



写给大学生的贸易引力模型

Yoto V. Yotov

Translated into Chinese by:

Miaojie Yu

Ohyun Kwon



DREXEL UNIVERSITY

Center for

Global Policy Analysis

LeBow College of Business

CGPA 工作论文旨在供学术讨论与意见交流使用。论文未经过同行评审，也未接受 CGPA 理事会的正式审查。CGPA 不对论文中所表达的观点或内容的准确性承担责任。

致授课教师

感谢您在课程中使用该教学资料！我为撰写该教学资料投入了大量时间与精力，希望它能对您的教学有所帮助。该教学资料、数据、代码、练习题及其参考答案，均作为公共资源免费提供。请您在使用时注意以下事项：

- 请让学生自行从以下网站下载本教学资料及相关数据与代码：https://yotoyotov.com/Gravity_Undergrads.html。您的协助将有助于我统计资料的使用情况，并评估是否值得继续推进这项工作。
- 如您对本教学资料、配套数据或代码有任何疑问，或发现其中存在前后不一致、笔误或其他错误，请您随时指正。同时，我也非常欢迎一切建设性的意见与建议。联系方式：yotov@drexel.edu。
- 如需获取配套练习题的参考答案，请发送电子邮件至：yotov@drexel.edu。
- 最后，请提醒学生，在使用本教学资料时务必按规范格式进行引用。

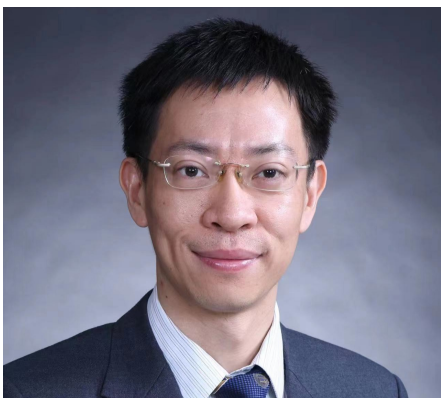
团队简介



本教学资料是我最具价值的成果之一，凝聚了本人职业生涯中的两大追求——经济学教学以及对贸易引力模型的长期探索。我由衷希望它能为广大本科生、硕士生及所有需要了解贸易引力模型的研究者与学习者提供坚实的助力。

正是出于对教学与引力模型的兴趣，我当年选择攻读博士学位。自此，我在学术生涯中始终深耕于贸易引力模型领域，在理论建模、估计方法改进、算法开发及引力数据集构建等方面做出了一系列贡献。相关研究成果已发表于多家国际知名学术期刊。与此同时，我还运用引力模型为国际组织、各国政府及智库提供政策咨询。

我曾多次讲授引力模型相关课程，学员包括来自全球 130 多个国家的数百名学生、学者与政策制定者。在指导过本科生应用引力模型开展研究的过程中，我发现引力模型不仅简单易用，而且能为本科生带来重要的学习价值。通过本教学资料，我希望将前沿的研究方法和政策分析工具融入课堂，为本科教学带来一个独特的体验。能够编写这份材料，我深感荣幸。



余淼杰，现任辽宁大学党委副书记、校长，国家监委特约监察员，第十四届全国人大代表，英国皇家经济学奖首位华人获奖者、联合国国际经济学会会士、长江学者特聘教授、国家杰青、北京大学博雅特聘教授。

他曾任北大国发院党委书记、副院长，主持多项国家级重大科研项目，在《Economic Journal》《Review of Economics & Statistics》《Journal of International Economics》《经济研究》等国内外顶级期刊发表论文 170 余篇，出版著作教材 23 部。其独著论文获英国皇家经济学奖并被评为《Economic Journal》自 1891 年创刊以来最具影响力的三篇论文之一。曾获吴玉章人文社科奖、张培刚发展经济学奖等十余项国家级大奖。担任多家国际权威期刊副主编或编委，是全球经管类前 1% 高引经济学家。

多次受邀为联合国、财政部、商务部等提供政策咨询，并在央视《焦点访谈》等媒体发声。在北大百廿校庆中作为优秀教师代表受到习近平总书记接见。主要研究领域为国际贸易、世界经济与中国经济发展。



权五显，现为美国德雷塞尔大学经济学系的助理教授，同时也是该校全球政策分析中心的研究员。毕业于北京大学光华管理学院金融学专业，随后在美国威斯康星大学麦迪逊分校获得经济学博士学位，并曾在达特茅斯学院进行访学研究。研究兴趣涵盖国际贸易、环境与贸易政策以及经济制裁等前沿领域。

引力模型作为国际贸易研究的基石，其重要性毋庸置疑，且随着计量经济学理论和计算能力的进步，其应用变得便捷高效。这份教学资料应运而生，旨在帮助中国学子及年轻学者迅速掌握引力模型的核心要义与最新应用，使其更容易对接国际贸易研究前沿。

我深切期望这份资料能惠及对国际经济学充满热情的莘莘学子。通过学习，学生们不仅能深入理解理论逻辑，更能习得实用的数据分析技能，显著提升实证研究能力。这必将为他们未来在更高阶的学习、国际组织、政府或企业的工作奠定坚实基础。我们期待它成为学生学术成长的有力助推器，激励他们在国际贸易领域做出创新贡献。

致谢与免责声明

我衷心感谢许多同事和朋友对该教学资料作出的直接或间接贡献，其中包括：Delina Agnosteva、James Anderson、Scott Baier、Richard Baldwin、Richard Barnett、Jeff Bergstrand、Cosimo Beverelli、Ingo Borchert、Sebastien Bradley、Federico Carril-Caccia、Minghua Chen、Carsten Eckel、Peter Egger、Gabriel Felbermayr、Lisandra Flach、Javier Florez、Lionel Fontagne、Rebecca Freeman、Gene Grossman、Jean Grossman、James Harrigan、Beno Heid、Inga Heiland、Julian Hinz、Peter Herman、Paul Ko、Ohyun Kwon、Mario Larch、Maia Linask、Jeff Luckstead、Martina Magli、Inma Martinez-Zarzoso、Xenia Matschke、Jose Antonio Monteiro、Arne Nagengast、Sergei Nigai、Kevin O'Rourke、Jordi Paniagua、Blake Peters、Roberta Piermartini、Ray Riezman、Fernando Rios-Avila、Ana Maria Santacreu、Mauricio Sepulveda、Serge Shikher、João Santos Silva、Bob Staiger、Costas Syropoulos、Angelos Theodorakopoulos、Farid Toubal、Joschka Wanner、Ji Wu、Erdal Yalcin、Jangsu Yoon，以及 Tom Zylkin。特别感谢 Blaize Giangiulio 在该教学资料各个方面给予的宝贵帮助。我也感谢德雷塞尔大学 (Drexel University) 全球政策分析中心 (Center for Global Policy Analysis) 给予的支持与鼓励。与大多数本科教材一样，我在该教学资料中尽量减少了引用参考文献的数量，但在个别地方还是给读者引用了关键论文以及文献综述。文中所有观点与错误均由作者本人负责。

我非常感谢 **Miaojie Yu** (余森杰) 和 **Ohyun Kwon** (权五显) 教授将本教学资料译为中文，并期待它能惠及更多中国学子。

写给大学生的贸易引力模型

贸易引力模型是国际贸易研究中的“主力”模型 (workhorse), 也是贸易政策分析中应用最为广泛的工具。许多被主流媒体广泛报道的重大事件—例如 2025 年初美国总统唐纳德·特朗普关税政策的量化研究、英国脱欧 (Brexit) 的经济影响评估, 以及俄罗斯在俄乌冲突后所受贸易制裁的效应分析—其背后的学术研究均建立在不同引力模型的基础上。因此, 引力模型成为唯一一个登上《金融时报》头版的经济学实证模型, 并不令人意外 (见图 1)。

图 1: 《金融时报》中的引力模型



来源:《金融时报》, 2016 年 4 月 19 日。灵感来自 Peter Neary 在 2019 年皇家经济学会 (RES) 会长演讲。

引力模型在国际贸易研究中享有“明星地位”, 主要原因包括: (i) 具备强大的预测能力; (ii) 理论基础坚实严谨; (iii) 形式直观、易于理解, 适合包括本科生在内的不同读者; (iv) 实证应用中操作简便, 可用于分析多种政策问题。然而, 尽管该模型在理论架构、实证表现、直观性及可操作性等方面均表现突出, 却在大学本科阶段的国际贸易教材中未获得充分重视与系统介绍。为弥补这一不足, 本教学资料旨在系统性地引导本科生掌握贸易引力模型, 具体教学目标包括:

- 向学生全面系统地介绍贸易引力模型, 阐述其学习价值、广泛应用背景及成功原因。这是第 1 节的主要目标。
- 为最“朴素的”(naive) 引力方程提供理论动机, 并进一步将其拓展为结构引力模型, 同时强调引力理论对模型应用与估计的重要意义。这是第 2 节的主要目标。
- 将理论引力方程转化为计量经济学模型, 讨论估计过程中的主要计量问题, 并总结若干直观且操作简便的估计方法。这是第 3 节的主要目标。
- 向学生提供可实际操作的贸易数据与代码, 辅以练习题、指导与补充数据, 旨在支持学生顺利完成课程论文或本科毕业论文。这是第 4 节以及本资料末尾部分练习题的主要目标。

