



武汉大学学报(信息科学版)

Geomatics and Information Science of Wuhan University

ISSN 1671-8860, CN 42-1676/TN

《武汉大学学报(信息科学版)》网络首发论文

题目： 夜间灯光遥感视角下的中国对中亚地区援助效果评估
作者： 李熙， 巩钰
DOI： 10.13203/j.whugis20220478
收稿日期： 2022-08-10
网络首发日期： 2022-08-23
引用格式： 李熙， 巩钰. 夜间灯光遥感视角下的中国对中亚地区援助效果评估[J/OL]. 武汉大学学报(信息科学版). <https://doi.org/10.13203/j.whugis20220478>



网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

DOI: 10.13203/j.whugis20220478

引用格式：李熙，巩钰. 夜间灯光遥感视角下的中国对中亚地区援助效果评估[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2022, DOI:10.13203/J.whugis20220478

Citation: LI Xi, GONG Yu. Evaluation of China's Aid to Central Asia from the Perspective of Night-time Light Remote Sensing[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2022, DOI:10.13203/J.whugis20220478

夜间灯光遥感视角下的中国对中亚地区援助效果评估

李熙¹ 巩钰¹

¹ 武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室, 湖北 武汉, 430079

摘要：近年来，中国积极向中亚地区提供援助，以帮助改善当地的区域发展不平衡，但目前缺乏针对该地区援助效果的客观评估。针对该问题，基于2012—2019年的夜间灯光遥感数据构建中亚地区的夜光均衡指数，宏观分析该地区的社会经济发展情况，结合援助信息构建该地区一级行政区划的面板数据，并建立计量经济模型，从经济活动均衡化角度客观评估中国对中亚地区的援助效果。研究表明，近年来，中国向中亚地区提供的援助对促进该地区经济活动的均衡化有显著的促进作用；能源类和工业类的援助项目促进区域经济活动均衡化的效果更突出；该地区的中等偏下收入国家在接受能源类的援助后，经济均衡化发展更明显。该研究证明了中国对中亚地区的援助切实改善了当地的社会经济发展水平，为实现人类命运共同体贡献了力量。

关键词：夜光遥感；对外援助；空间不均衡；中亚地区；计量经济模型

Evaluation of China's Aid to Central Asia from the Perspective of Night-time Light Remote Sensing

LI Xi¹ GONG Yu¹

¹ State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan University, Wuhan 430079, China

Abstract: Objectives: Recent years, to improve the equality of local economic development in Central Asia, China is actively providing aid and support. However, there is a lack of objective evaluation of the effectiveness of aid in the region. Thus, evaluation of the improvement quality will provide a scientific and timely reference for aid departments. **Methods:** Firstly, this paper constructs night-time light equality index(NLEI) based on night-time light remote sensing data. Secondly, through the construction of a panel data model for first level administrative divisions in Central Asia, the empirical analysis of the benchmark model is conducted to objectively evaluate the effect of China's aid to Central Asia. Also, this paper analyzes the aid effect in different income countries based on heterogeneity analysis. **Results:** The results show that: Recent years, the aid provided by China has a significant positive effect on promoting the equality of regional economic activities in the first level administrative divisions of Central Asia; Energy type aid projects have a more prominent effect on the balance of economic activities in Central Asia; Lower middle income countries regional equality was more pronounced after receiving energy aid

收稿日期：2022-08-10

基金项目：国家重点研发计划（2019YFE0126800）。

第一作者：李熙，博士，教授，主要研究方向为遥感图像处理与应用。lixix@whu.edu.cn

support. **Conclusions:** We provide a new perspective to analyze the timely effects of China's foreign aid projects in subnational administration level using night-time light data, which contributes to the realization of a Community of Shared Future for Mankind.

Key words: night-time light; foreign aid; spatial inequality; Central Asia; econometric model

作为新兴的施援国,中国逐步形成了具有本国特色的援助机制。2018年,第十三届全国人民代表大会第一次会议通过决定,组建国家国际发展合作署,助力对外援助,其有关职能包括对外援助战略方针以及政策的拟定等。2021年10月《对外援助管理办法》开始实施,中国致力于帮助受援方减轻与消除贫困,促进受援方经济发展和社会进步,促进高质量共建“一带一路”等。多项政策表明,中国正以相互尊重、合作共赢的态度向世界提供援助支持。有研究认为,中国援助可以显著带动受援国家的经济发展^[1-3],但近几年中国的对外援助是否仍然具有上述带动作用,有待进一步评估。

20世纪90年代,中亚五国相继独立。1997年,中国在哈萨克斯坦成立油气公司,与中亚地区在能源等行业往来逐渐频繁。虽然中亚及邻近里海地区石油天然气资源丰富,但各国在发展过程中仍然存在“资源诅咒”^[4]、区域发展不均衡、经济水平分化加剧、收入分配失衡等问题^[4-7]。中亚地区多山的地形也会导致地区交通等基础设施不完善,阻碍经济往来,最终造成区域的发展差异^[8],如哈萨克斯坦分布不均衡的发电设施会导致部分地区电力供应短缺,土库曼斯坦和乌兹别克斯坦的边缘偏僻地区缺少电力供应等^[6]。

2008年全球金融危机爆发,中亚受其影响,经济发展受挫后,积极对外寻求援助改善。美国等国家在此次危机中受到一定冲击,减少了对中亚地区的援助,而中国则持续对中亚地区给予支持^[9],如2009年为曼格什套投资公司提供26亿美元贷款^[10],2012年为土库曼斯坦-中国输气管线哈萨克斯坦段提供47亿美元贷款。2013年,国家主席习近平提出“一带一路”重大倡议,中国进一步与中亚地区建立互联互通的基础设施往来,并于2014年为凯尼梅1号泵站改造项目提供504万美元贷款,2017年为奇姆肯特炼油厂

