人-地系统模式耦合中数据时空匹配方法的新探索

丑洁明^{1*}, 董文杰^{2*}, 王淑瑜³, 涂钢⁴, 胡川叶⁵

1. 北京师范大学地表与资源生态国家重点实验室, 北京 100875;

2. 中山大学大气科学学院, 广州 519082;

3. 南京大学大气科学学院, 南京 210043;

4. 吉林省气象科学研究所, 长白山气象与气候变化吉林省重点实验室, 中高纬度环流系统与东亚季风研究开放实验室, 长春 130062;

5. 中国气象局国家气候中心, 北京 100081

* 联系人, E-mail: choujm@bnu.edu.cn; dongwj3@mail.sysu.edu.cn

2020-05-12 收稿, 2020-11-13 修回, 2020-11-16 接受, 2020-11-19 网络版发表

国家重点研发计划(2016YFA0602703, 2018YFC1509003)和国家自然科学基金(42075167)资助

摘要 人-地系统模式双向耦合的运行, 存在着人-地数据时空尺度不相匹配的障碍. 为使二者相匹配, 在空间尺度上, 提出通过经济模型将行政单元统计数据转变为网格数据的运行路径, 并设计了“面积权重折算法”的数据转换方法, 使经济系统的行政单元数据与地球系统模式的网格数据相匹配; 在时间尺度上, 将选取的不同时间尺度的经济统计数据整合到年际范围, 使其与地球系统模式的时间步长尺度相一致. 运用该方法分别对中国大陆和世界各国的人口、GDP、CO₂排放等进行网格化处理, 结果表明其特征与实际分布相一致. 新方法结果可信度高, 为人-地系统模式的双向耦合提供了可靠的变量运转的基础.

关键词 模型, 耦合, 气候变化, 数据网格化, 时空匹配

人-地系统模式耦合问题, 是目前科学界研究的热点和难点问题. 地球系统模式用包括动力学方程组和参数化方案等一系列数学方程组对地球系统进行表征, 构成数学物理模型, 进而用数值的方法进行求解的过程^[1], 在几代科学家们的持续努力下获得了显著的进展^[2-12]. 但在将气候变化影响引入模式特别是与社会经济系统的关联研究方面起步较晚, 实现以人类活动为主要内容的社会经济模式与以自然动力方程数值求解为表征的地球系统模式相耦合, 更是举步维艰. 由此所形成的这个具有创新性和挑战性的科学难题, 引发了许多科学家的研究探索^[13-16].

运用人-地系统模式研究气候变化影响, 需要实现地球系统模式和经济评估模型的双向耦合. 要攻克人-地系统耦合的难关, 除了要跨越两类系统运行的思维设计鸿沟外, 其运行方式、参数选取以及评估结果的思想表达都不相同, 也是耦合模式需要克服的难点. 其中一个重要的技术难点就是模式运行中存在的人-地双方时间尺度和空间尺度不匹配的问题, 它是模式耦合运行的基础性技术瓶颈.

地球系统模式与社会经济系统模型二者的建模思想具有较大的差异, 其数据来源也很不相同, 需进行必要的转换才能实现二者的耦合. 在空间尺度方面, 社会经济系统模型(例如综合评估模

型), 一般着重考虑包括人口、部门、GDP、能源、技术等因素的宏观经济过程的变化, 是以区域行政单元为空间尺度建立的, 数据获取一般来源于行政单位的统计数据; 而地球系统模式是以格点为尺度建模的, 要做到使两类模式相耦合, 首先必须通过空间尺度转换的方法将经济行政数据与地球格点数据互为转换. 在时间尺度方面, 目前的社会经济系统模型^[17-23]所用的经济数据由于受社会经济过程和社会经济统计周期的约束, 通常为月、季、年以及5年甚至10年的长时间尺度; 地球系统模式涉及多个分量模式, 每个分量模式都有各自的时间步长, 与社会经济系统模型在运行的

