

柴莹莹,孟晓杰,申璐,等.基于污染源布局规划调整的大气环境承载力研究[J].环境工程技术学报,2021,11(4):657-662.

CAI Y Y, MENG X J, SHEN L, et al. Research on atmospheric environmental carrying capacity based on adjustment of pollution sources layout[J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2021, 11(4): 657-662.

基于污染源布局规划调整的大气环境承载力研究

柴莹莹¹, 孟晓杰^{1*}, 申璐¹, 薛明明¹, 廖凤娟²

1. 中国环境科学研究院生态研究所
2. 中国环境科学研究院环境管理研究中心

摘要 针对环境质量背景值较好的区域,以国家环境质量标准控制目标计算的大气环境承载力较大,规划污染源允许排放量过高的问题,提出建立大气环境承载力线性规划模型,以规划污染源的预测浓度作为控制目标,结合区域污染源布局优化进行大气环境承载力估算的方法,并以平顶山市某产业园区为例进行验证。结果表明:在国家二级标准、一级标准及一级标准50%的控制目标下,SO₂大气环境承载力约为规划污染源排放量的7~275倍,NO₂为38~129倍;将规划污染源的预测值作为环境质量控制目标,通过污染源布局优化,SO₂、NO₂的允许排放量为规划污染源排放量的1.23和1.42倍,更接近实际规划需求。

关键词 大气环境承载力;线性规划法;产业园区;污染源布局;控制目标

中图分类号:X32 文章编号:1674-991X(2021)04-0657-06 doi:10.12153/j.issn.1674-991X.20200200

Research on atmospheric environmental carrying capacity based on adjustment of pollution sources layout

CHAI Yingying¹, MENG Xiaojie^{1*}, SHEN Lu¹, XUE Mingming¹, LIAO Fengjuan²

1. Institute of Ecology, Chinese Research Academy of Environmental Sciences
2. Environmental Management Research Center, Chinese Research Academy of Environmental Sciences

Abstract For the areas with better environmental quality background values, the atmospheric environmental carrying capacity calculated based on the national environmental quality standard was relatively large, and the allowable emission of planned pollution was excessively high. In order to solve the above problems, a linear programming model for atmospheric environmental carrying capacity was proposed. Regional atmospheric environmental carrying capacity was estimated with the predicted concentrations of planned pollution sources as the control targets, combined with pollution sources layout optimization. Then, an industrial park in Pingdingshan City was taken as an example for verification. The results showed that, under the control target of national secondary standards, primary standards and 50% of the primary standards, the atmospheric environmental carrying capacity of SO₂ was about 7 to 275 times emissions of the planned pollution sources, while that of NO₂ was about 38 to 129 times. Taking the predicted values of the planned pollution sources as the environmental quality control targets, through the optimization of pollution sources layout, the allowable emissions of SO₂ and NO₂ were 1.23 and 1.42 times, respectively, of the planned sources emissions, which was closer to the actual planning requirements.

Key words atmospheric environmental carrying capacity; linear programming method; industrial park; pollution sources layout; control target

收稿日期:2020-08-13

基金项目:国家重点研发计划项目(2016YFC050350402)

作者简介:柴莹莹(1987—),女,工程师,硕士,主要从事环境承载力研究,592952458@qq.com

* 责任作者:孟晓杰(1975—),女,正高级工程师,博士,主要从事大气环境承载力研究,690785448@qq.com

当前,大气环境质量状况已经成为公众关注的焦点,工业园区由于大气污染物排放量巨大且较为集中,一直是大气污染防治的重中之重。据统计,“十二五”期间,中国工业园区实现工业总产值占本地区工业总产值的 50% 以上,工业企业入园率达到 40% 左右。工业园区企业的集中分布在引导产业聚集、促进科技创新中发挥了重要作用,但其发展过程中带来的污染物问题也日益受到重视,特别是大气污染物排放问题。当污染物排放量超出大气环境承载力时,就会产生环境污染,对周边区域的生产生活造成不良影响。因此,准确把握工业园区大气环境容量,对控制园区内企业污染物排放,加强日常监管具有重要现实意义。

