

基于fNIRS的脑同步分析

周思远
北京师范大学
zhou_siyuan@mail.bnu.edu.cn

概述

脑同步方法概述

小波相干介绍

小波相干实操

深入数据挖掘

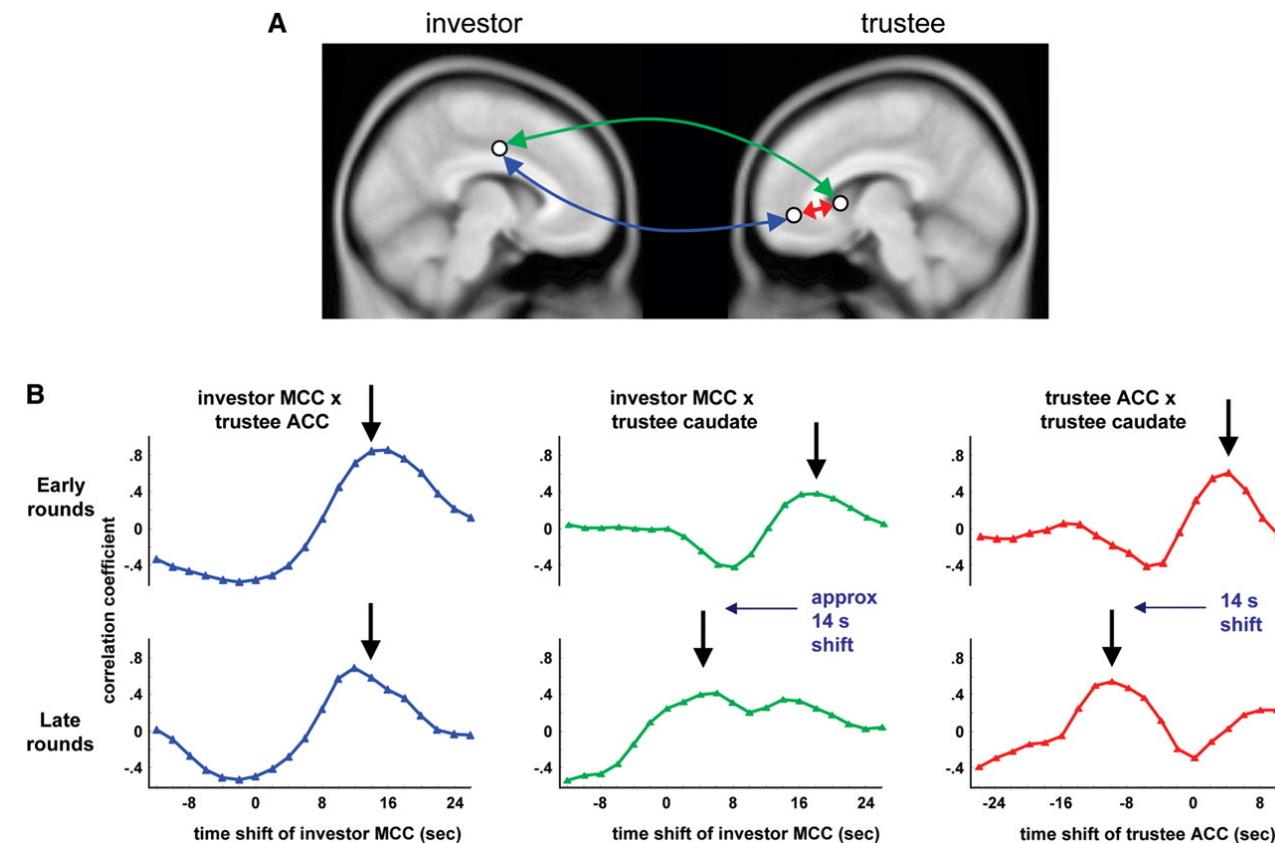
脑同步分析概述

脑同步概述

- 近十年来，越来越多社会认知神经科学研究开始强调从真实的他人在场情景研究人的社会认知神经机制
- 在这一过程中，同时测量多人神经活动的超扫描 (hyperscanning) 技术应运而生，快速推广开来，并逐步扩散到发展心理学、教育心理学等领域
- 超扫描技术主要通过构建脑同步 (interpersonal neural synchronization) 指标来描述、解释和预测人在社会情境下的认知神经过程

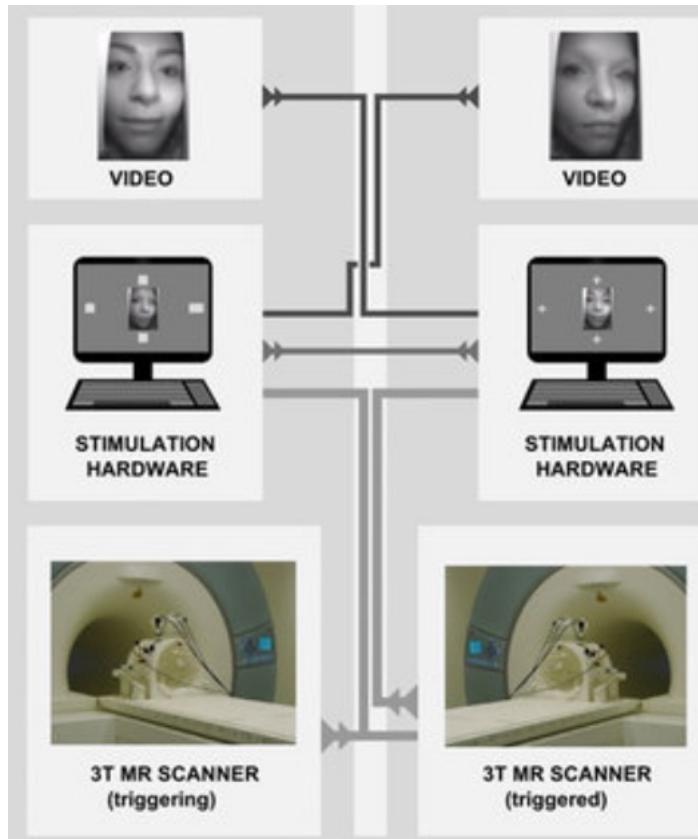
脑同步方法的发展过程

- Montague(2002)在science发表了现代意义上的第一篇hyperscanning研究，并正式提出了这一术语



脑同步方法的发展过程

- 之后很多研究者使用fMRI展开了一系列hyperscanning研究，但受限于fMRI的环境，始终无法有效地模拟真实的社会互动情景



脑同步方法的发展过程

- 随后一些研究者也是用EEG展开了一系列hyperscanning的研究，但EEG的信号抗头动性太弱、空间分辨率太低也阻碍了其进一步模拟与研究真实社会情景

appropriate card.



Fig. 1. EEG hyperscanning performed by using several high resolution EEG



Figure 1. A typical setup for the execution of the Prisoner's Dilemma. The

脑同步方法的发展过程

- 2012年，华人学者崔旭首次使用fNIRS开展hyperscanning研究。fNIRS因其高抗头动性、较高的时间空间分辨率等优点，很快成为了hyperscanning研究的热门之选
- 同时，崔旭也首次将小波相干(wavelet transform coherence)引入了hyperscanning领域



fNIRS中计算脑同步的常见算法

- 目前较为主流的fNIRS脑同步计算方法主要有以下几种：

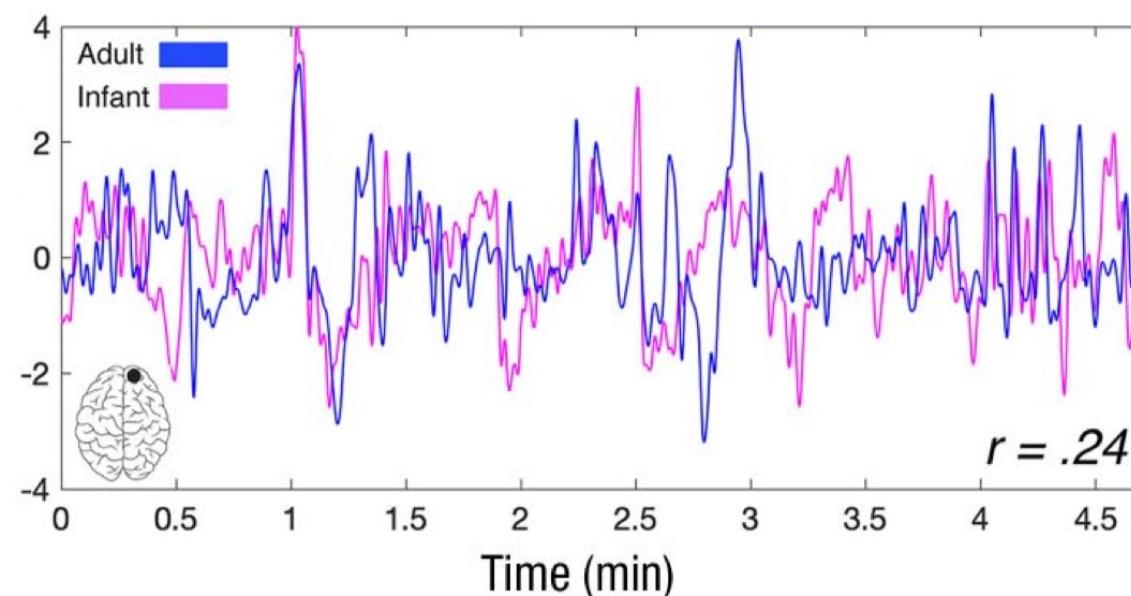
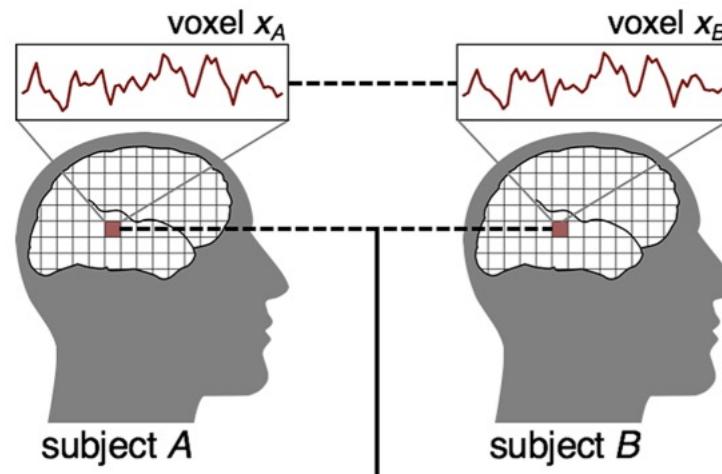
inter-subjet
correlation(ISC)

general linear
model(GLM)

wavelet transform
coherence(WTC)

fNIRS中计算脑同步的常见算法

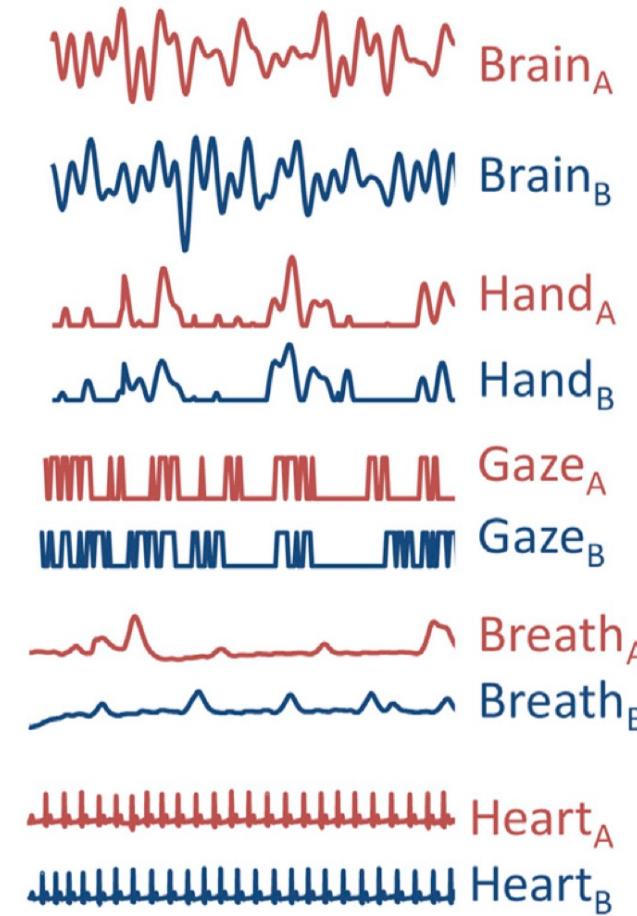
inter-subject
correlation(ISC)



fNIRS中计算脑同步的常见算法

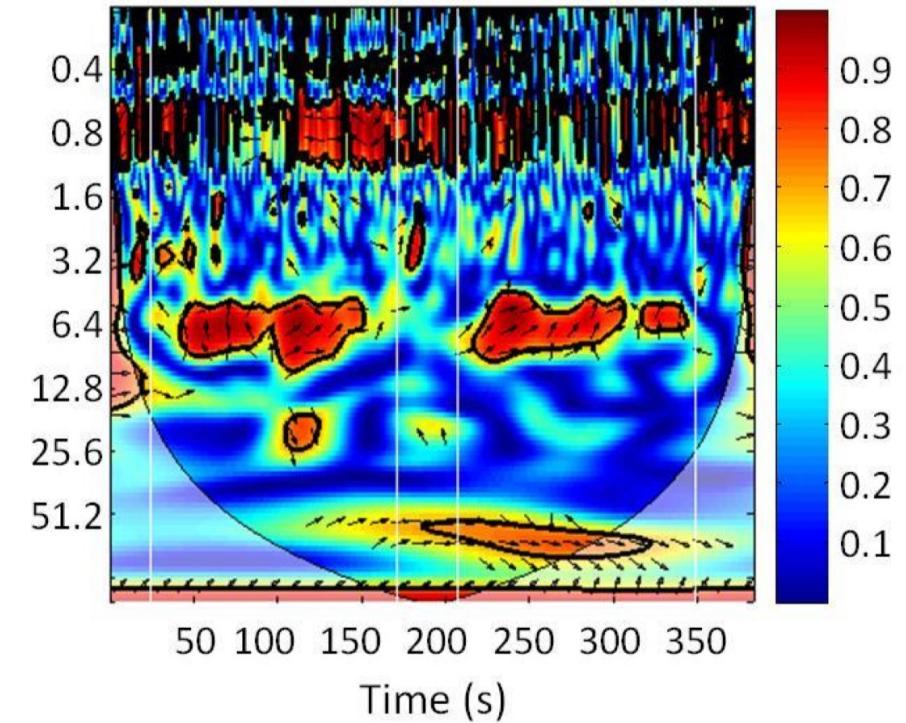
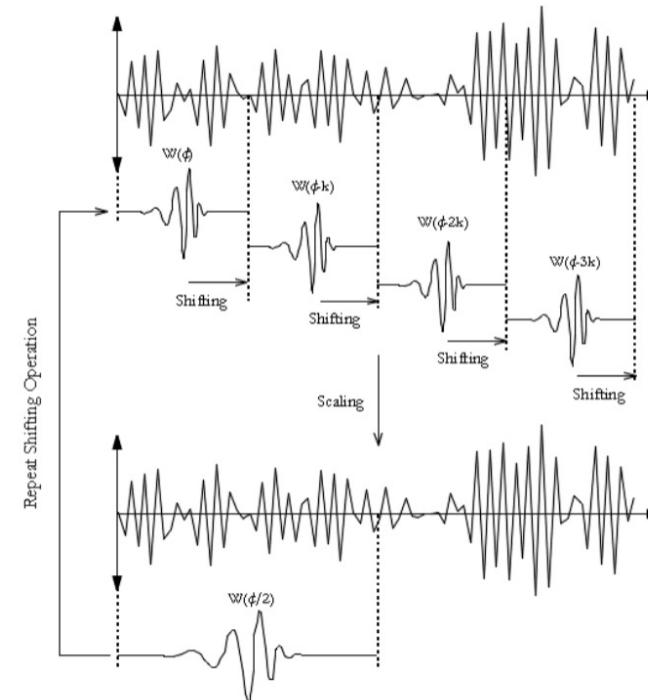
general linear
model(GLM)

