
区域大气环境承载力监测预警技术规范

(编制说明)

1 工作简况

1.1 任务来源

本标准依托于“基于人工智能与区块链技术的生态环境新型治理体系研究与示范应用”(国家重点研发计划 2021YFC1809004)中的子课题“生态环境新型治理体系构建与示范应用”。大气环境承载力是表征大气系统所能承受的社会经济活动压力的阈值,是指导区域大气环境系统规划与管理工作的重要依据。而大气环境承载力监测预警技术则可以有效的评价环境承载力状况并预测未来超载的趋势,完成初步预警工作。2015年9月,中共中央、国务院印发的《生态文明体制改革总体方案》中明确提出“规划编制前应当进行资源环境承载能力评价,以评价结果作为规划的基本依据。2016年9月,国家发展改革委联合12部委下发《资源环境承载能力监测预警技术方法(试行)》,要求“建立资源环境承载能力监测预警机制”。2017年9月,中共中央办公厅 国务院办公厅印发《关于建立资源环境承载能力监测预警长效机制的若干意见》中提出“建设监测预警数据库和信息技术平台”和“建立一体化监测预警评价机制”。在我国的《大气污染防治法》第八十七条规定:国务院生态环境主管部门会同国务院有关部门、国家大气污染防治重点区域内有关省、自治区、直辖市人民政府,根据重点区域经济社会发展和大气环境承载能力,制定重点区域大气污染联合防治行动计划,明确控制目标,优化区域经济布局,

统筹交通管理，发展清洁能源，提出重点防治任务和措施，促进重点区域大气环境质量改善。可见，开展环境承载能力监测预警已经成为环境保护部的法定职责。

当前我国在大气环境承载力监测预警领域同样面临着一系列挑战，诸如概念界定的模糊性、监测对象的不确定性、指标选择的局限性以及评价标准与权重配置的非合理性等问题。迄今为止，尚未建立起一套被广泛认可并能够科学指导实践的大气环境承载力监测预警技术体系和规范标准。这一现状要求我们亟须从科学的角度明确大气环境承载力的内涵与外延，清晰界定监测预警的对象与目标，以此为基础，优化并完善大气环境承载力的监测预警技术方法体系，制定出既科学严谨又具备推广价值的大气环境承载力监测预警规范。这一规范应能深入分析大气环境承载力的时空动态变化特征，为建立和完善大气环境质量监管、考核及调控机制提供坚实的科学依据，确保环境管理措施的前瞻性和有效性。

1.2 标准制定的必要性、原则与技术路线

1.2.1 标准制定的必要性

环境承载力监测预警研究具有重要现实意义，是我国深化生态文明体制改革、提升生态文明治理体系与治理能力现代化的重要手段。2013年11月《中共中央关于全面深化改革若干重大问题的决定》明确提出要“建立资源环境承载能力监测预警机制”。

2014 年底，经国务院同意，国家发改委联合原环境保护部、水利部、国土部等 13 个部门印发了《关于印发建立资源环境承载能力监测预警机制的总体构想和工作方案的通知》。按照国家发改委统一安排和部署，在原环境保护部组织指导下，原环境保护部环境规划院承担了环境承载力的评估监测预警技术支持工作。2016 年 9 月国家发改委等 13 部委下发《资源环境承载能力监测预警技术方法（试行）》，规定了水、土地、生态、环境等要素的单项评价和综合集成方法。2017 年 9 月，中共中央办公厅、国务院办公厅印发《关于建立资源环境承载能力监测预警长效机制的若干意见》，要求建立手段完备、数据共享、实时高效、管控有力、多方协同的资源环境承载能力监测预警长效机制，为构建国土空间开发格局奠定基础。当前，资源环境承载能力监测预警与长效机制建立相关研究与实践工作已经开始推进，将成为我国国土空间开发和生态环境治理的重要基础和手段。环境承载力监测预警是国家资源环境承载能力监测预警体系的重要组成部分。

2015 年 9 月，中共中央、国务院印发的《生态文明体制改革总体方案》中明确提出以资源环境承载力能力评价结果作为规划的基本依据。为贯彻执行国家《生态文明体制改革总体方案》，新修订的《中华人民共和国大气污染防治法》要求“根据重点区域经济社会发展和大气环境承载能力，制定重点区域大气污染联合防治行动计划”和“国家建立重污染天气监测预警体系”。环境承载力监测预警作为空气污染预警的重要前置评价条件，可以

为空气污染预警提供重要的科学支撑和技术互补。两者的管理与应对措施需要相互反馈,通过长期减排措施改善大气环境承载力,同时利用短期预警机制缓解即时污染状况,两者相辅相成,共同促进空气质量的持续改善。虽然国家各相关部委出台了相关政策文件,高度重视资源环境承载力评估工作,但是现阶段大气环境承载力监测预警工作概念界定不清、缺乏对大气环境承载力监测预警的系统认知,评估对象或目的不明确、指标体系构建缺乏针对性与目的性,评估指标体系庞杂、指标选取与权重确定过程过于主观片面、缺乏具有物理意义的客观量化技术方法,评估时间尺度单一、无法反映大气环境承载力监测预警的时空变化特征。因此,亟待提出被广泛认可、可推广的大气环境承载力监测预警评估技术规范。

为规范大气环境承载力监测预警工作,科学界定大气环境承载力监测预警概念及内涵、明确评估对象,提出大气环境承载力监测预警技术方法体系,编制本文件。

1.2.2 标准制定的原则

标准编制组以监测预警大气环境承载力目标为导向,本着科学性、普遍适用性和实用性的原则,致力于实现监测预警的科学的评估。

(1)科学性

充分利用相关领域的科学原理,熟悉国内外相关领域的研究

进展,吸取多年来相关工作所取得的成果和经验。

(2)普遍适用性

充分考虑国内现有的技术和装备水平以及社会经济承受能力,选择合适的研究方法和评估指标,适用于在大多数地区开展工作。

(3)实用性

指南内容详尽,工作流程简洁,便于实施与监督。

1.2.3 标准制定的路线

在制定大气环境承载力监测预警技术指南的过程中,需深刻理解环境承载力与人类活动压力之间的关系,特别是在一定时间尺度和特定基础设施条件下的动态平衡。明确其承受主体、承载对象及超负荷的具体含义与范围;鉴于此,指南的编制需借鉴经济学领域广泛应用的景气指数法,通过精确量化环境承载力在面对经济社会发展压力时的响应与变化,以实现对未来环境超载趋势的科学预警。