目前,常用的工业园区大气环境容量估算方法有指标体系法^[14]、A-P 值法^[5-6]、模拟法^[7-9]、线性规划法^[10-12]、综合法^[13-15]等。这些方法各有所长,也均有其局限性。A-P 值法发展较早,使用较为简单,但误差较大,无法考虑污染物干湿沉积及化学转化,不能充分反映污染源排放和控制点污染物浓度的关联,无法体现污染源空间分布对承载力的影响^[16]。模拟法输入要求高,计算量大,对污染源源强的准确性要求较高,否则计算结果会有较大偏差^[11]。线性规划法通过建立“排放源—受体”之间的响应关系,以区域污染物排放量最大化为目标,通过调整各排放源的排放量,实现区域环境容量资源配置,最终计算出区域大气环境容量^[17]。由于线性规划法可以将大气环境容量与大气污染物总量控制结合起来,精度较高,对管理支撑更有针对性,因此得到了广泛应用^[18]。

Teller^[19]于 1968 年首次 in 环境空气质量管理中引入线性规划模型。1994 年, Teng 等^[20]开发了一套多属性规划方法以解决空气质量改善策略的优选问题。国内学者在利用线性规划法解决大气环境承载力问题方面的研究起步较晚。1991 年,原国家环境保护局与中国环境科学研究院共同编制完成了《城市大气污染总量控制方法手册》^[21],手册将线性规划法作为总量控制规划优化方法,通过线性规划法制定切实可行又经济有效的大气环境规划。1995 年,王建平等^[22]采用线性规划法计算了昌吉市大气环境承载力,该研究将控制点环境目标设置为所属环境功能区的国家标准浓度限值,传递系数则采用高斯扩散模式计算得到,为制定控制区域大气污染物排放总量提供了依据。1996 年,王民良

等^[23]在研究污染源源强优化时增加了技术经济限制,规定污染源源强增幅不超过 1 倍,同时分析了不同控制目标下的允许排放量。同年,张淑娟等^[24]在其研究中推荐了控制点的选取原则,以城市多源模型计算的年日均浓度最大值点为控制点,其余采样点在各功能区均匀布置,此外,为了避免单源过于集中而造成区域浓度过高,提出源强削减模型,对单源采用 P 值控制,同时保证在规划实施中确定的污染源削减量尽可能小。2002 年,李凤娟^[25]对线性规划法最大排放量模型进行了进一步改进,增加面源、线源分担率的约束,避免对面源、线源削减过度。2005 年,王金南等^[17]对 4 种线性规划法允许排放量的设置方法进行了比较,分析各种方法的优缺点,并给出推荐方法。

线性规划法能较好地考虑污染源分布及污染物在环境中的迁移转化,并以传递系数的形式体现在模型中,适用于即将进行技术改造、规划调整的现有开发区。目前,研究者常用污染物国家环境质量限值作为环境控制目标进行大气环境承载力计算,对于环境质量本底较好的区域,该方法得出的大气环境承载力较大,依此推算出的污染源允许排放量过高,不适用于在实际中指导规划调整。2017 年,生态环境部提出“一个区域的环境质量只能改善不能恶化,这是我们的底线”。为了满足新形势下的环保要求,笔者提出将规划污染源在控制点处的预测浓度作为环境质量控制目标,通过区域污染源布局优化,提高规划污染源允许排放量,同时保证规划调整前后环境质量不恶化。以平顶山市某产业园区为例,建立大气环境承载力评价模型进行验证,以期为产业园区一次污染物允许排放量的计算提供经验,为产业园区规划调整提供参考。

