风量(m²/s)；R表示年降水量(mm/a)；c_s为污染物年平均浓度的

标准限值(mg/m³)； u_w 为湿沉降速率(m/s)； u_d 为干沉降速率(m/s)。公式等号右边的第一项为输送扩散清除项；第二项为干沉降和湿沉降清除项；第四项为化学转化清除项。

对各个季节的季节值进行计算，年系数为 3.1536，季节系数值为各季节的天数与年天数(非闰年)的比值再与年系数的乘积。

$$\partial = \frac{t}{365} \times 3.1536 \tag{14}$$

式中 ∂ 为季节系数； t 为各季节的天数，其中春季和夏季都为 92 天，秋季为 91 天，冬天为 90 天。计算出季节系数值如表 4 所示。

Table 4. Seasonal coefficient values of the study area

表 4. 研究区季节系数值

季节	春	夏	秋	冬
季节值	0.79488	0.79488	0.78624	0.7776

3.5. 大气环境容量核算

作为衡量着大气环境污染承受能力的重要参数，混合层高度直观的代表污染物垂直方向上的扩散范围。由于动力因素，热力因素等条件的影响，需要先对各季节 A 值进行计算。在计算各季度的混合层平均高度时，取各个观测时间达到混合层最高点的值的倒数平均进行计算。公式如下：

$$\bar{h} = \frac{n}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{h_i}} \tag{15}$$

式中， \bar{h} 为平均混合层高度， h_i 为每时段混合层高度。

由于夜间云量资料的缺失，只对贵阳市白天 5 个时段(北京时间 08 时、11 时、14 时、17 时、20 时)的混合层高度进行了计算。图 1 给出了贵阳市四个季节混合层高度的日平均变化。通过对比可以发现四季的日平均混合层高度在早晚都相对较低，春夏季的混合层高度在 14 时达到顶峰，且波动相对较明显，而秋冬季混合层高度的最大值则有所延后，出现在 17 时。此外，尤其是冬季，日间的混合层高度差异较小。在四季中，春季的混合层高度最高，冬季的最低。冬季是人为排放最为显著的季节，加之混合层高度较低，使冬季大量的人为排放污染物无法垂直扩散，最终将使地面污染物持续累积。这也是贵阳市冬季污染物浓度较大的一个主要原因之一。

大气热力是驱动白天大气混合层高度变化的一个主要因素。早晨及夜间大气层结比较稳定，并且近地层多逆温存在，故湍流很弱，致使混合层厚度较小；中午之后，太阳辐射强度达到顶峰，大气层结的不稳定度达到了一天中的最高点，湍流活动也达到了最旺盛的时候，所以此时混合层高度相应较高。

同时，通过下式能对混合层内的平均风速进行计算：

$$u_2 = u_1 \left(\frac{z_2}{z_1} \right)^p, z_2 \leq 200 \text{ m}; u_2 = u_1 \left(\frac{200}{z_1} \right)^p, z_2 > 200 \text{ m} \tag{16}$$

式(16)中， u_1 为距离地面 z_1 时的高度； u_2 为距离地面 z_2 时的高度，此处的 z_1 取 10 m， u_1 为 10 m 风速， z_2 取混合层高度单位为 m/s； p 为风速高度数。