1.3 工作过程

1.3.1 制定工作计划

本标准编制单位承担团体标准的编制工作后,第一时间组成标准编制组和工作团队,认真学习领会国家关于资源环境承载力监测预警的管理要求和文件精神,收集了大气环境承载力监测

预警相关的基础资料，并制定了工作计划。

1.3.2 梳理研究进展

通过整理文献与当前大气环境承载力监测预警评估的方式，对水环境承载力评估相关内容进行梳理分析。2023年，编制组对国内外相关概念展开了研究，并汇集分析，为标准的编写提供了重要的依据。借鉴经济学上广泛应用的预警方法——景气指数法建立环境承载力监测预警模型，并选取环境压力指标进行承载力的表征。

1.3.3 初稿起草

2024年2月至7月，在开展文献查阅、现场调查和专家咨询的基础上，按照GB/T1.1-2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的编制规则，起草完成了《大气环境承载力监督预警技术指南》文本及编制说明草案。

1.3.4 标准立项

2024年7月，编制组召开了标准编制工作启动会，进行了团体标准立项情况的汇报，开展了本标准的立项讨论。会上，《大气环境承载力监督预警技术指南》文本及编制说明草案通过中国环境科学学会团体标准立项审查。

会后根据专家意见，编制组进行了逐条修改和完善，形成《大气环境承载力监督预警技术规范(编制组讨论稿)》。

1.3.5 专家咨询

2024年9月，召开《大气环境承载力监督预警技术规范(编制组讨论稿)》专家评审会，按专家组建议进一步修改完善《大气环境承载力监督预警技术规范》文本及编制说明。

1.3.6 公开征求意见

拟2024年9月，针对《大气环境承载力监督预警技术指南》文本及编制说明向公众征求意见。

1.3.7 技术审查

2024年10月份，针对《区域大气环境承载力监督预警技术指南》，开展专家技术审查会并开展修订。

1.3.8 正式发布

计划于2024年11月底发布。

2 相关实证案例

2.1 京津冀地区大气环境承载力预警预测案例

2.1.1 区域自然概况

京津冀地区是我国北方经济规模最大、最具活力的区域，包括北京市、天津市及河北省的11个地级市和雄安新区。该地区

位于东经 113°04'-119°53'，北纬 36°01' -42°37'之间，面积 21.8 万平方千米，常住人口约 1.11 亿人。京津冀地区处于内蒙古高原、太行山脉向华北平原的过渡地带，多高原和山地丘陵地，大气扩散条件极其不利，加之其承载了巨大的经济社会功能，该区域环境状况一直不容乐观，资源环境与经济发展矛盾十分突出。基于此，本章将从社会经济规模和结构、资源利用、污染排放、环境质量、环保设施建设等方面，分析京津冀地区 2004-2016 年各指标的变化情况，以期发现地区近十余年环境承载的演变趋势，为后续的大气环境承载力监测预警提供数据支撑。



图 2- 1 京津冀地区区位示意图

从地理环境看，京津冀地区位于中纬度亚欧大陆东岸，高原与平原、寒温带与暖温带、内流区与外流区的交接地带。从自然地貌来看，该区处于内蒙古高原、太行山脉向华北平原的过渡地带，整体地形特征是西北高，东南低。地形差异显著，地貌类型

复杂多样，高原、山地、丘陵、平原、盆地、湖泊等地貌类型齐全，高原和山地丘陵地区占区域的面积比例超过 50%。复杂地形地貌对区域风速、风向都有影响，进而影响大气污染扩散。

从气候条件看，京津冀地区气候条件属暖温带向寒温带，半湿润向半干旱过渡类型。大部分地区四季分明，冬季寒冷少雪，夏季炎热多雨，春多风沙，秋高气爽。年平均气温 0-12℃，北部高原区低于 4℃。冬季寒冷气候导致该地区必须人工取暖，而我国的能源结构决定了大部分地区只能燃煤供暖，导致冬季大气污染物的大量排放。夏季普遍高温，加速光化学反应，对城区复合型污染的形成带来影响。冬春季节干旱，不利于大气污染物的湿沉降。年平均大风日数 15-60 天，沙尘暴一般 3.3 天，最高 11 天。北部地区风大且频繁，有利于大气污染物扩散，但是由于靠近黄土高原和内蒙古高原，植被覆盖条件差，易导致大粒径颗粒物浓度较高。

京津冀地区作为“首都经济圈”，2019 年的经济总量达到 8.46 万亿元，占全国经济总量的 10%左右。2004 年，京津冀地区共有 9326 万人；2019 年达到 11307 万人。2004-2019 年京津冀地区整体人口增长幅度不大，特别是 2010 年后增速放缓。其中，北京地区在 2013 年后人口增速减缓，2016 年后受非首都功能疏解影响人口持续下降。

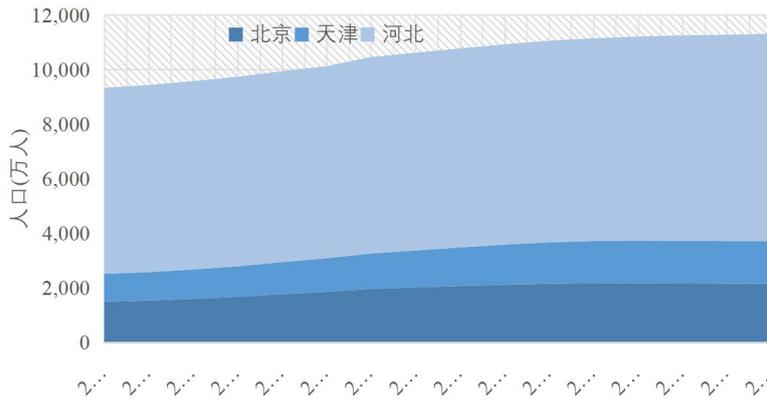


图 2- 2 京津冀地区人口规模

2.1.2 区域经济概况

2004 年，京津冀地区的经济总量（GDP）为 1.69 万亿，到 2019 年增长到 8.46 万亿。2004-2019 年京津冀地区整体经济增长速度较快，翻了两番。但在 2013 年经济增速整体放缓，特别是天津市几乎没有增长，2019 年 GDP 为负增长。

