

DOI: 10.5846/stxb202103300828

许杰, 刘海江, 聂平静, 金自恒, 翟德超, 高锡章. 国家重点生态功能区县域环境空气质量时空变化分析. 生态学报, 2022, 42(11): 4362-4368.

Xu J, Liu H J, Nie P J, Jin Z H, Zhai D C, Gao X Z. Spatiotemporal analysis of environmental air quality in counties of national key ecological function areas. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(11): 4362-4368.

国家重点生态功能区县域环境空气质量时空变化分析

许 杰^{1,2}, 刘海江³, 聂平静^{1,2}, 金自恒^{1,2}, 翟德超^{1,2}, 高锡章^{1,4,*}

1 中国科学院地理科学与资源研究所 资源与环境信息系统国家重点实验室, 北京 100101

2 中国科学院大学 资环学院, 北京 100049

3 中国环境监测总站, 北京 100012

4 江苏省地理信息资源开发与利用协同创新中心, 南京 210023

摘要: 评估国家重点生态功能区县域空气质量改善状况, 对落实国家生态文明建设与重点生态功能区转移支付制度具有现实意义。以国家重点生态功能区转移支付县域空气质量为评价对象, 基于 2015 年至 2019 年的空气质量监测站点日均值数据, 对环境空气质量状况和变化进行了评价分析。研究结果表明: 国家重点生态功能区转移支付县域空气质量总体表现较好且仍在稳步提升, 转移支付政策对 2015—2019 年国家重点功能区空气质量的改善有着明显的推动作用。优良天数比例超过 90% 的县域占比由 2015 年的 33.77% 提高到 2019 年的 69.52%, 水源涵养区的优良天数占比由 2015 年的 72.71% 提高到 2019 年的 92.09%, 空气质量改善效果最为显著。2015—2019 年间, 细颗粒物(PM_{2.5})污染占比明显下降, 臭氧(O₃)污染占比大幅上升, 主要超标污染物由颗粒物逐渐转为颗粒物和臭氧。当前防风固沙区的主要超标污染物为可吸入颗粒物(PM₁₀)和细颗粒物, 其他三类生态功能区为细颗粒物和臭氧。重点生态功能区的空气质量存在着显著的空间差异, 空气污染表现出显著的空间聚集特征。在四类国家重点生态功能区中, 生物多样性区的空气质量最好, 水源涵养区次之, 水土保持区稍差, 防风固沙区最差。国家重点生态功能区承担着保障国家生态安全的重要功能, 今后仍需持续加强国家重点生态功能区空气质量监测力度, 细化生态系统建设评估指标体系, 为生态环境保护措施的有效实施和国家重点生态功能区生态环境建设的管理决策提供科学依据。

关键词: 国家重点生态功能区; 财政转移支付; 空气质量监测; 空气质量指数

Spatiotemporal analysis of environmental air quality in counties of national key ecological function areas

XU Jie^{1,2}, LIU Haijiang³, NIE Pingjing^{1,2}, JIN Ziheng^{1,2}, ZHAI Dechao^{1,2}, GAO Xizhang^{1,4,*}

1 State Key Laboratory of Resources and Environmental Information System, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

2 College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3 China National Environmental Monitoring Center, Beijing 100012, China

4 Jiangsu Center for Collaborative Innovation in Geographical Information Resource Development and Application, Nanjing 210023, China

Abstract: Evaluation of the environmental air quality in counties of the national key ecological function areas is of practical significance to the implementation of the ecological civilization construction and transfer payment system for the national key ecological function areas. Took the air quality of transfer payment counties in the national key ecological function areas as the evaluation object, the status and changes of ambient air quality were evaluated and analyzed based on the daily average data of air quality monitoring stations from 2015 to 2019. The conclusion of the research indicated that the overall air quality

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0500205); 国家自然科学基金项目(41571391)

