

## 基于 Nelson-Siegel 模型的 10-30Y 国债期货套利策略研究

国投期货研究院

王锴 期货投资咨询号 Z0016176

张婧婕 期货从业资格号 F03116832

相比于现券交易，国债期货在资金占用和流动性方面具有一定优势，这些优势使其成为管理利率风险和寻求套利机会的有效工具。国债期货市场通常具有比现券市场更高的流动性，使得投资者可以更快地进出头寸，降低了交易成本和时间成本，在最近市场风险偏好较低的背景下，国债期货的波动性有所增加，尤其是长期国债期货的波动更为显著，30 年期与 10 年期国债期货的利差变化幅度逐渐增大，为国债跨品种套利创造了有利条件。然而，国债期货的利差变化频繁，这种波动性对套利策略构成了挑战。因此，准确预测利差的变动方向变得尤为关键，它直接关系到套利策略的制定和执行，有效的利差择时能力是实现成功套利的重要前提。

基于多方面的分析，我们尝试构建 30 年与 10 年期国债的期限套利策略。具体地，文章将经典 Nelson - Siegel 三因子与宏观因子相结合对国债期限利差进行预测，主要思路为：首先，我们选取国债即期收益率数据，采用 Nelson-Siegel 三因子模型拟合债券收益率曲线，运用 VAR 方法对未来收益率曲线进行滚动预测，根据债券收益率的预测变动方向构建国债 NS 套利策略，其中 10 年与 30 年期国债根据固定 2.8:1 的比率构建久期中性组合。之后，我们尝试引入宏观因素，使用机器学习与回归模型进行特征筛选并跟踪预测宏观因子的边际变化。最后，我们将 NS 模型与宏观因素相结合，参考宏观因子变动对 NS 套利策略信号进行修正，搭建基于 NS 与宏观因子的国债期限套利策略。

策略表现方面，基于动态预测的 NS 套利策略在样本内外的年化收益率分别为 10.31% 与 13.02%，夏普比率分别为 1.53 与 3.47。经宏观因子调整后的 NS 宏观套利策略在样

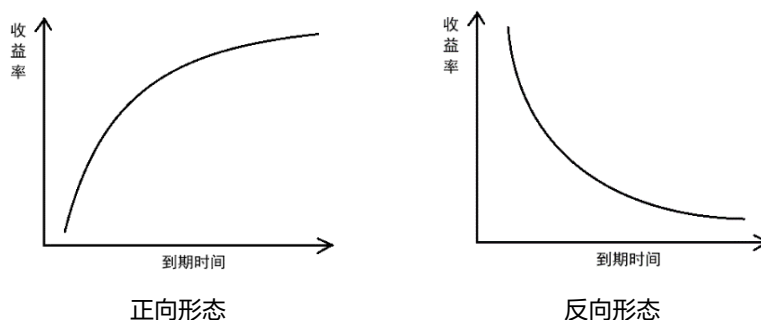
本内外年化收益率分别为 12.27%与 13.32%，策略夏普比分别为 1.77 与 3.56，组合在收益与风险收益表现方面均有所提升，策略年化开仓次数约 55 次，开仓平均持仓天数在 1-2 天左右。

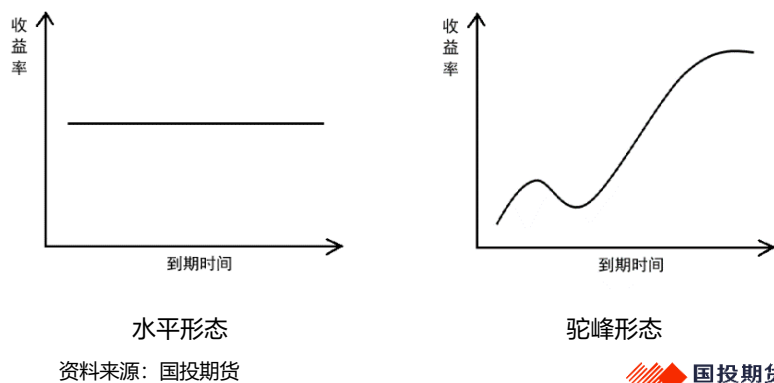
## 1 利率期限结构与收益率曲线形态

国债期限策略的核心是对利率期限结构进行分析与预测，利率期限结构反应了不同期限资金的市场成本，它可以通过收益率曲线来表示。收益率曲线边际走平时反应了长短利差的收窄，可以通过买长债卖短债进行套利，而当曲线边际走陡则预示着利差扩大，可以构建买短债卖长债的套利策略。

收益率曲线通常表现为以下几种形态，1) 正向的收益率曲线，收益率曲线呈上凸形态居多，曲线整体斜率为正，反应出投资者对于长期债券要求的风险补偿。2) 反向的收益率曲线，该形态通常出现在市场对未来经济预期较为悲观时，由于大量资金会倾向于配置长债资产避险，相应推高长债价格使得收益率被压低，使得曲线斜率走平甚至达到负斜率状态。3) 水平的收益率曲线，这类形态一般在过渡阶段出现，当短端收益率快速抬升（熊平）或长期收益率快速下降（牛平）时曲线会短期接近水平形态。4) 驼峰的收益率曲线，这里驼峰指的是中间期限债券的收益率高于两边期限收益率，使得曲线出现局部极值，这类情况较少见，有可能是债券流动性溢价所致。

