

大气环境资源管理：一个基本框架

蔡银寅

(南京信息工程大学大气环境经济研究院, 南京 210044)

摘要: 大气环境资源管理的核心任务是根据经济发展状况制定合适的大气污染控制目标, 最大限度地利用大气环境的自然特征, 实现对大气环境资源的时空优化配置, 减少大气污染防治成本。平衡排放法是大环境资源管理的基本方法, 针对大气环境的初始状态建立模型, 将大气环境的自然特征和污染物排放看作是两个独立的变量, 通过对大气自然净化能力的精细统计, 估算污染物平衡排放强度, 将大气污染控制目标转换为污染物排放控制目标, 为大气污染防治的分级管理提供数据支撑。

关键词: 大气环境资源, 分级管理, 平衡排放法

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2020.04.005

A Basic Framework on Management of the Atmospheric Environmental Resources

Cai Yinyin

(Institute of Atmospheric Environmental Economics, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044)

Abstract: The targets of air pollution control should be taken the stage of economic development into account, which is the central task of the atmospheric environmental resources management. The optimal allocation on time and space of atmospheric environmental resources by maximizing weather use can reduce the expenditure on air pollution control. The basic approach to management of atmospheric environmental resources is method of pollutant equilibrium emission. In this paper, the initial state of atmospheric environment before the polluted, atmospheric environment and pollutant emission are considered as independent variable. Detailed statistics on Air Self-Purification can help to estimate pollutant equilibrium emission, and the goal of air pollution control may be changed into the goal of pollutant emission control by employing this data.

Keywords: atmospheric environmental resources, level-to-level administration, method of equilibrium emission

0 引言

大气环境资源主要是指气象变化所引起的大气污染物清除能力, 即一个地区的大气环境特征所决定的一个时间周期内所能清除污染物的最大量, 以及清除能力的时间特征。当人类活动的污染物排放量加上自然排放量, 超出大气环境的最小清除能力时, 清洁大气环境不能全时供应, 经济学上定义, 大气环境具备了稀缺性, 开始变成一种资源^[1]。大气环境资源虽然由自然条件决定, 但很大程度是人类活动发展到某个阶段产生的经济产品^[2]。在人类历史的初级阶段, 污染物排放很少, 不会对大气环境造成显著的改变, 清洁空气无限供应, 很少有人会关注大气环境的资源属性问题。当然, 随着科技水平的不断提高, 在未来的某个时段, 污染物排放可能恢复到人类社会初级阶段的水平, 那时候, 大气环境也不会存在资源性的问

题。就像石油、天然气、稀土矿产、水能一样, 大气环境作为一种资源, 也是人类社会发展到某个阶段的产物。

多年前就有关于大气环境资源的各种说法, 但由于阐述的角度较分散, 并未形成明确的概念。事实上, 只有明确了大气环境资源的经济学含义, 才能将大气环境的自然属性与经济发展结合起来, 才能构建大气环境资源管理体系和方法。大气污染问题, 也可以说是大气环境资源的消耗问题。大气污染程度并不取决于污染物的绝对排放量, 而取决于大气环境资源的消耗情况。大气污染治理, 实际上应该是大气环境资源管理。明确大气环境资源的概念, 有利于转变目前大气污染以治理为主的思路, 建立以大气环境自然特征为核心的大气环境资源管理为主的思路。

就大气环境自然特征与大气污染之间的关系而言, 相关概念有大气吸收能力、大气环境承载力、大气环境容量、纳污能力等^[3-5]。然而, 无论是大气环境承载力, 还是大气环境容量和纳污能力, 都侧重于

收稿日期: 2020年6月16日; 修回日期: 2020年7月29日
第一作者: 蔡银寅(1985—), Email: yyincai@nuist.edu.cn

对大气环境阈值的描述，即将大气环境特征与大气污染程度混在一起考虑，本质上都是从大气污染结果角度出发，进而估算污染物排放增减对大气污染的边际影响，体现的是余量的概念，而并非是真实的大气环境容量或大气环境承载力^[6-7]。也就是说，当前对大气环境承载力、大气环境容量以及大气纳污能力的研究，并未考虑大气环境的初始（自然）状态，而是直接从大气环境现实状况（已污染状态）出发，评估污染物增减量的影响，并将增减量所反映的结果看作是现实的大气环境承载力或大气的纳污能力，实际上它所代表的更多意义上是剩余的承载力（余量或纳污能力）。这种思维方式在很大程度上混淆了大气污染状况与大气环境自然特征本身的关系，不利于从根本上厘清大气环境异质性的问题。

大气环境的异质性，既包括时间上的异质性，也包括空间上的异质性，对于大气污染而言应该是一个外生变量。大气环境为污染物排放提供空间，大气环境的空间异质性意味着相同的污染物排放强度，在不同的空间排放，造成的结果不同。大气环境的时间异质性则意味着相同的污染物排放强度，在不同的时间排放，造成的结果也不同^[8]。理论上讲，大气环境作为一种资源要注意三个条件：1）异质性，不同地区的大气环境存在差别，不同时间的大气环境也存在差别；2）稀缺性，大气环境必须能够成为某种边际成本不为零的要素；3）可配置性，只有可以实现配置，其作为资源的意义才存在。

具体而言，大气环境资源的三个条件主要是从经济学方面考虑的。通常情况下，只要一种物品具备了稀缺性特征，在经济学上就可以称之为资源。稀缺性包括两层含义：一是有用性；二是有限性。比如，煤炭、石油、天然气可以发电、也可以作为能源和化工原料，然后为人类服务，这是有用性的体现。同时，煤炭、石油、天然气的储量有限、开采条件复杂，不可能无成本获得，这是有限性的体现。进一步考虑，假定获取资源（煤炭、石油、天然气）的成本是明确的，则还要考虑另外一个问题，即如何让资源的有用性发挥到最大，这是经济学研究的核心问题——资源高效配置。至于如何进行高效配置，相关的论述非常多，这里不再做过多说明。

对于大气环境来说，有用性主要体现在对污染物的清除能力方面，有限性则体现在清除能力是有限的，不可能无限大。因为大气环境对污染物的影响能力有限，当污染物排放达到一定强度时，就会超出大气环境的清除能力。这时候，如果继续增加污染物的排放，就不得不承受污染带来的损失（人类健康、动