改造提供6.07亿美元贷款等。综上,中国正努力通过提供石油化工、天然气等能源以及建筑等基础设施领域的援助^[7]来帮助改善中亚地区的区域发展不均衡问题^[7,11],成为中亚地区重要的援助伙伴之一^[9]。而中亚接受上述多项援助后,地区均衡化发生了怎样的改变,仍需对其展开有关研究。

过去往往仅依靠统计数据评估对外援助效果,这极大地受限于数据的覆盖时间以及数据的准确程度。夜光遥感通过夜间连续对地观测,记录真实的人类夜间活动来反映地区总体经济状况以及区域发展不平衡^[12-15]。文献[16]基于美国军事卫星(defense meteorological satellite, DMSP)夜光数据和人口数据构建夜间灯光发展指数,研究结果表明该指数可以用来反映全球发展不平衡程度。文献[17]基于2000—2013年的夜光数据对行政区划内所有有效像元计算夜光基尼系数,并与援助信息进行回归分析,结果肯定了中国对外援助可以显著促进受援助地区经济发展的均衡程度。文献[18]对比分析了DMSP与可见红外成像辐射器件(visible infrared imaging radiometer, VIIRS)夜光数据来预测国内生产总值(gross domestic product, GDP)的区别,得到DMSP数据在城市地区会低估空间不均衡等结论。

综上所述,在中国不断向中亚地区提供援助以帮助改善其区域发展不均衡问题的背景下,本文基于夜光遥感影像提取夜光均衡指数变量,通过中国对外援助数据获取援助核心变量,从而构建面板数据,并建立计量经济模型客观评估中国对中亚地区提供援助的效果,为中国有关援助机构政策方针的制定提供较为科学可靠的信息。

1 研究区域与数据

1.1 研究区域概况

本文选取中亚地区为研究区域,如图1所示。中亚地区地处亚欧大部中部,是贯通

亚欧大陆的交通要塞。该地区由哈萨克斯坦、吉尔吉斯斯坦、乌兹别克斯坦、土库曼斯坦以及塔吉克斯坦共 5 个国家组成，简称中亚五国，是“一带一路”西边陆路交通的首站，因此中国一直把中亚看作“一带一路”的先行区。中亚地区自然资源丰富，其中土库曼斯坦和哈萨克斯坦油气资源丰富，塔吉克斯坦和吉尔吉斯斯坦水电资源优越。从 1992 年开通的中国-哈萨克斯坦跨境铁路开始^[9]，中国向中亚地区提供援助，包括公路建设和修复项目、石油管道项目以及水电站项目等，来帮助改善中亚地区的区域经济发展不均衡问题。基于中国对中亚地区提供的援助支持，开展本文的研究



图 1 研究区示意图 (来源

https://gadm.org/download_country.html)

Fig. 1 Research Region (from

https://gadm.org/download_country.html)

1.2 数据来源与预处理

1.2.1 夜光数据来源及预处理

VIIRS 上的传感器可以对全球范围内的夜间可见光和红外光进行每日测量，记录地表夜间信息。与 DMSP 夜光数据相比，VIIRS 夜光数据的空间和辐射分辨率以及数据的校准程度均有了显著改进，可以更好地监测夜间活动。为了充分发挥 VIIRS 数据的潜力，美国国家航空航天局 (National Aeronautics and Space Administration, NASA) 开发了一套新的夜光数据产品——黑色大理石(VNP46/VJ146)，进行夜间灯光的应用分析^[19]。文献[20]分别基于上述三套夜光数据在县级尺度计算夜光总量，并与 GDP 进行经济建模分析，对比证明了黑色大理石数据在经济建模上的优势。黑色大理石数据的空间分辨率为 15"，可获取自 2012 年至今的夜光数据。该数据通过建立新的定

量遥感反演算法，实现云层污染的去，以及校正由于大气、地形、植被、雪、月光和杂散光等因素带来的夜光数据偏差。VNP46 产品包括每日大气顶部传感数据 (VNP46A1/VJ146A1)、每日月光校正后夜光数据 (VNP46A2/VJ146A2)、月度月光校正后夜光数据 (VNP46A1/VJ146A3) 以及年度月光校正后夜光数据 (VNP46A4/VJ146A4)。

本文选择年度月光校正后夜光数据 VNP46A4 开展研究，该数据共包括 28 个图层，包括考虑角度效应^[21]设置的全角度观测数据、星下点观测数据以及远离星下点数据 3 种。结合质量标志图层，本文选择全角度去雪图层，图层每个像元对应辐射亮度的单位为 $nWatts \cdot cm^{-2} \cdot sr^{-1}$ 。图 2 为中亚地区 2019 年该图层的夜光影像。针对夜光影像，进行的数据预处理包括格式转化、影像拼接与裁剪、去除油气井干扰、质量筛选和等面积投影。由于黑色大理石数据并未去除油气井影响，因此需要结合夜光影像与油气井矢量数据绘制掩膜区域，进行掩膜处理，以去除油气井对夜光影像的干扰。质量筛选则根据 VNP46A4 年度数据的质量标志图层掩膜质量较差的像元，使其不参与计算。等面积投影后的栅格影像空间分辨率为 500 m。

