

中国大气环境资源的地理分布

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: 利用《中国大气环境资源报告2018》的数据, 对中国大气环境资源的地理分布进行研究, 以生态级大气环境保护为战略目标, 提出“安康分界线”的思路, 将中国大气环境资源大致分为四个区域: 安康以东以南地区为丰富区; 安康以西以南地区为一般区; 安康以东以北地区为相对匮乏区; 安康以西以北地区为匮乏区。下调大气环境资源等级, 中国大气环境资源的地理分布会发生变化, 相对匮乏区的资源量上升, 这一规律对当前的大气污染防治工作具有重要的现实意义。同时, 还探讨了大气环境区域分级管理, 以及区域分级过程中的生态公平和经济公平问题。

关键词: 大气环境资源, 地理分布, 安康分界线

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2020.06.019

Geographical Distribution of the Atmospheric Environmental Resources in China

Cai Yinyin

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

Abstract: The geographical distribution of the atmospheric environmental resources in China was researched by employing the data of Report on China's atmospheric environmental resources (2018). Considering the ecological criteria for air pollution control, a proposed boundary Ankang borderline divided China into four parts, namely rich area, general area, relative deprivation area, deprivation area. Where rich area locates southeast of Ankang; general area locates southwest of Ankang; relative deprivation area locates northeast of Ankang; and deprivation area locates northwest of Ankang. With the degradation of criteria for air pollution control, the geographical distribution of the atmospheric environmental resources in China shows a change that relative deprivation area turn into rich area. This rule has an important and practical meaning to the current work on air pollution control. Meanwhile, the issue of hierarchical region management on atmospheric environment, ecological justice and economic equity were discussed too.

Keywords: atmospheric environmental resources, geographical distribution, Ankang borderline

0 引言

大气环境成为一种资源是社会发展到某个阶段的经济产物, 就像煤炭、石油、天然气和水一样, 因其可以满足人类的某种需求而又无法零成本获得使然。在人类发展的初级阶段, 人类活动水平相对较低, 对大气环境造成的影响很小, 清洁空气无限供应, 也不存在所谓大气环境资源问题。随着工业文明的不断进步, 人类活动产生的污染物越来越多, 不断释放到大气环境中, 造成不可忽略的影响, 大气环境也随即成为一种资源。

简单地说, 大气环境的资源性主要体现在其自然净化能力方面。如果大气环境不具备自然净化能力, 污染物排放就会对大气环境产生持续性的不可逆

改变, 大气污染呈现线性上升的态势, 人类将无法生存, 当然也就不考虑其资源性的问题。正因为大气环境存在一定的自然调节和恢复能力, 才使得其具有成为一种资源的可能性。大气自然净化能力的产生包含温度、湿度、气压、风、降水等多要素的共同作用, 是大气活动综合水平的体现, 既有实时性, 又有周期性的特征^[1]。大气自然净化能力指大气环境对进入其中的污染物的自然清除能力, 而这种清除能力与天气条件有关。同一个地方, 不同时间会经历不同的天气过程, 因此不同时间的大气自然净化能力也会不同, 这就决定了大气自然净化能力具有实时性特征。然而, 同一个地方, 一个周期内(如一年)天气变化的总体情况却保持着相对的稳定性, 也即所谓的气候特征, 则决定了大气自然净化能力的周期性规律。

除自然源排放以外, 大气污染物主要是人类经济活动的副产品。当人类活动产生的污染物超出大气环

收稿日期: 2020年7月9日; 修回日期: 2020年7月29日
第一作者: 蔡银寅(1985—), Email: yyincai@nuist.edu.cn

境的最低自然净化能力时, 污染物就会在大气环境中留存并持续一段时间, 从而对人类健康、动植物和资产等产生一定程度的损害^[2]。此时, 人们面临两个选择: 一是承受大气污染造成的损失; 二是牺牲经济增长, 减少一些排放。也就是说, 这种情况下想要获得完全无害的大气环境(清洁空气)就必须支付一定的成本, 大气自然净化能力不再无限供应(获取的边际成本不再为零), 已经成为一种稀缺资源, 需要考虑其经济配置, 才能获得最大的经济效益^[3]。

然而, 在传统的环境经济学框架下, 大气环境的异质性通常没有得到充分的体现, 自然也就不存在所谓大气环境资源的概念以及配置的问题。如果接受大气环境存在显著差异的事实, 就不得不重新考虑大气污染的问题。一方面, 大气污染不再是污染物排放单方面的事情, 而是污染物排放与大气自然净化能力之间的平衡问题; 另一方面, 大气自然净化能力的时空分布, 意味着大气污染防治成本的差异性。在不同的地方, 不同的时间, 削减一个单位的污染物排放, 其产生的空气质量改良结果不同。也就是说, 获得相同水平的空气质量改善(或恶化), 在不同的地方, 不同的时间, 所产生的经济成本(或效益)也大不相同。

大气环境资源作为一个经济学概念, 相当于扩大了生产要素的投入范围。在传统的经济学框架下, 生产要素包括劳动力、土地、资本、技术等, 随着生产力水平的提高, 以及人类对生存环境的重视, 环境也被看作是一种要素投入, 因为环境改变会带来一些损失(环境污染对人、动植物、资产的损害), 或者想要保持环境状态不变, 就需要支付更多的成本(比如使用污染物回收技术)。单位污染物对环境的改变程度, 与环境的耐受力有关。当然, 这个问题比较复杂, 如果把污染物分为积累性污染物和非积累性污染物, 则单位污染物对环境造成的边际改变程度, 不仅与环境的耐受力有关, 也与污染物的积累量(保有量)有关。对于大气污染来说, 大气污染物既有积累性污染物的性质, 又有非积累性污染物的性质。

本文主要考虑大气污染物作为非积累性污染物的性质, 即污染物在大气环境中的留存时间有限, 属于能够被及时清理类型的污染物。同时, 还要考虑大气污染物的影响范围, 是局部的, 还是区域的, 或者是全球的, 同样, 这里主要侧重于其局地性特征的考虑, 即本地大气污染物主要污染本地的情况。历史上, 大气污染特别严重的时期, 大气污染的区域性也比较突出, 比如上个世纪中期的伦敦, 20世纪90年代

中国南方的酸雨, 都是典型的区域性污染。随着工业脱硫脱硝技术的普及, 大部分工厂电厂都实现了达标排放, 大气污染也从超重污染阶段转向较重污染或中度污染阶段, 局地污染也就成了主要方面。

因此, 大气环境资源的经济学含义是: 大气环境的边际改变程度所接受的污染物排放量, 或者单位污染物排放量所产生的大气环境的边际改变程度。相同的污染物排放量, 如果造成的大气环境边际改变程度小, 则意味着大气环境资源丰富。如果将大气环境资源看作是一种生产投入, 其含义则是, 单位产量产生的污染物所需大气环境的边际改变程度。由于大气自然净化能力具有实时性和周期性特征, 所以大气环境资源也是一种不可存储的资源。生产(消费)活动中, 大气环境资源的投入, 取决于其生产的时间和空间安排, 生产(消费)过程(污染物排放过程)即大气环境资源的消耗过程。

值得注意的是, 大气环境资源的多寡, 主要体现在其趋势上, 而与实际消耗程度无关。对大气环境资源的优化配置, 也可以描述为对大气自然净化能力的充分利用, 即对污染物排在时间和空间上的安排问题。由于不同地方自然地理环境和气象气候特征不同, 就造成了不同地方大气环境资源的显著差异, 特别是对于中国这样幅员辽阔、地形复杂多变的大国来说更是如此。想要提升污染物排放空间安排的效率, 首先要掌握大气环境资源的空间特征。因此, 厘清中国大气环境资源的地理分布, 具有重要的战略意义。

1 大气环境资源及其统计方法

清洁空气不能无限供应, 是大气环境成为资源的前提条件。污染物在大气环境中的留存量和持续时间是大气污染的核心问题。现实中, 空气中污染物的浓度是衡量大气污染程度的主要指标^[4]。大气环境的资源性, 主要源于其对污染物这两个方面的影响。

大气环境对进入其中污染物的作用主要表现为两个方面: 一是清除作用, 即大气环境的自然净化作用; 二是强化作用, 即对二次污染物生成的影响。二次污染物的生成依赖两个因素, 一是生成原料, 二是生成条件。作为二次污染物生成的外部条件, 大气环境实际上相当于增加了污染物的排放强度。在《中国大气环境资源报告2018》中, 二次污染物生成系数(GCSP)描述了大气环境的这一特征^[5]。严格意义上说, 大气环境的二次污染物生成特征, 也是大气环境资源的一部分。假定其他条件不变, 较大的二次污染物生成能力, 意味着相同排放条件下, 二次污染物生成量多, 大气污染程度高。二次污染物生成能力相