植物或资产损害），或者以牺牲经济增长的方式控制污染物排放强度来获得理想的大气环境。换句话说，大气环境对污染物的清除能力不能无限供应，使得大气环境成为经济活动的一个投入要素，是有价的，这就是大气环境的稀缺性特征。如何让大气环境资源的有用性发挥到最大，就需要对其进行经济上的安排，即高效配置。假如生产1吨有机溶剂产生的污染物和生产2吨塑料产生的污染物需要消耗的大气环境资源（清除能力）是一样的，在大气环境资源有限的情况下，如何安排有机溶剂和塑料的生产量，则需要考虑在大气环境资源约束条件下的成本收益最大化问题。大气环境资源的配置，实际上也可以看作是污染物清除能力的配置，有限的清除能力，怎样才能达到效用的最大化，自然是优先清除那些经济收益高的污染物。比如道路扬尘与硅酸盐工业相比，自然是优先让硅酸盐工业排放，然后把硅酸盐工业的增加值分出一部分来治理道路扬尘，其经济结果要优于硅酸盐工业的停产限产。所以，大气环境资源的可配置性，主要是指如何最大化地利用大气环境的清除能力。

异质性是大气环境资源一个独有特征，这一特征主要源于大气环境对污染物清除能力的时空变化方面。大气环境资源既不像石油、煤炭、天然气，也不像水和土地，这些资源都有其固定的形态，石油煤炭天然气开采出来，可以运送到最需要的地方进行利用，土地为生产生活提供物理空间，其形态明确。大气环境资源则不同，其随时空不断发生变化。就其时间特征而言，同一个地方，不同时间的大气环境所产生的清除能力不同，所以其大气环境资源量也不同。就其空间特征而言，不同地方，一个周期内（如1 a）大气环境所产生的清除能力的总量不同。因此，大气环境资源的异质性特征，还可以表述为空间特征、实时性和周期性特征。

概括起来，大气环境在现阶段成为一种资源的基本逻辑可以表述为：由于自然地理条件和气象气候特征的差异，不同地区、不同时间的大气环境具有明显的差别。随着人类社会的不断进步，清洁大气环境不能无限供应，边际成本不再为零，有限的大气清洁能力，可以通过时间和空间的优化配置产生更高的经济效益，大气环境成为一种资源。与其他资源相比，大气环境资源具有异质性的特征，使其优化配置过程显得更为复杂。本文从这一思路出发，针对大气环境的初始状态建立模型，将大气环境的自然特征和污染物排放看作是两个独立的变量，通过对大气环境异质性的量化，实现对大气污染结果的解析，并以此构建出一个基于大气环境异质性的的大气环境资源管理基本框架。

1 基本模型

首先，考虑大气环境的初始状态，即没有污染源排放的状态。这种状态包含两层含义：一是大气环境中没有污染物，即大气环境中的成分相对稳定且污染物含量不显著；二是大气环境时刻处于变化中，即流动性（风、湍流）、气压、湿度、温度等大气环境要素的变动性，也就是通常意义上的气象条件变化。然后，再考虑污染物的排放过程，人为的或自然过程都会产生一些不属于大气环境本身的成分并被释放到大气环境中，这个过程便是污染物排放。污染物进入大气环境后，大致经历扩散、搬运、沉降、清除等一系列过程，最后离开大气，回到地面、水体、动植物表面等。

大气污染物一般以气溶胶状态或者气体状态存在。气溶胶类污染物如粉尘、烟、飞灰等，气体状态类污染物则有二氧化硫、一氧化氮、二氧化氮、一氧化碳、气态有机物等。无论是气溶胶类污染物，还是气体状态类污染物，都有源头，这些污染物在被源头释放以后，其初始浓度通常都要高于周围环境几十倍、上百倍甚至数千倍，形成较高的势差。在开放的大气环境下，污染物以分子运动的形式向四周填补空间，单位体积下污染物的含量降低。这个过程可以描述为污染物的扩散过程。污染物的扩散过程，从物理学角度考虑，属于污染物主动运动的过程。而污染物的搬运过程，则是被动的。大气被太阳能量推动，时刻处于非静止状态。污染物在大气环境中，会随着大气运动产生位移，即被搬运。

短期看，污染物在大气环境中处于悬浮状态，不会离开大气环境。扩散作用使大气环境中的污染物浓度降低，搬运作用使污染物离开本地，都起到降低大气污染程度的作用。其实，污染物的悬浮状态是暂时的，除了部分性质特别稳定的污染物以外，一大部分污染物在大气环境中会慢慢达到沉降条件，最终在重力影响下向地面回落。污染物的沉降既有外力作用，也有内力作用。外力作用诸如湍流、降水等；内力作用则通过物理化学过程，使污染物重力增加，从而打破悬浮状态。

对于很多污染物来说，沉降是其进入大气环境后的必然趋势。也就是说，长期看，污染物最终必然会离开大气环境，回到地面。污染物离开大气环境，最终回答地面、水体、植物表面的过程，可以称为清除过程。污染物在重力作用下，可以直接回到地面。一些污染物可能被雨水冲刷，混同水流进入土壤、水体等。也有一些污染物可能会被植物吸附，暂时留在植物表面，最后在雨水冲刷下进入土壤，再被植物吸收

等等。不管如何，污染物最终离开大气环境的过程，可以称为清除过程。

当然，扩散、搬运、沉降和清除过程也是同时进行的，只是活动强度和持续时间不同。例如，污染物进入大气环境后，扩散过程表现的特别突出，搬运、沉降和清除也在进行，但因为其速度相对较慢，就显得有些滞后。所以，大多数时候，人们比较关注污染物的扩散作用，甚至直接将有利的气象条件描述为扩散条件的优劣。事实上，污染物的扩散过程与搬运、沉降和清除过程密切相关，污染物的扩散过程是一个无组织的热运动过程，遵循高浓度向低浓度进行的规律，且浓度差越大，则扩散效应越强。污染物的搬运、沉降和清除，是产生低浓度大气环境的过程，这个过程越快，相应地，污染物的扩散效应也就越强，大气中的污染物浓度也就越低。因此，将这一过程称为大气自然净化过程，而这一过程的快慢，则定义为大气自然净化能力的强弱。在不同的气象条件下，污染物进入大气环境后，所经历的扩散、搬运、沉降、清除一系列过程的时间也不相同。这一过程的时间越短，意味着大气的自然净化能力越强，这一过程时间越长，则意味着大气的自然净化能力越弱。

也就是说，大气自然净化能力的强弱，可以用污染物从进入大气到从大气中被清除所经历的时间表示。时间越长，意味着大气自然净化能力越弱。大气自然净化能力的强弱既是描述大气环境异质性主要变量，又是衡量大气环境资源多寡的核心指标，也是连接大气环境异质性与大气污染的桥梁。