混合层高度内平均风速积分求解方法为：

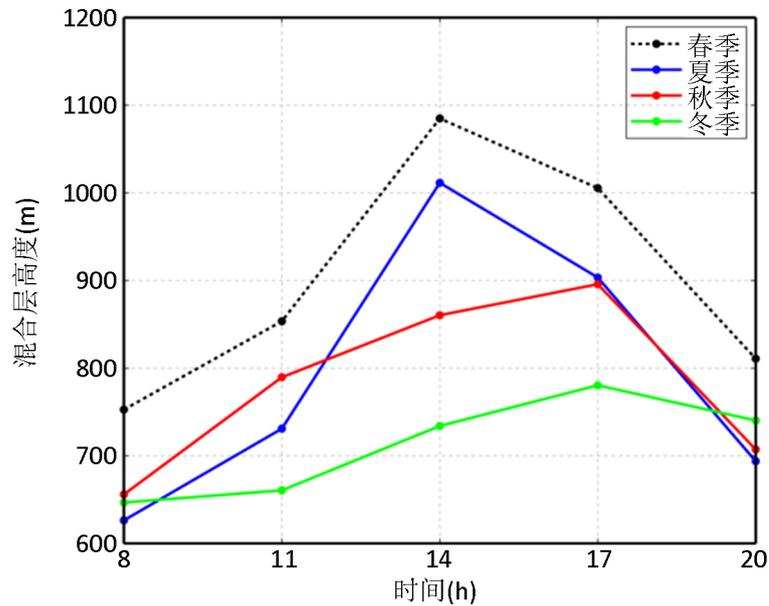


Figure 1. Daily average change of seasonal mixed layer height in Guiyang City
 图 1. 贵阳市季节混合层高度日平均变化图

$$u = \frac{1}{H_i} \int_0^{H_i} u(z) dz = \frac{1}{H_i} \left[\int_0^{200} u_{10} \left(\frac{z}{10} \right)^p dz + \int_{200}^{H_i} u_{10} \left(\frac{200}{10} \right)^p dz \right] \quad (17)$$

式中, u_{10} 为 10 m 处的风速, 单位 m/s; 当风速大于 6 m/s 时取为 6 m/s。

通过式(16)和(17)可以算出研究区的混合层内的各月份的平均风速。

p 为地表摩擦系数, 贵阳市属城市取系数 0.4。

根据《城市大气污染物总量控制方法手册》[13]中的说明, 计算各季节的通风量时, 需要以各季度中三个月的平均风速作倒数平均后再取其倒数, 计算公式为:

$$v_E = \frac{3}{\frac{1}{u_{i-1}H_{i-1}} + \frac{1}{u_iH_i} + \frac{1}{u_{i+1}H_{i+1}}} \quad (18)$$

上式中, u 为各季节中的 3 个月混合层内的平均风速(m/s); H 为季节内 3 个月的混合层高度。根据上述公式, 分别计算出了贵阳市季节混合层高度及其通风系数。如表 5 和表 6 所示, 贵阳市春夏两季平均通风系数相差不大, 秋季次之, 冬季最小。

Table 5. Ventilation volume in each season of the study area

表 5. 研究区各季节通风量

季节	春	夏	秋	冬
通风量	1060.702	866.4104	920.8849	854.1774

前文假设 T 为一年, 将公式 3~6 进行如下修改以计算季节大气环境容量:

$$A = a_i \times 10^{-3} \sqrt{\pi} \frac{v_E}{2}, i = 1, 2, 3, 4 \quad (19)$$

上式中, a_i 为季节值, 取表 4 的各季节对应的值进行带入, A 值单位: $10^4 \text{ km}^4/\text{季}$ 。由于四季的通风量较为相近, 季节值也差异不大, 导致各季节 A 值也较为相近。研究区 A 值计算结果如下表所示。

Table 6. Statistical A value of each element of the study area (104 km²)
表 6. 研究区季节各要素统计 A 值(104 km²)

季节	春	夏	秋	冬
混合层高度(m)	643	575	564	515
风速	1.655544	1.506421	1.632781	1.66264
通风量	1060.702	866.4104	920.8849	854.1774
A 值	0.747205	0.610338	0.641661	0.588639

4. 贵阳市季节大气环境容量

4.1. 季节基本大气环境容量(静态及输送扩散清除项)