$$\text{Brain}_A \sim f(\text{Task} + \text{Beh}_A + \text{Phys}_A + \text{Beh}_B + \text{Phys}_B + \text{Brain}_B)$$



fNIRS中计算脑同步的常见算法

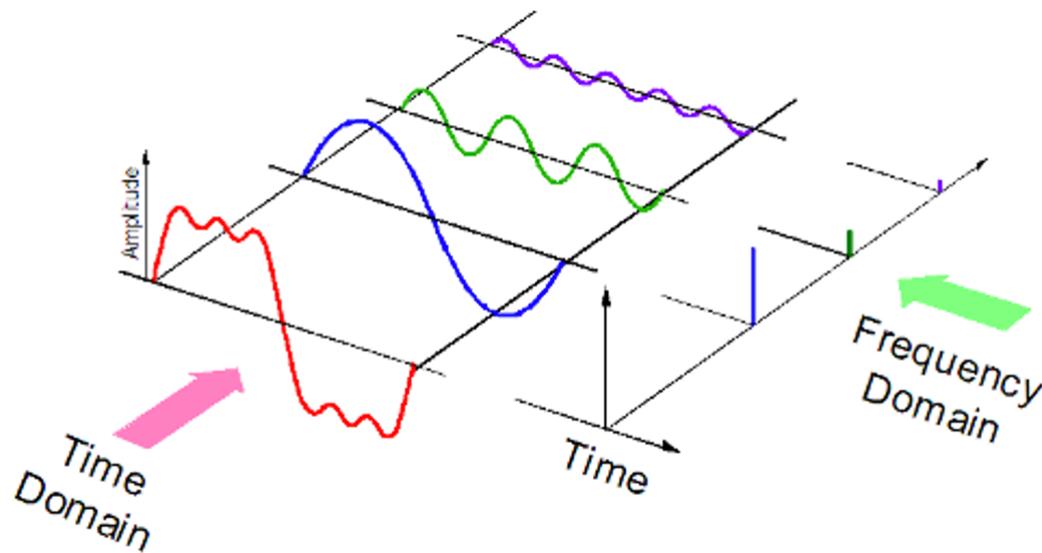
wavelet transform
coherence(WTC)



小波相干解析

WTC原理极简介绍

- 要理解WTC，就需要先理解小波变换（wavelet transform），要理解小波变换，就需要先理解傅里叶变换



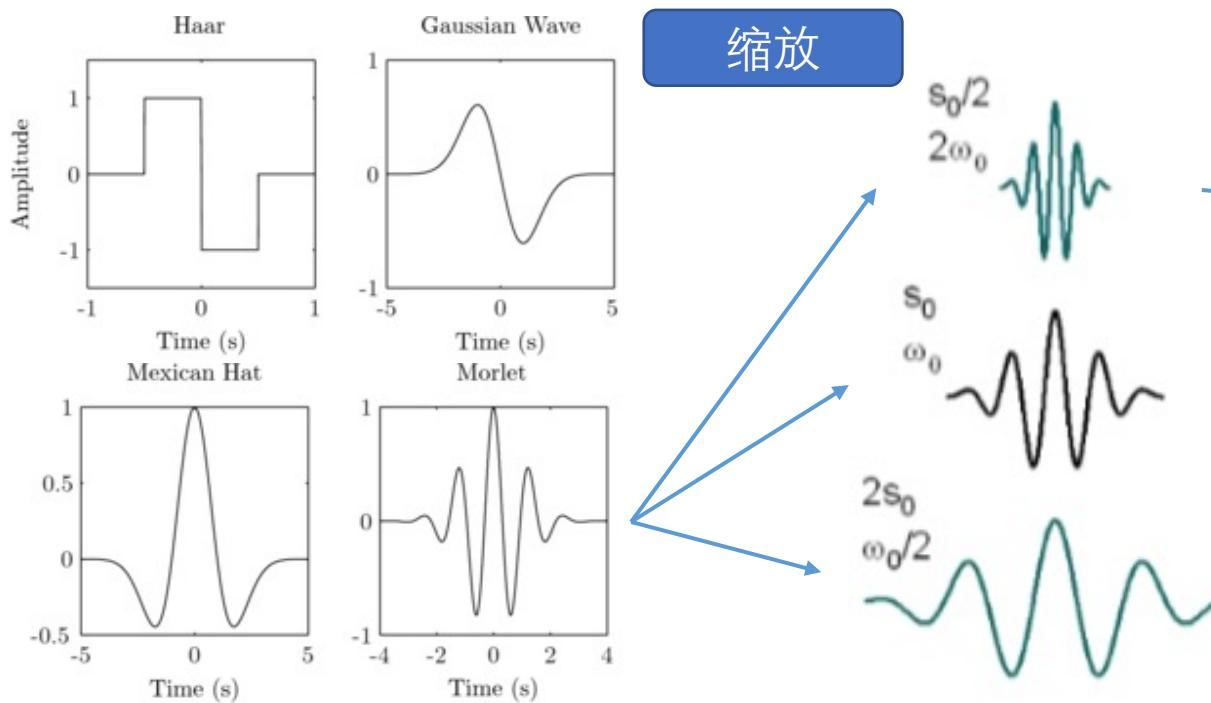
傅里叶变换的本质就是用一组不同参数的正交三角函数基来表示一个时域上的信号

这里我们可以十分粗浅地理解成用原始信号和每一个正交基做相关

但每一组正交基都是在时域上无限延展的周期函数，因此FFT在描述非周期信号时总是存在各种问题

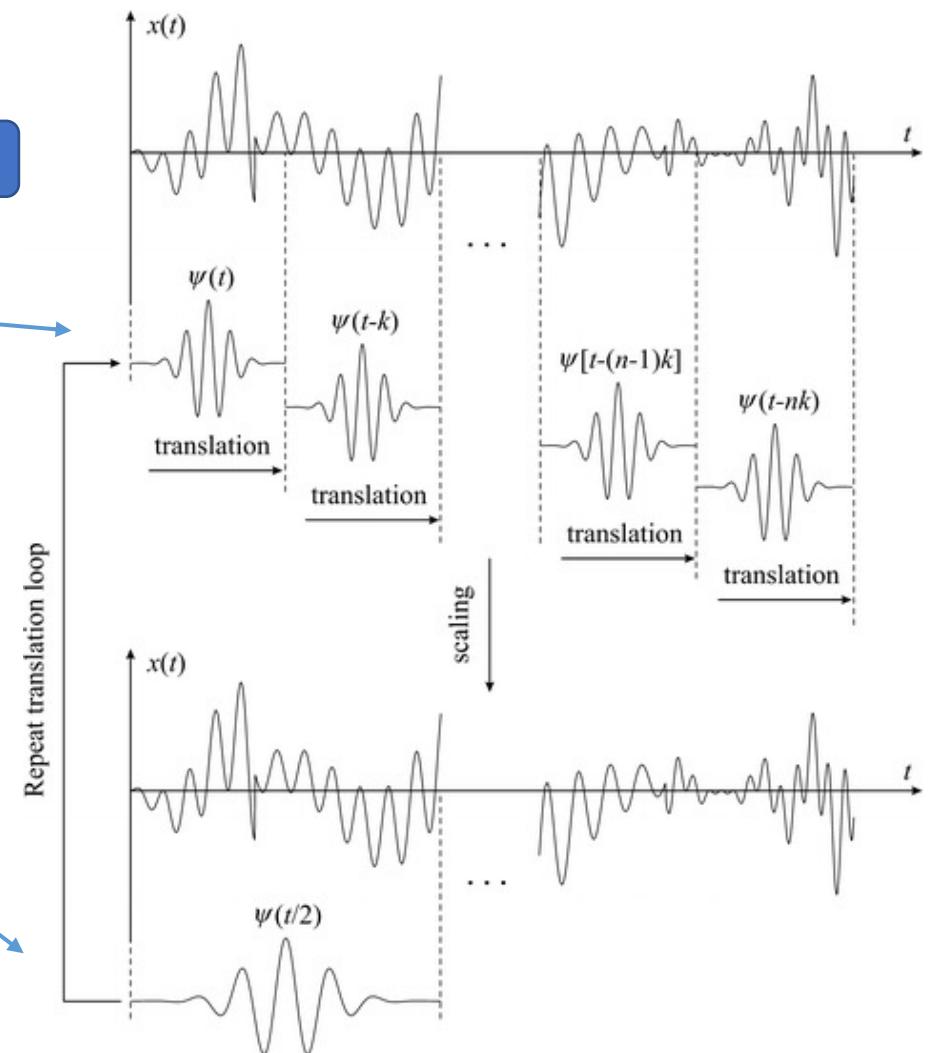
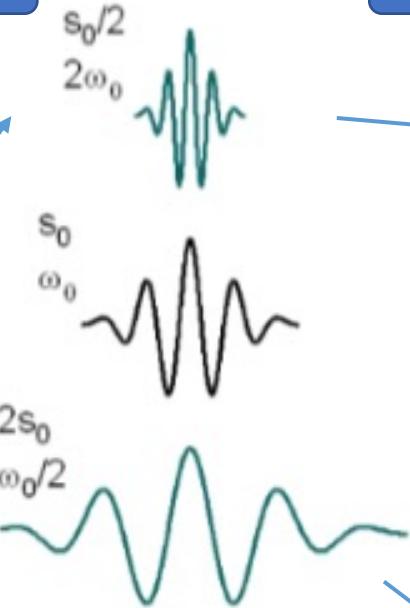
WTC原理极简介