接下来考虑大气污染的产生过程。在这个过程中，需要明确三个含义：第一，大气污染是指大气环境中的污染物达到一定浓度且持续了一定的时间，浓度阈值和持续时间由人为规定，而非自然标准^[9-10]；第二，未进入大气的污染物或已经从大气中清除出去的污染物都不会对大气污染程度产生影响；第三，无论是污染物进入大气的过程，还是污染物从大气中被清除的过程，都是连续发生的，只需要关注污染物在大气环境中的留存量和留存时间，而不需要关注其发生的具体过程。在此基础上，图1给出了大气污染的形成及其与大气自然净化能力之间的关系，纵轴代表大气自然净化能力和污染物排放强度，横轴代表时间。其中，绿色的曲线代表大气自然净化能力的变化趋势，红色的实线代表污染物排放强度的变化。注意，图1是大气污染形成过程的示意图，图中的曲线变化并无实值含义，变量也无单位，时间轴、大气自然净化能力和污染物排放强弱反映的都是其趋势。例如，当大气自然净化能力曲线上升时，就代表此刻大

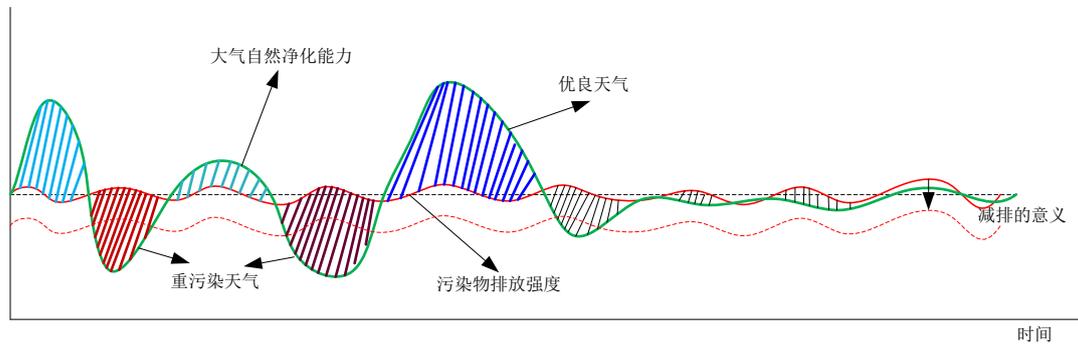


图1 大气污染的形成与大气自然净化能力之间的关系
Fig. 1 The relationship between air pollution and air self-purification

气自然净化能力在变强，反之则变弱。

现实中，污染物的排放过程非常复杂，并且存在一定的波动性，但大致可分为两大类：一是人为源的排放，如工厂、机动车、建筑工地、餐饮油烟、养殖场等；二是自然源的排放，如植被、地面、山体等。这些种类繁多的污染源本身也具有一定的变动性，有时候排放，有时候不排放，有时候排放强度高，有时候排放强度低。比如，行进中的汽车是排放源，而停放的汽车就不是，快速行驶的汽车排放强度低，而堵车时的排放强度就高。总的来说，一个地方的污染物排放强度是一个时刻都在变化的参数。然而，无论是人为源的排放，还是自然源的排放，却又都具有一定的规律性，其中人为源的规律性一般由本地经济发展状况、产业结构、城市建设、居民生产生活习惯等经济要素决定，而自然源的规律性则由本地自然生态特征决定。因此，宏观上，污染物的排放强度又可以看作是一个规律波动的参数。天气变化是一个快速的过程，至少与污染物排放强度的变化相比，天气变化绝对是一个快变过程，这也就意味着大气自然净化能力是一个快变过程。所以，这里假设污染物排放强度是一个低幅波动且慢变的变量（图1中红色曲线），相对于大气自然净化能力的变化幅度而言，污染物排放强度的波动可以忽略。

从图1可以看出，只要污染物排放强度超过了大气自然净化能力的最小值，大气环境中的污染物浓度就会出现一个高值且持续一定的时间。假定大气自然净化能力的波形不变，随着污染物排放强度的提升，大气环境中的污染物浓度的高值就会升高且持续时间也会变长，超过人为规定的阈值时，意味着发生了大气污染。由于大气自然净化能力的波动性，大气污染并不是时时发生，但随着污染物排放强度的提高，发生大气污染的频次和强度都会增加。从这个角度看，结构性减排的意义非常明显，污染物排放强度下降，

大气污染发生频次，污染程度都会下降。

可以将图1看作是一个基本模型，进而考虑大气环境资源的管理问题。图1是一个任意给出的大气自然净化能力波形图。实际上，不同地区的大气自然净化能力波形图都是不同的。正如前面所说，气象条件的变化在很大程度上决定了大气自然净化能力的变化，或者说，每一组气象条件都有一个大气自然净化能力值与之对应。这样，大气自然净化能力的波形也就由一组连续变化的天气过程所决定。反过来说，一次又一次的天气过程，构成了连续变化的大气自然净化能力曲线。不同地方的天气过程不同，大气自然净化能力曲线自然也不同。图2给出了A、B两个地区的大气自然净化能力曲线图，其波动情况本质上由A、B两地的气象气候特征决定。类似地，图2中的大气自然净化能力曲线和污染物排放警戒线也只是示意图，大致反映其趋势。为了以示区分，图2中A、B两地区的大气自然净化能力曲线有明显差别。A地区的大气自然净化能力曲线相对于B地区来说，一直在较高水平波动，虽然有一段时间，B地区的大气自然净化能力超过了A地区，但总体来看，B地区的大气自然净化能力长期弱于A地区。

假定人为规定A、B两个地区的大气污染控制目标相同，比如优良天气都不能低于90%，但A、B两个地区的污染物排放警戒线（控制线）则不同。这意味着，想要在A、B两地获得相同的空气质量，B地的排放强度要远远低于A地。其实，这种情况很容易理解。以江苏为例，2016年苏州的大气污染物排放总量约为徐州的3倍，但空气质量整体优于徐州不少；空气质量最好的盐城，全年的大气污染物排放总量却高于空气质量较差的宿迁、扬州和泰州；空气质量略逊于盐城的南通和连云港两市，全年的大气污染物排放总量也处于全省中等水平。类似地，上海的污染物排放量是成都的近6倍，空气质量却比成都好很多。珠