对贵阳市进行区划后, 对全市进行了标准浓度限值的确定, 所以对公式(13)的第一项进行调整为:

$$Q_{a1} = A \sum_{i=1}^n c_{sb} \frac{S_i}{\sqrt{S}} \quad (20)$$

式中, A 值是各个季节的季节值; S_i 为相应研究区的面积; S 为研究区的总面积; $c_{sb} = (c_s - c_b)$, c_s 为大气污染物的标准限值, c_b 为本底值浓度, 指的是环境在未受到污染物影响的情况下, 其中化学元素和环境能量分布的正常值。一般来说一类控制区的本底值浓度取值为一级基本限值浓度的 20%, 而二类控制区本底值浓度取值为一级基本限值浓度的 50%。

根据《环境空气质量标准》(GB3095-2012)中的规定, 在一类功能区中 SO_2 、 NO_2 、 PM_{10} 、 $PM_{2.5}$ 的年平均浓度值为 0.04、0.02、0.04、0.015 mg/m³ 在二类功能区中则分别为 0.06、0.04、0.07、0.035 mg/m³。也就是对于一类功能区来说, c_{sb} 分别为 0.016、0.008、0.016、0.06 mg/m³ 对于二类功能区来说, c_{sb} 分别为 0.05、0.02、0.05、0.0275 mg/m³。

展开公式为:

$$Q_{a1} = A \times \left[0.8 \times c_{s1} \times \frac{S_1}{\sqrt{S}} + (c_{s2} - 0.5 \times c_{s1}) \times \frac{S_2}{\sqrt{S}} \right] \quad (21)$$

式(21)中, c_{s1} 为一级基本限值浓度, c_{s2} 为二级基本限值浓度。 S_1 和 S_2 分别为一类和二类功能区的面积。通过计算发现, 在春季, 贵阳的大气环境基本容量相比其他三个季节来说略高, 而冬季则相对较低, SO_2 和 PM_{10} 的基本容量要远大于另外两项污染物, 并且四项污染因子的季节变化趋势相近。各季节的基本大气环境容量(输送扩散清除项)计算结果如表 7 所示。

Table 7. Basic environmental capacity of different seasons in the study area (10⁴ t·a⁻¹)
表 7. 研究区不同季节基本环境容量(10⁴ t·a⁻¹)

季节	春	夏	秋	冬
SO ₂	3.294357	2.690921	2.829021	2.595255
NO ₂	1.358658	1.109789	1.166744	1.070334
PM ₁₀	3.319929	2.711808	2.85098	2.6154
PM _{2.5}	1.817011	1.484184	1.560353	1.431419

4.2. 季节干沉降项

在对季节干沉降项进行计算时, SO_2 、 PM_{10} 、 NO_2 的年均干沉降速率分别是: 0.346~0.354 cm/s、

0.4395~0.440 cm/s、0.0693~0.0707 cm/s。由于 PM_{2.5} 的粒径较小，自然的沉降效率很低，所以很难确定 PM_{2.5} 在干沉降方面的沉降速度。此外，PM_{2.5} 中成分构成较为复杂，在计算中，我们将 PM_{2.5} 的干沉降速度取值为 0.25 cm/s。另外，因为在相近区域，成分相同或相似的污染物的干沉降速度较为相近，所以在计算相同的污染物因子时，无需对各个季节的干沉降速度进行重复计算，而是对其进行近似处理，取年干沉降速率进行计算。故其他三个值在计算中，也取其中间值，分别为 0.35 cm/s、0.44 cm/s、0.07 cm/s。

干沉降项计算公式如下：

$$Q_{a2} = a_i \times c_s S_i u_d \tag{22}$$

式中 a_i 为各季节的季节值， c_s 为污染物年平均浓度的标准限值， S_i 为各类研究区的面积。 u_d 为干沉降速率。

展开公式：

$$Q_{a2} = a_i \times (c_{s_1} S_1 + c_{s_2} S_2) u_d \tag{23}$$

如表 8 所示，先对不同季节进行对比，由于春夏季节值相同，其他各项也相同，所以春夏季各污染物的数据也相同，各季节的数据差异仅存在其季节值上。再对不同污染物进行对比，PM₁₀ 是干沉降项中最大的污染物，而 NO₂ 则相对最小。另外在宏观上，干沉降的变化趋势十分不明显。