图表 1 多种形态的收益率曲线





## 2 收益率曲线的拟合方法

历史研究中尝试采用了多种方法拟合收益率曲线，其中包括：1）非参数拟合：包括区间差值，样条拟合平滑等；2）参数模型拟合：主要包括 Nelson-Siegel（NS）模型及其扩展形式 Nelson-Siegel-Svensson（SV）模型等，SV 模型是 Svensson(1994)在 NS 模型的基础上加入了新的参数，使模型对于更为复杂利率期限结构也能实现较优拟合。3）经验法：基于历史经验进行估计推断；4）机器学习法：包括神经网络，随机森林等模型算法。

本文中我们选择采用 Nelson-Siegel（NS）模型来拟合收益率曲线，主要源于以下几点考量：1）模型复杂性：NS 模型可以通过较少的参数来刻画收益率曲线的形态，相比于 SV 模型其参数稳定性更优。2）灵活度：NS 模型可以刻画多种利率期限结构，模型具有较强适应性和灵活度。3）经济含义：NS 模型中参数具有明确的经济学含义，模型具有较高解释度。

### 2.1 Nelson-Siegel 模型简介

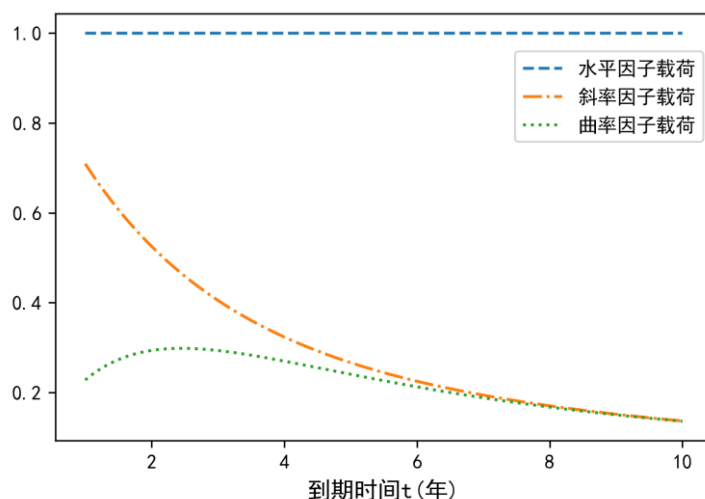
NS 模型为 Nelson 和 Siegel 在 1987 年提出的参数模型，其通过远期瞬时利率推导出即期利率函数，实现对收益率曲线的静态建模，式 2-1 为 NS 模型的计算表达式，主要参数共有四个，其中  $\beta_0$  定义为水平因子， $\beta_1$  为斜率因子， $\beta_2$  为曲度因子， $\theta$  用于控制参数影响的衰减速度，决定曲线的斜率与曲度随时间变化的快慢， $\theta$  越大则曲度变化速度越慢，可

以更好的拟合长期利率走势。

$$r(t) = \beta_0 + \beta_1 \left( \frac{1 - e^{-\frac{t}{\theta}}}{\frac{t}{\theta}} \right) + \beta_2 \left( \frac{1 - e^{-\frac{t}{\theta}}}{\frac{t}{\theta}} - e^{-\frac{t}{\theta}} \right) \quad (2-1)$$

在 NS 模型中,  $(\beta_0, \beta_1, \beta_2)$  为影响债券收益率的三个隐含因子, 对应因子载荷为  $(1, \left( \frac{1 - e^{-\frac{t}{\theta}}}{\frac{t}{\theta}} \right), \left( \frac{1 - e^{-\frac{t}{\theta}}}{\frac{t}{\theta}} - e^{-\frac{t}{\theta}} \right))$ 。其中, 当期限趋近于无穷时  $(t \rightarrow \infty)$ , (1)  $\beta_0$  的因子载荷恒定为 1, 说明水平因子  $\beta_0$  对收益率的影响不会随时间衰减, 同时其对于不同期限的影响程度相同, 可视为长期影响因子; (2)  $\beta_1$  斜率因子载荷从 1 逐渐衰减至 0, 说明其短期影响强于长期, 可视为短期影响因子; (3)  $\beta_2$  曲率因子载荷先升后降, 其对于中间期限收益率影响高于长期与短期, 可视为中期影响因子。