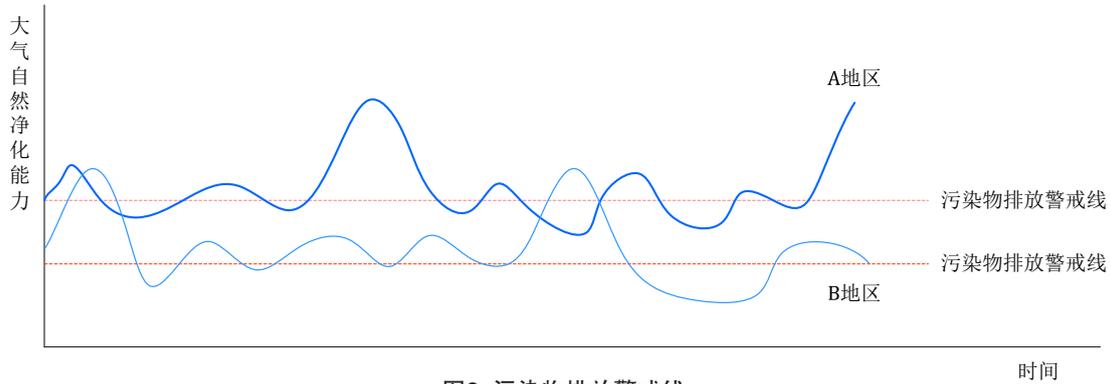


图2 污染物排放警戒线
Fig. 2 Warning line of pollutant emission

三角、长三角和京津冀相比，排放强度并不低，但空气质量却好很多。

由图2至少可以得出两个结论：1) 大气污染程度并不取决于污染物的绝对排放量，而是取决于污染物排放强度与大气自然净化能力之间的关系，或者说是大气环境资源的消耗情况；2) 想要获得相同的空气质量，不同地区的污染物排放强度控制目标不应相同。这两点是进行大气环境资源管理的理论基础。本质上讲，大气污染控制，既不是控制空气质量，也不是控制污染物排放总量，而是根据大气环境的管理目标，协调污染物排放强度与大气自然净化能力之间的关系。短期看，大气污染控制的任務是根据大气自然净化能力对污染物排放进行时间调控；长期看，大气污染控制的任務是根据大气环境资源的多寡对污染物排放进行空间调控。

2 大气环境资源的分级管理

大气污染产生的根本原因是污染物排放强度超越了大气自然净化能力，这一点很容易从图1看出来。同样，污染物排放强度对大气自然净化能力的超越程度也就决定了大气污染的程度。对于现实的大气污染防治工作来说，其核心任务是将空气质量控制在一定水平上，不至于恶化，或者是给空气质量制定一个目标，然后通过减排活动，逐步实现空气质量的持续改善，直到达到既定目标。减少排放对大气污染防治工作的作用非常明显，同样可以从图1看出。在图1中，由于大气自然净化能力曲线是已知的，所以很容易计算出减少排放对空气质量改善的作用。试想一下，如果没有大气自然净化能力的相关信息，纯粹从减少排放角度去估算空气质量的改善程度，则会出现很大的误差。

如前文所述，关于大气环境吸收能力、大气环境承载力、大气环境容量和大气纳污能力的研究，多注重对污染物排放增减量与大气污染程度变化之间的关

系研究，进而推算大气环境还有多少余量或承载力。其实，这种推算方法存在一定的问题。首先，大气自然净化能力的波形变化不是均匀的，由此决定污染物排放强度对于大气自然净化能力超越所带来的大气污染程度的变化也不是均匀的。其次，不同地区的大气自然净化能力曲线不同，污染物排放强度不同，由此产生的大气污染程度也不同，根据边际变化量得出的污染物排放与空气质量改善之间的关系图谱，只适用于当前短时间的大气污染防治工作，不能作为大气污染防治工作的战略依据。

当然，在实际工作中，可以采用减排与空气质量循环对比，依次迭代的方法，使其趋近大气自然净化能力波形的真实情况。这种方式的问题不在于最终结果是否是有偏的，而在于这种方式的执行成本会很高。一方面，污染源类型太多，特征太复杂，很难实现对它们的精确统计，从而导致对减排工作的评估存在较大误差；另一方面，由于气象条件的变动性和气候特征的波动性，在不精确掌握大气环境变化规律的情况下，直接使用空气质量数据结果来判断，误差也非常大。两方面导致看似合理的方法，在执行过程中却十分费力，甚至很多时候还会出现相反的结果。比如，污染物排放有了明显的减少，但空气质量非但没有变好，反而变差了。这种情况在实际工作中比较常见，究其原因，就是上述两个方面：污染排放统计误差和气象变化干扰。因此，仅仅根据污染物排放情况和空气质量情况来制定大气污染防治目标的做法实用性和准确性较差，成本较高，这是当前大气污染防治工作中面临的主要问题。

类似地，图3给出了大气环境资源的分级管理思路（示意图），即根据大气自然净化能力曲线波形，结合经济发展的实际情况，制定大气污染防治目标。在图3中，假定大气自然净化能力曲线已知，可以看出，在大气污染的超重阶段，污染物排放强度对大

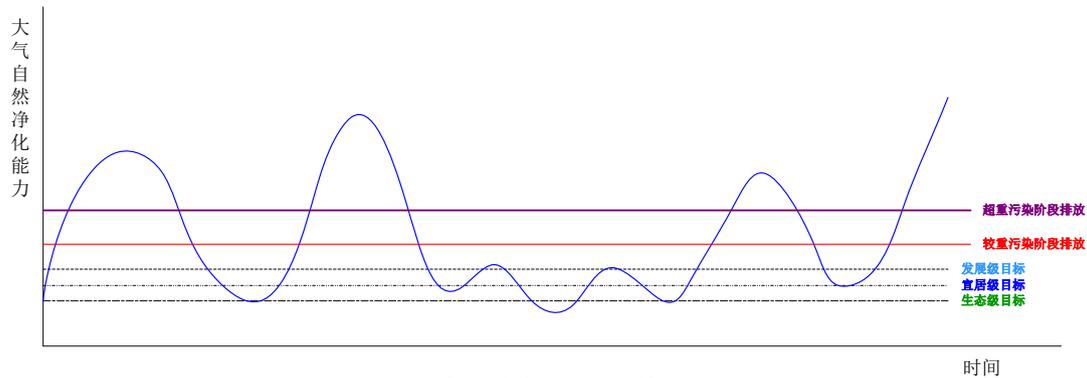


图3 大气环境资源的分级管理思路

Fig. 3 Level-to-level administration on atmospheric environmental resources

气自然净化能力的超越很大。甚至有超过70%以上的时间，污染物排放强度都超过了大气自然净化能力，这个阶段的大气污染很重，重污染天气很多，几乎每天都是污染状态，只不过污染程度不同而已。2015年之前的华北地区，可以大致看作是这个阶段。随着对大气污染防治工作的重视，结构性减排的实施，会迅速将污染物排放强度从超重污染阶段平移至较重污染阶段。污染物排放强度从超重阶段向较重阶段的转变过程，空气质量会出现明显的改变，对于这一过程来说，污染物排放减少的边际效应明显。2016—2018年，大致可以看作是这个阶段，随着污染物排放大幅度削减，我国重点区域的空气质量有了明显的改善。