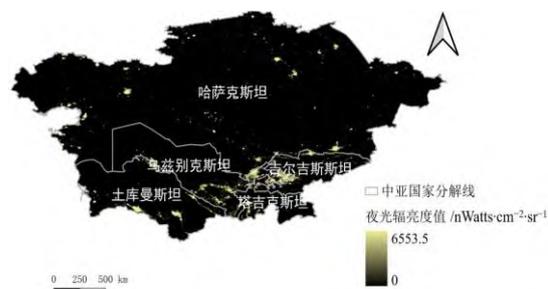


图 2 中亚地区 2019 年夜光影像

Fig. 2 Night-time Light Image of Central Asia in 2019

1.2.2 援助数据来源及预处理

美国威廉与玛丽学院利用跟踪资金流 (tracking underreported financial flows, TUFF) 方法对全球的援助信息进行研究整理，于 2021-09-29 发布了中国官方财务数据集 2.0 版本。该数据集搜集了 2000—2017 年中国官方支持 165 个国家和地区的援助信息，援助项目覆盖时间长达 20 多年 (2000—2021 年)，对援助的状态、类别、描述信息、地

理位置等进行了详细的汇总整合^[22]。文献^[23]使用该援助数据集对“一带一路”沿线国家 2000—2014 年接受援助后经济的增长效果进行实证分析,证明了中国对沿线国家援助的有效性。此外,许志成等^[15]、冯凯等^[24-25]多名学者基于该数据集开展中国援助效果的评估,最终结果均表明中国对外援助可以促进受援国经济的正向发展。但上述研究均基于 2014 年之前的中国对外援助项目展开,无法评估近年来的援助效果。为了更加及时地评估中国对外援助的效果,本文评估涉及项目的年份为 2012—2019 年。

本文选择中国援助中亚地区的 168 条项目开展援助效果评估,包括工业、能源、交通和储存、基础设施建设以及水资源供给等类型。上述援助项目中部分有明确的地理经纬度,部分则缺少地理位置信息。因此分别针对上述两类援助项目,借助 Google Earth

平台和行政区划矢量数据,根据项目的经纬度或位置描述逐条进行地理编码。编码后的援助项目具有详细的一级行政区划名称,这极大地区别于过去只针对国家层面开展的援助效果评估研究。

1.2.3 其他数据及预处理

本文使用的其他数据信息见表 1,包括全球行政区划数据库(global administrative areas database, GADM)提供的一级行政区划数据 4.1 版本(发布时间:2022 年 7 月 16 日)、美国橡树岭国家实验室发布的 LandScanTM人口数据、大型油气井数据、GDP 数据以及用于构建计量经济模型的其他变量数据(CO₂排放数据以及中国钢铁数据),其中 CO₂排放数据来自世界银行数据库,中国钢铁数据来自世界钢铁组织。为保证数据的平稳性,建模前需要对部分变量进行对数化预处理。

表 1 其他数据具体信息

Tab. 1 Characteristics of Other Data

数据名称	数据说明	数据来源	数据网址
行政区划数据	矢量数据	全球行政区划数据库	https://gadm.org/data.html
人口数据	栅格数据	LandScan TM 人口数据	https://landscan.ornl.gov/
油气井数据	矢量数据	2012—2019 年全球油气井数据	https://daac.ornl.gov/CMS/guides/Methane_Flaring_Sites_VIIRS.html
GDP 数据	统计数据(单位:美元)	世界银行数据库	https://data.worldbank.org/country/
CO ₂ 排放数据	统计数据(单位:kt)	世界银行数据库	https://data.worldbank.org/country/
中国钢铁数据	统计数据(单位:kt)	世界钢铁组织	https://worldsteel.org/wp-content/uploads/Steel-Statistical-Yearbook-2020-concise-version.pdf

2 研究方法 with 模型

2.1 基于夜间灯光的社会经济指数构建

夜间灯光可以有效评估区域的经济水平^[26-30],常用夜光总量指数(total night-time light index, TNLI)反映地区整体的社会经济发展情况^[26],地区夜光总量一般和区域经济总量正相关。TNLI 计算公式如下:

$$TNLI_{irt} = \sum_{k=1}^N R_{kt} \quad (1)$$

式中, $TNLI_{irt}$ 为国家 i 的行政区划 r 在时间 t 的夜光总量; R_{kt} 表示第 k 个像元 t 年的夜光辐亮度值; N 表示该行政区划 r 内的像

元总数目。

而关于区域内部经济发展的差异性,经济学中常用判断收入分配公平程度的基尼系数表示。当将收入替换为客观真实的夜间灯光值时,即可以通过夜间灯光的不均衡程度反映区域经济发展的不均衡程度。2012 年 Elvidge 等利用夜间遥感影像构建了夜间灯光的基尼系数,称为夜光发展指数(night-time light development index, NLDI),该指数即通过分析夜间灯光来反映不同区域经济发展的不均衡程度^[16]。

关于夜光基尼系数的构建,文献^[17]指出将行政区划作为单元计算人均灯光量来反映区域差距,或将地理格网作为单元计算地均灯光量来反映区域差距。本文关注援助

在空间维度上对地区经济均衡化影响的效果,故按照地均灯光量来构建夜光均衡指数(night-time light equality index, NLEI)。NLEI越小,地区经济活动分布越扩散,经济发展越均衡,反之,地区发展差异明显。NLEI计算公式如下:

$$NLEI_{it} = \frac{\sum_{k=1}^N \sum_{j=1}^N |R_{kt} - R_{jt}|}{2N * \sum_{k=1}^N R_{kt}} \quad (2)$$

式中, $NLEI_{irt}$ 为国家 i 的行政区划 r 在时间 t 的夜光均衡指数; R_{jt} 表示第 j 个像元 t 年的夜光辐亮度值; R_{kt} 、 N 的含义同式(1)。