收稿日期: 2021-03-30; **采用日期:** 2021-08-16

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: gaoxz@lreis.ac.cn

of transfer payment counties in the national key ecological function areas was generally good and improving, transfer payment policy has a significant promoting effect on the improvement of air quality in the national key functional areas from 2015 to 2019. The proportion of counties with more than 90% good air quality days increased from 33.77% in 2015 to 69.52% in 2019, and the water conservation areas' proportion of excellent air quality days increased from 72.71% in 2015 to 92.09% in 2019, with the most significant improvement in air quality. Between 2015 and 2019, with the significantly decreased in proportion of fine particulate matter ($PM_{2.5}$) pollution, and increased in the proportion of ozone (O_3) pollution, the main non-attainment pollutants were gradually changed from particulate matter to particulate matter and ozone. At present inhalable particles (PM_{10}) and fine particulate matter were the main over standard pollutants in the sand fixation areas, and fine particulate matter and ozone were the other three types of the national key ecological function areas. There were significant spatial differences in air quality in the national key ecological function areas, and air pollution exhibited significant spatial aggregation characteristics. Among the four ecological function areas, the air quality of the biodiversity conservation areas was the best, followed by the water conservation areas, the water and soil conservation areas was slightly worse, and the sand fixation areas was the worst. The national key ecological function areas undertake the important function of guaranteeing national ecological safety. In the future, it is still necessary to continue to strengthen the air quality monitoring of the national key ecological function areas and refine the evaluation index system of ecosystem construction, so as to provide a scientific basis for the effective implementation of ecological environment protection measures and the management decision-making of ecological environment construction of the national key ecological functional areas.

Key Words: national key ecological function areas; financial transfer payment; air quality monitoring; air quality index

建立国家重点生态功能区是保障国家生态安全的重要措施,国家环境保护总局于 2007 年公开发布《国家重点生态功能保护区规划纲要》^[1],至 2010 年国务院发布《全国主体功能区规划》,正式将 25 个限制开发区域列为国家重点生态功能区,为国家未来的土地和空间发展制定了规范和指导方针^[2]。同时,中央财政于 2008 年启动国家重点生态功能区转移支付,用于对发展受限的国家重点生态功能区的县(市、区)给予一般性转移支付资金进行生态补偿^[3],截止到 2019 年,国家已累计投入转移支付资金近 5200 多亿元^[4]。评估国家重点生态功能区财政转移支付的空气质量改善状况,对国家生态文明建设与重点生态功能区制度的完善具有重要意义^[5-7]。空气质量是关乎人们生命健康的一项重要环境质量数据,同时也是反映生态环境质量的一项敏感指标。空气质量状况及其主要污染物通常能够反映大气环境的健康程度,研究其动态变化过程有利于解释污染物扩散的成因及规律^[8-10],帮助人们更好的进行大气污染防治,建设更加高效的生态文明系统,对国家重点生态功能区的空气质量的时空变化规律进行研究,可以直接反映国家重点生态功能区财政转移支付的空气质量改善状况^[5]。

目前的空气质量研究工作主要包括从单个城市的点状尺度到城市群的区域尺度,再到国家尺度,对空气质量时空分布特征及其驱动因素进行探讨^[10-11]。点状尺度方面,刘春兰等人对 1997—2007 年北京市二氧化碳排放变化的原因及影响^[12]、Kassomenos 等对欧洲 3 个城市颗粒物污染的变化特点及成因等进行了研究^[13];在区域尺度方面,诸多学者对京津冀城市群、长三角城市群等我国经济较为发达地区的细微颗粒物 $PM_{2.5}$ 浓度的时空变化规律及其驱动因素进行了研究^[9,14-15],部分学者则是对京津冀地区的臭氧污染特征^[16]、二氧化氮的分布差异及影响因素^[17]、大气污染物的区域传输过程等进行了细致的分析^[18-19];国家尺度方面,同样包括对如细微颗粒物 $PM_{2.5}$ 浓度在中国的分布特征^[8,10,20]、中国境内空气质量指数(Air quality index, AQI)的驱动因素进行了等系统性研究^[21-22]。然而,当前针对国家重点生态功能区内空气质量状况的研究还相对不足,特别是从空气质量状况的变化方面评估国家财政转移支付效益的研究工作更是为数甚少。因此,本篇以国家重点生态功能区转移支付县域为评价对象,以空气质量监测数据为基础,对国家首次具体实施转移支付制度以来,国家重点生态功能区空气质量状况的时空变化规律进行评价分析,致力于为生态环境