1 数据来源与研究方法

1.1 数据来源

1.1.1 污染源

平顶山市某产业园区位于河南省平顶山市叶县东北方向 6 km 处的龚店乡。规划总面积为 17.4 km²,现有 SO₂、NO₂排放源 5 个,均为点源。根据产业园区规划中的近期规划重点项目清单来确定大气污染源强,涉及 SO₂、NO₂规划污染源共 8 个,其中点源 6 个,面源 2 个,产业园区平面布置见图 1。

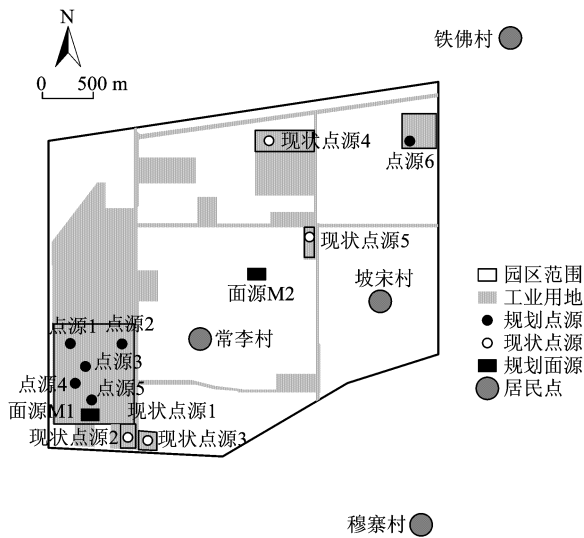


图1 产业园区污染源分布

Fig. 1 Distribution of pollution sources in the industrial park

1.1.2 气象资料

根据气象资料统计,研究区域年平均风速为 1.8 m/s,常年主导风向为东北风,频率为 11%,多年平均气温为 15.3 ℃,年平均相对湿度为 70%。地面气象资料选取叶县气象站 2016 年全年逐日逐时气象数据,气象站与产业园区直线距离约 12 km。高空气象数据采用生态环境部评估中心的模拟数据,模拟网格点为 113.325°E,33.731 5°N,海拔高度为 92 m,距产业园区直线距离约 11.6 km。

1.2 线性规划模型

线性规划模型选取各污染源允许排放量为决策变量,目标函数为各污染源污染物最大排放量,约束条件包括各控制点污染物浓度标准要求、各污染源的允许排放量要求^[10]。假定研究区域内共有大气污染源 m 个,对应的排放量分别为 q_1, q_2, \dots, q_m ,选定 n 个控制点,计算方法如下:

$$\text{目标函数为: } \max F(Q) = \sum_{i=1}^m D_i^T q_i$$

约束条件为:

$$\sum_{i=1}^m a_{ji} q_i \leq C_{Sj} - C_{Aj}, j=1, 2, \dots, n$$

即

$$\begin{cases} a_{11} q_1 + \dots + a_{1m} q_m \leq C_{S1} - C_{A1} \\ \vdots \\ a_{n1} q_1 + \dots + a_{nm} q_m \leq C_{Sn} - C_{An} \\ q_i \geq 0 \end{cases}$$

式中: m 为污染源个数; n 为环境质量控制点个数; D_i 为第 i 个污染源的价值(权重)系数; q_i 为第 i 个污染源的排放量,kg/h; a_{ji} 为第 i 个污染源污染物对第 j 个环境质量控制点的浓度贡献,即传递系数, 10^{-6} h/m^3 ; C_{Sj} 为第 j 个环境质量控制点的控制目标, mg/m^3 ; C_{Aj} 为第 j 个环境质量控制点的背景浓度, mg/m^3 。