当于给污染物排放加了一个放大系数，不同大气环境下，放大程度不一样。

大气环境对污染物的清除作用，是大气环境资源的本质体现。污染物进入大气环境后，会经历扩散、搬运、沉降、移除等一系列过程，最终离开大气环境回到地面、水体、动植物表面等，这个过程称为大气环境的自然净化过程。在不同的大气环境下，污染物经历这一过程的时间长短不同。这一过程的时间反映了大气自然净化能力的强弱，时间越短，意味着大气的自然净化能力越强，反之则越弱。大气自然净化能力反映了大气环境对污染物的清除能力和制造清洁空气的速度，是大气环境资源配置的主要依据。

概括起来，二次污染物生成能力和大气自然净化能力共同构成了大气环境的资源特征。现实计算中，二次污染物生成能力相当于给大气环境资源做减法，可以看作是对污染物排放的强化或对大气自然净化能力的削弱。当然，大气自然净化能力的强弱，对二次污染物的生成也有一定的影响，因为较强的大气自然净化能力，会显著减少二次污染物的生成原料。长期看，自然净化能力是大气环境资源的主要方面。因此，对中国大气环境资源地理分布的研究，主要是对不同地区大气自然净化能力总量差异和时间特征的分析。

大气自然净化能力指数模型（ASPI-Model）是实时计算大气自然净化能力强弱的一种方法，其原理如下：首先，针对污染物在大气环境中的留存时间与气象要素之间的关系建立方程。其次，使用计量模型和大数据分析技术，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，并对其贡献按照大小排序。第三，将气象因子的贡献转化为对污染物在大气环境中留存时间的影响程度。第四，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等固化为可变常参数，方程的左边为污染物在大气环境中的留存时间，右侧为气象因子和可变常参数。最后，对污染物在大气环境中的留存时间进行标准化处理，变成0~100的实数，作为衡量大气自然净化能力强弱的一个指标。

理论上，大气自然净化能力指数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，也可以评估某一段时间，该地区的大气自

然净化能力的强弱。《中国大气环境资源报告2018》列举了中国2018年2290个地方的大气环境资源样本，覆盖到县一级。单个样本包括该地的ASPI、GCSP等五项指标数据，数据频次为3 h或8 h，基本反映了该地的大气环境资源状况。利用《中国大气环境资源报告2018》的数据，可以对中国大气环境资源的地理分布，做一个简要的分析。

2 大气环境资源的战略分级

一个地区一年内大气自然净化能力的总量，反映了一个地区大气环境资源的相对丰腴程度。然而，大气自然净化能力强弱在时间上的分布，对大气环境资源也有重要意义。假定污染物的排放由经济活动规律决定，相对于大气自然净化能力的时间分布是一个随机事件。也就是说，污染物的排放并不会考虑大气自然净化能力的变化，只是根据自身活动需要进行。基于这种假定，将大气自然净化能力看作是一个外生变量，其时间分布特征对大气环境资源的意义就显得尤为重要。例如，A地和B地全年的大气自然净化能力总量相等，A地大气自然净化能力的时间分布比较平均，而B地大气自然净化能力的时间分布则比较集中，且强弱悬殊。如果AB两地的污染物排放情况一致，则B地更容易出现大气污染。因为在大气自然净化能力较弱的时段，污染物排放很容易超过大气自然净化能力，产生大气污染，而在大气自然净化能力较强的时段，由于污染物排放不会随之提高，大气自然净化能力的作用没有完全发挥。

当然，如果污染物排放强弱可以根据大气自然净化能力进行适时调节，那么大气自然净化能力的时间分布就不那么重要了。但是，除非适时调节的成本可以忽略或者调节成本相对于减少排放来说收益更为明显，否则这种理想的适时调节都不可能。至少在目前看来，调节污染物排放时间的成本还不能忽略。因此，在不考虑污染物排放适时调节的情况下，可以根据一个地方大气自然净化能力的时间（强弱）分布情况，对大气环境资源进行战略分级。

大气环境资源战略分级的基本假设如下：1) 污染物排放与大气自然净化能力是两个相对独立的事件，不存在相互依存关系；2) 一个地方的大气自然净化能力变化具有明显的周期性特征，即具有整体稳定性的特征，年度波动不明显或者可以忽略；3) 一个地方大气自然净化能力强弱的时间分布虽然不同，但不同水平的大气自然净化能力占全年的比重相对稳定。例如，一个地方较弱的净化能力可能出现在3月，也可能出现在4月，但全年较弱大气自然净化能

力出现的频次和时间长短大致稳定。基于这三个假设,可以对大气环境资源进行战略分级(表1)。

表1 大气环境资源的战略分级标准和含义

Table 1 The strategic grading standard and implications of atmospheric environmental resources

	生态级 大气环境资源	宜居级 大气环境资源	发展级 大气环境资源	大气环境 资源储量
大气环境资源的战略分级标准	全年大气自然净化能力指数10%分位数	全年大气自然净化能力指数25%分位数	全年大气自然净化能力指数50%分位数	全年大气自然净化能力指数平均值
大气环境保护的目标含义	全年不到10%的时间超过大气自然净化能力时对应的污染物排放强度	全年不到25%的时间超过大气自然净化能力时对应的污染物排放强度	全年不到一半的时间超过大气自然净化能力时对应的污染物排放强度	大气自然净化能力相对丰腴程度

不考虑污染物排放的适时调整,想要获得相应的空气质量,就需要根据如表1所示的标准制定排放计划。假定,想要保持空气质量处于生态保护区水平,污染物排放强度超过大气自然净化能力的时间,不能超过全年的10%。也就是说,对该地大气自然净化能力进行强弱排序,找到倒数第10%的那个大气自然净化能力,然后将污染物排放水平定在该大气自然净化能力以下,就可以获得生态级的空气质量。以此类推,想要获得宜居级的空气质量,也可以找到对应的污染物排放强度限值。

按照表1的思路,大气环境资源的战略分级实际上是先确定大气环境的控制目标,然后再根据这个控制目标,结合本地的大气自然净化能力特征,计算对应的污染物排放水平。换句话说,在相同的控制目标下,对应的污染物排放水平越高,意味着该地的大气环境资源越丰富。如果将污染物排放强度与大气自然净化能力看作是一组对应关系,则可以直接用大气自然净化能力来表示大气环境资源的多寡。因此,《中国大气环境资源报告2018》将大气环境资源分为生态、宜居和发展三级,分别用ASPI的10%、25%和50%分位数来表示对应目标下大气环境资源的丰富程度。

其实,大气环境资源的战略分级主要是考虑到污染损失和减排损失的平衡关系。如前面所说,当污染物排放强度超过大气自然净化能力时,产生大气污染,此时人们面临两个选择:一是直接承受大气污染带来的损失;二是用控制排放的方式保持空气质量,承受减排带来的经济损失。到底该选择哪种方式,实际上是一个经济问题。在经济发展的初级阶段,物质生活相对匮乏,人们对环境的效用评价较低,经济增长的收益高,承受污染的损失低,人们大概率会选择直接承受大气污染的损失。随着经济发展水平越来越

高,物质条件越来越好,人们对环境的效用评价也会越来越高,直接承受大气污染的损失越来越大。相对而言,由于经济活动的选择范围扩大,替代性增强,减排的经济损失则越来越小,两者相较,这时候,通过排放控制获得较好的空气质量是一个好的选择。中国的大气污染治理历程,大致也反映了这一事实^[6]。

选择什么样的空气质量控制目标,就等于确定了大气环境资源的分级标准。如果将空气质量管理目标定在宜居级,那么就应该考虑宜居级的大气环境资源分布状况及其配置方案。类似地,如果将空气质量管理目标定在生态级,就应该考虑生态级大气环境资源分布状况。因此,在分析中国大气环境资源地理分布的过程中,同样要考虑大气环境资源的分级问题。不同分级条件下,中国大气环境资源的地理分布不同,其空间配置方式和结果也不会相同。