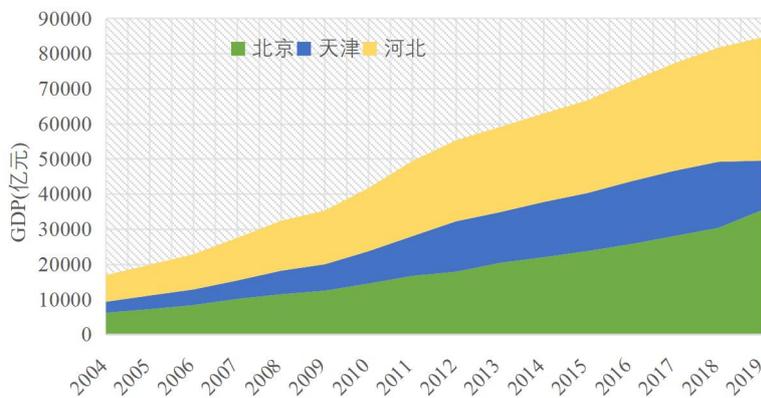
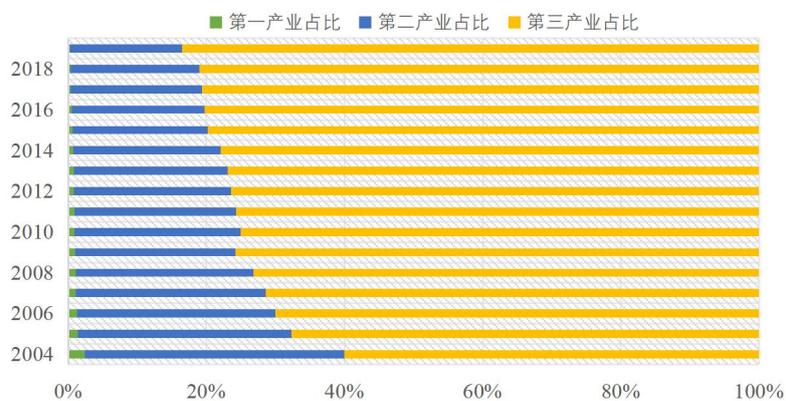


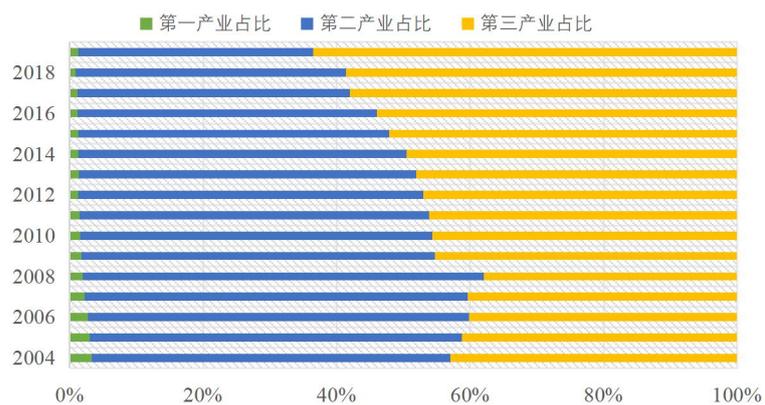
图 2- 3 京津冀地区生产总值

2004-2019 年京津冀地区产业结构中第一、二产业占比明显下降，第三产业占比稳步增加，其中以北京市第三产业占比增长幅度最大；此外，可以看出，到 2019 年，北京地区的产业结构主要以第三产业为主，占 GDP 的 83.5%；天津地区第二产业和第

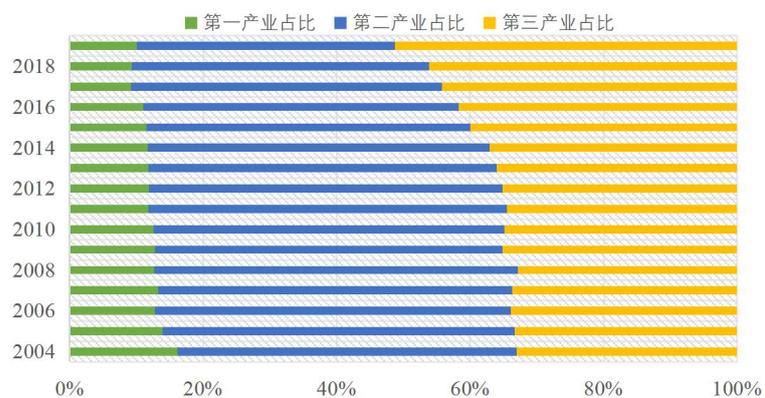
三产业的占比差距不大，但逐渐转变为以第三产业为主；河北地区相较于其他两个地区第一产业占比依然较为明显，且目前仍以第二产业为主，占 GDP 的近 50%。



(a) 北京市



(b) 天津市



(c) 河北省

图 2- 4 京津冀地区产业结构

2004-2018 年京津冀地区私人机动车拥有量增加显著，2019 年河北省有所下降导致整个地区的数量下降。其中，北京和天津地区分别在 2011 年和 2013 年后私人机动车拥有量增幅下降明显，但河北地区的机动车数量在 2018 年及以前还在以较快的速度增加，且在这十多年间，私人机动车数量增加了 2000 多万辆。

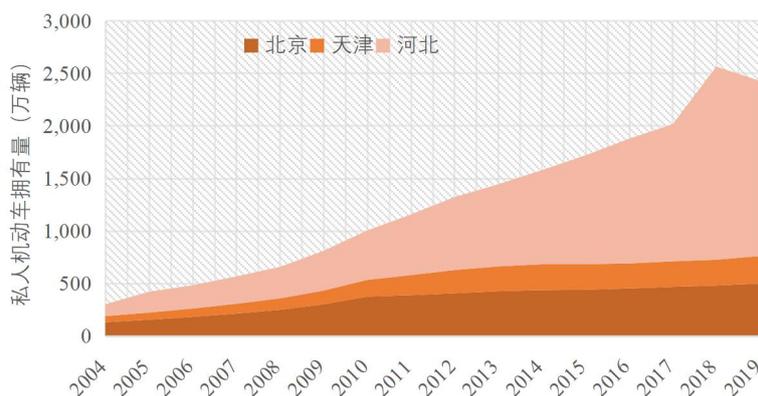


图 2- 5 京津冀地区私人机动车拥有量

2.1.3 区域资源能源概况

2004-2019 年京津冀地区能源消耗总量增加显著，主要以河北地区能源总消耗量增长为主，天津和北京地区能源总消耗量增长相对较少，且三个地区在 2012 年后能源总消耗量增加逐渐趋缓；2004-2019 年京津冀地区的万元 GDP 能耗均有较大幅度下降，但目前河北地区的万元 GDP 能源消耗仍较高，是北京和天津地区的 1-2 倍。

