

参赛队员姓名： 姜皓文

中学： 深圳国际交流学院

省份： 广东省

国家/地区： 中国

指导教师姓名： 刘恒奇

指导教师单位： 深圳国际交流学院

论文题目： 基于空间视角下的中国大陆各省环境效率对比研究

基于空间视角下的中国大陆各省环境效率对比研究

摘要

本研究从人类面临的全球变暖危机的大背景出发，试图建立中国大陆各省的碳排放等影响气候变暖其他的温室气体的排放的环境绩效计算模型，并从空间地理上找到其排放的规律，目的在为早日实现“碳中和”的目标寻求理论和实证的支持。从方法上，本研究用到了中国大陆三十个省市（除西藏）的面板数据，首先用 DEA 模型衡量计算了各省的碳排放环境绩效，之后用空间自回归指数（全局自回归、局部自回归）判定了各省各年度各环境绩效指标在空间地理上的集聚程度。同时，本研究运用了数据可视化的手段，更好地呈现了环境绩效和各指标的时空数据的分布状况。

关键词：碳中和、空间自相关、环境绩效、数据可视化

目录

1	前言	4
2	DEA 计算环境绩效，空间自回归模型的应用	6
2.1.	环境生产技术集和非径向 DEA 模型	6
2.2.	空间集聚模式分析	8
3.	数据	10
3.1.	投入要素	11
3.2.	产出：期望产出和非期望产出	12
3.3.	投入及产出的数据描述性统计	13
4.	环境绩效测算结果及空间地理分布分析	22
4.1	环境绩效指数	22
4.2.	空间地理分布结果	24
4.2.1.	二氧化碳	24
4.2.2.	二氧化硫	28
4.2.3.	氮氧化物	32
4.2.4.	粉尘（烟尘）	36
5.	结论	41
	参考文献	42
	附录	44
	二氧化碳中国大陆各省绩效计算结果	44
	二氧化硫绩效计算结果	45
	氮氧化物绩效计算结果	46
	烟尘（粉尘）计算结果	47
	致谢	48

1 前言

2021 年 8 月 9 号, 政府间气候变化专门委员会 (The Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) 在第六次评估报告 中指出全人类正在面临严峻的气候变化形势, 而证据表明, 造成这种气候变化的主要原因是人类的生产活动。节能减排的任务刻不容缓。研究表明如果可以减少引起气候变化的气体的排放诸如二氧化碳及温室气体, 并且减少化工污染的排放量, 则可以有效的防止全球气候恶化。

邓等人在 2020 年的文章《何谓“碳中和”》中提到了中和 (neutrality) 的概念。他们指出“将全球温升稳定在一个给定的水平意味着全球“净”温室气体排放需要大致下降到零, 即在进入大气的温室气体排放和吸收的汇之间达到平衡。这一平衡通常被称为中和”^[1]。“中国将提高国家自主贡献力度, 采取更加有力的政策和措施, 二氧化碳排放力争于 2030 年前达到峰值, 努力争取 2060 年前实现碳中和。”^[2]

对于实现这一目标, 有学者通过研究指出, 需要电力部门减少或完全不使用煤炭, 而使用其他清洁能源及先进的技术作为替代的方式, 会使得碳中和的实现有了多种路径的可能。王和张 2020 年的文章总结了 Hector Pollitt 和 Adair Turner 等人的这些研究都着重强调了电力部门的生产方式转型在这一过程中的重要性。

与此同时, 尽管近几年核电、风电、太阳能发电量有所提高, 但受制于“富煤、贫油、少气”的能源情况, 我国的火电发电方式仍然以煤作为主要的发电资源, 这样做不仅造成了资源的浪费也污染了环境。火力发电顾名思义就是用可燃物自身所带的能量去进行发电。虽然自 2014 年以来, 火力发电量占我国大陆地区发电量的比例开始下降, 但是其发电量在我国大陆地区总发电量的占比仍然很高。2021 年的前 5 个月, 火力发电更是占了我国大陆地区发电总量的 73.7%, 同比增长了 16%。火力发电的原理是通过燃烧煤炭的方式排放以二氧化碳为主的温室气以及其他大气污染物。大气污染物的排放是形成雾霾天气的主要原因之一。中国环境监测总站在《2014 年环境统计年报》中提到, 我国 2014 年二氧化硫排放量达到了 1974.7 万吨, 氮氧化物排放量为 2078 万吨, 大陆地区烟 (粉) 尘排放量为 1740.8 万吨, 其中工业二氧化硫排放量, 工业氮氧化物排放量, 工业烟 (粉) 尘排放量分别占我国大陆地区比例为 88.1%, 67.6%, 83.6%^[3]。在调查统计的多个工业行业中, 电力行业是产生二氧化硫和氮氧化物最多的行业, 其次是热力生产和供应业所产生的二氧化硫, 电力行业是颗粒物排放的重要来源之一 (中国环保部)。

国家能源部“十三五”规划中就出台了对于火力发电行业的相关政策, 政策指出要把保护环境放在首位, 而保护环境的其中一个重要指标是节能减排。为了实现节能减排的国家要求并达到 2060 年我国对世界碳中和的承诺, 最首要的任务是要了解这些排放物的排放现状。而以其为标准计算的环境效率指数无疑是实现这一任务的有效手

ⁱ http://www.cnemc.cn/jcbg/zghjtjnb/201712/t20171206_647159.shtml

段。因此我们需要对这些排放物的环境效率进行核算，并找到其所可以对应的解释的环境问题现状及规律。这样会帮助我们达到节能减排的目标和碳中和的愿景。

已有学者利用了 DEA 模型衡量环境效率，并将其作为地区生产的一个指标。如，Xie 等（2014）使用环境 Malmquist 指数测算了 26 个 OECD 国家电力部门的环境效率^[3]。近几年 DEA 被广泛应用于能源与环境效率的评估中。许多学者对 DEA 模型在应用方面或在理论发展方面进行了改进。Zhang（2013）等总结了在能源和环境模型中，1993 年到 2013 年间涉及径向 DEA 的应用^[4]。Sueyoshi（2013）等从生产、传输、分配和销售四个阶段总结了电力行业的效率研究，并总结了在环境评估中，使用径向和非径向 DEA 方法的优缺点。研究发现，当需要处理期望和非期望两种产出的情况下，相较于径向 DEA，非径向 DEA 模型拥有更明显的优势^[5]

一类非径向 DEA 研究方法是通过使用松弛变量来计算无效率，这类方法可以避免定义方向距离。Wang 等在 2013 年的研究中使用了 RAM 模型，他们评估了我国 2006 到 2010 年间各地区的环境绩效，发现大多数地区的环境绩效水平仍有巨大的提升空间，并提出扩大生产规模可能是一种可行的方式^[6]。Li 等（2014）提出了超级 SBM 模型，其采用弱处置的假设去解决非期望产出的可能性的逻辑问题^[7]。

而另一类 DEA 方法则需要定义方向距离。它不同于径向方向距离函数之处在于可使绩效模型中所涉及的不同的投入和产出要素按照不同的比例增加或者缩减，而非要求他们按一定比例增减。Wang（2013）等在研究中就使用了定义非径向方向距离函数的 DEA 方法。结果发现能源技术的进步与效率的提升是推动能源生产率提升主要原因^[8]。2010 年，在评估中国 252 家火电厂绩效时使用了 Zhang（2014）等构造的联合环境能源效率指数，该指数是在改进了 Zhou（2012）等的研究中构建的指标的基础上而来的^{[9][10]}。火电行业在生产过程中会产生大量大气污染物，二氧化碳会对气候变化带来影响，而其余的污染物会对人体的身体健康带来损害。

而另一类 DEA 方法则需要定义方向距离。它不同于径向方向距离函数之处在于可使绩效模型中所涉及的不同的投入和产出要素按照不同的比例增加或者缩减，而非要求他们按一定比例增减。Wang（2013）等在研究中就使用了定义非径向方向距离函数的 DEA 方法。结果发现能源技术的进步与效率的提升是推动能源生产率提升主要原因^[8]。2010 年，在评估中国 252 家火电厂绩效时使用了 Zhang（2014）等构造的联合环境能源效率指数，该指数是在改进了 Zhou（2012）等的研究中构建的指标的基础上而来的^{[9][10]}。火电行业在生产过程中会产生大量大气污染物，二氧化碳会对气候变化带来影响，而其余的污染物会对人体的身体健康带来损害。

本文目的主要在于通过 DEA 模型和空间计量经济学模型，从空间分布的角度分析这种环境绩效的分布是否在空间地理上存在一定的规律，从而找出促进中国提升环境效率的内在途径。具体研究内容分布如下，第二部分阐述了 SBM-DEA 和空间相关性的方法，第三部分说明数据来源并阐述了实证研究的过程，第四部分呈现了研究结果及讨论，最后一部分则展现结论及相关的政策启示。

2 DEA 计算环境绩效，空间自回归模型的应用

2.1. 环境生产技术集和非径向 DEA 模型

地区生产总值的大小可以反应经济活动中进行的生产活动的规模和成绩，即我们所期望从生产活动中获得的期望产出。但与此同时，生产活动进行中也不可避免地会产生碳排放及二氧化硫，氮氧化物和烟尘等非期望产出。而后者是不包括在经济活动产出的测算当中的。也就是说，这些非期望产出在经济生产上并不作为价值指标，因此也不能在地区生产总值的数据上体现出来。

因此我们需要构建出一种可以将经济生产活动和环境污染排放物结合起来的模型，从而对各地的碳排放、排污指标进行有效测算，并作为环境绩效的考量因素。为测算各地的环境绩效，首先我们需要构造一个生产可能性集，这个集里需要包含期望和非期望两种产出，即环境生产技术（Färe, 2007）^[11]。其次，设定几种生产要素，如资本要素，即每个省份的生产部门总共投入资本（K）及化石燃料（F）还有必要的劳动力要素（L）。然后设定生产出的期望产出为地区生产总值（E），同时，产生四种非期望产出：二氧化碳（B1）、二氧化硫（B2）、氮氧化物（B3）、烟尘（B4）。则其生产过程可表示为 $T = \{(K, L, F, E, B_1, B_2, B_3, B_4) : (K, L, F) \text{ 生产 } (E, B_1, B_2, B_3, B_4)\}$ 公式 1。

$$T = \{(K, L, F, E, B_1, B_2, B_3, B_4) : (K, L, F) \text{ 生产 } (E, B_1, B_2, B_3, B_4)\} \quad \text{公式 1}$$

环境生产技术满足两个假设：

$$\text{If } (K, L, F, E, B_1, B_2, B_3, B_4) \in T \text{ \& } B_1 = 0, B_2 = 0, B_3 = 0, B_4 = 0, \rightarrow E = 0 \quad \text{公式 2}$$

$$\text{If } (K, L, F, E, B_1, B_2, B_3, B_4) \in T \text{ \& } 0 \leq \theta \leq 1, \rightarrow (K, L, F, E, \theta B_1, \theta B_2, \theta B_3, \theta B_4) \in T \quad \text{公式 3}$$

$\text{If } (K, L, F, E, B_1, B_2, B_3, B_4) \in T \text{ \& } B_1 = 0, B_2 = 0, B_3 = 0, B_4 = 0, \rightarrow E = 0$ 公式 2 为零联合性假设，表明各地在生产期望产出的同时，必然伴随着二氧化碳、二氧化硫、氮氧化物、烟尘等非期望产出的排放。如果没有非期望产出，那么也不会有期望产出。而避免污染物排放的唯一办法是停止生产活动。

$\text{If } (K, L, F, E, B_1, B_2, B_3, B_4) \in T \text{ \& } 0 \leq \theta \leq 1, \rightarrow K, L, F, E, \theta B_1, \theta B_2, \theta B_3, \theta B_4 \in T$ 公式 3 为弱可处置性假设，表明在投入量保持不变的情况下，降低非期望产出的行为必然会引起期望产出的减少，这意味着环境污染物的减排需要付出经济代价。

SBM (Slack Based Measure) 模型，即至前沿最远距离模型，由 Tone (2001) 提出^[12]。作为非径向、非角度的数据包络分析方法，它遵循了 DEA 的基本思想，即用“最小的”或“匹配最紧密的”凸面包络投入，来产出数据集，使其所得到数据集的边界构建一个相对最优的技术前沿。SBM 模型提供了松弛问题的有效改进途径，解决

了在最优解中松弛改进在效率值测量的问题。具体而言，我们用 $S^- \in R_m$, $S^+ \in R_s$ 分别代表投入与产出的松弛，则某一特定的 DMU(Dscision Making Unit,即决策单元) (X_0, Y_0) 可以表示为

$$x_0 = X\lambda + s^-,$$

$$y_0 = Y\lambda - s^+.$$

Tone 定义了生产指标 p ，用来表示投入产出效率水平。可以证明：

- 1) 当数据的度量单位发生变化时， p 保持不变；
- 2) p 随着投入、产出松弛的增加呈单调递减性；
- 3) $0 \leq p \leq 1$ 。

$$\min p = \frac{1 - \left(\frac{1}{m}\right) \sum_{i=1}^m \frac{s_i^-}{x_{i0}}}{1 - \left(\frac{1}{s}\right) \sum_{r=1}^s \frac{s_r^-}{y_{r0}}}$$

$$s.t. \ x_0 = X\lambda + s^-;$$

$$y_0 = Y\lambda - s^+;$$

$$\lambda \geq 0, s^- \geq 0, s^+ \geq 0$$

公式 4

Tone (2007) ^[13] 提出了加入非期望产出的 SBM 模型，即给一个坏产出指标：

$$\min p' = \frac{1 - \left(\frac{1}{m}\right) \sum_{i=1}^m \frac{s_i^-}{x_{i0}}}{1 + \frac{1}{s_1 + s_2} \left(\sum_{r=1}^{s_1} \frac{s_r^g}{y_{r0}^g} + \sum_{r=1}^{s_2} \frac{s_r^b}{y_{r0}^b} \right)}$$

$$s.t. \ x_0 = X\lambda + s^-;$$

$$y_0^g = Y^g\lambda - s^g;$$

$$y_0^b = Y^b\lambda + s^b;$$

$$\lambda \geq 0, s^- \geq 0, s^g \geq 0;$$

$$s^b \geq 0$$

公式 5

当 $p = 1$ 时，则说明被评价 DMU 为强有效，不存在径向模型的弱有效问题。当 $0 < p < 1$ 时，某 DMU 是非有效的，那么它可以通过改进消除投入产出的松弛实现有效。在本研究中，针对中国 30 个省级行政区划（不含西藏、香港、澳门、台湾）作为决策单元

DMU, y_0^g 表示各省预期产出一地区生产总值, y_0^b 表示非期望的伴随生产活动进行所产出的二氧化碳, λ 为权重向量, s_1 和 s_2 分别表示期望产出和非期望产出的数目, s 表示投入产出的松弛向量。 s^g and s^b 分别表示期望产出不够的部分和非期望产出多余的部分。这样, p' 的分子和分母就分别表示了投入的非效率和产出的非效率。对于一个任意的生产决策部门 DMU, 即某时某刻的省级行政单位, 如果想要使得生产最终是有效的, 就必须满足 $p'=1$, $s^- = 0$, $s^g = 0$, 和 $s^b = 0$ 的条件。否则即产生无效生产。

由于数据为面板数据, 即我们要考虑的问题是在多个年份下的各地生产的环境绩效, 因此选择用窗口 SBM-DEA 模型。窗口 DEA (Window DEA) 就是把每个 DMU 在不同时期内的数据看作是相对独立的。例如, 在 2008 年到 2018 年期间, 一共有 11 个年份, 设置为 11 个窗口。对于 30 个省级行政区划 (不含西藏、香港、澳门、台湾) 下的二氧化碳排放决策部门 DMU 来说, 就相当于每一个年份有 30 个 DMU, 那么一共有 $30 \times 11 = 330$ 个 DMU。因此研究设计上, 我们对于每一个省 (市、自治区) 在 11 年间的二氧化碳排放的环境绩效进行平均测算, 就可以得到 11 年以来的该省份 (市、自治区) 的平均环境绩效。或者构建一个时空面板, 将同一个年份的二氧化碳排放绩效作为单独考量的指标, 计算不同年份的二氧化碳排放绩效的空间自回归系数。

2.2. 空间集聚模式分析

空间自相关是一种空间数据分析方法, 透过统计方法, 进行空间自相关性程度的计算, 以分析空间单元在空间上分布现象的特性。空间自相关系数被分为全局空间自相关和局域空间自相关。

全局莫兰指数 (Moran' s I 指数), 是常用的空间自相关分析工具, 通过分析整个区域的关联性, 可以反映出整片空间地理上邻接或者空间临近的区域属性的相似度。其计算公式如下:

$$I = \frac{n \cdot \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{S_0 \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad \text{公式 6}$$

其中, I 为莫兰指数。以二氧化碳各地区环境绩效值为例来计算莫兰指数, 则有 x_i 和 x_j 分别为区域 i 和区域 j 的某一年的二氧化碳排放的环境绩效值, $\bar{x}$ 为各地区的二氧化碳排放的环境绩效平均值。

重要的, 要确定空间权重矩阵。在莫兰指数公式里, w_{ij} 用来表示地理上邻接空间权重矩阵的元素数值。权重矩阵由行政边界的毗邻状况定义, 并有多种表示方法, 具体算法由研究者进行选择。常用的算法有二进制空间权重矩阵和行政区划间的质心距离为主的空间矩阵。若采用二进制权重矩阵算法, 当 $w_{ij} = 1$ 时表示地区 i 和地区 j 行政边界上毗邻, 而当 $w_{ij} = 0$ 时表示地区 i 和地区 j 行政边界上不接壤。