对大气环境资源进行战略分级,主要是考虑到污染物排放的不可适时调节性。如果污染物排放的时间调整成本降低,就可以更充分地利用大气自然净化能力。这时候,大气环境资源的丰富程度,则主要由大气自然净化能力的总量来反映。如表1所示,本文将考虑污染物排放时间调整时的大气环境资源定义为大气环境资源储量,用大气自然净化能力的均值表示。值得注意的是,大气环境资源储量与发展级大气环境资源在数值上虽然比较接近,但含义却不相同。发展级大气环境资源,强调的是在不考虑污染物排放时间调整的情况下,为了获得较好的经济发展,而承受一定程度污染损失时,大气环境资源的可利用状况。大气环境资源储量,强调的则是污染物排放时间调整的空间,即最大可利用的大气环境资源状况。

3 中国大气环境资源的地理分布

无论按照什么样的分级标准,由于自然地理条件和气象气候特征的差异,中国的大气环境资源都应该有明显的地理分布规律。《中国大气环境资源报告2018》分别列出了2018年全国2290个样本的生态级大气环境资源、宜居级大气环境资源、发展级大气环境资源和大气环境资源储量数据。利用这些数据,可以对中国大气环境资源的地理分布情况进行初步的分析。

虽然大气环境资源与煤炭、石油、天然气等矿藏资源,以及土地、水资源等类似,其丰富程度都可以用多寡来衡量,但大气环境资源还有一些相对特殊的特征。首先,大气环境资源与其他资源相比,不是有无的概念,而更多是大小或多少的概念。即使在大气环境资源极度匮乏的地区,也不能说其大气环境资

源为零,只能说该地的大气环境资源,比较接近基准低量。大气环境资源的这一特征主要是由大气自然净化能力的最低水平决定的。也就是说,即使在最不利的气象条件和地形下,开放性的大气环境所具备的自然净化能力也不是零,而只是一个相对低值。比如,可以将这个相对低值,定义为基准低量。任何一个地方,其大气环境资源的匮乏程度,最多也就是无限趋近这个基准低量。其次,无论是用大气自然净化能力的总量还是分位数来衡量大气环境资源,都是一个相对概念。不像煤炭、石油那样,用蕴含量来反映多寡。

基于以上两点,简单起见,用高值样本占比这一指标来反映大气环境资源的丰富程度。其含义是,在一个区域内,如果大气环境资源高值样本占比较高,意味着该区域的大气环境资源丰富。具体计算方法是,对于不同等级的大气环境资源数据,先对《中国大气环境资源报告2018》中的2290个样本进行排序,规定排在前25%左右的样本为高值样本,具体分类标准如表2所示。

表2 高值样本分类标准

Table 2 Classification criteria of high-value samples

	生态级 大气环境资源	宜居级 大气环境资源	发展级 大气环境资源	大气环境资源 储量
高值样本 分类标准	>30	>33	>37.5	>45

按照表2的分类标准,首先分析中国大气环境资源沿经度的变化规律(图1)。纵轴表示不同分级条件下高值样本的占比(为自然比,比值区间为0~1),横轴表示经度基准线,即中国该经度以东的地区。例如,横轴110表示中国110°E以东地区,横轴115则表示中国115°E以东地区。图1中的曲线,代表中国每向东移动1个经度,区域内高值样本所占比例的变化趋势,

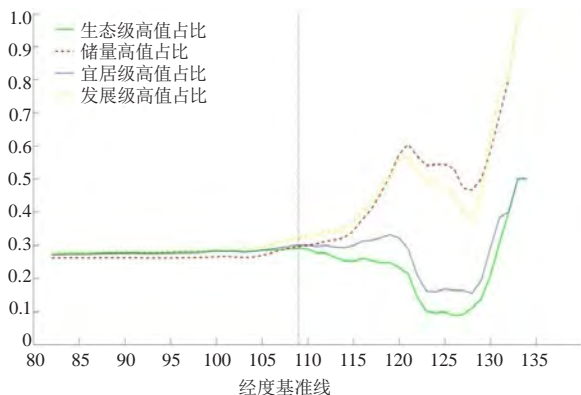


图1 中国大气环境资源沿经度变化

Fig. 1 The change of atmospheric environmental resources in China with longitude

也即大气环境资源丰富程度的变化趋势。

从图1可以大致看出,中国大气环境资源分布东西方向上存在显著差异,在109°E附近,有一个明显的变化。也就是说,109°E以东地区,中国的大气环境资源分布与以西地区相比,存在显著差异。为了更清楚地显示这一变化,表3列出了95°—125°E,每向东移2个经度高值样本所占比例的变化,用百分比表示。同样可以大致看出,109°E具有分界线的作用。

类似地,用同样的方式分析中国大气环境资源沿纬度的变化(图2)。纵轴表示不同分级条件下高值样本的占比(为自然比,比值区间为0~1),横轴表示纬度基准线,即中国该纬度以南的地区。例如,30表示中国30°N以南的区域,40表示中国40°N以南的区域。

从图2可以大致看出,整体而言,中国大气环境资源呈现南多北少的状况,随着纬度基准线的北移,大气环境资源丰富程度下降。在33°—47°N附近,中国大气环境资源分布有两个典型的变化。与109°E分界线类似,33°N和47°N,同样可能具有纬度分界线的含义。

表4列出了21°—53°N,每向北移动2个纬度,中国大气环境资源的变化情况。可以看出,33°N以南地区,大气环境资源相对丰富。33°N以北地区,每向北移动2个纬度,大气环境资源丰富程度的下降趋势开始趋于平缓,说明33°N以北地区,大气环境资源相对匮乏,移动到47°N附近,大气环境资源的丰富程度几乎不再变化。由于中国47°N以北区域占全国比重较小,所以47°N线没有多少实际的分界意义。

由图1、图2、表3和表4的分析可以大致确定,中国的大气环境资源存在明显的地理分布特征,下面将对其地理分布特征和含义做进一步的阐述。

4 安康分界线

如前面分析,中国大气环境资源分布东西方向大致以109°E为界,南北方向大致以33°N为界。根据这一分界原则,中国大体被分为四个区域。由于109°E,33°N位于陕西省安康市境内,因此可以称之为中国大气环境资源的安康分界线。地理分界线的确定,有利于提高对中国大气环境资源的空间认知水平,促进大气环境资源的空间优化配置。在不同的历史时期,有很多著名的地理分界线^[7],对社会经济发展和知识传播都起到非常重要的作用,如标记中国人口疏密分布的胡焕庸线^[8-9]、划分南北方的秦岭淮河线等,一直深深地影响着人民生活的种种方面。同时,在较小的专业领域,也有一些地理分界线的提法,

表3 中国大气环境资源沿经度变化趋势（自西向东）^[5]
Table 3 The change tendency of atmospheric environmental resources in China with longitude (from west to east)^[5]

经度基线	样本总量	生态级大气环境资源		宜居级大气环境资源		发展级大气环境资源		大气环境资源储量	
		高值量	百分比/%	高值量	百分比/%	高值量	百分比/%	高值量	百分比/%
95°E	2167	606	27.96	598	27.60	607	28.01	566	26.12
97°E	2156	606	28.11	598	27.74	607	28.15	566	26.25
99°E	2129	602	28.28	596	27.99	605	28.42	563	26.44
101°E	2065	583	28.23	582	28.18	594	28.77	551	26.68
103°E	1964	552	28.11	549	27.95	567	28.87	518	26.37
105°E	1834	523	28.52	524	28.57	541	29.50	495	26.99
107°E	1683	483	28.70	494	29.35	522	31.02	481	28.58
109°E	1533	446	29.09	461	30.07	495	32.29	454	29.62
111°E	1344	373	27.75	399	29.69	446	33.18	409	30.43
113°E	1122	296	26.38	331	29.50	383	34.14	355	31.64
115°E	871	219	25.14	261	29.97	321	36.85	299	34.33
117°E	618	157	25.40	195	31.55	262	42.39	253	40.94
119°E	394	98	24.87	131	33.25	201	51.02	201	51.02
121°E	238	51	21.43	69	28.99	136	57.14	144	60.50
123°E	148	15	10.14	24	16.22	73	49.32	80	54.05
125°E	101	10	9.90	17	16.83	48	47.52	55	54.46