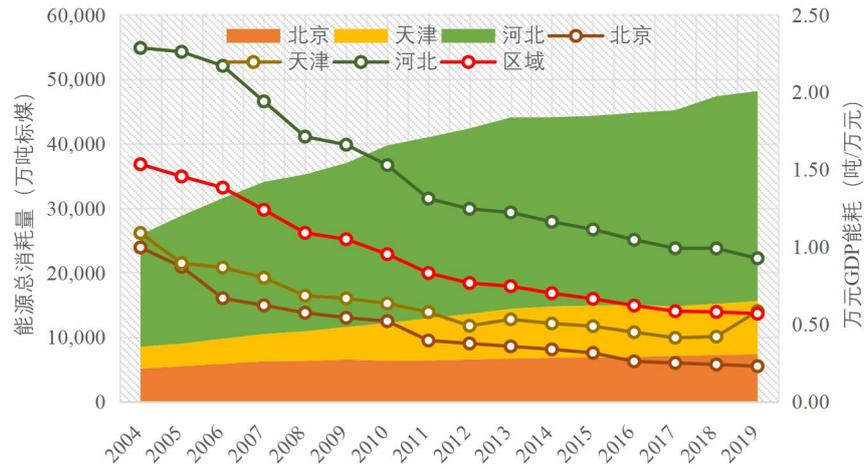


图 2- 6 京津冀地区能源总消耗和万元 GDP 能耗

2004-2019 年京津冀地区发电量增加明显，其中，北京地区 2004-2012 年的发电量趋于平稳，在 2013 年后增长趋势明显；天津地区发电量在 2009-2010 年增加明显，其他时间发电量趋于稳定；河北地区以 2004-2012 年发电量增加最为显著，但在 2013 年后也逐渐平稳，并在 2018 年后有小幅增长趋势。

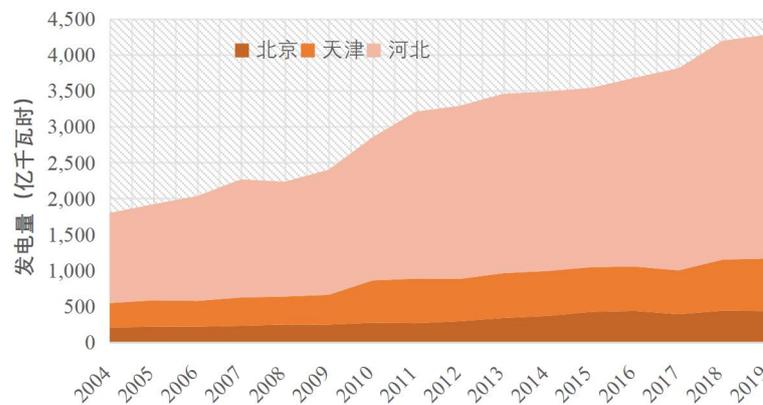


图 2- 7 京津冀地区发电量

2.1.4 区域生态环境概况

二氧化硫排放方面，2004-2019 年京津冀地区整体呈快速下降趋势（2011 年与 2010 年相比，排放量增大，主要是由于统计

口径变化导致)。2004年,京津冀地区二氧化硫排放184.67万吨;2019年下降到31.07万吨,仅为2004年的1/6。氮氧化物排放方面,除2018年外,2011年-2019年也呈下降趋势。2004年,京津冀地区氮氧化物排放234.84万吨;2019年下降到122.93万吨,为2011年的1/2。颗粒物排放方面,2004-2019年京津冀地区整体呈快速下降趋势,但是下降速度不及二氧化硫。2004年,京津冀地区颗粒物排放160.32万吨;2019年下降到52.82万吨,为2004年的1/3。



图 2- 8 京津冀地区大气污染物排放情况

2004-2016年京津冀地区的空气质量达标率在2013年前逐年提升的趋势,除天津地区在2009年空气质量达标情况略有下降。受空气质量监测评价标准改革的影响,京津冀地区的达标天数在2013年进行了调整,2014年后北京市空气质量逐年好转、达标天数不断上升;2017年天津、河北的达标天数有所下降。但是总体京津冀地区的空气质量在2013年后是有明显提升的,2020年北京市全年空气质量优良天数为276天,比2013年整整多了100天。

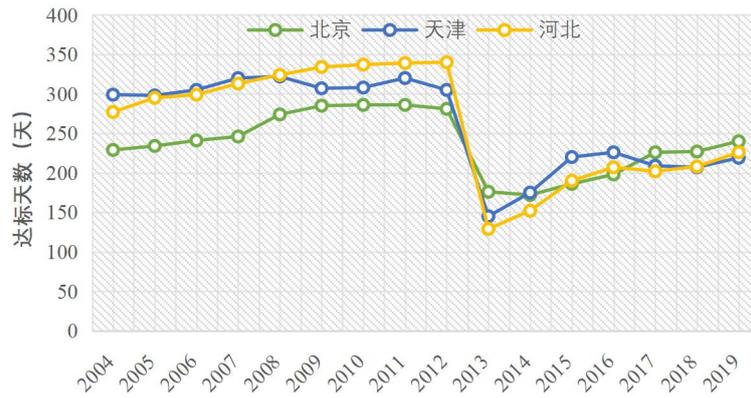


图 2- 9 京津冀地区空气质量达标情况

2004-2019 年京津冀地区的二氧化硫污染治理取得巨大成功。在 2004 年，除北京市外，其他两个省份的二氧化硫年均浓度全部超过《空气质量标准》(GB3095-2012) 的二级标准限值，到 2019 年三个省份均大幅下降，且低于《空气质量标准》(GB3095-2012) 的一级标准限值。