1.3 模型参数选取

1.3.1 污染源源强

选取总量控制因子 SO_2, NO_2 为大气环境承载力计算因子,大气污染物排放量根据产业园区规划重点项目清单确定,如表 1 所示。

表1 产业园区 SO_2 及 NO_2 源排放清单

Table 1 Source emission inventory of SO_2 and NO_2 in industrial park

| 污染源 | 排气筒高度/m | 排放量/(kg/h) | |
|---------------------|---------|---------------|---------------|
| | | SO_2 | NO_2 |
| 点源 1 | 120 | 25.00 | 36.00 |
| 点源 2 | 30 | 72.00 | 4.32 |
| 点源 3 | 120 | 37.00 | 102.00 |
| 点源 4 | 60 | 5.40 | 27.00 |
| 点源 5 | 25 | 0.09 | 0.82 |
| 点源 6 | 80 | 8.54 | 33.57 |
| 面源 M1 ¹⁾ | 15 | 3.24 | |
| 面源 M2 | 15 | 0.29 | 0.64 |

1) 面源 M1 为某硫酸装置,不产生 NO_2 。

1.3.2 控制点

控制点的设置目的是检验环境质量,总量控制的环境目标反映在控制点的控制浓度上。控制点的选取应对控制区内的大气环境质量具有代表性,根据线性规划法数学求解的要求,控制点的数目不能多于污染源总数目^[24]。综合考虑选取产业园区内及周边 4 个居民点(铁佛村、常李村、坡宋村、穆寨村)作为控制点。

1.3.3 传递系数

传递系数即当污染源位置及其他参数确定的情况下,单位污染源排放量在控制点处的浓度贡献值。本研究中 a_{ji} 采用 AERMOND 扩散模式计算,以边长为 10 km 的矩形为计算范围,以步长 200 m 划定网格。各源的 SO_2 和 NO_2 的 a_{ji} 见表 2。

表 2 SO₂和 NO₂的传递系数Table 2 Transmission coefficient of SO₂ and NO₂h/m³

| 污染源 | SO ₂ | | | | NO ₂ | | | |
|-------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| | 控制点 1 | 控制点 2 | 控制点 3 | 控制点 4 | 控制点 1 | 控制点 2 | 控制点 3 | 控制点 4 |
| 点源 1 | 7.94×10^{-6} | 1.87×10^{-6} | 1.05×10^{-6} | 5.49×10^{-7} | 7.95×10^{-7} | 1.87×10^{-6} | 1.05×10^{-6} | 5.49×10^{-7} |
| 点源 2 | 5.87×10^{-7} | 9.07×10^{-7} | 4.22×10^{-7} | 3.99×10^{-7} | 4.54×10^{-6} | 1.77×10^{-5} | 1.39×10^{-5} | 1.09×10^{-6} |
| 点源 3 | 1.99×10^{-6} | 7.00×10^{-6} | 8.57×10^{-6} | 1.32×10^{-6} | 5.87×10^{-7} | 9.07×10^{-7} | 4.22×10^{-7} | 3.99×10^{-7} |
| 点源 4 | 2.41×10^{-6} | 4.67×10^{-6} | 1.08×10^{-5} | 1.35×10^{-6} | 2.41×10^{-6} | 4.67×10^{-6} | 1.08×10^{-5} | 1.35×10^{-6} |
| 点源 5 | 8.78×10^{-6} | 2.19×10^{-5} | 5.79×10^{-5} | 2.11×10^{-6} | 8.73×10^{-6} | 2.19×10^{-5} | 5.79×10^{-5} | 2.09×10^{-6} |
| 点源 6 | 1.75×10^{-6} | 6.94×10^{-6} | 5.80×10^{-6} | 2.35×10^{-6} | 1.75×10^{-6} | 6.94×10^{-6} | 5.80×10^{-6} | 2.35×10^{-6} |
| 面源 M1 | 5.72×10^{-5} | 1.34×10^{-4} | 1.49×10^{-4} | 2.27×10^{-5} | | | | |
| 面源 M2 | 8.37×10^{-6} | 1.58×10^{-4} | 3.19×10^{-4} | 4.95×10^{-5} | 8.39×10^{-6} | 1.58×10^{-4} | 3.19×10^{-4} | 4.95×10^{-5} |