本研究采用的是离本地最近的几个 “邻居” (knn) 算法来计算权重矩阵。具体而言, 即选取每个行政区划单元 DMU 的 8 个最临近单位作为权重矩阵的算法, 结果由

Python Pysal 包自动生成。这样，就得到了一个有关大陆地区各行政地区的空间权重矩阵。所有空间权重的聚合为 S_0 ($S_0 = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij}$)。

全局莫兰指数的取值范围为-1 到 1。当该指数大于 0 时，存在空间正相关，且指数值越大则表示其空间分布的聚集越明显。当该指数小于 0 时，存在负的空间自相关，其空间分布趋于分散。而当莫兰指数为 0 时，则说明该属性，即二氧化碳排放的环境绩效在以行政区划为边界的空间地理上存在随机性。

而对莫兰指数的数值判定可以运用到统计学上假设检验的方法。我们提出零假设即“二氧化碳排放的环境绩效莫兰指数为 0”，即全局莫兰指数的期望为 $E(I) = -\frac{1}{n-1}$ 。通过标准正态分布计算得到其对应的 p 值和 z 值。当 p 值大于所设定的范围（通常为 5%）时，我们不能拒绝原假设，因此莫兰指数为 0，即不存在二氧化碳排放的环境绩效的空间分布相关性，其分布是空间上随机的。相反当 p 小于假设检验中的范围，即 5%，此时若 z 值为正，则为统计上的空间正相关，即二氧化碳排放的环境绩效在以行政区划为边界的地理分布上存在集聚效应，二氧化碳排放的环境绩效高的地区常常和二氧化碳排放的环境绩效高的地区毗邻。若 z 为负数，即二氧化碳排放的环境绩效高的地区常常和二氧化碳排放的环境绩效低的地区相邻。之后，用同样的方法可以分别算出各地的某一年二氧化硫、氮氧化物和烟尘绩效的莫兰指数。

空间是同质的是全局自相关的前提条件。全局自相关系数是将一个指数应对于所有地区，也就是只存在一种充满整个区域的分布趋势。但实际上各局部区域很难满足空间是同质的这一假设前提。现实中常常存在的是空间异质性。此外，全局呈现的空间自相关性也可能无法应用到局部，即当全局呈现了空间自相关性时，局部空间未必有空间自相关性。这就要求在探讨此问题时，应当采取更精确的指标进行衡量比对，从而进一步找出存在集聚趋势或者分散趋势的具体位置/地区。

本文采用局部指数（Local Indicators of Spatial Association, 简称 LISA）检验局部地区是否存在变量集聚现象。LISA 是 Anselin 教授在 1995 年的时候提出来的^[15]。其中的局部莫兰指数具体为，地域单元*i*的局部莫兰指数 I_i 可以度量与其周围地域单元之间的关联性，即：

$$I_i = \frac{n \cdot (x_i - \bar{x})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sum_{j=1}^n w_{ij} (x_j - \bar{x}) \quad \text{公式 7}$$

每一个地区的局部莫兰指数 I_i 只适用于度量这个地区的空间自相关程度。局部空间自相关的加总也可以反映整体的全局空间自相关程度。局部莫兰指数中空间矩阵权重的含义同全局莫兰指数，即 w_{ij} 和 S_0 。这种定义下的局部莫兰指数 I_i 的和为全局莫兰指数 I 。局部莫兰指数也是构造统计学假设检验，在标准正态分布的基础上计算其 z 值和 p 值，从而判断某一地区 i 是否存在空间集聚或分散分布。

3. 数据

本研究以中国除西藏（数据缺失）、香港、澳门和台湾的中国大陆 30 个省级行政区划的固定资本存量、城镇就业人员、能源消耗（煤炭）作为投入要素，以地区生产总值作为期望的产出。二氧化碳、二氧化硫、氮氧化物、烟尘排放量分别代表四种不同的非期望产出。数据维度上，二氧化硫、氮氧化物、烟尘排放量的时间维度为 2011–2015 年，其余均为 2008–2018 年度的省级面板数据。

此外，考虑到我国幅员辽阔，环境效率可能存在区域差异，因此本研究按照按国务院“十一五”提出的八大综合地区的划分方式，将大陆地区分为八大地区，具体的省份划归示意图见图表 1。



图表 1 八大综合经济区划分方式

东北综合经济区，包括辽宁、吉林、黑龙江，是中国重型装备和设备制造业基地；**北部沿海综合经济区**，包括北京、天津、河北、山东，是最有实力的高新技术研发和制造中心之一；**东部沿海综合经济区**，包括上海、江苏、浙江，是最具影响力的多功能的制造业中心；**南部沿海经济区**，包括福建、广东、海南，是最重要的外向型经济发展的基地；**黄河中游综合经济区**，包括陕西、山西、河南、内蒙古，是最大的煤炭开采和煤炭深加工基地、天然气和水能开发基地、钢铁工业基地、有色金属工业基地及奶业基地；**长江中游综合经济区**，包括湖北、湖南、江西、安徽，以水稻和棉花为主的农业地区专业化生产基地及相关深加工工业；以钢铁和有色冶金为主的原材料基地；武汉“光谷”和汽车生产基地；**大西南综合经济区**，包括云南、贵州、四川、重庆、广西，以重庆为中心的重化工业和以成都为中心的轻纺工业两大组团；以旅游开发为龙头的“旅游业-服务业-旅游用品生产”基地。**大西北综合经济区**，包括了甘肃、青海、宁夏、西藏（缺失数据不在本文研究中）、新疆，重要的能源战略接替基地；

最大的综合性优质棉、果、粮、畜产品深加工基地；向西开放的前沿阵地和中亚地区经济基地和特色旅游基地。

以下两小结将介绍中国除西藏、香港、澳门和台湾的中国大陆 30 个省级行政区划的资本、劳动力、能源消耗、地区经济生产总值和二氧化碳、二氧化硫、氮氧化物和粉尘的总排放的数据具体情况。ⁱⁱ每一小节中的地图示意的颜色所代表的数值大小，在标准化计算后由图形最右端的颜色图例显示。同时，每一要素中的时序堆叠图也可以反映出某省（市、自治区）的该要素在我国大陆地区的占比及占比的变化趋势。相近的颜色表示了该省所在的同一经济区的其他各省的指标状况。

3.1. 投入要素

根据模型，计算各地的环境绩效，首先要考虑生产过程中的投入变量。我们选取了固定资本存量、城镇就业人员数和万标准吨煤炭消耗分别代表资本、劳动力和化石燃料在各地各年份的变量。

城镇就业人员数的 2008-2018 年各省时空分布图表 2 所示，右下角图例给出了中国大陆 30 个省级行政单位（不包括西藏、香港、澳门、台湾）的就业人员在我国大陆地区各时段的分布比例变化。总体而言，城镇就业人员数十年间在我国大陆地区的分布呈由东到西、由南到北递减的特点。西部地区（包括大西北经济带和西南经济区），北部经济区和长江中游经济区的就业人员占我国大陆地区的比例没有太大的变化；黄河中游经济带的就业人员比例有小幅度的下降，而东北地区的就业人员占我国大陆地区比例有很大的下降。东、南部沿海地区的就业人员比例则逐年持续增高。

资本存量的 2008-2018 年各省时空分布图表 3 所示。其计算方法来自于张军（2004）：用 1990 年的固定资本形成总额除以 10%，作为该省区市的初始资本存量^[16]。东北地区、北部经济区、大西北经济区和南部沿海地区的资本存量随时间的变化不大。西南地区、长江中游地区、黄河中游地区的资本存量逐年有所增长，而东部沿海经济区的资本存量占比有一定程度的减少。而从绝对量上看，山东、广东、江苏和河南的资本存量最多。

能源消耗用万标准吨煤的消耗量作为表示。其 2008-2018 年各省时空分布图表 4 所示。山东、河北和广东一直为煤炭能源的消耗大省。而最明显的变化是，新疆维吾尔自治区的能源消耗量在这十年期间有了非常显著的增长。从地区的能源消耗变化来看，东北和北部经济区的煤炭能源消耗有一定程度的减少。从总体结构来看，大部分地区的能源消耗分布结构在我国大陆地区范围内的变化并不显著。而从绝对数值上看，地图上各地区消耗能源的绝对程度（颜色）变化不甚明显。

ⁱⁱ 图表为所涉及的中国大陆省份地图，其地图矢量边界数据来源于 RSTATA 公众号。。

3.2. 产出：期望产出和非期望产出

在这一小节我们介绍各省十年间作为期望产出的地区生产总值和非期望产出的二氧化碳排放的时空分布及变化。对于其他非期望产出，由于统计局将 2016 年以后二氧化硫、氮氧化物及粉尘的数据的统计口径做了调整，因此不能比较 2016 年前后的这三项废气排放数据。而可追溯的统计年鉴及环境统计年鉴的三废排放总量数据为 2011 年，因此我们将产出的地区生产总值、二氧化碳与三废的情况另做了一个加以区别的可视化分组呈现出来。

首先是地区生产总值的数据分布情况，如图表 5 所示。地区生产总值由东南向西北递减，而广东、江苏、山东的地区生产总值占比最大。从变化上来看，东北三省的地区生产总值在我国大陆地区的占比下降趋势明显，西南经济带和黄河中游地区的地区生产总值在十年间的我国大陆地区占比有显著低高，而其它地区的变化不大。

再次是二氧化碳排放情况，如图表 6 所示。和能源消耗变化相似的是，新疆的二氧化碳排放有了明显的增高，无论是绝对数量，还是在我国大陆地区的二氧化碳排放相对占比。另一个比较明显的特点是，西南经济地区的碳排放有了非常明显的减少，尤其是云南和四川，其二氧化碳排放的减少程度卓然。

在三大废弃排放的变化趋势上，我们将八大经济区的各省 2011 年-2015 年的排污时间趋势线分别描绘出来，如图表 7、图表 8 和图表 9 所示。

首先是二氧化硫的排污情况。在 2011 年至 2015 年期间，除了大西北地区，我国大陆地区整体排放量都是下降的。西北经济区的甘肃排放量变化比较平缓，而新疆则出现了增长排放的波动。从绝对量上来看，北部地区要高于南方地区，尤其是胶东地区的辽宁、山东和黄河中游地段的内蒙古、河南和山西省，是二氧化硫排污大省。在地理上，这些省份彼此临近。

氮氧化物在我国大陆地区大部分地区的排放情况和二氧化硫的排放变化趋势非常接近，稍有不同的是，甘肃的氮氧化物排放量也是减少的，而环渤海附近地区的氮氧化物排放量在整体上更为高，即山东、河北和河南。辽宁省的氮氧化物排放量逐年下降趋势较明显。

粉尘排放量的情况较这二者区别较大。总体上看，我国大陆地区大部分地区的粉尘排放量都是在 2015 年以前都是显著逐年上升的，云南省除外。而 2015 年开始，除了小部分省份（江西、青海），可以看到粉尘排放的显著下降趋势。

显然，通过基本的数据可视化，我们既能找到投入与产出的相关性，又需要用模型进一步解释分析不能被简单观测到的规律。而可以肯定的是，污染的排放具有一定的空间关联性。无论是从地图的数据分布情况上看，还是从时空变化趋势图上；无论是在投入要素，还是产出要素中，我们都可以找到这样的证据。

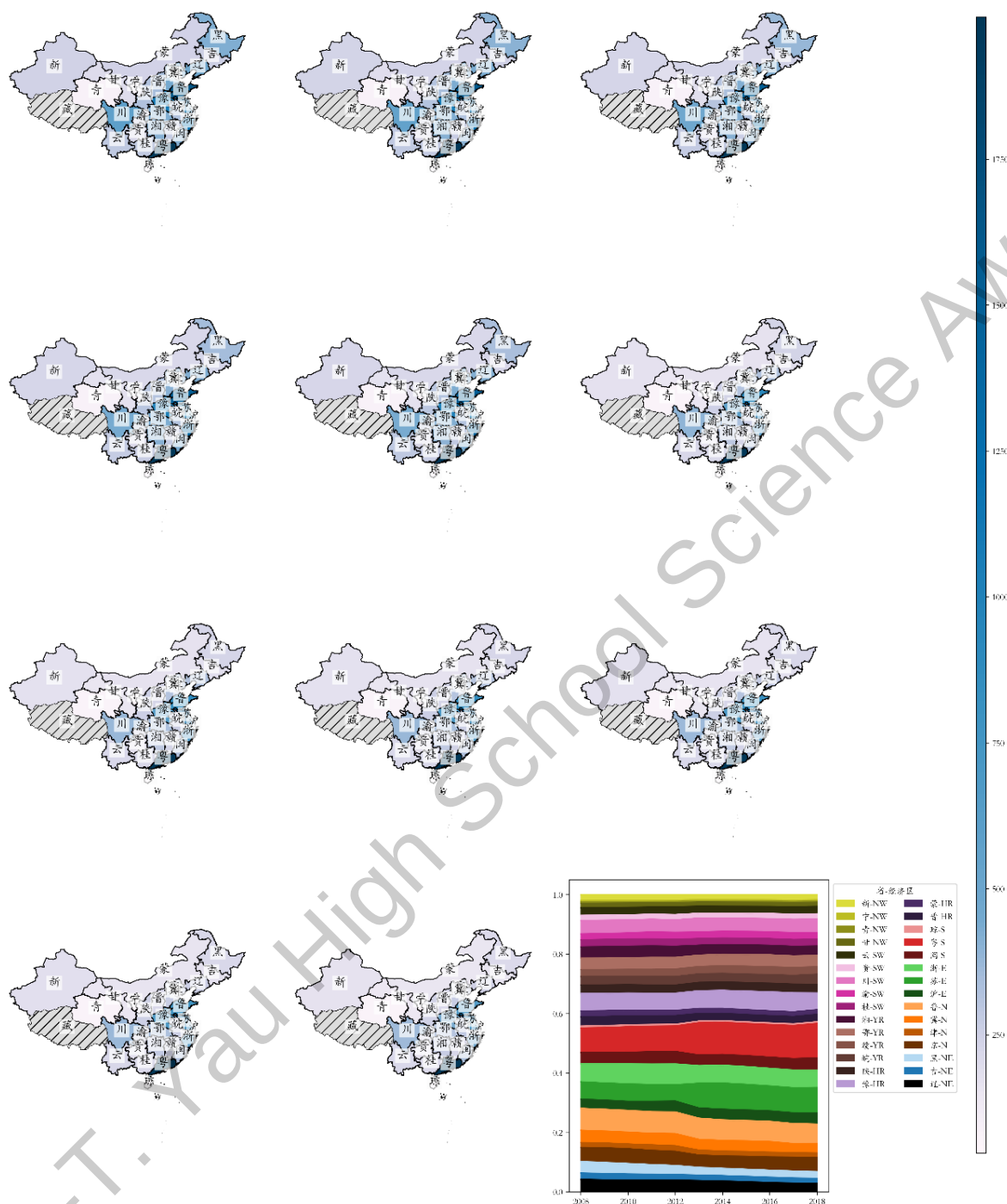
3.3. 投入及产出的数据描述性统计

在这一小节，我们总结了 30 个省级行政区划的投入及产出的具体指标及其相关描述性统计量。

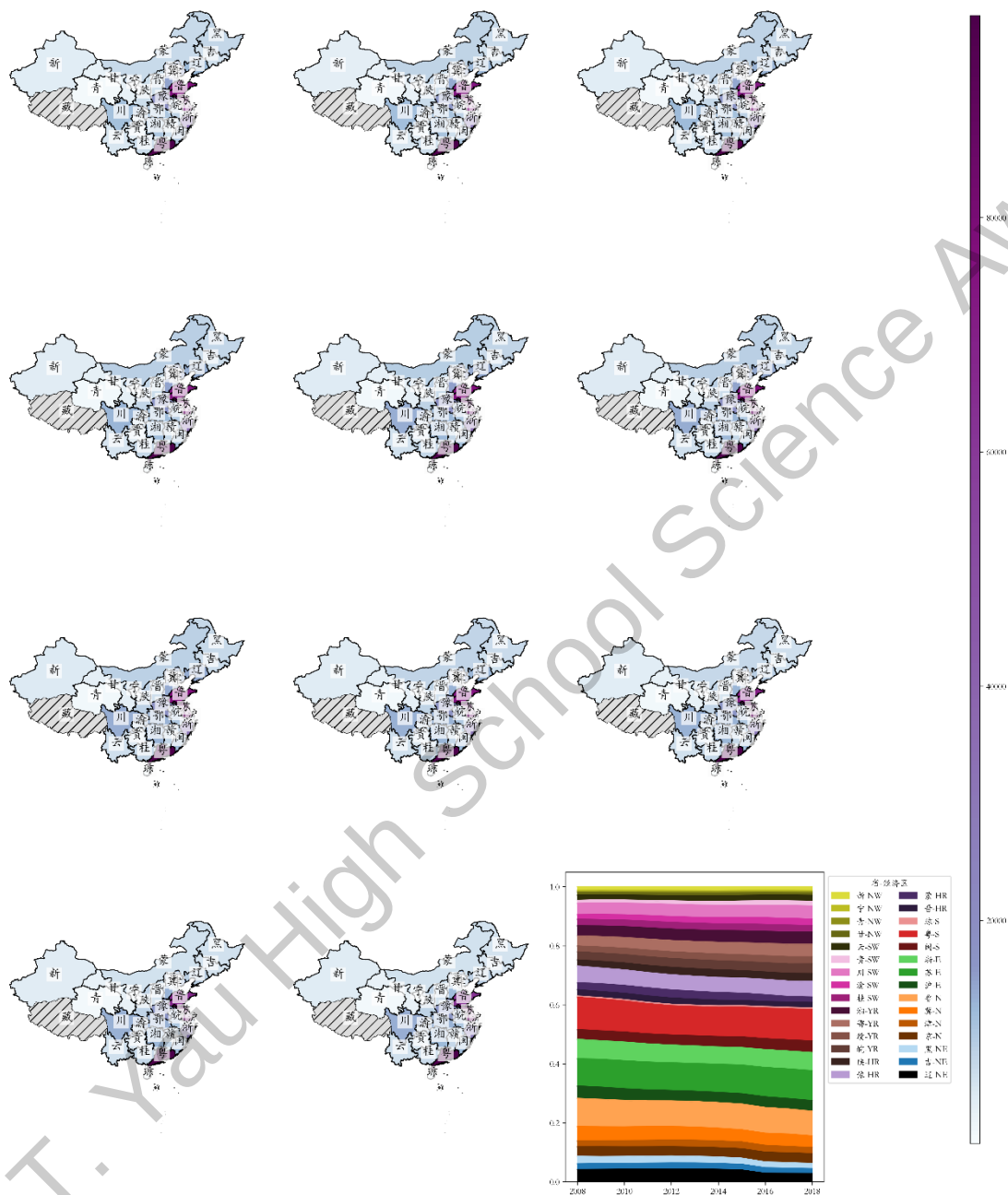
要素	模型变量	单位	均值	最大值	最小值	标准差
固定资本存量	资本	亿	21,779	99,104	1,053	18,452
煤耗量	能源	万吨	14,061	40,581	1,135	14,061
就业人数	劳动力	万人	528	1994	47	365
地区生产总值	期望产出	亿	20,623	97,278	962	17,304
二氧化碳	非期望产出	万吨	30,203	94,969	2,552	20,290
二氧化硫		万吨	57	183	0.3	42
氮氧化物		万吨	62	180	5	41
烟尘		万吨	47	180	2	34