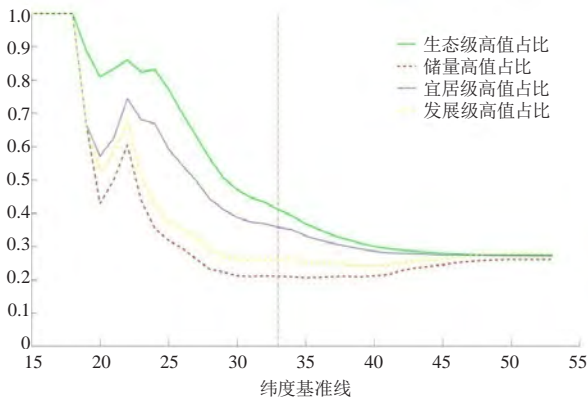


图2 中国大气环境资源沿纬度变化

Fig. 2 The change of atmospheric environmental resources in China with latitude

如风速与能见度关系的地理分界线^[10]，但影响范围较小。安康分界线的提出，对于中国大气环境资源的空间配置来说，希望能起到化繁为简的效果。

首先，考虑安康分界线下生态级大气环境资源的分布（表5）。可以看出，109°E以东，33°N以南地区，生态级大气环境资源非常丰富，高值样本占比接近一半。109°E以西，33°N以南地区，生态级大气环境资源下降，高值样本占比不到三分之一。而在33°N以北地区，生态级大气环境资源非常匮乏，尤其109°E以西地区，高值样本占比仅为8.01%。

从经济发展的长期规律看，空气质量的最终控制目标应该是生态级。基于这个考虑，对中国大气环

境资源的地理划分，应该以生态级大气环境资源为基础，然后再研究其他分级条件下，大气环境资源变化情况。因此，根据表5的数据，可以将中国的大气环境资源大致划分为四个区域（图3），即安康以东以南地区为丰富区，以南以西地区为一般区，以西以北地区为匮乏区，以东以北地区为相对匮乏区。

从图3可以看出，中国生态级大气环境资源大致呈现了南多北少、东多西少的基本规律。在丰富区，广东、海南、广西东部、福建大部，江西、安徽、湖北、江苏、浙江的部分地区，生态级大气环境资源相对丰富。在匮乏区和相对匮乏区，华北大部、西北大部，生态级大气环境资源都比较匮乏。

在生态级大气环境资源分区的基础上，考察宜居级大气环境资源的分布情况（表6）。可以看出，放宽空气质量控制标准，中国大气环境资源分布的地区差距缩小。与生态级大气环境资源相比，丰富区宜居级大气环境资源高值占比下降了5.51%，一般区宜居级大气环境资源高值占比下降了5.03%，而匮乏区宜居级大气环境资源高值占比上升了1.75%，相对匮乏区宜居级大气环境资源高值占比上升了6.3%。当然，四个区域的整体趋势并没有发生逆转。

表6呈现的规律，从图4可以更明显地看出，中国宜居级大气环境资源的区域差异明显缩小，尤其在匮乏区和相对匮乏区，还出现了零星的高值集中区，使得这两个区域宜居级大气环境资源上升。在一般区，

表4 中国大气环境资源沿纬度变化趋势 (自南向北)^[5]

Table 4 The change tendency of atmospheric environmental resources in China with latitude (from south to north)^[5]

纬度基线	样本总量	生态级大气环境资源		宜居级大气环境资源		发展级大气环境资源		大气环境资源储量	
		高值量	百分比/%	高质量	百分比/%	高值量	百分比/%	高值量	百分比/%
21°N	24	20	83.33	15	62.50	14	58.33	12	50.00
23°N	91	75	82.42	62	68.13	46	50.55	40	43.96
25°N	273	211	77.29	162	59.34	102	37.36	87	31.87
27°N	479	303	63.26	239	49.90	156	32.57	126	26.30
29°N	703	356	50.64	289	41.11	191	27.17	157	22.33
31°N	957	428	44.72	358	37.41	248	25.91	201	21.00
33°N	1163	478	41.10	416	35.77	303	26.05	245	21.07
35°N	1369	504	36.82	455	33.24	343	25.05	282	20.60
37°N	1617	540	33.40	500	30.92	400	24.74	339	20.96
39°N	1812	561	30.96	530	29.25	440	24.28	378	20.86
41°N	1960	576	29.39	551	28.11	478	24.39	423	21.58
43°N	2072	592	28.57	577	27.85	532	25.68	488	23.55
45°N	2141	598	27.93	587	27.42	564	26.34	525	24.52
47°N	2203	607	27.55	602	27.33	601	27.28	563	25.56
49°N	2241	615	27.44	610	27.22	621	27.71	585	26.10
51°N	2255	617	27.36	613	27.18	626	27.76	590	26.16
53°N	2258	617	27.33	613	27.15	626	27.72	591	26.17

表5 安康分界线下生态级大气环境资源分布

Table 5 The geographical distribution of the atmospheric environmental resources with ecological criteria divided by Ankang borderline

区域		样本总量	高值样本数量	百分比/%	分区
经度范围	纬度范围				
≥109°E	≤33°N	690	329	47.68	丰富区
<109°E	≤33°N	477	149	31.24	一般区
<109°E	>33°N	287	23	8.01	匮乏区
≥109°E	>33°N	841	117	13.91	相对匮乏区

表6 安康分界线下宜居级大气环境资源分布

Table 6 The geographical distribution of the atmospheric environmental resources with livable criteria divided by Ankang borderline

区域		样本总量	高值样本数量	百分比/%	分区
经度范围	纬度范围				
≥109°E	≤33°N	690	291	42.17	丰富区
<109°E	≤33°N	477	125	26.21	一般区
<109°E	>33°N	287	28	9.76	匮乏区
≥109°E	>33°N	841	170	20.21	相对匮乏区

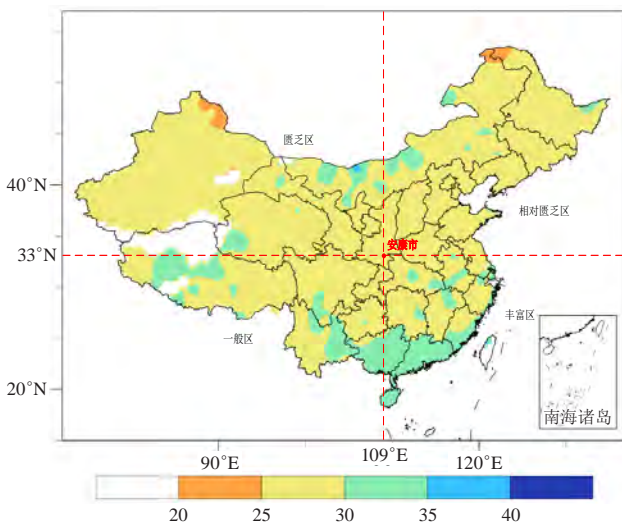


图3 中国生态级大气环境资源的地理分界线—安康线

Fig. 3 The geographic boundary of the atmospheric environmental resources in China with ecological criteria—Ankang borderline

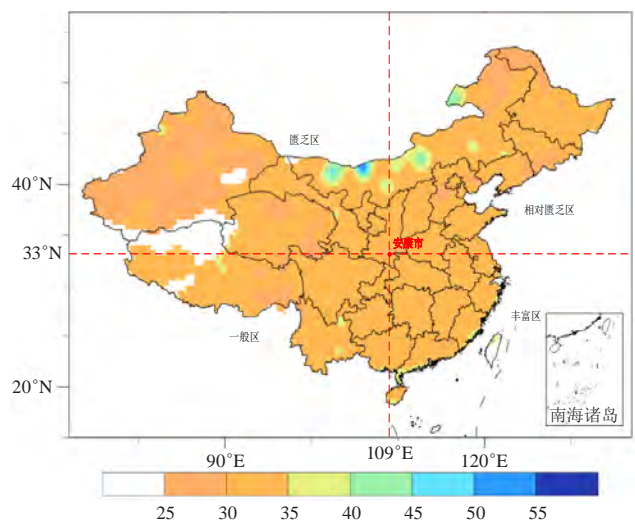


图4 中国宜居级大气环境资源的地理分界线—安康线

Fig. 4 The geographic boundary of the atmospheric environmental resources in China with livable criteria—Ankang borderline

西藏东部一部分地区拉低了整体水平。丰富区虽然没有明显的高值集中区，但海南、广东、福建、浙江沿海的优势比较突出，更重要的是，丰富区与其他三个区域相比，没有明显的低值集中区。因此，在大气环境资源的宜居级水平下，四个区域的划分仍然是合理的，丰富区的优势也是明确的，这一点与表6中的数据也相一致。