2 结果与分析

2.1 国家环境质量标准控制下的大气环境承载力

分别选取 GB 3095—2012《环境空气质量标准》中 SO₂、NO₂的二级标准、一级标准以及一级标准的 50% 作为控制目标, $F(Q)$ 取最大值时, 各污染源的污染物大气环境承载力见表 3, 不同控制目标下允许排放量与规划污染源排放量的倍数关系见图 2。

由表 3 及图 2 可见, SO₂在国家二级标准、一级标准及一级标准 50% 的控制目标下大气环境承载力分别为 36.44 万、8.60 万、0.88 万 t/a, 约为规划污染源排放量的 275、65 和 7 倍; NO₂在国家二级标准、一级标准及一级标准 50% 的控制目标下大气环境承载力分别为 23.03 万、23.03 万、6.87 万 t/a, 约为规划污染源排放量的 129、129 和 38 倍。可见, 区域大气环境承载力较大, 以此设置污染源排放量容易导致排放量过大, 不符合实际情况。

表 3 不同环境质量控制目标下 SO₂、NO₂大气环境承载力Table 3 Atmospheric environmental carrying capacity of SO₂ and NO₂ under different environmental quality control standards

t/a

| 污染源 | 二级标准 | | 一级标准 | | 一级标准 50% | |
|-------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| | SO ₂ | NO ₂ | SO ₂ | NO ₂ | SO ₂ | NO ₂ |
| 点源 1 | 32 251.69 | 29 019.25 | 673.47 | 29 019.25 | 883.01 | 20 044.63 |
| 点源 2 | 315 447.60 | 452.30 | 80 567.47 | 452.30 | 6 668.81 | 26.41 |
| 点源 3 | 259.30 | 197 029.92 | 270.22 | 197 029.92 | 162.34 | 48 214.16 |
| 点源 4 | 9 650.02 | 3 507.94 | 3 756.81 | 3 507.94 | 326.10 | 93.93 |
| 点源 5 | 284.49 | 119.07 | 111.76 | 119.07 | 0.49 | 145.21 |
| 点源 6 | 6 413.11 | 147.09 | 629.55 | 147.09 | 715.02 | 147.09 |
| 面源 M1 | 63.74 | | 23.29 | | 14.41 | |
| 面源 M2 | 18.52 | 7.14 | 1.27 | 7.14 | 1.58 | 7.61 |
| 合计 | 364 388.48 | 230 282.70 | 86 033.85 | 230 282.70 | 8 771.75 | 68 679.06 |

注: SO₂一级标准限值为 0.02 mg/m³, 二级标准限值为 0.06 mg/m³; NO₂一级、二级标准限值均为 0.04 mg/m³。

2.2 基于规划调整的大气环境承载力

根据 2017 年 9 月 29 日—10 月 5 日环境空气质量监测数据, 铁佛寺村、常李村 SO₂最大日均浓度分别为 0.034、0.037 mg/m³ (二级标准限值为 0.15 mg/m³), NO₂最大日均浓度分别为 0.045、0.047 mg/m³ (二级标准限值为 0.08 mg/m³), 均满足国家二级标准要求, 本研究区域环境质量背景值较好。

在实际规划中, 污染源排放量不可能设置为允许排放量的最大值。为了寻找污染源允许排放量的合理值, 以规划污染源在控制点处的预测浓度作为环境质量控制目标, 即采用大气污染物扩散模拟软件模拟近期规划污染源在控制点处的浓度贡献值, 与环境背景值叠加, 将叠加后的浓度作为控制目标, 近期规划污染源在控制点处的浓度贡献值见表 4。