2.2 中亚地区接受援助效果评估基准模型设定

考虑不同行政区划间的差异,构建基准模型时加入个体固定效应来控制区域差异。假设中亚地区夜光均衡程度由中国援助、区域人口、CO₂排放等因素决定,其中引入的CO₂排放变量可以反映地区的工业水平差异,建立最小二乘回归(ordinary least squares, OLS)模型如下:

$$NLEI_{it} = \beta ChnAid_{it} + \gamma X_{it} + \mu_{ir} + \varepsilon_{irt} \quad (3)$$

式中, $NLEI_{irt}$ 为国家 i 的行政区划 r 在 t 年的夜光均衡指数; β 和 γ 为 OLS 模型的变量回归系数; 核心变量为援助虚拟变量 $ChnAid_{rt}$, 用来表示国家 i 的行政区划 r 是否在 t 年接受中国提供的援助, 取值为 1 或 0, 该变量由地理编码后的援助数据得到, 故可以分析一级行政区划接受援助后均衡化的改变, 有别于过去国家层面建立的面板数据与计量模型; X_{irt} 为控制变量, 包括人口数量和 CO₂排放量; μ_{ir} 为针对不同行政区划的固定效应; ε_{irt} 为随机误差项。

为进一步解决援助核心变量存在的内生性问题^[15, 17, 23], 通过引入援助变量的工具变量 IV , 使用两阶段最小二乘法 (two stage least square, 2SLS) 进行基准模型的回归分析。工具变量 IV 指与式 (3) 中误差项 ε_{irt} 不相关, 但与援助核心变量 $ChnAid_{rt}$ 相关的变量, 引入 IV 后仍然可以得到 OLS 模型的一致估计值。本文选取中国钢铁产量 $Steel_{t-1}$ ^[17, 23]和援助次数的平均值 A_{ir} 组成的交互项作

为工具变量 IV 。一方面当行政区划 r 平均接受援助次数多时, 其接收中国援助的可能性高; 另一方面当中国钢铁产量高时, 中国对外援助的概率较高。工具变量 IV 计算如下:

$$IV = A_{ir} * Steel_{t-1} \quad (4)$$

式中, A_{ir} 为行政区划 r 在 2012—2019 年期间的平均接收援助次数 (接受援助次数/年数); $Steel_{t-1}$ 为中国在 $t-1$ 年的钢铁产量。

2SLS 模型首先利用工具变量 IV 对内生援助变量进行回归, 第一阶段回归后, 根据回归系数和固定效应即可得到援助变量的估计值 \widehat{ChnAid}_{rt} 。第一阶段回归模型如下所示:

$$ChnAid_{it} = \delta * IV + \tau_{ir} + \sigma_{irt} \quad (5)$$

其中, $ChnAid_{rt}$ 为援助虚拟变量; δ 为援助变量的回归系数; IV 为工具变量; τ_{ir} 为个体固定效应; σ_{irt} 为随机误差项。

然后将援助变量的估计值 \widehat{ChnAid}_{rt} 以及其他控制变量与夜光均衡指数被解释变量进行第二阶段回归, 得到最终回归结果, 包括援助变量回归系数 β' 等。第二阶段模型如下:

$$NLEI_{it} = \beta' \widehat{ChnAid}_{it} + \gamma' X_{it} + \mu_{ir}' + \varepsilon_{irt}' \quad (6)$$

其中, $NLEI_{irt}$ 为国家 i 的行政区划 r 在 t 年的夜光均衡指数; β' 和 γ' 为变量回归系数; \widehat{ChnAid}_{rt} 为援助变量估计值; X_{irt} 为控制变量; μ_{ir}' 为个体固定效应; ε_{irt}' 为随机误差项。

3 研究结果分析

3.1 中亚地区社会经济发展宏观规律

3.1.1 夜光总量与均衡化发展

基于预处理后的年度夜光影像根据式 (1)计算中亚地区各国夜光总量指数 $TNLI$, 分析中亚地区整体的经济水平及变化, 结果如图 3 所示。

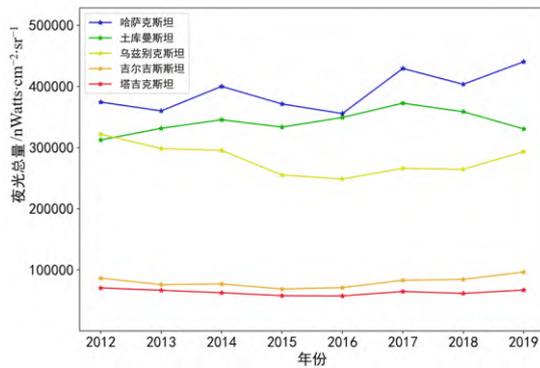


图 3 中亚地区夜光总量指数

Fig. 3 Total Night-time Light Index (TNLI) of Central Asia

从图 3 可以看出, 中亚地区 2012—2019 年各国家的夜光总量差异较大。哈萨克斯坦夜光总量整体最高, 土库曼斯坦与乌兹别克斯坦夜光总量整体较高, 吉尔吉斯斯坦与塔吉克斯坦则相对较低。该地区各国家在过去 8 年中夜光总量并非持续增长, 这与各国发展政策以及国际经济金融环境等内外因素有关。如哈萨克斯坦 2015 年和 2016 年的夜光总量相比 2014 年的夜光总量有所减少,

2015 年以来的国际油价下跌可能是原因之一。哈萨克斯坦油气资源丰富, 当油价下跌时, 该国石油出口大幅下降, 经济下滑, 夜光总量减少。随着国际油价抬升, 2017 年哈萨克斯坦经济正向发展, 夜光总量也相比之前有所增长。对比 2019 年与 2012 年各国家的夜光总量, 哈萨克斯坦、土库曼斯坦与吉尔吉斯斯坦夜光总量增加, 乌兹别克斯坦与塔吉克斯坦夜光总量减少。