图 2- 10 京津冀地区二氧化硫年均浓度

2004-2019 年京津冀地区的氮氧化物污染治理也取得一定进展。2004 年北京市的二氧化氮年均浓度超过 $70 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，高于天津市和河北省的 $52 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 和 $35 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ；到 2019 年，北京市二氧化氮年均浓度为 $37 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，低于《空气质量标准》

(GB3095-2012) 的二级标准限值。天津市的二氧化氮年均浓度由 52 u g/m^3 下降为 42 u g/m^3 ，下降幅度小于北京市；河北省的二氧化氮年均浓度不降反升，到 2019 年上升为 39 u g/m^3 。天津市和河北省尚未达到二级标准。

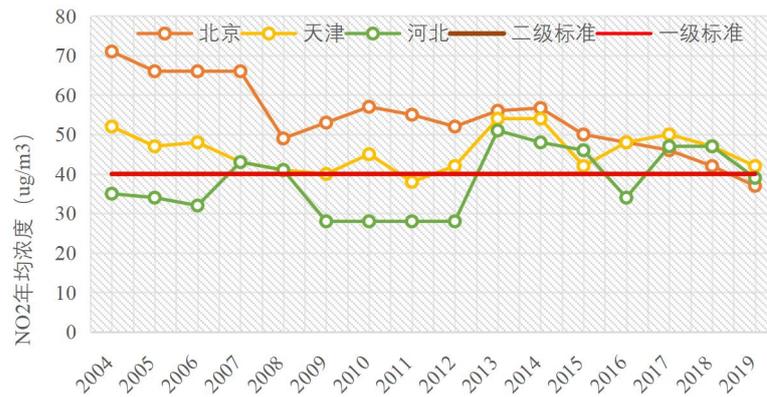


图 2- 11 京津冀地区二氧化氮年均浓度

2004-2019 年京津冀地区的颗粒物污染治理也取得较大进展。2004 年北京市的颗粒物年均浓度将近 150 u g/m^3 ，高于天津市和河北省的 111 u g/m^3 和 103 u g/m^3 ；到 2019 年，北京市的年均浓度降为 42 u g/m^3 ，略高于《空气质量标准》(GB3095-2012) 的二级标准限值。天津市的颗粒物年均浓度下降为 76 u g/m^3 ，下降幅度小于北京市；河北省的年均浓度下降幅度不太明显，到 2019 年为 93 u g/m^3 。天津市和河北省污染形势较为严峻。

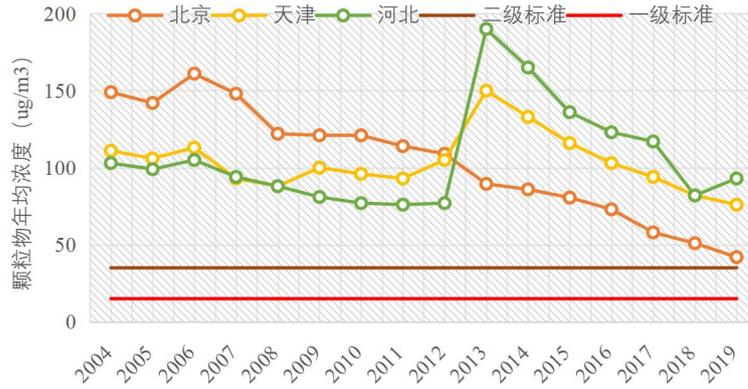


图 2- 12 京津冀地区颗粒物年均浓度

注：2013 年以前为可吸入颗粒物年均浓度；2013 年及以后为细颗粒物年均浓度

2.1.4 研究结果

2.1.4.1 警情指标类型

采用 SPSS 软件计算指标之间的时差相关系数，并以达标天数增长序列值作为基准指标，对预警指标时间序列进行验证以时差相关性系数最高项（最高项需同时满足相关系数大于 0.5，显著性水平大于 0.85）来确定延迟数，进而确定各指标与基准指标在时间序列上的先行、一致和滞后关系，具体结果如下。

经过对预警指标进行分类，结果可以看出，由于地区社会经济规模、产业结构、资源能源消耗和污染排放情况不同，京津冀三个地区各自划分出的指标也不同；北京地区共划分出 5 个先行指标、15 个滞后指标，天津地区共划分出 11 个先行指标、9 个滞后指标，河北地区共划分出 10 个先行指标、1 个一致指标、9 个滞后指标。取三个地区中同时出现两次及以上先行指标的，作

为京津冀地区的先行指标，包括总人口、第一产业占比、第二产业占比、农药使用量、化肥施用量、二氧化硫排放量、颗粒物排放量、环境污染治理投资总额和环境污染治理投资占 GDP 比重 9 个指标。

通过指标分类结果还可以看出，京津冀地区的大气环境承载力主要受人口、第一第二产业和污染治理投资的影响。其中北京市还与发电量有关；天津市还与国内生产总值、城市环境基础设施建设投资、工业污染源治理投资有关；河北省还与私人机动车拥有量、二氧化硫浓度有关。

此外，在滞后指标分类结果中可以发现，当前的大气环境承载状况还将影响未来几年该地区的人口、机动车保有量、污染治理投资等部分指标。比如河北省的人口在滞后 3 年时其相关系数为 -0.933，显著性水平大于 0.95，与空气达标天数呈反向的显著相关关系，可视为是空气质量太差、超出大气环境承载力，而主动或被动的造成人口流失。

北京市大气环境预警指标分类

指标	时差	相关系数	指标	时差	相关系数
X1	-2	0.395	X11	-2	0.321
X2	-5	0.522	X12	-6	0.517
X3	-6	0.505	X13	5	0.587
X4	-6	0.740	X14	5	0.717
X5	3	0.406	X15	5	0.604
X6	3	0.604	X16	-4	0.776
X7	7	0.713	X17	5	0.699
X8	-4	0.578	X18	7	0.692
X9	6	0.782	X19	1	0.617
X10	6	0.518	X20	7	0.676

天津市大气环境预警指标分类

指标	时差	相关系数	指标	时差	相关系数
X1	-6	0.782	X11	-5	0.258
X2	-6	0.435	X12	2	0.478
X3	-5	0.695	X13	2	0.554
X4	-6	0.749	X14	2	0.623
X5	5	0.586	X15	-7	0.592
X6	-4	0.413	X16	-7	0.531
X7	1	0.586	X17	-5	0.900
X8	5	0.510	X18	-1	0.676
X9	-4	0.812	X19	-1	0.700
X10	-4	0.607	X20	-5	0.863