保护措施的有效性和国家重点生态功能区生态环境建设管理决策提供科学依据。

1 研究方法

1.1 研究区概况

2010 年,国务院初步划定了 25 个限制开发区域列为国家重点生态功能区,包括 436 个县级单位,总面积约 386 万 km²,占全国陆地国土面积的 40.2%,将重点生态功能区分为水土保持型、防风固沙型、水源涵养型和生物多样性维护型四种类型^[2]。2008 年起,中央财政通过国家重点生态功能区转移支付制度,对位于国家重点生态功能区的县(市、区)给予一般性转移支付资金,弥补重点生态功能区经济发展的损失^[4]。2011 年,正式开始考核时,转移支付县域为 452 个,以后逐年增加,截止至 2019 年底,转移支付县域达到 817 个,总面积约 484 万 km²,占全国陆域国土面积的 50.4%,分布在北京、天津、河北等 29 个省(自治区、直辖市)以及新疆生产建设兵团。

1.2 数据及评价方法

本文的空气质量监测数据来源于 2015—2019 年中国环境监测总站国家重点生态功能区的环境质量基础和监测数据,截止至 2019 年底,共有 987 个监测站点 1425759 天空气质量监测日均值数据。主要监测指标为二氧化硫(SO₂)、二氧化氮(NO₂)、一氧化碳(CO)、臭氧(O₃)、可吸入颗粒物(粒径小于等于 10μm,PM₁₀)和细颗粒物(粒径小于等于 2.5μm,PM_{2.5})六项基本污染物。除了 O₃ 的浓度为 8 小时滑动平均值外,其余 5 种污染物的监测数据均为 24 小时平均值。

本研究采用的空气质量指数评价基本方法,依据《环境空气质量指数(AQI)技术规定(试行)(HJ 633—2012)》^[23],通过 6 项基本污染物浓度来确定空气质量指数的值。根据每个污染物浓度限制,计算各污染物对应的空气质量分指数(Individual air quality index, IAQI),方法如下:

$$IAQI_P = \frac{IAQI_{Hi} - IAQI_{Lo}}{BP_{Hi} - BP_{Lo}} (C_P - BP_{Lo}) - IAQI_{Lo} \quad (1)$$

式中,IAQI_P为污染物 P 的 IAQI;C_P为污染物 P 的质量浓度值;BP_{Hi}为表 1 污染物限值表中对应 C_P的高位值;BP_{Lo}为表 1 污染物限值表中对应 C_P的低位值;IAQI_{Hi}为表 1 中 BP_{Hi}对应的 IAQI;IAQI_{Lo}为表 1 中 BP_{Lo}对应的 IAQI。

表 1 空气质量分指数及对应的污染物项目浓度限值(HJ 633—2012)

Table 1 Individual air quality index and corresponding pollutant concentration limit values (HJ 633—2012)

空气质量分指数 Individual air quality index	污染物指标 Pollutant index ⁽¹⁾					
	可吸入颗粒物 (粒径小于 等于 10μm) Inhalable particles (Particles less than 10μm in diameter) <=	二氧化硫 SO ₂ <=	二氧化氮 CO ₂ <=	一氧化碳 CO <=	臭氧 O ₃ <=	细颗粒物(粒径 小于等于 2.5μm) Fine particulate matter (Particles less than 2.5μm in diameter) <=
0	0	0	0	0	0	0
50	50	50	40	2	100	35
100	150	150	80	4	160	75
150	250	475	180	14	215	115
200	350	800	280	24	265	150
300	420	1600	565	36	800	250
400	500	2100	750	48	—	350
500	600	2620	940	60	—	500

(1)除一氧化碳的浓度单位为 mg/m³外,其余污染物浓度单位均为 μg/m³

计算整体的空气质量指数,则使用公式(2):

$$AQI = \max (IAQI_1, IAQI_2, IAQI_3, \cdots IAQI_6)$$

(2)

根据《环境空气质量指数技术规定》^[23]按照值的大小将空气质量指数分为优、良、轻度污染、中度污染、重度污染和严重污染六个等级,空气质量指数数值越大,空气污染越严重。