基于式 (2) 计算中亚地区一级行政区划 2012—2019 年的 NLEI, 结果如图 4 所示。可以看出, 中亚全部一级行政区划过去 8 年的平均夜光均衡指数为 0.54, 地区经济活动的均衡化程度与建设基础设施以及地区互联互通等有极大关系。中亚地区各国家的区域差异较大, 塔吉克斯坦、吉尔吉斯斯坦、乌兹别克斯坦、土库曼斯坦和哈萨克斯坦的平均 NLEI 分别为 0.40、0.42、0.49、0.62 和 0.68, 经济发展均衡化程度依次递减, 这与各个国家采取的发展政策、资源禀赋、地理地形以及经济水平等有关。

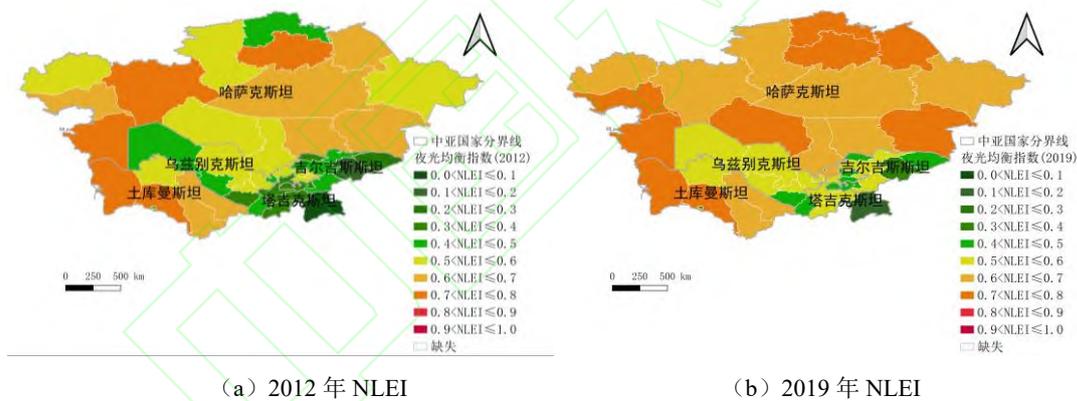


图 4 中亚地区夜光均衡指数

Fig. 4 Night-time Light Equality Index in Central Asia

3.1.2 援助与世行统计情况分析

世界银行数据库中各个国家的年度 GDP 数据如图 5 所示。GDP 数据表明中亚地区经济水平差距较大, 哈萨克斯坦为第一梯队, 乌兹别克斯坦和土库曼斯坦为第二梯队, 吉尔吉斯斯坦和塔吉克斯坦为第三梯队, 与 § 3.1.1 中各国夜光总量的分析一致。

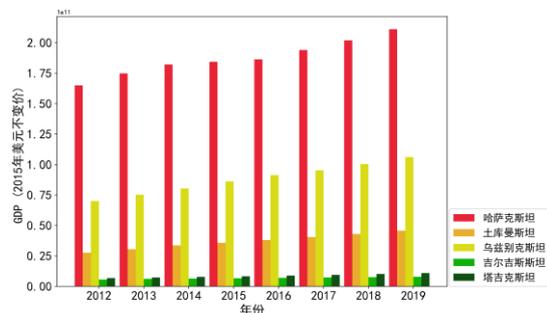


图 5 中亚地区 GDP 数据

Fig. 5 GDP Statistics of Central Asia

基于 § 1.2.2 经过地理编码后的所有援助项目，统计各行政区划 2012—2019 年接受中国援助的次数 N_{ir} ， N_{ir} 表示国家 i 的行政区划 r 有地理编码的中国援助次数，如图 6 所示。结果表明哈萨克斯坦一级行政区划接受中国援助的数量最多，其次依次为乌兹别克斯坦、吉尔吉斯斯坦、塔吉克斯坦、土库曼斯坦。

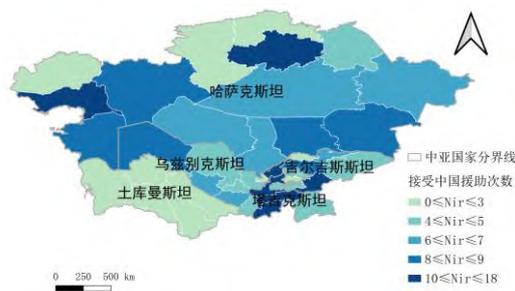


图 6 2012—2019 年中亚不同行政区划接受援助次数

Fig. 6 Amount of Aid Received by Different Administrative Divisions in Central Asia from 2012 to 2019

3.2 基于计量模型的援助效果分析

3.2.1 模型结果

本文将 NLEI 与中国援助核心变量 $ChnAid$ 按照式 (3) 进行 OLS 回归。逐步增加控制变量以及区分援助类型进行回归的结果见表 2。其中，援助核心变量为援助虚拟变量。表 2 第 2 列只加入了核心变量进行回归，第 3 列和第 4 列逐步加入区划人口数和 CO_2 排放量。第 2—4 列结果显示，中国对中亚地区的援助可以显著促进当地经济发展均衡化。一个地区接受中国援助后，夜光均衡指数减小约 0.01，相比平均夜光均衡指数，均衡化程度可提高约 1.8%。第 4—6 列为 3 种不同援助类型 OLS 回归的结果，表明 3 种类型的中国援助均可以促进当地经济活动的扩散。第 5 列表明能源类的援助在促进地区均衡化方面产生的正向效果更积极，即在中亚地区修建炼油厂、矿井等能源设施时，中国给予的大量贷款支持可以有效促进当地能源互通，实现不同区域的共同发展。