河北省大气环境预警指标分类

指标	时差	相关系数	指标	时差	相关系数
X1	4	0.313	X11	-6	0.700
X2	-6	0.568	X12	2	0.335
X3	-4	0.926	X13	-5	0.531
X4	-6	0.894	X14	2	0.306
X5	5	0.503	X15	-4	0.502
X6	-2	0.282	X16	-7	0.442
X7	2	0.679	X17	-7	0.702
X8	5	0.641	X18	3	0.573
X9	-5	0.839	X19	0	0.480
X10	-7	0.800	X20	-7	0.836

2.1.4.2 警情指标编制

(1) 扩散指标

如前所述，扩散指数是评价和衡量景气指标的波动和变化状态，反映了社会经济对环境的影响状态。当扩散指数大于 50，说明半数以上警情指标处于景气状态，经济压力对环境造成的压力在增大；当扩散指数小于 50，说明半数以上警情指标处于不景气状态，经济对于环境造成的压力在变小。此外，先行扩散指数对同步扩散指数的领先程度（设为时差 t ），可以认为先行扩散

指数所预测的承载状态改变将在 t 年后出现。

通过对北京市、天津市、河北省的先行指标进行扩散指数编制，结果如下图所示。北京市的先行扩散指数在 2013 年之前较高，特别是 2010 年达到 80，说明所选的社会经济的大多数指标对大气环境承载的压力较大；在 2019 年为 20，社会经济的大多数指标对大气环境承载的压力较小。天津市在 2014 年之前，扩散先行指数较高，社会经济多数指标对大气环境承载压力较大；之后先行扩散指数都小于 50，社会经济多数指标的压力相对较小。河北省先行扩散指数在 2013 年也都高于 50；2014-2017 年低于 50，但是 2018、2019 年上升为 50，说明近几年河北省的大气环境承载压力变大。

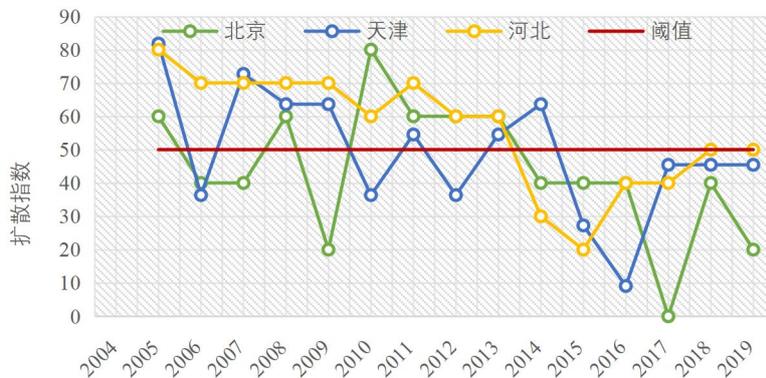


图 2- 13 京津冀地区先行扩散指数

另外，通过计算 t 值可知，北京市先行扩散指数领先 4.96 年，天津市领先 4.62 年，河北省领先 5.74 年。即京津冀地区社会经济对大气环境的压力一般会通过 5-6 年时间传导到大气环境质量，明显表现出来。

(2) 合成指数

合成指数在预警中起到和扩散指数相似的作用，但需要注意的是，合成指数不仅能对环境承载运行的景气状态进行预警，还可以预测承载力景气波动的程度和所处的水平。

根据北京市、天津市、河北省的先行指标进行扩散指数编制，可以看出，除河北省 2019 年外，其他地区的各个年份合成指数波动不大，基本围绕 100 左右浮动。北京市的先行合成指数在 2009 年之前较低，但是在 2010 年达到 100 以上，说明社会经济等各方面对大气环境承载的压力变大；在 2017 年以后又降到 100 以下，社会经济等各方面对大气环境承载的压力较小。天津市在 2014 年之前，扩散合成指数大多都高于 100，社会经济对大气环境承载压力较大；之后先行合成指数都小于 100，社会经济的压力相对较小。河北省先行合成指数变化规律与天津市类似，在 2014 年前都高于 100；2015-2019 年低于 100，特别是 2019 年下降为 97，说明近几年河北省的大气环境承载压力变小。

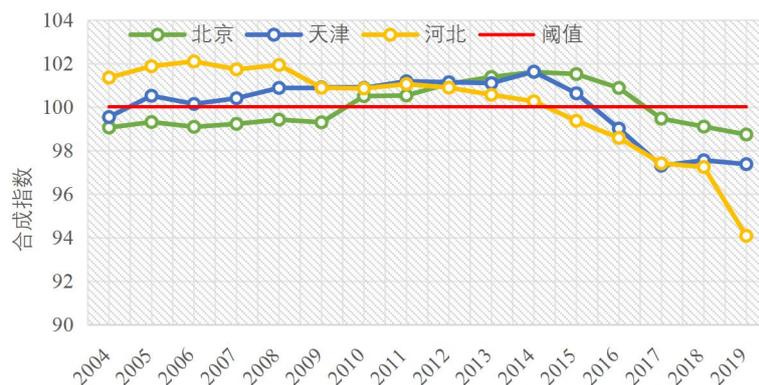


图 2- 14 京津冀地区先行合成指数

2.1.4.3 警情指标编制

取三个地区中同时出现两次及以上先行指标的，作为京津冀

地区的先行指标，包括总人口、第一产业占比、第二产业占比、农药使用量、化肥施用量、SO₂排放量、颗粒物排放量、环境污染治理投资总额和环境污染治理投资占 GDP 比重 9 个指标。将其标准化后，采用熵权法进行综合预警分析。具体过程如下：

