

基于Copula函数的我国绿色债券市场与绿色股票市场的极值风险测度

鲁训法, 黄楠, 叶智韬, 崔海蓉

南京信息工程大学管理工程学院风险治理与应急决策研究院, 江苏 南京

收稿日期: 2022年7月11日; 录用日期: 2022年7月28日; 发布日期: 2022年8月8日

摘要

本文运用基于极值分布的Copula-GARCH模型研究了我国绿色债券市场和绿色股票市场之间的关联特征及极值风险特征。研究结果显示, 该模型能准确度量两者之间的负向相关结构, 并能清晰刻画由绿色债券市场和绿色股票场所构造的投资组合的在险价值, 为我国绿色金融市场风险特征的发展提供了决策参考依据。

关键词

极值风险, Copula函数, 绿色金融

The Extreme Risk Measurement of Green Bond and Green Stock Markets in China Based on Copula

Xunfa Lu, Nan Huang, Zhitao Ye, Hairong Cui

Research Center of Risk Management and Emergency Decision-Making, School of Management Science and Engineering, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing Jiangsu

Received: Jul. 11th, 2022; accepted: Jul. 28th, 2022; published: Aug. 8th, 2022

Abstract

This paper investigates the correlation and extreme risks of green bond and green stock markets in China using the Copula-GARCH model with extreme value distribution. The result shows that the model can accurately measure the negative correlation structure between green bonds and

green stock markets and clearly characterize the Value at Risk of the portfolio constructed by the two markets. This provides a decision-making reference for the development of risk characteristics of the Chinese green financial market.

Keywords

Extreme Risks, Copula, Green Finance

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

中国绿色金融作为引导资金流向绿能产业、应对气候变化和环境恶化、推进可持续发展的关键经济活动,对实现我国“30·60”双碳战略目标,加快构建清洁低碳循环发展经济具有重要的意义。在《关于构建绿色金融体系的指导意见》《关于加快建立健全绿色低碳循环发展经济体系的指导意见》和《关于深化生态保护补偿制度改革的意见》等战略部署下,我国绿色金融市场不断完善,绿色相关金融投资产品不断丰富,形成了包括绿色债券、绿色股票、绿色信贷、绿色基金、绿色保险及碳金融等各类绿色金融业务。其中,绿色债券市场与绿色股票市场的发展尤为突出。根据《中国绿色债券市场年度报告 2021》显示,截至 2021 年底,我国在全球市场累计发行贴标绿色债券约 2.1 万亿人民币。而截至 2021 年底,我国已累计发布约 80 个绿色股票指数,主要包括可持续发展指数、环保产业指数及绿色环境指数等。两者的快速发展,对推进我国绿色金融市场的建设与完善起着重要的作用。因此,探究两者之间的关联特征以及两者所构造的投资组合风险特征,有助于具有绿色投资偏好的投资者进行合理的投资决策,有助于政府相关部门对绿色金融市场进行全面理解,以制定符合我国双碳战略目标的风险监管政策。

2. 文献综述

绿色债券作为绿色金融的一种创新金融工具,能够为企业环境保护必要的资金支持,引导更多资金流向环境友好项目,是建设生态文明的重要推动力。绿色股票是对债券、商业票据及贷款的补充,被贴绿色标签的公司最低要求是超过 50% 的收入和投资来自绿色活动,对于促进上市公司披露环境信息、引导社会资本进入环保领域、稳定资本市场运行具有显著作用。作为两种不同类型的金融工具,在信息化高度发展的今天,两者之间的信息传递速度越来越快,关联程度越来越紧密。因此,研究两者之间的关联效应及所构造投资组合的极值风险特征,对金融市场参与者而言,有利于进行合理的资产配置与风险规避。当前,国内外关于绿色债券和绿色金融的研究主要涉及关联特征及风险溢出效应等,而涉及两者的极值风险特征的文献则极为少见。例如 Sinha 等(2021) [1]运用分位数回归和小波分解研究了绿色债券与环境社会治理(ESG)相关股票之间的关系,研究结果发现绿色债券融资对 ESG 股票具有逐渐增强的负向传递影响。陈晓莹(2020) [2]运用 MI-TVP-SV-VAR 模型和 DCC-MIDAS 模型研究了绿色债券市场与绿色股票市场之间的动态关联效应,研究发现我国绿色股票市场与绿色债券市场之间具有时变关联效应,并且两者之间的交互影响具有滞后负向特征。而罗雄(2020) [3]则运用 DCC-GARCH 模型研究了绿色债券市场和绿色股票市场之间的动态关联关系,并运用 SVAR 模型研究了两个市场之间的风险溢出效益,研究发现两者之间总体呈现一个负相关关系,且两者之间具有显著的双向风险溢出效应。敖蕊(2020) [4]运