图表 2 NS 模型中因子载荷变化



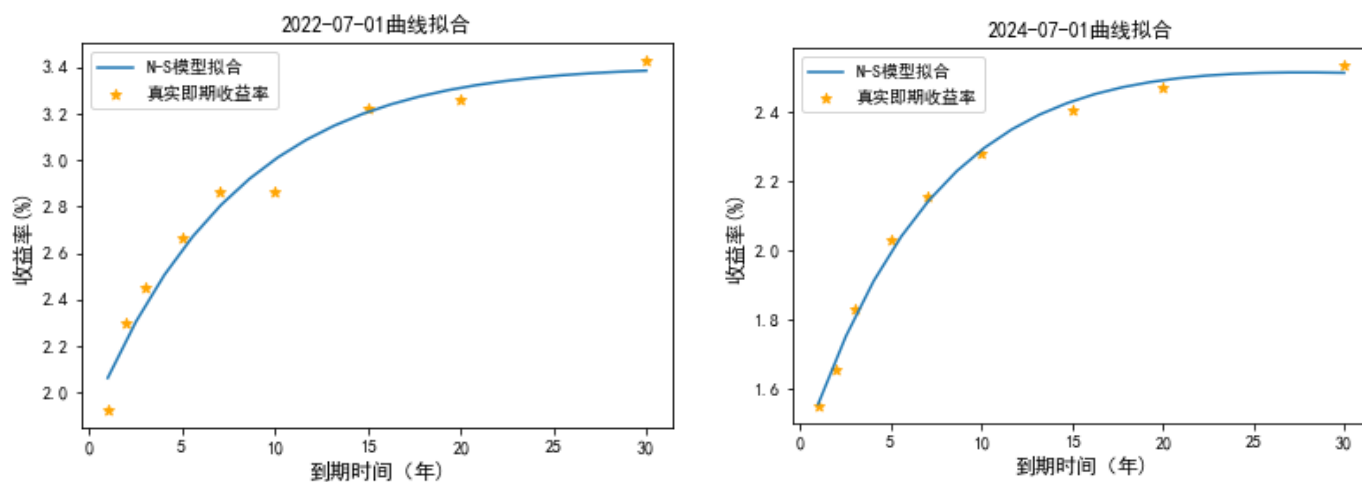
资料来源: 国投期货

### 3 基于 NS 模型的国债跨期套利策略

该部分我们基于 NS 模型构建 10 年与 30 年期国债套利策略, 首先我们使用 1Y、2Y、3Y、5Y、7Y、10Y、15Y、20Y、30Y 共 9 个期限的中债国债即期收益率数据通过 NS 模型拟合构造收益率曲线, 其次我们使用时间序列模型构建动态 NS 模型, 滚动预测 10Y 与 30Y 债券收益率的变化方向, 之后基于预测方向生成策略信号。数据方面原始

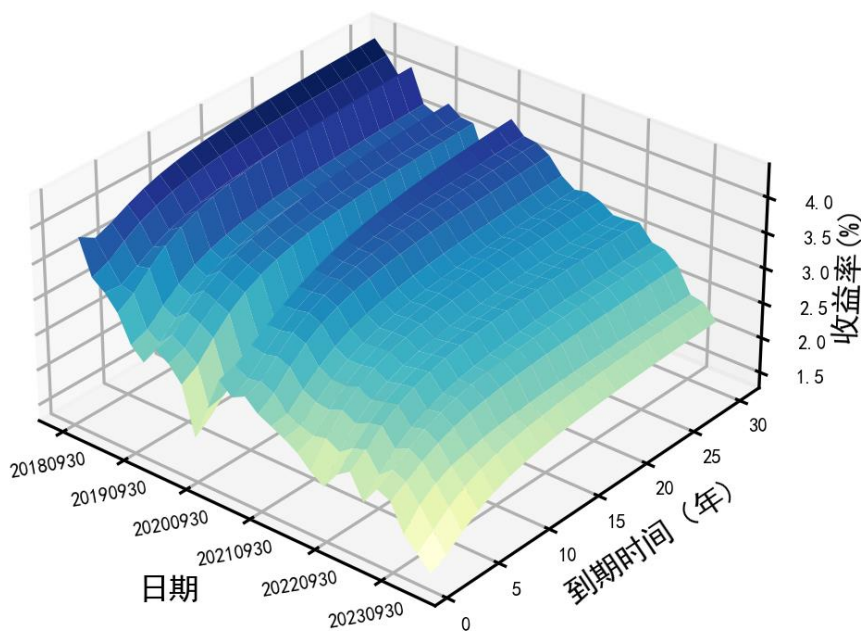
收益率数据、模型生成信号频率均为日度，样本期间为 2018 年初至 2024 年 9 月中旬，  
2023 年 7 月前为样本内，之后为样本外数据。