(1) 数据标准化

采用极值法对数据进行归一化，其中环境污染治理投资总额和环境污染治理投资占 GDP 比重与空气达标呈反向关系，因此进行逆标准化。

表 2- 1 京津冀地区大气环境预警指标标准化

年份	总人口	第一产业占比	第二产业占比	农药使用量	化肥施用量	SO ₂ 排放量	颗粒物排放量	环境污染治理投资总额	环境污染治理投资占 GDP 比重
2004	0.00	1.00	0.94	0.69	0.15	0.92	0.73	1.00	0.86
2005	0.05	0.73	0.98	0.83	0.43	0.99	0.75	0.95	0.66
2006	0.13	0.57	0.97	0.85	0.48	1.00	0.68	0.91	0.59
2007	0.21	0.60	0.94	0.89	0.63	0.95	0.52	0.95	1.00
2008	0.31	0.52	1.00	0.95	0.63	0.84	0.46	0.85	0.73
2009	0.40	0.50	0.84	1.00	0.71	0.78	0.38	0.77	0.50
2010	0.57	0.46	0.87	0.94	0.83	0.76	0.29	0.67	0.40
2011	0.65	0.38	0.89	0.89	0.88	0.86	0.64	0.48	0.10
2012	0.73	0.35	0.89	0.95	0.94	0.81	0.59	0.50	0.33
2013	0.80	0.32	0.78	1.00	0.95	0.77	0.64	0.42	0.24
2014	0.87	0.27	0.72	0.98	1.00	0.70	1.00	0.26	0.00
2015	0.92	0.24	0.56	0.87	0.95	0.63	0.82	0.53	0.66
2016	0.95	0.18	0.49	0.81	0.85	0.35	0.57	0.41	0.52
2017	0.97	0.01	0.40	0.64	0.57	0.08	0.13	0.27	0.37
2018	0.98	0.00	0.33	0.14	0.33	0.13	0.12	0.13	0.21
2019	1.00	0.10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.06

(2) 确定各指标的权重

根据指标权重的计算公式，可以得到各个指标的权重如下表所示。9 个指标的权重分配较为均衡，最大权重与最小权重仅差

0.004。权重第二产业占比和农药使用量的权重最大，为 0.113；第一产业占比权重最小，为 0.109。

表 2- 2 大气环境承载力监测预警关键指标权重表

指标	总人口	第一产业占比	第二产业占比	农药使用量	化肥施用量
权重	0.110	0.109	0.113	0.113	0.112
指标	SO ₂ 排放量	颗粒物排放量	环境污染治理投资总额	环境污染治理投资占 GDP 比重	
权重	0.111	0.111	0.111	0.110	

(3) 计算综合警情指数

由此可以构建出综合警情指数，京津冀地区 2004 年至 2019 年综合警情指数得分如下表所示。2004-2007 年，京津冀地区的综合警情指数保持增长状态，在 2007 年最，达到 0.74，此后波动下降；2017 年-2019 年下降幅度较大。从中可以判断，2004-2007 后的 5-6 年，即 2009-2013 年，京津冀地区的大气环境承载压力达到峰值；2017 年-2019 年后的 5-6 年，即 2022-2025 年，京津冀地区的大气环境承载压力较小。

表 2- 3 京津冀地区大气环境监测预警综合警情指数

年份	大气环境综合警情指数	年份	大气环境综合警情指数
2004	0.7	2012	0.68
2005	0.71	2013	0.66
2006	0.69	2014	0.65
2007	0.74	2015	0.69
2008	0.7	2016	0.57
2009	0.65	2017	0.38
2010	0.65	2018	0.26
2011	0.64	2019	0.13

(4) 景气信号灯临界值确定及预警

根据综合警情指数计算结果，并采用 3σ 法对各灯区的预警界限进行确定，得到警情信号灯取值范围。其中，

深蓝灯：表明社会经济发展对环境造成的压力较小，环境承载力利用不足，未来可能面临经济社会发展速度过慢的问题，这时应优先鼓励经济发展，暂时无需担心环境问题。

浅蓝灯：表明环境承载力在承载目前社会经济规模下，还有较大结余，也说明经济增速正在放缓，未来需要警惕可能出现的经济增速过缓的情况。

绿灯：表明目前的经济社会规模匹配环境承载力，环境承载力在负担当前经济社会规模下还有少量结余，经济社会环境协调发展。

黄灯：表明社会经济发展对环境造成的压力较大，需要警惕经济社会进一步发展会导致的超载状况，应加大环境保护力度，控制经济发展速度。

橙灯：表明社会经济发展对环境造成的压力很大，经济社会过快发展，已经超出了环境能承受的范围，各种环境问题开始出现，这时必须限制经济发展，采取有效措施减轻环境压力。

红灯：表明环境承载力系统已处于严重超载状态，应采取紧急预警措施，防止环境状况出现不可逆转的恶化。

表 2- 4 京津冀地区大气环境监测预警综合警情景气信号区间临界值

	深蓝	浅蓝	绿	黄	橙	红
信号灯						
大气环境	≤ 0.314	0.314-0.486	0.486-0.657	0.657-0.828	0.828-1.000	> 1.000

通过输出的预警信号灯结果可以看出，京津冀地区大气环境承载力监测预警景气信号灯从2004年到2019年一直处于由黄变蓝状态，说明监测预警指标的对大气环境承载的压力越来越小。其中2004年-2008年为黄灯，说明5-6年后社会经济发展仍对环境造成的压力较大，需要警惕经济社会进一步发展会导致的超载状况，应加大环境保护力度，控制经济发展速度；2009年-2016年为绿灯，说明5-6年后经济社会规模匹配环境承载力，环境承载力在负担当前经济社会规模下还有少量结余，经济社会环境协调发展；2017年为蓝灯，说明5-6年后环境承载力在承载目前社会经济规模下，还有较大结余，也说明经济增速正在放缓，未来需要警惕可能出现的经济增速过缓的情况；2018年-2019年为深蓝灯，说明5-6年后社会经济发展对环境造成的压力较小，环境承载力利用不足，未来可能面临经济社会发展速度过慢的问题。

京津冀地区景气预警信号灯

年份	大气环境	年份	大气环境
2004	●	2012	●
2005	●	2013	●
2006	●	2014	●
2007	●	2015	●
2008	●	2016	●
2009	●	2017	●
2010	●	2018	●
2011	●	2019	●

3 国内外研究进展

环境承载能力研究经历了从萌芽到深入、从单一到综合的探索，其概念理论与研究方法不断完善。

3.1 国外相关研究进展

国外方面，环境承载相关的研究由来已久，以后涉及范围不断扩大，经历了由单一要素向综合要素、由静态到动态的过程。18世纪80年代，马尔萨斯(Malthus, T.R.)即开始研究周围环境因素（主要是食物）对人口规模的约束。其名著《人口原理》假设食物是限制人口增长的唯一因素，提出食物呈线性增长对人口呈指数增长的第一个承载力研究的基本框架，即根据限制因子的状况，得出研究对象的极限数量，此后这一框架被生态学、人口学、地理学等学科广泛采纳。承载力最初被引进区域环境系统，是在生态学领域，主要是研究在某种环境条件下某种生物个体可存活的最大数量的潜力。20年代70年代以后，扩展到资源环境与社会经济相关联的领域。1986年，Catton定义了“环境承载力”的概念，后来国外很多学者把它引申为生态承载力。20世纪90年代初，加拿大生态经济学家 William 和 Wackernagel 提出“生态足迹”(Ecological Footprint)的概念，使承载力的研究从生态系统中的单一要素转向整个生态系统。