1. 引力模型：为什么要学习？为什么如此受欢迎？

基于与其他教师的交流、本科生对贸易引力模型的学习反馈，以及我个人在教学与政策咨询中的经验，我认为，引力模型不仅能够、而且也应当在本科阶段进行系统性讲授。方框 1 总结了在本科课程中引入引力模型的主要理由，并阐述了其多方面的益处。

e

方框 1. 为什么要学习引力模型 & 它对本科生有何用处？

- 与本科国际贸易教材中的标准模型相比，引力模型不仅能更准确地预测双边贸易流量，还能更广泛地应用于学术研究与政策分析之中。
- 引力模型可用于补充和强化经典贸易理论，其经验估计方程能让学生对这些理论进行实证检验，从而在本科教学中发挥重要作用。
- 引力模型兼具理论严谨性与实证效力。作为纳入贸易成本的实证模型，它能够便捷地结合真实数据进行估计，从而显著丰富以理论分析为主的本科国际贸易课程。
- 得益于其直观而简洁的理论结构，引力模型易于被包括本科生在内的广大学习者理解和掌握。
- 随着计量经济学与计算方法的不断进步，如今，即便是前沿的实证引力模型，也只需掌握如普通最小二乘法 (OLS) 和固定效应等基础计量工具即可实际运用。基于此，本教学资料配套了真实数据集、计量代码、实操实例及政策分析练习题，以支持学生高效开展相关操作与学习。
- 引力模型的适用性并不仅限于国际贸易领域。本教学资料所介绍的经济学直觉与实证方法，同样可直接应用于分析双边移民流动、外国直接投资 (FDI)、跨境专利等问题。
- 除了服务于本科国际贸易课程，引力模型亦可在计量经济学课程与本科高年级论文研讨课中发挥作用，并为准备本科论文或独立研究项目的学生提供有力支持。

贸易引力模型。国际贸易的引力方程表明，两国之间的双边贸易流量 (X_{ij})，即国家 j 从国家 i 的进口，通常与出口国的经济规模 (Y_i) 和进口国的经济规模 (Y_j) 的乘积成正比，并与两国之间的双边贸易摩擦 (T_{ij}) 成反比：

$$X_{ij} = \tilde{G} \frac{Y_i Y_j}{T_{ij}^\theta}, \quad (1)$$

其中， \tilde{G} 表示贸易引力常数， θ 为贸易流量相对于贸易摩擦的弹性系数，用以刻画双边贸易流量对贸易摩擦变化的敏感程度。式 (1) 的直观解释是，两国的经济规模越大、相距越近，其双边贸易规模也就越大。该经济直观性正是引力模型具有强大吸引力的原因之一。

为什么引力模型如此受欢迎？贸易引力方程在经济学家和政策制定者中广受欢迎，主要基于四个原因。首先，正如前文所述，该模型与牛顿万有引力定律在形式上高度相似，因而具有非常直观的经济学含义。

1. 引力模型具有极强的经济直观性。

如方框 2 所示，贸易引力方程与牛顿万有引力定律之间存在显著的相似性。两国（物体）之间的贸易额（引力）与其经济规模（质量）的乘积成正比，并与贸易摩擦（距离的平方）成反比。换言之，两个国家规模越大、彼此越接近，其双边贸易流量就越大。

方框 2. 物理学中的引力 vs. 贸易中的引力

物理学中的引力

$$F_{ij} = G \frac{M_i M_j}{D_{ij}^2}$$

其中:

F_{ij} 表示物体 i 与 j 之间的引力;

G 表示物理学中的引力常数;

M_i 与 M_j 表示物体 i 与 j 的质量;

D_{ij} 表示 i 与 j 之间的距离;

2 表示引力对距离的弹性;

贸易中的引力

$$X_{ij} = \tilde{G} \frac{Y_i Y_j}{T_{ij}^\theta}$$

其中:

X_{ij} 表示国家 i 与 j 之间的贸易额;

\tilde{G} 表示贸易中的“引力常数”;

Y_i 与 Y_j 表示国家 i 与 j 的经济规模;

T_{ij} 表示 i 与 j 之间的贸易成本/摩擦;

$\theta > 0$ 表示贸易流量对贸易成本的弹性。

贸易引力模型的精妙之处，不仅在于其形式与物理学中的万有引力高度相似，还在于它能够从严谨的微观经济学理论中推导出来。

引力模型广受欢迎的第二个原因在于其出色的实证表现。简而言之，该模型在预测双边贸易流量方面确实“效果显著” (it works)。

2. 引力方程对双边贸易流量具有很强的预测能力。

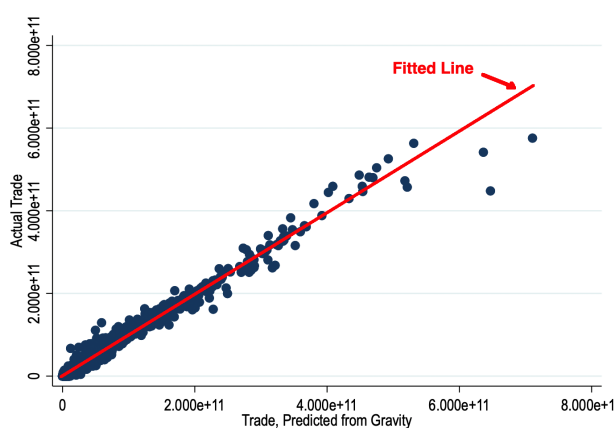
引力方程对于贸易流量的拟合效果出色，并能对一系列自变量（常称为“传统引力变量”）给出经济学上合理的系数估计。这些变量包括双边距离的对数、是否接壤、是否使用共同官方语言、殖民关系以及区域贸易协定 (RTA) 等。通常情况下，引力模型的估计结果表明：双边贸易流量随距离增加而下降，而在签订区域贸易协定时显著上升。

图 2 通过对比引力模型预测的双边贸易总额与实际贸易总额，直观呈现了该模型的良好性能。该图数据涵盖 1990—2023 年全球前 100 大出口国。图中预测结果基于一个现代计量引力模型（将在本资料第 4 节具体实现），拟合效果极佳（实际与预测贸易额的相关系数高达 0.99）。不过，正如将在第 4 节及文末练习中展示的，即便是仅包含三个自变量的最基础的引力模型，也能够较为准确地预测双边贸易流量。

图 2 中的预测基于 1990—2023 年的动态数据。值得强调的是，引力方程不仅在单一年份的截面数据中表现稳健，在跨年份的面板数据中也具有良好的估计效果。此外，该模型在不同层级的分解与汇总数据中均适用，如按产品、行业或部门划分的数据。

引力方程备受推崇的第三个原因，在于其高度的灵活性。

图 2: 引力模型的有效性



来源：作者。摘自第 4 节的分析。

3. 引力方程具有高度的灵活性。

引力模型已被广泛用于分析双边贸易流量并量化各类决定因素的影响，相关学术论文已达数百篇。同时，该模型也是贸易政策分析中的核心工具。方框 3 列举了诸多“传统”与“新颖”的贸易流量决定因素（仍非全部）。可以说，任何有关贸易流量决定因素的研究，或有关贸易流量如何影响其他经济结果的评估，都离不开某种形式的引

力模型。

方框 3. 引力方程的应用

“传统”的贸易决定因素：双边距离、是否接壤、国内生产总值 (GDP)、人口规模、发展水平、优惠贸易协定、关税水平、关税战、出口补贴、地理条件、非关税措施、世界贸易组织 (WTO) 成员身份、关税同盟、欧洲联盟 (EU)、共同货币与货币同盟、经济合作与发展组织 (OECD) 成员身份、国际货币基金组织 (IMF) 成员身份、外国直接投资 (FDI)、移民、文化纽带、殖民关系，以及共同或相同语言等。

“新颖”的贸易决定因素：制度质量、对外援助、社会信任、群体声誉与产品声誉、汇率波动、新冠疫情、英国脱欧 (Brexit)、出口促进政策、专利、技术性贸易壁垒、动植物检疫标准、企业所得税与增值税、大型国际体育赛事 (如奥运会与世界杯)、禁运与制裁 (如针对俄罗斯的措施)、冲突与战争、海盗活动、极地冰盖消融、苏伊士运河关闭事件，以及特朗普政府的关税战等。

关于上述大多数应用的具体参考文献，请参见 Yotov (2024)。

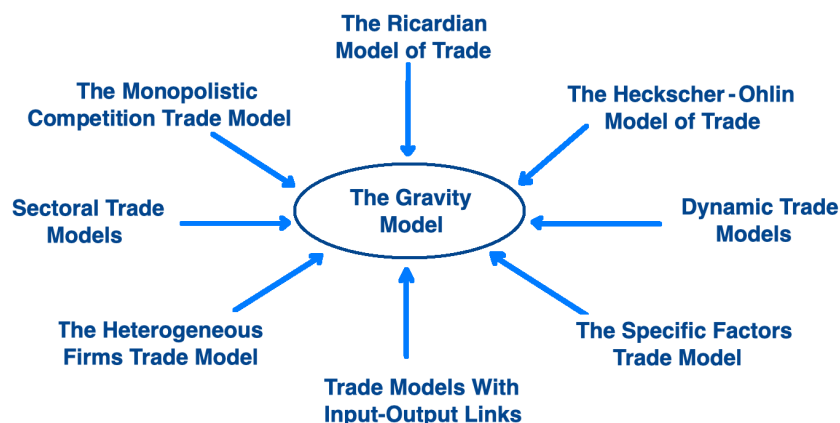
除了能够涵盖多种贸易决定因素，引力模型还具有四大灵活性。首先，该模型可应用于不同层级的数据，无论是产品、行业、部门，还是总体层面。其次，尽管在非贸易领域的理论基础相对薄弱，引力模型仍被广泛且成功地用于分析其他类型的双边流动，包括外国直接投资 (FDI)、国际移民与跨境技术转移。第三，正如后文所示，借助常用统计软件即可便捷地估计最前沿的引力模型，操作性强、易于实施。最后，该模型可被灵活嵌入更广泛的分析框架，例如实物资本投资、环境经济学与劳动力市场模型等。