2 研究结果

2.1 环境空气质量分析

空气质量评价结果按优、良和轻度污染等 6 个级别的统计天数占总监测天数的比例进行分析,分别针对所有转移支付县域的自动站监测数据进行分析。分析结果表明(表 2):重点生态功能区转移支付县域 2015 年至 2019 年空气质量优良天数的比例分别为 80.58%、85.42%、87.87%、87.92%、89.23%,平均达到 86.20%。其中优级空气天数比例提升明显,从 2015 年的 29.00%上升至 2019 年的 44.41%;良级天气数占比最高,始终维持在 50%左右。严重污染天气占比略微增加,没有明显改善。

表 2 转移支付县域不同空气质量天数占比/%

Table 2 The proportion of days with different air quality in transfer payment county

年份 Year	优 Excellent	良 Good	轻度污染 Lightly polluted	中度污染 Moderately polluted	重度污染 Heavily polluted	严重污染 Severely polluted
2015	29.00	51.58	13.50	3.51	1.90	0.51
2016	37.54	47.88	10.25	2.50	1.38	0.45
2017	39.31	48.56	8.98	1.88	0.94	0.33
2018	40.60	47.32	8.85	1.81	0.85	0.58
2019	44.41	44.82	7.73	1.73	0.73	0.57

重点生态功能区分布广泛,不同类型生态功能区定位相异,环境空气质量差别较大。由表 3 可知,生物多样性区的环境空气质量显著高于重点生态功能区的整体水平,每年的优良天数占比都保持在 93.00%以上,且稳步上升;水源涵养区的空气质量逐年改善,优良天数比例于 2017 年开始高于重点生态功能区的平均水平 87.87%,改善最为显著;水土保持区的空气质量虽然逐渐改善,但优良天数比例提升幅度较小,效果不够明显;防风固沙区的优良天数比例没有明显的上升趋势,2019 年优良天数比例 77.84%甚至低于 2015 年的 79.63%,环境空气质量最差。

表 3 2015—2019 年不同生态功能区优良天数比例占比/%

Table 3 The proportion of good days in different ecological function areas from 2015 to 2019

功能区类型 Ecological function areas type	2015	2016	2017	2018	2019
水源涵养型 Water conservation	72.71	84.00	89.13	90.60	92.09
生物多样性型 Biodiversity conservation	93.87	93.24	93.69	95.43	96.42
水土保持型 Soil and water conservation	81.00	81.93	82.74	82.16	83.61
防风固沙型 Sand fixation	79.63	79.46	84.27	73.49	77.84
重点生态功能区 National keyecological function areas	80.58	85.42	87.87	87.91	89.24

环境空气质量水平在重点生态功能区中的空间分布也表现出明显的空间聚集特征。本文根据转移支付县域 2019 年空气质量监测站点日监测数据计算出每日的空气质量指数值,并以转移支付县域为单位求年均值得出了 2019 年重点生态功能区转移支付县域年均空气质量级别的分布情况(图 1)。西北、华北和中部地区的空气质量相对较差,特别是新疆南部的塔克拉玛干沙漠地区的防风固沙区和中国北部黄土高原的水土保持区有较多的转移支付县域环境空气质量污染还比较严重。东北、西南和东南区域的转移支付县域大多位于水源涵养区和生物多样性区,空气质量较好,多数县域都维持着优级空气质量级别,只有部分县域是良类空

气。整体而言,位于西北的防风固沙区空气质量最差,位于中部的水土保持区空气质量较差,而位于西南和东南区域的水源涵养区和生物多样性区空气质量相对较好。

2.2 超标污染物分析

2015—2019 年,总超标天数为 138139d,其中 PM_{10} 和 $\text{PM}_{2.5}$ 的超标天数明显高于其他污染物,超标天数分别为 57376d 和 75695d,占超标天数比例为 41.53% 和 54.80%; O_3 的超标天数上升比较明显,2019 年达到 13181d,接近于 PM_{10} 的超标天数。转移支付县域的主要超标污染物由颗粒物逐渐变为颗粒物和臭氧, $\text{PM}_{2.5}$ 作为污染物的占比有明显下降趋势,从 2015 年的 35.51% 下降至 2019 年的 23.34%;而 O_3 有明显上升趋势,从 2015 年的 20.17% 上升至 2019 年的 45.99%,较 2015 年的占比有了大幅提升,已经成为生态功能区转移支付县域内影响空气质量最主要的污染物之一。 CO 、 NO_2 和 SO_2 三种污染物超标频次占比较低,且总体呈下降趋势。