表格 1 30 个省级行政单位（不包括西藏、香港、澳门、台湾）投入产出指标统计描述，其中二氧化碳、氮氧化物和烟尘为 2011-2015 年的数据，其余数据均为 2008-2018 年的数据统计。

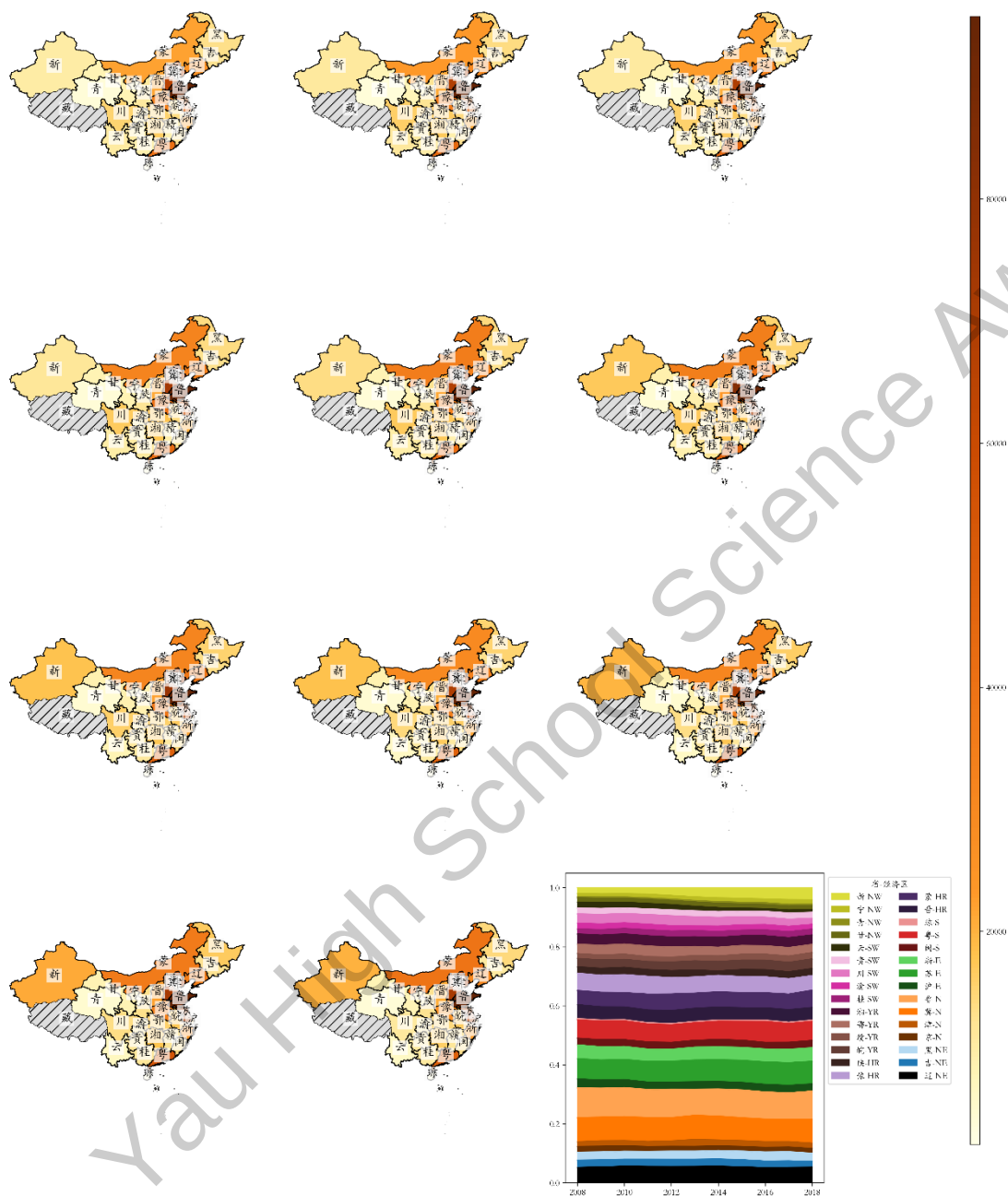
在以上三小节中，我们已经对本研究所需要的原始数据做出了基本的整合、统计和可视化分析。接下来，我们将要用这些数据计算出各省各年份的环境绩效指数。所需要的方法已经在上一章节中进行了介绍。



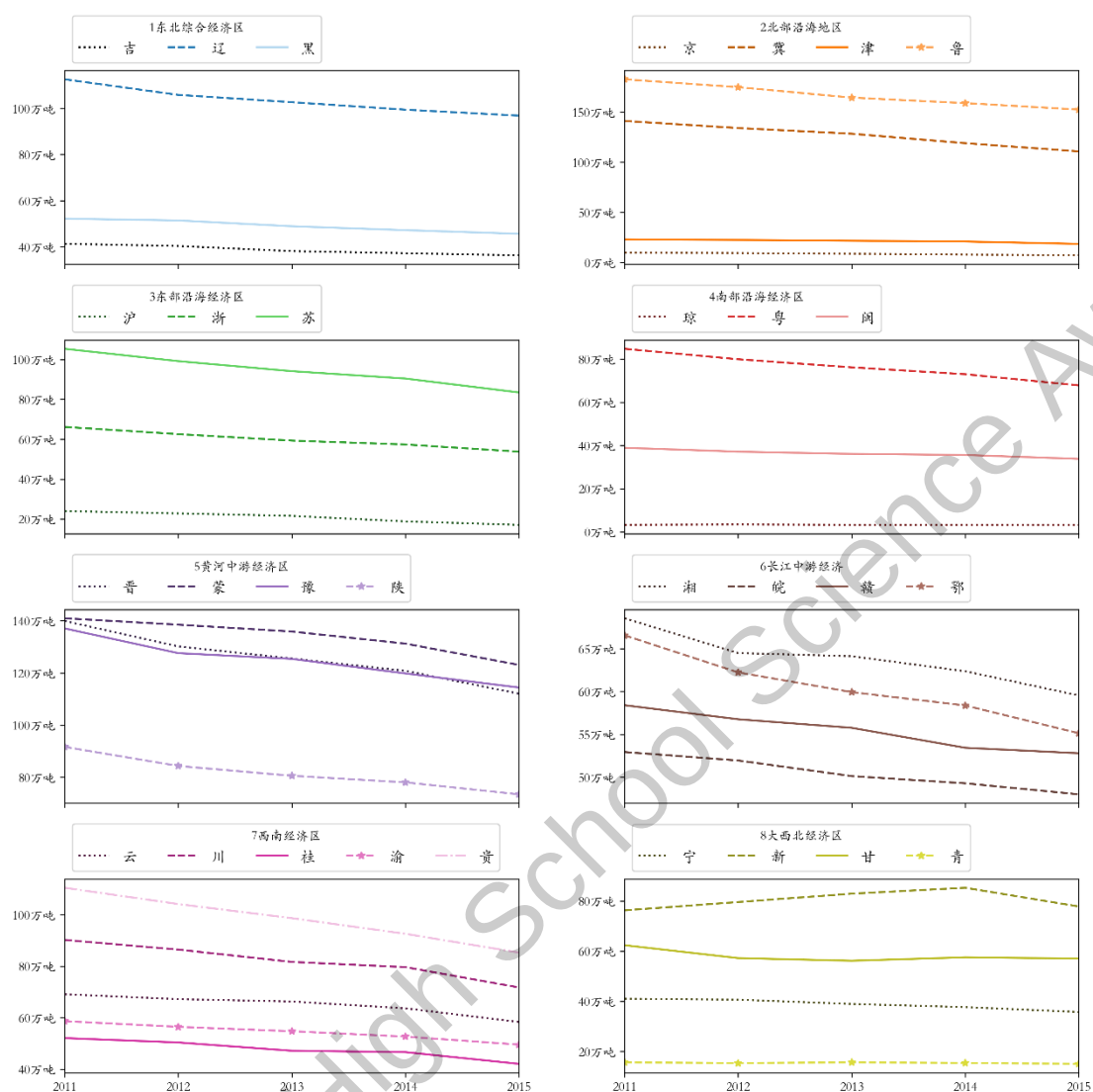
图表 2 30 个省级行政单位（不包括西藏、香港、澳门、台湾）城镇就业人员（万人）地图示意，数据来源于相应年份的国家统计局统计年鉴。右下角图例为这 30 个省级行政单位的城镇就业人员在我国大陆地区的分布相对比例随时间的变化。



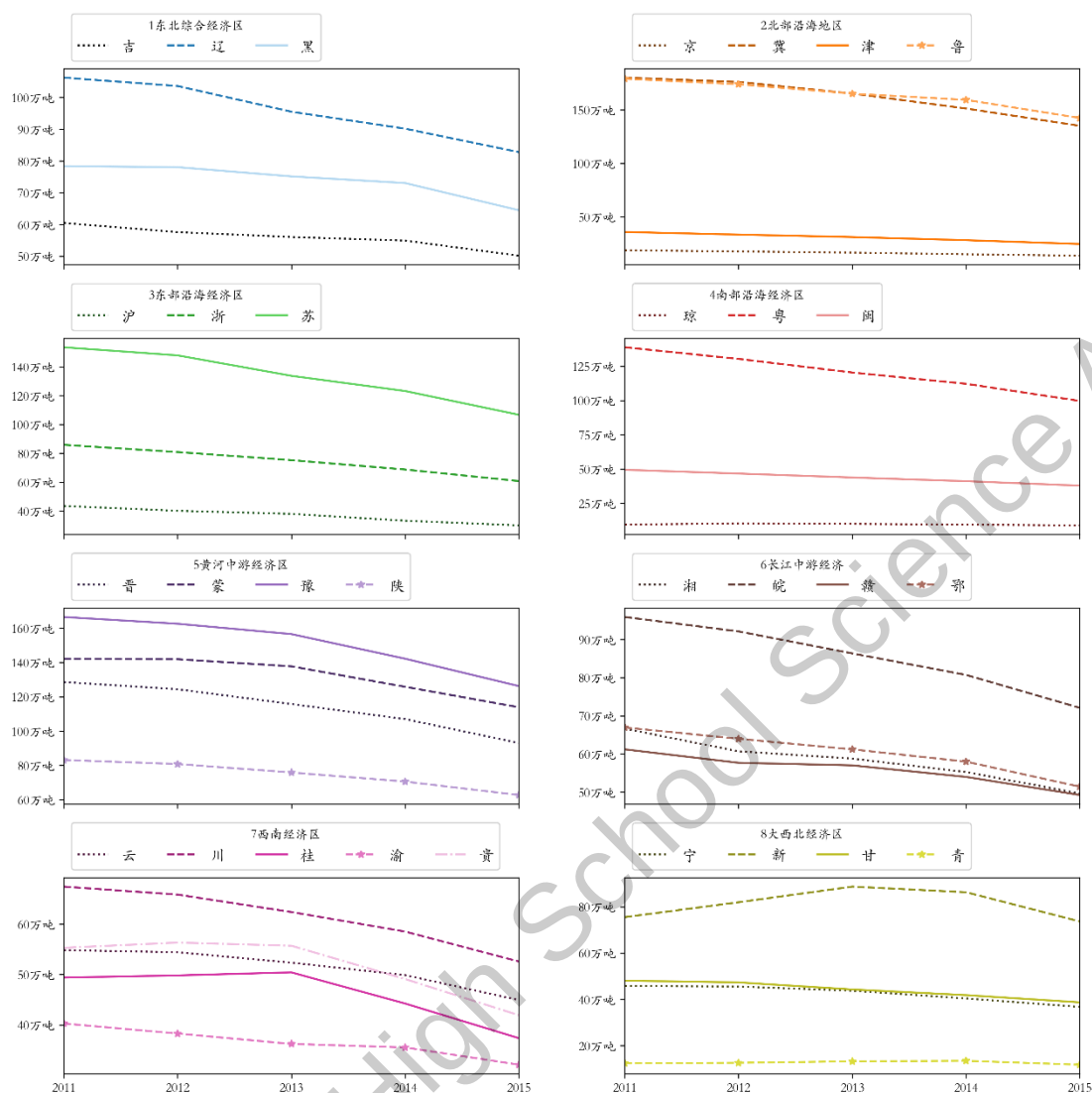
图表 5 30 个省级行政单位（不包括西藏、香港、澳门、台湾）2008-2018 地区生产总值（亿元）地图分布示意，数据来源于相应年份的国家统计局统计年鉴，2008 年为地区生产总值测算的基准期。右下角图例为这 30 个省级行政单位的地区生产总值在我国大陆地区的分布相对比例随时间的变化。



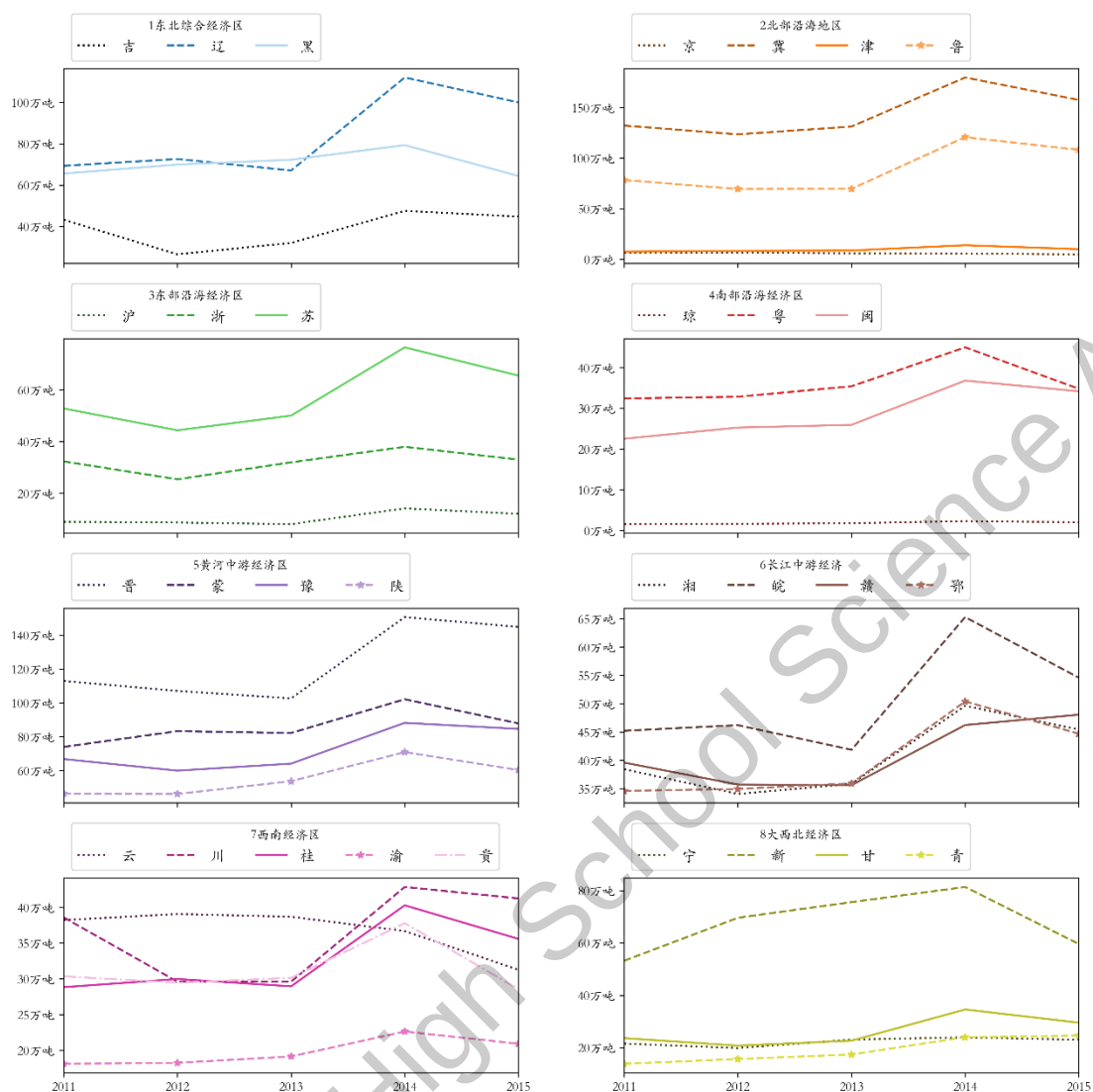
图表 6 30 个省级行政单位（不包括西藏、香港、澳门、台湾）2008-2018 二氧化碳排放估算（万吨）图分布示意，数据来源于世界资源研究所 (<https://www.wri.org.cn/blog/6%E5%BC%A0%E5%9B%BE%E5%B8%A6%E4%BD%A0%E4%BA%86%E8%A7%A3%E4%B8%AD%E5%9B%BD%E7%9A%84%E7%A2%B3%E6%8E%92%E6%94%BE>)。右下角图例为这 30 个省级行政单位的二氧化碳（估算值）排放在我国大陆地区的分布相对比例随时间的变化。