引力模型之所以获得广泛应用，第四个原因在于其能够基于坚实的微观经济学理论严格推导而出。

4. 引力方程具有坚实（且多样化）的理论基础。

贸易引力方程的一个显著特征在于，在相对标准化的假设下，它能够从多种不同的微观经济理论框架中严格推导出来。如图 3 所示，引力方程既可以源于本科教材中常见的经典贸易理论，例如李嘉图 (Ricardian) 模型、赫克歇尔—俄林 (Heckscher-Ohlin) 模型、垄断竞争模型与特定要素模型；也可以来自更复杂的理论体系，如行业层面的贸易模型、动态贸易模型、包含投入产出关系的模型，以及考虑企业异质性的贸易模型。

图 3: 贸易引力模型的一些理论基础



来源：作者。改编自 Yotov et al. (2016)。

学界经过长期探索才逐渐认识到，众多差异显著的贸易理论竟可以推导出同一个简洁直观的引力方程（见方框 4）。然而，回过头看，这一结果实则并不出人意料：贸易的根本动力可归结为三个方面——出口国的供给能力、进口国的需求规模，以及双边之间的交易成本。这一逻辑同样适用于其他社会经济领域的双边互动关系。因此，第 3 节与第 4 节所介绍的实证方法与实践分析，不仅可用于研究贸易问题，也完全适用于外国直接投资 (FDI)、国际移民、跨境技术扩散等相关研究主题。

引力模型的理论基础对其实证研究具有重要意义。首先，更严格地遵循理论有助于提升引力模型的整体预测能力，并更准确地估计贸易政策的影响。其次，引入理论中的关键特征使得研究者能够应对贸易文献中一些长期存在的难题，例如：为何距离对贸易的影响并未随时间推移而显著减弱，以及为何早期引力模型难以合理解释双边贸易不平衡等现象。再次，引力理论为推动一系列核心方法论的发展提供了重要支持，其中最具代表性的是对多边贸易成本的系统考量——我们将在下一节详细讨论这一问题。最后，引力理论为进一步分析贸易如何影响其他经济结果提供了可能，包括劳动力市场效应、环境影响、实物资本投资和经济增长等方面。

需要指出的是，与许多重大发现类似，引力模型并非自提出之初便立即成为主流。正如方框 4 所总结的那样，它经历了长期的演变与完善，才逐渐获得国际贸易学界的广泛认可，并最终确立其作为国际经贸研究的“主力模型”。

方框 4. 引力模型的故事

到 2025 年，引力模型无疑已成为国际贸易研究中的主流分析框架。然而，它的“成名”之路并非一帆风顺。最初，引力方程在经济学中的应用缺乏坚实的理论支撑，主要基于与物理学公式的类比。学界通常将 Tinbergen (1962) 视为在经济学中引入引力方程的先驱（这一判断基本成立，但严格来说仅限于国际贸易领域）。作为 1969 年诺贝尔经济学奖得主，Tinbergen（可以说）是第一个将引力模型用于国际贸易流量分析的学者。然而，早在他之前，Ravenstein (1885) 就已将类似思路应用于人口迁移研究。此后，在 20 世纪 60 至 70 年代，Tinbergen 的一些学生继续推动相关研究，但受限于理论基础的缺乏，当时大多数经济学家并未将引力模型视作一种理论上严谨的国际贸易分析工具。

尽管对于谁是最早将引力引入经济学的首倡者这一问题仍存争议，但贸易领域的学者普遍为，如今我们所熟悉的贸易引力方程，其系统化的理论基础最早源于 Anderson (1979)。值得注意的是，在经历若干细微改进之后，Anderson (1979) 的模型与现代所有实证引力分析在本质上几乎完全一致。

虽然引力模型兼具经济直观性、良好的实证表现与逐渐稳固的理论基础，但在 20 世纪 80 甚至 90 年代，它仍未被主流贸易经济学家普遍接纳。作为国际贸易学界的学术“指南针”，《国际经济学手册》(Handbook of International Economics) 所收录的权威综述文章曾对该模型持怀疑态度，质疑其理论渊源，并认为它难以对国际贸易学科产生深远影响。Anderson (2011) 在回顾这一段历史时，将引力模型在当时的学术处境形象地称为“思想上的孤儿”。

直至 21 世纪初，贸易经济学界对引力模型仍未予充分重视。在当时，该模型主要被看作一种实用的政策分析工具，而非具有坚实理论基础的学术框架。然而，在 2000 年初，一系列关键突破开启了所谓“结构引力模型”的黄金十年 (2002—2012)。首先，也是最为重要的，是 Eaton and Kortum (2002) 与 Anderson and van Wincoop (2003) 做出的开创性工作，这些研究为引力模型奠定了无可争议的微观理论基础。其次，Frankel and Romer (1999) 与 Rose (2000) 等知名经济学家的实证研究，打破了“引力模型不适合做经济理论上严谨的实证研究”的偏见，使其作为受尊重的实证方法重新获得关注。最后，在此时期，随着大规模、高质量贸易数据库不断涌现，以及更加先进的计量方法与计算技术取得重要进展 (Baldwin and Taglioni, 2006)，引力模型的发展得到进一步推动。

在黄金十年 (2002—2012) 间，引力模型确立了其作为国际贸易研究“主力模型”的稳固地位，被数以百计的研究所采用，涵盖应用研究、理论拓展、估计方法改进及新数据集构建等多个方面。该时期多数相关研究聚焦于实证应用，旨在评估各类政策和双边贸易决定因素的作用（如自由贸易协定 (FTA)、世界贸易组织 (WTO) 成员资格、地理距离和殖民历史等）。尽管部分研究仍以较为直观的方式使用该模型，但随着理论一致性的不断增强，学者们得以更深入的理解贸易流量增长的驱动因素，并获得更合理、更可靠、解释力更强的引力估计结果。

此外，“黄金十年”间，引力模型在理论领域也取得了重要进展，

学者们提出了包括行业层面的引力框架、异质性企业模型下的引力方程以及动态引力模型在内的多种理论模型。引力理论与应用研究的热潮，在很大程度上得益于计算能力的大幅提升，并与一系列方法论创新相辅相成。例如引入出口国、进口国以及国家间配对固定效应（将在下一节详细讨论），以及 Santos Silva and Tenreiro (2006) 所提出的泊松伪极大似然 (PPML) 估计方法（该方法此后被广泛视为最优的引力估计工具）。

在一篇具有里程碑意义的论文中，Arkolakis et al. (2012) 通过展示不同微观理论基础如何收敛到完全相同的引力方程，进一步巩固了结构引力模型在贸易研究中的主导地位。随着大量新应用与理论进展的持续涌现，引力模型成功扭转了以往被低估的学术地位，并在 2014 年版《国际经济学手册》中获得高度关注——与之形成鲜明对比的是，同一系列手册在 20 世纪 80 至 90 年代曾对其评价颇低。此后，引力模型还被纳入 2018 年出版的《国际贸易与交通手册》(Handbook of International Trade and Transportation) 及多部聚焦于贸易政策分析与全球化影响的学术著作之中。

实证引力方程至今仍是学术研究中的首选工具。研究者持续运用更新、更优化、更完善的方法重新评估已有结论、衡量贸易成本、并量化各类贸易决定因素的影响，例如货币同盟、海盗活动、共同语言、汇率与经济制裁等。随着数据质量不断提高（体现于国家、行业与时间维度上的改进），学者得以更系统地识别多种贸易政策——如区域贸易协定 (RTA)、货币同盟与制裁——所产生的异质性效应。进一步研究还表明，引力模型不仅适用于服务业、采矿和农业等不同部门的贸易分析，也能在不同层级（从产品层到总体层）的贸易研究中保持良好表现。基于此，可以明确的是，不同形式的引力模型已近乎成为研究贸易流量决定因素必不可少的工具。此外，结合贸易文献的最新进展，学者与政策制定者还将引力模型扩展至其他类型的双边流动研究，如移民、外国直接投资 (FDI) 与跨境专利等。

该时期同样也涌现出多项估计方法、数据与理论方面的重要突破。在估计方法上，学界普遍确认 PPML 估计方法与引力理论高度契合，使得研究者能够直接利用常用统计软件开展全面的贸易政策分析，而无需依赖复杂的自定义编程；理论方面则不断推陈出新，例如纳入投入—产出关联的引力模型、以及包含双边动态的引力模型等。这些理论进展，结合模型一贯良好的实证表现与新近发展的计量与计算工具，共同推动了一系列研究，将贸易与更广泛的经济结果——如技术扩散、就业与失业动态、碳排放等——联系起来。与此同时，新一代的数据库涵盖了多层级的引力变量及国际与国内贸易流量，为理论创新和新的应用场景提供了坚实支撑。

引力模型的广泛影响力与成功在 2025 年得到充分体现：当时，美国总统特朗普频繁调整关税政策（例如对加拿大钢铁关税在 3 月 9 日上午宣布实施，当日下午又突然取消）。引力模型方法的成熟，使得学界具备了实时全面分析贸易政策影响的能力，既能评估局部均衡效应，也能考察一般均衡效应。

以上对引力模型演变的总结改编自 Yotov (2024)，更深入的讨论与参考文献请见该文。

2. 更有“分量”(Gravitas)的引力: 结构引力模型

本节旨在实现三个学习目标: 其一, 介绍贸易理论与结构贸易引力模型的核心思想; 其二, 比较朴素引力方程与结构引力方程的差异, 强调二者在理论层面的关键区别; 其三, 总结若干重要启示, 帮助研究者在建模贸易流量及估计实证引力方程时, 更好地保持实证与理论的一致性。

