引文格式：崔阳,孙洪泉,夏积德. 杨凌区 1990-2020 年生态环境时空演变分析[J]. 地理空间信息, 2024, 22(6): 43-47. doi:10. 3969/j.issn. 1672-4623.2024.06.010

杨凌区 1990-2020 年生态环境时空演变分析

崔　阳[1]，孙洪泉[2]，夏积德[1]
（1. 杨凌职业技术学院，陕西 杨凌 712100；2. 应急管理部国家自然灾害防治研究院，北京 100085）

摘　要：基于 GEE 平台 Landsat 影像构建了杨凌区 1990-2020 年的遥感生态指数（RSEI），对生态环境进行监测评估，并结合 Sen's 斜率、Mann-Kendall 检验和 Hurst 指数进行时空过程分析。1990-2020 年，RSEI 均值从 0.67 降至 0.55，先下降后不变，呈现西高东低的空间分布格局；生态质量变差面积从 28.6%上升到 60.6%，集中在城建区，变差重心东移，变好重心西移；生态环境质量变化趋势稳定，占 68.59%，呈现持续性；社会经济发展对研究区生态环境质量存在负面影响，且人口指标的影响较大，得益于生态文明建设，2015 年后生态环境状况得到稳定。杨凌区生态环境质量先退化后动态稳定，应控制裸地和建设用地面积，改善该地区生态环境水平。

关键词：RSEI；生态环境质量；时序分析；Google Earth Engine；杨凌示范区
中图分类号：P208　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2024）06-0043-05

Spatio-temporal Evolution Analysis of Ecological Environment in Yangling District from 1990 to 2020

CUI Yang[1], SUN Hongquan[2], XIA Jide[1]
(1. Yangling Vocational and Technical College, Yangling 712100, China;
2. National Institute of Natural Disasters, MEMC, Beijing 100085, China)

Abstract: We constructed the remote sensing ecological index (RSEI) based on Landsat images of Google Earth Engine platform from 1990 to 2020 to monitor and evaluate the ecological environment, and combined with Sen's slope, Mann-Kendall test and Hurst index to analyze the spatio-temporal processes. From 1990 to 2000, the RSEI average declined to 0.55 from 0.67, declining first and then unchanged, showing a spatial distribution pattern of high in the west and low in the east. The area of ecological quality deterioration rose from 28.6% to 60.6%, concentrated in the urban construction area, with the gravity center of deterioration shifting eastward and the gravity center of improvement shifting westward. The trend of ecological environment quality change is stable, accounting for 68.59%, showing continuity. The socio-economic development has a negative impact on ecological environment quality in the study area, and the ecological and environmental conditions are stabilized after 2015. The ecological environment quality of Yangling District was first degraded and then dynamically stabilized, and the area of bare land and construction land should be controlled to improve the ecological environment level in the area.

Key words: RSEI, ecological environment quality, time series analysis, Google Earth Engine, Yangling demonstration area

生态环境是人类活动与社会发展的基础，其好坏直接影响生活质量[1]。党的十八大以来，党中央大力抓生态文明建设，推动绿色发展，美丽中国建设迈出重大步伐，未来将持续加大生态文明建设力度[2]。生态环境的评价方法通常采用指标的方法，由于生态环境的复杂性，以往的单因子指标已无法准确监测[3]，而综合因子指标能更好地反映实际状况[4]。同时，由于遥感技术的快速、大规模和周期性特点，已被广泛应用于生态领域，通过多时相遥感影像与时间序列分析相结合的方法能对研究区时空范围的地表变化特征进行有效记录与分析，成为生态环境监测的新模式[5]。如2006年环境保护部提出了 ecological index（EI）[6]，但在实际应用中存在数据获取不及时等问题，而及时动态监测生态环境状况，明晰变化趋势，对生态治理十分重要。在此基础上，徐涵秋[7]等提出了 RSEI（remote sensing ecological index），是综合了绿度、湿度、干度和地表温度的综合性生态遥感评价指标，数据获取简便，快速，有利于在区域尺度上进行生态质量变化的定量评价，得到了广泛的应用[8]。此前夏积德[9]等通过 RSEI 进行杨凌区生态质量监测，但未能进行长时间时