图表 7 30 个省级行政单位（不包括西藏、香港、澳门、台湾）单位分八大经济区的 2011-2015 二氧化硫总排放（万吨）趋势图，数据来源于相应年份的环境统计年鉴。



图表 8 30 个省级行政单位（不包括西藏、香港、澳门、台湾）分八大经济区的 2011-2015 氮氧化物总排放（万吨）趋势图，数据来源于相应年份的环境统计年鉴。



图表 9 30 个省级行政单位（不包括西藏、香港、澳门、台湾）分八大经济区的 2011-2015 粉尘（烟尘）总排放（万吨）趋势图，数据来源于相应年份的环境统计年鉴。

4. 环境绩效测算结果及空间地理分布分析

4.1 环境绩效指数

在这一小节中，我们将利用“动态窗口 SBM-DEA 非导向规模报酬不变非期望产出模型”分别算出得到二氧化碳和其他三种污染物（二氧化硫、氮氧化物、烟尘排放量）的各省各年份的环境绩效产出，即 EPI。

EPI 为 Environmental Performance Index 的缩写，意为环境绩效指数。是 2002 年由耶鲁大学和哥伦比亚大学联合研发，旨在辅助联合国千年发展目标中的环境目标而成^[17]。通过计算得到的二氧化碳环境效率 CO2EPI、二氧化硫环境效率 SO2EPI、氮氧化物环境效率 NOXEPI、烟尘环境效率 SOOTEPI，结果见表格 2。

表格 2 30 个省级行政单位（不包括西藏、香港、澳门、台湾）四种排放的环境绩效对比ⁱⁱⁱ

地区	CO2EPI			SO2EPI			NOXEPI			SOOTEPI		
	年平 均值	效 率 为 1 的年数	名	年平 均值	效 率 为 1 的年数	名	年平 均值	效 率 为 1 的年数	名	年平 均值	效 率 为 1 的年数	名
北京	1	11	3	1	5	8	1	5	8	1	5	8
天津	0.89	6	7	0.91	3	4	0.92	3	4	0.93	3	4
河北	0.56	0	3	0.55	0	0	0.55	0	1	0.52	0	1
山西	0.42	0	7	0.4	0	7	0.41	0	7	0.39	0	6
内蒙古	0.62	3	9	0.79	3	9	0.8	3	9	0.79	3	9
辽宁	0.59	0	1	0.63	0	4	0.67	0	4	0.6	0	7
吉林	0.6	0	0	0.6	0	8	0.59	0	8	0.55	0	8
黑龙江	0.55	0	4	0.54	0	2	0.53	0	2	0.51	0	2
上海	0.9	0	6	1	5	8	0.92	1	5	0.99	4	3
江苏	1	10	3	0.98	4	4	0.98	4	4	0.97	4	4
浙江	0.92	2	5	0.89	1	6	0.9	1	7	0.92	3	6
安徽	1	11	3	1	5	8	1	5	8	1	5	8
福建	0.85	2	9	0.7	0	1	0.76	0	0	0.66	0	2
江西	0.75	0	2	0.63	0	4	0.66	0	6	0.62	0	6
山东	0.73	0	3	0.67	0	2	0.74	0	1	0.67	0	1
河南	0.58	0	2	0.51	0	3	0.52	0	3	0.5	0	3
湖北	0.78	1	1	0.66	0	3	0.72	0	2	0.64	0	3
湖南	0.88	6	8	0.89	3	6	0.94	3	4	0.89	3	8
广东	0.98	9	4	0.88	2	8	0.87	0	8	0.9	2	7

ⁱⁱⁱ 四种排放物的数据时间维度并不相同。二氧化碳的各地区排放量数据时间维度为 2008-2018 年，而二氧化硫、氮氧化物和粉尘（烟尘）的排放量数据时间维度为 2011-2015 年。

地区是大西北经济区。可以看到，甘肃、青海、宁夏和新疆的环境绩效综合表现都排名靠后。

从局部异常情况来看。而内蒙古和云南省的表现相反。内蒙古的碳排放环境绩效指标较差，但大气三废的表现稍强。云南则在碳排放方面做得比三废处理的环境绩效优秀一些。北部经济区内部的环境绩效差异显著，北京、天津和山东、与河北分处于环境绩效最好，靠前和靠后的位置。长江中游地区的环境绩效表现要整体高于黄河中游地区。东北和西南地区的环境绩效表现一般，比较靠后。

4.2. 空间地理分布结果

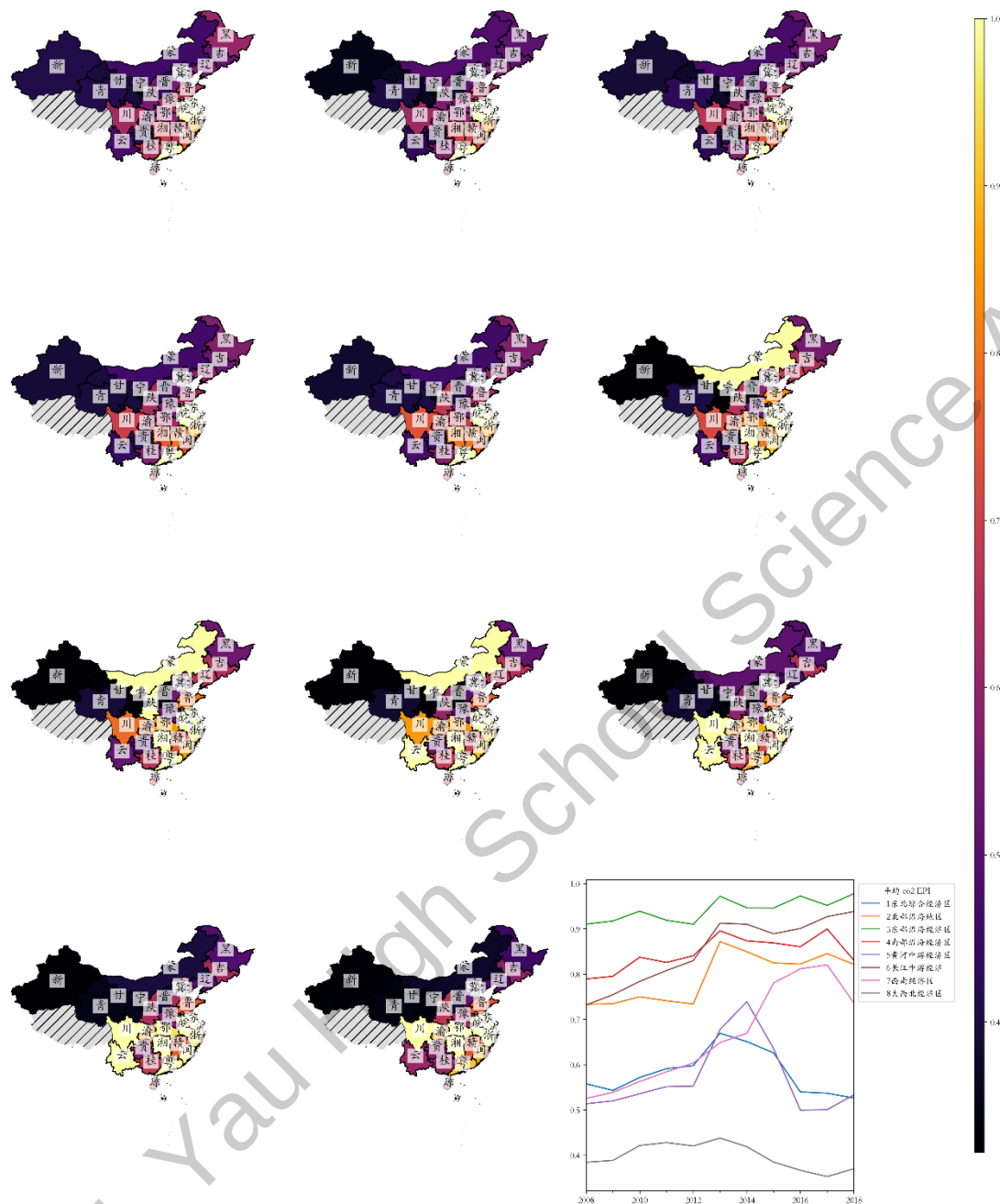
从上一小节的环境绩效结果来看，各排放物在空间上的分布既有集聚性，又存在差异性。为了进一步阐明环境绩效的空间分布规律，我们计算了各省的各年份环境绩效的全局莫兰指数和局部莫兰指数，并进 3.1. 空间地理分布结果行了可视化展现。

4.2.1. 二氧化碳

4.2.1.1. 二氧化碳排放的环境绩效的空间分布

根据各省各年度的碳排放环境绩效指数，首先我们绘制了其在时空上的分布及变化趋势图，并分区域进行了时间序列趋势的结果展示，如图表 11 所示。前 11 个图分别展示了 2008 年到 2018 年间，每一年分的各数据所在省的二氧化碳排放的环境绩效的空间地理分布。首先，可以看到地区分布上，碳排放环境绩效呈现东南向西北衰减的特点。其次，各省份的时空碳排放环境绩效存在一定程度的变化。地图上比较明显的有四川地区，其碳排放环境绩效逐年增高，说明该省在这方面的治理水平在不断提高。而内蒙古地区的碳排放环境绩效则出现了随时间趋势的反复变化。在中间的一些年份，内蒙古的碳排放环境绩效表现很好，而在其他时间里其环境绩效表现不佳，近几年更是出现了跌落到我国大陆地区倒数水平的状况。

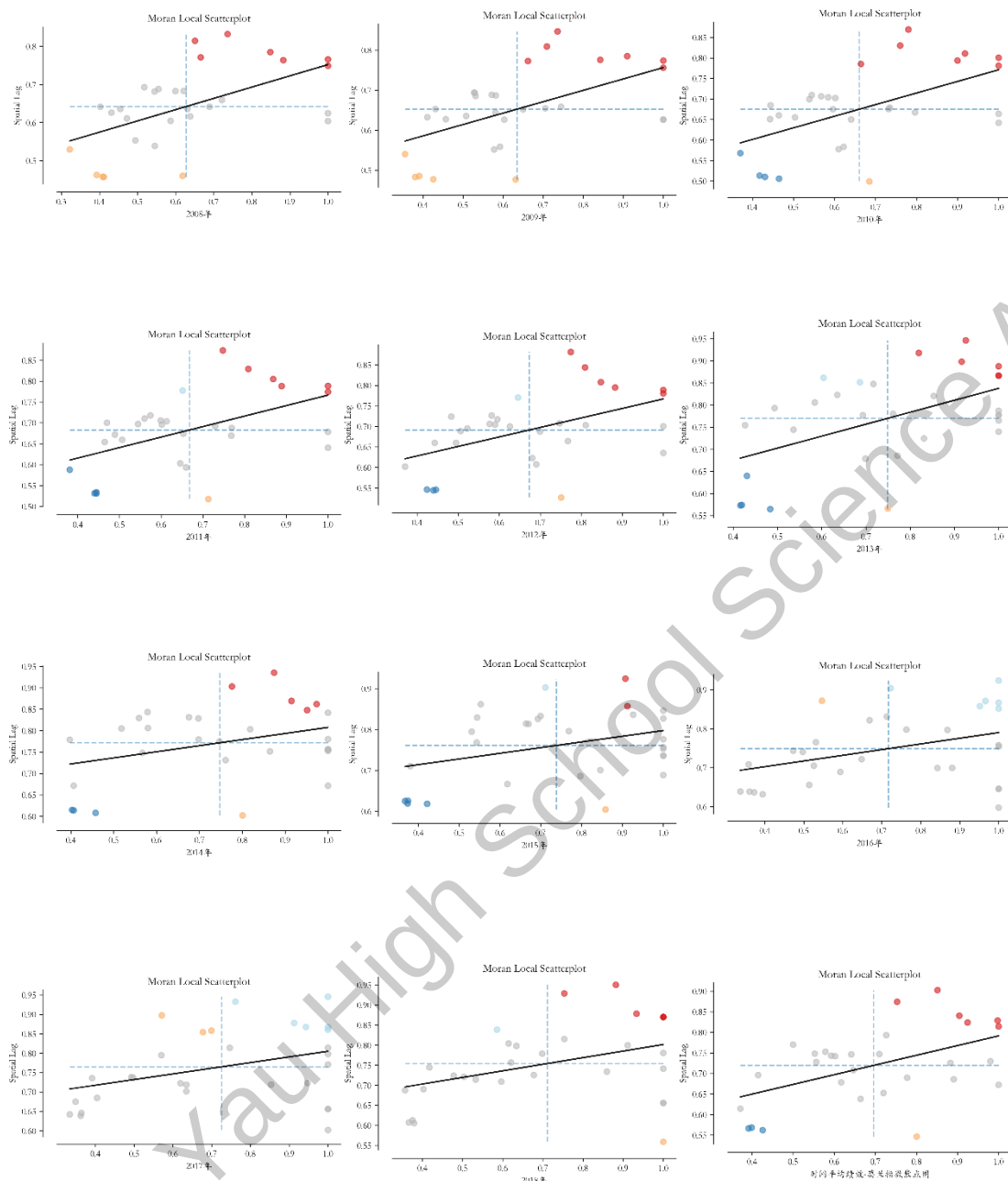
第十二幅图描绘了八大经济区的碳排放时间变化趋势。东部沿海地区整体上表现最佳，而长江中游地区近几年的碳排放表现日益优越，时间趋势上即将赶超东部沿海地区的碳排放环境绩效。南部沿海地区的碳排放环境绩效近几年有明显的下降趋势。有同样下降趋势的还有东北地区 and 黄河中游地区。而我们之前分析了东北地区近几年的城镇就业人口流失较严重。作为重要的生产要素，相信这一定对环境绩效的非期望产出有着一定的不良影响。而黄河中游地区的投入要素减少幅度并没有那么大，其碳排放环境绩效下降的原因应该区别于东北地区。北部地区的碳排放绩效在近年里的增幅放缓。而我们知道北京的碳排放绩效一直为第一，也就意味着天津、河北和山东的碳排放绩效改善情况放缓了。



图表 11 30 个省级行政单位（不包括西藏、香港、澳门、台湾）的碳排放环境绩效时空分布。

4.2.1.2. 二氧化碳的空间莫兰散点图

图表 12 描绘了二氧化碳排放的环境绩效的莫兰散点图。其中前 11 幅图是每一年 30 个省级行政单位（不包括西藏、香港、澳门、台湾）的莫兰散点图。第 12 副图表现的是这些地区时间上的平均值的莫兰指数分布。可以看到的是无论是时间序列上，还是平均程度上，莫兰指数都是正向分布的，说明二氧化碳排放的环境绩效方面，我国有空间集聚效应：高排放绩效的地区更倾向于和高排放绩效的地区毗邻，而低排放绩效的地区更容易和低排放绩效的地区毗邻。而在每个时间节点上，这种空间集聚性又稍有差异。