Table 8. Dry deposition of pollutants in Guiyang city in different seasons ($10^4 \text{ t}\cdot\text{a}^{-1}$)

表 8. 贵阳市各季节各污染物干沉降量($10^4 \text{ t}\cdot\text{a}^{-1}$)

季节	春	夏	秋	冬	总计
SO ₂	1.319739	1.319739	1.305394	1.291049	5.23592
NO	0.17881	0.17881	0.176866	0.174923	0.709409
PM ₁₀	1.946792	1.946792	1.925631	1.904471	7.723687
PM _{2.5}	0.551161	0.551161	0.54517	0.539179	2.186672

4.3. 季节湿沉降项

在式(13)中的第三项为湿沉降的计算公式：

$$Q_{a3} = a_i \times c_s S_i u_w \tag{24}$$

在进行计算时需要分固体颗粒物和气态污染物两种进行计算，对于固体颗粒物而言，仍然沿用式(24)中的计算项，但式中的 u_w 用 $wr \times R$ 进行替换， wr 为清洗比，无量纲量，取值为 1.9×10^{-5} ；而 R 是季度的累积降水量，单位为 mm/季度，对其进行展开后为：

$$Q_{a3} = a_i \times (c_{s_1} S_1 + c_{s_2} S_2) \times wr \times R \tag{25}$$

而气态污染物的公式则变为：

$$Q_{a3} = 3.1536 \times C_s \times S_i \times K_w \tag{26}$$

式中 k_w 表示为湿沉降速率， $K_w = a \times R^b$ ； R 是季节的每小时平均降水量； a 和 b 为对应各季节的相应季节系数，SO₂ 的湿沉降系数在春季时， a 和 b 分别为 0.036 和 0.530，夏季为 0.14 和 0.12，秋季的两项系数与春季相同，冬季为 0.009 和 0.700。另外，在计算 NO₂ 的湿沉降率时， a 和 b 取值为 SO₂ 的 1/4。

如表 9 所示，春秋两季的湿沉降速率较为相近，而由于降水量的关系，夏季的是沉积速率远远高于另外三个季节，冬季则小于另外三个季节，SO₂ 的湿沉降率是春秋两季的近 5 倍。PM₁₀ 的湿沉降率则是春秋季的 1.5 倍，冬季的 9 倍。对不同污染物而言，SO₂ 的湿沉降率最高，其在夏季最为明显，SO₂ 的沉

降率远远高于其他三种污染物。PM_{2.5}和PM₁₀受季节因素影响则相对较小。

Table 9. Dry deposition of pollutants in Guiyang city in different seasons (10⁴ t·a⁻¹)
表 9. 贵阳市各季节各污染物干沉降量(10⁴ t·a⁻¹)

季节	春	夏	秋	冬	总计
SO ₂	1.319739	1.319739	1.305394	1.291049	5.23592
NO	0.17881	0.17881	0.176866	0.174923	0.709409
PM ₁₀	1.946792	1.946792	1.925631	1.904471	7.723687
PM _{2.5}	0.551161	0.551161	0.54517	0.539179	2.186672

4.4. 季节化学清除项

在对化学清除项的讨论中,我们首先对颗粒物进行排除,只需对SO₂和NO₂两项进行求解,计算公式为:

$$Q_{a4} = a_i \times c_s S_i \times 0.639 \times \frac{H_i}{T_{1/2}} \quad (27)$$

式(27)中, a_i为各季节对应系数, H_i为研究区的不同季节大气的混合层高度,单位为 m。T_{1/2}为污染物半衰期,而SO₂的半衰期为10⁵s。NO₂的半衰期为7.2 × 10⁵ s。计算结果如表10所示,SO₂的化学清除项要比NO₂大的多,另外,混合层高度作为同一地区比较的主要影响因素,导致了春季的化学清除项是同年中最高的,而冬季则是最低的。并且季节变化上NO₂相较SO₂的变化趋势要小得多。