收稿日期：2022-10-13。
项目来源：国家重点研发计划资助项目（2017YFC1502402）；杨凌职业技术学院科技创新项目（ZK22-27）；杨凌职业技术学院教育教学改革研究项目（JG22030）。
第一作者简介：崔阳（1995—），硕士，助教，研究方向为遥感生态环境，E-mail：550865824@qq.com。

序研究，无法准确分析杨凌区多年生态环境的演化情况。此外，海量遥感数据获取和快速处理也是研究人员面对的巨大挑战，而谷歌地球引擎（GEE）通过Web的交互式开发环境实现对云端海量数据的访问、操作，给高精度长时间序列分析提供了极大便利[10]。

因此，本文主要研究目的是：①基于GEE平台构建杨凌区生态环境评价指标RSEI，②评估1990—2020年生态环境质量，③定性和定量分析杨凌区生态环境的时空变化过程，揭示其时空演化特征。研究结果为杨凌区生态环境可持续发展规划提供参考。

1 研究区概况

本文研究区为杨凌区，位于陕西关中平原中部，107.59°~108.08°E，34.14°~34.20°N，北高南低，面积135 km²。属于暖温带半湿润半干旱气候，年均降水量为637 mm，多集中在夏秋季，年均气温约13℃，是中国第一个农业高新技术产业示范区。

2 数据与方法

2.1 数据及预处理

数据采用在GEE云端存储的第二代Landsat遥感影像，地址为https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/landsat，分别选取1990—2010年的Landsat5TM，2015—2020年的Landsat8 OLI遥感影像。为避免云雨影响，采用每年6-9月影像进行中值合成，该方法被广泛应用于年度数据合成，可极大减小因云雨影响造成的影像污染，合成后的影像空间分辨率为30 m。本文数据采集和预处理均在GEE平台在线批量完成，主要包括合成、镶嵌、时间过滤、去云和指数计算等。降水、温度数据来自国家气象科学数据中心，降水处理为年累计降水、温度处理为年平均气温；人口、经济数据来自陕西省杨凌示范区统计局。图1详细展示了本文数据及预处理方法、RSEI模型建立以及时间序列研究方法。

2.2 RSEI模型构建

RSEI通过遥感数进行生态环境质量评价，耦合具有代表性的4个生态因子：绿度、湿度、温度和干度，并通过主成分分析（PCA）确定指标权重。RSEI取值范围（0~1）值越大，说明生态环境质量越好。公式如下：

$$PC_1 = f(\mathrm{NDVI}, \mathrm{Wet}, \mathrm{NDBSI}, \mathrm{LST}) \quad (1)$$

$$\mathrm{RSEI} = (PC_1 - PC_{1\,\min})/(PC_{1\,\max} - PC_{1\,\min}) \quad (2)$$

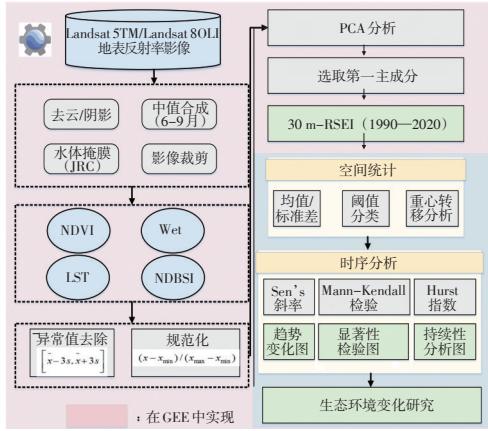


图1 流程图

式中，PC_1为第一主成分；$PC_{1\min}$与$PC_{1\max}$分别为第一主成分的最小值与最大值；NDVI、Wet、NDBSI和LST分别为归一化植被指数、湿度、干度和地表温度。

2.3 时间序列研究方法

时间序列研究方法包括Sen's斜率、Mann-Kendall非参数检验[11]。Sen's斜率用来判断长时间序列影像的变化趋势，Slope>0.05时，呈上升趋势；Slope<-0.05时，为下降趋势；-0.05<Slope <0.05时，认为变化不明显，处于稳定状态。MK检验用来判别趋势性是否显著，本文显著水平α取0.05，Z=1.96，并通常与Sen's斜率进行耦合，从而判断时间序列是否发生显著变化。为进一步判断时间序列未来发展趋势，采用Hurst指数进行定量化分析，值大于0.5表示未来趋势具有持续性，反之具有不确定性[12]。若进一步将Hurst指数与上述结果耦合，可判断未来变化趋势的显著性。