因此，有研究者引入了“小波基”这一概念来改进傅里叶变化的正交基
小波基可以缩放和平移，比正交基更适合描述非周期信号



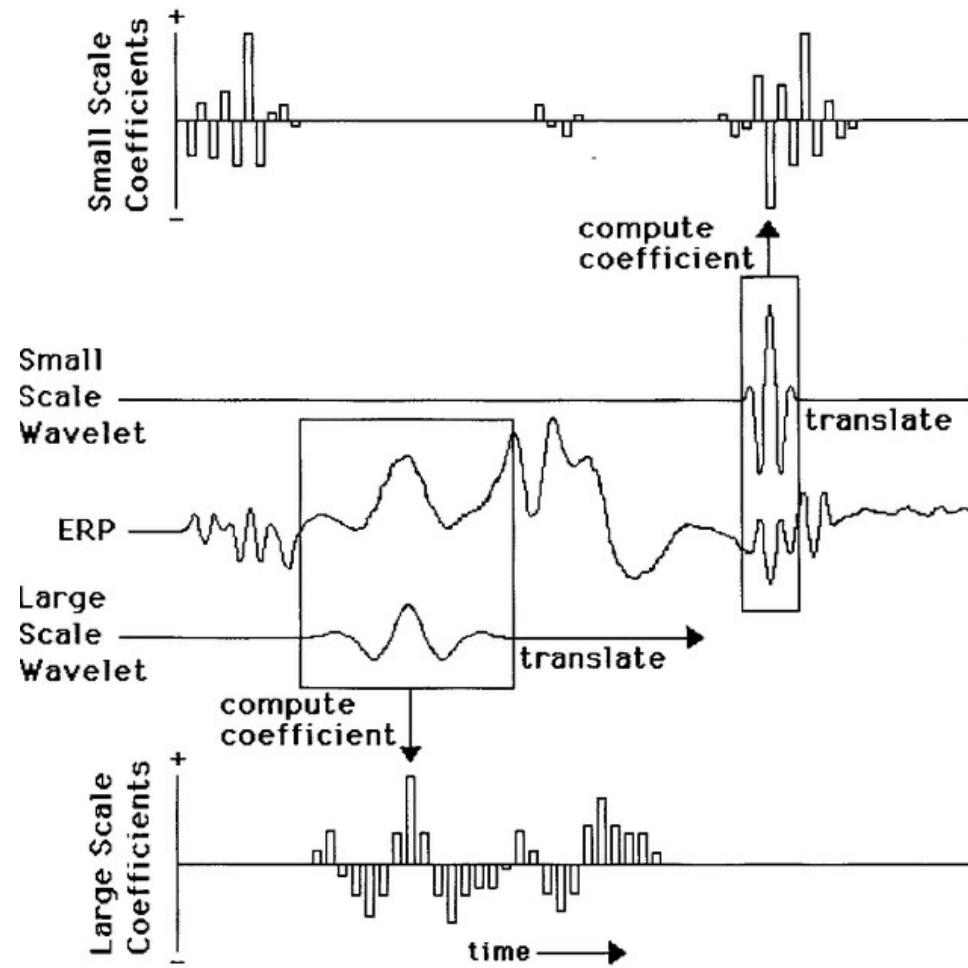
缩放

平移



WTC原理极简介绍

小波基可以缩放和平移，比正交基更适合描述非周期信号



这里我们可以粗略地理解为原始信号和不同缩放程度的小波基做滑窗相关

WTC原理极简介绍

小波相干可以简单理解为对两列小波变换之后的数据进行相关分析

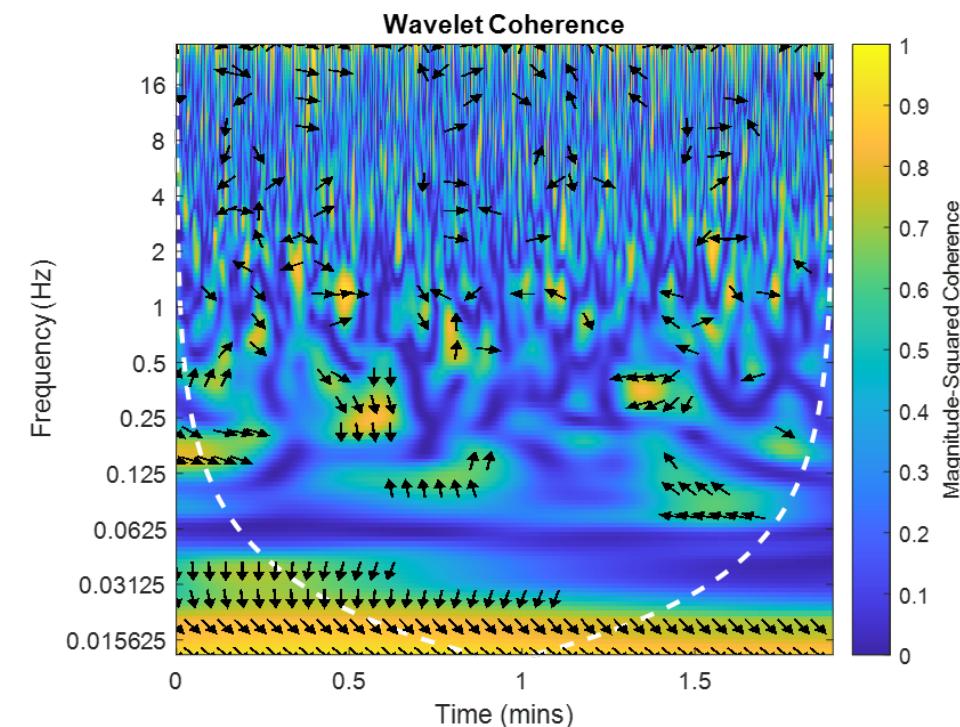
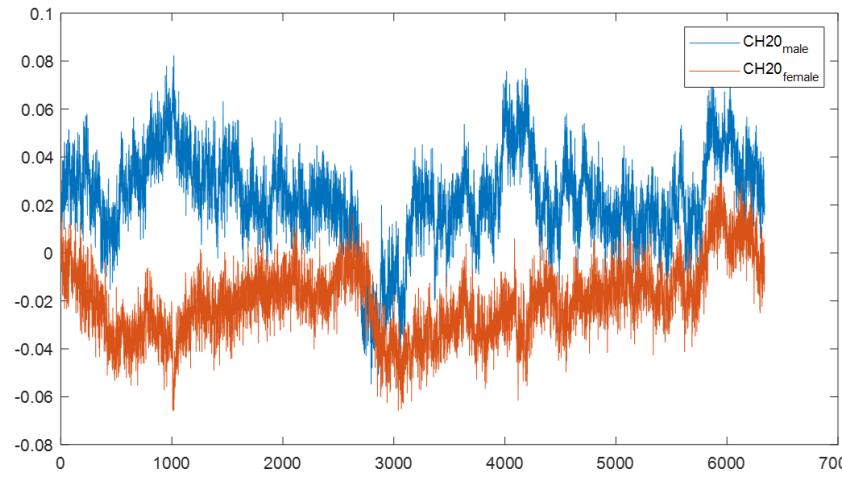
$$R_n^2(s) = \frac{|\langle s^{-1} W_n^{XY}(s) \rangle|^2}{\langle s^{-1} |W_n^X(s)|^2 \rangle \langle s^{-1} |W_n^Y(s)|^2 \rangle}$$

$$r_{xy} = \frac{\text{Cov}(x,y)}{S_x S_y}$$

为什么推荐WTC？

- 小波相干(wavelet transform coherence, 以下简称WTC)相较于其他方法具备很多优势

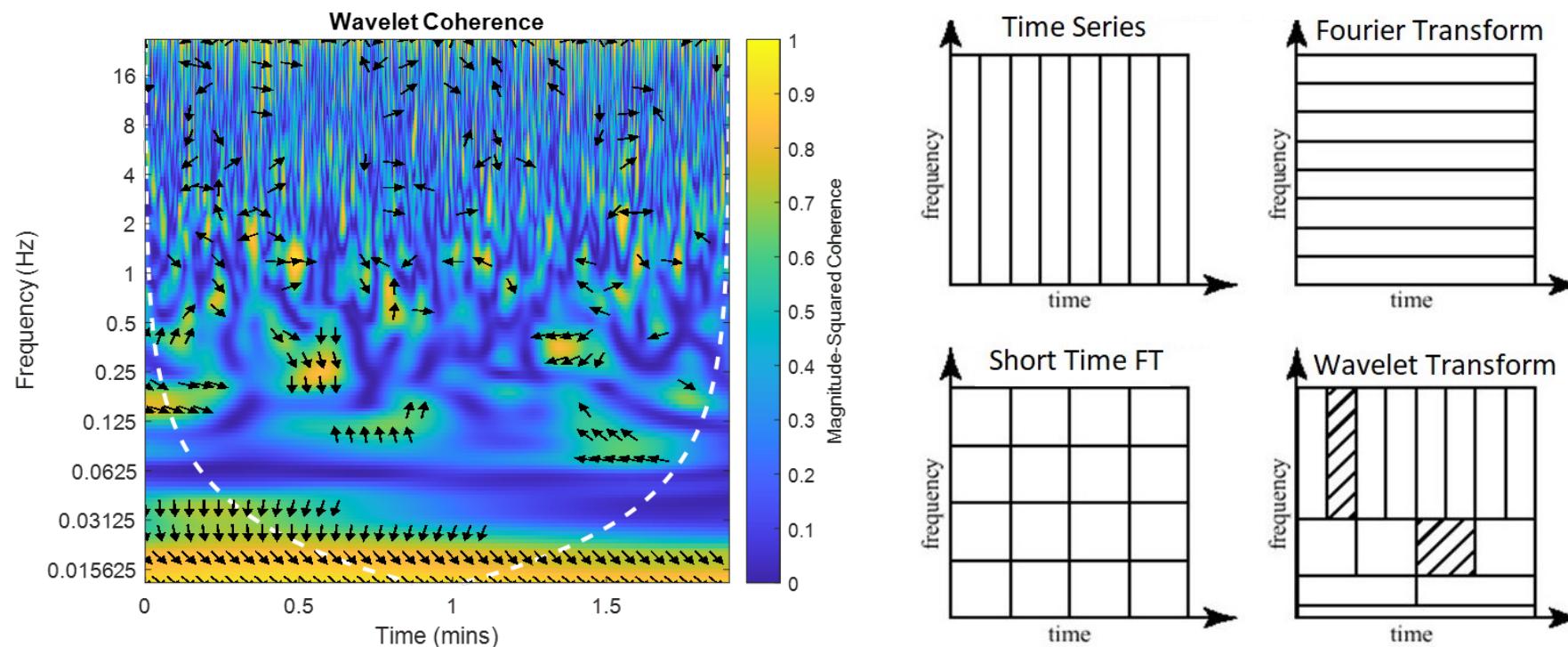
可以对信号拆分到频域计算，这样可以避免全局漂移或局部波动对数据结果的影响



为什么推荐WTC？

- 小波相干(wavelet transform coherence, 以下简称WTC)相较于其他方法具备很多优势

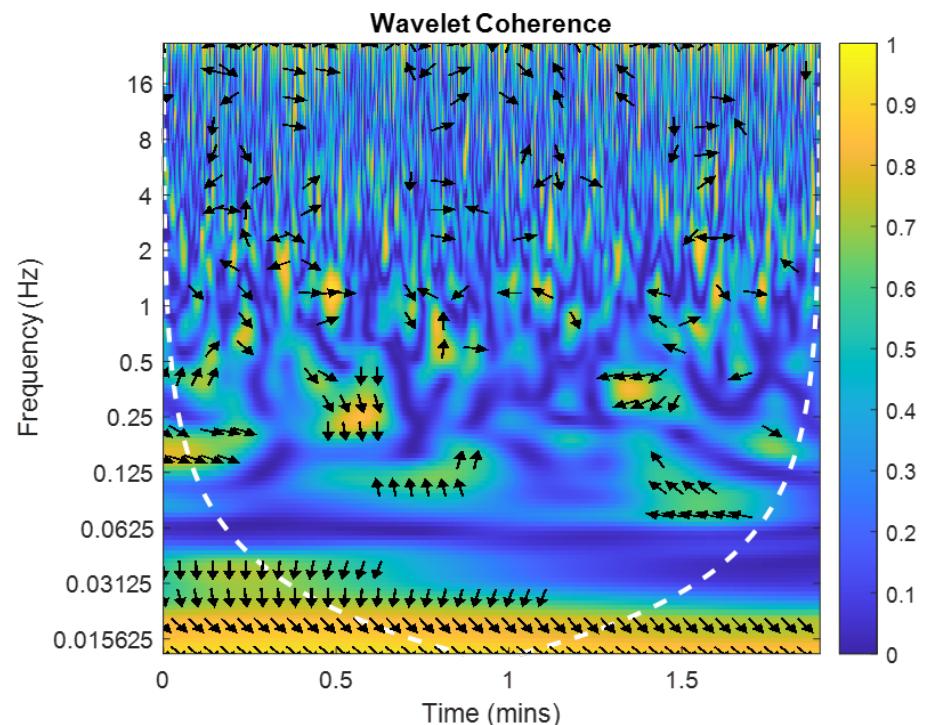
拆分频域计算的同时保留了时域信息，对行为响应反映地更准确
虽然滑窗FFT也可以做到，但WTC的时间窗在每个频段的窗长是自适应的



为什么推荐WTC？

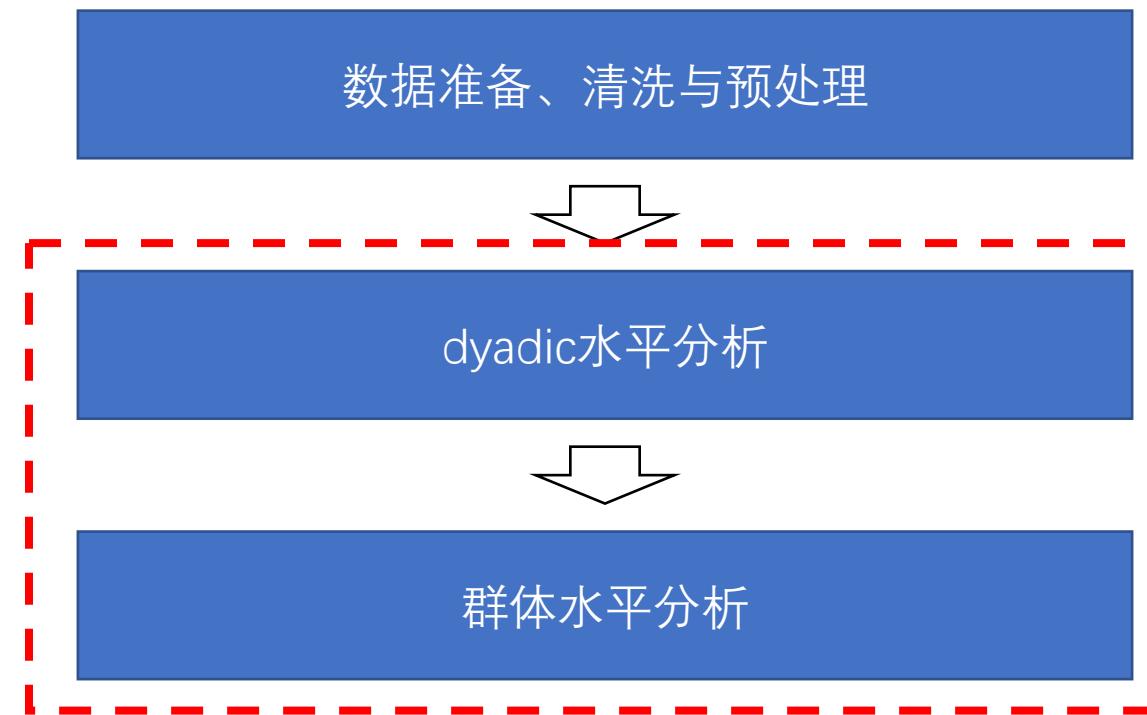
- 小波相干(wavelet transform coherence, 以下简称WTC)相较于其他方法具备很多优势

更适合非周期性的非平稳信号，符合脑数据特点



小波相干实操

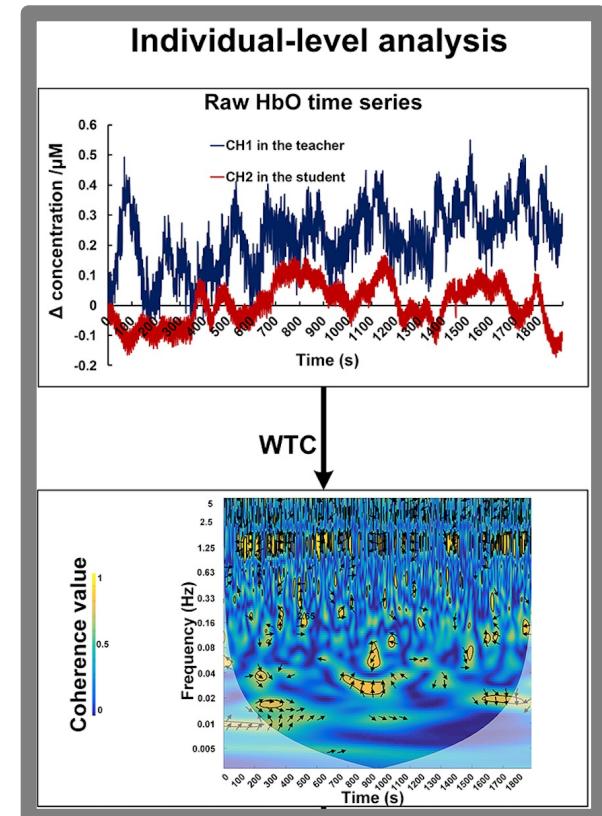
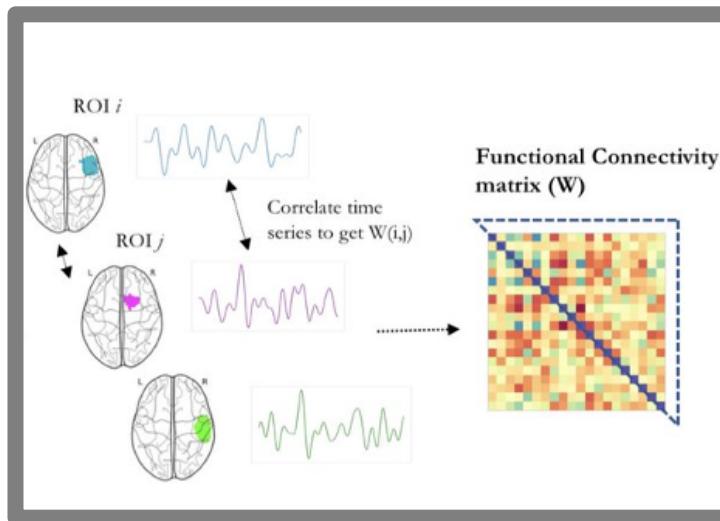
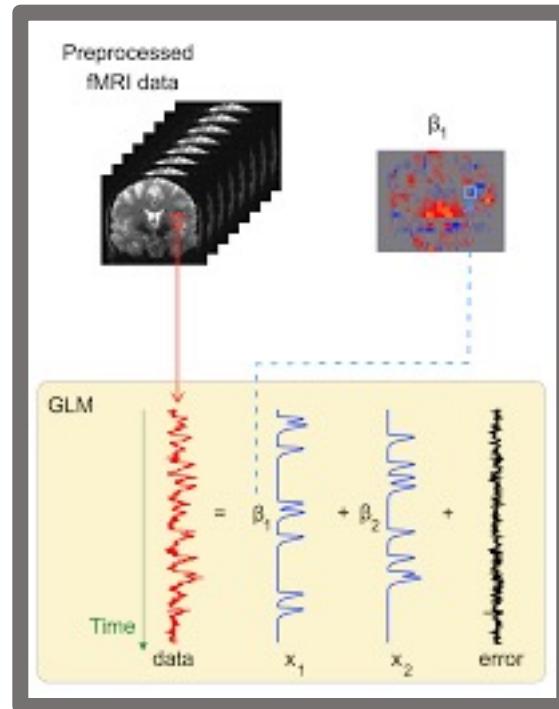
一个完整的脑同步分析流程