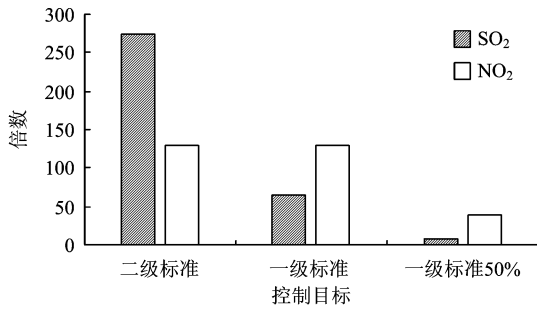


图2 不同控制目标下允许排放量与规划源排放量的倍数关系

Fig. 2 Multiple relationship between allowable emissions and planned sources emissions under different control targets

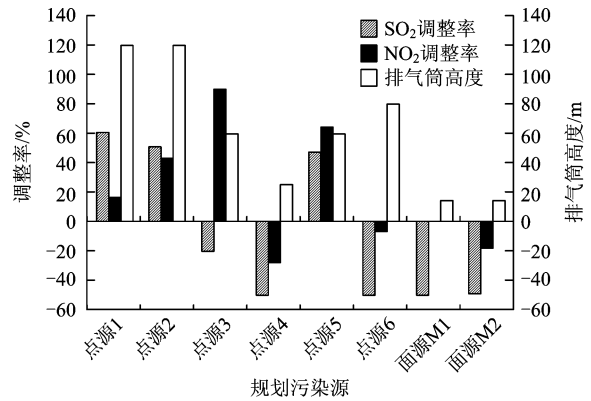


图3 各规划污染源排放量调整率

Fig. 3 Emission adjustment rate of each planned source

在该控制目标下对规划污染源进行布局调整,可实现规划污染源排放量最大化配置的同时,保持各控制点浓度为规划污染源预测浓度,即规划调整前后环境质量不恶化。各源最大允许排放量限值采用生态环境部环境规划院^[26]推荐的方法确定,即允许排放量选用排放标准计算的排放量与 A-P 值法计算的允许排放量中的较低数值;最大允许削减量则根据现有减排技术经济可行性结合园区管理部门的管理要求确定。 $F(Q)$ 取最大值时,各规划污染源排放量调整率见图3,各污染源的污染物最大允许排放量见表5。

表4 近期规划污染源在控制点处的浓度贡献值

Table 4 Concentration contribution values of the recent planned pollution sources at the control points mg/m^3

| 控制点 | SO ₂ | NO ₂ |
|-----|------------------------|------------------------|
| 铁佛村 | 8.286×10^{-3} | 1.025×10^{-2} |
| 常李村 | 8.706×10^{-3} | 1.072×10^{-2} |
| 坡宋村 | 8.777×10^{-3} | 1.088×10^{-2} |
| 穆寨村 | 8.163×10^{-3} | 1.021×10^{-2} |

表5 各污染物大气环境承载力调整前后变化

Table 5 Variation of atmospheric environmental capacity of various pollutants after adjustment t/a

| 污染源 | 调整前 | | 调整后 | |
|------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| | SO ₂ | NO ₂ | SO ₂ | NO ₂ |
| 点源1 | 219.00 | 315.36 | 352.82 | 368.72 |
| 点源2 | 630.72 | 37.84 | 955.19 | 54.24 |
| 点源3 | 324.12 | 657.00 | 259.87 | 1248.21 |
| 点源4 | 47.30 | 131.40 | 23.66 | 95.10 |
| 点源5 | 0.79 | 7.18 | 1.16 | 11.82 |
| 点源6 | 74.81 | 294.07 | 37.59 | 276.17 |
| 面源M1 | 28.38 | | 14.26 | |
| 面源M2 | 2.54 | 5.61 | 1.28 | 4.62 |
| 合计 | 1327.67 | 1448.47 | 1645.83 | 2058.87 |

由图3可见,各规划污染源排放量调整率为-50%~90%,排放量调整率与排气筒高度具有一定相关性,SO₂、NO₂相关系数分别为0.78、0.35,排气筒高度较高的点源允许排放量可适当增加,排放高度较低的面源宜进行削减。根据表5可以看出,通过对各源排放量的优化调整,可提高区域大气环境承载力,调整后各污染物的大气环境承载力,SO₂为1645.83 t/a、NO₂为2058.87 t/a,相对调整前分别增加了23.96%和42.14%。在规划污染源调整前后环境质量不变的前提下,通过线性规划法调整污染源布局,可在一定程度上提升这2种典型大气污染物的区域大气环境承载力,以此为基础进行的产业布局优化调整更贴合实际情况。