表 2 最小二乘法回归结果

Tab. 2 Ordinary Least Square Regression Result

变量名称	全部援助（只加入核心变量）	全部援助（加入区划人口数）	全部援助（加入 CO_2 排放量）	工业类型	能源类型	交通基建
中国援助（虚拟变量）	-0.011** (0.005)	-0.011** (0.005)	-0.010* (0.005)	-0.009 (0.006)	-0.036*** (0.011)	-0.003 (0.005)
区划人口数		0.012 (0.070)	-0.017 (0.063)	-0.012 (0.065)	0.030 (0.056)	0.030 (0.054)
CO_2 排放量			0.039** (0.016)	0.039** (0.017)	0.039** (0.016)	0.039** (0.016)
观测样本数	384	384	384	384	384	384
行政区划数	48	48	48	48	48	48
区划固定效应	是	是	是	是	是	是

注：变量括号中为标准误差值；***、**、* 分别表示 1%、5%、10% 的显著性水平

3.2.2 稳健性检验

§ 3.2.1 中通过增加控制变量实验，说明中国援助有促进中亚地区经济活动均衡化的效果，本节将进一步开展稳健性实验 1 和实验 2。

稳健性实验 1 为核心变量的替换。将援

助虚拟变量替换为援助数量变量，再与夜光均衡指数按照式 (3) 进行 OLS 回归，结果如表 3 所示，仍然可以得到中国提供的援助可以显著促进中亚地区的均衡化发展，能源类的援助项目显著促进地区经济均衡化的结论。

表 3 最小二乘法回归结果

Tab. 3 Ordinary Least Square Regression Result

变量名称	全部援助	工业类型	能源类型	交通基建
中国援助(数量变量)	-0.005**(0.002)	-0.005(0.003)	-0.027***(0.010)	-0.003(0.004)
区划人口数	-0.013(0.059)	-0.003(0.064)	0.032(0.055)	0.031(0.054)
CO ₂ 排放量	0.032*(0.017)	0.038**(0.016)	0.040**(0.016)	0.040**(0.016)
观测样本数	384	384	384	384
行政区划数	48	48	48	48
区划固定效应	是	是	是	是

注：变量括号中为标准误差值；***、**、*分别表示 1%、5%、10%的显著性水平

稳健性实验 2 使用工具变量法来克服核心变量的内生性问题。选取式 (4) 构建的工具变量 IV ，利用 2SLS 对模型再次进行回归。同时在第一阶段对工具变量开展弱工具变量检验，对应统计量为 Kleibergen-Paap rk Wald F，如表 4 所示。结果有：统计量 Kleibergen-Paap rk Wald F > 10%显著水平的临界值（统计量括号中为对应临界值），因此拒绝“存在弱工具变量”的原假设，说明构建的工具变量 IV 与内生变量 $ChnAid$ 的相

关性强，即可以先利用该工具变量与援助变量进行第一阶段回归，得到援助变量的估计值，后该估计值与 NLEI 进行第二阶段回归，以得到与 OLS 估计一致的结果。表 4 中结果均在 5%及以上水平显著为负，与表 2、表 3 保守的 OLS 估计相比，回归系数的符号没有变化，且数值更小。因此可以得到中国援助可以显著促进中亚地区均衡化发展，工业类的援助可以缩小当地区域差异的稳健结论。

表 4 两阶段最小二乘法回归结果

Tab. 4 Two Stage Least Square Regression Result

变量名称	全部援助	全部援助	工业类型	工业类型
中国援助(虚拟变量)	-0.041*** (0.015)		-0.033*** (0.012)	
中国援助(数量变量)		-0.019*** (0.007)		-0.025*** (0.009)
区划人口数	-0.165* (0.093)	-0.126* (0.074)	-0.129 (0.080)	-0.131* (0.075)
CO ₂ 排放量	0.033** (0.016)	0.008 (0.020)	0.032* (0.017)	0.025 (0.017)
Kleibergen-Paap rk Wald F统计量	90.919 (16.38)	51.996 (16.38)	148.758 (16.38)	57.996 (16.38)
观测样本数	366	366	366	366
行政区划数	48	48	48	48
区划固定效应	是	是	是	是

注：变量括号中为标准误差值；***、**、*分别表示 1%、5%、10%的显著性水平

3.2.3 异质性分析

考虑不同地区接受援助后均衡化程度的差异，本文按照世界银行的收入等级对中亚五国进行分类，其中哈萨克斯坦和土库曼斯坦属于中等偏上收入国家，塔吉克斯坦、乌兹别克斯坦和吉尔吉斯斯坦为中等偏下收入国家。分组后按照式 (3) 进行最小二乘法 OLS 回归，如表 5 所示。结果显示：

不同等级收入的国家对应援助虚拟变量的回归系数不同。文献[31]表示虽然分组回归的系数存在差异，但由于不同分组的置信区间不同，仍然需要对系数的差异进行统计学检验。本文选择费舍尔组合检验，通过计算两组结果的组间差异，并估计对应统计量分布的经验 P 值来分析是否存在异质性。两组回归对应的 P 值检验结果见表 6，结果显示

只有能源类援助项目的 P 值小于 0.1, 表明不同收入等级的国家接受该类型援助后, 经济均衡化的效果存在异质性, 其他列的回归结果则不存在异质性。表明中等偏下收入国