图 2 显示了 2015—2019 年四类生态功能区中不同污染物超标天数占总超标天数的比例。2015 年四类生态功能区的超标天气中,超标天数占比最高的两项均为颗粒物,到 2019 年,水源涵养区、生物多样性区和水土保持区超标天数占比最高的仍是 $\text{PM}_{2.5}$,但占比次高的已经变为 O_3 。可以看到,水源涵养区的 PM_{10} 超标频次占比在 2018 年略微反弹;生物多样性区的 $\text{PM}_{2.5}$ 超标频次占比不断波动,水土保持区的 PM_{10} 和 $\text{PM}_{2.5}$ 超标频次占比均在 2016 年有所提升。这三类生态功能区超标污染物中, O_3 出现频次均呈现不同程度的逐年提升,其中水土保持区最为明显,由 2015 年占比 11.44% 增长至 2019 年的 43.57%。防风固沙区超标天数占比最高的两项仍是颗粒物,且 2019 年防风固沙区 PM_{10} 超标天数占比达到 76.34%,远高于其他生态功能区。

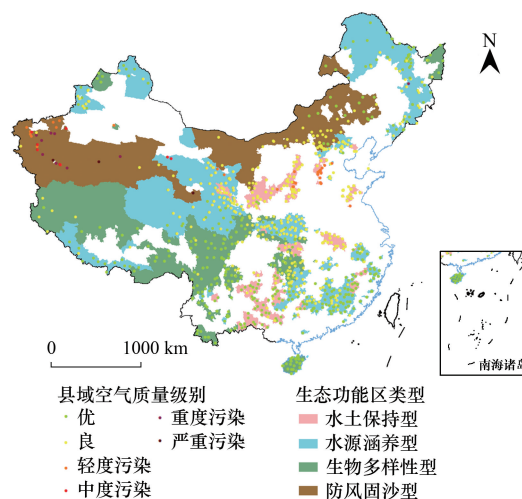


图 1 2019 年国家重点生态功能区转移支付县域年均空气质量级别分布

Fig.1 Distribution of average annual air quality level in counties under transfer payments for national key ecological function areas in 2019