继续降低大气污染控制目标，将大气环境资源分级下调到发展级。如表7所示，四个区域的发展级大气环境资源的差距进一步缩小，丰富区和一般区高值占比继续下降，相对匮乏区和匮乏区的高值占比继续上升，并且发生了逆转。如果按照发展级大气污染控制目标，相对匮乏区的大气环境资源最为丰富，甚至还高于丰富区1.43%。匮乏区的发展级大气环境资源已经与一般区接近。

表7 安康分界线下发展级大气环境资源分布

Table 7 The geographical distribution of the atmospheric environmental resources with developmental criteria divided by Ankang borderline

区域		样本总量	高值样本数量	百分比/%	分区
经度范围	纬度范围				
≥109°E	≤33°N	690	219	31.74	丰富区
<109°E	≤33°N	477	88	18.45	一般区
<109°E	>33°N	287	45	15.68	匮乏区
≥109°E	>33°N	841	279	33.17	相对匮乏区

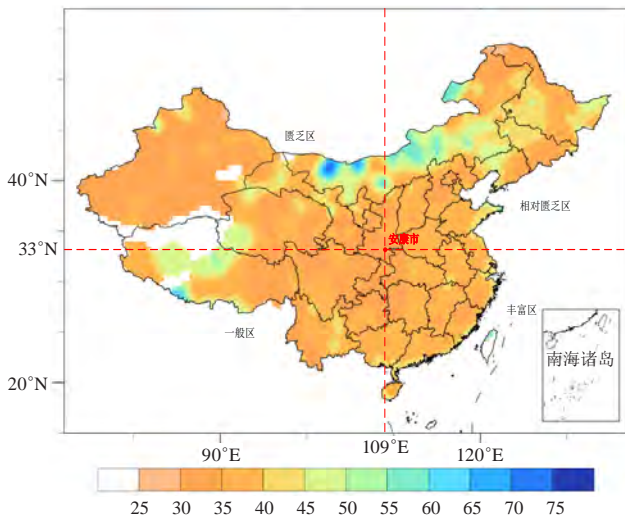


图5 中国发展级大气环境资源的地理分界线—安康线
Fig. 5 The geographic boundary of the atmospheric environmental resources in China with developmental criteria—Ankang borderline

从图5可以看出，相对匮乏区发展级大气环境资源上升，主要是因为在内蒙古东部、东北大部分、山东半岛、辽东半岛等地区出现了大量的高值集中区。

在丰富区，虽然发展级大气环境资源整体上仍处于优势，但缺乏明显的高值集中区，这也是造成丰富区整体水平下降的原因。发展级水平下，匮乏区也出现了明显的高值集中区，这使得匮乏区与一般区的差距缩小。

进一步考察四个区域的大气环境资源储量分布（表8）。相对匮乏区的大气环境资源储量，高值占比已经超过了1/3，而丰富区大气环境资源储量的高值占比与生态级相比，下降了一半以上，减少了24.35%，已经不足1/4。匮乏区与一般区相比，高值占比已经非常接近，且出现了逆转。也就是说，就大气环境资源的储量而言，一般区已经成了匮乏区，丰富区变成了一般区，相对匮乏区变成了丰富区。

表8 安康分界线下大气环境资源储量的分布

Table 8 The geographical distribution of the atmospheric environmental resources in reserve divided by Ankang borderline

区域		样本总量	高值样本数量	百分比/%	分区
经度范围	纬度范围				
≥109°E	≤33°N	690	161	23.33	丰富区
<109°E	≤33°N	477	86	18.03	一般区
<109°E	>33°N	287	54	18.82	匮乏区
≥109°E	>33°N	841	293	34.84	相对匮乏区

从图6可以看出，除了京津冀、陕北外，相对匮乏区的大气环境资源储量丰富。对于丰富区来说，江西大部、福建西部山区、皖南、浙西南、以及湘鄂西部，大气环境资源储量都相对较少，使得丰富区的大气环境资源储量整体下降。一般区的情况和丰富区类似，川渝黔大部分地区大气环境资源储量不足，拉低

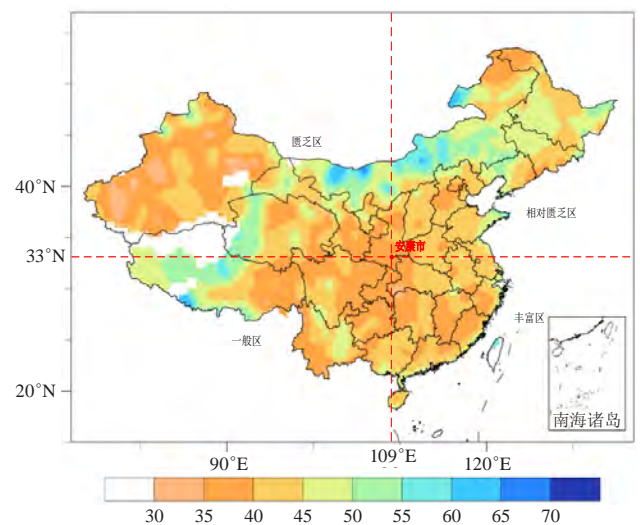


图6 中国大气环境资源储量的地理分界线—安康线
Fig. 6 The geographic boundary of the atmospheric environmental resources in China in reserve criteria—Ankang borderline

了一般区的整体水平，使其成为大气环境资源储量的匮乏区。匮乏区的情况则与相对匮乏区相似，出现了储量丰富的集中区，拉高了整体水平。

由于图3—图6为渲染图，每个色阶代表的ASPI相差为5，并且同时画出了所有的样本点，使得四个区域的颜色区分看上去不是特别明显，尤其是图4。实际上，只要ASPI的周期性数值相差超过1，就可以将两地的大气环境资源看作是具有明显差异。因此，图3—图6很难突出ASPI数值在1~5的差别。

为了清楚地呈现安康分界线的区分效果，图7给

出了不同分级条件下中国大气环境资源高值样本分布的散点图。其中图7a是生态级大气环境资源的高值样本分布，可以比较清楚地看出，安康以南以东地区，高值样本比较集中。值得注意的是，安康分界线划分的四个区域，样本总量不同，不能只通过高值样本的绝对数量来判断大气环境资源的丰富程度，而应该用高值占比来衡量。尽管如此，通过对图7中四张子图的比较，以及结合图1和图2所反映的高值样本占比沿经纬度的变化趋势，还是可以比较清楚地看出，安康线下四个区域大气环境资源的显著差异。

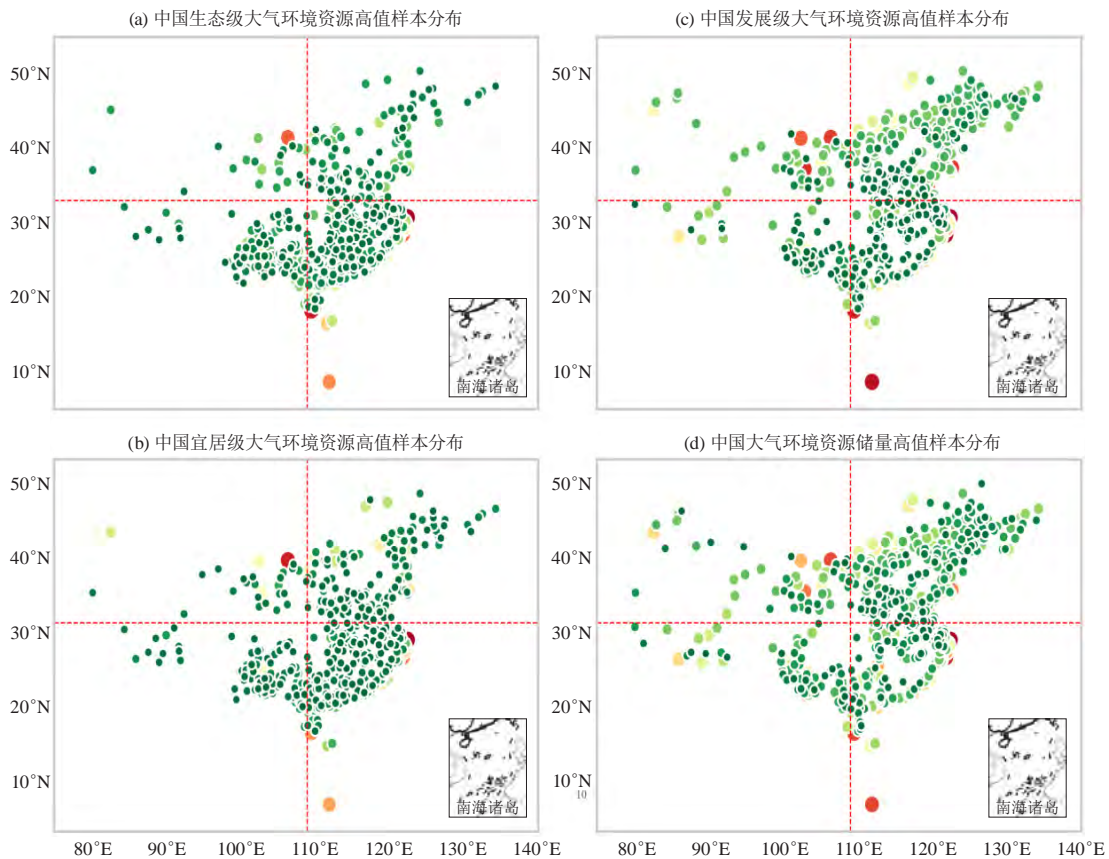


图7 中国大气环境资源的高值样本分布（不同分级）

Fig. 7 The distribution of high-value samples of the atmospheric environmental resources in China (different classification criteria)