引用格式: 丑洁明, 董文杰, 王淑瑜, 等. 人-地系统模式耦合中数据时空匹配方法的新探索. 科学通报, 2021, 66: 526-532

Chou J M, Dong W J, Wang S Y, et al. New method for matching spatial and temporal data in human-Earth system model coupling (in Chinese). Chin Sci Bull, 2021, 66: 526-532, doi: [10.1360/TB-2020-0569](https://doi.org/10.1360/TB-2020-0569)

时间步长尺度上存在较大差别,要将不同来源和统计取样的不同时间尺度的经济数据转化为与地球系统模式运行相一致的时间步长的经济数据,才能在技术上实现两类模式的双向耦合的运行。

本研究针对上述两类模型系统的数据时空尺度不相匹配问题,借鉴同一网格内不同下垫面如何参数化的方法^[2,3],提出运用转变社会经济评估模型数据的空间分辨率和时间分辨率的办法:在空间上,将社会经济系统模型中以行政区划为尺度的经济数据进行网格化处理,处理成与地球系统模式的网格相一致的数据形式;在时间上,将选取的不同来源的经济统计数据的时间尺度整合成一年的时间步长尺度,使之与地球系统模式的时间尺度相一致,从而使人-地系统模式的耦合在技术上成为可能。

本研究采用的数据,(1)基于GDP、人口和CO₂这3个典型的经济指标,以行政区域为统计单元,包括中国大陆和世界两个范围。在中国大陆选择了分省的统计数据,在全球范围选择了分国家统计数据。时间范围选取2010~2018年,逐年研究分析。中国内地数据主要来源于中国国家统计局、地方国土资源局和中国统计年鉴,世界各国的数据主要来源

于联合国数据库。在将经济数据输入到GIS的数据库中时,由于联合国数据库中国家划分名称略有差异,本文对原始数据一一进行了核实处理,以保证数据在衔接时的准确度。(2)在兰勃脱投影下,分别在国底图和世界底图上建立1°×1°的经纬网,覆盖了完整范围,国内范围的格网总计3795个网格单元,世界范围格网包含62640个网格单元。

本研究的工作之一,是通过行政数据网格化和网格数据行政化处理两种数据转换处理办法,实现两类模式的耦合运转(图1)。依据经济系统模型数据的处理,有先网格化和后网格化两条路径,均可实现经济系统模型与地球系统模式间双向且闭合的耦合。

路径一:先将统计得到的行政区域的统计资料进行网格化处理,再输入经济模型运行运算,得到网格化的数据结果,然后与地球系统模式衔接耦合。路径二:将行政区域的统计资料直接输入经济模型处理,再将得到的结果进行网格化处理,同样可以与地球系统模式衔接耦合。

二者的相同点是起点均为行政区域的统计资料,在进入地球系统模式前都转换成了网格化的资料,可以与地球

系统模式运转的数据输入格式要求相匹配。不同点是网格化的过程和进入经济模型进行处理的过程有先后顺序之分,影响的是社会经济模型运转的结果分类。先网格化的数据进入经济模型,得到的是经济模型网格化的结果,不利于经济模型的分析但有利于和地球系统模式的衔接和耦合;后网格化的处理是迎合经济模型的分析结果,再进行网格化处理,后衔接到地球系统模式中去,转换数据的过程会给地球系统模式数据的输入带来不确定性。

在双向耦合的另一端,即地球系统模式输出的格点形式资料,既可以直接用于经济模型进行处理,也可以先进行网格数据行政化处理后进入社会经济模型,形成一个闭合的循环过程。同时,由于在经济研究中行政区域的数据更为常见和常用,运用“网格数据行政化”的方法由网格数据转为以行政区域为统计单元的数据,进入模型并运行,更有利于经济模型的结果分析。

找到能满足先网格化或后网格化的经济模型是十分重要的。经济-气候模型^[24](C-D-C)可以同时实现先网格化和后网格化的两条路径,且对数据约束较小(图1)。

图1 (网络版彩色)人-地系统模式双向耦合过程

Figure 1 (Color online) Bidirectional coupling process of human-Earth system model