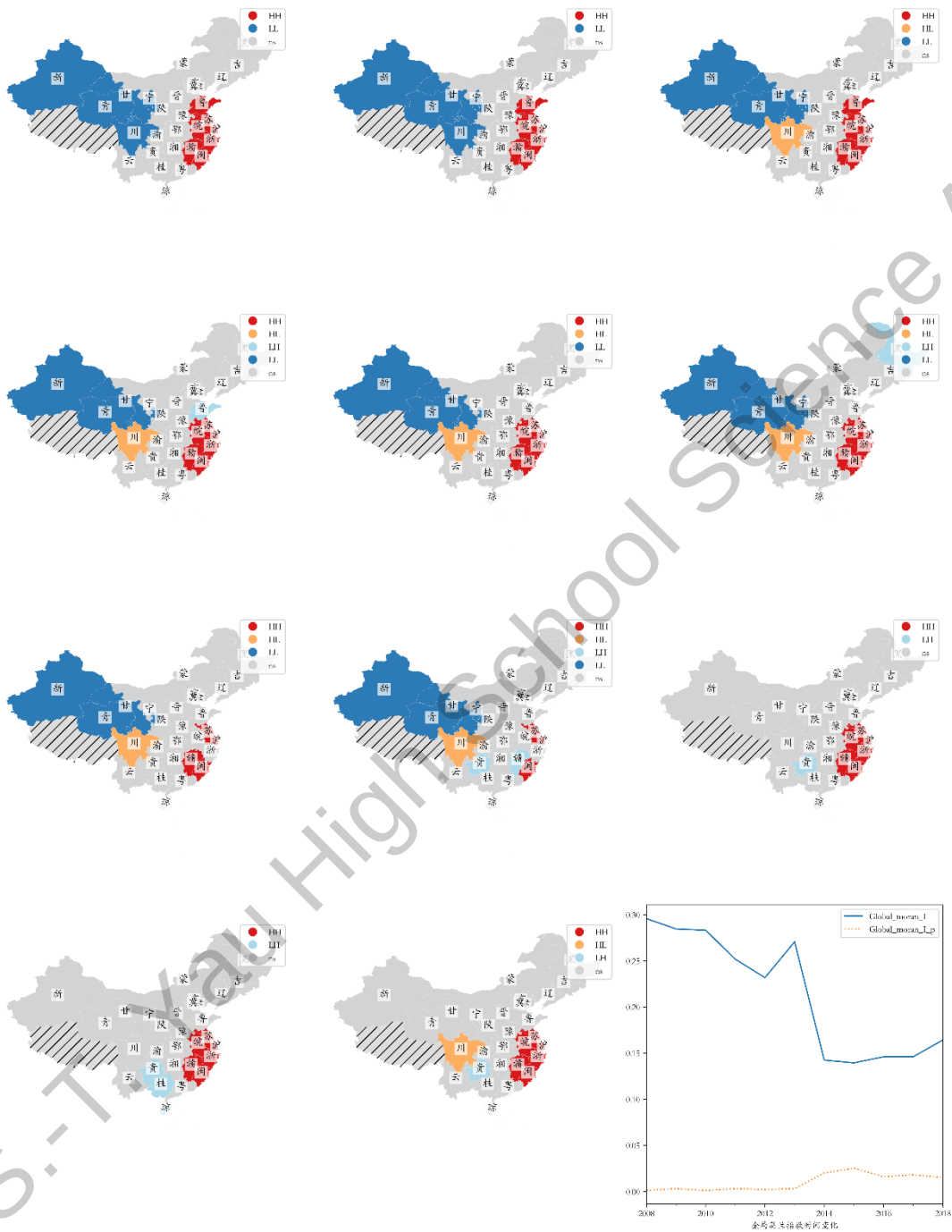


图表 12 二氧化碳排放的环境绩效的空间莫兰散点图

4.2.1.3. 二氧化碳空间自相关局部莫兰指数

图表 13 进一步用局部莫兰指数的空间分布向我们展示了二氧化碳排放绩效的空间集聚发生的具体地理区域及其时间上的变化。由前 11 副地理图示可以明确地看到，二氧化碳排放的环境绩效地空间分布可以分为两个时期。2008 年至 2014 年时期，空间上西北地区的省份多为二氧化碳排放的低绩效区，而他们在空间上临近。而东南沿海各省的高二氧化碳排放环境绩效区域也在地理分布上临近。2015 年之后，西北部的二氧化碳低绩效集聚效应消失，而东南沿海的高二氧化碳排放环境绩效区域集聚效应仍然存在。第 12 幅图显示了随时间趋势变化的全局莫兰指数及其显著性。可以看到所有的

时间点上，全局莫兰指数都是在 5%显著水平范围里。然而在 2015 年以后，随着西北地区的低二氧化碳排放环境绩效区域的集聚性消失，全局莫兰指数有着断崖式下降。



图表 13 二氧化碳空间自相关局部莫兰指数

这一从一定侧面上说明了，西北的省份的碳排放治理有着改善，尤其个别省份的环境绩效变化，如四川省，由于其与西北几个省份毗邻（或邻居的邻居），其碳排放的治理和改善使得低环境绩效的空间集聚效应消失。

因此，虽然从全局莫兰指数的统计数据上看，莫兰指数为正，说明我国存在着碳排放环境绩效的空间集聚效应，但这背后所反映的变化并不尽相同。通过上述更细致的分析，我们可以看到一些碳排放环境绩效上所取得的进步成绩。

4.2.2. 二氧化硫

4.2.2.1. 二氧化硫环境绩效的空间分布

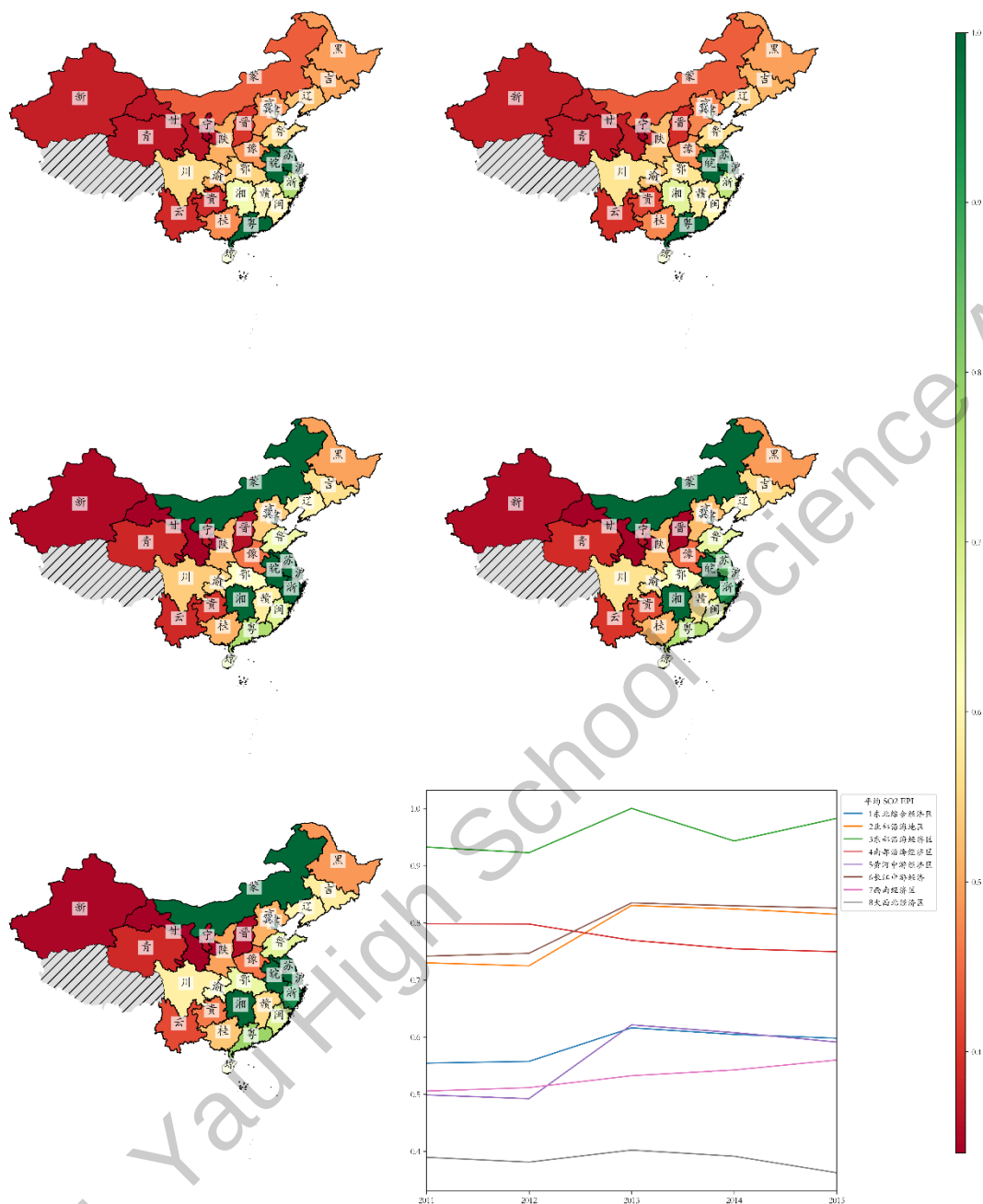
根据各省各年度的二氧化硫排放环境绩效指数，首先我们绘制了其在时空上的分布及变化趋势图，并分区域进行了时间序列趋势的结果展示，如图表 14 所示。前 5 个图分别展示了 2011 年到 2015 年间，每一年分的各数据所在省的二氧化硫排放的环境绩效的空间地理分布。

首先，可以看到地区分布上，二氧化硫排放环境绩效稍稍呈现出东南高向西北低的特点，但在程度上，并非是递减分布，而有一定的离散形态。

其次，各省份的时空二氧化硫排放环境绩效存在小范围的变化。地图上比较明显的有内蒙古，其二氧化硫排放环境绩效逐年增高，说明该自治区在这方面的治理水平在不断提高。而其他地区的二氧化硫排放环境绩效所改变的幅度不大。

第 6 幅图描绘了八大经济区的二氧化硫排放时间变化趋势。可以明显看到八大地理经济区在二氧化硫排放绩效上呈现出了四组迥异的数值分组。第一梯队为东部沿海经济区，其二氧化硫排放的环境绩效一直为我国大陆地区之首。第二梯队为南部、北部和长江中游经济区。而其内部中，南部地区的二氧化硫环境排放绩效趋势随时间有所下降，而北部和长江中游经济区则呈现出非常相近的平缓增长趋势。第三梯队为东北、黄河中游及西南经济区。而大西北经济区的二氧化硫排放的环境绩效一直表现最末，并持续下降。

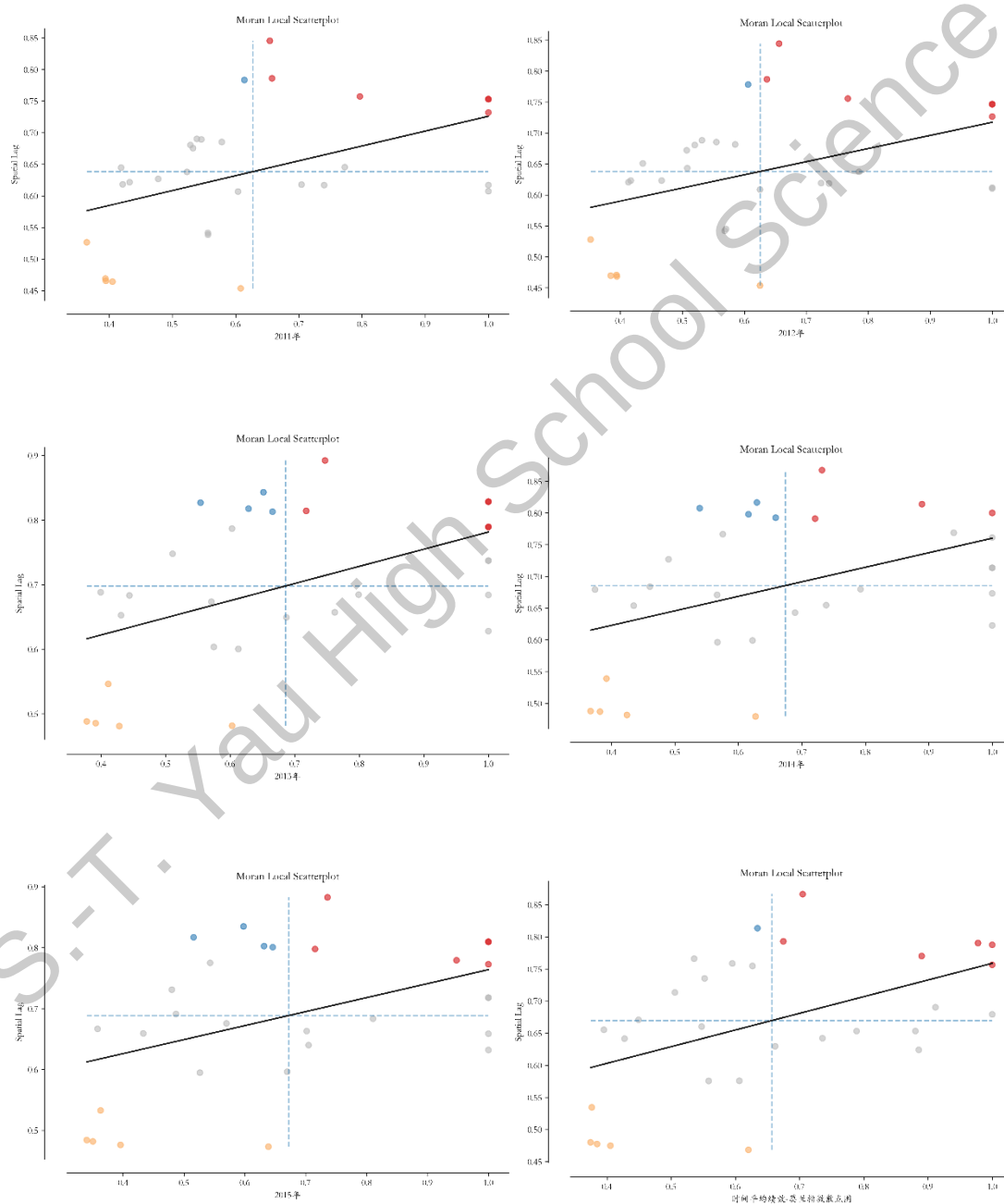
我们从地理分布上并不能轻松判断二氧化硫环境绩效的空间集聚效应是否存在，因此要进一步借助于空间自回归指数来帮助我们判断这一议题。



图表 14-30 30 个省级行政单位（不包括西藏、香港、澳门、台湾）的 2011-2015 年二氧化硫排放环境绩效时空分布。

4.2.2.2 二氧化硫的空间莫兰散点图

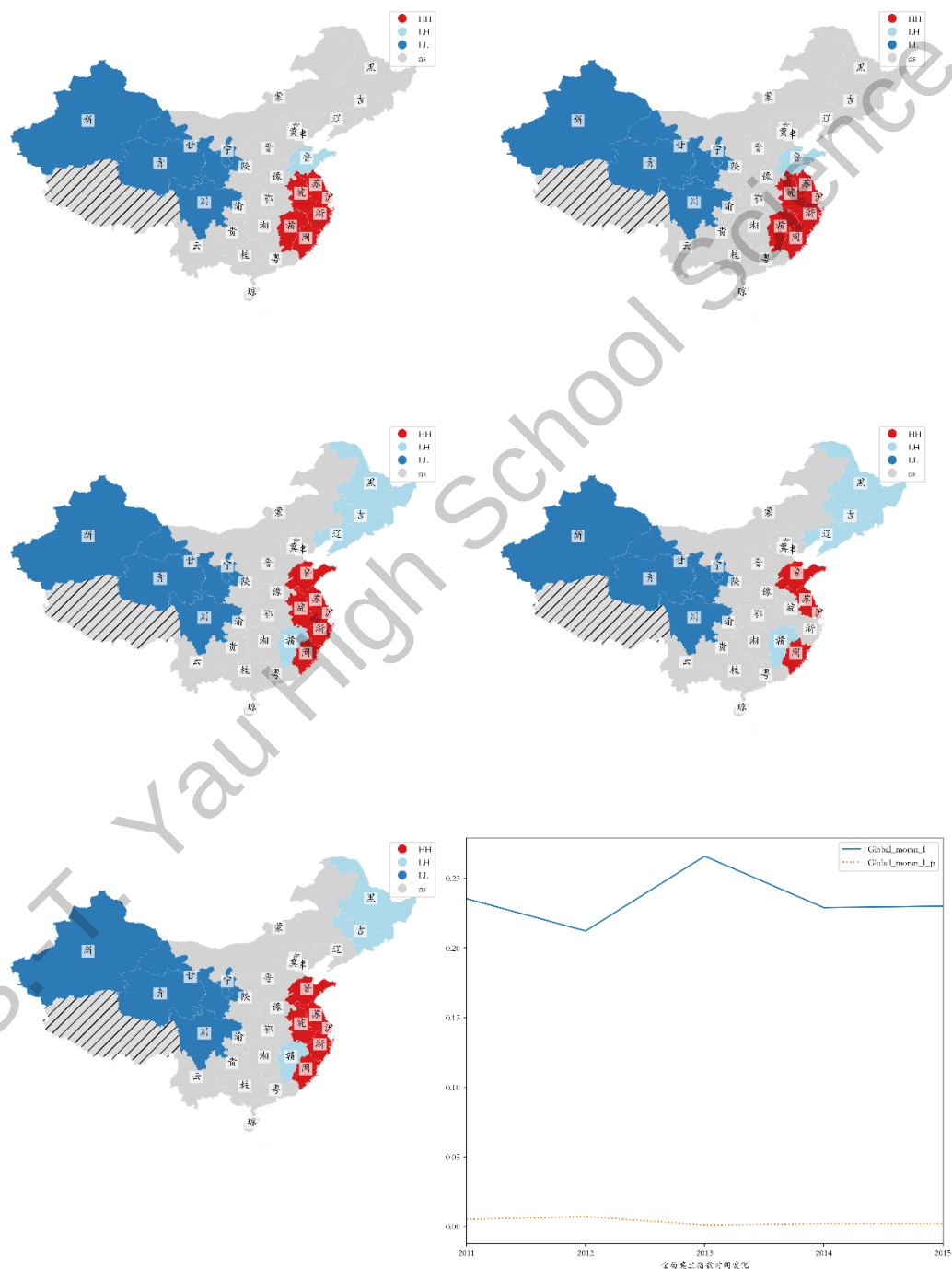
图表 15 描绘了二氧化硫环境绩效的莫兰散点图。其中前 5 幅图是每一年 30 个省级行政单位（不包括西藏、香港、澳门、台湾）的莫兰散点图。第 6 副图表现的是这些地区时间上的平均值的莫兰指数分布。可以看到的是无论是时间序列上，还是平均程度上，莫兰指数都是正向分布的，说明二氧化硫排放的环境绩效方面，我国有空间集聚效应：高排放绩效的地区更倾向于和高排放绩效的地区毗邻，而低排放绩效的地区更容易和低排放绩效的地区毗邻。而在每个时间节点上，这种空间集聚性又稍有差异，但整体变化幅度不大。