用 Copula 函数研究了我国绿色债券市场和股票市场之间的联动关系, 研究发现绿色债券市场与能源市场的相关关系总体不显著, 但是在 2020 年 3 月, 由于全球疫情的影响, 两者之间具有显著的负向相关关系。王昊(2022) [5]运用小波分析研究了我国绿色债券与绿色能源股票之间的联动效应, 研究发现绿色债券与绿色能源之间缺乏关联性。Reboredo 等(2022) [6]运用 Copula 模型研究了绿色债券与低碳股票所构造的投资组合的期望短缺(ES)。研究发现绿色债券与低碳股票具有负向相关关系, 因而其投资组合整体风险被降低了。

鉴于当前文献很少研究绿色债券和绿色股票之间的极值风险问题, 本文将运用基于极值分布的 Copula-GARCH 模型分析我国绿色债券市场和绿色股票市场之间的关联特征, 并进而分析两者所构造投资组合的在险价值(VaR), 以探究我国绿色金融市场的风险特征, 为促进我国绿色金融更好更长足发展提供决策建议。

3. 数据与模型

本文采用中债——中国绿色债券指数(GB)和中证财通中国可持续发展 100(ESG)指数作为代理变量。样本数据为 2016 年 1 月 4 日到 2022 年 5 月 31 日的每日收盘价格。匹配同日交易数据后, 共 1557 个样本观测值。数据来源于 Wind 数据库。考虑金融时间序列的平稳性要求, 本文采用对数收益数据进行分析, 记为 $r_{g,t}$ 和 $r_{e,t}$ 。

Table 1. Descriptive statistics

表 1. 描述性统计量

变量	$r_{g,t}$	$r_{e,t}$
均值	0.000170	0.000147
标准差	0.000819	0.012264
JB 统计量	26795.27***	2100.384***
ADF 检验	-16.2957***	-40.84305***
ARCH 检验	37.66459***	16.74224***

注: ***表示 1% 的显著性水平。

表 1 显示绿色债券指数的平均收益大于可持续发展 100 指数的平均收益, 而前者的标准差却小于后者, 这说明绿色债券市场的总体波动要比绿色股票市场低。JB 统计量显示两个序列都显著拒绝了正态性假设, 并且 ADF 结果表明两个序列都是平稳序列。ARCH 检验显示序列具有显著的异方差性质。因此, 本文将运用带有极值分布的 ARMA-GARCH 模型来拟合平稳的观测值序列, 并进一步运用具有厚尾特征的 t-copula 模型拟合两者之间的相关结构。具体模型如下:

ARMA-GARCH 模型:

$$\begin{cases} r_t = \phi_0 + \sum_{i=1}^n \phi_i r_{t-i} + \varepsilon_t - \sum_{j=1}^m \theta_j \varepsilon_{t-j} \\ \varepsilon_t = \sqrt{h_t} e_t, e_t \stackrel{i.i.d}{\sim} f(0,1) \\ h_t = \lambda_0 + \sum_{i=1}^p \eta_i h_{t-i} + \sum_{j=1}^q \lambda_j \varepsilon_{t-j}^2 \end{cases} \quad (1)$$

其中, e_t 为均值为 0, 方差为 1 的 t 分布, 即

$$f_{\nu}(e_t) = \frac{\Gamma\left(\frac{\nu+1}{2}\right)}{\sqrt{\pi(\nu-2)}\Gamma\left(\frac{\nu}{2}\right)} \left(1 + \frac{e_t^2}{\nu-2}\right)^{-\left(\frac{\nu+1}{2}\right)} \quad (2)$$

