

全球二氧化碳浓度非均匀分布条件下碳排放与升温关系的统计分析

邓祥征^{1,2,3}, 蒋思坚^{1,2,3}, 刘冰⁴, 王泽昊⁴, 邵卿⁴

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所, 中国科学院陆地表层格局与模拟重点实验室, 北京 100101;

2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 中国科学院农业政策研究中心, 北京 100101;

4. 山东科技大学测绘科学与工程学院, 青岛 266590)

摘要: 为定量评估全球二氧化碳浓度非均匀分布条件下碳排放与升温的关系, 采用空间自相关分析与空间联立方程组模型, 基于1度、2度与3度空间分辨率的全球二氧化碳浓度, 碳排放与近地面气温等格点数据, 揭示了2003—2015年全球二氧化碳浓度的空间分布聚集特征并估计了碳排放对升温的影响系数。结果发现: 二氧化碳浓度在空间上表现为北半球高浓度值聚集与南半球低浓度值聚集的分布型。利用二氧化碳浓度非均匀分布的参数条件对碳排放与升温影响的估计结果表明, 代入二氧化碳浓度非均匀分布这一参数会小幅拉低碳排放对升温影响的估计结果。研究表明, 全球二氧化碳浓度非均匀分布是当前评估碳排放升温影响亟待引入的参数; 同时由于估计结果的空间尺度效应的存在, 相关参数的空间范围与分辨率的选择也需要关注。

关键词: 二氧化碳浓度; 二氧化碳非均匀分布; 碳排放; 经济影响; 社会代价

根据IPCC第五次评估报告, 人为碳排放的大量增加导致了20世纪50年代以来的一系列如海平面上升、积雪和冰量减少、大气和海洋变暖、气候系统变暖等气候变化问题, 引起了国际上政府部门和科学界的广泛关注。由于全球经济的快速发展和人口的迅速增加, 大量化石燃料的使用排放了过量的二氧化碳, 致使大气中二氧化碳浓度自工业革命以来急剧上升, 进而对全球气候、生态系统、经济领域等各个方面造成了很大影响。为此, 定量评价人为二氧化碳排放、大气二氧化碳浓度与地表升温之间的耦合关系和互馈机制, 对于人类应对气候变化, 实现社会经济的可持续发展具有重大的现实意义。

不少学者利用气候模式对二氧化碳与升温关系进行了研究。Leduc等^[1]量化了对累积排放量的温度响应如何随总排放量和二氧化碳排放率的变化而变化的过程; 赵宗慈^[2]利用五个全球大气海洋环流模式模拟二氧化碳增加对气候变化的影响, 表明大气中二氧化碳排放增加将导致全球地面气温升高, 其中高纬与极区冬季增暖更明显; Tett等^[3]基于Had-CM2模型研究地表温度上升驱动因素, 表明过去50年地表温度上升主要是大气二氧化碳浓度上升及气溶胶的增加; Crowley^[4]基于能量平衡模型绘制温度与辐射强迫的敏感曲线, 表明目前大气中二氧化碳浓度已超过气候系统在自然发展情况下二氧化碳浓度, 温度与人为辐射强迫关系越来越大; Stern等^[5]模拟分析并验证了辐射强迫与温度之间相互促进的关系。当前的气候模式相关研究主要着力于系统模拟大气环流等相关气象机理,

收稿日期: 2019-12-04; 修订日期: 2020-03-02

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2016YFA0602500)

作者简介: 邓祥征 (1971-), 男, 山东日照人, 博士, 研究员, 博士生导师, 研究方向为土地科学与自然资源管理、区域环境变化、发展地理学。E-mail: dengxz@igsnrr.ac.cn

但对社会经济方面的刻画还不够细致。

碳排放引致的升温与社会、经济发展之间的关系及相互作用机制十分复杂,许多学者采用了计量经济学与统计学等方法对碳排放、升温与社会经济间的关系开展了定量评价。赵金彩等^[6]估算了我国中原地区网格尺度上的居民碳排放及其影响因素,发现了人均GDP对碳排放的拉动作用。孙宁等^[7]采用年平均气温序列及工业产值、GDP、劳动力序列,建立多变量的结构向量自回归模型,考察气温对南京市工业经济的动态影响,并用方差分解法揭示其相互影响程度;刘宇等^[8]采用投入产出法测算了二氧化碳的排放量并分析了其影响因素。Azam等^[9]使用了1971—2013年间的年度数据分析发现二氧化碳排放量和能源使用对经济增长具有显著的促进作用。Kasman等^[10]调查发现1992—2010年间各国的二氧化碳排放与经济增长之间呈现正相关的关系。Raupach等^[11]探究了碳排放量与人口和GDP等社会经济因子的相关关系,并以此预测了各国的未来碳排放空间。刘莉娜等^[12]运用空间计量模型揭示了我国人均居民生活碳排放的时空演化特征及其影响因素。计量经济学方法可以有效构建碳排放、升温与社会经济关键指标间的关系并进行定量评价^[13,14]。虽然已有部分研究将碳排放、升温与社会经济相结合,但对于二氧化碳浓度尤其是其非均匀分布的考虑则有所欠缺。

全球二氧化碳的非均匀分布这一参数条件是研究碳排放与升温关系间不可忽视的重要因素。已有相关研究表明,二氧化碳浓度的增加以及分布的非均匀性是气升温高的驱动因素之一。符传博等^[15]针对AIRS卫星反演的对流层二氧化碳浓度资料及地基观测结果对我国区域二氧化碳浓度的时空分布及季节变化进行研究,发现了二氧化碳浓度在空间上的差异化分布;李燕丽等^[16]通过移动监测法研究城市近地面二氧化碳时空分布特征;杨成荫等^[17]综合考虑不同经济区划与土地覆盖类型对应的二氧化碳浓度差异及其季节变化规律,构建网格化大气二氧化碳浓度非均匀动态分布数据模型揭示了二氧化碳浓度在区域上呈现非均匀分布的特征。Zhang等^[18]利用气候模型对CO₂的空间非均匀分布的气候效应进行敏感性实验,发现了空间均匀分布的二氧化碳浓度在气候模型中会高估二氧化碳浓度的温室效应。二氧化碳浓度非均匀分布的客观事实为现有碳排放与升温关系的定量估计带来不确定性。为此,本文将揭示二氧化碳浓度在空间上的聚集效应,结合关键社会经济指标,定量评估二氧化碳浓度非均匀分布条件下碳排放与升温的影响关系。

1 研究方法与数据来源

1.1 数据来源

本文使用的数据主要包括了自然环境数据集与社会经济数据集。时间跨度在2003—2015年之间,空间范围为全球尺度,自然环境数据与社会经济统计数据均已采用双线性内插法重采样至1度的空间分辨率。模型所用指标与数据的描述性统计信息如表1所示。