图表 15 二氧化硫环境绩效的空间莫兰散点图

4.2.2.3. 二氧化硫空间自相关局部莫兰指数

图表 16 进一步用局部莫兰指数的空间分布向我们展示了二氧化硫排放绩效的空间集聚发生的具体地理区域及其时间上的变化。由前 5 副地理图示（2011–2015 年）可以明确地看到，二氧化硫环境绩效地空间分布可以分为两个时期。2011 年至 2012 年时期，空间上西北地区的省份多为二氧化硫排放的低绩效区，而他们在空间上临近。而东南沿海各省的高二氧化硫排放环境绩效区域也在地理分布上临近。东北地区出现了空间负相关，说明二氧化硫排放的环境绩效在这一区域出现高低交错相邻的情况。



图表 16 二氧化硫空间自相关局部莫兰指数

2013 年及之后，东北部的二氧化硫低绩效空间离散效应消失，而西北低二氧化硫排放环境绩效、东南沿海的高二氧化硫排放环境绩效区域聚集效应仍然存在。第 6 幅图显示了随时间趋势变化的全局莫兰指数及其显著性。可以看到所有的时间点上，全局莫兰指数都是在 5% 显著水平范围里。尤其在 2013 年，随着东北地区的低二氧化硫排放环境绩效区域的离散性（莫兰指数为复的区域）消失，全局莫兰指数有着瞬时的提高。

东北三省在地理位置上毗邻内蒙古地区。而内蒙古在 2013 年以后的二氧化硫排放环境绩效有着非常大的提高，因此在一定程度上帮助东三省的二氧化硫排放高低错落的离散性得到了区域缓解。

但同时，2013 年之后的全局莫兰指数又有所下降。这是因为东南沿海地区的高二氧化硫排放环境绩效集聚效应在减少，具体是安徽、浙江和江西省的集聚效应消失，甚至出现了江西省的局部莫兰指数为负，这说明，他们本身或者其毗邻的省份有绩效下降的可能性在。这与我们之前分析的南部地区的二氧化硫排放环境绩效下降有关。在前五张小地图上也可以看到这样的证据。比如广东省的二氧化硫排放的环境绩效就在此期间逐年下降。

4.2.3. 氮氧化物

4.2.3.1. 氮氧化物环境绩效的空间分布

根据各省各年度的氮氧化物排放环境绩效指数，首先我们绘制了其在时空上的分布及变化趋势图，并分区域进行了时间序列趋势的结果展示，如图表 17 所示。前 5 个图分别展示了 2011 年到 2015 年间，每一年分的各数据所在省的氮氧化物排放的环境绩效的空间地理分布。

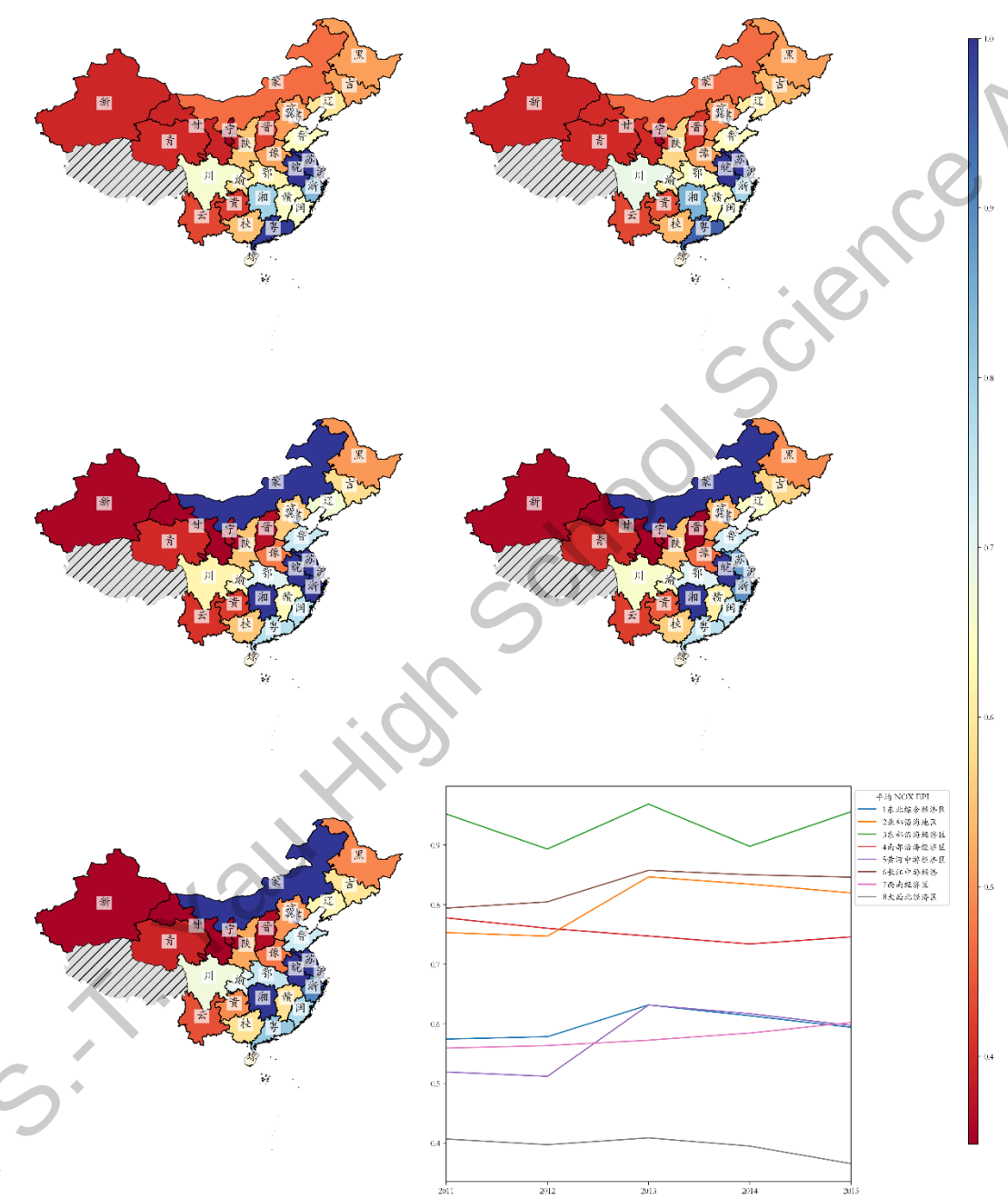
首先，可以看到地区分布上，氮氧化物排放环境绩效稍呈现出东南高向西北低的特点，但其并非是递减分布，而有一定的离散形态。

其次，各省份的时空氮氧化物排放环境绩效存在小范围的变化。地图上比较明显的有内蒙古，其氮氧化物排放环境绩效逐年增高，说明该自治区在这方面的治理水平在不断提高。西北经济地区和山西的氮氧化物环境绩效在逐年下降，与二氧化硫排放的环境绩效的分布状况相似。

第 6 幅图描绘了八大经济区的氮氧化物排放时间变化趋势。可以明显看到八大地理经济区在氮氧化物排放绩效上呈现出了四组迥异的数值分组。第一梯队为东部沿海经济区，其氮氧化物排放的环境绩效一直为我国大陆地区之首，但也呈现了一定的波动状态。第二梯队为南部、北部和长江中游经济区。而其内部中，南部地区的氮氧化物环境排放绩效趋势随时间有较大幅度的下降，并与其他两个地区逐年拉开差距。而北部和长江中游经济区则呈现出相近的趋势，只是北部地区的绩效在高增长过后有小幅度的下跌趋势。第三梯队为东北、黄河中游及西南经济区。除了西南地区以外，东

北和黄河经济带的氮氧化物环境排放绩效出现下滑。而大西北经济区的氮氧化物排放的环境绩效一直表现最末，并持续下降。

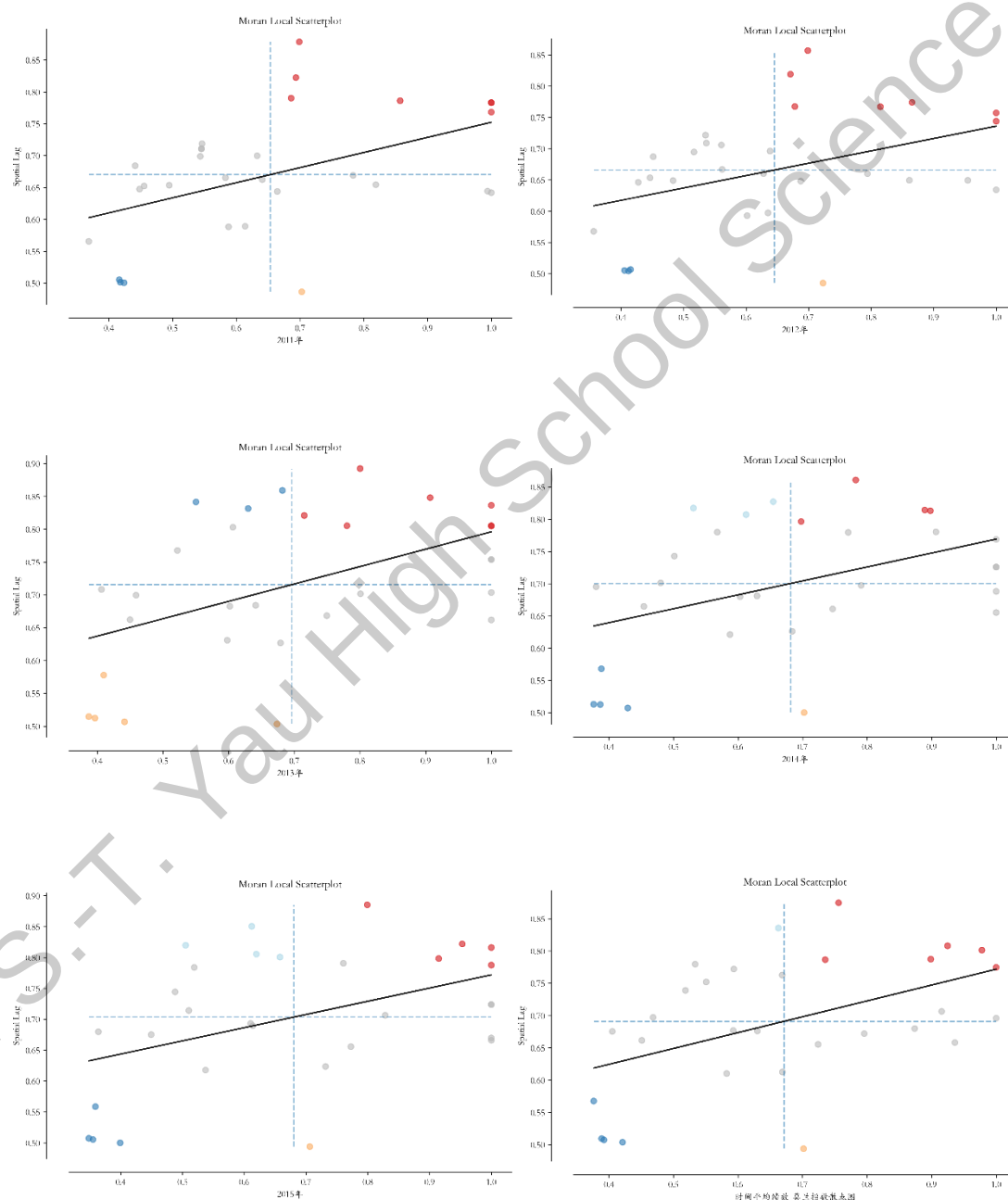
而复杂的时空地理分布图并不能明显地让我们判断出氮氧化物的环境绩效是否存在时空集聚或者离散趋势。



图表 17 30 个省级行政单位（不包括西藏、香港、澳门、台湾）的 2011-2015 年氮氧化物排放环境绩效时空分布。

4.2.3.2. 氮氧化物的空间莫兰散点图

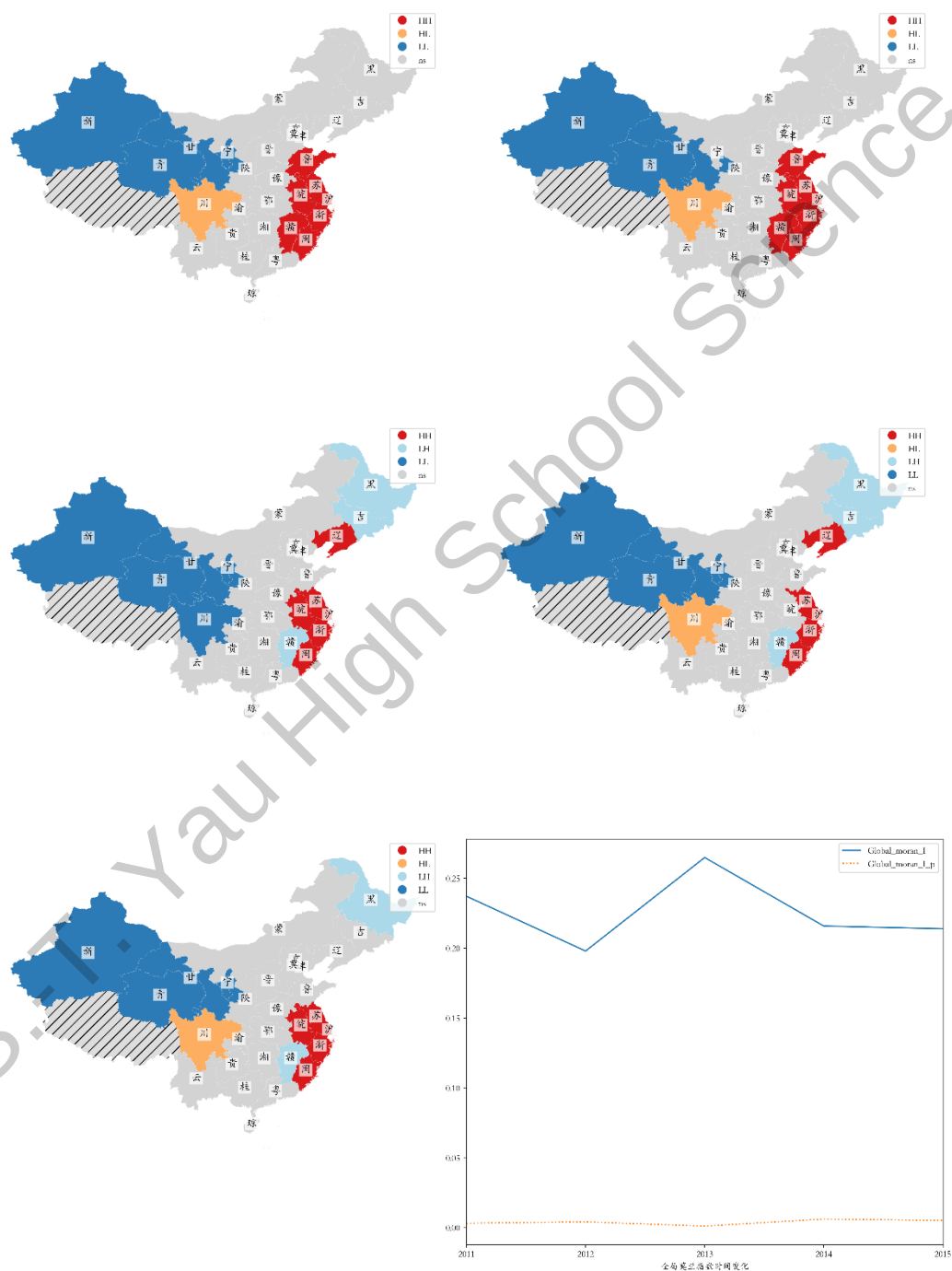
图表 18 描绘了氮氧化物环境绩效的莫兰散点图。其中前 5 幅图是每一年 30 个省级行政单位（不包括西藏、香港、澳门、台湾）的莫兰散点图。第 6 副图表现的是这些地区时间上的平均值的莫兰指数分布。可以看到的是无论是时间序列上，还是平均程度上，莫兰指数都是正向分布的，说明氮氧化物排放的环境绩效方面，我国有空间集聚效应：高排放绩效的地区更倾向于和高排放绩效的地区毗邻，而低排放绩效的地区更容易和低排放绩效的地区毗邻。而在每个时间节点上，这种空间集聚性又稍有差异，但整体变化幅度不大。



图表 18 氮氧化物环境绩效的空间莫兰散点图

4.2.3.3. 氮氧化物空间自相关局部莫兰指数

图表 19 进一步用局部莫兰指数的空间分布向我们展示了氮氧化物排放绩效的空间集聚发生的具体地理区域及其时间上的变化。由前 5 副地理图示（2011–2015 年）可以明确地看到，氮氧化物环境绩效地空间分布可以分为两个时期。2011 年至 2012 年时期，空间上西北地区的省份多为氮氧化物排放的低绩效区，而他们在空间上临近。而东南沿海各省的高氮氧化物排放环境绩效区域也在地理分布上临近。