图7对不同分级条件下四个区域大气环境资源丰富程度的变化规律，表现得更为明显。图7c与图7b相比，丰富区和一般区的高值样本数量显著减少，而相对匮乏区的高值样本数量显著增加。很明显，发展级大气环境资源，是相对匮乏区发生逆转的分野，这同样也可以看作是中国大气环境资源南北方的等级分野。这意味着，如果将大气污染防治的标准定在发展级，即允许一定程度的污染，这时候，南北方的大气环境资源相差并没有那么悬殊。然而，一旦上调大气

污染防治的标准，比如将空气质量定在宜居级，南北方大气环境资源的差距就会变得比较明显。

整体而言，安康分界线对于中国大气环境资源的地理划分具有典型意义。不考虑污染物排放的时间调整问题，安康分界线下，丰富区的大气环境资源较为丰富。尤为重要是，丰富区的大气环境资源，很少出现低值集中区。因此在丰富区，只要不是污染物排放强度特别高，出现重污染的几率一般较低。与丰富区相比，一般区内出现污染的几率上升，但总体的风

险并不高。而对于相对匮乏区和匮乏区来说，大气污染的几率很高。

前面提到，当污染物排放强度超过大气自然净化能力的最低值时，就会出现大气污染。从这个角度看，大气环境资源匮乏区和相对匮乏区最先出现污染的概率很高。当然，如果考虑到具体的排放问题，由于匮乏区地处西北，人口较少、经济发展相对落后，排放强度有限，出现大面积污染的可能性较低，而地处华北、东北的相对匮乏区，人口密集、经济发达，尤其存在集中布局的重工业，排放强度很大，最容易出现大面积的重污染。相对匮乏区的京津冀及其周边地区，就是典型的代表。当然，在匮乏区的关中地区，由于工业也相对集中，也出现了重污染。相对而言，匮乏区虽然大气环境资源匮乏，但由于排放强度有限，大气污染的程度并不是特别严重。

大气环境资源丰富区，实际上也是经济发达区，中国的经济产出，有一半以上布局在这个区域，排放

强度远超其他三个区域。然而，由于这个区域的大气环境资源丰富，尤其是超低净化能力的占比较低，使这个区域的大气污染程度与相对匮乏区相比，还不算严重。虽然在长三角地区，部分城市的空气质量达不到优良水平，但考虑到其庞大的经济总量和排放强度，空气质量则属于较好的区域，大气环境资源的意义非常明显^[11]。

5 大气环境资源分级变化规律的含义

下调大气环境资源的等级，相对匮乏区和匮乏区的大气环境资源上升，而丰富区和一般区的大气环境资源下降。这一规律可以用大气自然净化能力波形特征来解释（图8）。其中纵轴表示大气自然净化能力指数，即ASPI的大小，取值区间为0~100，值越大，代表大气自然净化能力越强，反之越弱。横轴表示不同的ASPI值占总体的比例。图8给出了四个区域大气自然净化能力的代表波形示意，大致反映了不同区域大气自然净化能力的典型特征。

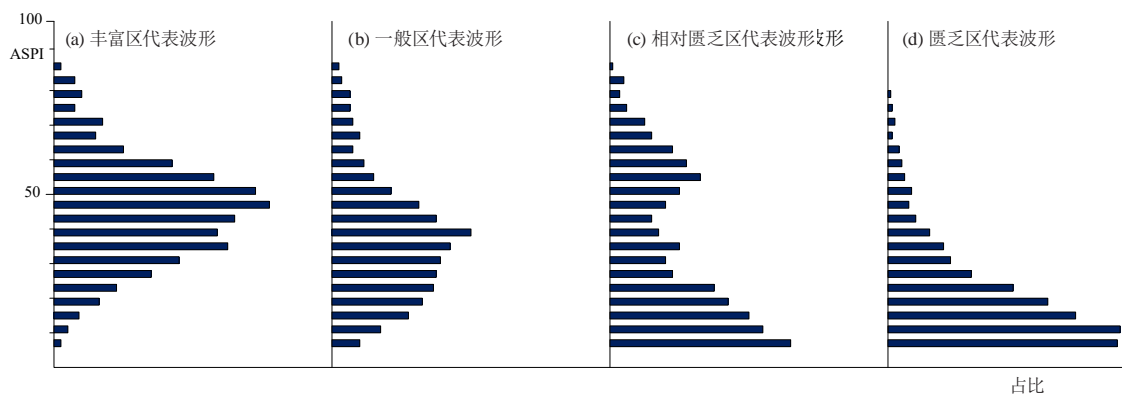


图8 四大区域大气自然净化能力波形特征示意

Fig. 8 Schematic characteristic of air self-purification in four area

丰富区的大气自然净化能力波形整体呈正态分布状，较低的大气自然净化能力和较高的大气自然净化能力占比都较小，中等水平的大气自然净化能力占比较高，并呈现向两侧递减的趋势。这意味着，在不考虑污染物排放时间调整的条件下，污染物排放和大气自然净化能力作为两个相互独立的事件，大气环境自然净化能力的自然配置水平较高。也就是说，处于完全放任状态的污染物排放，由于大气自然净化能力趋于正态分布状，较高排放水平遇到较低净化能力的概率较低，相当于自然状态下提高了大气自然净化能力的利用效率，从而减少了大气污染发生的频次。

一般区的大气自然净化能力波形可以看作是变异的正态分布状，较低的大气自然净化能力占比升高，较高的大气自然净化能力占比下降，大气自然净化能

力整体在中等以下水平集中。这种波形特征的含义是，大气环境资源的整体水平下降，且较低水平的大气自然净化能力占比较高，与丰富区相比，自然状态下的配置效率降低，相同排放情况下，发生大气污染的频次上升。

匮乏区的大气自然净化能力波形特征也比较明显，它已经完全不再具备正态分布的特征，而是整体呈现明显的向下集中趋势，即低水平的大气自然净化能力占比较高，随着大气自然净化能力的提高，占比越来越低。从自然状态下的配置效率看，匮乏区出现大气污染的概率最高。大气自然净化能力的这种分布特征，最容易出现污染物排放超过大气自然净化能力的情况，而出现大气污染。同时，由于较低大气自然净化能力连续出现的比例较大，其发生超重污染的可

能性也比较高。

相对匮乏区的大气自然净化能力波形特征比较特殊，它既有匮乏区的特征，又有丰富区的特征。相对匮乏区的大气自然净化能力波形具有两个占比高值，一个是较低的大气自然净化能力占比较高，另一个是中等以上水平的大气自然净化能力也有一个相对显著的占比。当然，中等以上水平大气自然净化能力占比与较低水平大气自然净化能力占比相比，其绝对水平还是较低的，只是从趋势上看，相对匮乏区的大气自然净化能力在相对高值部分有一个显著的优势，这是其他三个区域不具备的。

其实，可以将相对匮乏区的大气自然净化能力波形分作两部分看。中等净化能力水平以下，它更接近匮乏区的大气自然净化能力波形特征。较低水平的大气自然净化能力占比较大，随着净化能力的升高，占比较小。在发生大气污染的几率方面，相对匮乏区与匮乏区的特点相似，都比较容易发生。由于较低水平的大气自然净化能力占比较高，且容易集中。在相同排放条件下，与丰富区相比，相对匮乏区更容易发生大气污染。同时，相对匮乏区中等水平以上的大气自然净化能力也有一个相对较高水平的占比，这就使得相对匮乏区的大气环境资源，又部分具有丰富区的特征。从统计数据看，相对匮乏区的这一特征主要表现为发展级大气环境资源和大气环境资源储量较高。