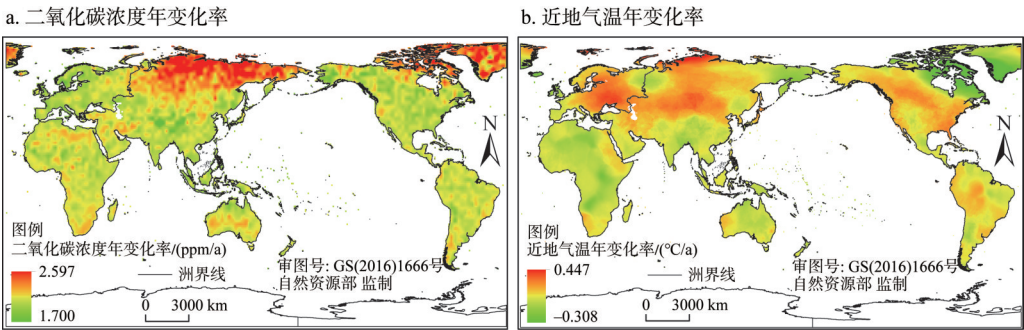
1.1.1 自然环境数据

自然环境数据包括数字高程数据(DEM),全球年平均二氧化碳浓度数据以及年降水量和年平均近地温度等气象数据。其中年平均二氧化碳浓度格网数据下载自美国宇航局(NASA)网站。NASA的Aqua卫星主要用于观测全球水和能量循环、气候变化趋势,以及气候系统对温室气体增加的响应等科学目的^[19]。其中搭载在Aqua卫星上的大气红外垂直遥感器AIRS,可以探测并反演出全球范围内逐日的CO₂浓度,其中还包括陆

表1 模型指标含义与描述性统计
Table 1 Model indicators and descriptive statistics

变量	样本数/个	说明及单位	平均值	标准差	最小值	最大值
CO ₂	219193	陆地二氧化碳浓度/ppm	383.63	7.68	367.87	401.32
rain	219193	陆地降水量/mm	60.31	62.20	0	885.05
pGDP	219193	人均GDP/(万元/人)	2.59	2.93	0	19.94
POP	219193	人口数/万人	28.469	108.05	0	3260.71
T	219193	陆地近地面气温/(0.1 °C)	91.01	147.74	-277.42	316.17
E	219193	陆地二氧化碳排放/(t/km ²)	199.42	2122.87	0	176601.60
DEM	219193	陆表地海拔高度/km	0.60	0.83	-0.1575	6.21

地、海洋和极地等地区的CO₂浓度^[20]。年平均温度格网数据来自东英吉利大学气候研究室的气候变化与其他现象变化的时间序列(TS)数据集v3(图1), 下载自<http://catalogue.ceda.ac.uk/uuid/>。年降水量格网数据是由美国国家海洋和大气管理局(NOAA)提供的GPCC降水数据, 下载自<https://www.esrl.noaa.gov/psd/>。全球DEM数据是来自美国国家大气研究中心(UCAR), 下载自<http://dss.ucar.edu/datasets/ds759.3/>, 以上数据均通过空间重采样至1度的空间分辨率。



注: 本图基于自然资源部标准地图服务系统下载的标准地图制作, 底图无修改, 下同。

图1 2003—2015年CO₂浓度与近地面气温年平均变化率

Fig. 1 Annual average change rate of CO₂ concentration and near-surface temperature during 2003-2015

1.1.2 社会经济数据

2003—2015年全球人口数据来自美国橡树岭国家实验室(Oak Ridge National Laboratory)的LandScan数据集, 空间分辨率为1度, 表征了周围人口(24小时内的平均值)分布。该数据下载自<http://www.ornl.gov/sci/landscan/>。2003—2015年的全球GDP数据来自于Kummu等^[21]对全球GDP的空间降尺度数据, 空间分辨率为1度(图2)。2003—2015年的全球二氧化碳排放数据来自欧盟委员会的全球大气研究排放数据库(EDGAR), 其计算主要是基于国际能源机构(IEA)能量平衡统计数据(2014)和《BP世界能源统计评论》^[22]。

1.2 研究方法

1.2.1 全局莫兰指数(Global Moran's I)

空间自相关被用于检验空间变量与空间临近位置变量之间的相关性。全局空间自相关是描述属性值在空间上的综合水平, 一般常用的全局空间自相关指标为全局Moran's I

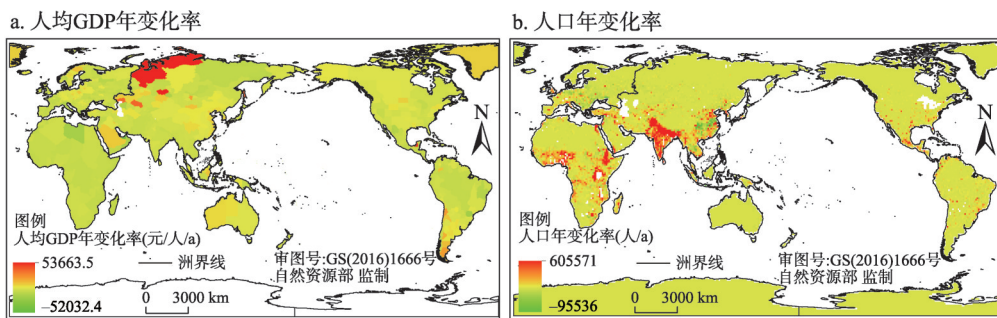


图2 2003—2015年人均GDP与人口数量年平均变化率

Fig. 2 Annual average change rate of per capita GDP and population during 2003-2015

和全局 G 系数, 在判断空间自相关特征是高值还是低值聚集时常采用 G 系数, 判断某个区域是否存在空间自相关特征时, 尤其对于位于边缘的聚集区域, 运用 Moran's I 得到的结果更加可靠。本文采用全局 Moran's I 来判断二氧化碳浓度是否存在空间自相关特征, 作为最重要和最主流的空间数据分析工具之一, 全局 Moran's I 可以指示全局自相关特征^[23], 其公式如下:

$$I = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij} (C_i - \bar{C})(C_j - \bar{C})}{S^2 \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij}} \quad (1)$$

$$S^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (C_i - \bar{C})^2 \quad (2)$$