本研究的另一个工作,是构建“面积权重折算法”。这种方法既可以用于行政数据网格化,即正向的转化;又可以用于网格数据行政化,即逆向的转化。

首先看如何进行行政数据网格化处理。“面积权重折算法”是一种通过面积分配行政数据,从而达到网格化的方法。其原理为,若网格处于非交界处,即处于某省省内,网格数据则与该省数据一致;在多(n)个省份交界处,网格由多个不规则的图形组成,网格数据则由多个省份的数据共同决定。

$$Z_{jk} = \sum_{i=1}^n \frac{Y_i}{S_i} s_{ijk}, \quad (1)$$

式中, Z_{jk} 为第 j 行 k 列网格内的经济指标总量(如GDP、人口、 CO_2 排放量等), Y_i 为第 i 个统计单元(若国内即为某省,若全球即为某国)的经济指标总量, S_i 为第 i 个统计单元的总面积, s_{ijk} 为第 i 个统计单元在第 j 行 k 列的网格中所占面积。运用GIS进行上述处理的操作有较高的规范性,流程的可重复性较强。由于任何一个网格都会由一个或多个省份组成,全部数据均按照上述方法进行转换,以行政区为统计单元的经济资料便转化为网格形式,达到了空间尺度的转换。

如图2(a)所示,以国内某单个网格为例,选取兰勃脱投影,在中国地图底图及世界地图底图上建立 $1^\circ \times 1^\circ$ 的经纬网格,底图原有的行政单位会被经纬网格切割。此网格被分为3个部分,左上不

规则图形属于山西省,右上不规则图形属于河北省,第③个不规则图形属于河南省。则有:

$$Z_{jk} = \frac{Y_1}{S_1} s_{1jk} + \frac{Y_2}{S_2} s_{2jk} + \frac{Y_3}{S_3} s_{3jk}. \quad (2)$$

实际的操作流程为:在ArcGIS中,先建立网格并将要素转面。再将底图与单位面积的某经济指标的数据进行连接,连接的关键是各行政区划的名称。运用分析工具中的联合操作,建立的网格便将底图按网格切割并产生不规则图形。将属性表导出,其包含了不规则图形面积、单位面积的某经济指标等数据。对数据进行上述的加权折算后,再连接到ArcGIS的网格中。

同理,在由网格化数据向行政区域数据的逆向转化时,则有

$$Y_i = \sum_{j=1}^n \frac{Z_{jk}}{S_z} s_{ijk}, \quad (3)$$

式中, Y_i 为第 i 个统计单元(国内即为某省)的经济指标总量, Z_{jk} 为第 j 行 k 列网格内的经济指标总量(如GDP、人口、二氧化碳排放量等), S_z 为每个网格的面积, s_{ijk} 为第 i 个统计单元在第 j 行 k 列的网格中所占面积。例如,从图2(b)可以看到,广东省的某经济指标的总量由其在每个网格中所占的小面积加和得到。任何一个行政划分的省份都可以通过这种方法得到省级经济指标的总量,完成了从网格数据到行政区域数据的转化。

利用这种方法,分别对2010~2018年中国各省和世界各国的GDP、人口数据进行了网格化的处理,结果显示:(限于篇幅,只展示出部分图例,即:图3,4):从中国大陆区域看,GDP和人口都呈现出一种自东南沿海向西北逐渐递减的趋势,与实际情况一致。比较相同年份的不同指标时,可以发现GDP的高值区相较于人口有向东的偏移,说明东部的GDP优势比人口更为明显。这一现象符合我国的实际国情,即东部沿海城市的发达程度与西部有明显的差距。比较不同年份的相同指标时,可以发现网格化后的人口和GDP的年际变化无明显差异,从年代际的时间尺度上看,GDP的变化波动幅度大于人口波动幅度,和实际的情况以及经济指标增长的规律相符,说明2010~2018年全国人口和GDP的增速较为稳定,年际之间变动不大。

在对全球数据进行网格化时,可以看到由于数据的局限性,每个国家只有一个数值,只有被国境线分割的网格会有数值的变动,但这些网格的数目相对于全球的网格微乎其微。对于地球系统模式而言,这个精度是可以满足要求的。模拟结果显示:世界各国的网格化GDP分布,总体来说呈现出“南北差异”,高纬度地区的经济状况好于低纬度特别是赤道地区。