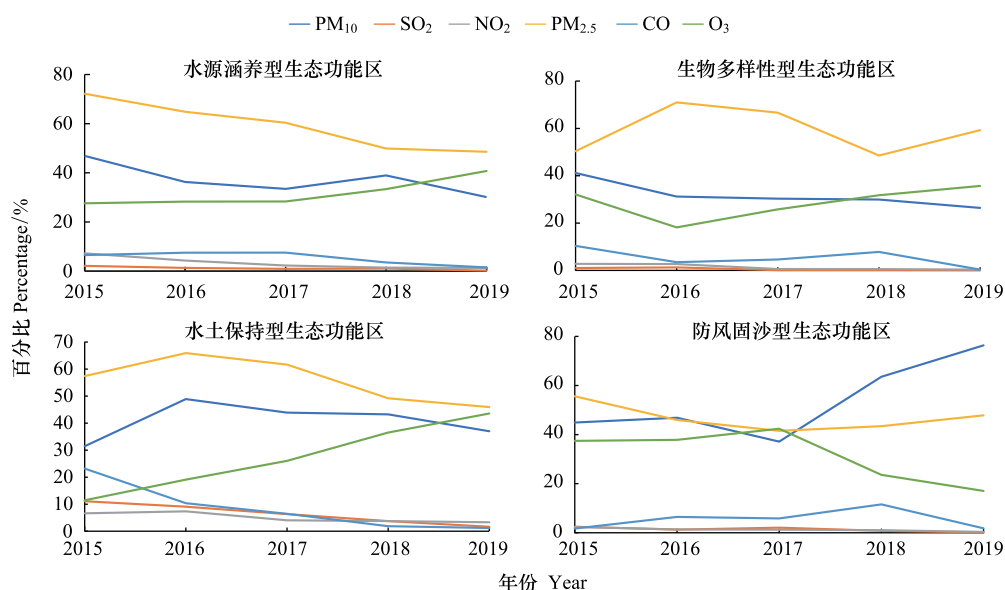


图 2 2015—2019 年四类生态功能区中超标污染物出现频次占比

Fig.2 The proportion of occurrence frequency of standard exceeded pollutants in the four function areas from 2015 to 2019

3 结论与讨论

(1) 空气质量总体较好且不断改善。2019 年空气质量优良天数比例为 89.24%, 比 2019 年全国城市优良天数比例(82.0%)高出 7.24%^[24]。空气质量优良天数比例由 2015 年的 80.58% 升高到 2019 年的 89.23%, 优良天数比例超过 90% 的县域占比由 2015 年的 33.77% 提高到 2019 年的 69.52%。重点生态功能区作为限制开发区, 修复生态和保护环境为其首要任务, 提供生态产品为其主要目标^[6,25]。转移支付政策对 2015—2019 年国家重点功能区空气质量的改善有着明显的推动作用, 同时稳步提升了考核县域的环境监测能力和质量, 空气质量整体较好, 且不断改善。从不同生态功能区类型来看, 水源涵养区的优良天数占比由 2015 年的 72.71% 提高到 2019 年的 92.09%, 空气质量改善效果最为显著。但严重污染天气总占比略微增加, 主要是由于新疆塔克拉玛干盆地地区的大气汇聚带造成的部分沙尘污染区, 导致位于新疆的防风固沙区依然存在季节性的极端天气情况, 影响了当地的空气质量状况^[26]。

(2) 主要超标污染物由颗粒物逐渐转变为颗粒物和臭氧。PM_{2.5} 为占比最高的超标污染物, 但超标天数比例明显降低, 由 63.88% 下降到 48.02%, 与此同时 O₃ 超标天数比例明显上升, 从 23.79% 逐年升高的 36.94%。其中防风固沙区的主要超标污染物为 PM₁₀ 和 PM_{2.5}, 其他三类生态功能区为 PM_{2.5} 和 O₃。O₃ 污染天数的增加与同期全国大气环境质量的研究结果一致, 浓度呈逐年递增的趋势, 污染状况越来越严重^[27]。

(3) 重点生态功能区的空气质量存在着显著的空间差异, 空气污染表现出显著的空间聚集特征, 生物多样性区的环境空气质量最好, 水源涵养区次之, 水土保持区水平稍差, 防风固沙区最差。部分原因是生态功能区的功能性定位决定了其分布的地理位置, 例如防风固沙区主要分布于西北边疆区域, 其中新疆南部的塔克拉玛干沙漠区域沙尘天气较为频繁^[28], PM₁₀ 污染较为严重, 极端风沙天气的问题未能得到较好的解决; 水土保持区多分布于平原区域, 人口较为稠密的城市, 存在大量的煤炭燃烧和汽车尾气排放造成的 PM_{2.5} 超标较为严重, 导致中国北部黄土高原的部分县域也存在一定程度的空气污染, 对易感人群存在着潜在的健康风险^[29]; 生物多样性区一般都选择在人迹稀少, 生态系统较为完备的区域^[30], 大部分县域都保持着优良空气质量水平; 水源涵养区则多分布域森林覆盖率较高, 具有冰川水系等区域^[31—32], 空气质量也相对较好。

(4) 重点生态功能区作为国家设立的限制开发区域, 承担着保障国家生态安全的重要功能^[33—34]。当前还未针对不同生态功能区类型建立科学有效的评估系统, 国家重点生态功能区的指标体系尚未完善, 对影响重点生态功能区空气质量变化的主要因素的研究仍不够充分。环境质量监测工作为生态环境保护和污染治理提供重要数据支持, 空气质量监测为生态保护工作提供重要的决策依据^[35—36], 国家重点生态功能区分布范围较广, 生态功能类型多样, 空气质量站点数量相对较少, 仍需持续加强监测力度, 不断提高环境空气质量监测能力。