2.1. 条条大路通向……结构引力

如前所述, 贸易引力模型的一个突出优势在于其高度的普适概括性: 同一形式的引力方程能够以多种不同的微观经济学理论为基础推导而出, 其中一些仍是当前本科国际贸易教材的核心内容(见图3)。遵循理论引力文献的发展脉络, 本节将分两部分介绍现代结构引力模型。首先, 与经典贸易理论保持一致, 我们给出基于截面数据的结构引力方程:¹

$$X_{ij} = \frac{Y_i E_j}{Y} \left(\frac{t_{ij}}{T_j T_i} \right)^{-\theta} \quad (2)$$

以下三方面的理论基础使得结构引力方程(式(2))有别于前文的朴素引力方程(式(1))。第一, 引力常数 \tilde{G} 背后的结构项是世界总产出 Y 。其含义在于, 双边贸易流量与两国经济规模之积占世界总产出的比重成正比。

第二, 针对理论引力方程对规模度量指标进行了明确区分: 以 Y_i 表示出口方的产出规模, 以 E_j 表示进口方的支出规模。直观上讲, 出口国的规模应反映其生产能力, 而进口国的规模则应体现其消费能力。这种区分在细分层面中尤为重要。例如, 由于国际分工与专业化的存在, 某些行业可能出现显著的贸易不平衡现象(即某行业出口与进口之间的差额过大)。

第三, 式(1)中的贸易成本项(T_{ij})在式(2)中被分解为三个结构性组成部分。具体而言, t_{ij} 表示直接影响两国贸易流量的双边摩擦, 例如地理距离、关税、区域贸易协定、制裁等; T_i 与 T_j 分别表示出口方与进口方的多边贸易成本。它们体现出这样一个事实: 两国之间的贸易不仅取决于各自的经济规模和直接的双边摩擦, 还取决于它们与世界其他国家进行贸易的相对成本, 因此被称为“多边”贸易成本。

为了更清晰地说明多边贸易成本的作用, 图4提出了一个假设情境: 将美国与加拿大置于火星环境中。尽管两国的经济规模(Y_i 与 E_j)及直接的双边摩擦(t_{ij} , 如距离)均保持不变, 但它们在火星上的贸易量将远超于在地球上的水平, 原因在于, 火星环境中两国与其他国家之间的隔离程度显著提高。这一例子表明, 美加之间的贸易流量不仅取决于它们之间的直接贸易成本, 也受到它们与所有其他国家贸易成本的共同影响。这正是结构引力模型与朴素引力模型的一个根本区别: 后者错误地假定只有直接双边贸易成本会影响贸易流量, 而前者则明确纳入了多边贸易成本的作用。

最后, 在贸易理论的指导下, 对引力模型进行两项扩展, 即可得到当代的结构性引力模型:

$$X_{ij,t}^k = \frac{Y_{i,t}^k E_{j,t}^k}{Y_t^k} \left(\frac{t_{ij,t}^k}{T_{j,t}^k T_{i,t}^k} \right)^{-\theta^k}, \quad \forall i, j, t, k. \quad (3)$$

来源: 作者。灵感来自 Krugman (1995)。



首先, 引力模型可以在任意层级上推导, 包括产品、行业、门类以及总体层面。这一点体现在式(3)中的上标 k , 它可以表示某一具体的产品、行业或门类。其次, 下标 t 的引入反映出一个事实: 与贸易流量类似, 式(3)中的规模变量和贸易成本项均随时间而变化。时间下标也得到了动态贸易理论的支持, 这类理论表明, 贸易与贸易自由化可能导致生产要素的积累, 例如实物资本(如位于美墨边境的“Maquiladoras”制造工厂)。需要注意的是, 如果去掉上标 k 与下标 t , 式(3)与式(2)完全一致。最后, 所有贸易引力理论均表明, 引力方程既适用于国际贸易($i \neq j$), 也适用于国内贸易($i = j$)。

¹该方程与 Eaton and Kortum (2002) 和 Anderson and van Wincoop (2003) 的开创性贡献保持一致。更多采用相同符号体系的替代理论推导, 请参见 Yotov et al. (2016)。

2.2. 贸易理论对引力模型应用与估计的启示

引力方程的理论基础不仅深刻影响了引力模型在实证研究中的广泛应用，也为构建正确的实证模型提供了关键依据。下文将逐一阐述这些理论启示。

多边贸易成本。多边贸易成本在估计贸易政策效应时具有两个关键含义。其一，若实证模型未能妥善控制多边贸易成本，则对于在全球范围内更为孤立的国家，引力模型往往低估其贸易流量；而对于拥有大量贸易伙伴的国家（如欧洲国家），则可能高估其贸易流量。其二，多边贸易成本反映了贸易转移的难易程度，这对准确评估现实政策效果具有重要意义。例如，西方因俄罗斯入侵乌克兰而对其施加的制裁效果有限，关键原因之一就在于俄罗斯能够将贸易转向未参与制裁的国家（如中国、印度和土耳其）。类似的逻辑也体现在 2025 年美国对加拿大加征关税的影响中：由于加拿大在地理和经济层面相对孤立，此次关税对其造成的冲击尤为显著。

细分层级的引力模型。理论表明，引力方程适用于不同层级的数据——从高度细化的单一产品层级直至加总的整体贸易层级。这一特性赋予实证引力模型高度的灵活性，研究者可根据具体问题聚焦于特定产品、行业或部门，也可在更广维度上分析商品与服务贸易。部门或行业层级的分析尤其重要，原因在于贸易成本（如运输费用）在不同部门间差异显著，且多数贸易政策（如关税）均在细分层面实施。即便是覆盖整体经济的政策（如全面贸易禁运），其产生的影响也因产品或行业而异。因此，引力理论为开展细分层级的分析提供了明确支持。

随时间变化的引力模型。引力方程的时间维度亦具有若干重要实证含义。首先，数据中加入更多年份可以提升估计的精确性。其次，正如下节所示，利用面板数据（即随时间变化的数据）能够灵活而全面地控制所有不随时间变化的双边贸易成本（如距离）。再次，面板数据使得研究者能够识别贸易成本与政策效应的动态演变。例如，区域贸易协定（RTA）的影响通常并非立即显现，因此，考察其在实施后不同阶段对贸易的动态效应具有重要的政策价值。此外，形成于 1990 年代的 RTA 与近年来新签订的 RTA，无论在作用机制还是实际效果上都可能存在明显区别，而这种差异只有通过分析不同时间维度上的数据才能得以识别。

产出与支出。引力理论强调对产出与支出加以区分，这一做法具有多方面的实证意义。首先，如果贸易成本是对称的（例如两国之间的距离），而模型未考虑国家间产出与支出的差异，则可能因始终预测出对称的双边贸易流量而导致模型表现欠佳。其次，在行业或产品等更细分的层级上区分产出与支出尤为重要，因为国家在这些层级上的生产与消费往往存在更明显的差异。第三，即使在使用国家层面贸易数据时，GDP 也并非经济规模的最佳代理变量。这不仅是因为理论要求考虑贸易失衡，也是由于 GDP 按增加值核算，而贸易流量以总额统计，两者在统计口径上并不一致。然而，幸运的是，正如下节所示，实证引力模型可采用简便的计量方法控制国家规模，从而有效避免测量困难或额外数据需求带来的问题。

国内贸易。贸易理论表明，引力关系不仅适用于国际贸易，也同样存在于一国之内的国内销售。利用国内贸易数据进行引力估计具有重要价值：例如，它有助于识别贸易协定对非成员国可能产生的贸易转移效应、制裁的域外影响，以及非歧视性贸易政策的实际效果。然而，受数据限制，目前大多数引力估计仍仅基于国际贸易数据，针对国内贸易流量的系统性引力分析尚未成为常规做法。因此，与本领域多数现有文献保持一致，本教学材料也将主要聚焦于国际贸易流量。

3. 从朴素引力估计到现代引力估计

引力模型之所以得到广泛应用，主要源于其出色的预测性能与应对多样化研究问题时的灵活性。本节旨将朴素的实证引力方程过渡到现代计量引力模型，估计并分析多种贸易决定因素的影响。分析过程仅需基础的计量经济学知识（例如普通最小二乘法（OLS）与固定效应模型），因此对于具备计量经济学基础的本科生而言是完全可行的。此外，本节内容同样适用于计划深入研修计量经济学或参与经济学论文专题研讨，以及准备撰写本科论文或开展独立研究项目的学生。

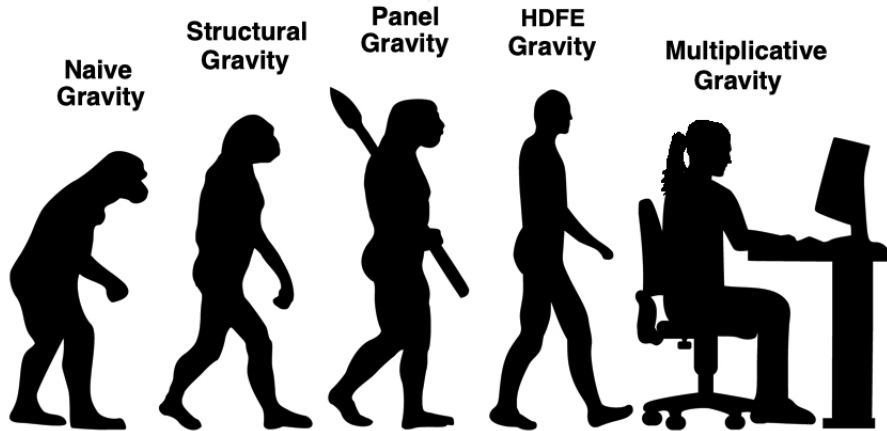
基于前文的理论基础与已有知识积累，我们将通过五个步骤逐步引入计量引力模型的设定。这五个步骤对应了引力方程估计方法的历史演进（见图 5）。²