图表 3 NS 模型拟合收益率曲线（时点）



资料来源：WIND、通联数据、国投期货

图表 4 NS 模型拟合收益率曲线



资料来源：WIND、通联数据、国投期货

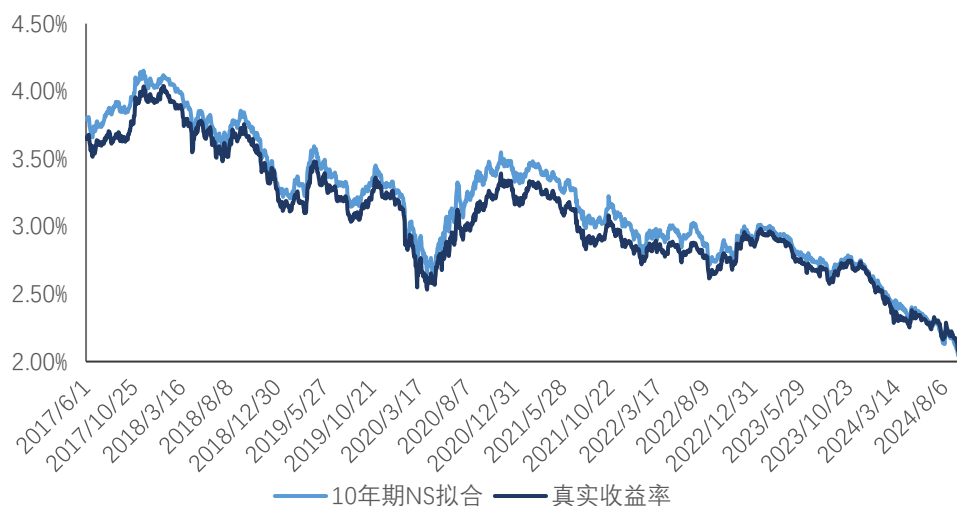
图表 5 NS 模型各期限收益率拟合效果统计

到期时间（年）	mse	rmse	mae	r2
1	0.62%	7.86%	6.65%	99.25%
2	0.23%	4.76%	3.92%	99.68%
3	0.26%	5.06%	4.05%	99.61%
5	0.22%	4.65%	3.71%	99.63%
7	0.49%	6.98%	6.07%	99.09%
10	1.33%	11.55%	10.36%	97.63%
15	0.51%	7.11%	5.85%	99.16%
20	0.49%	6.97%	5.88%	99.35%
30	0.27%	5.24%	4.49%	99.63%

资料来源：WIND、通联数据、国投期货

上图表为 NS 曲线拟合结果，整体来看采用 NS 方法可以较好的对各期限收益率进行拟合，其中 10 年期债券的拟合误差显著大于其余期限，通过分析我们发现 2023 年前 NS 拟合收益率持续略高于真实收益率，相应使得期间拟合误差偏大，而在 2023 年后截距项逐渐缩窄，误差显著降低，文章推测这有可能是因为期间 10 年期国债存在流动性溢价所致。

图表 6 NS 模型 10 年期国债收益率拟合结果



资料来源：WIND、通联数据、国投期货

在构建动态 NS 模型前，我们需要对参数进行平稳性检验，ADF 单位根检验结果显示斜率与曲率因子序列平稳，水平因子中存在线性趋势项，经差分处理后序数据平稳。为了解因子间是否存在一定相关关系，文章采用格兰杰因果检验对因子滞后三阶数据进行分析，检

验结果显示三因子之间存在一定的格兰杰因果关系,其中水平与曲率因子之间在滞后一阶下存在显著因果关系。

图表 7 NS 模型参数描述性统计与平稳性检验

	mean	std	skewness	kurtosis	Jarque-Bera 检验	ADF (常数趋势项)	ADF (线性趋势项)
beta0	4.25%	0.57%	-0.26	2.19	58.96***	-1.23	-3.49**
beta1	-1.80%	0.36%	-0.74	4.41	262.24***	-2.66*	-2.89
beta2	0.36%	0.81%	-0.02	2.69	6.40**	-3.73***	-4.51***

注: 图表中\*, \*\*, \*\*\*分别代表检验结果在 10%,5%,1%的显著性水平上显著。

资料来源: WIND、通联数据、国投期货

图表 8 NS 模型因子格兰杰因果检验

滞后 阶数	beta0 ->beta1	beta0 ->beta2	beta1 ->beta0	beta1 ->beta2	beta2 ->beta0	beta2 ->beta1
1	0.75	11.63***	0.01	0.72	22.05***	1.68
2	2.08	6.39***	9.14***	13.13***	12.63***	3.49**
3	3.96***	4.72***	11.52***	11.02***	8.62***	3.17**

注: 图表中\*, \*\*, \*\*\*分别代表检验结果在 10%,5%,1%的显著性水平上显著。

资料来源: WIND、通联数据、国投期货

基于以上分析结果,我们尝试采用向量自回归(VAR)模型对 NS 模型三因子进行滚动预测,参考 AIC、BIC 滞后阶数为 1 阶,构建 VAR(1)模型,期间我们发现若将水平因子进行差分后再建模会丢失很多原始信息,因此该部分我们采用水平因子原始数据进行建模,同时为测试模型估计参数是否稳定,对模型残差项进行了稳定性检验,结果显示参数平稳,模型估计结果稳定。



图表 9 NS-VAR 模型滚动预测结果（样本内）



图表 10 NS-VAR 模型滚动预测结果（样本外）



图表 11 NS-VAR 模型滚动预测结果（预测利率与真实利率）

样本内	10 年期		样本外	10 年期	
	rmse	0.11%		rmse	0.05%
	mae	0.10%		mae	0.04%
	R2	94.50%		R2	96.55%
	方向胜率	53.62%		方向胜率	50.14%
	30 年期			30 年期	
	rmse	0.06%		rmse	0.04%
	mae	0.05%		mae	0.04%
	R2	98.57%		R2	98.61%
	方向胜率	54.04%		方向胜率	56.27%