dyadic水平分析

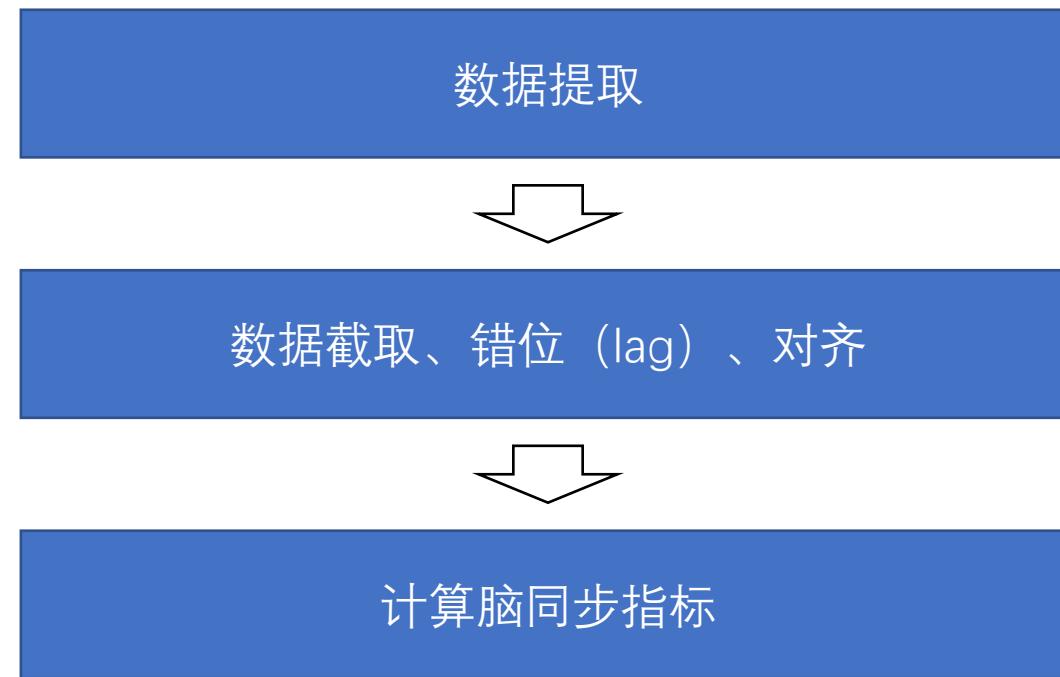
dyadic水平分析框架

- dyadic水平分析就是传统单人研究中的个体水平分析 (First-Level Analysis)
 - 这一步的目的是从raw data中提取出衡量每个subject/dyad神经活动过程的指标，并进一步服务于之后群体水平的统计检验



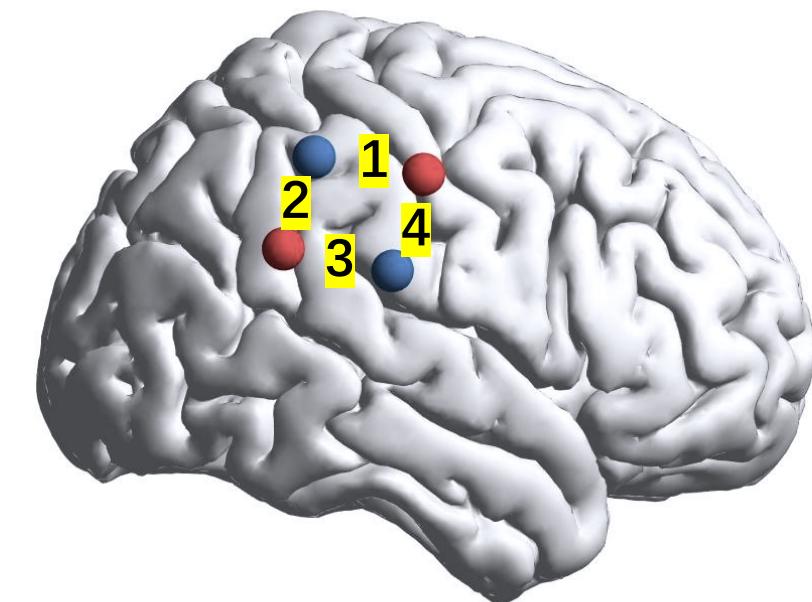
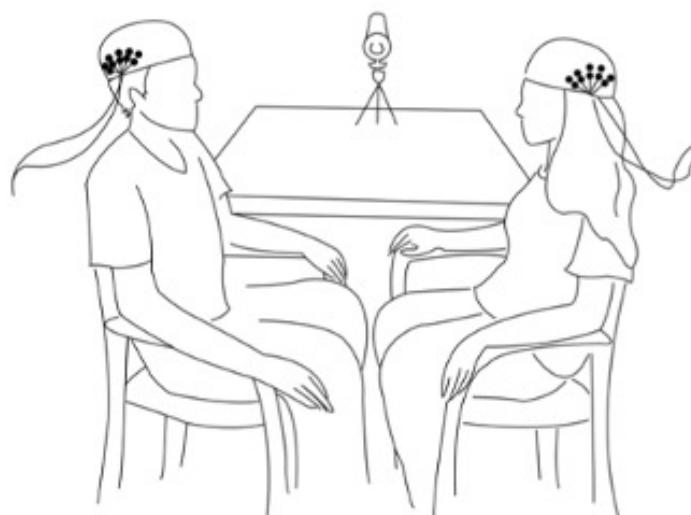
- 对于脑同步研究，我们需要先在dyad水平构建出衡量每对被试神经活动同步性的指标

dyadic水平分析框架

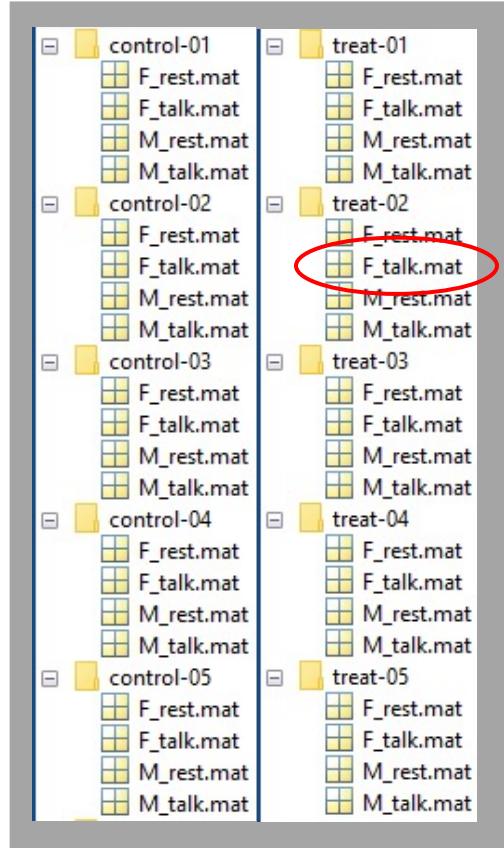


示例数据

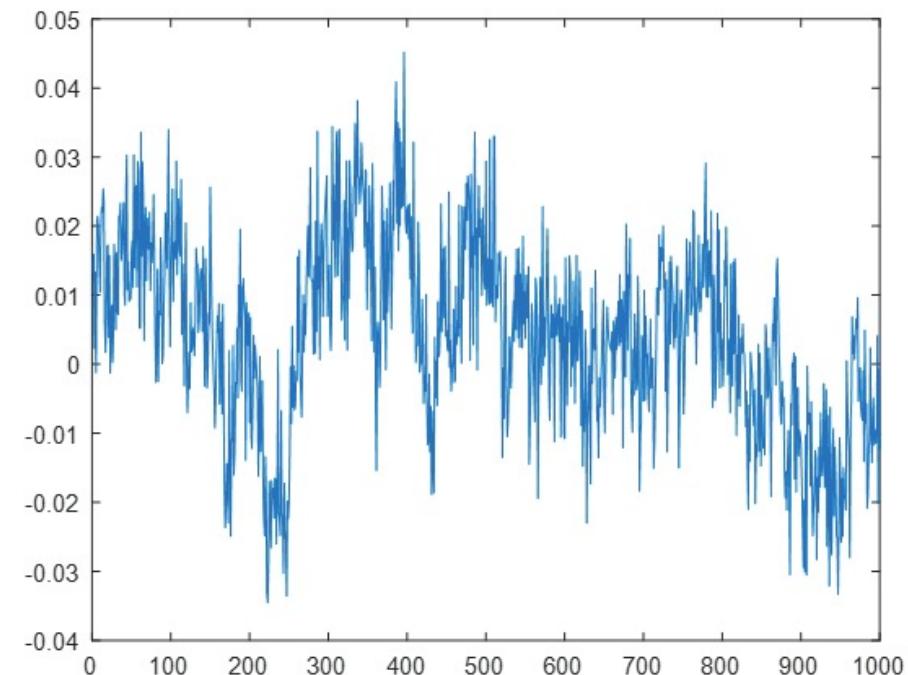
- 研究问题：假设有一种心理咨询技术，可以提高人们在冲突时的共情水平，那么干预后是不是吵架时候比对照组的人脑同步更高？
 - 5对异性干预组进行了2分钟的冲突性话题讨论
 - 5对异性对照组也进行了2分钟的冲突性话题讨论
- 在右侧颞上回(rSTG), 颞顶联合区(rTPJ), 右侧中央后回等区域采集4个通道的数据



示例数据

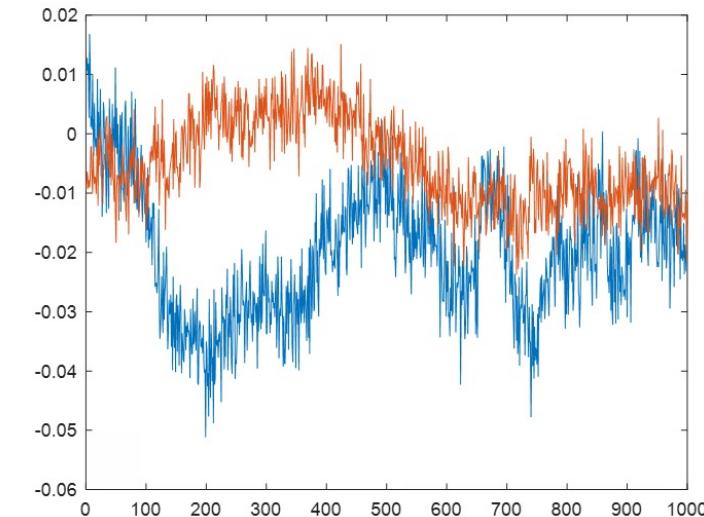
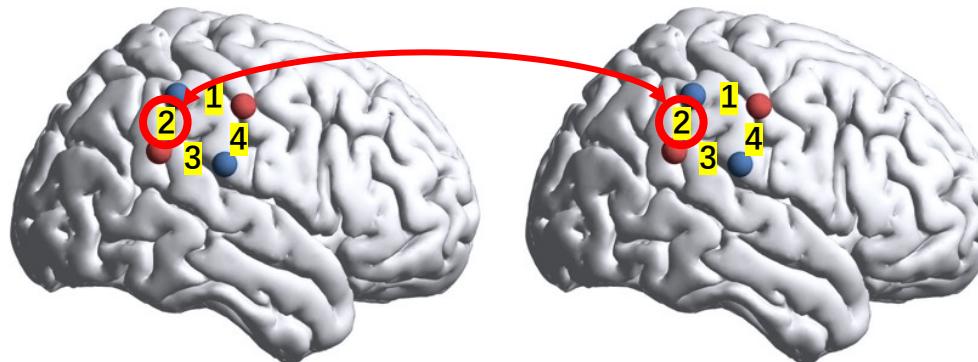


	1	2	3	4
1	-0.0316	-0.0256	0.0116	0.0133
2	-0.0280	-0.0292	0.0083	0.0159
3	-0.0464	-0.0269	0.0056	0.0023
4	-0.0336	-0.0303	0.0080	0.0133
5	-0.0320	-0.0293	0.0096	-0.0012
6	-0.0351	-0.0365	0.0140	0.0208
7	-0.0361	-0.0327	0.0126	0.0214
8	-0.0280	-0.0330	0.0072	0.0194
9	-0.0440	-0.0248	0.0056	0.0149
10	-0.0473	-0.0314	0.0131	0.0104
11	-0.0330	-0.0334	0.0069	0.0182
12	-0.0377	-0.0295	0.0080	0.0227
13	-0.0277	-0.0312	0.0090	0.0220
14	-0.0337	-0.0320	0.0297	0.0254
15	-0.0327	-0.0279	0.0081	0.0238
16	-0.0486	-0.0338	0.0045	0.0058
17	-0.0345	-0.0303	2.4876e-04	0.0017
18	-0.0318	-0.0383	-0.0075	0.0065
19	-0.0358	-0.0297	0.0064	0.017
20	-0.0283	-0.0360	0.0049	0.0173