中国大气环境资源分级变化规律具有重要的现实意义，具体表现如下：

第一，如果采取放任的环境政策，对大气污染物的排放不进行控制。从大气污染的结果看，大气环境资源储量高的区域具有一定的优势。也就是说，如果走先污染后治理的路子，一开始污染物排放自由放任，工业任意布局（不考虑大气污染因素），等到发展级大气环境资源消耗完毕，大气污染处于超重阶段时再进行治理。在这个过程中，大气环境资源储量高的地区具有更大的环境容量和纳污能力优势。1990年之前的中国大致就处于这个状态，大气环境政策相对宽松，污染物排放控制主要集中在烟尘方面。随着工业化进程的加速，接下来的10年间（1991—2000年），大气污染问题主要表现为酸雨。这一阶段，地处丰富区的东南部发达省份的大气污染比地处相对匮乏区的华北省份要严重，因为此时大气污染处于超重阶段，丰富区的大气环境资源储量并不具有明显的优势。21世纪第一个10年（2001—2010年）间，中国工业化过程逐渐完成，二氧化硫排放增幅放缓，总量进入稳定阶段。当然，此时也是中国大气污染最严重的

阶段，大气环境资源储量消耗殆尽，重污染天气频发。2012年开始，中国进入了以结构性减排为代表的大气污染治理新阶段，同时采用新的空气质量标准，并从总量控制思路转向结果控制思路，以扭转超重污染的局面。

事实上，2010年之前，相对匮乏区的大气环境资源具有一定的优势。由于此时对大气污染的容忍程度较高，空气质量等级较低，环境政策比较宽松，相对匮乏区凭借其丰富的大气环境资源储量，一直在增加污染物的排放强度，直到进入超重污染阶段。2010年前后，京津冀地区的污染物排放总量，比地处丰富区的长三角、珠三角要高出3~4倍甚至更多，而大气污染程度并不比丰富区严重太多。也就是说，在超重污染阶段，相对匮乏区的大气环境资源优势是明显的，这一点对于深入理解中国大气污染的历史过程非常重要。

第二，2012年，中国大气污染治理工作进入新阶段。此后，污染物排放开始出现下降趋势，大气污染从超重阶段转向较重阶段。在这个过程中，相对匮乏区的大气污染治理成效与其他区域相比会比较明显。正如图8所示，相对匮乏区的大气自然净化能力在中等水平以上有一个明显的集中区。这意味着，随着污染物排放强度的下降，一旦触及大气自然净化能力的中等水平区，空气质量就会有一个明显的好转过程，此时相当于释放了一个较大比重的大气自然净化能力，对于空气质量改善具有显著的作用。2013—2019年，京津冀地区通过大幅度削减排放使空气质量获得明显改善就是这个道理。其实，京津冀地区作为大气环境资源相对匮乏区的核心区域，大气污染从超重阶段转向较重阶段的过程中，起作用的正是图7（c）中波形的上半部分，这个过程，减排的效果会比较明显。

第三，随着大气污染治理的不断深入，污染进入较重阶段后，相对匮乏区的大气环境资源储量优势不再起作用，可利用的大气环境资源进入下半段，开始表现为相对匮乏的一面。这意味着，2020年以后，安康以东以北地区，也即华北大部和东北地区，将进入大气污染治理的新阶段。这一阶段，结构性减排的效果会越来越差，空气质量每向前改进一步，都需要付出较大的代价。也就是说，在相对匮乏区，空气质量达到发展级是相对容易，但想要从发展级进入宜居级，则要付出很大代价，而想要从宜居级进入生态级，成本会更高。本质上，这是由相对匮乏区的大气环境资源特征决定的。对于未来10年相对匮乏区的

大气污染治理成效，决不能以2013—2019年的经验推定。

第四，从现实的大气污染控制标准看，安康分界线的意义明显。如果最终要实现生态级的空气质量标准，则丰富区的大气环境资源优势明显。相对匮乏区和匮乏区需要付出很大的经济代价，才能获得生态级空气质量。虽然现阶段相对匮乏区的大气污染治理取得了一定的成绩，但以后的工作会越来越难。大气污染治理成效与污染物排放减少不是等比例变动的，其变动关系主要取决于该地区的大气自然净化能力波形特征，以及大气污染所处的阶段。或者也可以表述为，大气污染治理成效与污染物排放的关系，主要取决于大气环境资源的整体特征，以及大气环境资源的消耗程度。

第五，大气环境的分级管理问题，应该以大气环境资源为基础，而不是以大气污染的现实状况为基础^[12]。如果不考虑各区域大气环境资源的差异，制定相同的空气质量标准。对于大气环境资源较少的区域来说，就必须牺牲大量的经济活动，以减少大气环境资源的消耗。当然，这还要看空气质量的具体标准。如果将空气质量标准定在发展级，即承受一定程度的大气污染，此时各区域只要将大气环境资源的消耗控制在发展级以下就行。这种情况下，发展级大气环境资源是各区域制定排放控制目标的依据。是否具有大气环境资源方面的优势，主要取决于发展级大气环境资源的多寡。类似地，如果将空气质量标准定在宜居级，就需要按照宜居级大气环境资源的多寡来判定是否具有大气环境资源优势。因此，对于以安康线为基础划分的四个区域来说，采用不同的空气质量标准，其大气环境资源的优势也不同。如果采取相对严格的空气质量标准，则相对匮乏区和匮乏区的劣势明显。最近几年，中国加快了生态文明建设的步骤，空气质量标准提升，环境政策收紧，执行力加强，地处相对匮乏区的华北地区、东北地区 and 地处匮乏区的关中地区，经济增长与大气污染治理的矛盾明显加剧，表现出前所未有的压力。

不同地区采取相同的空气质量标准，主要考虑的是生态公平问题，不能因为大气环境资源少就应该承受污染。当然，如果考虑到经济公平问题，则不同地区应该采取不同的空气质量标准，进而建立大气环境分级管理体系。现阶段，一种比较适宜的分级原则是，坚持生态公平优先，同时兼顾经济公平。首先，划定一个空气质量的下限，比如发展级空气质量标准，所有区域的空气质量不能低于该标准，以保障生

态公平。同时，为了体现经济公平，大气环境分级管理的目标应该是让各地的排放水平接近相同，而空气质量标准不同。然后，根据不同地方的大气环境资源状况，在保障空气质量基本目标的前提下，制定差异化的空气质量标准。既保障生态公平，又不失经济公平。例如，在大气环境资源匮乏区和相对匮乏区，可以将空气质量标准定在发展级，在大气环境资源一般区，则定在宜居级，而在大气环境资源丰富区，则定在生态级。当然，在大的区划内，还应该考虑小尺度的大气环境资源差异，如不同地市和县域之间。不管如何，大气环境的分级管理思路，应该以大气环境资源为基础，而不应该以大气污染的现实情况为基础。根据大气污染的现实情况制定大气环境分级管理标准，既不可能保证生态公平，也不能保证经济公平。

其实，坚持生态公平优先，同时兼顾经济公平的原则也只是权宜之计，只是相对于单一标准的优化，并不能从根本上解决问题。长期看来，想要实现大气环境资源的有效配置，最好的方法是收取类似大气环境资源使用税性质的资源费，让大气环境资源以生产要素的形式真正参与到经济活动中来^[13]。结合不同地区的经济发展状况，核算大气污染造成的边际损失，按照损失等价原则，推动大气环境资源的合理定价，通过价格机制，最终实现中国大气环境资源的空间优化配置。

6 结论

大气环境资源是大气环境经济性的体现，也是人类发展到一定阶段的产物。中国的大气环境资源整体呈现南多北少，东多西少的状况。109°E线和33°N线可以作为中国大气环境资源分布的地理分界线，即安康分界线。安康分界线根据生态级大气环境资源分布情况将中国大致分为四个区域，陕西省安康市以东以南地区为丰富区，以西以南地区为一般区，以东以北地区为相对匮乏区，以西以北地区为匮乏区。中国生态级大气环境资源分布空间差异明显，丰富区与匮乏区相差悬殊。下调大气环境资源等级，大气环境资源分布的空间差异性缩小趋势明显。尤其大气环境资源储量方面，丰富区与相对匮乏区甚至出现了逆转。中国大气环境资源分级变化规律具有重要的现实意义，不仅可以解释近几十年来中国大气污染治理的历史进程，还可以作为大气环境分级管理的基础，指导未来的大气污染防治工作。明确中国大气环境资源的地理分布，有助于平衡大气污染治理与经济矛盾的矛盾，为制定差异化的大气环境管理目标提供理论依据和数