3 结论

(1)以国家环境空气质量标准值为控制目标计算的大气环境承载力较大,根据案例计算结果,在国家二级标准、一级标准及一级标准50%的控制目标下SO₂大气环境承载力约为规划污染源排放量的7~275倍,NO₂为38~129倍,污染源允许排放量过高,不符合产业园区污染源规划调整的实际要求。

(2)以规划污染源的预测浓度作为环境质量控制目标,可有效保证规划调整前后大气环境质量不降低,同时通过污染源空间布局优化调整可提升区域大气环境承载力。经线性规划法优化调整后,SO₂和NO₂允许排放量分别增加了23.96%和42.14%,以此为基础进行的产业布局优化调整更贴合实际情况。

参考文献

[1] 郑健,关宁,杨成梅,等.干旱区绿洲城市大气环境承载力分析及预测:以乌鲁木齐市为例[J].西北师范大学学报(自然科学版)

- 科学版),2015(6):110-114.
- ZHANG J, GUAN N, YANG C M, et al. Urban oasis environmental carrying capacity analysis and prediction of atmospheric arid zone; a case of Urumqi City [J]. Journal of Northwest University(Natural Science),2015(6):110-114.
- [2] 张静,蒋洪强,卢亚灵. 一种新的城市群大气环境承载力评价方法及应用[J]. 中国环境监测,2013,29(5):26-31.
- ZHANG J, JIANG H Q, LU Y L. Evaluation of atmosphere environmental carrying capacities of urban agglomerations in optimized exploitation areas [J]. Environmental Monitoring in China,2013,29(5):26-31.
- [3] LU Y, XU H W, WANG Y X, et al. Evaluation of water environmental carrying capacity of city in Huaihe River Basin based on the AHP method; a case in Huai'an City [J]. Water Resources and Industry,2017,18:71-77.
- [4] PAMUNGKAS A, SULISTYONO A, SISWANTO V K. Poteran carrying capacity for small island development [J]. Procedia-Social and Behavioral Sciences,2016,227:761-769.
- [5] 王勤耕,吴跃明,李宗恺. 一种改进的 A-P 值控制法[J]. 环境科学学报,1997,17(3):278-283.
- WANG Q G, WU Y M, LI Z K. A improved A-P method[J]. Acta Scientiae Circumstantias,1997,17(3):278-283.
- [6] 覃扬颂,支国强,李田富,等. 基于可开发利用土地的区域大气环境承载力研究[J]. 环境科学导刊,2016,35(增刊1):164-167.
- QIN Y S, ZHI G Q, LI T F, et al. Study on regional atmospheric environmental carrying capacity based on development and utilization of land [J]. Environmental Science Survey,2016,35(Suppl 1):164-167.
- [7] WANG F, CHEN D S, CHENG S Y, et al. Identification of regional atmospheric PM₁₀ transport pathways using HYSPLIT, MM5-CMAQ and synoptic pressure pattern analysis [J]. Environmental Modelling & Software,2010,25(8):927-934.
- [8] ZHAO Y X, ZHANG J H, WU W G, et al. Assessing environmental carrying capacity of sea cage culture in the Yellow Sea, China, using a coupled diffusion model [J]. Aquaculture, 2020,520:735009.
- [9] ZHENG P, CUI J Y, HU L, et al. Effect of long-term operation of a subsurface wastewater infiltration system (SWIS) based on the limiting value of environmental carrying capacity [J]. Ecological Engineering,2016,92:190-198.
- [10] 戴轩宇. 线性规划法在区域大气环境容量计算中的应用:以江苏省张家港市为例[D]. 南京:南京大学,2008.
- [11] 腊孟珂,林立清. 线性规划法在产业园区大气环境容量中的应用研究:以苏北某工业园区为例[J]. 科技经济与资源环境,2017(20):148-149.
- [12] LIAO E H, JIANG Y W, YAN X H, et al. Allocation of marine environmental carrying capacity in the Xiamen Bay [J]. Marine Pollution Bulletin,2013,75(1/2):21-27.