式中: I 代表莫兰指数; W 代表空间权重矩阵, 以距离的倒数为权重系数; i 、 j 代表格点和除该格点外的其他格点; C_i 、 C_j 代表二氧化碳浓度 (ppm); \bar{C} 表示二氧化碳浓度的平均值 (ppm); S 表示二氧化碳浓度的标准差; n 代表空间单元个数 (个)。 I 值介于 -1~1 之间, 当 I 值为零时, 表示研究区域不相关, 为随机分布状态, 当 I 值大于零时, 表示研究区域正相关, 为高高集聚或者低低集聚状态, 当 Moran's I 小于零时, 表示研究区域负相关, 为高低离散或者低高离散状态。Moran's I 的绝对值越大, 表明空间联系的意义越大。

1.2.2 局部空间自相关

鉴于局部空间自相关分析能够更好地表征空间异质性分析^[24], 本文采用 LISA (空间联系区域指标) 和 Moran's I 散点图局部空间自相关分析法开展研究。LISA 采用局部 Moran's I 和 LISA 集聚图。与全局 Moran's I 相比, LISA (空间联系区域指标) 是一种识别所选指标的重要局部空间簇的方法^[23]。其具体公式如下:

$$I_i = \frac{(C_i - \bar{C})}{S^2} \times \sum W_{ij} \times (C_j - \bar{C}) (i \neq j) \quad (3)$$

式中: C_i 表示为二氧化碳浓度的值 (ppm); \bar{C} 是二氧化碳浓度平均值 (ppm); W 是空间权重矩阵, 以距离的倒数为权重系数; i 、 j 表示为格点; S 与全局 Moran's I 中相同。根据 P 值和 z 得分, 空间数据的聚类/离散值将被区分为集聚区域的高值区域 (HH) 和低值区域 (LL) 以及离散区域, 即相对隔离的低值区域 (HL) 或高值区域 (LH)。

Moran's I 散点图四个象限, 分别代表不同的空间自相关关系。第一象限代表高高特征, 即高观测值被高观测值包围, 呈现集聚状态; 第二象限代表低高特征, 即低观测值被高观测值包围, 呈现离散状态; 第三象限代表低低特征, 即低观测值被低观测值包围, 呈现集聚状态; 第四象限代表高低特征, 即高观测值被低观测值包围, 呈现离散状态。

1.2.3 空间联立方程组建模

如IPCC评估报告所述, 气候变化是由自然变化与人类活动共同作用引起的, 其主要原因是人类活动加剧排放 CO_2 导致大气 CO_2 浓度增加, 改变大气—地球能量平衡, 加强温室效应, 最终导致了全球气温升高。同时, 全球升温又会对人类生产活动产生影响, 具体表现在GDP经济产出与人口等社会因素变动上^[25], 并结合人为气候减缓与适应措施最终反馈到人为二氧化碳排放中^[27]。但二氧化碳非均匀分布的客观事实的存在, 为二氧化碳与升温关系等方面的研究增加了新的不确定性因素^[28]。由于二氧化碳排放和二氧化碳浓度分布在空间分布上具有协同效应, 两者对升温的影响存在双向因果关系, 导致解释变量出现内生性问题。为解决相互间的内生性问题, 本文基于图3分析框架, 通过构建联立方程组, 以研究全球二氧化碳浓度非均匀分布下的碳排放与升温的关系。

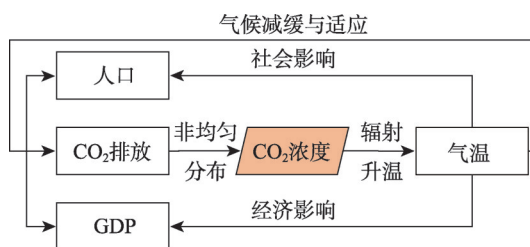


图3 全球二氧化碳浓度非均匀分布条件下碳排放与升温关系分析框架

Fig. 3 Framework of the relationship between carbon emissions and temperature rise under the condition of uneven distribution of global carbon dioxide concentration

本文首先构建二氧化碳排放对升温的影响函数关系式, 考虑到除了升温与二氧化碳排放相关, 还有其他因素参与影响, 加入了格点尺度的降水等气候影响因素以及经度、纬度和海拔高度等地理变量作为控制变量, 具体函数形式如下所示:

$$dT_{it} = f(E_{it}, rain_{it}, DEM_{it}, longitude_i, latitude_i, u_{it}) \quad (4)$$

式中: dT_{it} 为格点 i 上的温度变化, 表现为 $t-1$ 时期温度与 t 时期近地面气温差 (10^{-1}°C); E_{it} 表示格点 i 在 t 时期的碳排放 (t/km^2); $rain_{it}$ 表示格点 i 在 t 时期的降雨量 (mm); T_{it} 表示格点 i 在 t 时期的气温 (10^{-1}°C); DEM_{it} 表示格点 i 的海拔高度 (km); $longitude_i$ 表示格点 i 的经度值; $latitude_i$ 表示格点 i 的纬度值; u_{it} 表示残差项。

同时, 构建温度对 CO_2 排放的影响函数关系, 加入温度变量, 并考虑了人均GDP作为经济影响指标以及人口作为社会影响指标, 以及经度、纬度和海拔等地理变量作为控制变量, 具体函数形式如下:

$$E_{it} = f(T_{it}, pGDP_{it}, POP_{it}, DEM_{it}, longitude_{it}, latitude_{it}, u_{it}) \quad (5)$$

式中: $pGDP_{it}$ 表示格点 i 在 t 时期的人均GDP (万元/人); POP_{it} 表示格点 i 在 t 时期的人口量 (万人)。

基于联立方程组模型, 将升温与二氧化碳排放函数关系式联立, 并对其中的关键指标变量进行对数处理, 具体的模型方程如下:

$$\begin{cases} dT_{it} = \alpha_0 + \alpha_1 \ln E_{it} + \alpha_2 \ln rain_{it} + \alpha_3 \ln rain_{it}^2 + \beta_1 DEM_i + \dots \\ \quad \dots + \beta_2 longitude_i + \beta_3 latitude_i + u_{it} \\ \ln E_{it} = \rho_0 + \rho_1 T_{it} + \rho_2 \ln pGDP_{it} + \rho_3 \ln pGDP_{it}^2 + \rho_4 \ln POP_{it} + \dots \\ \quad \dots + \rho_5 \ln POP_{it}^2 + \gamma_1 DEM_i + \gamma_2 longitude_i + \gamma_3 latitude_i + \varepsilon_{it} \end{cases} \quad (6)$$

式中： α_0 与 ρ_0 表示常数项； $\alpha_1 \sim \alpha_3$ 与 $\rho_1 \sim \rho_5$ 表示影响因素估计参数； $\beta_1 \sim \beta_3$ 与 $\gamma_1 \sim \gamma_3$ 为控制变量估计参数； u_{it} 与 ε_{it} 表示残差项。