在 ARMA-GARCH 模型的参数估计基础上, 引入极值分布对模型残差拟合分段分布函数, 并用于后续 copula 函数的概率积分转换, 上下 10% 的数据服从极值帕累托分布(GPD), 中间 80% 的数据服从正态分布, 即

$$\begin{cases} f_{(\beta,\xi)}(z) = \frac{1}{\beta} \left(1 + \frac{\xi z}{\beta}\right)^{\left(\frac{1}{\xi}-1\right)}, z \geq u_1 \\ f(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{z^2}{2}}, u_2 < z < u_1 \\ f_{(\beta,\xi)}(-z) = \frac{1}{\beta} \left(1 + \frac{-\xi z}{\beta}\right)^{\left(\frac{1}{\xi}-1\right)}, z \leq u_2 \end{cases} \quad (3)$$

t-copula 函数:

Copula 函数突破了传统多元分布模型中边际分布相同的限制, 在满足一定的假设条件下, 可以将不同类型的边际分布与 copula 函数连接起来, 从而构造出具有良好特性的多元联合分布。根据 Sklar 定理, 设 F 为二元联合分布函数, 其对应的边际分布为 $F_1(\bullet)$ 和 $F_2(\bullet)$, 那么存在一个二元 copula 函数 $C:[0,1]^2 \rightarrow [0,1]$, 使得:

$$F(x_1, x_2) = C(F_1(x_1), F_2(x_2)) \quad (4)$$

如果 $F_1(\bullet)$ 和 $F_2(\bullet)$ 连续, 则 copula 函数唯一; 反之, 如果 $F_1(\bullet)$ 和 $F_2(\bullet)$ 为一元分布函数, C 为二元 copula 函数, 则 F 是边际分布 $F_1(\bullet)$ 和 $F_2(\bullet)$ 的二元联合分布函数。

在上述 Sklar 定理的支持下, 现有文献已构造出适用于不同场景的 copula, 比如乘积 copula、椭圆 copula、阿基米德 copula、藤 copula 等等。Copula 函数不同于传统的线性相关关系, 它能够更清晰地度量出不同变量之间的相关结构, 并且在单调转换中具有转移不变形的特征。因此, 在多元投资组合分析中, copula 的使用越来越广泛。其中 t-copula 函数因为具有良好的厚尾特征性质, 在实际的金融风险分析中往往被证明是有效的。因此, 本文将运用 t-copula 函数构造绿色债券指数和可持续发展 100 指数之间的二元联合分布, 以刻画两者之间的相关结构, 并为进一步度量由两者所构造的投资组合的在险价值(VaR)。

$$C_T(u, v; \rho, \nu) = T_{\nu, \rho}(T_{\nu}^{-1}(u), T_{\nu}^{-1}(v); \rho, \nu) = \int_{-\infty}^{T_{\nu}^{-1}(u)} \int_{-\infty}^{T_{\nu}^{-1}(v)} \frac{\Gamma((\nu+2)/2)}{\nu\pi\Gamma(\nu/2)\sqrt{1-\rho^2}} \left\{1 + \frac{s^2 - 2\rho st + t^2}{\nu(1-\rho^2)}\right\}^{-\frac{(\nu+2)}{2}} ds dt \quad (5)$$

其中, $u_t = F_1(e_{g,t})$ 和 $v_t = F_2(e_{e,t})$ 为概率积分转换, $F_1(\bullet)$ 和 $F_2(\bullet)$ 为满足公式(3)的 GPD。由公式(1)、(2)、(3)、(5)构成的模型为基于极值分布的 Copula-GARCH 模型。