朴素引力模型。延续上一节从朴素引力方程到结构引力模型的思路，本节首先给出一个朴素的引力估计方程。具体而言，可分三步完成。第一，对式 (1) 进行对数线性化，得到：

$$\ln(X_{ij}) = \ln(\tilde{G}) - \theta \ln(T_{ij}) + \ln(Y_i) + \ln(Y_j). \quad (4)$$

²关于引力估计的更为详尽的理论讨论与方法论建议，可参见 Larch et al. (2025)。

图 5: 引力模型估计的发展演进



来源: 作者。

第二, 为式 (4) 中的自变量选择合适的代理变量。具体而言, 我们以 GDP 衡量出口国的规模 (GDP_i) 与进口国的规模 (GDP_j), 并使用双边距离 ($DIST_{ij}$) 与区域贸易协定 (RTA_{ij}) 来代表双边贸易成本。在引力模型研究中, 距离与区域贸易协定是最常用的两类贸易成本代理变量。³ 选择这两者作为代表性变量, 在教学上也具有明显意义: 距离是连续变量, 而区域贸易协定则为二元虚拟变量, 其取值仅为 0 或 1。具体来说, 如果两个国家在特定年份签订并执行了区域贸易协定, 则 RTA 取值为 1; 否则为 0。

第三, 我们引入一个常数项 (β_0), 对应于引力常数 (\tilde{G}), 并加入一个误差项 (ϵ_{ij}), 由此得到第一个计量引力模型的设定:

$$\ln(TRADE_{ij}) = \beta_0 + \beta_1 RTA_{ij} + \beta_2 \ln(DIST_{ij}) + \beta_3 \ln(GDP_i) + \beta_4 \ln(GDP_j) + \epsilon_{ij}. \quad (5)$$

式 (5) 是计量引力模型中最常见的设定, 可以通过普通最小二乘法 (OLS) 进行估计。其系数的解释如下: 对于连续变量 (如距离与 GDP), 估计系数具有弹性含义。例如, 若距离的估计系数为 $\hat{\beta}_2 = -0.8$, 则意味着在其他条件保持不变时, 两国之间的距离增加 1% 将导致双边贸易量下降 0.8%。对于指示变量 (如 RTA), 其影响的解释需通过以下公式获得: $[\exp(\beta_1) - 1] \times 100$ 。例如, 若 RTA 的估计系数为 $\hat{\beta}_1 = 0.5$, 则表明在研究期内生效的 RTA 使成员国之间的贸易量增加了约 65% ($[\exp(0.5) - 1] \times 100 = 64.87$), 在其他条件保持不变的情况下。

结构引力模型。接下来, 我们将依据方程 (2) 的理论含义对计量模型设定进行改进, 重点解决两个关键问题: 一是区分出口国的产出与进口国的支出, 二是有效控制多边贸易成本。虽然原则上可以尝试直接利用可观测数据处理这些问题, 但一种更为简便、全面且符合理论的方法则是引入出口国与进口国的固定效应, 其形式如下:

$$\ln(TRADE_{ij}) = \beta_0 + \beta_1 RTA_{ij} + \beta_2 \ln(DIST_{ij}) + \pi_i + \psi_j + \epsilon_{ij}. \quad (6)$$

其中, π_i 表示一组出口国固定效应, 即每个出口国对应的虚拟变量; ψ_j 表示一组进口国固定效应, 即每个进口国对应的虚拟变量。例如, 若样本中包含 100 个国家, 且每个国家同时担任出口和进口角色, 则模型中将包含 100 个出口国固定效应和 100 个进口国固定效应。⁴ 固定效应的主要优势在于: (i) 能够全面控制出口国与进口国所有可观测和不可观测的特征 (包括经济规模与多边贸易成本), 从而有效避免遗漏变量偏误, 同时省去收集其他变量数据的额外工作; (ii) 在常见统计软件中易于构建和实现。其局限在于, 引入固定效应后, 无法识别不随时间变化的出口国或进口国特定变量的独立影响, 因为这些变量会与固定效应完全共线性而被吸收。不过, 这并不影响核心研究目标, 即估计双边贸易成本与政策变量 (如距离与 RTA) 的影响。

面板引力模型。下一步的改进操作比较直观, 即在计量模型中引入时间维度。这意味着误差项与所有变量 (除了不随时间变化的距离) 都将附带时间下标:

$$\ln(TRADE_{ij,t}) = \beta_0 + \beta_1 RTA_{ij,t} + \beta_2 \ln(DIST_{ij}) + \pi_{i,t} + \psi_{j,t} + \epsilon_{ij,t}. \quad (7)$$

³在末尾的练习题中, 我们还将引入其他贸易成本代理变量与政策变量。

⁴出口国与进口国各有一个固定效应会因完全共线性而被去掉, 但这不会影响我们关注的核心自变量估计结果。

正如上一节所述，在计量分析中引入时间维度不仅与贸易理论相符，还能通过利用更多数据提高模型的估计精度。此外，时间维度的引入使得研究者能够分析区域贸易协定 (RTA) 在实施前后的动态效果，并比较不同时期签订的 RTA 协定—例如早期（如 1990 年代）与近期（如 2000 年代）签订的 RTA—在影响上的差异。

高维固定效应 (HDFE) 引力模型。在面板数据的基础上，可进一步引入国家对 (country-pair) 固定效应 (γ_{ij})，来构建“高维固定效应引力模型” (HDFE)。国家对固定效应的定义方式为：对于数据中存在的每一对国家，其对应虚拟变量取值为 1，否则为 0。其计量方程可表述为：

$$\ln(\text{TRADE}_{ij,t}) = \beta_0 + \beta_1 \text{RTA}_{ij,t} + \gamma_{ij} + \pi_{i,t} + \psi_{j,t} + \epsilon_{ij,t}. \quad (8)$$

与出口国和进口国固定效应类似，国家对固定效应能够完全控制所有不随时间变化的双边贸易成本，例如地理距离、接壤边界等。然而，其代价是无法识别这些不随时间变化的双边变量的影响。因此，式 (8) 中不再包含变量 $\ln(\text{DIST}_{ij})$ ，因为该不随时间变化的因素已被国家对固定效应完全吸收。尽管如此，若研究目标是估计诸如关税、区域贸易协定、经济制裁等随时间变化的政策变量的影响，则仍建议在引力模型估计中引入国家对固定效应。这样做不仅能有效缓解遗漏变量问题，还可减少对额外数据收集的需求，并显著提升模型的解释与预测能力。下一节的实操部分将对此方法作进一步验证。

乘法形式的引力模型。最后一步是实现最优计量设定的关键，旨在解决对数线性化引力模型存在的一个固有缺陷：对数变换会自动排除所有贸易流量为零的观测值（因为零的对数无定义）。一种常用的改进方法是对方程两边取指数，将其转化为以下乘法形式的计量模型：

$$\text{TRADE}_{ij,t} = \exp[\beta_0 + \beta_1 \text{RTA}_{ij,t} + \gamma_{ij} + \pi_{i,t} + \psi_{j,t}] \times \epsilon_{ij,t}. \quad (9)$$

乘法形式的计量模型还具有两个额外优势，使其在应用中更具吸引力。第一，正如下节将展示的，乘法引力模型可以借助常用统计软件中的高效内置命令，快速而稳健地完成估计。第二，其引力系数的解释方式与对数线性 OLS 一致。

式 (9) 则代表了当代计量引力模型的最常见形式，学术研究者 and 政策分析人员均以此为基础来估计各类政策对贸易流量的影响。基于式 (9)，方框 5 对引力理论与其实证实现之间的对应关系进行了总结。

方框 5. 理论与实证的对应关系

理论含义	对应的实证方法
区分并控制产出与支出	引入出口国（含时间）与进口国（含时间）固定效应
控制多边贸易成本	引入出口国（含时间）与进口国（含时间）固定效应
处理不随时间变化的双边贸易成本	使用国家对固定效应或相应的不变双边变量
处理随时间变化的双边贸易成本	使用随时间变化（面板）数据及政策变量
处理零贸易流量	使用乘法形式的 PPML 估计方法

在进一步讨论之前，有必要再次强调：贸易理论表明，引力方程适用于不同层级的数据汇总。因此，式 (9) 可在产品、行业、部门乃至国家总体层面进行估计。更重要的是，该式在常见统计软件中均可便捷地实现估计。下一节将用一个简洁而前沿的实例对此进行展示。

4. 引力模型的实证操作：距离、RTA 与欧盟的影响

本节将提供一个实际的实证分析案例，依次估计上一节中介绍的各类引力方程。与之前模型不同的是，除了考察距离和区域贸易协定 (RTA) 的影响之外，我们还将单独识别欧盟 (EU) 的作用。为此，在模型中引入一个新的指示变量 $EU_{ij,t}$ ：若国家 i 与国家 j 在年份 t 同为欧盟成员国，则该变量取值为 1，否则为 0。此时，RTA 变量涵盖除欧盟之外的所有其他贸易协定，EU 变量被单独予以区分。这样设置主要基于以下四方面原因：第一，欧盟成员资格对贸易的影响是学术界与政策界长期以来关注的核心议题；第二，预计欧盟对贸易的作用不同于且强于一般的区