为了捕获二氧化碳浓度非均匀分布对人为二氧化碳排放与升温间的空间效应，本文在二者联立方程模型中引入二氧化碳浓度及其空间加权滞后项，构建空间联立方程组模型，并分别采用广义一般最小二乘法（GSLs），以及系统估计法中的二阶段广义空间最小二乘法（GS2SLS）和三阶段广义空间最小二乘法（GS3SLS）定量估计二氧化碳浓度非均匀分布对人为二氧化碳排放与升温的影响，具体公式如下：

$$\begin{cases} dT_{it} = \alpha_0 + \alpha_1 \ln E_{it} + \alpha_2 \ln E_{it} rain_{it} + \alpha_3 \ln rain_{it}^2 + \alpha_4 \ln CO_{2it} + \alpha_5 W \ln CO_{2it} + \dots \\ \quad \dots + \beta_1 DEM_i + \beta_2 longitude_i + \beta_3 latitude_i + u_{it} \\ \ln E_{it} = \rho_0 + \rho_1 T_{it} + \rho_2 \ln pGDP_{it} + \rho_3 \ln pGDP_{it}^2 + \rho_4 \ln POP_{it} + \rho_5 \ln POP_{it}^2 + \dots \\ \quad \dots + \rho_6 \ln CO_{2it} + \rho_7 W \ln CO_{2it} + \gamma_1 DEM_i + \gamma_2 longitude_i + \gamma_3 latitude_i + \varepsilon_{it} \end{cases} \quad (7)$$

式中： CO_{2it} 表示 i 格点在 t 时期的二氧化碳浓度（ppm）； W 表示空间权重矩阵，这里采用反距离权重矩阵，基于空间邻近构建规则，样本空间单元与其邻接空间单元之间距离越近，权重越大，表征的空间效应就越强。

2 结果分析

2.1 二氧化碳浓度空间自相关分析

CO_2 浓度Moran's I 散点（图4）显示，二氧化碳浓度在不同年份（2003—2015年）具有相同的空间自相关特征： I 值都大于零，表示研究区域二氧化碳浓度在空间上呈现正相关特征，表现为高高集聚或者低低集聚状态，2003—2005年间都表现出较高的空间正相关性。

在显著性水平 $P \leq 0.05$ 的水平下绘制二氧化碳浓度分布LISA集聚图（图5），清晰地揭示了通过显著性水平检验的局部空间自相关地区。2003年全球 CO_2 浓度分布呈现高一高的空间自相关特征的区域包括：北美洲的美国和加拿大、欧洲、中东、西亚国家及东亚的中国；呈现低—低的空间自相关特征的区域包括：南美洲、非洲中部及南部以及俄罗斯地区。2005年增加了呈现高一高的空间自相关特征的格陵兰岛和阿拉斯加州，增加了呈现低—低的空间自相关特征的东南亚及澳大利亚部分地区。2010年俄罗斯由低—低的空间自相关集聚状态转变为高一高的空间自相关集聚状态。2015年美国、北欧及俄罗斯的 CO_2 浓度空间分布呈现低—高离散状态的区域有所增加，东亚地区包括中国的低—高离散状态区域大量转变为低—低的空间自相关集聚状态。澳大利亚和非洲内部出现高一低的空间自相关离散状态区域。

2.2 空间联立方程组计量结果

表2的参数估计结果表明，联立方程组中每一个方程的卡方检验（chi2）值都通过了1%显著性水平，这表明每个方程设置的解释变量总体上是显著的，这也就意味着本文所设置的模型是合理有效的。在不同的参数估计方法结果中，普通最小二乘法（OLS）的

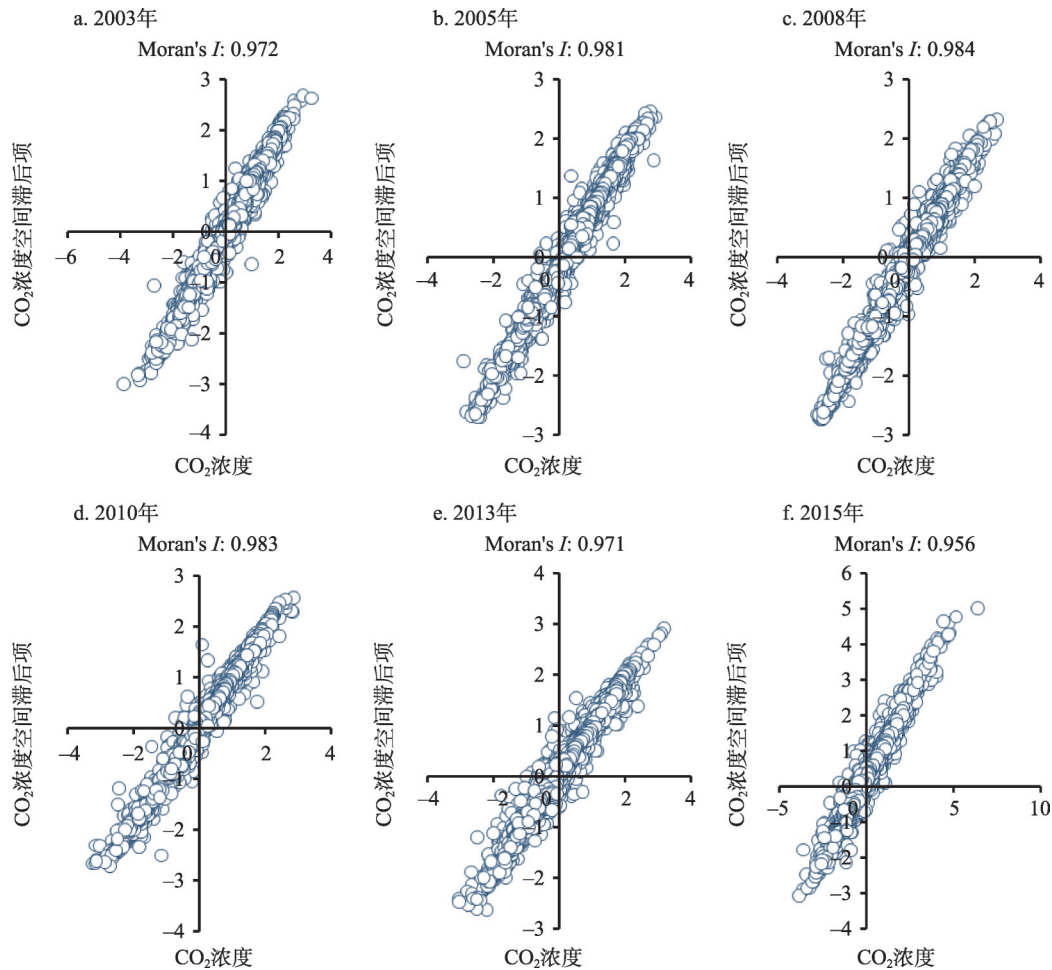


图4 2003—2015年全球二氧化碳浓度分布Moran's I散点图

Fig. 4 Moran's I scatter diagram of global CO₂ concentration distribution during 2003-2015