Copula-GARCH 模型的估计通常使用两阶段分布极大似然估计(IFM)实现, 即, 首先估计边际分布的参数, 如下:

$$\hat{\theta}_g = \arg \max \sum_{t=1}^T \ln f(e_{g,t}; \theta_g) \quad (6)$$

$$\hat{\theta}_e = \arg \max \sum_{t=1}^T \ln f(e_{e,t}; \theta_e) \quad (7)$$

然后在概率积分转换下, 估计 copula 的参数, 如下:

$$\hat{\theta}_c = \arg \max \sum_{t=1}^T \ln c(T_v^{-1}(u), T_v^{-1}(v); \theta_c) \quad (8)$$

在险价值价值(VaR)是当前最为常用的金融市场风险度量工具, 以一种简单直观方便的方式量化金融市场极端风险, 即在一定时期内, 在显著性水平 q 的情况下, 金融市场潜在的最大可能损失或最大风险。假设 x 为某一金融变量, $F_t(x)$ 为 t 时刻的累计分布函数, 则, 该金融变量的 VaR 为

$$\text{VaR}_t(q) = -\inf \{x | F_t(x) \geq q\} \quad (9)$$

本文的 VaR 计算, 在 Copula-GARCH 模型的基础上采用蒙特卡洛模拟来实现。即, 根据公式(6)、(7)、(8)求出模型参数, 然后运用蒙特卡洛模拟方法得到 m 组 (u, v) , 将模拟出的 (u, v) , 带入公式(1)、(2)和(3), 即可得到模拟的 (r_g, r_e) , 然后按照等权重方法计算出投资组合的收益 r_c , 然后累计分布函数 F , 并求出给定显著性水平 q 下的 VaR。

4. 实证分析

根据 GB 指数和 ESG 指数的样本数据和公式(1)和(2), 以及 BIC 准则, 可得边际分布最优模型的参数估计如表 2 所示。

表 2 显示绿色债券指数的对数收益服从 ARMA(1,1)-GARCH(1,1)模型, 而可持续发展指数的对数收益服从 AR(0)-GARCH(1,1)模型。即, 绿色债券指数的对数收益不仅受到自身滞后一期值的影响, 同时还受到滞后一期移动平均的影响; 而可持续发展指数的对数收益没有自回归效应, 仅受到异方差效应的影响。 $r_{g,t}$ 中残差 t 分布中的自由度小于 $r_{e,t}$ 残差 t 分布中的自由度, 意味着可持续发展指数具有更高的峰度。 $r_{g,t}$ 的上尾 GPD 分布中的形状参数为正且显著, 而 $r_{e,t}$ 的上尾 GPD 分布中的形状参数为正, 但不显著。两者下尾 GPD 分布中的形状参数都为正值, 且不显著。 $r_{g,t}$ 的上尾 GPD 尺度参数大于 $r_{e,t}$ 的 GPD 尺度参数, 但是下尾却相反。根据表 2 模型的估计结果, 可得到 ARMA-GARCH 模型的残差, 进而通过分段分布函数求得模型的边际分布概率值。

Table 2. Estimation of ARMA-GARCH
表 2. ARMA-GARCH 模型估计结果

参数	$r_{g,t}$	$r_{e,t}$
ϕ_0	$1.76572 \times 10^{-4***}$	$5.65203 \times 10^{-4***}$
ϕ_1	0.60212***	/
θ_1	0.23665***	/
ν	4.32955***	5.05505***
λ_0	4.74533×10^{-9}	2.67544×10^{-6}
λ_1	0.06048	0.07267***
η_1	0.90994***	0.91087***
$\xi^{\text{上}}$	0.330438***	0.058765
$\beta^{\text{上}}$	0.684593***	0.528912***
$\xi^{\text{下}}$	0.032864	0.081280
$\beta^{\text{下}}$	0.757193***	0.826371***
BIC	-12.180	-6.209

注: ***表示 1% 的显著性水平。

依据残差边际分布的概率值，以及概率积分转换公式，可估计 t-copula 函数的参数，如下：

Table 3. Estimation of t-copula
表 3. t-copula 函数估计结果

t-copula	ρ	ν
ϕ_0	-0.02920	11.4815 ^{***}

注：***表示 1% 的显著性水平。

由表 3 的结果可知，GB 与 ESG 的相关性参数为-0.02920，即两者具有弱负相关性，这一结果与 Reboredo 等(2022) [6]的结果一致。这表明，两者在构造投资组合时，具有较好的风险分散效应，适合配置在同一个投资组合中。t-copula 中的 ν 为 11.4815，显著大于 0，表明两者的具有更厚的尾部。