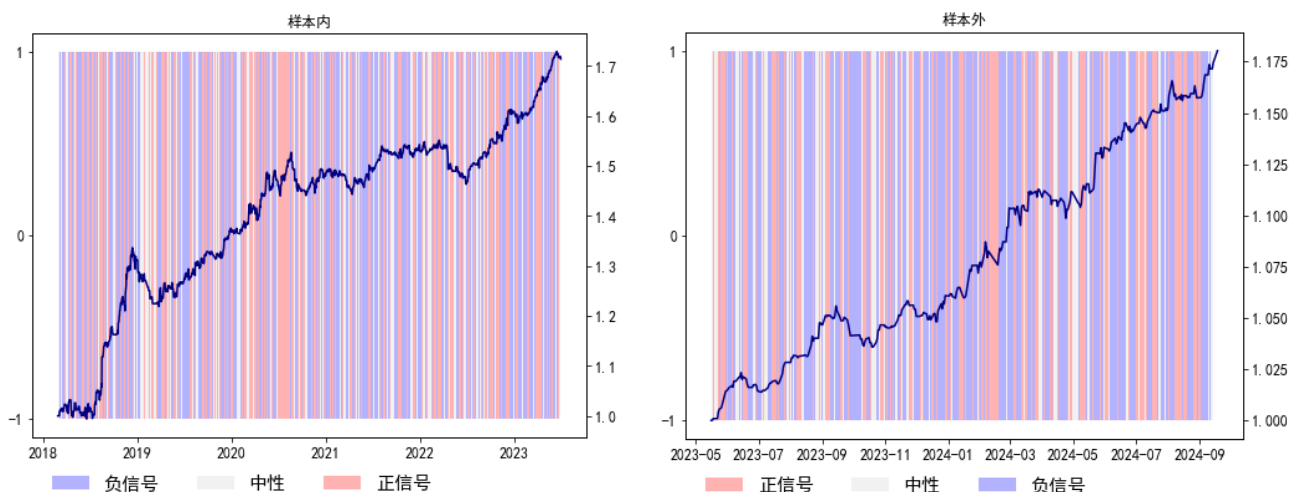
资料来源：WIND、通联数据、国投期货

从模型预测误差与拟合优度来看，NS-VAR 模型对 10 年与 30 年期收益率均有一定预测能力，相应我们参考两个期限预测利差的变动方向构建模型信号。具体来说，当模型预



测下一期 30 期收益率上升 10 年期下降时，发出看多利差的信号，当预测 30 年期收益率走低 10 年期上升时发出看空信号，其余时期保持中性信号。此外，由于 30 年期国债期货上市时间较短，可回测数据量不足，我们使用国债即期收益率模拟债券价格构建策略，参考 10 年期与 30 年期国债期货最便宜可交割券的久期选择 2.8:1 比率构建久期中性组合，当模型发出看多 30-10Y 利差的信号时做多 2.8 个单位的 10 年期国债，做空 1 个单位的 30 年期国债，当发出看空利差的信号时则进行相反操作。

图表 12 NS 套利策略信号与收益表现统计结果



	年化 收益率	年化 波动率	年化 下行波动率	期间 最大回撤	夏普比率	卡玛比率	SORTINO
样本内	10.61%	6.95%	4.02%	-8.79%	1.53	1.21	2.71
样本外	13.02%	3.75%	2.05%	-1.89%	3.47	6.89	6.38

资料来源：WIND、通联数据、国投期货

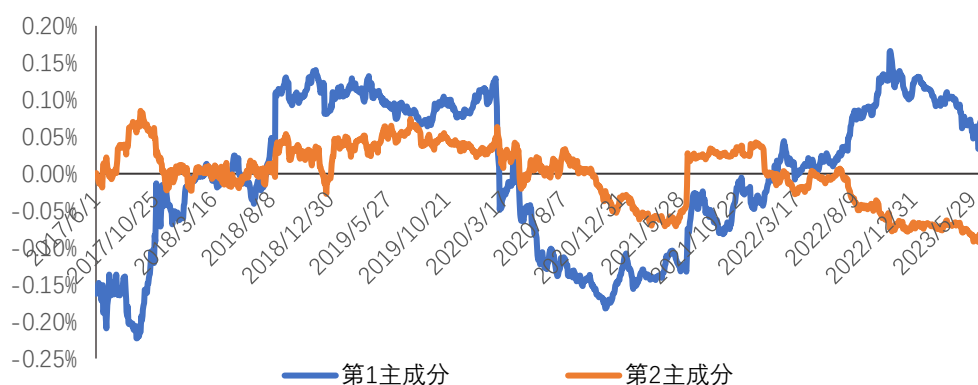
上图表中为 2018 年以来的模型回测结果，策略在样本内外的年化收益率分别为 9.34% 与 11.41%，夏普比率分别为 1.38 与 2.97。样本内最大回撤发生在 2018 年年末，回撤幅度为 8.79%，样本外最大回撤发生在 2023 年 9 月，回撤幅度为 1.89%。