本研究针对地球系统模式和经济评估模型的双向耦合问题,在揭示二者时空尺度不相匹配的基础上,提出了通

图2 (网络版彩色)行政数据网格化和网格数据行政化示意图。(a)以中国华北地区为例将行政数据网格化;(b)以中国广东省为例将网格数据转化为行政区域的统计单元

Figure 2 (Color online) Schematic diagram of administrative data gridding and transformation of grid data into administrative data. (a) Gridding in North China as an example; (b) grid data transformed into a statistical unit in the administrative area in Guangdong Province

图 3 1960~2010年中国GDP年代际变化的网格化效果
Figure 3 The gridding effect of China's GDP interdecadal changes (1960–2010)

图 4 1960~2010年中国人口年代际变化网格化效果
Figure 4 The effect of gridding of interdecadal changes in Chinese population (1960–2010)

过行政数据网格化和网格数据行政化两种数据转换的办法,实现了两类模式的耦合运转;构建了面积权重算法,并基于中国国家统计局和联合国数据库中

2010~2018年的国内与全球的GDP、人口资料、CO₂排放等,对此方法进行了实际模拟检验,得到了较为理想的结果。重要启示有:

第一, GDP和人口、CO₂排放等以行政区划为统计单位的经济数据用新方法进行网格化处理,空间尺度运用1°×1°网格,不同时间尺度的统计数据来源统

一转换为一年尺度,突破了经济统计数据以行政区划为统计单元的旧有模式,既能够反映实际经济数据分布,又能够与地球系统模式中的格网相衔接,从而为人-地系统双向耦合模式运行提供了变量匹配的技术支持.本研究关于行政数据网格化和网格数据行政化的路径设计,在可查阅的研究文献中,尚属首次提出.全面评估两条路径模拟带来的差异、可靠性和不确定性的研究,是我们

后续工作的方向.

第二,对于社会经济系统模型与地球系统模式的耦合工作来说,运用面积权重折算法初步构建了两类系统运行的思维设计“桥梁”,基本达到了耦合运行的目标,但在精细化的方面还有待提升.将此方法转换生成的时空变量相匹配的数据,输入“人-地系统模式”中进行运转和模拟,分析其结果和影响,进一步提高时空分辨率和时效性,是下一步将要继

续开展的工作.

第三,通过参数的时空尺度相互转换,将气候系统与社会经济系统有效耦合,克服了两类模型由于内在特异性导致的耦合障碍,创新提出了两类不同科学性质的模式耦合的数据处理问题上的方法,可以为同步耦合评估气候变化对社会经济的影响提供模拟手段,这对于适应和应对气候变化,推动经济社会可持续发展具有重要的意义.

致谢 文内涉及的地图经自然资源部地图技术审查中心审查,审图号为GS(2020)7001号.