家接受能源的援助后, 地区均衡化程度更明显。这一实证结果符合收入较低的国家对援助的需求更大的常识。

表 5 不同收入等级回归结果

Tab. 5 Regression Result in Different Income Level Countries

变量名称	中等偏上收入国家				中等偏下收入国家			
	全部援助	工业类型	能源类型	交通基建	全部援助	工业类型	能源类型	交通基建
中国援助 (虚拟变量)	-0.003 (0.008)	-0.005 (0.009)	-0.004 (0.006)	0.009 (0.006)	-0.014** (0.005)	-0.007 (0.007)	-0.042*** (0.013)	-0.004 (0.006)
区划人口数	-0.046 (0.077)	-0.054 (0.079)	-0.038 (0.062)	-0.041 (0.062)	-0.106 (0.107)	-0.050 (0.110)	-0.022 (0.106)	-0.010 (0.105)
CO ₂ 排放量	-0.111*** (0.037)	-0.108*** (0.036)	-0.112** (0.041)	-0.111** (0.041)	0.064*** (0.019)	0.063*** (0.019)	0.064*** (0.019)	0.063*** (0.018)
观测样本数	160	160	160	160	224	224	224	224
行政区划数	20	20	20	20	28	28	28	28
区划固定效应	是	是	是	是	是	是	是	是

注: 变量括号中为标准误差值; **、*、*分别表示 1%、5%、10% 的显著性水平

表 6 异质性分析 P 值结果

Tab. 6 P Value Result in Heterogeneity Analysis

统计项	援助类型			
	全部援助	工业类型	能源类型	交通基建
P 值	0.154	0.429	0.046	0.144

4 结语

本文结合卫星数据和援助数据, 评估了 2012—2019 年中国对中亚地区一级行政区划的援助效果, 区别于以往根据国家层面的面板数据, 构建计量经济模型的研究主要结论有: 中国对中亚五国提供的援助具有正向带动地区发展的作用, 可以显著促进当地经济活动的扩散分布; 能源类和工业类的援助对该地区经济活动的均衡化效果更突出; 中等偏下收入国家接受中国援助后, 区域发展均衡化程度相对更高, 尤其能源类的项目对促进地区的均衡化发展更明显。本研究证明了中国对中亚地区的援助项目切实改善了当地社会经济发展, 为实现人类命运共同体发挥了重要作用。未来的研究可以结合多源遥感数据以及众源地理信息数据, 从而更全面客观地评估援助项目产生的社会经济

影响, 为中国制定对外援助政策提供有效的科学支撑。

参考文献

- [1] BenYishay A, Parks B, Runfolo D, et al. Forest Cover Impacts of Chinese Development Projects in Ecologically Sensitive Areas[C]. *Sais Cari 2016 Conference*, America, 2016.
- [2] Dreher A, Fuchs A, Parks B, et al. Aid, China, and Growth: Evidence from a New Global Development Finance Dataset[J]. *American Economic Journal: Economic policy*, 2021, 13(2): 135-174.
- [3] Liu A, Tang B. US and China Aid to Africa: Impact on the Donor-Recipient Trade Relations[J]. *China Economic Review*, 2018, 48: 46-65.
- [4] Hu Zhengyuan. Analysis and Prospect of Economic Development in Central and Western Asia [C]/*World Economic Analysis & Outlook(2016-2017)*. Beijing: Social Sciences Academic Press, 2018: 131-151 (胡正源. 中亚、西亚经济发展分析与展望[C]/*国际经济分析与展望(2016-2017)*.北京: 社会科学文献出版

- 社, 2018: 131-151)
- [5] Wang Zhenquan, Liu Min, Xue Shanhong. Leap and Challenge: Educational Development and Current Reform Trend in Central-Asia Countries [J]. *Studies in Foreign Education*, 2006 (12): 31-35. (王振权, 刘闽, 薛山红. 跨越与挑战: 中亚五国教育发展及改革走向[J]. 外国教育研究, 2006(12): 31-35.)
- [6] Li Xinliang. A Research on New Energy Trade Cooperation Between China and the Five Central Asian Countries under the B&R [J]. *Journal of Weifang University*, 2021, 21 (3): 26-29. (李新亮. “一带一路”背景下中国与中亚五国新能源贸易合作研究[J]. 潍坊学院学报, 2021, 21(3): 26-29.)
- [7] Li Qin, Xu Yunxia. The Status Quo of Chinese Investment in Central Asia and Comparative Analysis [J]. *Business & Economy*, 2012 (14): 1-3. (李钦, 许云霞. 中国对中亚地区投资现状及其比较分析[J]. 商业经济, 2012(14): 1-3.)
- [8] Li Yue, Yang Dianzhong. The Present Situation, Existing Problems and Countermeasure Suggestions of China's Direct Investment in Central Asia[J]. *Review of Economic Research*, 2014 (21): 62-75. (李悦, 杨殿中. 中国对中亚五国直接投资的现状、存在的问题及对策建议[J]. 经济研究参考, 2014(21): 62-75.)
- [9] Sun Zhuangzhi, Wang Haimei. Achievements and Challenges of China's Central Asian Studies in the 21st Century: An Interview with Professor Sun Zhuangzhi [J]. *The Journal of International Studies*, 2019, 40 (2): 143-160. (孙壮志, 王海媚. 21世纪以来中国的中亚研究: 进展与不足——孙壮志研究员访谈[J]. 国际政治研究, 2019, 40(2): 143-160.)
- [10] Ma Bin, Chen Ying. Energy Cooperation Between China and Central Asia in the New Situation--Taking China's Aid to Kazakhstan as an Example[J]. *Journal of International Economic Cooperation*, 2014 (8): 79-82. (马斌, 陈瑛. 新形势下中国与中亚的能源合作——以中国对哈萨克斯坦的投资为例[J]. 国际经济合作, 2014(8): 79-82.)
- [11] Shi Ji. Analysis of China's Aid to Central Asia--Taking China's Aid to Central Asian Countries as an Example [J]. *Social Sciences in Xinjiang*, 2009 (4): 50-53. (石婧. 中国对中亚援助状况分析——以中国援助中亚国家重点项目为例[J]. 新疆社会科学, 2009(4): 50-53.)
- [12] Li Deren, Li Xi. An Overview on Data Mining of Nighttime Light Remote Sensing [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2015, 44(6): 591-601. (李德仁, 李熙. 论夜光遥感数据挖掘[J]. 测绘学报, 2015, 44(6): 591-601.)
- [13] Li Deren, Yu Hanruo, Li Xi. The Spatial-Temporal Pattern Analysis of City Development in Countries along the Belt and Road Initiative Based on Nighttime Light Data[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2017, 42 (6): 711-720. (李德仁, 余涵若, 李熙. 基于夜光遥感影像的“一带一路”沿线国家城市发展时空格局分析[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2017, 42(6): 711-720.)
- [14] Zhao Lixian, Li Changhui, Song Yang, et al. A Spatial-Temporal Pattern Evolution Analysis of Urban Scale Development in Guangdong-Hong Kong-Macao Region Based on Nighttime Light Imagery [J]. *Tropical Geography*, 2020, 40 (2): 243-253. (赵丽娴, 李长辉, 宋杨, 等. 基于夜光遥感影像的粤港澳地区城市发展时空格局演变[J]. 热带地理, 2020, 40(2): 243-253.)
- [15] Xu Zhicheng, Zhang Yu. Lightening Up Africa: The Effects of Chinese Aid on the Economic Development in Africa [J]. *China Economic Quarterly*, 2021, 21 (5): 1499-1520. (许志成, 张宇. 点亮非洲: 中国援助对非洲经济发展的贡献[J]. 经济学(季刊), 2021, 21(5): 1499-1520.)
- [16] Elvidge C D, Baugh K E, Anderson S J, et al. The Night Light Development Index (NLDI): a spatially explicit measure of human development from satellite data[J]. *Social Geography*, 2012, 7(1): 23-35.
- [17] Bluhm R, Dreher A, Fuchs A, et al. Connective Financing: Chinese Infrastructure Projects and the Diffusion of Economic Activity in Developing Countries[R]. AidData, College of William & Mary, 2018.
- [18] Gibson J, Olivia S, Boe-Gibson G, et al. Which Night Lights Data Should We Use in Economics,