3 结果与分析

3.1 RSEI有效性分析

表1为RSEI主成分分析的特征值、特征向量和贡献率，1990—2020年第一主成分PCI贡献率72%以上，表明PC1包含了各生态因子大部分特征，同时4个指标都对PC1有相对稳定的贡献度，不会出现大小不一或正负不定的现象以至丢失特征信息。此外在PC1中，NDVI和Wet为正值表示对生态环境正面影响，NDBSI和LST为负值表示负面影响，与实际生态含义相符。上述结果均表明通过PC1构建的RSEI可以合理表达生态环境。

如表2所示，分别求取了各生态因子与RSEI的相关性，每年的平均相关度在0.81以上，表明RSEI综合了各生态因子大部分信息。其中，NDVI、Wet与RSEI呈正相关，多年均值分别为0.894 0与0.806 8，表明植被、土壤湿度对研究区生态环境起正向作用；而NDBSI、LST与RSEI呈负相关，多年均值分

表1　主成分分析结果（节选）

年份	生态因子	PC1	PC2	PC3	PC4
1990	NDVI	0.601 5	0.547 7	0.169 3	0.556 3
	Wet	0.371 6	0.519 4	0.698 7	0.322 3
	NDBSI	0.603 4	0.162 2	0.152 9	0.765 6
	LST	0.368 8	0.635 5	0.678 0	–0.021
	特征值	0.091 6	0.025 8	0.007 0	0.000 4
	贡献率	0.733 7	0.206 5	0.056 2	0.000 4
2020	NDVI	0.600 3	0.496 7	0.203 0	0.593 1
	Wet	0.400 6	0.432 1	0.776 7	0.222 3
	NDBSI	0.570 9	0.264 3	0.074 0	0.773 8
	LST	0.391 4	0.704 8	0.591 6	0.008 5
	特征值	0.079 6	0.019 0	0.010 7	0.000 3
	贡献率	0.726 3	0.173 5	0.097 4	0.002 9

别为–0.973 7与–0.710 7，表明干度与温度对研究区生态环境有负向效应。另外，NDBSI与RSEI的相关性最高，说明建筑与裸土的变化对研究区生态影响最高，表明人类活动对研究区生态环境的变化影响较大。

表2　1990–2020年RSEI与4个生态因子的相关系数

年份	NDVI	Wet	NDBSI	LST	平均相关度
1990	0.896 7	0.740 3	0.983 9	0.690 9	0.828 0
1995	0.911 1	0.886 1	0.968 1	0.706 4	0.867 9
2000	0.899 2	0.830 3	0.977 7	0.688 3	0.848 9
2005	0.863 5	0.790 8	0.969 2	0.754 0	0.844 4
2010	0.823 1	0.804 4	0.963 9	0.651 0	0.810 6
2015	0.945 2	0.846 5	0.982 2	0.790 9	0.891 2
2020	0.919 5	0.748 9	0.971 0	0.693 3	0.833 2
均值	0.894 0	0.806 8	0.973 7	0.710 7	P<0.01

3.2　基于RSEI的生态环境测度

为更好地分析RSEI评价效果，对其进行统计分析。由图3可知，1990—2020年RSEI在（0，1）范围内均有分布，整体均值在0.57左右，范围为0.54~0.67，标准差约为0.17，具有明显的下降趋势。其中，在1990—2005年间，RSEI值从0.67下降到0.54，为明显下降期；2005—2020年间，RSEI值基本均在0.54左右，呈较为平稳的状态，表明杨凌区整体生态环境质量在1990—2005年变差，而在2005—2020年间较为稳定。