(下转124页)

性, 部分地区的试点改造也在一定程度上取得了积极成果。尽管如此, 城市应对气候变化的工作依然任重道远, 今后也需要更多的政策支持及人力、科技与经济投入。

参考文献

- [1] 郑艳. 推动城市适应规划构建韧性城市: 发达国家的案例与启示. 世界环境, 2013(6): 50-53.
- [2] Tyler S, Moench S. A framework for urban climate resilience. *Climate and Development*, 2012(4): 311-326.
- [3] 冯潇雅, 李惠民, 杨秀. 城市适应气候变化的国际经验与启示. 生态经济, 2016(11): 120-124, 135.
- [4] 管力. 韧性城市下应对气候变化的适应性规划探索. 共享与品质: 2018中国城市规划年会论文集(01城市安全与防灾规划). 中国城市规划学会、杭州市人民政府、中国城市规划学会, 2018: 9.
- [5] 国家发展和改革委员会. 国家应对气候变化规划(2014—2020). 2014 [2019-08-20]. <http://www.sdpc.gov.cn/zcfb/zcfbtz/201411/W020141104584717807138.pdf>.
- [6] 洪亮平, 华翔, 蔡志磊. 应对气候变化的城市规划响应. 城市问题, 2013(7): 18-25.
- [7] 姜允芳, Eckart L, 石铁矛, 等. 城市规划应对气候变化的适应发展战略: 英国等国的经验. 现代城市研究, 2012, 27(1): 13-20.
- [8] The City of New York. PlaNYC 2030: a greener, greater New York. 2019 (2019-08-15). <https://www1.nyc.gov/site/sirr/report/report.page>.
- [9] 杨佳杰, 朱霞. 大城市气候响应规划研究: 以“芝加哥气候行动计划”为例. 中国城市规划年会论文集, 2015: 430-438.
- [10] Greater London Authority (GLA). Managing risk and increasing resilience: the mayor's climate change adaptation strategy. 2011 [2019-10-26]. <http://www.london.gov.uk/sites/default/files/Adaptation-oct11.pdf>.
- [11] The Vancouver City Council. Climate change adaptation strategy. (2012-11-07)[2019-06-25]. <http://vancouver.ca/files/cov/VancouverClimate-Change-Adaptation-Strategy-2012-11-07.pdf>.
- [12] Toronto Environment Office, City of Toronto. Ahead of the storm preparing Toronto for climate change. 2008 [2019-04-18]. http://www.toronto.ca/teo/pdf/ahead_of_the_storm.pdf.
- [13] The City of Copenhagen. Copenhagen climate adaptation plan. 2015 (2019-02-19). <http://www.kk.dk/english>.
- [14] The City of Rotterdam. Rotterdam climate adaption strategy. (2012-12-10) [2019-01-10]. http://www.deltacities.com/documents/20121210_RAS_EN_lr_versie_4.pdf.
- [15] Parks R, McLaren M, Toumi R, et al. Experiences and lessons in managing water from Cape Town. Grantham Institute Briefing

- paper, 2019.
- [16] 杨巍, 高续续. 三大世界城市应对气候变化的经验与启示. 北京化工大学学报: 社会科学版, 2015 (2): 46-50.
 - [17] 国家发展和改革委员会, 住房和城乡建设部. 关于印发城市适应气候变化行动方案的通知(发改气候〔2016〕245号). (2016-02-16) [2019-08-20]. http://www.ndrc.gov.cn/zcfb/zcfbtz/201602/t20160216_774721.html.
 - [18] 国家发展和改革委员会, 住房和城乡建设部. 关于印发气候适应型城市建设试点工作的通知(发改气候〔2017〕343号). (2017-02-27)[2019-08-20]. <http://www.ndrc.gov.cn/zcfb/zcfbtz/201702/W020170227362192328438.pdf>.
 - [19] 韩贵锋, 陈明春, 曾卫, 等. 城市高温灾害的规划应对研究进展. 西部人居环境学刊, 2018, 33(2): 77-84.
 - [20] Robinson P J. On the definition of a heat wave. *Journal of Applied Meteorology*, 2001, 40(4): 762-775.
 - [21] 邓玲, 彭洁, 李好, 等. 城市发展适应气候变化策略研究: 以岳阳为例. 中国气象学会第35届中国气象学会年会 S6 应对气候变化、低碳发展与生态文明建设. 中国气象学会: 中国气象学会, 2018: 10.
 - [22] 李少轩. 干旱事件的过程化描述及其识别应对研究. 西安理工大学, 2019.
 - [23] Ziervogel G, New M, Liu W. Making cities water-wise and climate-resilient: lessons and experience from the Cape Town drought. *Landscape Architecture Frontiers*, 2019, 7(3): 94-99.
 - [24] 上海市气候变化研究中心, 上海市节能减排中心. 上海市“十三五”适应气候变化专门规划(上报稿). 2016(10).
 - [25] 朱黎青, 彭菲, 高翅. 气候变化适应性韧性城市视角下的滨水绿地设计: 以美国哈德逊市南湾公园设计研究为例. 中国园林, 2018, 34(4): 41-46.
 - [26] Liu Y. The reference value of American low impact development to the theory and application of Chinese sponge city. *Proceedings of the 2019 3rd International Forum on Environment, Materials and Energy (IFEME 2019)*, 2019.
 - [27] Arahueta A, Olcina J. The potential of sustainable urban drainage systems (SuDS) as an adaptive strategy to climate change in the Spanish Mediterranean. *International Journal of Environmental Studies*, 2019, 76(2): 1-16.
 - [28] Kazemi F, Golzarian M R, Myers B. Potential of combined water sensitive urban design systems for salinity treatment in urban environments. *Journal of Environmental Management*, 2018, 209: 169-175.
 - [29] 李梦琦, 王慧. 域外国家沿海地区适应海平面上升的法律保障机制及启示. 浙江海洋大学学报: 人文科学版, 2018, 35(5): 1-7.
 - [30] 周韵, 陈天, 张赫. 新加坡填海造地区域的空间演变与规模变化趋势. 国际城市规划, 2016, 31(3): 71-77.
 - [31] 王量量, 韩洁. 新加坡海平面上升应对策略对我国沿海城市发展的启示. 城市建筑, 2017(28): 119-123.

(上接117页)

据支撑, 做到生态公平优先, 兼顾经济公平。当然, 想要实现大气环境资源的长期有效配置, 还要结合地区经济差异, 核算污染物排放的边际影响和经济损失, 进而通过大气环境资源的有效定价来实现长期可持续发展。

参考文献

- [1] 蔡银寅. 大气污染治理的经济学方法. 北京: 科学出版社, 2017.
- [2] Zivin J G, Neidell M. Environment, health, and human capital. *Journal of Economic Literature*, 2013, 51(3): 689-730.
- [3] 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.
- [4] 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.

- [5] 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.
- [6] 柴发合. 我国大气污染治理历程回顾与展望. *环境与可持续发展*, 2020, 45(3): 5-15.
- [7] 胡德志. 重要的地理分界线. 学知报, 2011-8-1-B03.
- [8] 胡焕庸. 中国人口之分布: 附统计表与密度图. *地理学报*, 1935, 2(2): 33-74.
- [9] 龚胜生, 陈云. 中国人口疏密区分界线的历史变迁及数学拟合与地理意义. *地理学报*, 2019, 74(10): 2147-2162.
- [10] 程叙耕, 何金海, 车慧正, 等. 1980—2010年中国区域地面风速对能见度影响的地理分布特征. *中国沙漠*, 2013, 33(6): 1832-1839.
- [11] 贾艳红, 陆赛娣, 冯小莉, 等. 中国雾霾分布及其组成相关性分析. *测绘与空间地理信息*, 2015, 38(12): 9-12.
- [12] 柴发合, 王淑兰, 王鐸一, 等. 中国城市空气质量分级管理战略探讨. *环境与可持续发展*, 2011, 36(5): 5-7.
- [13] Ng Y K. Quasi-Pareto to social improvements. *The American Economic Review*, 1984, 74(5): 1033-1050.