图表 19 氮氧化物空间自相关局部莫兰指数

2013 年之后，东北地区出现了空间负相关，说明氮氧化物排放的环境绩效在这一区域出现高低交错相邻的情况。而西北低氮氧化物排放环境绩效、东南沿海的高氮氧化物排放环境绩效区域聚集效应仍然存在。但是，东南沿海的高氮氧化物排放环境绩效区域聚集效应在减小。

第 6 幅图显示了随时间趋势变化的全局莫兰指数及其显著性。可以看到所有的时间点上，全局莫兰指数都是在 5% 显著水平范围里。

在 2013 年，全局莫兰指数有着瞬时的提高。这一年，四川和毗邻地区出现了空间集聚现象，即氮氧化物的排放出现了低环境绩效的区域性聚集。而其他年份都没有这个效应。

2013 年之前与 2013 年之后相比，虽然莫兰指数相近，但含义不同。2013 年之前的空间集聚效应更为明显。分别是西北的低绩效集聚区和东南的高绩效集聚区。而 2014 年，虽然辽宁加入了高环境绩效集聚区域中，但其他地区，如黑龙江、吉林和江西出现了氮氧化物排放的环境绩效的空间离散效应。2015 年，全东三省都出现了氮氧化物排放的空间离散效应。虽然东南部地区的空间集聚效应有所上升，但总体上，使得空间集聚效应在 30 个被考察的省级行政区划单位的范围内的水平仍然较低。

4.2.4. 粉尘（烟尘）

4.2.4.1. 粉尘（烟尘）环境绩效的空间分布

根据各省各年度的氮氧化物排放环境绩效指数，首先我们绘制了其在时空上的分布及变化趋势图，并分区域进行了时间序列趋势的结果展示，如图表 20 所示。前 5 个图分别展示了 2011 年到 2015 年间，每一年分的各数据所在省的粉尘（烟尘）排放的环境绩效的空间地理分布。

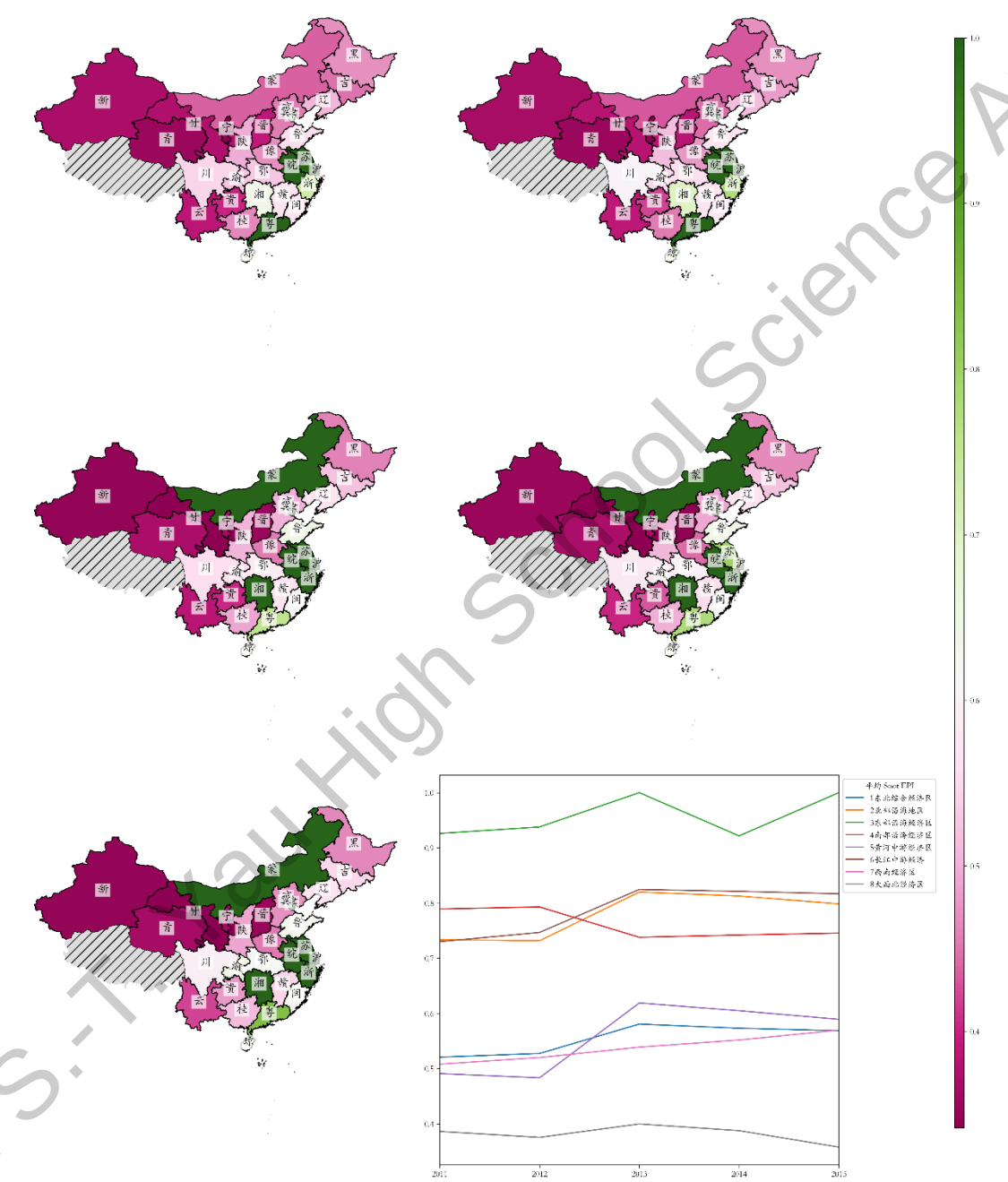
首先，可以看到地区分布上，粉尘（烟尘）排放环境绩效稍稍呈现出东南高向西北小的特点，但其并非是递减分布，而有一定的离散形态，与二氧化硫、氮氧化物排放的环境绩效的分布状况相似。

其次，各省份的时空粉尘（烟尘）排放环境绩效存在小范围的变化。地图上比较明显的有内蒙古，其粉尘（烟尘）排放环境绩效逐年增高，说明该省在这方面的治理水平在不断提高。西北经济地区和山西的粉尘（烟尘）环境绩效在逐年下降。

第 6 幅图描绘了八大经济区的粉尘（烟尘）排放时间变化趋势。可以明显看到八大地理经济区在粉尘（烟尘）排放绩效上呈现出了四组迥异的数值分组。第一梯队为东部沿海经济区，其粉尘（烟尘）排放的环境绩效一直为我国大陆地区之首。第二梯队为南部、北部和长江中游经济区。而其内部中，南部地区的粉尘（烟尘）环境排放绩效趋势随时间有所下降。而北部和长江中游经济区则呈现出相近的趋势，只是北部地区的绩效在高增长过后有非常小的下跌趋势。第三梯队为东北、黄河中游及西南经

济区。除了西南地区以外，东北和黄河经济带的粉尘（烟尘）环境排放绩效略有下降。而大西北经济区的粉尘（烟尘）排放的环境绩效一直表现最末，并在波动中持续下降。

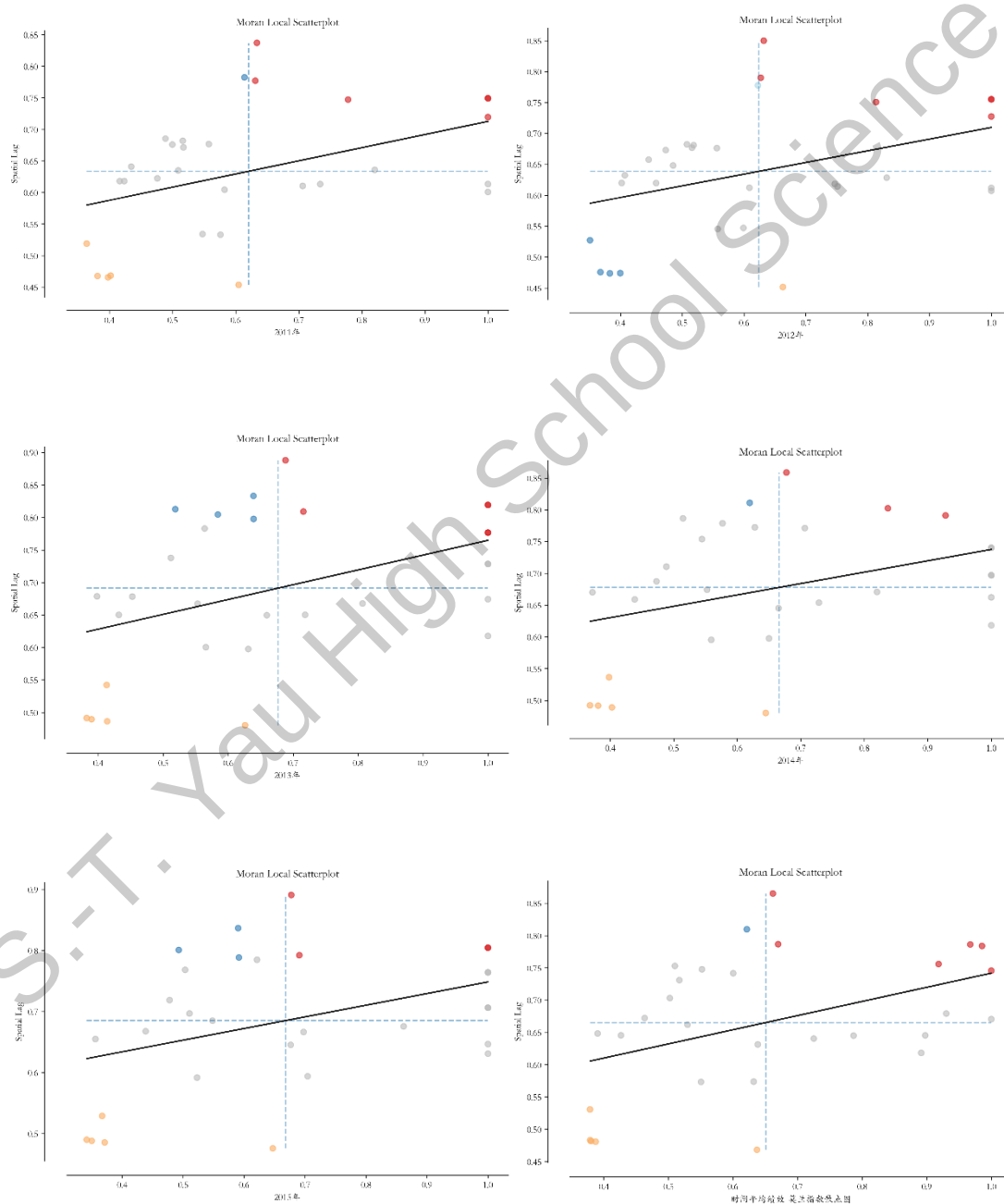
而复杂的时空地理分布图并不能明显地让我们判断出粉尘（烟尘）的环境绩效是否存在时空集聚或者离散趋势。



图表 20 30 个省级行政单位（不包括西藏、香港、澳门、台湾）的 2011-2015 年粉尘（烟尘）排放环境绩效时空分布。

4.2.4.2. 粉尘（烟尘）的空间莫兰散点图

图表 21 描绘了粉尘（烟尘）环境绩效的莫兰散点图。其中前 5 幅图是每一年 30 个省级行政单位（不包括西藏、香港、澳门、台湾）的莫兰散点图。第 6 副图表现的是这些地区时间上的平均值的莫兰指数分布。可以看到的是无论是时间序列上，还是平均程度上，莫兰指数都是正向分布的，说明粉尘（烟尘）排放的环境绩效方面，我国有空间集聚效应：高排放绩效的地区更倾向于和高排放绩效的地区毗邻，而低排放绩效的地区更容易和低排放绩效的地区毗邻。而在每个时间节点上，这种空间集聚性又稍有差异，但整体变化幅度不大。



图表 21 粉尘（烟尘）环境绩效的空间莫兰散点图

4.2.4.3. 粉尘（烟尘）空间自相关局部莫兰指数

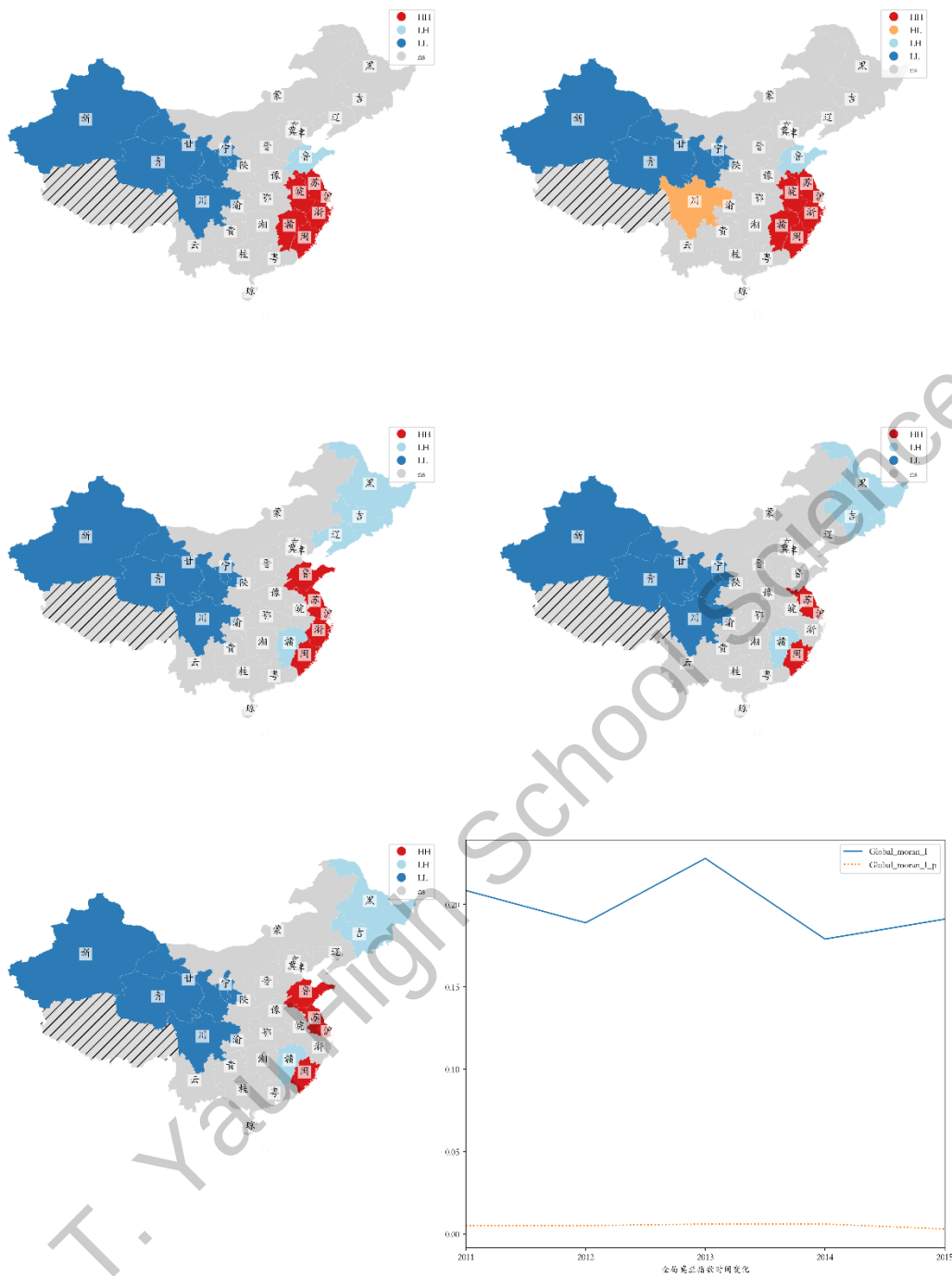
图表 22 进一步用局部莫兰指数的空间分布向我们展示了粉尘（烟尘）排放绩效的空间集聚发生的具体地理区域及其时间上的变化。由前 5 副地理图示（2011-2015 年）可以明确地看到，粉尘（烟尘）环境绩效地空间分布可以分为两个时期。2011 年至 2012 年时期，空间上西北地区的省份多为粉尘（烟尘）排放的低绩效区。而东南沿海各省的高粉尘（烟尘）排放环境绩效区域也在地理分布上临近。这一段时间里也有东部沿海地区的局部空间负相关出现。

2013 年之后，东北地区和东南部地区出现了空间负相关，说明粉尘（烟尘）排放的环境绩效在这一区域出现高低交错相邻的情况。而西北低粉尘（烟尘）排放环境绩效、东南沿海的高粉尘（烟尘）排放环境绩效区域聚集效应仍然存在。但是，东南沿海的高粉尘（烟尘）排放环境绩效区域聚集效应在减小。

第 6 幅图显示了随时间趋势变化的全局莫兰指数及其显著性。可以看到所有的时间点上，全局莫兰指数都是在 5% 显著水平范围里。

在 2013 年，全局莫兰指数有着瞬时的提高。地图上并不能看出其空间集聚在地理上有增加的区划单位，但是可以推断，消失的空间负相关（2012 年的四川、山东）和空间正相关（2013 年的浙江、安徽）的效应大于 2013 年增加的空间负相关地区（吉林、黑龙江、辽宁、江西）和空间正相关地区（山东、四川）。