目前，我国的大部分地区，大气污染状况正处于较重污染和发展级目标之间。在这一阶段，由于污染物的结构性减排已经完成，区域内的强污染源已经减少了很多，空气质量较之前有了明显的改善，污染物排放类型从强源模式转向弱源模式，大气污染防治工作进入深水区，治理的技术难度越来越大。一方面，弱源的减排工作实施难度较大，由于弱源种类繁多，特征极其复杂，很难像结构性减排那样快速推进，只能由浅入深，逐步实施；另一方面，随着强源的减少，自然源排放和大气环境变化对空气质量的影响越来越显著，现有的工作思路已经难以全面解释污染物排放控制与空气质量改善之间的关系。

从现在的工作难点看，图3所示的思路具有一定的战略意义，为未来的大气污染防治工作提供了一个重要的参考依据。首先，回到大气污染问题的本质，大气污染防治工作的核心依据仍然是处理好污染物排放与大气自然净化能力之间的关系。空气质量只是大气污染的结果，其主要是由污染物排放超越大气自然净化能力的程度决定的。所以，无论是哪一个阶段的大气污染，都不应该脱离大气自然净化能力曲线这一因素。其次，大气污染控制应该有明确的目标性，这

个目标性既可以是空气质量改善目标，也可以是污染物减排目标。但无论是哪一个目标，其核心都是一个成本问题，污染物减少排放意味着经济损失，空气质量改善目标的实现，意味着对应经济成本的支付。从某种意义上说，污染权就是发展权，在大气污染防治工作中，需要平衡这种关系。图3所示的大气环境资源分级管理思路，给出了一种经济性的选择。

对于任何一个地区来说，只要给出了大气自然净化能力曲线，就可以制定相应的大气污染防治目标。如果希望空气质量达到生态保护区一级，那么就可以直接根据大气自然净化能力曲线，确定污染物排放强度。反过来说，只要在本地区，将污染物排放强度控制在生态级以下，就可以获得生态级的空气质量。这种方式显得更直接，更有效。当然，对于不同地区来说，由于大气自然净化能力曲线不一样，生态级污染物排放强度的控制目标也不一样，这就是不同地区大气环境差异化管理的基本原理。相应地，根据本地地区的经济社会发展目标，可以有选择地将大气污染防治目标定在生态级、宜居级或发展级。

大气环境资源的分级管理思路具有以下几个优点：第一，大气环境资源分级管理的基本依据是本地大气自然净化能力曲线，也即大气环境资源的多寡程度，它先不考虑本地大气污染的实际状况，而是直接从本地大气环境的自然特征出发，将大气环境看作是一个外生变量；第二，根据大气自然净化能力曲线，可以将大气污染防治目标直接转换成污染物排放控制目标，与依据空气质量现状制定污染物排放控制目标的方式相比，这种方式直接剥离了气象气候因素的干扰；第三，大气污染控制目标应该是一种经济选择，根据本地社会经济发展状况和本地大气环境资源特征，选择适合本地的大气污染控制目标，可以实现差异化化管理；第四，可以将污染物排放总量控制思路，转变成大气环境资源管理思路，控制污染物排放总量

不是目的，控制大气环境资源的消耗量才是目的；第五，大气环境资源的分级管理，为污染物排放的时空优化配置提供了依据。在对比不同地区大气环境资源多寡的基础上，可以根据大气环境资源的消耗情况，进行污染物排放的时间和空间调整，以更充分地利用自然条件，在不减少排放的情况下，改善大气环境状况。

3 大气自然净化能力监测与平衡排放法

大气环境资源管理的重点是大气自然净化能力曲线波形的监测，即一个地区的大气环境异质性特征所决定的大气自然净化能力的连续变化情况。根据基本模型的定义，大气自然净化能力可以用污染物从进入大气环境到被从大气环境中清除所经历的时间表示。如果用 t 表示这个时间，则可以得出如下方程：

$$t = f(x_i, y_i, \dots) \approx F(F, T, P, RH, \dots), \quad (1)$$

其中， f 为 t 的函数形式， x_i 表示影响 t 的一类因子， y_i 表示影响 t 的另一类因子，依次类推。对应于大气环境的自然状况， x_i 可以看作是时刻变化的气象参数， y_i 可以看作是地形地貌和经纬度等固定参数。因此，可以对 f 做一个近似形变， $F(F, T, P, RH, \dots)$ ， F 、 T 、 P 、 RH 分别代表大气环境的风速、气温、大气压强、相对湿度等。同时，可以对位置信息、地形地貌、气象气候特征等进行定参数处理，最终得出一个关于 t 的模型，代入这些参数，便可以得到一个相应的 t 值， t 值越小，说明大气自然净化能力越强，反之则越弱。

实际操作中，计算 t 值的过程相对复杂，且不容易得出准确的结论。为了方便应用，可以对上述方程进行归一化处理，即不计算 t 的具体值，而只对不同状态下的 t 值进行排序，最终得到一个大气自然净化能力的标准排序，这就是大气自然净化能力指数（Air self-purification index, ASPI）模型。

准确地说，ASPI是对超近地面（一般30 m以下）大气自然净化能力强弱的标准化排序，无量纲，用0~100的实数表示。ASPI只体现大气自然净化能力的序数关系，ASPI的值越大，大气的自然净化能力就越强，反之就越弱。ASPI模型的基本原理如下：首先，使用计量模型和大数据分析方法，对气象历史数据、空气质量历史数据和自然地理条件进行经验分析，反复计算查找影响空气质量的主要气象因子，并对其进行贡献排序；其次，将气象因子的贡献转化为大气自然净化过程的时间影响程度；第三，将转化后的气象因子作为自变量引入方程，同时将自然地理条件固化为可变常参数，方程的左边为污染物在此大气环境状态下从进入到被清除过程所经历的时间，右侧为气象