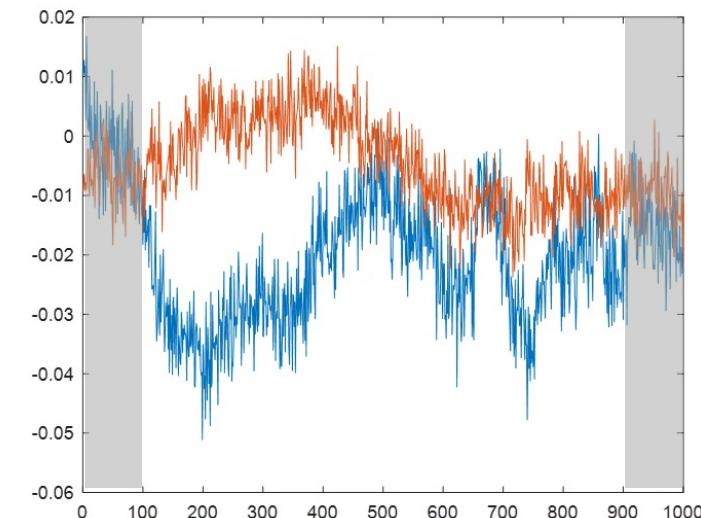
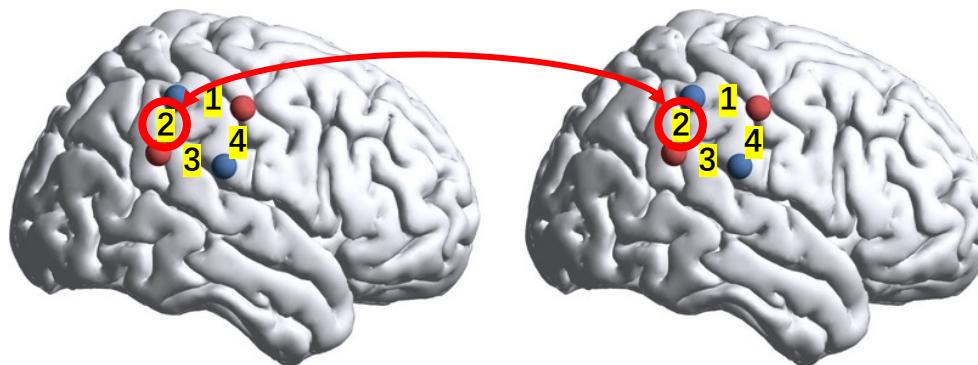
数据读取

- 现在我们来计算第一组干预组被试在冲突性话题讨论时男性rTPJ->女性rTPJ(被叫做一个channel pair) 的神经同步性
 - 采样率8.333Hz



数据读取

由于fNIRS数据在实验开始和结束时往往为非稳态，所以我们需要截去前后15s的数据（8.333Hz下约为100个采样点）



计算脑同步指标

- 我们使用MATLAB中wavelet toolbox自带的wcoherence函数计算这两个信号的WTC值

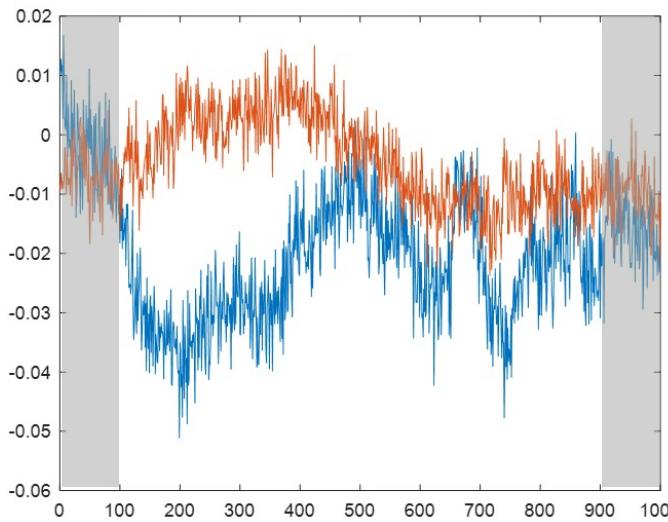
The screenshot shows the MATLAB documentation for the **wcoherence** function. The left sidebar contains navigation links for Contents, Documentation Home, Wavelet Toolbox, Time-Frequency Analysis, Continuous Wavelet Transforms, and the current page, wcoherence. The main content area has a title **wcoherence** and a subtitle "Wavelet coherence and cross-spectrum". It includes a **Syntax** section with code examples:

```
wcoh = wcoherence(x,y)
[wcoh,wcs] = wcoherence(x,y)
[wcoh,wcs,period] = wcoherence(x,y,ts)
[wcoh,wcs,f] = wcoherence(x,y,fs)
[wcoh,wcs,f,coi] = wcoherence(___)
[wcoh,wcs,period,coi] = wcoherence(___,ts)
wcoherence(__)
```

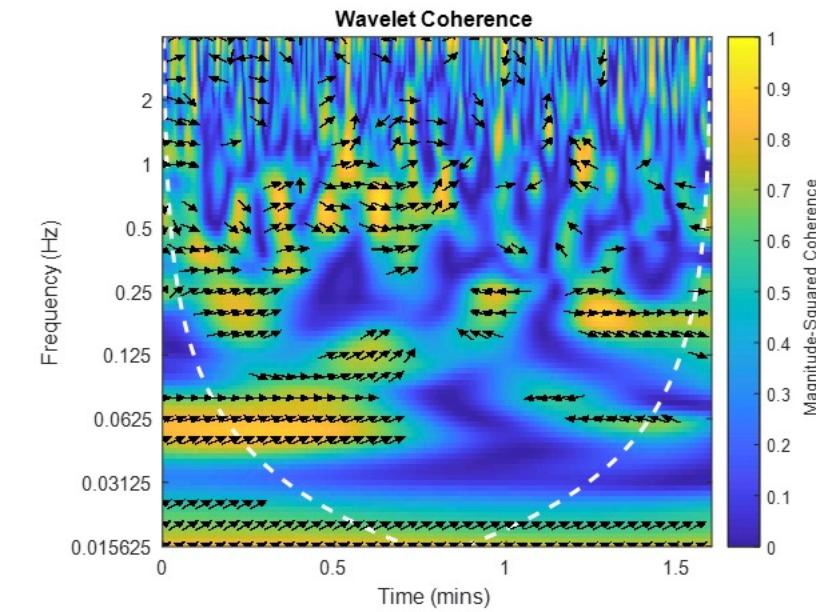
- 之前的研究者更多使用Grinsted(2004)开发的wtc_master工具包，但MATLAB植入该函数后提供了更丰富的指标与稳定
- 该函数结果与wtc_master基本一致但有细微区别

WTC结果 = **wcoherence**(男性单channel数据, 女性单channel数据)

计算脑同步指标



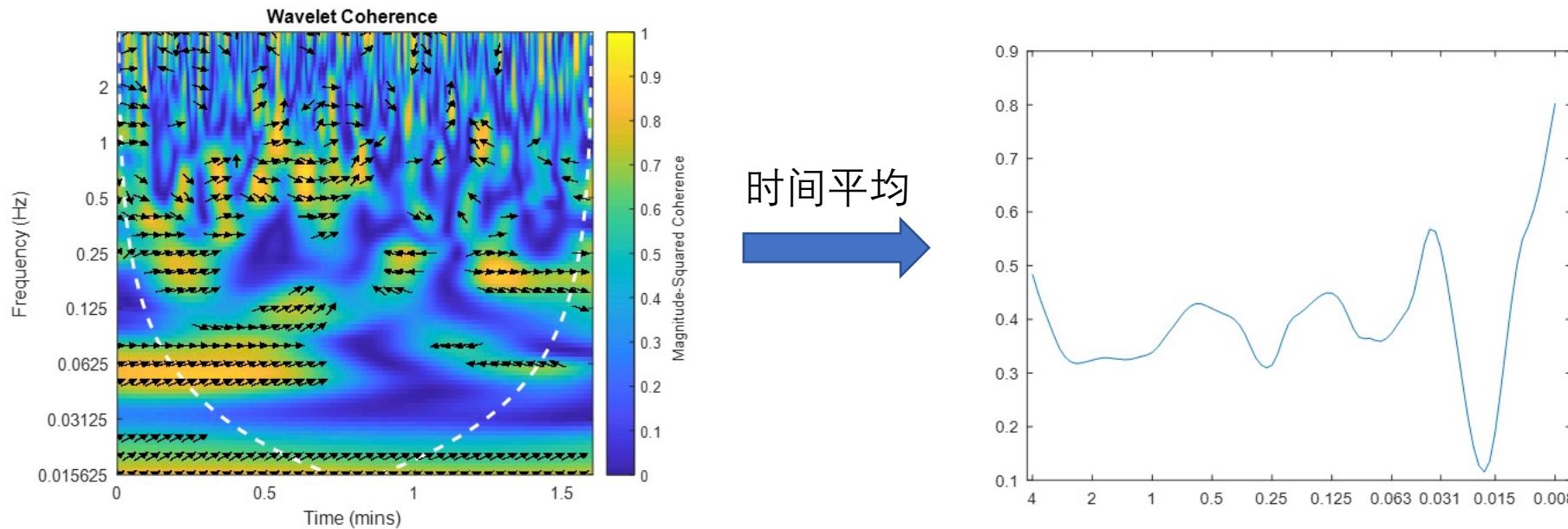
wcoherence(data1, data2, fs)



这样我们就完成了一对被试在一个任务下一对channel上脑同步指标的计算

计算脑同步指标

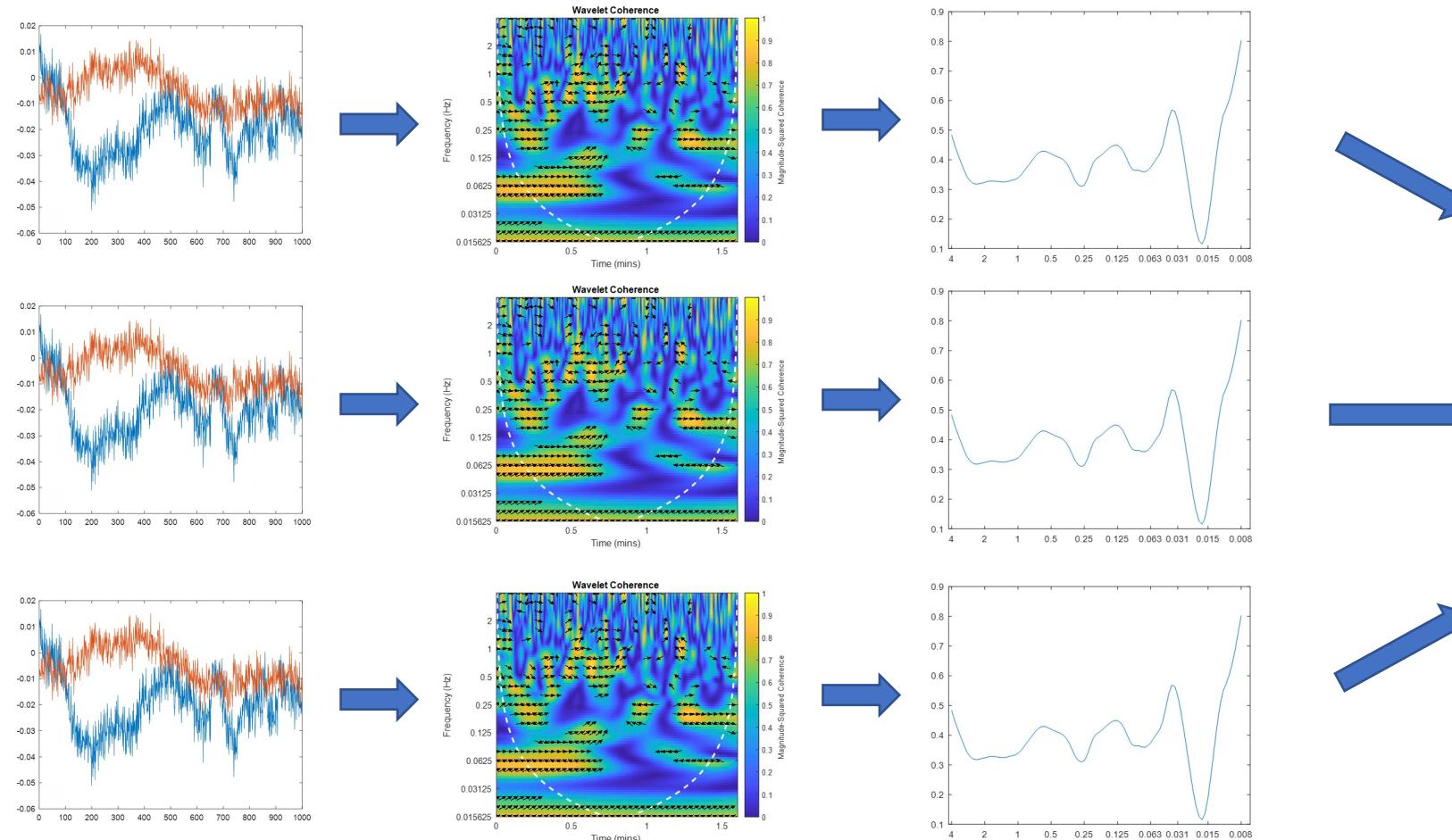
- 如果没有特别的数据分段或时间锁定的先验假设，我们在之后群体水平的分析往往是对时间平均的WTC进行分析