估计结果与其他两种方法估计结果有所差异，尤其是在关键变量碳排放对升温的影响系数估计上与另外两组模型估计结果存在较大差异，由于本文的联立方程组中包括了内生变量，普通最小二乘法的估计结果可能存在估计偏差的问题，认为两阶段最小二乘法（2SLS）和三阶段最小二乘法（3SLS）的估计结果更加稳健，所以主要关注这两者估计方法的参数估计结果。同时，由于采用2SLS进行参数估计忽略了方程之间扰动项间可能存在的相关性，因此降低了方程组的估计效率；3SLS不仅可以解决方程组中的内生性问题，同时考虑扰动项之间的可能相关性，因此在估计效率上可能更有优势^[29]，所以选择三阶段最小二乘法估计结果作为主要估计结果。

具体的参数估计结果中，两组联立方程模型中的关键变量的系数符号和显著程度是最受关注的。在不考虑二氧化碳浓度分布水平影响的模型中，二氧化碳排放对升温具有显著的正向作用，影响系数为0.192，通过了1%的显著性水平检验，其实际显示含义表示为由于二氧化碳温室效应通过吸收从地表射向太空的长波辐射并反射回地表进而使地表升温，二氧化碳排放每增加1%，温度升高0.0192摄氏度。同时降水的一次项与二次项影响系数也均表现为显著的正向作用，表明降水与升温间存在明显的协同作用，降水量

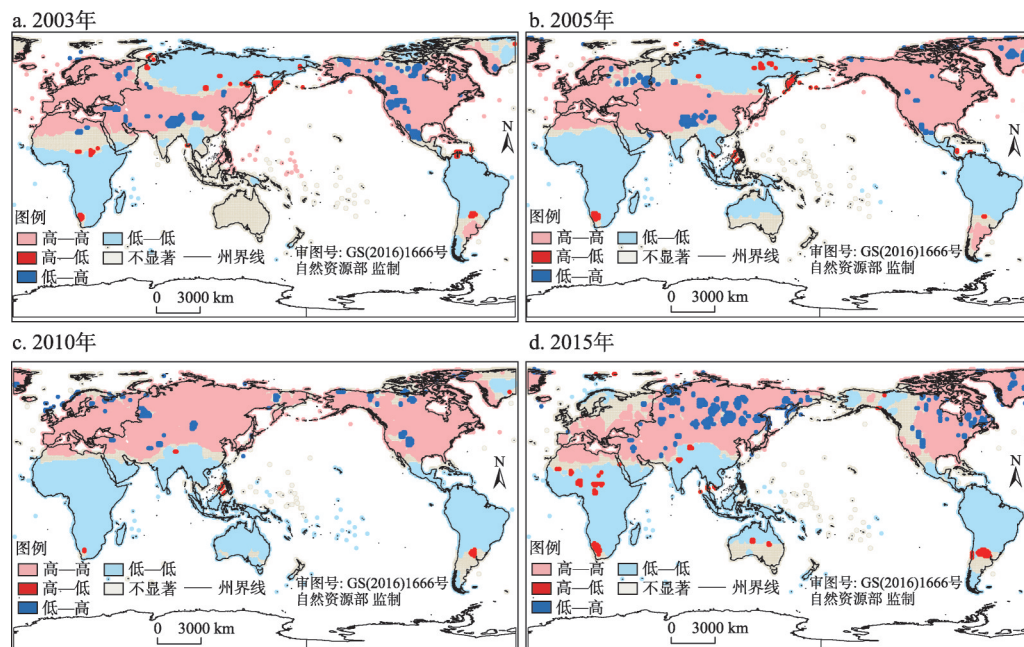


图5 2003—2015年全球二氧化碳浓度分布LISA集聚图

Fig. 5 LISA map of global carbon dioxide concentration distribution during 2003-2015

增加区域同时也存在着明显的近地面气温上升的趋势，高温聚集也加快了地面的蒸散与大气水汽循环。而在温度与排放的关系参数估计中，除了温度的影响系数为正，表现为高温地区的高碳排放型以外，反映社会经济发展程度的人均GDP与人口数指标的一次项及二次项影响系数也均为正，表明了经济发展以及人口的聚集对能源消耗的需求拉动，并最终导致了二氧化碳排放量的增加。而在地理控制变量经度、纬度与海拔高度的影响估计中，纬度对升温与碳排放的影响系数均为正，表现为高纬度地带的升温与碳排放上升较快，与全球气象观测数据空间分布尤其是亚洲与美洲地区中高纬度升温表现相吻合。

为揭示二氧化碳浓度非均匀分布条件下碳排放与升温关系，在不考虑二氧化碳浓度的模型组一的基础上，本文引入了碳卫星观测的二氧化碳浓度数据，并结合空间权重矩阵，将二氧化碳浓度的空间滞后项考虑在内，形成了包含二氧化碳浓度非均匀分布在内的模型组二。本文采用了广义空间最小二乘法（GSLS），二阶段广义空间最小二乘法（GS2SLS）与三阶段广义空间最小二乘法（GS3SLS）估计了模型，篇幅所限，选取GS3SLS估计结果做了报道。在考虑二氧化碳浓度分布影响下的估计结果与模型组一相比，主要表现为关键指标碳排放对升温的影响系数略有下降，但仍为显著的正向作用。而新加入的二氧化碳浓度及其空间滞后项也均表现为显著的正向作用，表明二氧化碳浓度对辐射强迫的增强作用，带来了近地面气温的上升，同时由于空间溢出效应的存在，二氧化碳浓度的空间滞后项对近地面气温上升也有一定拉动作用，但影响水平较小。其他影响因素系数与模型组一估计结果近似，表现为高降水区与中高纬度升温较快以及人口和GDP对碳排放的正向拉动作用。

2.3 空间尺度效应分析

二氧化碳浓度空间的分布异质性表征结果可能因数据分辨率的选择而异，同时也会受到分析尺度大小，气温波动变化等影响，Hansen等^[30]在对比分析全球尺度和区域尺度