- and Where?[J]. *Journal of Development Economics*, 2021, 149: 102602.
- [19] Román M O, Wang Z, Sun Q, et al. NASA's Black Marble nighttime lights product suite[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2018, 210: 113-143.
- [20] Zhang X, Gibson J. Using Multi-Source Nighttime Lights Data to Proxy for County-Level Economic Activity in China from 2012 to 2019[J]. *Remote Sensing*, 2022, 14(5): 1282.
- [21] Li X, Ma R, Zhang Q, et al. Anisotropic Characteristic of Artificial Light at Night – Systematic Investigation with VIIRS DNB Multi-Temporal Observations[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2019, 233: 111357.
- [22] Custer S, Dreher A, Elston T, et al. Tracking Chinese Development Finance: An Application of AidData's TUFF 2.0 Methodology[R]. AidData, College of William & Mary, 2021.
- [23] Yu Jia. Analysis of the Economic Growth Effect on China's aid to Countries along the Belt and Road—from the Perspective of Recipient Countries[D]. Nanjing: Nanjing University, 2020.(于佳. 中国对“一带一路”沿线国家援助的经济增长效果分析[D]. 南京: 南京大学, 2020.)
- [24] Feng Kai, Li Ronglin, Chen Mo. China's Foreign Aid and Economic Growth in Africa Countries: Theoretical Model and Empirical Analysis [J]. *Journal of International Trade*, 2021 (11): 21-36.(冯凯, 李荣林, 陈默. 中国对非援助与非洲国家的经济增长:理论模型与实证分析[J]. 国际贸易问题, 2021(11): 21-36.)
- [25] Feng Kai, Li Ronglin, Chen Mo. Research on the Dynamic Relationship Between China's Aid to Africa and the Economic Growth of Africa Countries [J]. *China Economic Quarterly*, 2022, 22 (1): 175-196.(冯凯, 李荣林, 陈默. 中国对非援助与非洲国家经济增长的动态关系研究[J]. 经济学(季刊), 2022, 22(1): 175-196.)
- [26] Li X, Xu H, Chen X, et al. Potential of NPP-VIIRS Nighttime Light Imagery for Modeling the Regional Economy of China[J]. *Remote Sensing*, 2013, 5(6): 3057-3081.
- [27] Henderson J V, Storeygard A, Weil D N. Measuring Economic Growth from Outer Space[J]. *American Economic Review*, 2012, 102(2): 994-1028.
- [28] Doll C N H, Muller J, Morley J G. Mapping Regional Economic Activity from Night-Time Light Satellite Imagery[J]. *Ecological Economics*, 2006, 57(1): 75-92.
- [29] Beyer R C M, Hu Y, Yao J. Measuring Quarterly Economic Growth from Outer Space[Z]. World Bank, Washington DC, 2022: 9893.
- [30] Henderson V, Storeygard A, Weil D N. A Bright Idea for Measuring Economic Growth[J]. *American Economic Review*, 2011, 101(3): 194-199.
- [31] Li Min, Dai Yongwu. Internet Development and Business Environment Optimization Based on Panel Instrumental Variable Method [J]. *Journal of Dalian University of Technology(Social Sciences)*, 2022, 43 (2): 24-36.(李民, 戴永务. 互联网发展与营商环境优化——基于面板工具变量法的分析[J]. 大连理工大学学报(社会科学版), 2022, 43(2): 24-36.)