3.2 我国相关研究进展

国内方面，任美镔先生是我国最早注意到承载力研究重要性的学者。在 40 年代末任美镔先生通过对四川省农作物生产力分布的地理研究，首先计算了以农业生产力为基础的土地承载力。1986 年中科院综考会等多家科研单位联合开展的“中国土地生产潜力及人口承载量研究”是我国迄今为止进行得较为全面的土地承载力方面的研究。随着研究的深入，20 世纪 80 年代末，我国承载力研究大多不再局限于某一种资源，而是更强调综合性，如资源与环境综合承载力、地理环境人口承载潜力、生存空间的人口承载力、区域承载力等。国家“七五”重点科研项目《我国沿海经济开发区环境的综合研究—福建省湄洲湾开发区环境规划综合研究》是较早将环境承载力与产业结构和生产力布局相结合的研究。此后，针对大气、水等环境要素，我国进行了多项相关研究工作，形成多种不同方法。此外，刘伟等通过从大气环境、污染控制、社会经济三个层面构建指标体系，然后采用层次分析法进行区域大气环境承载力评价；刘龙华等通过计算福建省大气环境容量，进而与排放量对比进行了我国省级区域大气环境承载力评价；张静等采用该方法进行了我国城市群大气环境承载力评价，该方法简便易行，应用广泛。

4 标准制定的必要性

目前大气环境承载力监测预警面临的主要挑战和问题：

（1）环境承载力评价关键技术方法仍不完善

有关部门尽管出台了资源环境承载力评估的技术规程，但仍然存在很大的争议，主要集中在承载力内涵界定不清晰、环境承载力的若干关键技术问题（如单要素评估、综合评估、尺度效应、关键阈值等）亟待解答、缺乏基于空间和时间差异的精细化评价方法、生态承载力难以定量评价以及监测预警评估技术方法缺乏等方面，受到有关机构、专家、技术管理人员的质疑。同时，环境承载力评估方法对数据要求高，地方难以获取，部分区县数据严重缺失，也影响到承载力评价工作的开展。

（2）环境承载力研究与经济社会发展实际应用脱节

当前经济社会发展的相关规划多数未能在顶层设计中考虑环境的承载能力，没有体现环境承载力的基础性、源头性和约束性作用，对实施空间规划和主体功能区规划评估修订的支撑力度不够。同时，基于环境承载力评价，如何从产业规模、产业结构、产业布局方面以及行业减排、项目准入、排放标准、负面清单等管理方面提出有效的管控措施，如何提出缓解承载压力、增强承载能力的有效路径，且如何与现有环境管理政策制度相衔接还不清晰，对优化国土开发空间、加大环境保护力度、新型城镇化和城乡统筹、产业结构与布局调整等的科学化、精细化决策支撑力度明显不够。

（3）实时动态的环境承载力监测预警系统尚未建立

环境承载力的评价以及监测预警，需要建立全国统一的信息

平台，开发环境承载力监测预警数据库和信息技术平台是建立形成资源环境承载力监测预警长效机制的重要基础。目前开展的工作重点集中于技术方法体系的研究，尚未深入研究环境承载能力监测预警数据库的建设以及技术平台的开发，如何运用云计算、大数据处理及数据融合技术，实现数据整合集成与实时动态更新，形成环境承载力监测预警智能分析与动态可视化平台是后续工作的重点方向，特别是建立实时动态的环境承载力监测、评估、预警系统平台，对环境承载力的潜在风险实现系统预警还需要加大开发。

在如此背景下，制定《基于大数据的大气环境承载力监测预警技术规范》的标准规范，具有如下必要性：

1. 弥补技术与应用鸿沟

当前，环境承载力评估技术与经济社会发展实际应用之间存在显著脱节，缺乏统一的指导原则和标准，导致环境承载力的科学评估难以转化为有效的政策工具和管理实践。标准规范的制定将填补这一空白，确保环境承载力研究成果能够被正确、一致地应用于环境管理决策中。

2. 保障数据质量与一致性

数据获取困难和质量参差不齐是制约环境承载力评估的一大障碍。标准规范的出台将规范数据收集、处理和分析流程，确保数据的准确性和一致性，为环境承载力监测预警系统提供坚实的数据基础。

3. 实现监测预警的智能化与实时化

缺乏实时动态的环境承载力监测预警系统是当前面临的重大挑战。通过标准规范的制定，可以推动建立统一的信息平台和数据库，利用大数据、云计算等先进技术，实现环境承载力的实时监测、智能分析和动态预警，提高预警效率和响应速度。

4. 提升评估的精细化与科学化

当前环境承载力评估方法存在诸多局限，如尺度效应、关键阈值界定不清等问题。标准规范将促进多尺度精细化评估技术的发展，提升环境承载力评估的科学化水平，为环境管理决策提供更精准的支持。

5. 加强环境承载力预警与决策支持

标准规范的制定将推动环境承载力预警信息技术系统的研发，构建环境承载力关键要素变化的风险预警评估技术与指标体系，为环境管理者提供预警信号和应对策略，支持国土开发、资源利用、生态保护等领域的优化决策。

6. 促进环境承载力大数据平台技术的成熟

通过标准规范的引导，可以加速环境承载力大数据平台技术的发展，整合多源数据，实现数据的高效管理和动态更新，为环境承载力监测预警提供可靠的数据支持。

7. 强化环境承载力的动态预测与管理

标准规范将促进环境承载力动态预测与决策技术的进步，帮助政府和企业基于情景模拟和多目标优选决策模型，制定更加科

学合理的环境管理政策和措施。

综上所述，制定《大气环境承载力监测预警技术规范》不仅能够解决当前环境承载力监测预警领域存在的技术难题，还能够促进环境管理决策的科学化和精细化，对于保障生态环境安全、推动经济社会可持续发展具有重要的战略意义。