tips: 存储空间充裕也可以先保存完整数据

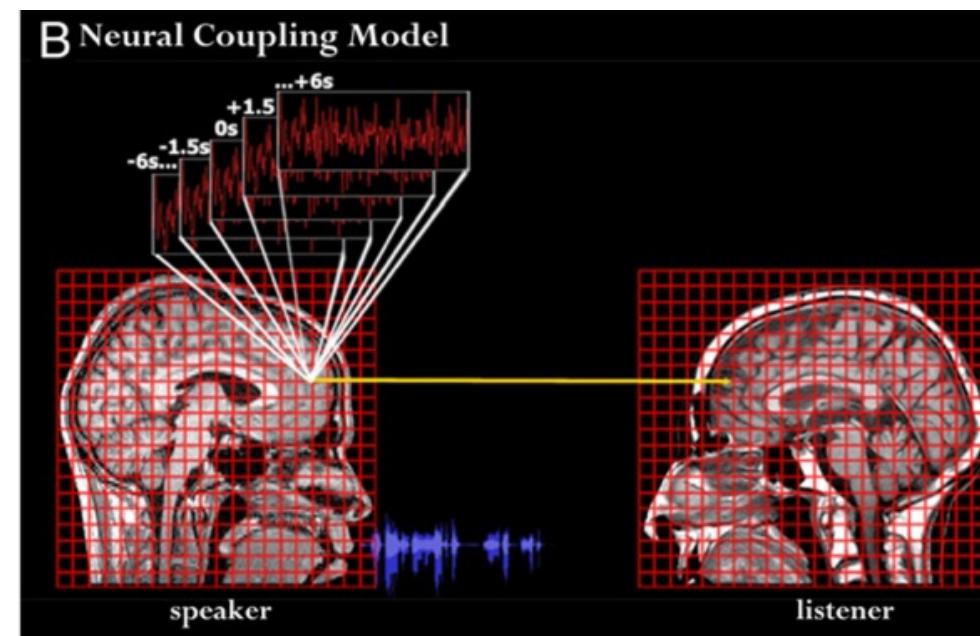
loop your code

- 将单次WTC计算嵌套进自己的数据结构里



time-lag 脑同步分析

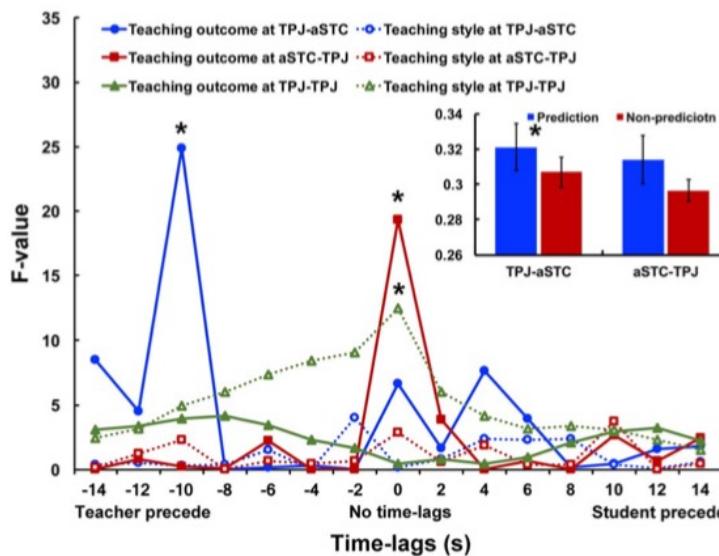
- 对于绝大多数的社会互动情景，人和人之间都几乎是瞬发同步的
- 视听传播的时间、认知通达的时间、整合理解的时间、反馈反应的时间，都使得人和人之间的神经同步会存在时间差
- 因此，在脑同步分析中引入时滞(time-lag)十分必要



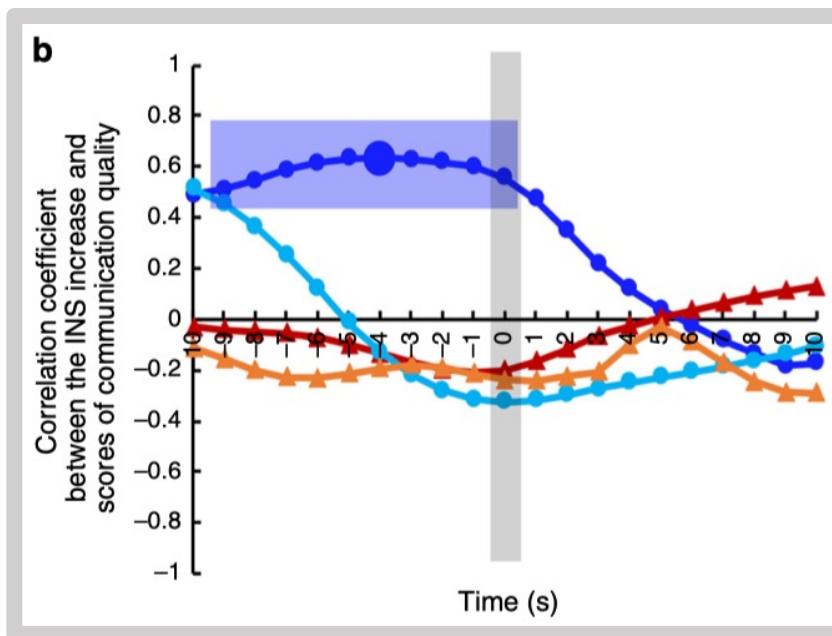
Stephens, 2010

time-lag 脑同步分析

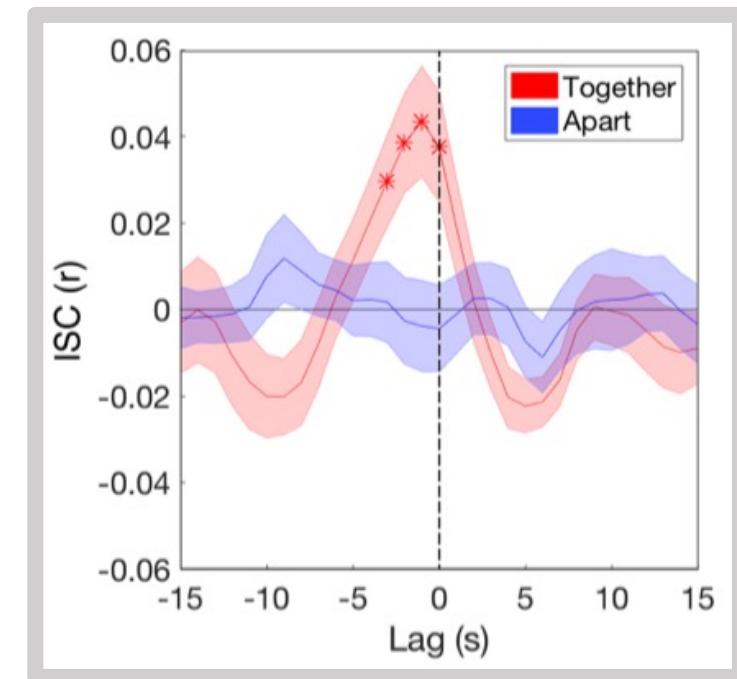
- time-lag脑同步分析不仅有利于我们更深入理解人际互动中的信息传递模式，还可以帮助我们判断交流中起主导地位的角色



Zheng, 2018

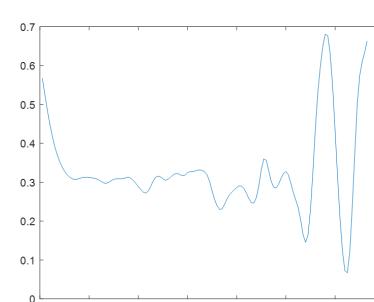
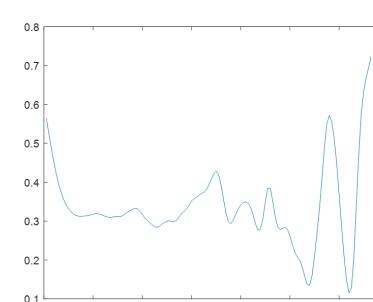
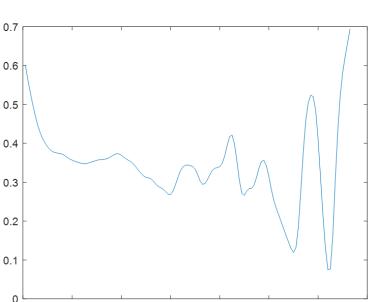
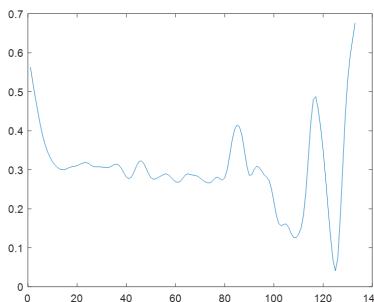
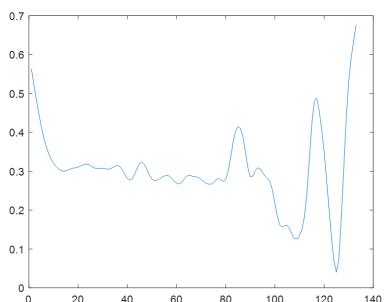
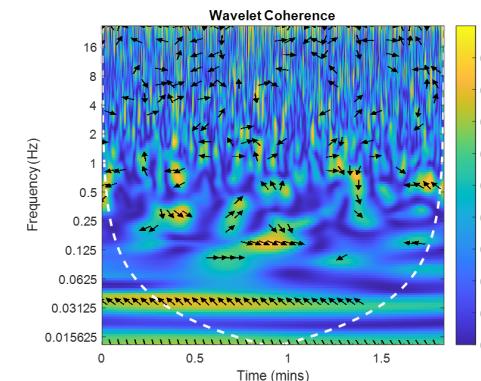
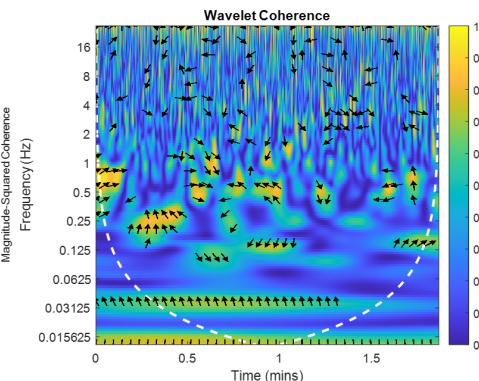
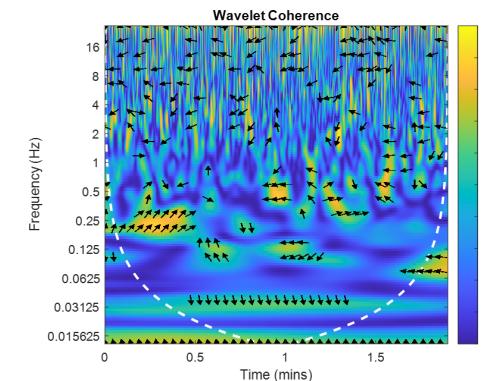
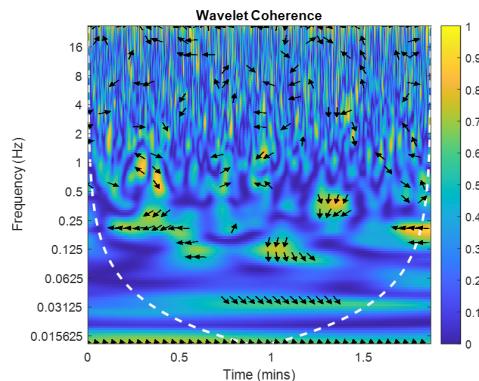
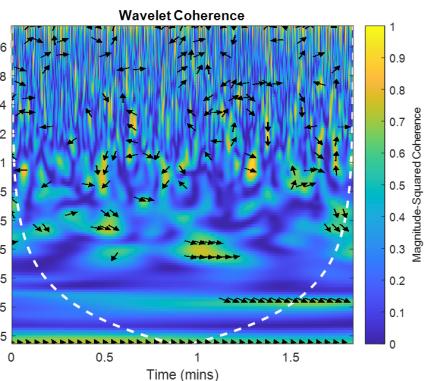
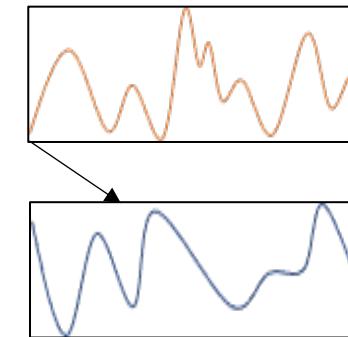
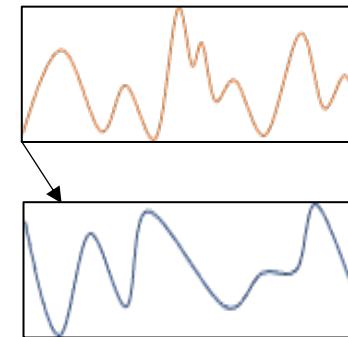
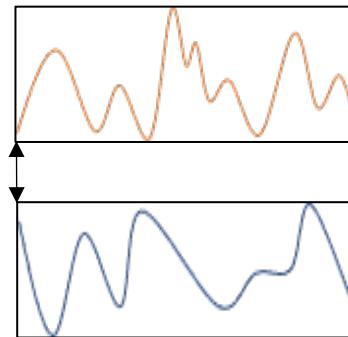
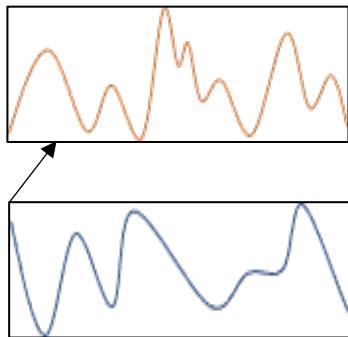
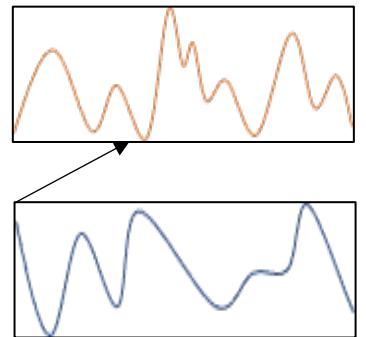