表2 联立方程组模型计量结果

Table 2 Estimation results of simultaneous equations model

变量		模型组一：不考虑 CO ₂ 浓度			模型组二：考虑 CO ₂ 浓度		
		OLS	2SLS	3SLS	GSLS	GS2SLS	GS3SLS
dT	lnE	0.0182***	0.191***	0.192***	0.0158***	0.186***	0.187***
		(0.0030)	(0.0065)	(0.0065)	(0.0030)	(0.0065)	(0.0065)
	lnCO ₂				16.95***	15.59***	15.80***
					(1.082)	(1.092)	(1.092)
	WlnCO ₂				0.372***	0.268***	0.255***
					(0.0401)	(0.0406)	(0.0406)
	lnrain	-0.0075	0.134***	0.0238*	-0.0058	0.130***	0.0242*
		(0.0135)	(0.0143)	(0.0142)	(0.0135)	(0.0143)	(0.0142)
	lnrain ²	-0.0003	0.0045***	0.0025***	0.0001	0.0041***	0.0027***
		(0.0010)	(0.0010)	(0.0010)	(0.0010)	(0.0010)	(0.0010)
	Longitude	0.0011***	-0.0005*	-0.0004	0.001***	-0.0002**	-0.0004
		(0.0002)	(0.0002)	(0.0002)	(0.0002)	(0.0002)	(0.0002)
	Latitude	0.0032***	0.0115***	0.0136***	-0.0019**	0.0076***	0.0097***
		(0.0007)	(0.0007)	(0.0007)	(0.0008)	(0.0009)	(0.0009)
	DEM	-0.0628***	-0.0185	-0.0107	-0.0579**	-0.0151	-0.0133
		(0.0243)	(0.0245)	(0.0245)	(0.0243)	(0.0245)	(0.0245)
	常数项	0.260***	0.582***	-0.166**	-102.6***	-93.69***	-95.59***
		(0.0733)	(0.0747)	(0.0741)	(6.435)	(6.494)	(6.494)
	Wald chi ²	14.0***	153.4***	1076.4***	53.7***	152.7***	1369.9***
	R ²	0.040	0.039	0.039	0.021	0.021	0.020
lnE	lnT		96.72***	97.33***		96.27***	96.85***
			(0.495)	(0.494)		(0.496)	(0.494)
	lnCO ₂					3.271***	3.181***
						(0.738)	(0.738)
	WlnCO ₂					0.523***	0.522***
						(0.0293)	(0.0293)
	lnPOP		0.0599***	0.0588***		0.0603***	0.0592***
			(0.0049)	(0.0048)		(0.00486)	(0.00481)
	lnPOP ²		0.0033***	0.0033***		0.00334***	0.00328***
			(0.0003)	(0.0003)		(0.0003)	(0.0003)

续表2

变量		模型组一：不考虑CO ₂ 浓度			模型组二：考虑CO ₂ 浓度		
		OLS	2SLS	3SLS	GSLS	GS2SLS	GS3SLS
lnE	lnpGDP		0.858*** (0.0146)	0.881*** (0.0145)		0.757*** (0.0156)	0.773*** (0.0155)
	lnpGDP ²		0.0280*** (0.0007)	0.0292*** (0.0007)		0.0237*** (0.0007)	0.0246*** (0.0007)
	Longitude		0.0103*** (0.0002)	0.0104*** (0.0002)		0.010*** (0.0002)	0.010*** (0.0002)
	Latitude		0.0559*** (0.0007)	0.0563*** (0.0007)		0.0508*** (0.0008)	0.0513*** (0.0008)
	DEM		0.535*** (0.0186)	0.554*** (0.0185)		0.517*** (0.0186)	0.534*** (0.0185)
	常数项		-771.4*** (3.960)	-776.2*** (3.949)		-790.0*** (5.763)	-794.2*** (5.757)
Wald chi ²			9553.6***	76419.8***		7689.6***	76892.8***
R ²			0.275	0.275		0.276	0.276
样本量/个		202332	202332	202332	202332	202332	202332

注：***、**、*分别表示 $P<0.01$ 、 $P<0.05$ 、 $P<0.1$ ，括号内的值表示标准误。

的平均气温变化情况后发现区域尺度越小，气温波动越大，变化也更明显。为了捕获由于数据采集分辨率所带来的估计结果干扰，本文在原有的1度分辨率的基础上，分别又对数据进行了重采样，并采用2度与3度分辨率的空间尺度数据对二氧化碳非均匀分布下的二氧化碳排放对升温影响进行了参数估计。

如图6所示，在参数估计结果对比中，样本数据的尺度扩大下，二氧化碳排放对升温的影响系数均有所减小，在不考虑二氧化碳浓度的模型估计中，采用2SLS与3SLS估计参数，得到结果发现2度与3度分辨率尺度数据估计结果系数均小于1度分辨率估计的影响系数，且3度分辨率影响系数小于2度分辨率。随着空间数据采样尺度的加大，二氧化碳排放对升温的影响估计由于空间信息量的减少而被低估。在考虑二氧化碳浓度及其空间滞后项的情况下，二氧化碳排放对升温的影响系数也表现为随着采样尺度的加大，系数逐渐减小。并且横向比较同一尺度下，考虑二氧化碳浓度分布与不考虑二氧化碳浓度分布的估计结果，均呈现在二氧化碳浓度非均匀分布下的影响系数更小，三种尺度四种模型估计方法下二氧化碳排放影响系数范围在0.149~0.192之间。

对比不同尺度数据下二氧化碳浓度对升温的影响系数，发现2度分辨率与3度分辨率样本估计出的影响系数小于1度的采样数据的估计结果。2度分辨率的数据估计结果系数小于3度分辨率采样数据，采样尺度对二氧化碳浓度的系数影响相较二氧化碳排放更大，三种尺度四种模型估计方法下二氧化碳浓度对升温的影响系数范围在0.025~0.268之

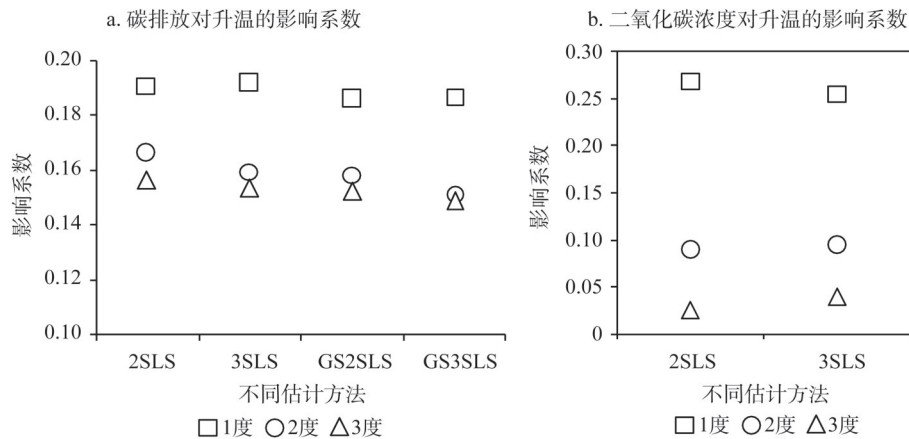


图6 基于不同分辨率数据下碳排放与二氧化碳浓度对升温影响系数
Fig. 6 Influence coefficient of carbon emissions and carbon dioxide concentration on temperature rise based on different resolution data