参考文献

- 1 Wang B, Zhou T J, Yu Y Q, et al. A perspective on earth system model development (in Chinese). *Acta Meteorol Sin*, 2008, 66: 857–869 [王斌, 周天军, 俞永强, 等. 地球系统模式发展展望. *气象学报*, 2008, 66: 857–869]
- 2 Zeng Q C, Zhang X H, Liang X Z, et al. Documentation of IAP Two-level Atmospheric General Circulation Mode. DOE/ER/60314- H1, TR044, 1989
- 3 Dai Y J, Zeng Q C, Wang B. A simple land surface model for use in AGCM (in Chinese). *Chin J Atmos Sci*, 1997, 21: 66–77 [戴永久, 曾庆存, 王斌. 一个简单的陆面过程模式. *大气科学*, 1997, 21: 66–77]
- 4 Zhang X, Bao N, Yu R, et al. Coupling scheme experiments based on an atmospheric and an oceanic GCM. *Chin J Atmos Sci*, 1992, 16: 129–144
- 5 Guo Y F, Yu Y Q, Chen K M, et al. Mean climate state simulated by a coupled ocean-atmosphere general circulation model. *Theor Appl Climatol*, 1996, 55: 99–111
- 6 Wu G X, Zhang X H, Liu H, et al. Global Ocean-Atmosphere-Land System Model of LASG (GOALS/LASG) and its performance in simulation study (in Chinese). *J Appl Meteorol Sci*, 1997, 8: 15–28 [吴国雄, 张学洪, 刘辉, 等. LASG全球海洋-大气-陆面系统模式(GOALS/LASG)及其模拟研究. *应用气象学报*, 1997, 8: 15–28]
- 7 Ding Y H, Li Q Q, Li W J, et al. Advance in seasonal dynamical prediction operation in China (in Chinese). *Acta Meteorol Sin*, 2004, 62: 598–612 [丁一汇, 李清泉, 李维京, 等. 中国业务动力季节预报的进展. *气象学报*, 2004, 62: 598–612]
- 8 Huang J P, Yi Y H, Wang S W, et al. An analogue-dynamical long-range numerical weather prediction system incorporating historical evolution. *Q J R Meteorol Soc*, 1993, 119: 547–565
- 9 Zhou T J, Wang Z Z, Yu R C, et al. SAMIL, and the Coupling Model FGOALS-s (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 2005. 1–288 [周天军, 王在志, 宇如聪, 等. 大气环流模式SAMIL及其耦合模式 FGOALS-s. 北京: 气象出版社, 2005. 1–288]
- 10 Zeng Q C, Lin Z H. Recent progress on the earth system dynamical model and its numerical simulations (in Chinese). *Adv Earth Sci*, 2010, 25: 1–6 [曾庆存, 林朝晖. 地球系统动力学模式和模拟研究的进展. *地球科学进展*, 2010, 25: 1–6]
- 11 Gao X J, Giorgi F. Use of the RegCM System over East Asia: Review and Perspectives. *Engineering*, 2017, 3: 766–772
- 12 Zhou T, Wu B, Wen X, et al. A fast version of LASG/IAP climate system model and its 1000-year control integration. *Adv Atmos Sci*, 2008, 25: 655
- 13 Ackerman F. Still dead after all these years: Interpreting the failure of general equilibrium theory. *J Econ Methodol*, 2002, 9: 119–139
- 14 Köhler J, Grubb M, Popp D, et al. The transition to endogenous technical change in climate-economy models: A technical overview to the innovation modeling comparison project. *Energy J*, 2006, 27: 17–55
- 15 Collins W D, Craig A P, Truesdale J E, et al. The integrated Earth system model version 1: Formulation and functionality. *Geosci Model Dev*, 2015, 8: 2203–2219
- 16 Dong W J, Yuan W P, Teng F, et al. Coupling earth system model and integrated assessment model (in Chinese). *Adv Earth Sci*, 2016, 31: 1215–1219 [董文杰, 袁文平, 滕飞, 等. 地球系统模式与综合评估模型的双向耦合及应用. *地球科学进展*, 2016, 31: 1215–1219]
- 17 Nordhaus W D. The ‘Dice’ Model: Background and Structure of a Dynamic Integrated Climate-Economy Model of the Economics of Global Warming. Technical Report, Yale University, 1992
- 18 Nordhaus W D, Yang Z. A regional dynamic general-equilibrium model of alternative climate-change strategies. *Am Econ Rev*, 1996, 86: 741–765

- 19 Zhang X Q, Ge Q S. Integrated assessment models on climatic changes (in Chinese). *Prog Geogr*, 1999, 18: 60–67 [张雪芹, 葛全胜. 气候变化综合评估模型. *地理科学进展*, 1999, 18: 60–67]
- 20 Nordhaus W D. An optimal transition path for controlling greenhouse gases. *Science*, 1992, 258: 1315–1319
- 21 Stocker T F, Qin D H, Plattner G K, et al. *Climate Change: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of IPCC the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge: Cambridge University Press, 2014
- 22 Stanton E A, Ackerman F, Kartha S. Inside the integrated assessment models: Four issues in climate economics. *Clim Dev*, 2009, 1: 166–184
- 23 Liu C X, Wang Z, Tian Y. Global cooperation on carbon mitigation by applying game (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2016, 61: 771–781 [刘昌新, 王铮, 田园. 基于博弈论的全球减排合作方案. *科学通报*, 2016, 61: 771–781]
- 24 Chou J M, Dong W J, Ye D Z. A new economic-climate model (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2006, 51: 1735–1736 [丑清明, 董文杰, 叶笃正. 一个经济-气候新模型的构建. *科学通报*, 2006, 51: 1735–1736]