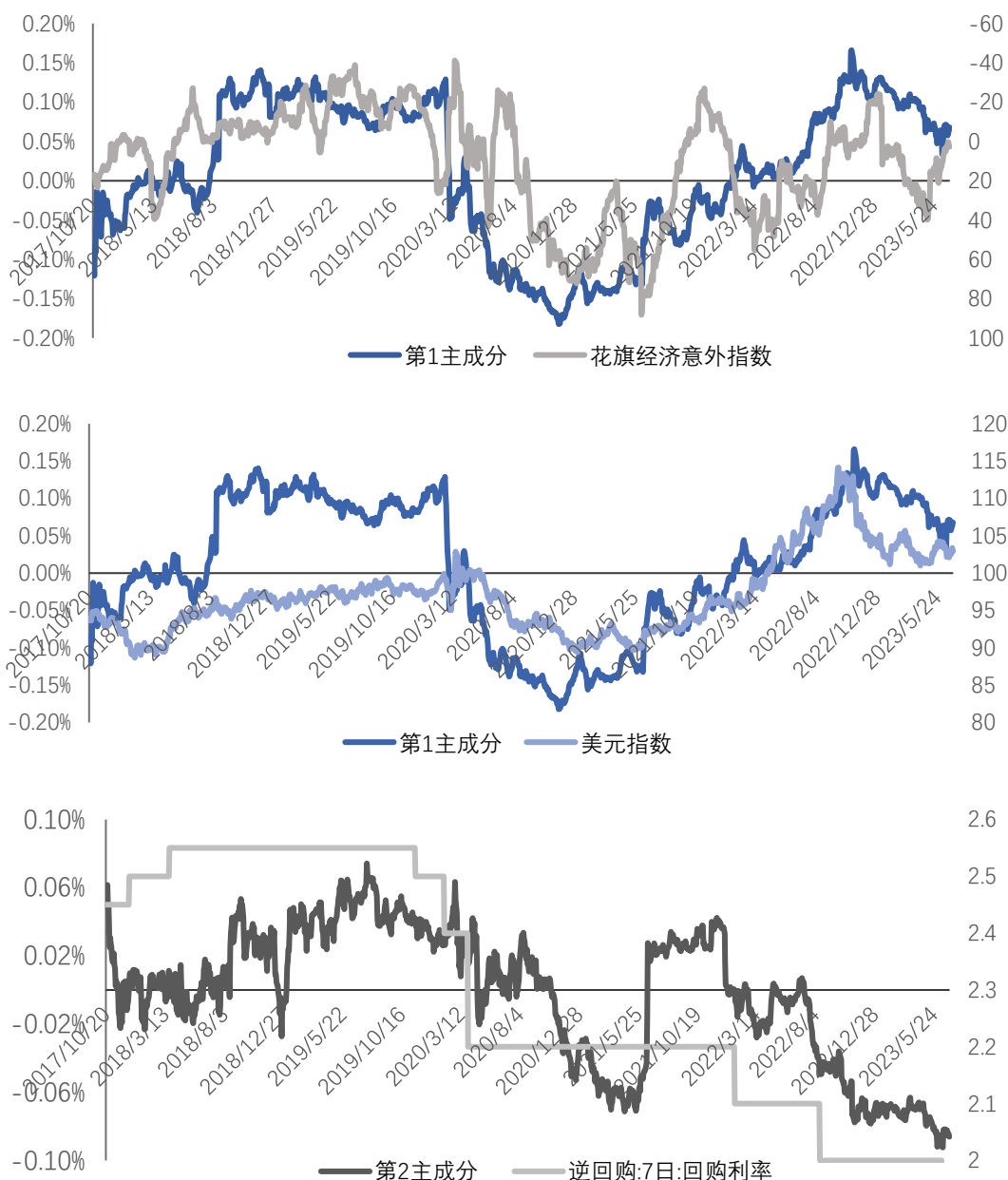
## 4 基于 NS 模型与宏观因子的国债跨期套利策略

考虑到长期债券收益率更容易受到经济基本面与货币政策的影响，我们尝试在模型中加入宏观变量来优化策略表现。由于大部分宏观数据的披露频率为月度及以上且滞后时间较长，为了能够更及时的捕捉到宏观环境变动对债券收益率的影响，在该部分本文选择采用更新频率在周度及以上的高频宏观数据进行跟踪分析。

在上一部分中文章通过 NS 模型对拟合债券收益率曲线，以 10 年期国债收益率为例，我们发现通过 NS 拟合得到的收益率与真实利率间存在一定的偏离，即模型残差项，为检验残差项中是否包含未反映到 NS 模型中的剩余有效信息，我们对残差项序列进行了白噪声检验，结果显示残差项为非随机游走序列，该结果侧面反应了残差项中可能存在影响债券收益率的隐含信息，经分析我们推测这可能与宏观经济环境的有关。我们通过主成分分析提取出期限在 10 年以上债券收益率的残差项，选择前两个主成分进行分析（第一、第二主成分累计解释度分别为 81%、94%），通过计算我们发现主成分与宏观经济数据存在一定相关性。从样本内拟合结果我们可以发现第一主成分与花旗集团发布的经济意外指数、美元指数具有较高相关性，第二主成分与七天逆回购利率较为相关，这在一定程度说明经济环境、货币政策等宏观因素会对收益率曲线产生影响。