域贸易协定；第三，该设定为如何区分不同贸易协定的异质性效应提供了示例⁵；第四，从方法论角度看，欧盟作为高度一体化的国家集群，符合前文理论部分的讨论背景，在估计其影响时，多边贸易成本很可能起到重要作用。

本节的实证分析将使用 **Stata** 完成，文中将附有相应的代码及其说明与结果解读。整合所有命令的“do”文件及相关数据可从 https://yotoyotov.com/Gravity_Undergrads.html 获取。需要说明的是，本节所涉及的估计命令同样也可在其他统计软件（包括开源免费软件）中轻松实现，因此完全适合高年级本科生操作。为进一步提升可及性，该网站同时提供了基于 R 语言的数据与代码。

引力数据。为编写本教学资料，我专门整理了“本科生引力数据库”（GU），其中汇集了截至 2025 年 3 月可获取的最新贸易、政策及引力数据，既适用于学术研究，也支持政策分析。本节及练习题部分所涉及的实证分析以及其他严谨的政策评估与研究项目，均可基于该数据库开展。具体而言，GU 数据库选取了全球前 100 大出口国，覆盖其总体贸易流量及相关引力变量，这些国家合计占全球出口的 98.9%、进口的 97.7% 和 GDP 的 98.3%，时间跨度为 1990 年至 2023 年。下表汇总了本节分析所使用的主要变量，包括简要说明及数据来源，更多变量将在练习题部分进一步介绍。

Exporter	出口国 i 的 ISO 国家代码。标识变量。
Importer	进口国 j 的 ISO 国家代码。标识变量。
Year	年份 t ，范围为 1990 – 2023 年。标识变量。
Trade	年份 t 中国家 i 与 j 之间的双边贸易总额，以当期美元计。 数据来源：UN COMTRADE 数据库， https://comtradeplus.un.org/ 。
Distance	i 与 j 之间按人口加权计算的地理距离（公里）。 数据来源：USITC DGD 数据库， https://www.usitc.gov/data/gravity/dgd.htm 。
RTA	区域贸易协定 (RTA) 的虚拟变量：若在年份 t ， i 与 j 之间存在 RTA，则取 1，否则为 0。 数据来源：Mario Larch 数据库， https://www.ewf.uni-bayreuth.de/en/research/RTA-data/ 。
EU	欧盟 (EU) 虚拟变量：若在年份 t ， i 与 j 同时为欧盟成员，则取 1，否则为 0。 数据来源：作者。基于欧盟委员会的数据。
GDP_Exporter	出口国 i 在年份 t 的 GDP（当期美元）。 数据来源：世界银行 WDI 数据库， https://datacatalog.worldbank.org/home 。
GDP_Importer	进口国 j 在年份 t 的 GDP（当期美元）。 数据来源：世界银行 WDI 数据库， https://datacatalog.worldbank.org/home 。

图 6 展示了 GU 数据库的一部分，涵盖三个国家（加拿大、墨西哥和美国）及三个年份（1993 – 1995）。数据表明，这三国之间的贸易规模庞大、存在明显的不对称性，且随时间而变化。根据模型设定，每一对国家之间的距离是对称的。RTA 变量在所有年份的加美贸易中均取值为 1，这是由于 1989 年生效的加美贸易协定；而在美墨与加墨之间，RTA 变量自 1994 年起由 0 变为 1，对应于北美自由贸易协定 (NAFTA) 的实施。EU 变量在此样本中始终为 0，因为上述国家均非欧盟成员。GDP 变量则反映了各国经济规模的差异。最后，尽管在实证操作中读者无需自行构造固定效应，图 6 仍提供了四个示例：‘CAN_exp_1993’ 表示 1993 年加拿大的出口国固定效应；‘USA_imp_1995’ 表示 1995 年美国的进口国固定效应；‘CAN_MEX’ 表示加拿大对墨西哥出口的国家对固定效应；‘MEX_CAN’ 表示墨西哥对加拿大出口的国家对固定效应。

图 6 所示的数据片段包含 18 个观测值。这是因为涉及 3 个国家，每年每个国家都与其他两个国家存在进出口关系，即 $(3 \text{ 国家}) \times (2 \text{ 贸易伙伴}) \times (3 \text{ 年份}) = 18$ 。若所有国家在所有年份的数据完整，GU 数据库应包含 $100 \times 99 \times 34 = 336,600$ 个观测值。然而，GU 数据库并非一个完全平衡的面板。例如，部分国家在苏联解体后才作为独立国家存在，其贸易与 GDP 数据仅在后期才可获得。因此，GU 数据库实际包含的观测值数量为 320,920。

在进入计量分析之前，我们需要对部分变量（即贸易、距离与 GDP）进行对数转换。这可以通过以下简洁的 Stata 命令实现：

```
generate ln_trade=ln(Trade)
generate ln_dist=ln(Distance)
generate ln_gdp_exp=ln(GDP_Exporter)
generate ln_gdp_imp=ln(GDP_Importer)
```

⁵资料末尾的练习题中将提供更多类似示例。

图 6: 引力数据的结构

	Exporter	Importer	Year	Trade	Distance	RTA	EU	GDP_Exporter	GDP_Importer	CAN_exp_1993	USA_imp_1995	CAN_MEX	MEX_CAN
1	CAN	MEX	1993	9.882e+08	3472.085	0	0	5.791e+11	5.302e+11	1	0	1	0
2	CAN	MEX	1994	1.620e+09	3472.085	1	0	5.799e+11	5.536e+11	0	0	1	0
3	CAN	MEX	1995	1.374e+09	3472.085	1	0	6.060e+11	3.802e+11	0	0	1	0
4	CAN	USA	1993	1.136e+11	2134.945	1	0	5.791e+11	6.859e+12	1	0	0	0
5	CAN	USA	1994	1.319e+11	2134.945	1	0	5.799e+11	7.287e+12	0	0	0	0
6	CAN	USA	1995	1.483e+11	2134.945	1	0	6.060e+11	7.640e+12	0	1	0	0
7	MEX	CAN	1993	2.785e+09	3472.085	0	0	5.302e+11	5.791e+11	0	0	0	1
8	MEX	CAN	1994	3.274e+09	3472.085	1	0	5.536e+11	5.799e+11	0	0	0	1
9	MEX	CAN	1995	3.901e+09	3472.085	1	0	3.802e+11	6.060e+11	0	0	0	1
10	MEX	USA	1993	4.072e+10	2492.907	0	0	5.302e+11	6.859e+12	0	0	0	0
11	MEX	USA	1994	5.033e+10	2492.907	1	0	5.536e+11	7.287e+12	0	0	0	0
12	MEX	USA	1995	6.275e+10	2492.907	1	0	3.802e+11	7.640e+12	0	1	0	0
13	USA	CAN	1993	8.804e+10	2134.945	1	0	6.859e+12	5.791e+11	0	0	0	0
14	USA	CAN	1994	1.002e+11	2134.945	1	0	7.287e+12	5.799e+11	0	0	0	0
15	USA	CAN	1995	1.098e+11	2134.945	1	0	7.640e+12	6.060e+11	0	0	0	0
16	USA	MEX	1993	4.832e+10	2492.907	0	0	6.859e+12	5.302e+11	0	0	0	0
17	USA	MEX	1994	5.481e+10	2492.907	1	0	7.287e+12	5.536e+11	0	0	0	0
18	USA	MEX	1995	5.397e+10	2492.907	1	0	7.640e+12	3.802e+11	0	0	0	0

来源：“本科生引力数据库”。

估计朴素引力模型。下列 Stata 命令基于普通最小二乘法 (OLS) 对最传统（但“朴素”）的引力方程进行估计，其设定对应于方程 (5)：

```
regress ln_trade ln_dist RTA EU ln_gdp_exp ln_gdp_imp if Year==2023
```

此估计命令的组成部分包括：‘regress’ — Stata 中用于执行 OLS 的命令；‘ln_trade’ — 被解释变量；‘ln_dist’、‘RTA’、‘EU’、‘ln_gdp_exp’ 与 ‘ln_gdp_imp’ — 自变量。最后，‘if year==2023’ 子句确保估计仅针对单一年份（2023 年）执行；该年份可更改为数据中所涵盖的其他年份，即 1990 年至 2023 年的任意一年。

表 1 第 (1) 列报告了该设定下的引力模型估计结果。总体而言，估计结果与预期相一致，主要有以下五点值得注意。第一，距离对贸易的估计值显著为负，系数估计结果显示，距离每增加 1%，双边贸易量平均下降约 1.179%；第二，区域贸易协定 (RTA) 和欧盟 (EU) 变量的估计系数均显著为正。具体而言，系数结果表明，在其他条件不变的前提下，RTA 使成员国间贸易量增长约 94%（计算方式为 $[\exp(0.664) - 1] \times 100 = 94.25$ ）；第三，与预期一致，欧盟作为更深层次的一体化安排，对成员国贸易的促进效应明显高于一般 RTA（读者可参照上述方法自行计算 EU 带来的额外贸易效应）；第四，进口国与出口国的 GDP 均对贸易流量有显著正向影响，再次验证经济规模与贸易量之间的强正相关关系；最后，尽管只包含五个解释变量，模型的拟合优度 (R^2) 仍达到 0.64，表明朴素引力模型已具备较强的数据解释力。

估计结构引力模型。为了估计结构引力模型 (6)，我们在前述估计命令的基础上进行了两处调整：

```
reghdfe ln_trade ln_dist RTA EU if Year==2023, absorb(Exporter Importer)
```