Table 10. Chemical removal items of pollutants in Guiyang City in different seasons (10⁴ t·a⁻¹)
表 10. 贵阳市各季节各污染物化学清除项(10⁴ t·a⁻¹)

季节	春	夏	秋	冬	总计
SO ₂	1.549286	1.385443	1.344168	1.213899	5.492796
NO ₂	0.145772	0.130356	0.126472	0.114215	0.516814

4.5. 年环境容量汇总及对比

将所有的四种清除项进行汇总,得到各个季节各污染物的大气环境容量,结果如表11所示。通过对不同污染物进行对比发现,春夏秋三季,污染物以湿沉降为主要清除途径,冬季则以传输扩散项为主要传播途径。并且二氧化硫的年环境容量要高于其他三项,PM₁₀次之,二氧化氮最低。对不同季节而言,二氧化硫、PM₁₀和PM_{2.5}的夏季清除量要大幅高于其他季节,尤其是高于冬季。而二氧化氮的季节环境容量的变化幅度则比其他三种污染物要小。

Table 11. Total atmospheric environmental capacity of each season in the study area (10⁴ t·a⁻¹)
表 11. 研究区各季节大气环境总容量(10⁴ t·a⁻¹)

污染物	季节	基本环境容量	干沉降量	湿沉降量	化学清除项	总环境容量	年总环境容量
SO ₂	春	3.294357	1.319739	11.37797	1.549286	17.54135	100.0992
	夏	2.690921	1.319739	53.97236	1.385443	59.36846	
	秋	2.829021	1.305394	11.76598	1.344168	17.24456	
	冬	2.595255	1.291049	0.844672	1.213899	5.944875	

Continued

NO ₂	春	1.358658	0.17881	1.926984	0.145772	3.610223	19.1353
	夏	1.109789	0.17881	9.140815	0.130356	10.55977	
	秋	1.166744	0.176866	1.992698	0.126472	3.46278	
	冬	1.070334	0.174923	0.143055	0.114215	1.502527	
PM ₁₀	春	3.319929	1.946792	9.538086		14.80481	54.92909
	夏	2.711808	1.946792	15.7256	-	20.3842	
	秋	2.85098	1.925632	8.734963		13.51157	
	冬	2.6154	1.904471	1.708637		6.228508	
PM _{2.5}	春	1.817011	0.551161	4.752617		7.120789	26.27179
	夏	1.484184	0.551161	7.835719		9.871064	
	秋	1.560353	0.54517	4.352439	-	6.457962	
	冬	1.431419	0.539179	0.851376		2.821975	

选取贵阳市大气环境容量与成都市环境容量进行对比,成都的大气环境容量数据则引自王涵瑾的《基于修正 A 值法核算成都市季节大气环境容量》[2]。将各自的年总环境容量分别除以两个城市的研究区面积,得到面积平均下的大气环境容量。如表 12 所示,贵阳的各项污染物容量都高于成都,尤其是 SO₂ 和 PM_{2.5} 的大气环境面积平均容量,贵阳是成都的 1.5 倍,两研究区大气环境容量的主要差异原因在于通风量和降雨量的不同,以及一二类功能区在研究区所占比例不同。

Table 12. Average atmospheric environmental capacity of Guiyang area (10⁴ t·a⁻¹)

表 12. 贵阳市面积平均大气环境容量(10⁴ t·a⁻¹)

污染物	SO ₂	NO ₂	PM ₁₀	PM _{2.5}
成都	77.97211	21.16987	52.76792	24.255424
贵阳	124.5945	23.8179	68.37079	32.700758

5. 结论与讨论

本文选取贵阳市作为研究对象,利用 2015 年 3 月~2016 年 2 月一整年的地面基本气象要素资料,利用 A 值法对贵阳市 PM_{2.5}、PM₁₀、SO₂ 和 NO₂ 等污染物日和季节尺度的大气环境容量进行核算,结果如下:

1) 贵阳市春夏秋冬的 A 值分别为 0.747205、0.610338、0.641661 和 0.588639。由混合层高度的日变化可知,其峰值多出现在下午。对于季节性而言,混合层平均厚度在春季达到最大值。

2) 四项污染因子的基本环境容量变化趋势较为相近。其中,春季容量最大,冬季最小。对于四项污染因子的干沉降项而言,干沉降项季节性差异较小。湿沉降项是造成各污染物总容量差异的主要原因,SO₂ 在夏季有着极高的湿沉降值。作为湿沉降的主导因子,降雨量在夏季最大,对应湿沉降值也较大,冬季则因少雨较小。

3) 贵阳市的 SO₂、NO₂、PM₁₀ 和 PM_{2.5} 的年总大气环境容量分别为 100.1、19.1、55.0 和 26.3 (10⁴ t·a⁻¹)。四项污染因子中 SO₂ 的大气环境容量最大,NO₂ 的最小。四项清除项中,湿沉降是最主要的清除方式,而干沉降项和化学清除项最小。

4) 造成贵阳市各个季节大气环境容量差异的主要因素为各季节通风量和湿沉降的时间分布不均匀。而由于降雨量、通风量和一二类功能区所占比例的不同,使得贵阳的大气环境容量较同属西南地区的成都略大。

参考文献

- [1] 王金南, 雷宇, 薛文博, 张伟. 基于 CREP 的国家环境质量改善工程规划与管理: 以《大气污染防治行动计划》为例[J]. 环境工程, 2016, 34(12): 64-68.
- [2] 王涵瑾, 王源程, 倪长健. 基于修正 A 值法核算成都市季节大气环境容量[J]. 环境与可持续发展, 2015, 40(3): 71-74.
- [3] 吴利彬, 周书华, 倪长健, 等. 成都及其周边地区霾时空分布特征研究[J]. 高原山地气象研究, 2014, 34(6): 63-67.
- [4] 欧阳晓光. 大气环境容量 A-P 值法中 A 值的修正算法[J]. 环境科学研究, 2008, 21(1): 37-40.
- [5] Houthuijs, D., Breugelmans, O., Hoek, G., et al. (2001) PM₁₀ and PM_{2.5} Concentrations on Central and East Europe: Results from the CESAR Study. *Atmospheric Environment*, **35**, 2757-2771. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(01\)00123-6](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(01)00123-6)
- [6] Zheng, M., Fang, M., Wang, F., et al. (2000) Characterization of the Solvent Extractable Organic Compounds in PM_{2.5} Aerosols in Hong Kong. *Atmospheric Environment*, **34**, 2691-2702. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(99\)00521-X](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(99)00521-X)
- [7] Ramachandran, R. and Jeeva Gupta, K.S. (1994) Variability of Surface Roughness and Turbulence Intensities at a Coastal Site in India. *Boundary-Layer Meteorology*, **70**, 385-400. <https://doi.org/10.1007/BF00713777>
- [8] Prior, E.J., McDougal, D.S. and Schiess, J.R. (1981) Approach to Forecasting Daily Maximum Ozone Levels in St. Louis. *Environ Science and Technology*, **15**, 430-436. <https://doi.org/10.1021/es00086a006>
- [9] Edgerton, S.A., Bian, X., Doran, J.C., et al. (1999) Particulate Air Pollution in Mexico City a Col Laborative Research Project. *Journal of the Air & Waste Management Association*, **49**, 1221-1229. <https://doi.org/10.1080/10473289.1999.10463915>
- [10] 中华人民共和国大气污染防治法[Z].
- [11] 国家环境保护局. 环境空气质量功能区划分原则与技术方法[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1996.
- [12] 国家环境保护局. GB/T 13201-91 制定地方大气污染物排放标准的技术方法[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 1991.
- [13] 国家环境保护局. 城市大气污染总量控制方法手册[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1991.

知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2164-5485, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: aep@hanspub.org