图表 13 NS 模型残差项主成分与宏观变量走势具有一定关联度

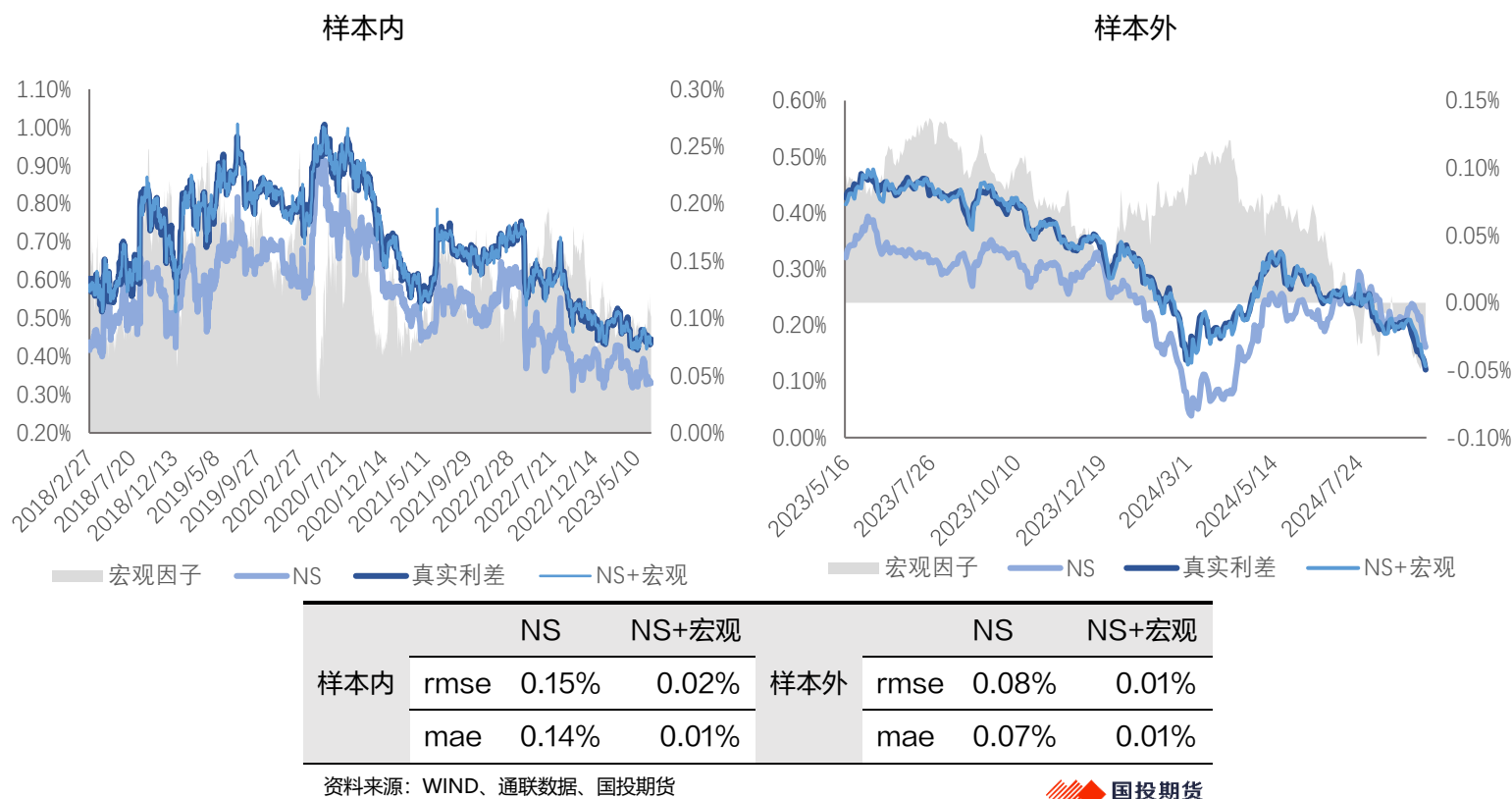




资料来源: WIND、通联数据、国投期货

基于上述分析结果,我们在模型中加入宏观数据对 NS 模型的残差项进行滚动预测。具体的,本文先使用随机森林算法进行特征筛选,保留近期影响显著的宏观变量放入模型中,之后通过岭回归对未来残差走势进行预测。

图表 14 NS 模型与宏观因子对 30 年-10 年利差预测结果

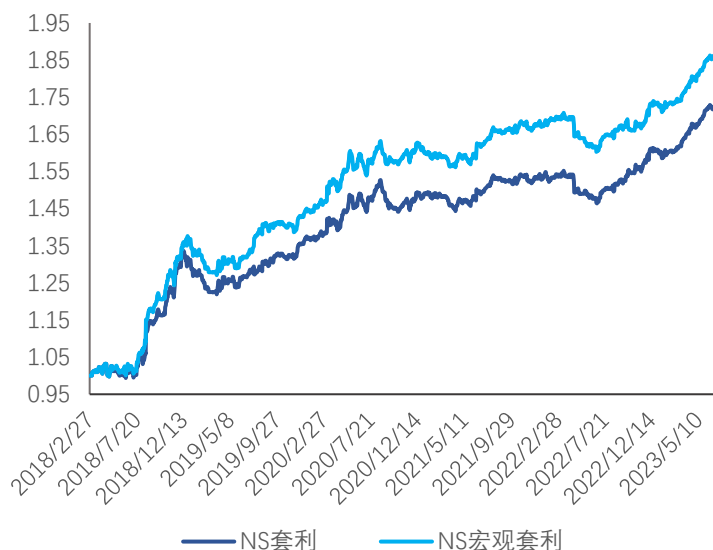


上图表为模型对 30Y-10Y 国债利差走势的预测结果，加入宏观因素的 NS 预测模型误差显著低于原始 NS 模型，说明宏观因素的变动会对利差走势产生一定影响。因此，接下来文章尝试对就宏观因子变动对利差走势影响做进一步分析，结果发现当模型中预测的宏观因子显著走强时，利差未来利差趋于收窄的概率较大，反之则未来利差扩大的概率较大。同时在宏观因子变化显著的区间内，NS 模型的预测胜率会略低于其余时期。