间。由于样本尺度的加大，二氧化碳浓度在空间上的非均匀分布差异缩小，空间信息量的减少使得影响被低估。

二氧化碳排放与二氧化碳浓度对升温的替代弹性揭示了在相同升温情况下，二氧化碳排放与浓度之间的替代关系。本文采用不同尺度数据下所估计的两者对升温的影响系数计算了相应的替代弹性（表3），所得结果发现在二氧化碳浓度对二氧化碳排放的替代弹性范围在83.82~181.23之间，表明在对相同升温水平下，二氧化碳浓度对升温的影响要远大于当期排放水平的影响，具体含义为相对平均水平每下降1%的二氧化碳浓度对二氧化碳排放的替代为大于83.82%并小于181.23%，二氧化碳浓度的下降可以缓解应对气候变化减排的压力，可获得更大的排放空间。Nordhaus等^[31]采用DICE模型模拟基准情景下2005—2255年间的世界工业二氧化碳排放水平，二氧化碳浓度以及升温情况，得到的结果在维持升温水平不变的条件下，二氧化碳浓度对二氧化碳排放的替代弹性为76.86~133.25。由于本文采用的模型并不包含DICE模型中考虑了海洋碳库的吸收以及大气碳库自身的碳衰减影响，故所估计的二氧化碳排放对浓度的替代水平要高于DICE模型模拟的结果，同时空间尺度效应的影响也增加了替代弹性估计的不确定性。

表3 不同分辨率数据二氧化碳浓度与二氧化碳排放对升温影响替代弹性

Table 3 Alternative elasticity of the impact of carbon dioxide concentration and carbon dioxide emissions on temperature rise with different resolution data

数据分辨率	$\Delta E\% / \Delta CO_2\%$	
	GS2SLS	GS3SLS
1度	83.82	85.03
2度	164.63	172.71
3度	179.57	181.23

3 结论

本文通过空间自相关分析揭示了2003—2015年全球二氧化碳浓度的非均匀空间分布聚集特征，并发现了该空间聚集程度在该研究时段存在明显增强趋势。空间分布上表现为北半球为高浓度值聚集区与南半球低浓度值聚集区的分布型，同时发现浓度较高聚集

区域基本集中在北美、东亚等高碳排放区域。在基于非均匀二氧化碳浓度空间分布的条件下, 采用了空间联立方程组模型, 估计了二氧化碳排放与升温间的关系, 发现了碳排放对升温的正向影响机制, 并定量评估了非均匀二氧化碳浓度对碳排放与升温的影响, 认为碳浓度的非均匀性在一定程度上会降低碳排放对升温影响估计, 而经济发展以及人口的聚集则会对能源消耗的需求拉动, 并最终导致了二氧化碳排放量的增加。同时考虑到空间的尺度效应, 分别采用了1度、2度与3度分辨率的采样数据进行影响估计, 结果出现由于空间数据采集尺度的扩大使得数据的空间信息量减少, 并进而低估影响系数的情况。

由于对碳排放及升温的估计结果存在影响, 二氧化碳浓度的非均匀空间分布应是当前区域碳排放空间分配需要考虑的因素之一。目前各国致力于探求不同的温控目标及阈值情景下各国的减排任务及减排目标以便制定公平合理的减排方案, 碳排放配额的分配也主要从公平性、减排能力及历史责任等原则出发, 基于人口数量、经济发展等社会经济因素来计算各国的排放空间, 普遍忽略了由于不同国家排放水平差异所导致的碳浓度空间分布差异以及相应的升温变动。对于不同国家而言, 二氧化碳浓度的下降可以缓解应对气候变化减排的压力, 区域的浓度差异使得排放空间的估计应有所调整。同时本文发现样本的空间采样范围与尺度大小会对估计结果产生一定影响, 这也将是在未来的研究中所值得进一步关注的地方。

参考文献(References):

- [1] LEDUC M, MATTHEWS H D, DE ELÍA R. Quantifying the limits of a linear temperature response to cumulative CO₂ emissions. *Journal of Climate*, 2015, 28(24): 9955-9968.
- [2] 赵宗慈. 五个全球大气海洋环流模式模拟二氧化碳增加对气候变化的影响. *大气科学*, 1990, (1): 118-127. [ZHAO Z C. Five global ocean circulation models to simulate the impact of carbon dioxide increase on climate change. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 1990, (1): 118-127.]
- [3] TETT S F B, STOTT P A, ALLEN M R, et al. Causes of twentieth-century temperature change near the Earth's surface. *Nature*, 1999, 399(6736): 569.
- [4] CROWLEY T J. Causes of climate change over the past 1000 years. *Science*, 2000, 289(5477): 270-277.
- [5] STERN D I, KAUFMANN R K. Anthropogenic and natural causes of climate change. *Climatic Change*, 2014, 122(1-2): 257-269.
- [6] 赵金彩, 钟章奇, 卢鹤立, 等. 基于夜间灯光的城市居民直接碳排放及影响因素: 以中原经济区为例. *自然资源学报*, 2017, 32(12): 2100-2114. [ZHAO J C, ZHONG Z Q, LU H L, et al. Urban residential CO₂ emissions and its determinants: A case study of central plains economic region. *Journal of Natural Resources*, 2017, 32(12): 2100-2114.]
- [7] 孙宁, 李廉水. 基于SVAR模型的气温变化对南京市工业经济的影响研究. *气象*, 2009, 35(10): 90-96. [SUN N, LI L S. Study of the impact resulting from temperature variance on the Nanjing industry economy on the basis. *Meteorological Monthly*, 2009, 35(10): 90-96.]
- [8] 刘宇, 吕郭康, 周梅芳. 投入产出法测算CO₂排放量及其影响因素分析. *中国人口·资源与环境*, 2015, 25(9): 21-28. [LIU Y, LYU Y K, ZHOU M F. Analysis on the influence factors of computing CO₂ Emission by input-output method. *China Population, Resources and Environment*, 2015, 25(9): 21-28.]
- [9] AZAM M, KHAN A Q, ABDULLAH H B, et al. The impact of CO₂ emissions on economic growth: Evidence from selected higher CO₂ emissions economies. *Environmental Science and Pollution Research*, 2016, 23(7): 6376-6389.
- [10] KASMAN A, DUMAN Y S. CO₂ emissions, economic growth, energy consumption, trade and urbanization in new EU member and candidate countries: A panel data analysis. *Economic Modelling*, 2015, 44: 97-103.
- [11] RAUPACH M R, DAVIS S J, PETERS G P, et al. Sharing a quota on cumulative carbon emissions. *Nature Climate Change*, 2014, 4(10): 873-879.