参考文献 (References):

- [1] 国家环境保护总局. 关于印发《国家重点生态功能保护区规划纲要》的通知. (2009-10-22) [2021-02-26]. http://www.mee.gov.cn/gkml/zj/wj/200910/t20091022_172483.htm.
- [2] 国务院. 国务院关于印发全国主体功能区规划的通知. (2011-06-08) [2021-02-27]. http://www.gov.cn/zwgg/2011-06/08/content_1879180.htm.
- [3] 财政部. 关于印发《国家重点生态功能区转移支付办法》的通知. (2011-07-28) [2021-02-27]. http://www.gov.cn/gzdt/2011-07/28/content_1915488.htm.
- [4] 马本, 孙艺丹, 刘海江, 孙聪. 国家重点生态功能区转移支付的政策演进、激励约束与效果分析. 环境与可持续发展, 2020, 45(4): 42-50.
- [5] 李国平, 李潇, 汪海洲. 国家重点生态功能区转移支付的生态补偿效果分析. 当代经济科学, 2013, 35(5): 58-64.
- [6] 何立环, 刘海江, 李宝林, 王业耀. 国家重点生态功能区县域生态环境质量考核评价指标体系设计与应用实践. 环境保护, 2014, 42(12): 42-45.
- [7] 武丹, 王斌, 孙聪, 刘海江, 张赞. 国家重点生态功能区县域环境监测质量评价方法及应用示范. 中国环境监测, 2020, 36(1): 1-9.