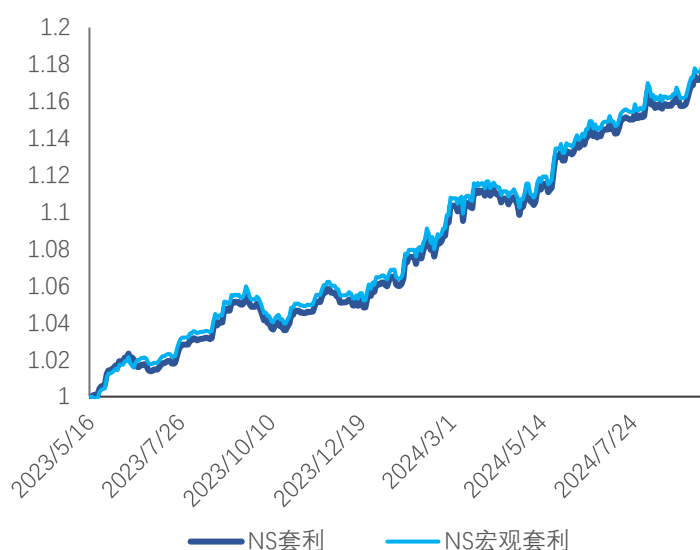
参考以上分析结果我们尝试根据宏观因子的预期变动调整原始 NS 策略信号。当模型预测下期宏观因子显著提高（变动幅度处于近一月内 95%分位以上水平时），若 NS 原始信号为看多利差则转为看空，当模型预测宏观因子显著降低（变动幅度处于变动幅度处于近一月内 5%分位以下水平时），若 NS 原始信号为看空利差则转为看多。

图表 15 NS 宏观策略信号与收益表现统计结果

样本内



样本外



样本内		NS 套利	NS+宏观套利	样本外		NS 套利	NS+宏观套利
	年化收益率	10.61%	12.27%		年化收益率	13.02%	13.32%
	年化波动率	6.95%	6.94%		年化波动率	3.75%	3.75%
	年化下行波动率	4.02%	3.91%		年化下行波动率	2.05%	2.04%
	期间最大回撤	-8.79%	-7.68%		期间最大回撤	-1.89%	-1.89%
	夏普比率	1.53	1.77		夏普比率	3.47	3.56
	卡玛比率	1.21	1.60		卡玛比率	6.89	7.05
	SORTINO	2.71	3.21		SORTINO	6.38	6.56

样本内		多头 空头		样本外		多头 空头	
	年化开仓次数	53	56		年化开仓次数	54	57
	平均持仓天数	1.81	1.84		平均持仓天数	1.49	2.12

资料来源：WIND、通联数据、国投期货

回测结果显示经宏观因子调整后的策略再风险收益表现上有所提升，样本内、外期间年化收益率分别为 12.27%与 13.32%，夏普比率为 1.77 与 3.45，相比较原 NS 模型样本内最大回撤减少 1.11%，策略开仓方面平均年化开仓次数在 55 次左右，样本内多头与空头平均持仓约 1.8 天，样本外空头平均持仓时间略长于多头。

## 参考文献

- [1]. Francis, X., Diebold, and, Glenn, & D., et al. (2006). The macroeconomy and the yield curve: a dynamic latent factor approach. *Journal of Econometrics*.
- [2]. Diebold, F. X. , & Canlin, L. . (2006). Forecasting the term structure of government bond yields. *Social Science Electronic Publishing*.
- [3]. Fernandes, M. , & Vieira, F. . (2019). A dynamic nelson-siegel model with forward-looking macroeconomic factors for the yield curve in the us. *Journal of Economic Dynamics and Control*, 106, 103720.
- [4]. Levant, J. , & Ma, J. . (2016). Investigating united kingdom's monetary policy with macro-factor augmented dynamic nelson-siegel models. *Journal of Empirical Finance*, 117-127.
- [5]. Li, C. , Niu, L. , & Zeng, G. . (2011). A generalized arbitrage-free nelson-siegel term structure model with macroeconomic fundamentals. *Ssrn Electronic Journal*, 73.

## 免责声明

国投期货有限公司是经中国证监会批准设立的期货经营机构，已具备期货投资咨询业务资格。本报告仅供国投期货有限公司(以下简称“本公司”)的机构或个人客户(以下简称“客户”)使用。本公司不会因接收人收到本报告而视其为客户。如接收人并非国投期货的客户，请及时退回并删除。

本报告是基于本公司认为可靠的已公开信息，但本公司不保证该等信息的准确性或完整性。本报告所载的资料、意见及推测只提供给客户作参考之用。本报告所载的资料、意见及推测仅反映本公司于发布本报告当日的判断，本报告所指的期货或期权的价格、价值可能会波动。在不同时期，本公司可发出与本报告所载资料、意见及推测不一致的报告。客户不应视本报告为其做出投资决策的唯一因素。在任何情况下，本报告中的信息或所表述的意见并不构成对任何人的投资建议。在任何情况下，本公司不对任何人因使用本报告中的任何内容所导致的任何损失负任何责任。

本报告可能附带其它网站的地址或超级链接，本公司不对其内容的真实性、合法性、完整性和准确性负责。本报告提供这些地址或超级链接的目的纯粹是为了客户使用方便，链接网站的内容不构成本报告的任何部分，客户需自行承担浏览这些网站的费用或风险。

本报告的版权归本公司所有。本公司对本报告保留一切权利。除非另有书面显示，否则本报告中的所有材料的版权均属本公司。未经本公司事先书面授权，本报告的任何部分均不得以任何方式制作任何形式的拷贝、复印件或复制品，或再次分发给任何其他人，或以任何侵犯本公司版权的其他方式使用。



长按关注国投期货研究院