首先，我们改用 ‘reghdfe’ 命令。⁶ 虽然仍可沿用前一设定中使用的 ‘regress’ 命令，但在此情况下更推荐使用 ‘reghdfe’，该命令能够更高效地处理大量固定效应。第二项调整是在估计命令中加入选项 ‘absorb(Exporter Importer)’，即为模型引入出口国和进口国固定效应。通过这一设定，回归模型不仅能够控制出口国（如产出）和进口国（如支出）的所有可观测与不可观测特征，还可以控制可能对双边贸易产生影响的多边贸易成本。因此，在新的估计结果（见表 1 第 (2) 列）中，不再汇报 GDP 的估计结果。⁷

⁶‘reghdfe’ 命令以及稍后将使用的另一条用于高维固定效应估计的快速命令 ‘ppmlhdfc’，分别由 Correia (2016) 与 Correia et al. (2020) 提出。

⁷一旦引入固定效应，常数项的估计值将失去其原有解释，因此被省略。

表 1: 引力模型估计方法的发展

	(1) Naive Gravity	(2) Structural Gravity	(3) Panel Gravity	(4) HDFE Gravity	(5) Multiplicative Gravity
ln_dist	-1.179 (0.032)**	-1.473 (0.034)**	-1.583 (0.006)**		
RTA	0.664 (0.049)**	0.236 (0.051)**	0.147 (0.010)**	0.103 (0.013)**	0.076 (0.012)**
EU	0.900 (0.112)**	-0.261 (0.117)*	-0.526 (0.022)**	0.427 (0.030)**	0.273 (0.024)**
ln_gdp_exp	1.352 (0.015)**				
ln_gdp_imp	1.143 (0.015)**				
Constant	-37.864 (0.600)**				
<i>N</i>	9564	9564	288085	288085	320920
<i>R</i> ²	0.643	0.759	0.772	0.897	

来源: 作者整理。括号内为标准误差。⁺ $p < 0.10$, * $p < 0.05$, ** $p < 0.01$ 。各回归设定的详细说明见正文。

表 1 第 (1) 列与第 (2) 列的估计结果存在以下四方面差异: 第一, 第 (2) 列中距离对贸易仍具有显著的负向影响, 且绝对值较之前更大。第二, 欧盟 (EU) 的效应明显减弱, 甚至转为负值; 该结果与上一节中有关多边贸易成本的理论预期一致: 在控制多边贸易成本之后, 欧盟的影响将显著下降。第三, RTA 的估计值也有所下降, 但仍显著为正。第四, 第 (2) 列的 R^2 更高, 这符合预期, 因为出口国与进口国固定效应的引入吸收了所有可观测及不可观测的贸易决定因素。

估计面板引力模型。为了获得对应方程 (7) 的面板引力估计结果, 我们在前述估计命令的基础上进行了两处调整:

```
reghdfe ln_trade ln_dist RTA EU, absorb(Exporter#Year Importer#Year)
```

首先, 我们移除了 'if year==2023' 这一条件语句, 以便充分利用数据集中所有年份的信息。其次, 我们允许模型中的固定效应随时间变化, 即分别引入出口国-年份联合固定效应 (Exporter#Year) 和进口国-年份联合固定效应 (Importer#Year)。值得强调的是, 在这一面板设定下, 固定效应的维度与理论模型 (3) 完全一致; 出口国与进口国的规模变量及多边贸易成本均被允许随时间变动。

面板数据的估计结果呈现在表 1 第 (3) 列。首先可以注意到, 正如预期那样, 本列所使用的观测值数量 (N) 显著增加。更大的样本量会带来更小的估计标准误差。距离对贸易的影响估计值与第 (2) 列的横截面结果基本一致。RTA 的估计系数虽有所下降, 但仍保持正向且在统计上显著。然而, 第 (3) 列中欧盟 (EU) 的估计效应在本列中为负值, 不仅数值较大, 而且在统计上显著。这一结果从政策角度看可能令人意外, 但从方法论角度则并不难理解, 原因在于, 当前的面板设定未能控制某些潜在重要的双边贸易成本变量。下一设定将针对这一问题进行改进。

估计 HDFE 引力模型。对面板引力模型的进一步改进是引入国家对固定效应。这可以通过在估计命令的 'absorb' 选项中轻松实现: 在出口国-年份和进口国-年份固定效应的基础上, 再加入国家对固定效应 — 'Importer#Exporter'。相应的估计命令如下:

```
reghdfe ln_trade RTA EU, absorb(Exporter#Year Importer#Year Importer#Exporter)
```

需要强调的是, 在新的估计命令中变量 'ln_dist' 已经不再出现。原因在于, 一旦引入国家对固定效应, 它们便会吸收并完全控制所有不随时间变化的双边贸易成本, 包括距离。由于大部分双边贸易成本由不随时间变化的地理因素所决定, 国家对固定效应因而成为一种极为有效的计量工具, 能够控制许多难以度量甚至无法观测的变量。这一特性使研究者能够将注意力集中于感兴趣的政策变量, 例如本例中的 EU 与 RTA, 它们同样属于双边变量, 但

具有随时间变化的特征。需要注意的是，如果研究目的在于分析不随时间变化的贸易决定因素（如距离、接壤边界、共同语言等），则国家对固定效应不可使用，因为将其引入会使这些变量的效应无法被识别。相关分析已在本资料末尾的练习题部分提供。

表 1 第 (4) 列汇报了引入国家对固定效应后的引力模型估计结果。与之前结果相比，欧盟 (EU) 效应的估计发生了明显变化：估计值转为正向显著，与理论预期一致。RTA 的估计值虽略有下降，但仍保持正向显著。如前述，这一变化反映出先前模型遗漏了某些不随时间变化的重要因素，而这些因素已由国家对固定效应有效控制。因此，若需估计诸如区域贸易协定、欧盟成员资格、关税或制裁等随时间变化的政策变量对贸易的影响，应采用包含国家对固定效应的设定。该设定还进一步提高了模型的整体拟合优度， R^2 达到 0.9。

估计乘法形式的引力模型。在最后一步中，我们以乘法形式来估计引力模型。相应的估计命令如下：

```
ppmlhdfc Trade RTA EU, absorb(Exporter#Year Importer#Year Importer#Exporter)
```

估计引力模型的乘法形式主要涉及两处改动：(i) 将 ‘reghdfe’ 命令更换为 ‘ppmlhdfc’ 命令；(ii) 将此前使用的贸易流量对数 ‘ln_trade’ 改为其水平值 ‘Trade’。使用 ‘ppmlhdfc’ 意味着我们将采用乘法形式的泊松伪极大似然 (PPML) 估计量来替代原先的 OLS 估计量。PPML 已被广泛确立为引力模型估计中的标准方法，因其在计量方面具备多个优势，其中最重要的一点是，PPML 的乘法形式天然适用于处理贸易流量中的零值观测。⁸ 值得一提的是，PPML 所估计得到的引力系数在解释方式上与 OLS 保持一致。此外，随着计算能力的显著提升，PPML 方法在大规模数据集上依然维持稳健且高效的估计性能。

表 1 第 (5) 列汇报了最后一组基于乘法形式引力模型的估计结果。结果显示，RTA 的系数为 0.076，意味着在研究期内，RTA 的生效使成员国之间的贸易量平均增长了约 8%；EU 带来的贸易促进效应约为 31%。尽管两个政策变量的估计值相对较小，但仍需注意以下几点：首先，由于模型已引入国家对固定效应，此处识别的是 1990 年之后新生效 RTA 的贸易效应，以及 1990 年后新加入欧盟成员国所带来的边际效应；其次，RTA 与 EU 的影响很可能存在明显异质性。关于 RTA 异质性的讨论将在本资料结尾的练习部分进一步展开。最后需要说明，第 (5) 列未汇报拟合优度 (R^2)。⁹ 若要评估模型的整体拟合度，建议读者参考图 2。该图基于乘法形式引力模型的估计结果绘制，直观展示了模型与数据之间的高度拟合。

最后的思考。若你已理解乘法形式引力模型中各设定的意义、动机与理论背景，说明你已经掌握了现代实证引力分析的核心思想，这是一项值得肯定的学习成果。正如本教学资料末尾练习题所示，只需在现有估计设定中加入其他自变量，便可评估多种随时间变化的双边政策（如制裁、关税同盟等）对贸易的影响。另一方面，如果关注的是某些不随时间变化的贸易决定因素（如距离、殖民历史、共同官方语言等），则可选择控制国家对固定效应，直接将变量加入模型。总之，至此你已具备采用现代实证引力模型，分析各类贸易政策如何影响贸易的基本能力。

在结束前，需简要讨论一个尚未提及的问题——引力模型中标准误差的处理方式。此前未详细展开，主要出于三方面考虑：首先，该问题可能超出本科教学范围；其次，学界目前尚未就此形成一致共识；最后，尽管标准误差的处理方式虽然会影响估计的精确性，但通常不会改变系数估计值本身。基于现有实证经验，在此推荐一种广泛采用的做法：在估计命令末尾添加 ‘cluster(Exporter#Importer)’ 选项，使用按国家对聚类的标准误差。这种方法能够稳健的应对双边数据中可能存在的序列相关问题。值得注意的是，目前对该问题的处理学界仍未达成一致意见，因此研究者无需过度纠结于此。若在实际应用该方法的过程中受到质疑，可以援引本学习资料作为参考，或幽默地回答一句：“这都是 Yotov 的建议！”。

⁸ 参见 Santos Silva and Teneyro (2006) 与 Larch et al. (2025)，二者系统论证了 PPML 在引力估计中的优越性。

⁹ 原因在于，非线性的 PPML 估计量所产生的是“伪- R^2 ”，它无法与先前 OLS 设定下的 R^2 直接比较。详见 <https://www.statalist.org/forums/forum/general-stata-discussion/general/1528609-ppmlhdfc-pseudo-r2>。