因子和可变常参数；第四，对大气自然净化过程时间进行标准化处理，变成0~100的实数。

ASPI模型是一个经验模型，它大致描述了不同地区、不同时间、不同气象条件下，大气自然净化污染物的能力强弱。利用这一模型，输入气象历史数据、地理信息数据和常参数数据，就可以计算该地区某一时间点的大气自然净化能力强弱，也可以评估某一时间段，该地区的大气自然净化能力的整体情况。因此，利用ASPI模型，可以实现对不同地区大气自然净化能力的实时监测。

严格来说，大气自然净化能力反映的是大气环境清除污染物的能力，但并不能够完全反映大气环境与污染物的作用过程，除了大气环境对污染物的清除作用外，污染物进入大气环境后，还有一个化学过程，这个过程通常被成为二次污染物生成过程。从结果看，二次污染物的生成过程，相当于给污染物排放加了一个强化系数，即在原排放基础上，强度被放大了一些。具体放大了多少，则由大气环境的状况决定，从这个角度看，不同大气环境条件下的二次污染物生成状况，也是影响大气污染的一个重要因子。为了更全面地反映大气环境资源的状况，除了大气自然净化能力这个主要因素外，也应该考虑二次污染物生成效率与大气环境自然特征之间的关系。当然，按照本文的思路，大气环境的二次污染物生成效率特征，也可以看作是一个独立的外生变量，然后将这个外生变量作为影响污染物排放的增强系数进行计算。这种处理方式的优势是，大气环境的二次污染物生成效率特征，只相当于增加了污染物的排放强度，并不影响图1所示模型的分析结果。有关二次污染物生成效率的模型，也可以做类似的处理，这里不再赘述。

实现了对大气自然净化能力强弱的排序，图3所示的大气环境资源的分级管理就具备了可操作性。对于任何一个地方来说，都可以通过实际监测或者调用历史气象数据，然后根据ASPI模型计算出该地的ASPI曲线。根据不同地方的ASPI曲线，很容易画出本地的大气污染防治目标所对应的污染物排放强度控制线。然而，这条控制线只是理论上的，在实际工作中，无论是发展级控制目标，还是生态级控制目标，都需要将对应的ASPI曲线转换成排放强度曲线，只有这样才能成为大气污染控制的可执行目标，而这个转换过程，可以称之为平衡排放法。

在理解平衡排放法之前，首先要说明一下等污染曲线的概念。等污染曲线的思想来源于经济学原理中的等效用曲线（图4），它表示一组排放强度（无量纲、数值大小代表强弱）与大气自然净化能力（无

量纲、数值大小代表强弱)的组合,这条曲线上的任一点,都代表一个排放强度和与之相对应的大气自然净化能力,这些点所产生的大气污染程度是一样的,因此被称为等污染曲线。在图4所表示的二维空间中,实际上充满了无数条等污染曲线,这些曲线密布排列却不重合,它们的含义是,想得到同一程度的污染,有多少种排放与大气自然净化能力之间的组合关系。

等污染曲线可以作为短期空气质量调控的主要依据,也可以作为错峰生产和临时措施的参考。对于任何一个地方(城市)来说,如果通过ASPI监测已经掌握了本地的大气自然净化能力曲线,然后再结合本地的空气质量监测数据,就可以绘制本地的等污染曲线,当大气自然净化能力下降时,为了避免空气质量恶化,应该相应地减少排放。近年来,北方地区秋冬季节的大气污染防治措施,实际上采用的就是等污染曲线的思路,虽然并没有采用精准的大气自然净化能力监测数据,但根据经验,秋冬季节的防控仍同比进行了大幅度减排,以避免造成秋冬季的重污染。

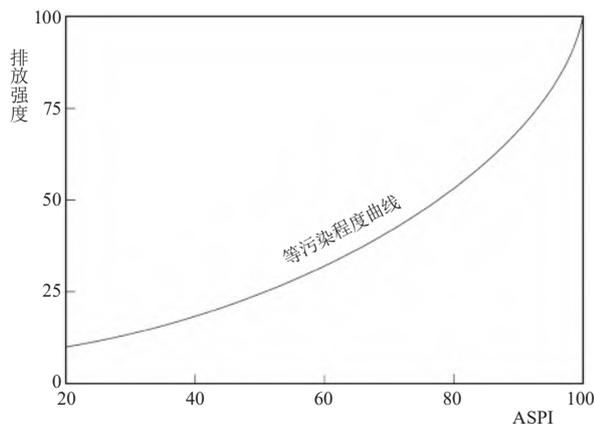


图4 等污染曲线示意图
Fig. 4 Equal pollution curve

长期看,等污染曲线暗含了一个重要的技术参数,即污染物的排放平衡点问题,这也是平衡排放法的基础。污染物排放平衡点是指污染物排放强度正好等于大气自然净化能力时,所对应的大气自然净化能力指数值。污染物排放平衡点具有如下三个含义:1)此时的污染物排放正好被大气环境完全净化掉;2)此时的空气质量处于平衡状态,既不恶化,也不好转;3)空气质量处于稳定状况,则意味着污染物排放强度处于平衡态。这就好比是一个水池,污染物排放是进水管,大气自然净化是出水管,水池的水深是空气质量。如果水池的水深不变,意味着进水量等于出水量。如果进水管太多,进水量不好统计,但出

水量容易统计,这时就可以利用进水量等于出水量的关系,用出水量表示进水量。也就是说,可以利用大气自然净化能力与污染物排放的平衡关系,估算污染物的实际排放强度。

现实中,由于污染源种类繁多,活动水平复杂,估算实际排放强度是最大的难题。宏观上,污染物排放平衡点,可以作为估算实际排放的主要理论依据。根据污染物排放平衡点的三个含义,结合空气质量监测数据,选取空气质量波动不大的时段,利用大气自然净化能力监测数据,可以估算实际排放强度,综合评价一个地区的实际排放。

通过图5所示的排放平衡点统计图可以来理解实际排放的估算方法。对于某个地方来说,当污染物排放处于平衡时,则空气质量保持不变。对一个地方进行一个周期的观测,可以将空气质量保持不变的时段选出,同时将对应时段的ASPI数据也列出,就可以绘制出如图5所示的统计图。