为了更好分析杨凌区生态环境时空变化，进一步将RSEI以0.2为间隔，划分为差、较差、中、良与优5个等级。图4为1990—2020年RSEI空间分布与面积

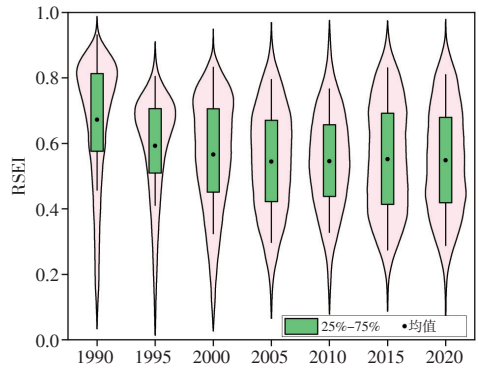


图2　1990—2020年杨凌RSEI统计结果

比例变化，可以看出在1990—2020年间，杨凌区生态环境质量先变差，然后趋于平稳，生态质量差和较差区域面积占比从1990年的28.6%上升到2020年的60.6%，增加32%，表明杨凌区生态环境质量整体下降且幅度较大；从空间分布来看，杨凌区生态环境质量差与较差的区域从小区域向大面积扩散，呈现明显的西高东低的空间分布格局。在1990—2000年，生态环境质量差与较差区域主要分布在杨凌区中部大寨镇，以及西南部地区；而在2005—2020年，生态环境质量差与较差区域在杨凌区西北部地区五泉镇，且在杨凌区中部分布日益变广，表明在该地区生态环境质量逐渐变差。

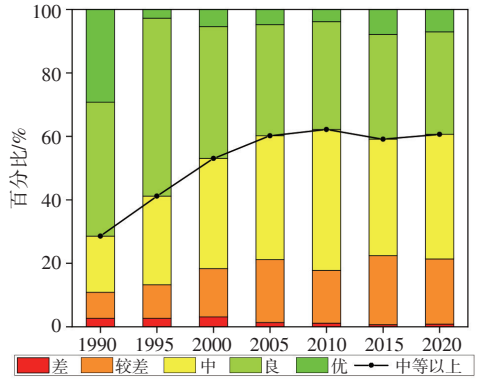


图3　RSEI的空间分布图及其统计结果

重心转移可以反映点群格局的总体位移特征，已被广泛用于土地利用、生态环境质量变化等方面的方向性差异及演变特征[13]。为分析1990—2020年RSEI各等级重心转移情况，绘制了重心移动路径图。如图5可知，1990—2020年各生态等级重心在杨凌区范围内进行迁移。“差”与“优”等级的重心转移较大，重心迁移均值分别为3.52 km与2.09 km；“较差”和“良”次之，分别为1.28 km与0.78 km；“中等”最小，为0.73 km。可以看出，“差”与“较差”重心存在明显东移，“差”等级尤为明显；而“良”与“优”重心则存在明显西移。表明在1990—2020年，杨凌区东部地区生态环境质量下降，而西部地区生态环境