Summary for “人-地系统模式耦合中数据时空匹配方法的新探索”

New method for matching spatial and temporal data in human-Earth system model coupling

Jieming Chou^{1*}, Wenjie Dong^{2*}, Shuyu Wang³, Gang Tu⁴ & Chuanye Hu⁵¹ State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;² School of Atmospheric Sciences, Sun Yat-sen University, Guangzhou 519082, China;³ School of Atmospheric Sciences, Nanjing University, Nanjing 210043, China;⁴ Institute of Meteorological Science of Jilin Province, Jilin Province Key Laboratory for Changbai Mountain Meteorology and Climate Change, Laboratory of Research for Middle-High Latitude Circulation System and East Asian Monsoon, Changchun 130062, China;⁵ National Climate Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China* Corresponding authors, E-mail: choujm@bnu.edu.cn; dongwj3@mail.sysu.edu.cn

The bidirectional coupled operation of the human-Earth system model is hindered by the spatial and temporal mismatch of the Earth system data and comprehensive economic system data. The Earth system model uses geologically gridded data whereas the economic evaluation model uses national or regional administrative statistical data. In addition, the Earth system model and economic evaluation system model are generally not synchronized because they use different time steps. Thus, the modeling methodologies and operational trajectories are totally different, thereby making it difficult to operate them in a single model. To match the two types of data on spatial scales, we proposed transforming the statistical data collected in administrative units into gridded data by using economic models and the inverse operation to convert the gridded data into administrative data. On temporal scales, we proposed to streamline the selected economic data for various time scales to the same time step used by the Earth system model (e.g., both on a “per year” basis). For the first time, we designed an “area-weighted conversion method”, which can be used in a forward direction to convert administrative data into gridded data or in a backward direction to transform gridded data into administrative data, thereby matching the economic data in administrative units with the gridded data in the Earth system model. The practical steps in the area-weighted conversion method are as follows. First, using the Lambert projection, net grids are built with $1^\circ \times 1^\circ$ latitude and longitude resolution using the base map for China and the global base map, respectively, thereby yielding 3795 cells for the Chinese mainland and 62640 cells for the globe. Next, in ArcGIS, the net grid is built and the factors are converted into areal units, and then connected to the base map with the economic indices per unit area. Connecting the names of the administrative entities is a crucial step. Using the union operation in the analysis tools, the established net grid cuts the base map into irregular shapes. The exported table of properties contains the areas of the irregular shapes and economic indices per unit area. Finally, after applying the weights to the data mentioned above, the map is reconnected to the ArcGIS net grid. Using the forward and backward methods, we connected the data in the Earth system model and economic evaluation model, and operated them in a coupled manner. Our study was based on data for 2010–2018 obtained from the China National Bureau of Statistics and the United Nations’ databases. We applied the proposed method to data for the Chinese mainland and other countries, such as populations, GDP, and CO₂ emissions, with a $1^\circ \times 1^\circ$ grid spatial scale and statistical data at various temporal scales were converted into a per year basis. The simulation and test results were satisfactory. The distributions of various indices and characteristics were consistent with reality, thereby indicating that the proposed method is capable of providing a reliable basis for the bidirectional coupled variable operation of the human-Earth system model. Our future research will involve feeding the spatial-temporal matched data converted using our method into the human-Earth system model to conduct simulations, analyzing the result and impacts, and further improving the spatial-temporal resolution and real-time capability.

model, coupling, climate change, data grid, spatiotemporal matchingdoi: [10.1360/TB-2020-0569](https://doi.org/10.1360/TB-2020-0569)