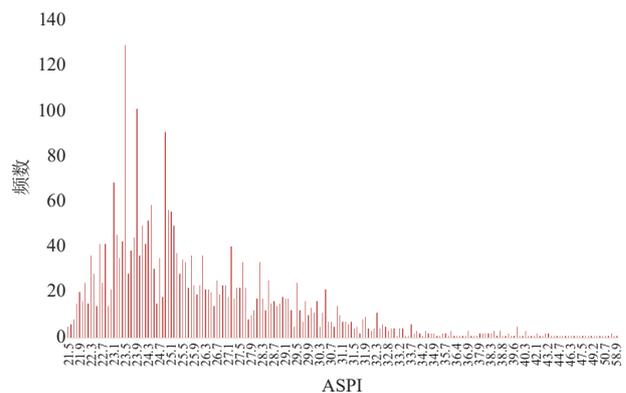


图5 排放平衡点统计
Fig. 5 The statistics of equilibrium point of pollutant emission

基于如下假设,可以根据图5对一个地方的排放平衡点进行估计。其假设条件如下:1)人为排放源排放规律由人类活动规律决定,如上下班、出行等;2)大气自然净化能力的变化规律由气象变化规律决定,如刮风下雨等;3)空气质量反映了污染物排放与大气自然净化能力之间的对应关系;4)污染源排放强度=大气自然净化能力的情况是一个随机事件E;5)一个时间周期内(如一月、一季、一年)的所有随机事件E组成一个样本,该样本均值约等于总体均值;6)样本中大气自然净化能力的均值,即为排放平衡点。

也就是说,虽然不能准确地计算一个地区的实际排放强度,但是可以计算出一个地区的实际排放强度需要多大的大气自然净化能力才能保持空气质量不

恶化，这是进行污染物真实排放强度估算的主要理论依据。

为了比较不同地区的污染物实际排放强度的差异，可以通过绘制排放平衡点曲线实现（图6）。首先，对不同地区统一进行空气质量和大气自然净化能力监测。然后根据监测数据，对每个地区的排放平衡点进行样本统计（图5）。其次，对样本求均值，得到ASPI均值，代表该地区的实际排放强度。第三，对所有地区的ASPI均值进行排序，绘制如图6所示的排放平衡点曲线。对于不同的地区来说，其ASPI均值越大，即越靠近曲线的右侧，说明该地区的实际排放强度越大。

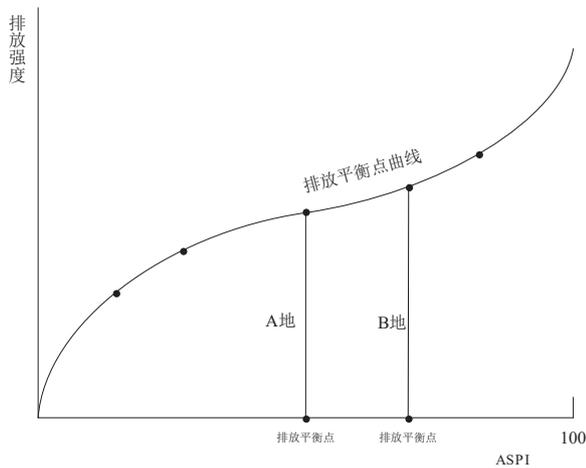


图6 排放平衡点曲线
Fig. 6 Equilibrium point curve

通过对一个地方的排放平衡点计算，可以反映该地的实际排放强度，从而就能对图3所示的大气环境资源分级管理思路进行实际操作。一方面，通过对一个地区的大气自然净化能力进行实时监测，绘制出该地的ASPI曲线图，并进行数据统计；另一方面，计算该地的排放平衡点，估算实际排放强度。下面通过一个案例来说明这一问题，对某地的ASPI进行统计，其分位数如下（表1）。

表1 某地大气自然净化能力指数ASPI统计
Table 1 A case of the statistics of ASPI

ASPI	分位数/%
28.12	5
29.59	10
32.98	25
38.82	50
52.61	75
73.74	90

如果人为规定，当污染物排放强度低于大气自然净化能力指数的10%分位数时，大气环境资源管理的

目标为生态级；低于大气自然净化能力指数的25%分位数时，大气环境资源管理的目标为宜居级；低于大气自然净化能力指数的50%分位数时，大气环境资源管理的目标为发展级。通过排放平衡点估算，发现该地的排放平衡点为39.48，则意味着该地的实际排放仍超过发展级水平，随着污染物排放控制水平的提高，该地的排放平衡点下降到38.82以下，则意味着该地的大气污染防治水平已经达到发展级，可以进一步将控制目标提升至宜居级。

可以看出，平衡排放法是基于大气自然净化能力指数监测的一种污染物排放强度估算方法，其优势有四个：第一，无需要进行污染源排放统计，也不需要进行污染源和污染物的详细分类和监测，节省了大量的成本；第二，平衡排放法是一种间接方法，利用大气自然净化能力与污染排放的平衡关系，不仅提高了准度，还解决了隐藏源、自然源的排放情况难以测定的问题，是一种比较便捷的宏观估算方法；第三，平衡排放法很容易与大气环境资源的分级管理思想相结合，是一种可以实际操作的方法；第四，平衡排放法可以对不同地方的实际排放情况进行比较，标准相对统一，客观性较强。

4 结论与展望

从大气环境的自然特征出发，大气污染防治工作实际上应该是对大气环境资源的管理。大气污染工作从治理转向管理，是一种思路的转变。大气环境资源概念及其管理框架的确立，有助于提升大气污染防治水平。将大气环境看作是一种资源，参与到经济要素的优化配置中来，是平衡经济发展与大气环境保护的重要手段，具有重要的战略意义。

第一，在大气环境资源管理视角下，异质性的 大气环境，意味着不同地区大气环境资源的多寡。中国幅员辽阔，自然地理条件和气象气候特征明显，大气环境资源差异显著，空间优化配置的潜力很大。由于历史原因，中国的大部分城市在内陆地区孕育，沿海城市到了近代才有一定程度的发展。而内陆的大部分城市，多布局在大气环境资源相对匮乏的位置。新中国成立后的工业发展，很多是在原有城市的基础上进行的，这就造成传统污染产业多布局在大气环境资源匮乏的地区。由于推动产业空间移动的主要因素是区位优势，包括劳动力资源、基础设施建设、资源价格以及环境政策等，近几十年，东部发达地区的经济增长快，以总量参考为核心的大气环境政策越来越严厉，中西部地区出现明显的比较优势。从而导致污