Dai, 2018

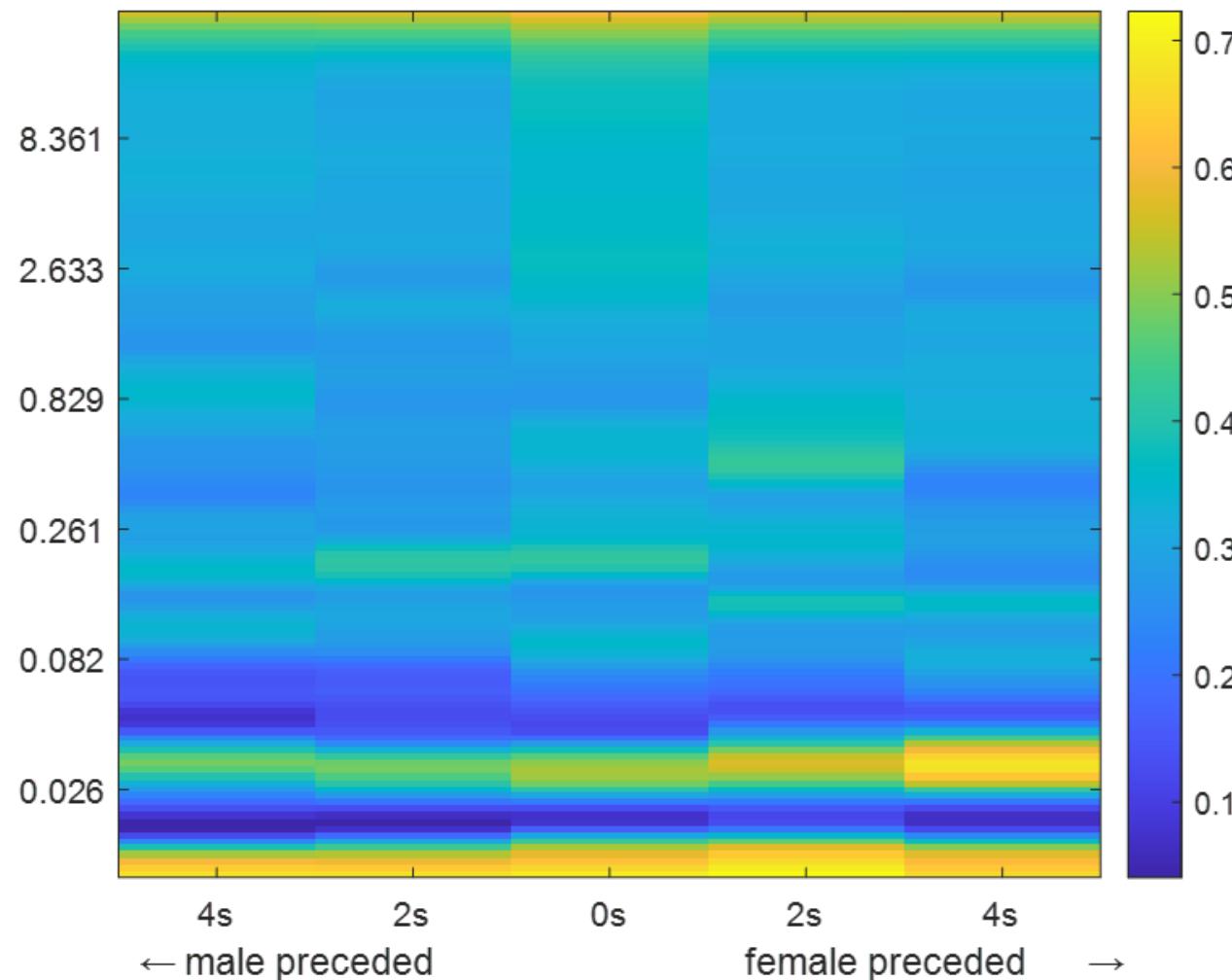


Piazza, 2018

如何计算time-lag WTC

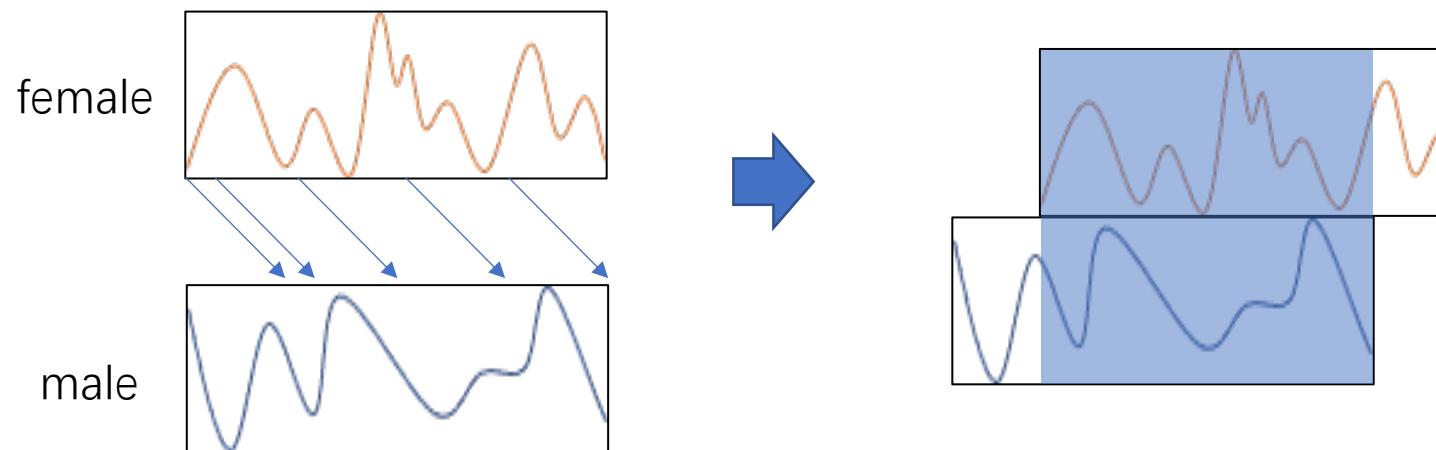


如何计算time-lag WTC



实操细节

- 计算time-lag WTC只需要在计算WTC之前shift and align数据即可，但这一步往往很容易犯错误，因为理解和实操的关系是反的



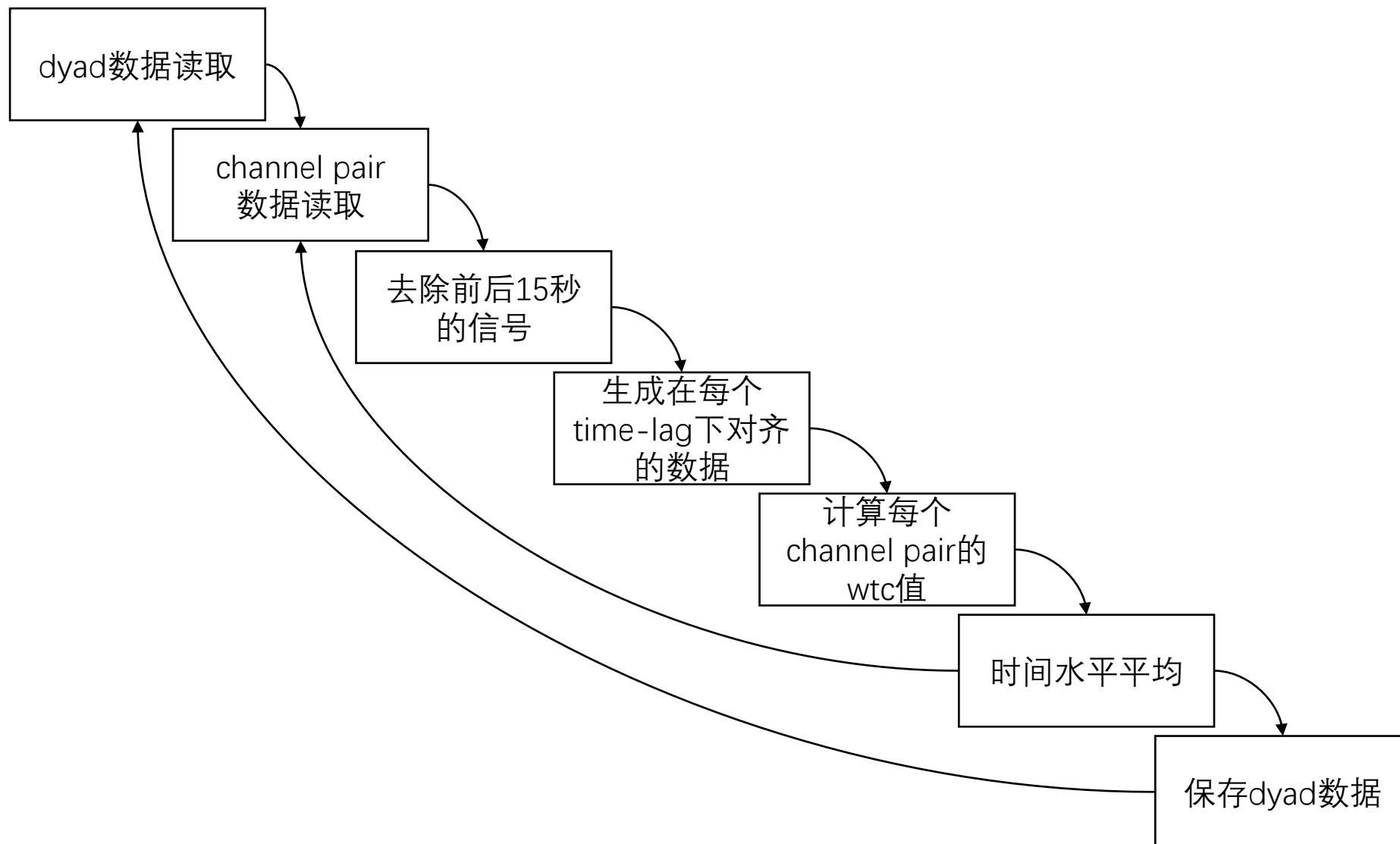
如果我们关心女性提前男性4s的脑同步关系

口诀：谁落后谁砍头

则我们需要截断男性前4s的信号
与女性第1s的信号对齐

同时为了保证数据等长，还需要
截断女性后4s的信号

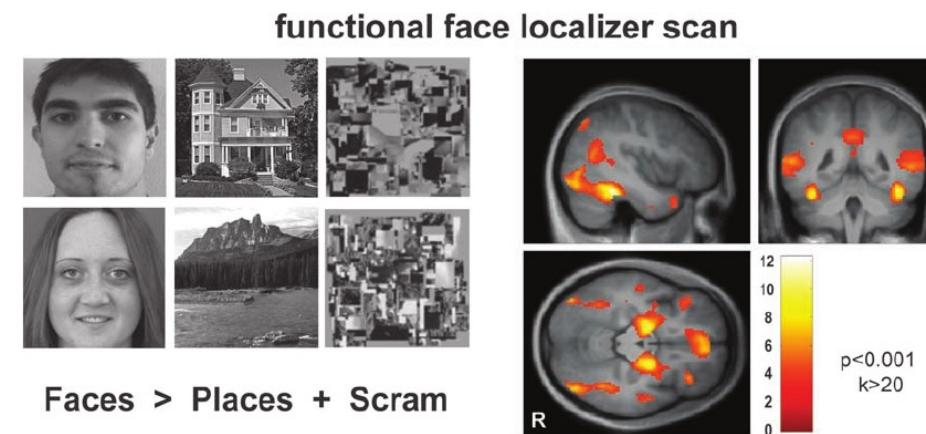
dyadic水平分析总结



群体水平分析

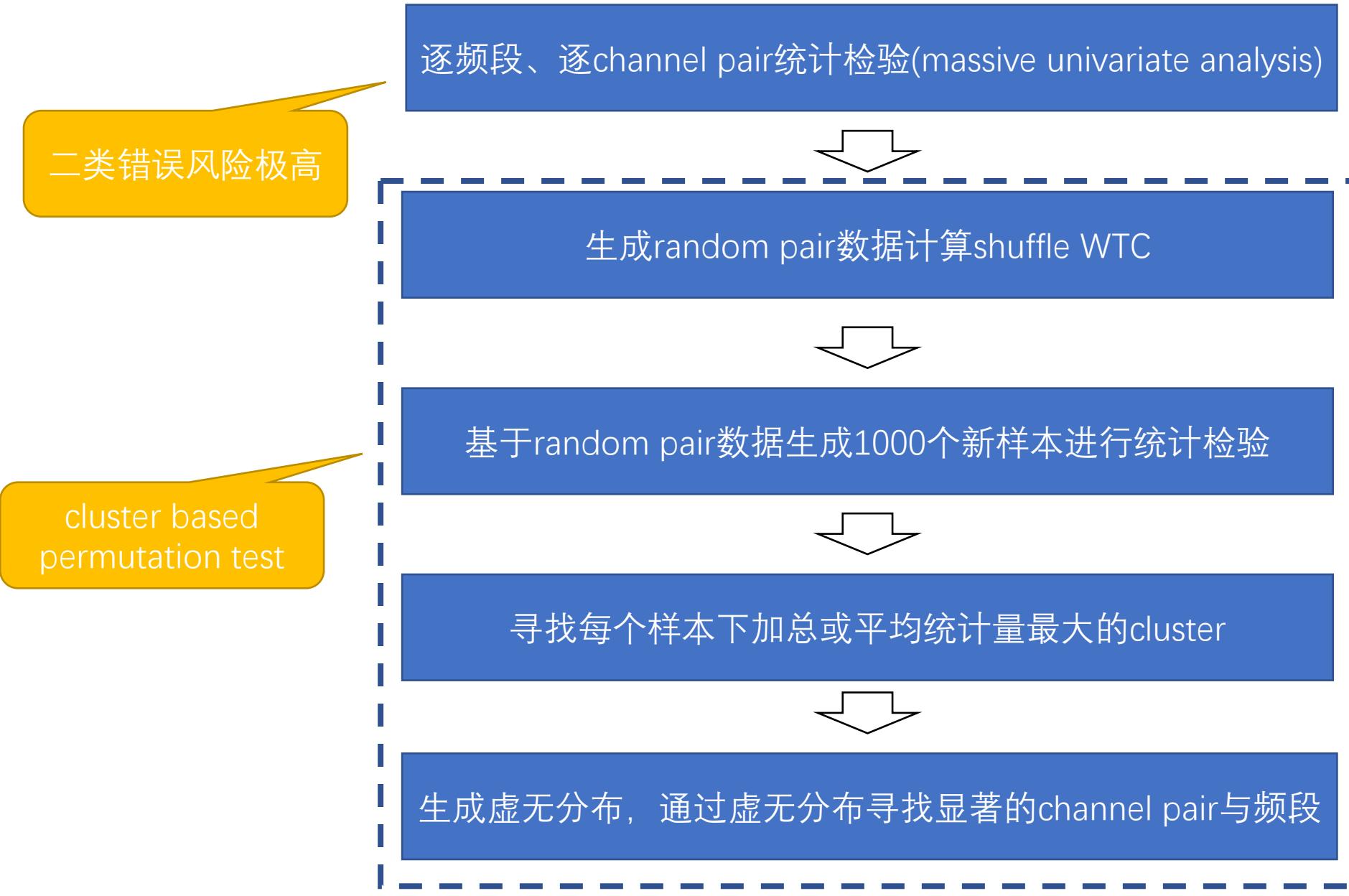
群体水平分析框架

- 在提取了dyadic水平的神经同步指标后，我们就需要将所有dyad的结果合并在一起按照实验设计进行假设检验
- 和绝大多数心理学以及认知神经科学实验相同，脑同步实验也采用因子设计和参数设计，绝大多数是因子设计
 - 因子设计：通过对神经指标进行条件间、群组间对比 (conditional/group contrast)来推理得出结论