- [8] 杨昆, 杨玉莲, 朱彦辉, 李岑, 孟超. 中国 PM_{2.5} 污染与社会经济的空间关系及成因. 地理研究, 2016, 35(6): 1051-1060.
- [9] 王冠岚, 薛建军, 张建忠. 2014 年京津冀空气污染时空分布特征及主要成因分析. 气象与环境科学, 2016, 39(1): 34-42.
- [10] 周亮, 周成虎, 杨帆, 车磊, 王波, 孙东琪. 2000—2015 年中国 PM_{2.5} 时空演化特征及驱动因素解析(英文). 地理学报, 2019, 29(2): 253-270.
- [11] 王振波, 方创琳, 许光, 潘月鹏. 2014 年中国城市 PM_{2.5} 浓度的时空变化规律. 地理学报, 2015, 70(11): 1720-1734.
- [12] 刘春兰, 陈操操, 陈群, 朱世龙, 王海华, 李铮. 1997 年至 2007 年北京市二氧化碳排放变化机理研究. 资源科学, 2010, 32(2): 235-241.
- [13] Kassomenos P, Vardoulakis S, Chaloulakou A, Grivas G, Borge R, Lumberras J. Levels, sources and seasonality of coarse particles (PM_{10-PM_{2.5}}) in three European capitals-Implications for particulate pollution control. Atmospheric Environment, 2012, 54: 337-347.
- [14] 刘海猛, 方创琳, 黄解军, 朱向东, 周艺, 王振波, 张蕾. 京津冀城市群大气污染的时空特征与影响因素解析. 地理学报, 2018, 73(1): 177-191.
- [15] 黄小刚, 邵天杰, 赵景波, 曹军骥, 岳大鹏, 吕晓虎. 长江经济带空气质量的时空分布特征及影响因素. 中国环境科学, 2020, 40(2): 874-884.
- [16] 单文坡, 殷永泉, 杜世勇, 闫怀忠, 吕波, 侯鲁健. 夏季城市大气 O₃ 浓度影响因素及其相关关系. 环境科学, 2006, 27(7): 1276-1281.
- [17] 周春艳, 厉青, 张丽娟, 马鹏飞, 陈辉, 王中挺. 遥感监测 2005—2015 年中国 NO₂ 时空特征及分析影响因素. 遥感技术与应用, 2016, 31(6): 1190-1200.
- [18] Huang X, Ding A J, Wang Z L, Ding K, Gao J, Chai F H, Fu C B. Amplified transboundary transport of haze by aerosol-boundary layer interaction in China. Nature Geoscience, 2020, 13(6): 428-434.
- [19] 王继康, 花丛, 桂海林, 张恒德. 2016 年 1 月我国中东部一次大气污染物传输过程分析. 气象, 2017, 43(7): 804-812.
- [20] 姜磊, 周海峰, 赖志柱, 柏玲, 陈忠升. 中国城市 PM_{2.5} 时空动态变化特征分析: 2015—2017 年. 环境科学学报, 2018, 38(10): 3816-3825.
- [21] Priyanka A, Uma M. Assessment of the Ambient Air Quality at the Industrial Area using the Air Quality Index Method (AQI). International Journal of Agriculture, Environment and Biotechnology, 2018, 11(2): 227-233.
- [22] 姜磊, 周海峰, 柏玲, 陈忠升. 空气质量指数(AQI)的社会经济影响因素分析——基于指数衰减效应视角. 环境科学学报, 2018, 38(1): 390-398.
- [23] 中华人民共和国生态环境部. 环境空气质量指数(AQI)技术规定(试行). (2012-03-02) [2021-02-26]. https://www.mee.gov.cn/ywgz/fgbz/bzwb/jcffbz/201203/t20120302_224166.shtml.
- [24] 中华人民共和国生态环境部. 2019 年中国生态环境状况公报. (2020-06-02) [2021-03-05]. <https://www.mee.gov.cn/hjzl/sthjzk/zghjzkgb/202006/P020200602509464172096.pdf>.
- [25] 李宝林, 袁烽城, 高锡章, 许丽丽. 国家重点生态功能区生态环境保护面临的主要问题与对策. 环境保护, 2014, 42(12): 14-18.
- [26] 任阵海, 万本太, 苏福庆, 高庆先, 张志刚, 洪钟祥, 胡非, 程水源. 当前我国大气环境质量的几个特征. 环境科学研究, 2004, 17(1): 1-6.
- [27] 董佳丹, 陈晓玲, 蔡晓斌, 徐强强, 关宇廷, 李婷慧, 刘诗燕, 陈芳. 基于中国大气环境监测站点的 2015—2019 年大气质量状况时空变化分析. 地球信息科学学报, 2020, 22(10): 1983-1995.
- [28] 徐洁, 肖玉, 谢高地, 王洋洋, 江源, 陈文辉. 防风固沙型重点生态功能区防风固沙服务的评估与受益区识别. 生态学报, 2019, 39(16): 5857-5873.
- [29] Han L J, Zhou W Q, Li W F. City as a major source area of fine particulate (PM_{2.5}) in China. Environmental Pollution, 2015, 206: 183-187.
- [30] 赵国松, 刘纪远, 匡文慧, 欧阳志云. 1990—2010 年中国土地利用变化对生物多样性保护重点区域的扰动. 地理学报, 2014, 69(11): 1640-1650.
- [31] 吴丹, 邹长新, 高吉喜, 林乃峰. 水源涵养型重点生态功能区生态状况变化研究. 环境科学与技术, 2017, 40(1): 174-179.
- [32] 冯倩, 周忠发, 侯玉婷, 陈全, 王历, 谭玮颐. 水源涵养型国家重点生态功能区生态功能评价: 以贵州省三都水族自治县为例. 环境工程, 2017, 35(12): 154-158.
- [33] 刘璐璐, 曹巍, 吴丹, 黄麟. 国家重点生态功能区生态系统服务时空格局及其变化特征. 地理科学, 2018, 38(9): 1508-1515.
- [34] 徐洁, 谢高地, 肖玉, 李娜, 江源, 陈文辉. 国家重点生态功能区生态环境质量变化动态分析. 生态学报, 2019, 39(9): 3039-3050.
- [35] 赵卫, 刘冬, 邹长新, 肖颖. 国家重点生态功能区转移支付现状、问题及建议. 环境保护, 2019, 47(18): 52-55.
- [36] 李国平, 刘倩, 张文彬. 国家重点生态功能区转移支付与县域生态环境质量——基于陕西省县级数据的实证研究. 西安交通大学学报: 社会科学版, 2014, 34(2): 27-31.