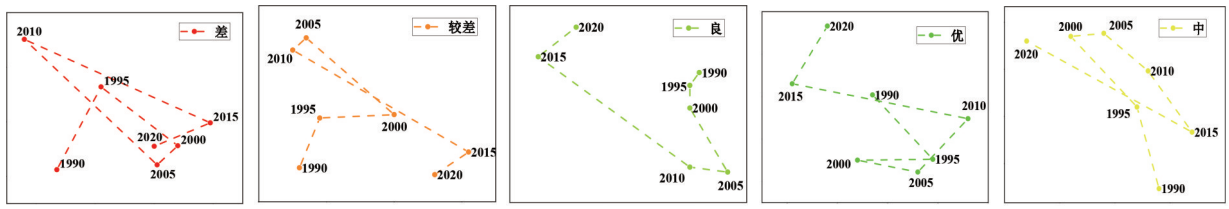


图4 RSEI各生态等级的重心转移

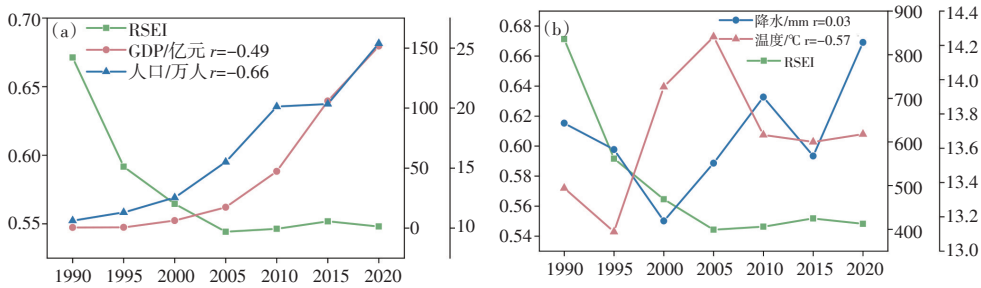


图5 RSEI与气象、社会经济曲线图

质量存在改善，这与前面生态环境时空变化分析结论相符。

3.3 杨凌生态环境时序演变分析

通过Sen's斜率和MK检验可以有效反映RSEI的时空变化趋势，进行杨凌区生态质量“格局-过程”的分析，结合Hurst指数可以进一步明晰其未来变化趋势，了解RSEI变化趋势和持续性分布格局与相应的面积占比。1990—2000年，杨凌区生态环境质量变化以稳定为主，面积占68.59%，分布于杨凌区大部分地区，而极显著稳定区域面积仅占4.98%，表明杨凌区在过去的30 a里，生态环境质量处于动态稳定；生态环境质量改善的面积（轻微增加与极显著增加）较少，仅占5.45%，分布零散，主要集中在西南部渭河流域地区与杨凌区北部边界地区；而生态质量变差区域面积（极显著减少与轻微减少）占比达20.98%，主要集中分布在杨凌区中部及东部部分地区，结合图1可知，该地区主要为城建区，初步表明人类活动是研究区生态质量变差的原因之一。

进一步计算Hurst指数可知，1990—2020年杨凌区RSEI的Hurst指数均值为0.67，趋势不确定地区面积仅占12.55%，且分布较为分散，表明杨凌区生态环境整体处于一个持续变化的状态。通过耦合Sen's与mk，可以定量化分析杨凌区未来变化趋势，持续稳定面积占比60.01%，而持续极显著稳定区域仅占4.13%，表明在未来几年内杨凌区生态质量将继续处于持续动态稳定的状态；未来持续增加的面积占4.99%，表明在未来这部分地区生态质量将持续改善；而持续减少面积达18.32%，集中分布在城建区，表明人类活动可能导致研究区生态质量进一步下降。

4 讨 论

图5a是1990—2020年气象站点年均气温和降水量的统计结果。可以看出1990—2020均温和降水总体均呈现上升趋势，RSEI与两者相关系数分别为-0.03与-0.57，表明降水对杨凌区生态环境的影响是较为微弱和有限的，而温度呈现较为明显的负相关关系，表明温度的变化对该地区生态环境影响较大，这与前文RSEI与LST相关性结论相同。

由上述结论可知，1990—2020年杨凌区生态环境质量变差的区域集中体现在城建区。图5b为杨凌区相应统计数据与RSEI变化曲线图，其中1990年、1995年来自何秀玲[14]的研究成果。其他年份数据来自陕西省统计年鉴。可以看出，1990—2020年，RSEI呈先减小再稳定的趋势，而GDP与人口指标则呈现明显的上升趋势，且RSEI与两者相关系数分别为-0.49与-0.66，呈明显负相关关系，表明人口与经济的快速增长对该区生态环境质量产生了负面影响，且人口指标的影响较大。但到了2015年，随着GDP与人口的增长，RSEI不再发生明显变化，表明社会经济的发展对生态环境的变化影响显著降低，这可能得益于十八大以来生态文明建设政策的颁布与实施，更多的社会经济与人口投入生态环境建设，生态环境状况得到稳定发展[2]。

5 结 语

本文基于GEE中Landsat遥感数据构建了杨凌区1990—2020年的生态指数（RSEI），证明RSEI可以合理表达该区生态环境，从而进行生态环境监测与

评估，得出：1990—2020年，该区生态环境质量呈现先明显下降后动态稳定的发展规律，存在西高东低空间分布格局；生态质量退化区域集中在城建区，且存在退化重心东移现象；变化趋势稳定，且以持续动态稳定为主。此外，社会经济增长对生态环境质量产生负面影响，再次表明人类活动是研究区生态质量变差的原因之一，但得益于十八大以来生态文明建设大力实施，该区生态环境状况得到了稳定发展。

此外，干度指标对RSEI影响最大，表明该区生态环境质量主要受到裸地和建筑用地面积影响。因而，应合理控制裸地和建设用地面积，改善生态环境水平。

需要指出的是，RSEI时空变化的因素分析中仅考虑了人口、GDP和气象数据等宏观数据，未补充对土地利用数据对RSEI变化的影响，在之后的工作中，会对该部分工作进行进一步分析说明。