- [12] 刘莉娜, 曲建升, 黄雨生, 等. 中国居民生活碳排放的区域差异及影响因素分析. 自然资源学报, 2016, 31(8): 1364-1377. [LIU L N, QU J S, HUANG Y S, et al. Analyze on the spatial-temporal pattern and influence factors of Chinas per capita household carbon emissions. Journal of Natural Resources, 2016, 31(8): 1364-1377.]
- [13] LIU Y, CHEN Z, XIAO H, et al. Driving factors of carbon dioxide emissions in China: An empirical study using 2006-2010 provincial data. *Frontiers of Earth Science*, 2016, 11(1): 156-161.
- [14] LIU Y, XIAO H, ZHANG N. Industrial carbon emissions of China's regions: A spatial econometric analysis. *Sustainability*, 2016, 8(3): 210-224.
- [15] 符传博, 丹利, 冯锦明, 等. 我国对流层二氧化碳非均匀动态分布特征及其成因. 地球物理学报, 2018, 61(11): 4373-4382. [FU C B, DAN L, FENG J M, et al. Temporal and spatial heterogeneous distribution of tropospheric CO₂ over China and its possible genesis. Chinese Journal of Geophysics, 2018, 61(11): 4373-4382.]
- [16] 李燕丽, 邢振雨, 穆超, 等. 移动监测法测量厦门春秋季近地面 CO₂ 的时空分布. 环境科学, 2014, 35(5): 1671-1679. [LI Y L, XING Z Y, MU C, et al. Spatial and temporal variations of near surface atmospheric CO₂ with mobile measurements in fall and spring in Xiamen, China. Environmental Science, 2014, 35(5): 1671-1679.]
- [17] 杨成荫, 王汉杰, 韩士杰, 等. 大气 CO₂ 浓度非均匀动态分布条件下的气候模拟. 地球物理学报, 2012, 55(9): 2809-2825. [YANG C Y, WANG H J, HAN S J, et al. Climate simulation for dynamic heterogeneous distribution of atmospheric CO₂ concentration. Chinese Journal of Geophysics, 2012, 55(9): 2809-2825.]
- [18] ZHANG X, LI X, CHEN D, et al. Overestimated climate warming and climate variability due to spatially homogeneous CO₂ in climate modeling over the Northern Hemisphere since the mid-19th century. *Scientific Reports*, 2019, 9(1): 1-9.
- [19] 姚志刚, 赵增亮, 韩志刚. AIRS 观测的东亚夏季平流层重力波特征. 地球物理学报, 2015, 58(4): 1121-1134. [YAO Z G, ZHAO Z L, HAN Z G. Stratospheric gravity waves during summer over East Asia derived from ARIS observations. Chinese Journal of Geophysics, 2015, 58(4): 1121-1134.]
- [20] CHAHINE M T, CHEN L K, DIMOTAKIS P, et al. Satellite remote sounding of mid-tropospheric CO₂. *Geophysical Research Letters*, 2008, 35(17): L17807.
- [21] KUMMU M, TAKA M, GUILLAUME J H A. Gridded global datasets for gross domestic product and human development index over 1990-2015. *Scientific Data*, 2018, 5: 180004.
- [22] JANSSENS-MAENHOUT G, CRIPPA M, GUIZZARDI D, et al. Fossil CO₂ & GHG Emissions of All World Countries. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2017.
- [23] ANSELIN L. Local indicators of spatial association: LISA. *Geographical Analysis*, 1995, 27(2): 93-115.
- [24] WANG C, DU X, LIU Y. Measuring spatial spillover effects of industrial emissions: A method and case study in Anhui province, China. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 141: 1240-1248.
- [25] LE TREUT H. Historical overview of climate change. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, 2007.
- [26] WANG Z, LIU W, YIN J. Driving forces of indirect carbon emissions from household consumption in China: An input-output decomposition analysis. *Natural Hazards*, 2015, 75(2S): 257-272.
- [27] PIELKE JR R A. What is climate change?. *Energy & Environment*, 2004, 15(3): 515-520.
- [28] 彭静, 丹利. 百年尺度地球系统模式模拟的陆地生态系统碳通量对 CO₂ 浓度升高和气候变化的响应. 生态学报, 2016, 36(21): 6939-6950. [PENG J, DAN L. The 100-year scale response of terrestrial ecosystem carbon fluxes to climate carbon cycle caused by increasing atmospheric CO₂ concentration using an Earth System Model. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(21): 6939-6950.]
- [29] 邱新国, 谭靖磊. 产业结构调整对节能减排的影响研究: 基于中国 247 个地级及以上城市数据的实证分析. 科技管理研究, 2015, (10): 239-243. [QIU X G, TAN J L. Study on the effect from industrial restructuring to energy-saving and emission- reducing based on the panel data of 247 cities in China. Science and Technology Management Research, 2015, (10): 239-243.]
- [30] HANSEN J, SATO M. Regional climate change and national responsibilities. *Environmental Research Letters*, 2016, 11(3): 034009.
- [31] NORDHAUS W D. Economic aspects of global warming in a post-Copenhagen environment. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2010, 107(26): 11721-11726.

Statistical analysis of the relationship between carbon emissions and temperature rise with the spatially heterogenous distribution of carbon dioxide concentration

DENG Xiang-zheng^{1,2,3}, JIANG Si-jian^{1,2,3}, LIU Bing⁴, WANG Ze-hao⁴, SHAO Qing⁴

(1. Key Laboratory of Land Surface Pattern and Simulation, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Center of Chinese Agriculture Policy, CAS, Beijing 100101, China; 4. School of Surveying and Mapping Science and Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, Shandong, China)

Abstract: In order to quantify the relationship between carbon emissions and temperature rise with the spatially heterogenous distribution of carbon dioxide concentration, this paper used the spatial autocorrelation analysis and the spatial simultaneous equations model to reveal the spatial distribution and aggregation characteristics of global carbon dioxide concentration during 2003-2015 and estimated the impact of carbon emissions on temperature rise based on the grid data of global carbon dioxide concentration, carbon emissions and temperature. The results indicate that carbon dioxide concentration has high value in the northern hemisphere and low value in the southern hemisphere. Spatially heterogenous distribution of carbon dioxide concentration will slightly decrease the estimation results of the impact of carbon emissions on temperature rise. The results show that the spatially heterogenous distribution is an important parameter that should be introduced into the assessment of global warming. At the same time, due to the existence of the spatial scale effect, the selection of spatial range and resolution deserves more attention.

Keywords: carbon dioxide concentration; spatially heterogenous distribution of carbon dioxide; carbon emissions; economic impact; social cost