References

- Anderson, James E.** 1979. "A Theoretical Foundation for the Gravity Equation." *American Economic Review* 69 (1): 106–116.
- Anderson, James E.** 2011. "The Gravity Model." *Annual Review of Economics* 3 133–160.
- Anderson, James E., and Eric van Wincoop.** 2003. "Gravity with Gravititas: A Solution to the Border Puzzle." *American Economic Review* 93 (1): 170–192.
- Arkolakis, Costas, Arnaud Costinot, and Andrés Rodríguez-Clare.** 2012. "New Trade Models, Same Old Gains?" *American Economic Review* 102 (1): 94–130.
- Baldwin, Richard E., and Daria Taglioni.** 2006. "Gravity for Dummies and Dummies for Gravity Equations." *NBER Working Paper No. 12516*.
- Correia, Sergio.** 2016. "A Feasible Estimator for Linear Models with Multi-Way Fixed Effects." *unpublished manuscript available at <http://scoreia.com/research/hdfe.pdf>*.
- Correia, Sergio, Paulo Guimarães, and Thomas Zylkin.** 2020. "Fast Poisson Estimation with High-Dimensional Fixed Effects." *The Stata Journal* 20 (1): 95–115. [10.1177/1536867x20909691](https://doi.org/10.1177/1536867x20909691).
- Eaton, Jonathan, and Samuel Kortum.** 2002. "Technology, Geography and Trade." *Econometrica* 70 (5): 1741–1779.
- Frankel, J.A., and D. Romer.** 1999. "Does Trade Cause Growth?" *American Economic Review* 89 (3): 379–399.
- Krugman, Paul.** 1995. "Increasing returns, imperfect competition and the positive theory of international trade." In *Handbook of International Economics*, edited by Grossman, G. M., and K. Rogoff Volume 3. 1st edition, Chap. 24 1243–1277.
- Larch, Mario, Serge Shikher, and Yoto Yotov.** 2025. "Estimating Gravity Equations: Theory Implications, Econometric Developments, and Practical Recommendations." Working Papers 2025001, Center for Global Policy Analysis, LeBow College of Business, Drexel University, <https://ideas.repec.org/p/drx/wpaper/2025001.html>.
- Ravenstein, Ernest George.** 1885. "The Laws of Migration: Part 1." *Journal of the Statistical Society of London* 48 (2): 167–235.
- Rose, Andrew K.** 2000. "One money, one market: the effect of common currencies on trade." *Economic Policy* 15 (30): 08–45.
- Santos Silva, João M.C., and Silvana Tenreyro.** 2006. "The Log of Gravity." *Review of Economics and Statistics* 88 (4): 641–658.
- Tinbergen, Jan.** 1962. *Shaping the World Economy: Suggestions for an International Economic Policy*. New York: The Twentieth Century Fund.
- Yotov, Yoto V.** 2024. "The evolution of structural gravity: The workhorse model of trade." *Contemporary Economic Policy* 42 (4): 578–603.
- Yotov, Yoto V., Roberta Piermartini, Jose-Antonio Monteiro, and Mario Larch.** 2016. *An Advanced Guide to Trade Policy Analysis: The Structural Gravity Model*. Geneva: UNCTAD and WTO.

练习题

本节的练习题旨在达成以下目标：首先，帮助学生巩固对本资料内容及计量工具的理解；其次，锻炼并拓展编程能力；最后，提供更贴近现实的政策应用场景。题目按难度递增设置，且彼此独立，学生应独立完成每道题目。部分练习被拆分为若干题目，每一题的解答通常仅需少量代码。全部练习所需数据均来自“Gravity for Undergraduates”数据库（GU 数据库）。

1. 物理与贸易。请基于 GU 数据库中 2023 年的出口国 GDP、进口国 GDP 及距离变量，基于朴素引力模型 (1) 构建模型并预测贸易流量。与现有文献保持一致，假设贸易对距离的弹性为 $\theta = -1$ 。此外，由于你只需关注构建的贸易流与实际贸易流之间的相关性，假设引力常数 $\tilde{G} = 1$ 。请计算朴素引力模型所得预测贸易流量与实际贸易流量之间的相关系数，该系数值为多少？进一步，请比较预测值与实际值的均值，并分析导致两者差异的潜在原因。

2. 截面估计的时间演变。使用 GU 数据库分别在 1990 年、2000 年、2010 年和 2020 年估计第 4 节的“朴素引力”模型（即表 1 第 (1) 列的设定）。比较并讨论五个引力变量的估计结果随时间的演变。（提示：可以分别估计四个回归方程，或通过循环实现。）

3. 传统引力变量。在贸易文献中，双边距离的对数、是否接壤、是否共享官方语言以及殖民关系，是最常用的四个不随时间变化的贸易成本代理变量。本题将使用 GU 数据库估计这些“传统”引力变量对贸易的影响。

3.a. 以第 4 节的“乘法引力”模型（即表 1 第 (5) 列的设定）为基础，在模型中直接加入 ‘ln_dist’、‘Contiguous_Border’、‘Common_Language’ 和 ‘Colonial_Ties’ 四个变量。是否能够估计出这些变量的系数？请解释原因。

3.b. 在不使用国家对固定效应的情况下，重新估计与 3.a 相同的模型设定。思考并指出：在先前的模型中，是哪一部分引入了国家对固定效应？将其去掉后，你是否得到了 3.a 中新加入变量的系数估计？请从符号与数值大小的角度解释这些新的估计结果。

4. 关税同盟的影响。关税同盟是一类更深层次的区域贸易协定 (RTA)，其成员不仅在彼此之间实现贸易自由化，还对非成员国采取共同的对外贸易政策。因此，关税同盟通常被认为比一般的 RTA 更能促进成员间贸易。本题将利用 GU 数据库检验这一假说。

4.a. 调用 GU 数据，在第 4 节的“乘法引力”模型（即表 1 第 (5) 列的设定）中加入变量 ‘Customs_Union’。请解释并讨论 ‘Customs_Union’ 的估计结果。

4.b. 由于关税同盟是区域贸易协定 (RTA) 的一种特定形式，因此 RTA 变量本身已涵盖关税同盟的情形。此时，问题 4.a 中对 ‘Customs_Union’ 的估计，实际反映的是关税同盟相对于一般 RTA 的额外效应（即偏差项）。为识别关税同盟的总体效应，应在 ‘Customs_Union’ 取值为 1 时，将 RTA 虚拟变量设置 0，并重新估计 4.a 中的模型。请比较 4.a 与 4.b 中 ‘Customs_Union’ 的系数估计结果，并解释估计值的含义。

5. “贸易制裁”的影响。经济制裁已成为当代国家外交的重要组成部分。本题将使用 GU 数据库来估计全面贸易制裁的总体效应，并进一步单独识别对俄罗斯的制裁效应。

5.a. 以 GU 数据为基础，在第 4 节的“乘法引力”模型（即表 1 第 (5) 列的设定）中加入变量 ‘Trade_Sanction’。请解释并讨论制裁效应的估计结果。

5.b. 在 5.a. 的设定基础上，进一步识别对俄罗斯的制裁效应。为此，利用 ‘Trade_Sanction’ 构造一个新的俄罗斯制裁变量 ‘Russia_Sanction’，当俄罗斯为制裁对象时取值为 1，否则为 0。然后，当 ‘Russia_Sanction’ 等于 1 时，将 ‘Trade_Sanction’ 设为 0，并在 5.a. 的模型中加入 ‘Russia_Sanction’ 变量重新估计。请解释回归结果。

5.c. 进一步区分 2022 年俄罗斯入侵乌克兰后实施的制裁效应。为此，将 5.b. 中的 ‘Russia_Sanction’ 拆分为两个变量：‘Russia_Sanction_Old’（2022 年之前的制裁）与 ‘Russia_Sanction_New’（2022 年实施的制裁）。在 5.b. 的模型中用这两个变量替代 ‘Russia_Sanction’，并进行估计。请讨论并解释你的结果。

6. 区域贸易协定 (RTA) 的异质性影响。该教学资料中所得到的单一 RTA 估计可能掩盖了其效应中的显著异质性。本题将利用 GU 数据库从多个维度探讨 RTA 效应的异质性。

6.a. 以 GU 数据为基础，在第 4 节的“乘法引力”模型（即表 1 第 (5) 列的设定）中，允许 RTA 效应在 1990 – 1999 年、2000 – 2009 年、2010 – 2023 年三个时期分别不同。（提示：需将单一的 RTA 变量拆分为三个时期的 RTA 变量。）请讨论你的回归结果。

6.b. 以第 4 节的“乘法引力”模型（即表 1 第 (5) 列的设定）为基础，单独识别 2015 年生效的中澳自由贸易协定 (ChAFTA) 的影响。为此，构造一个指示变量 ‘ChAFTA’，在 2015 年以后澳大利亚与中国之间的双边贸易中取值为 1，否则为 0。然后，将该变量加入“乘法引力”模型中。请解释回归结果。

6.c. 6.b. 的设定所得 ChAFTA 估计实际上反映的是相对于 RTA 效应的偏差，因为 RTA 变量已经包含了 ChAFTA。为了得到 ChAFTA 的完整效应，当 ‘ChAFTA’ 等于 1 时，将 RTA 变量设为 0，然后重新估计 6.b. 的模型。比较两种设定下的 ChAFTA 估计，并解释新的估计结果。

6.d. 检验 ChAFTA 的影响是否具有不对称性。（提示：将 ‘ChAFTA’ 拆分为两个变量，分别对应澳大利亚对中国的出口与中国对澳大利亚的出口。然后，用这两个变量替代原有的 ChAFTA 变量，并比较其估计结果。）