2013 年之前与 2013 年之后相比，虽然莫兰指数相近，但含义不同。2013 年之前的空间集聚效应更为明显。分别是西北的低绩效集聚区和东南的高绩效集聚区。而 2014 年，如黑龙江和江西出现了粉尘（烟尘）排放的环境绩效的空间离散效应。2015 年，全东三省都出现了粉尘（烟尘）排放的空间离散效应。虽然东南部地区的空间集聚效应有所上升，但总体上，使得空间集聚效应在 30 个被考察的省级区划行政单位的范围内的水平仍然较低。



图表 22 粉尘（烟尘）空间自相关局部莫兰指数

5. 结论

本研究在全球气候变化，各世界主要国家主张“碳中和”达成的前提下，探究了中国的二氧化碳及大气主要污染物（三废）的排放的环境绩效的空间分布特点。其中，主要运用了两种模型。对于碳排放和大气三废的排放的环境绩效的测量，我们主要应用了 SBM-DEA 模型，进行了测算。而对于其在空间地理上的分布，则用到了空间自相关的全局莫兰指数和局部莫兰指数的时间变化，探寻了这些环境绩效指数在时空分布上的特点。

首先，我们肯定了各环境绩效指数在我国的地理分布上具有聚集效应。也就是说整体上而言，高环境绩效地区和高环境绩效地区毗邻，而反之亦然。其次，空间分布的集聚性具有局部性和时间上的动态变化性，即空间异质性是存在的，并随着时间而产生变化。再次，不同的排放物的时空地理分布的特点是不同。

同时可以看到，一些省份在环境绩效方面的努力是值得肯定的。而一些省份的环境绩效情况存在下降的状况。但究其原因，各不相同。如东北地区的环境绩效下降更可能是因为投入要素（劳动力）的流失而带来的。而黄河中游地区的环境绩效的下降则与此无关。

DEA 模型的环境绩效测算结果只能告诉我们是否有效，和在多少程度上有效，却并不能给出解决问题的思路。而通过与时空地理分布分析的结合，我们不但找到了上述的一些环境绩效差异的内在原因，更能看到在一些关键时点前后，其环境绩效的各省分布变化差异是非常大的。这引发我们对后续研究的进一步思考。在未来，可以将某些时点上发生的政策变化引入进这个话题中来，来比较在同样的（中央政府）政策变化下和不同的（地方政府）政策引导下，各地的环境绩效反应的差异。这可以对政策在不同 DMU 的执行力的差异进行评估，从而分析政策即其地方执行力上对环境绩效的影响，对现实的环境改善有着知道的作用。可以运用的模型有空间地理的多重差分计量经济学模型。相信本研究可以为这类研究提供充分的证据和启发。

参考文献

- [1]. 邓旭, 谢俊, 滕飞. 何谓“碳中和”[J]. 气候变化研究进展, 2021, 17(01): 107-113.
- [2]. 王灿, 张雅欣. 碳中和愿景的实现路径与政策体系[J]. 中国环境管理, 2020, 12(06): 58-64.
- [3]. Bai-Chen Xie, Li-Feng Shang, Si-Bo Yang, Bo-Wen Yi. Dynamic environmental efficiency evaluation of electric power industries: Evidence from OECD (Organization for Economic Cooperation and Development) and BRIC (Brazil, Russia, India and China) countries[J]. Energy, 2014, 74:
- [4]. Ning Zhang, P. Zhou, Yongrok Choi. Energy efficiency, CO₂ emission performance and technology gaps in fossil fuel electricity generation in Korea: A meta-frontier non-radial directional distance function analysis[J]. Energy Policy, 2013, 56:
- [5]. Toshiyuki Sueyoshi, Mika Goto, Takahiro Ueno. Performance analysis of US coal-fired power plants by measuring three DEA efficiencies[J]. Energy Policy, 2009, 38(4):
- [6]. Ke Wang, Bin Lu, Yi-Ming Wei. China's regional energy and environmental efficiency: A Range-Adjusted Measure based analysis[J]. Applied Energy, 2013, 112:
- [7]. Hong Li, Kuangnan Fang, Wei Yang, Di Wang, Xiaoxin Hong. Regional environmental efficiency evaluation in China: Analysis based on the Super-SBM model with undesirable outputs[J]. Mathematical and Computer Modelling, 2013, 58(5-6):
- [8]. H. Wang, P. Zhou, D. Q. Zhou. Scenario-based energy efficiency and productivity in China: A non-radial directional distance function analysis[J]. Energy Economics, 2013, 40:
- [9]. Ning Zhang, Fanbin Kong, Yongrok Choi, P. Zhou. The effect of size-control policy on unified energy and carbon efficiency for Chinese fossil fuel power plants[J]. Energy Policy, 2014, 70:
- [10]. P. Zhou, B. W. Ang, H. Wang. Energy and CO₂ emission performance in electricity generation: A non-radial directional distance function approach[J]. European Journal of Operational Research, 2012, 221(3):

- [11]. Färe R, Grosskopf S, Pasurka Jr C A. Environmental production functions and environmental directional distance functions[J]. Energy, 2007, 32(7): 1055-1066.
- [12]. Tone K. A slacks-based measure of efficiency in data envelopment analysis[J]. European journal of operational research, 2001, 130(3): 498-509.
- [13]. Cooper W W, Seiford L M, Tone K. Data envelopment analysis: a comprehensive text with models, applications, references and DEA-solver software[M]. New York: Springer, 2007.
- [14]. Griffith D A. Negative spatial autocorrelation: One of the most neglected concepts in spatial statistics[J]. Stats, 2019, 2(3): 388-415.
- [15]. Anselin L. Local indicators of spatial association—LISA[J]. Geographical analysis, 1995, 27(2): 93-115.
- [16]. 张军, 吴桂英, 张吉鹏. 中国省际物质资本存量估算:1952—2000[J]. 经济研究, 2004(10):35-44.
- [17]. Wendling, Z.A., Emerson, J.W., de Sherbinin, A., Esty, D.C., et al. (2020). 2020 Environmental Performance Index. New Haven, CT: Yale Center for Environmental Law & Policy. epi.yale.edu

附录

二氧化碳中国大陆各省绩效计算结果

Part	Province	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	平均
1 东北综合经济区	吉林	0.518	0.528	0.545	0.56	0.577	0.686	0.676	0.67	0.648	0.62	0.597	0.62
	辽宁	0.555	0.572	0.602	0.613	0.626	0.717	0.698	0.664	0.473	0.497	0.504	0.599
	黑龙江	0.6	0.529	0.568	0.599	0.59	0.604	0.579	0.544	0.497	0.493	0.478	0.55
2 北部沿海地区	北京	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	天津	0.722	0.745	0.796	0.768	0.768	1	1	1	1	1	1	0.926
	山东	0.666	0.662	0.664	0.651	0.646	0.853	0.819	0.769	0.763	0.747	0.754	0.741
	河北	0.545	0.531	0.539	0.545	0.522	0.635	0.58	0.531	0.526	0.635	0.533	0.561
3 东部沿海经济区	上海	0.849	0.91	0.918	0.869	0.848	0.916	0.915	0.912	0.966	0.913	0.933	0.91
	江苏	1	1	1	1	1	1	0.974	1	1	1	1	0.997
	浙江	0.883	0.843	0.9	0.889	0.883	1	0.951	0.926	0.952	0.943	1	0.938
4 南部沿海经济区	广东	1	1	1	1	1	1	1	1	0.869	1	0.911	0.976
	海南	0.631	0.65	0.732	0.729	0.747	0.761	0.747	0.7	0.713	0.699	0.698	0.725
	福建	0.736	0.736	0.78	0.748	0.774	0.926	0.874	0.907	1	1	0.882	0.877
5 黄河中游经济区	内蒙古	0.455	0.508	0.504	0.506	0.495	1	1	1	0.514	0.405	0.403	0.647
	山西	0.431	0.411	0.443	0.465	0.443	0.427	0.397	0.38	0.358	0.392	0.418	0.414
	河南	0.621	0.582	0.585	0.574	0.582	0.584	0.559	0.543	0.531	0.57	0.634	0.574
	陕西	0.545	0.578	0.61	0.66	0.69	0.699	1	0.618	0.594	0.635	0.678	0.687
6 长江中游经济区	安徽	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	江西	0.651	0.709	0.76	0.809	0.809	0.82	0.776	0.711	0.723	0.761	0.754	0.769
	湖北	0.587	0.603	0.641	0.653	0.699	0.831	0.865	0.846	0.881	0.947	1	0.818
	湖南	0.689	0.706	0.735	0.769	0.811	1	1	1	1	1	1	0.924
7 西南经济区	云南	0.472	0.457	0.464	0.489	0.506	0.536	0.567	1	1	1	0.621	0.687
	四川	0.618	0.631	0.685	0.713	0.751	0.751	0.801	0.859	1	1	1	0.84
	广西	0.638	0.581	0.596	0.602	0.596	0.693	0.698	0.693	0.669	0.678	0.615	0.649
	贵州	0.403	0.431	0.444	0.47	0.483	0.493	0.518	0.553	0.547	0.571	0.586	0.518
	重庆	0.494	0.592	0.622	0.646	0.681	0.771	0.761	0.797	0.843	0.853	0.86	0.759
8 大西北经济区	宁夏	0.322	0.355	0.371	0.381	0.371	0.431	0.407	0.374	0.373	0.349	0.357	0.379
	新疆	0.409	0.381	0.431	0.44	0.424	0.416	0.403	0.368	0.337	0.334	0.367	0.391
	甘肃	0.393	0.391	0.418	0.445	0.446	0.419	0.407	0.375	0.361	0.364	0.376	0.401
	青海	0.412	0.426	0.465	0.445	0.439	0.484	0.458	0.422	0.394	0.362	0.379	0.428

二氧化硫绩效计算结果

Part	Province	2011	2012	2013	2014	2015	平均
1 东北综合经济区	吉林	0.546	0.555	0.628	0.616	0.632	0.625
	辽宁	0.578	0.585	0.666	0.659	0.646	0.657
	黑龙江	0.539	0.532	0.554	0.539	0.516	0.536
2 北部沿海地区	北京	1	1	1	1	1	1
	天津	0.773	0.785	1	1	1	1
	山东	0.614	0.606	0.718	0.721	0.715	0.718
	河北	0.533	0.507	0.603	0.575	0.543	0.574
3 东部沿海经济区	上海	1	1	1	1	1	1
	江苏	1	1	1	0.889	1	0.963
	浙江	0.797	0.767	1	0.939	0.948	0.962
4 南部沿海经济区	广东	1	1	0.799	0.793	0.811	0.801
	海南	0.74	0.737	0.762	0.738	0.702	0.734
	福建	0.654	0.656	0.747	0.732	0.736	0.738
5 黄河中游经济区	内蒙古	0.478	0.467	1	1	1	1
	山西	0.432	0.413	0.399	0.374	0.358	0.377
	河南	0.528	0.52	0.511	0.49	0.48	0.494
	陕西	0.556	0.569	0.575	0.567	0.526	0.556
6 长江中游经济	安徽	1	1	1	1	1	1
	江西	0.658	0.636	0.651	0.629	0.598	0.626
	湖北	0.604	0.625	0.687	0.689	0.705	0.694
	湖南	0.704	0.724	1	1	1	1
7 西南经济区	云南	0.421	0.417	0.431	0.435	0.433	0.433
	四川	0.608	0.625	0.603	0.627	0.639	0.623
	广西	0.523	0.508	0.571	0.566	0.57	0.569
	贵州	0.419	0.436	0.444	0.461	0.487	0.464
	重庆	0.556	0.57	0.613	0.622	0.67	0.635
8 大西北经济区	宁夏	0.364	0.352	0.411	0.392	0.363	0.389
	新疆	0.405	0.394	0.392	0.382	0.351	0.375
	甘肃	0.394	0.394	0.378	0.367	0.34	0.362
	青海	0.395	0.384	0.428	0.424	0.396	0.416

氮氧化物绩效计算结果

Part	Province	2011	2012	2013	2014	2015	平均
1 东北综合经济区	吉林	0.545	0.56	0.63	0.612	0.62	0.621
	辽宁	0.633	0.638	0.715	0.698	0.658	0.69
	黑龙江	0.545	0.536	0.55	0.531	0.505	0.529
2 北部沿海地区	北京	1	1	1	1	1	1
	天津	0.783	0.794	1	1	1	1
	山东	0.686	0.678	0.78	0.771	0.76	0.77
	河北	0.544	0.517	0.607	0.568	0.519	0.564
3 东部沿海经济区	上海	1	0.865	0.907	0.898	0.953	0.919
	江苏	1	1	1	0.889	1	0.963
	浙江	0.857	0.815	1	0.907	0.915	0.941
4 南部沿海经济区	广东	0.994	0.955	0.801	0.791	0.828	0.807
	海南	0.641	0.628	0.641	0.629	0.61	0.627
	福建	0.699	0.699	0.8	0.782	0.799	0.794
5 黄河中游经济区	内蒙古	0.495	0.483	1	1	1	1
	山西	0.448	0.428	0.406	0.38	0.364	0.383
	河南	0.546	0.535	0.522	0.501	0.488	0.504
	陕西	0.588	0.602	0.598	0.587	0.537	0.574
6 长江中游经济	安徽	1	1	1	1	1	1
	江西	0.694	0.671	0.682	0.654	0.612	0.649
	湖北	0.664	0.687	0.749	0.747	0.773	0.756
	湖南	0.819	0.861	1	1	1	1
7 西南经济区	云南	0.455	0.446	0.45	0.454	0.449	0.451
	四川	0.703	0.723	0.674	0.702	0.706	0.694
	广西	0.583	0.562	0.602	0.603	0.614	0.606
	贵州	0.441	0.451	0.459	0.48	0.51	0.483
	重庆	0.614	0.635	0.679	0.684	0.732	0.698
8 大西北经济区	宁夏	0.369	0.356	0.41	0.388	0.359	0.386
	新疆	0.418	0.406	0.396	0.386	0.355	0.379
	甘肃	0.417	0.415	0.387	0.376	0.348	0.371
	青海	0.424	0.412	0.441	0.429	0.399	0.423

烟尘（粉尘）计算结果

Part	Province	2011	2012	2013	2014	2015	平均
1 东北综合经济区	吉林	0.489	0.518	0.584	0.577	0.592	0.584
	辽宁	0.557	0.556	0.639	0.628	0.621	0.629
	黑龙江	0.516	0.508	0.519	0.515	0.493	0.509
2 北部沿海地区	北京	1	1	1	1	1	1
	天津	0.82	0.831	1	1	1	1
	山东	0.614	0.622	0.716	0.706	0.691	0.704
	河北	0.5	0.473	0.564	0.544	0.503	0.537
3 东部沿海经济区	上海	1	1	1	0.928	1	0.976
	江苏	1	1	1	0.837	1	0.946
	浙江	0.778	0.814	1	1	1	1
4 南部沿海经济区	广东	1	1	0.807	0.82	0.862	0.83
	海南	0.734	0.747	0.718	0.729	0.698	0.715
	福建	0.634	0.632	0.688	0.677	0.677	0.681
5 黄河中游经济区	内蒙古	0.476	0.458	1	1	1	1
	山西	0.423	0.402	0.398	0.372	0.356	0.375
	河南	0.517	0.516	0.512	0.488	0.478	0.493
	陕西	0.547	0.557	0.566	0.559	0.523	0.549
6 长江中游经济	安徽	1	1	1	1	1	1
	江西	0.631	0.627	0.639	0.62	0.59	0.616
	湖北	0.582	0.609	0.66	0.665	0.676	0.667
	湖南	0.706	0.751	1	1	1	1
7 西南经济区	云南	0.416	0.407	0.432	0.439	0.439	0.436
	四川	0.605	0.663	0.626	0.645	0.647	0.639
	广西	0.509	0.485	0.553	0.552	0.548	0.551
	贵州	0.434	0.446	0.452	0.473	0.51	0.479
	重庆	0.576	0.599	0.631	0.65	0.704	0.662
8 大西北经济区	宁夏	0.364	0.351	0.413	0.398	0.367	0.393
	新疆	0.398	0.383	0.39	0.381	0.35	0.374
	甘肃	0.402	0.4	0.382	0.368	0.342	0.364
	青海	0.381	0.368	0.414	0.403	0.371	0.396

致谢

近年来，“碳中和”受到了社会的广泛关注，也激起了研究兴趣。本研究从人类面临的全球变暖危机的大背景出发，试图建立中国大陆各省的碳排放等影响气候变暖其他的温室气体的排放的环境绩效计算模型，并从空间地理上找到其排放的规律，目的在为早日实现“碳中和”的目标寻求理论和实证的支持。

为了准备此比赛，本人做了长时间的准备。上网学习、与相关人士交流以及参加相关学术会议，如 2021 年的中国可视化大会。通过学习与交流，找到了这个课题。然后搜集数据、建模、编程实现。最后，在论文撰写方面，也花费了大量的时间。出于对于研究的热爱，本人拒绝了很多别的活动，一心铺在此项目上。

本课题研究过程中受到了指导老师刘恒奇的无私关怀和帮助，给了许多切实的建议。尤其在论文写作方面，刘老师从框架、结构、作图、文献都多方面进行详细的指导。同时，也非常感谢本课题研究过程中，给予过交流和指导的各位老师和专业人士！