（下转46页）

保障及专项保障。

参考文献

- [1] 姚秀萍, 吕明辉, 张晓美, 等. 气象服务效益评估研究和业务进展. 气象科技进展, 2012, (3): 39-44.
- [2] 韩佳茵, 吕丽莉, 张润嘉, 等. WMO气象服务效益评估工作的借鉴与启示. 气象科技进展, 2017, 7(1): 242-245.
- [3] World Meteorological Organization. Madrid Conference Statement and Action Plan. Madrid: WMO, 2007.
- [4] World Meteorological Organization. Meeting of the WMO Forum: Social and Economic Applications and Benefits of Weather, Climate and Water Services. Switzerland: WMO, 2009.
- [5] World Meteorological Organization. Proceedings of the WMO Regional Association VI (Europe) Conference on Social and Economic Benefits of Weather, Climate and Water Services. Switzerland: WMO, 2011.
- [6] World Meteorological Organization. Outcomes of the WMO 2018 Urban Survey. Switzerland: WMO, 2019.
- [7] 贾朋群, 刘英金. 美国气象现代化历程和发达国家气象现代化指标体系. 气象软科学, 2008, (2): 57-93.
- [8] 姚秀萍, 吕明辉. 公众气象服务效益评价理论与实践. 北京: 气象出版社, 2017.
- [9] 姚秀萍, 吕明辉, 范晓青, 等. 我国气象服务效益评估业务的现状与展望. 气象, 2010, 36(7): 62-68.
- [10] 姚秀萍, 吕明辉, 范晓青, 等. 气象服务效益评估研究进展. 气象, 2011, 37(6): 749-755.

- [11] 潘丽华. 气象服务效益评估研究和业务进展. 南方农机, 2018, (4): 207.
- [12] 丁朝阳, 唐万年. 多级模糊综合评判法在气象服务保障能力评估中的应用. 气象科学, 2005, 25(1): 48-54.
- [13] 罗慧, 谢璞, 俞小鼎. 奥运气象服务社会经济效益评估个案分析. 气象, 2007, 33(3): 89-94.
- [14] 罗慧, 谢璞, 薛允传, 等. 奥运气象服务社会经济效益评估的AHP/BCG组合分析. 气象, 2008, 34(1): 59-65.
- [15] 屈凤秋, 顾红兵, 朱平. 亚运公共气象服务质量评价分析. 第28届中国气象学会年会——S10公共气象服务政策体制机制和学科建设. 北京: 气象出版社, 2011.
- [16] 深圳市气象局, 深圳市公众力商务咨询有限公司. 深圳大运会“气象服务质量及满意度”调查与评估. 深圳市气象局, 2011.
- [17] 袁悦. 市场调查操作手册. 北京: 中国经济出版社, 2010.
- [18] 王文颖. 多阶段抽样的精度控制及样本量计算. 统计研究, 1997, (5): 66-70.
- [19] 袁建文, 李科研. 关于样本量计算方法的比较研究. 统计与决策, 2013, (1): 23-25.
- [20] 杜艾卿, 胡桂华, 陈新华. 人口普查质量评估调查样本量的测算. 统计与决策, 2013, (1): 23-25.
- [21] 王文霞, 杨洪娟. 浅谈定性研究与定量研究. 西部皮革, 2016, (10): 219.
- [22] 林竹. 社会调查中的定性研究方法浅析. 社会工作, 2009, (8): 53-55.
- [23] 孙晓娥. 深度访谈研究方法的实证论析. 西安交通大学学报, 2012, 32(3): 101-106.
- [24] 孙长征, 高慧君, 黄燕玲, 等. 气象要素对体育项目的综合影响. 山东气象, 2011, 31(2): 23-26.

(上接36页)

染产业有继续向大气环境资源匮乏地区集中的趋势。如果不进行调控, 污染产业就会出现空间上的强化效应, 增加空气污染。根据大气环境资源状况科学调控产业的空间布局, 显得十分必要。

第二, 随着大气污染防治工作的不断深入, 特别是2013年底以来, 中国的大气污染治理工作思路从总量控制转向空气质量控制, 为大气环境资源管理提供了契机。总量控制的工作思路暗含了一个前提, 即大气环境不存在空间上的异质性, 不同地区的大气环境性质相似, 至少其对大气污染的影响不存在显著差别。在以空气质量控制为核心的工作思路下, 大气环境异质性的作用凸显出来。结果导向, 精准治理, 实际上就是做好大气环境资源的时空优化配置, 以最小的代价, 获得最大的效益。大气环境资源管理的核心思路是对大气自然净化能力变化过程的精细统计, 从而得出大气自然净化能力的周期性规律, 并在此基础上进行大气环境资源的分级管理。排放平衡法为污染物排放提供了一种便捷的宏观估计方法, 具有一定的实践意义。

第三, 大气污染防治与经济发展不是一组不可调和的矛盾, 而应该是一种权衡取舍。清洁空气是有价的, 其价格取决于对清洁空气的需求弹性, 而不是清

洁空气本身的效用。从某种意义上说, 大气污染治理是一种经济活动, 治理目标是经济平衡的结果。建立大气环境资源管理的基本框架, 在未来的大气污染防治工作中, 可以根据本地经济发展状况制定合适的大气污染控制目标, 最大限度地利用大气环境的自然特征, 实现对大气环境资源的时空优化配置, 减少大气污染防治成本。

参考文献

- [1] 蔡银寅, 马力. 数值化的大气环境资源——2017年中国大气环境资源统计与政策建议. 阅江学刊, 2018, 10(5): 30-40.
- [2] 蔡银寅. 大气污染防治的经济学方法. 北京: 科学出版社, 2017.
- [3] Hoekstra A. Y, Wiedmann T O. Humanity's unsustainable environmental footprint. Science, 2014, 344(6188): 1114-1117.
- [4] 王凯丽, 袁彩凤, 张晓果. 我国大气环境承载力研究进展. 环境与可持续发展, 2018, 43(6): 35-39.
- [5] 邢秀凤. 区域环境容量、产业结构与经济发展质量关系研究——以山东济南和青岛两市为例. 生态经济, 2015, 31(7): 65-69.
- [6] 薛文博, 付飞, 王金南, 等. 基于全国城市PM2.5达标约束的大气环境容量模拟. 中国环境科学, 2014, 34(10): 2490-2496.
- [7] 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. 中国环境科学, 2011, 31(3): 504-509.
- [8] 蔡银寅. 中国大气环境资源报告2018. 北京: 社会科学文献出版社, 2020.
- [9] Muller N Z, Mendelsohn R, Nordhaus W. Environmental accounting for pollution in the United States economy. The American Economic Review, 2011, 101(5): 1649-1675.
- [10] Muller N Z. Boosting GDP growth by accounting for the environment: including air pollution and greenhouse gas damages increases estimated U.S. growth. Science, 2014, 345(6199): 873-874.