参考文献

[1] 张养安,张鑫,江仕嵘. 基于GIS与RS的杨凌区土壤侵蚀时空变异性研究[J]. 水土保持学报,2018,32(6):130-133

[2] 陶火生. 十八大以来中国共产党建设生态文明制度体系的成就与经验[J]. 福建师范大学学报(哲学社会科学版),2022(3):59-65

[3] 孙灏,胡佳琪,崔雅静,等. 基于多源遥感数据的生态系统服务功能时空演变趋势分析[J]. 测绘通报,2021(4):1-7

[4] 张仙,陈理,马燕妮,等. 基于GIS和RS的银川市城市生态环境质量动态监测与评价[J]. 安全与环境学报,2021,21(6):2 854-2 864

[5] 徐涵秋. 城市遥感生态指数的创建及其应用[J]. 生态学报,2013,33(24):7 853-7 862

[6] 厉彦玲,朱宝林,王亮,等. 基于综合指数法的生态环境质量综合评价系统的设计与应用[J]. 测绘科学,2005(01):89-91

[7] 徐涵秋. 区域生态环境变化的遥感评价指数[J]. 中国环境科学,2013,33(5):889-897

[8] Hu X, Xu H. A New Remote Sensing Index for Assessing the Spatial Heterogeneity in Urban Ecological Quality: A Case from Fuzhou City, China[J]. Ecological Indicators, 2018(89):11-21

[9] 夏积德,高焕霖,李峰博,等. 基于遥感生态指数模型的杨凌农业高新技术产业示范区生态环境评价[J]. 水土保持通报,2019,39(1):167-171

[10] 孔祥生,钱永刚,张安定. Google Earth Engine云平台下的遥感实验教学改革与实践[J]. 地理空间信息,2021,19(10):137-143

[11] Xu H, Wang Y, Guan H, et al. Remote Sensing Detecting Ecological Changes with a Remote Sensing Based Ecological Index (RSEI) Produced Time Series and Change Vector Analysis[J]. Remote Sensing,2019,11(20):2 345

[12] 钟欣呈,许泉立. 基于RSEI模型的玉溪市生态环境变化监测与评价[J]. 水土保持研究,2021,28(4):350-357

[13] 李蕊,陈国清,李玮贤,等. 基于遥感生态指数的神东矿区1995—2020年生态环境质量的时空变化特征分析[J]. 水土保持通报,2021,41(3):28-32

[14] 何秀玲. 杨凌“农科城”产业结构及其优化研究[D]. 西安:西安理工大学,2005

（上接第33页）

[9] Du P, Weber R, Luszczek P, et al. From CUDA to OpenCL: Towards a Performance-Portable Solution for Multi-platform GPU Programming[J]. Parallel Computing,2012,38(8):391-407

[10] 郭宇达,朱欣焰,禹维,等. 基于Spark计算框架的路网核密度估计并行算法[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2020,45(2):289-295

[11] Zhang G, Zhu A X, Huang Q. A GPU-accelerated Adaptive Kernel Density Estimation Approach for Efficient Point Pattern Analysis on Spatial Big Data[J]. International Journal of Geographical Information Science,2017,31(10):2 068-2 097

[12] Michailidis P D, Margaritis K G. Accelerating Kernel Density Estimation on the GPU Using the Cuda Framework[J]. Applied Mathematical Sciences,2013,7(30):1 447-1 476

[13] 禹文豪,艾廷华. 核密度估计法支持下的网络空间POI点可视化与分析[J]. 测绘学报,2015,44(1):82-90

[15] Luo Y, Duraiswami R. Canny Edge Detection on Nvidia Cuda[C]//2008 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops,2008:1-8

[16] LuebkeD.Cuda:Scalable ParallelProgrammingforHigh-performance Scientific Computing[C]//2008 5th IEEE International Symposium on Biomedical Imaging:From Nano to Macro,2008:836-838

[17] Friendly M. A Brief History of Data Visualization[M].Handbook of Data Visualization. Springer, Berlin, Heidelberg, 2008:15-56

[18] Shoshany B. A C++17 Thread Pool for High-performance Scientific Computing[J]. arXiv Preprint arXiv:2105,00613,2021