在以上模型的估计结果上，运用蒙特卡洛模拟方法计算未来 1 一个交易日的 VaR。其中本文采用的蒙特卡洛模拟次数 $m = 10000$ ，组合权重各为 50%。则，给定显著性水平 $q = 1\%$ ， $q = 5\%$ 和 $q = 10\%$ ，未来两天每个交易日的 VaR 如下：

Table 4. VaR
表 4. VaR

置信水平	99%	95%	90%
VaR ₂₀₂₂₋₀₅₋₃₀	0.01855583	0.009955923	0.007279906
VaR ₂₀₂₂₋₀₅₋₃₁	0.01910101	0.010282419	0.007355339

表 4 显示，由绿色债券指数和可持续发展 100 指数所构造的投资组合未来两个交易日在显著性水平为 1%、5% 和 10% 下的 VaR 分别为 0.01855583 和 0.01910101、0.009955923 和 0.010282419、0.007279906 和 0.007355339，有效地反映了在等权重组合策略下，两者的投资组合风险。基于这一结果，投资者可以根据自身风险承受能力，适时调整资产权重配置，直到投资组合的收益达到最优为止。政策制定者可以根据这一结果以及巴塞尔协议相关规定，出台相关政策，进一步完善绿色金融市场监管机制，促进绿色金融发展。

5. 结论

根据我国“十四五”规划中“碳达峰、碳中和”战略目标，发展绿色低碳循环经济是我国经济转型的重要目标之一。在各类政策的支持下，我国绿色金融蓬勃发展。然而，相较于传统金融而言，中国绿色金融的发展仍处于发展阶段，其通过资产定价和资金引流以强化污染防治、促进绿色发展的作用远未充分发挥。基于此，本文研究了绿色金融中的两种金融工具：绿色债券和绿色股票的关联特征及极值风险。研究结果发现，绿色债券和绿色股票具有负向相关关系，因此适合构造投资组合。同时，根据基于极值分布的 Copula-GARCH 模型，度量了该投资组合未来交易日在 99%、95% 和 90% 置信水平下的 VaR。研究结果显示，未来两个交易日，由绿色债券指数和可持续发展 100 指数所构造的投资组合的 VaR 分别为 0.01855583 和 0.01910101、0.009955923 和 0.010282419、0.007279906 和 0.007355339。该模型有效地反映了绿色债券市场和绿色股票市场的联合风险。

基金项目

教育部人文社会科学青年基金项目(17YJC790102)、国家自然科学基金(71701104)、江苏省社科基金一般项目(20GLB008)、江苏省研究生实践创新计划项目(SJCX21_0383)。

参考文献

- [1] Sinha, A., Mishra, S., Sharif, A. and Yarovaya, L. (2021) Does Green Financing Help to Improve Environmental & Social Responsibility? Designing SDG Framework through Advanced Quantile Modelling. *Journal of Environmental Management*, **292**, Article ID: 112751. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112751>
- [2] 陈晓莹. 绿色股票和绿色债券的时变动态关联效应分析[D]: [硕士学位论文]. 南昌: 南昌大学, 2020.
- [3] 罗雄. 我国绿色债券与绿色股票市场间联动性及风险溢出效应研究[D]: [硕士学位论文]. 济南: 山东大学, 2020.
- [4] 敖蕊. 基于 Copula 的我国绿色债券市场和证券市场联动关系研究[D]: [硕士学位论文]. 青岛: 中国石油大学, 2020.
- [5] 王昊. 绿色债券、绿色股票与其他主要资产联动性研究[J]. *北方经贸*, 2022(3): 103-106.
- [6] Reboredo, J.C., Ugolini, A. and Ojea-Ferreiro, J. (2022) Do Green Bonds De-Risk Investment in Low-Carbon Stocks? *Economic Modelling*, **108**, Article ID: 105765. <https://doi.org/10.1016/j.econmod.2022.105765>