- [13] WANG S P, LI K Q, LIANG S K, et al. An integrated method for the control factor identification of resources and environmental carrying capacity in coastal zones; a case study in Qingdao, China [J]. Ocean & Coastal Management,2017,142:90-97.
- [14] 钱跃东,王勤耕. 针对大尺度区域的大气环境容量综合估算方法[J]. 中国环境科学,2011,31(3):504-509.
- QIAN Y D, WANG Q G. An integrated method of atmospheric environmental capacity estimation for large-scale region [J]. China Environmental Science,2011,31(3):504-509.
- [15] 肖杨,毛显强,马根慧,等. 基于 ADMS 和线性规划的区域大气环境容量测算[J]. 环境科学研究,2008,21(3):13-16.
- XIAO Y, MAO X Q, MA G H, et al. Atmospheric environmental capacity study based on ADMS model and linear programming [J]. Research of Environmental Sciences,2008,21(3):13-16.
- [16] 杨俊,艾培顺. 工业园区大气环境容量的计算问题研究[J]. 民营科技,2018(10):96-100.
- [17] 王金南,潘向忠. 线性规划方法在环境容量资源分配中的应用[J]. 环境科学,2005,26(6):195-198.
- WANG J N, PAN X Z. Application of linear programming in the allocation of environmental capacity resources [J]. Environmental Sciences,2005,26(6):195-198.
- [18] 卢聪景,石晓枫. 线性规划法计算工业区大气承载力的探讨[J]. 环境科学与技术,2008,31(10):142-144.
- LU C J, SHI X F. Discussion on linear programming method for calculating atmosphere bearing capacity of an industrial park [J]. Environmental Sciences & Technology,2008,31(10):142-144.
- [19] TELLER A. The use of linear programming to estimate the cost of some alternatives air pollution abatement policies [C]//Process IBM Scientific Computing Symposium, on Water and Air Resource Management. New York,1968:345-353.
- [20] TENG J, TZENG G. Multi-criteria evaluation for strategies of improving and controlling air quality in the super city: a case study of Taipei City [J]. Journal of Environmental Management, 1994,40:213-229.
- [21] 国家环境保护局,中国环境科学研究院. 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,1991:152-167.
- [22] 王建平,张永福. 线性规划在昌吉市大气总量控制中的应用 [J]. 新疆环境保护,1995,17(2):20-23.
- [23] 王民良,曹健,乔美芳. 上海市大气环境承载力研究 [J]. 上海环境科学,1996,15(4):16-20.
- WANG M L, CAO J, QIAO M F. Study atmospheric environmental loading capacity in Shanghai [J]. Shanghai Environmental Sciences,1996,15(4):16-20.
- [24] 张淑娟,李雁,余冠明. 线性规划方法在城市大气污染物排放总量控制中的应用 [J]. 重庆环境科学,1996,18(4):29-32.
- ZHANG S J, LI Y, YU G M. Application of linear programming method in urban total atmospheric emission control [J]. Chongqing Environmental Science,1996,18(4):29-32.
- [25] 李凤娟. 线性规划在大气污染物总量控制中的应用研究 [J]. 内蒙古环境保护,2002,14(3):15-16.
- LI F J. The application of linear planning on the air pollutant total-amount control [J]. Inner Mongolia Environmental Protection,2002,14(3):15-16.
- [26] 中国环境规划院. 城市大气环境容量测算技术指南(试用) [M]. 北京:中国环境科学出版社,2004:152-167. □