Gschwind, 2011

dyadic水平分析框架

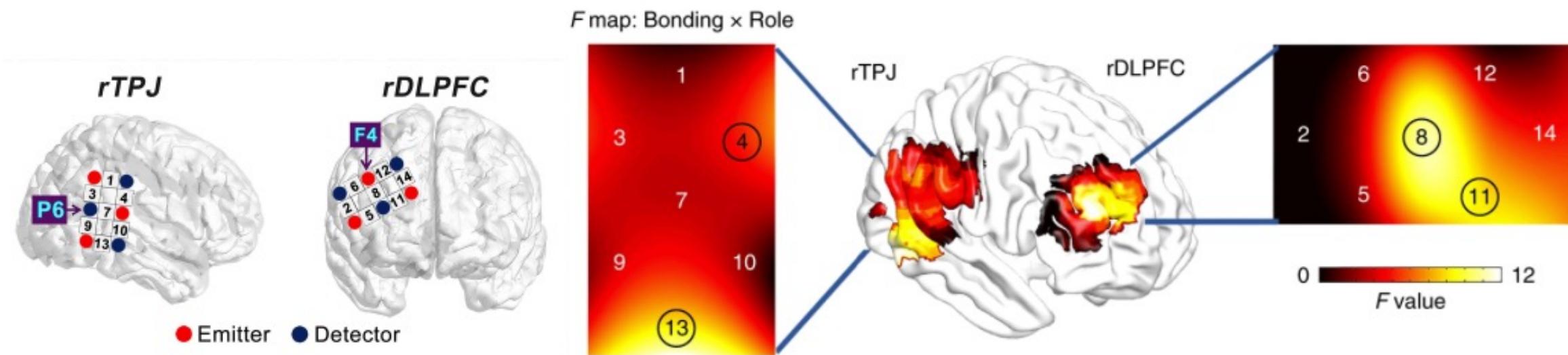


分析方案

- 是否有先验的channel pair选择？
- 是否有先验的频段选择？
- 是仅统计aligned channel的WTC还是也统计cross channel的WTC？
- dyad内的被试是否有角色区分？
- 研究问题与预期？

分析方案

- 是否有先验的channel pair选择？
 - 这一步一般在数据采集前的layout设计阶段就要考虑到，如果有先验的channel pair设计，需要提供充分的证据



Yang, 2020

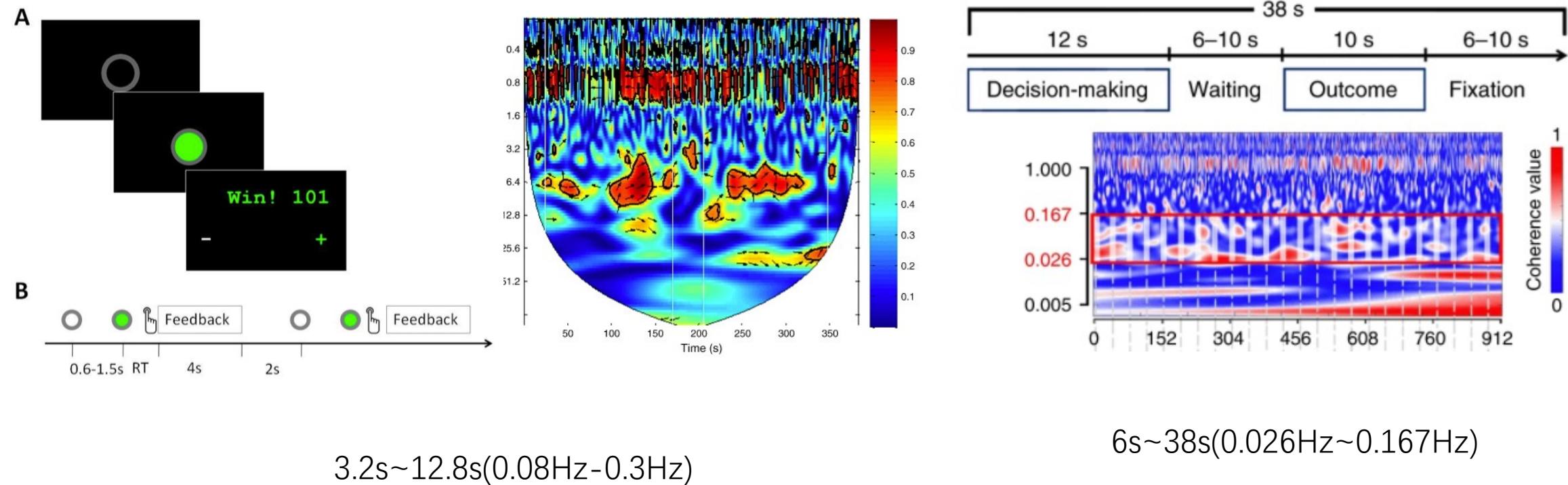
分析方案

- 是否有先验的频段选择？
 - 首先，一些涉及生理噪声的频段要先排除掉：
 - data above 0.7 Hz were excluded to avoid aliasing of high frequency physiological noise such as cardiac activity (~0.8–2.5 Hz);
 - data below 0.01 Hz were excluded to remove very low frequency fluctuations;
 - data within 0.15–0.3 Hz were also excluded to avoid the effect of respiratory activity

Tong, 2011

分析方案

- 一般hyperscanning研究分为两类：trial-by-trial设计，自然实验设计
 - 对tbt实验，一般只要提取任务序列频段即可

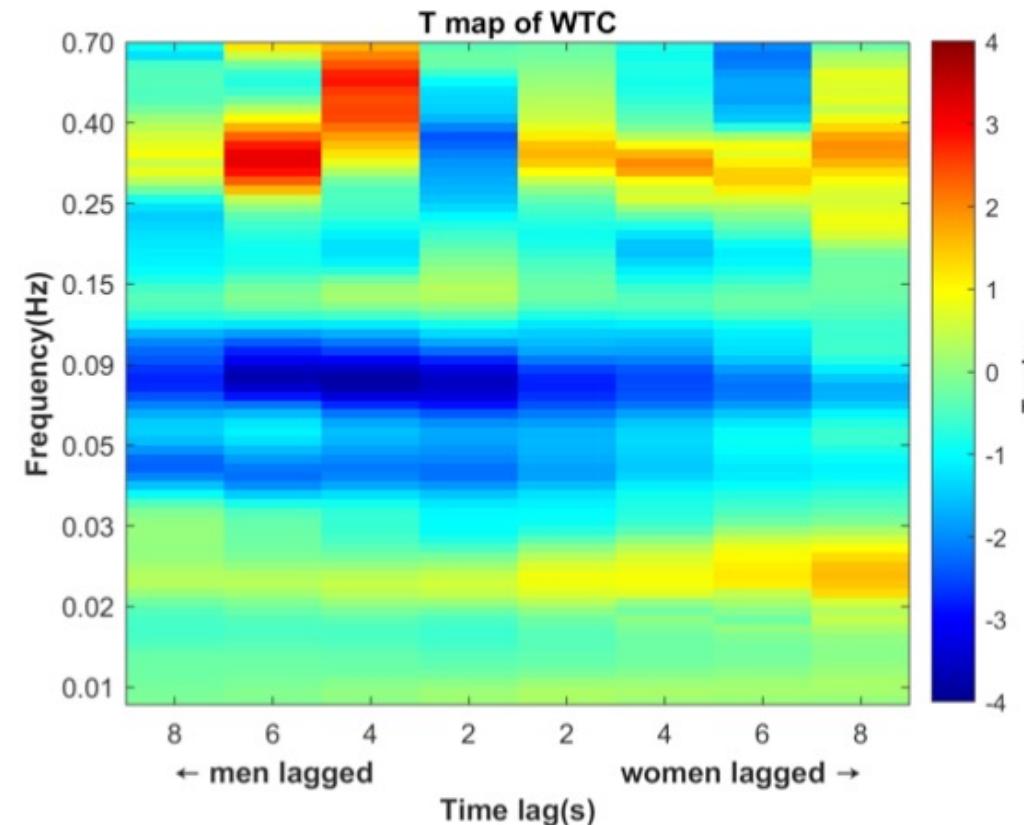


Cui, 2012

Yang, 2020

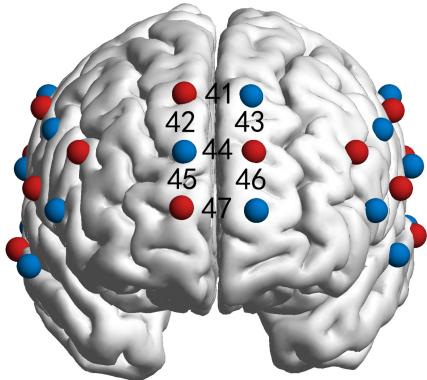
分析方案

- 对于自然实验设计则没有很好的办法确认先验频段，往往只能通过 data-driven 的方式获取

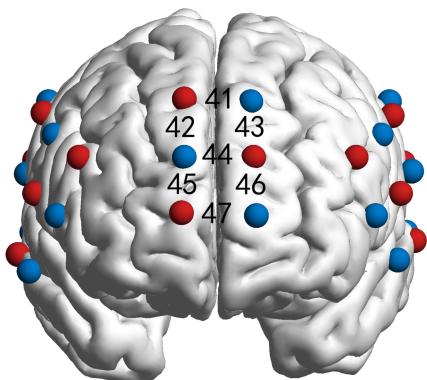


分析方案

- 是仅统计aligned channel的WTC还是也统计cross channel的WTC ?



subject A



subject B

	B41	B42	B43	B44	B45	B46	B47
A41	A41-B41	A41-B42	A41-B43	A41-B44	A41-B45	A41-B46	A41-B47
A42	A42-B41	A42-B42	A42-B43	A42-B44	A42-B45	A42-B46	A42-B47
A43	A43-B41	A43-B42	A43-B43	A43-B44	A43-B45	A43-B46	A43-B47
A44	A44-B41	A44-B42	A44-B43	A44-B44	A44-B45	A44-B46	A44-B47
A45	A45-B41	A45-B42	A45-B43	A45-B44	A45-B45	A45-B46	A45-B47
A46	A46-B41	A46-B42	A46-B43	A46-B44	A46-B45	A46-B46	A46-B47
A47	A47-B41	A47-B42	A47-B43	A47-B44	A47-B45	A47-B46	A47-B47

aligned channel
 cross channel

对于应该使用哪一种模式没有明确规定，一般存在互动的任务都建议使用 cross-channel WTC

有观点认为aligned channel WTC反映了共享表征及认知加工过程，cross channel WTC反映了信息在交流者之间的流动，但这一观点还有待更多证据支持(Zheng, 2019)

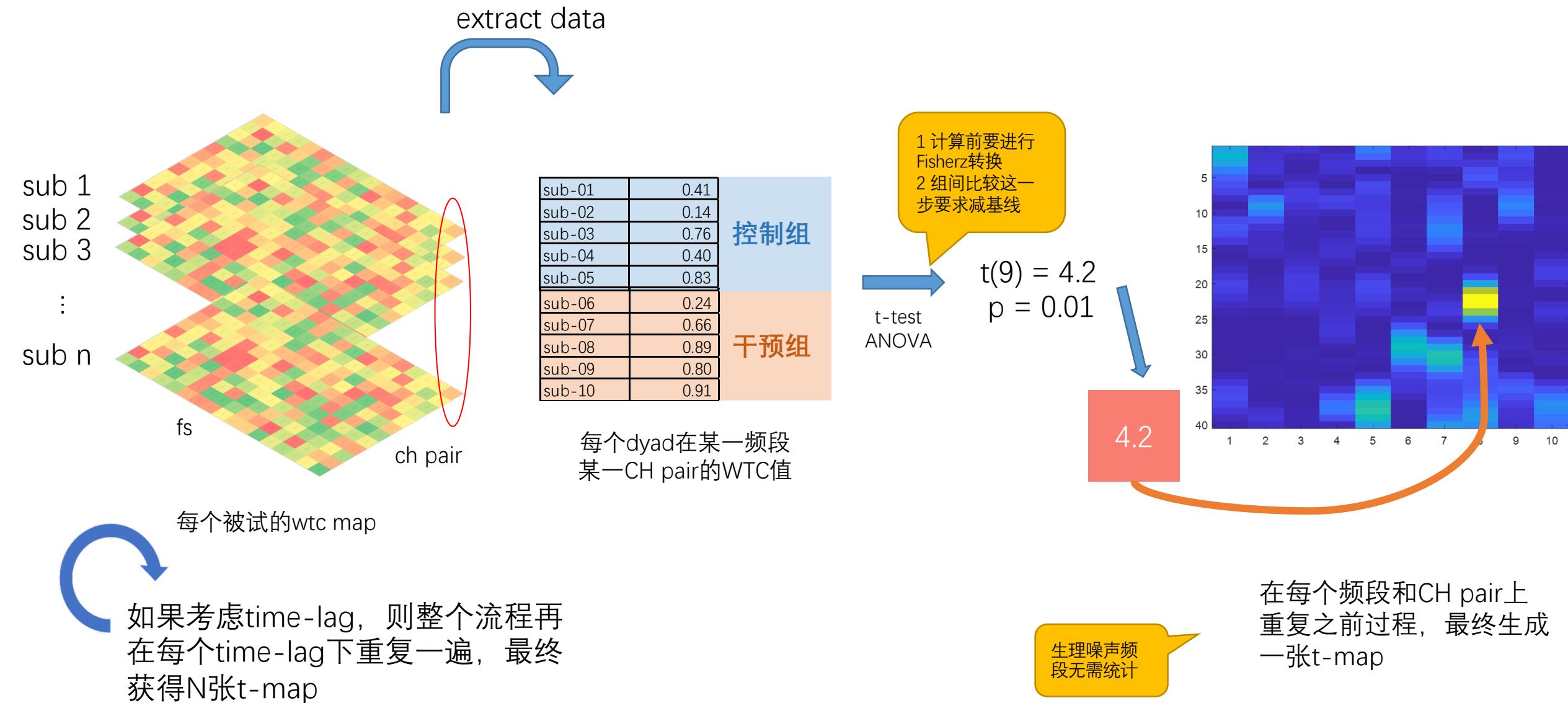
分析方案

- dyad内被试是否有角色区分？
 - 对于有角色区分的数据，在进行组水平分析前要确保cross-channel pair在每对被试间是对齐的，不要误将 $\text{CH5}_{\text{male}} - \text{CH10}_{\text{female}}$ 和 $\text{CH5}_{\text{female}} - \text{CH10}_{\text{male}}$ 混在一起
 - 这一步在dyadic level就要注意到，保证数据存储的顺序是一致的
- 没有角色区分的数据一般被称作indistinguishable dyad，这类数据一般建议如下操作：
 - 仅计算aligned channel WTC
 - 随机分配无意义角色标签（如role A与roleB）
 - 将两名被试对应的cross channel WTC平均（即平均 $\text{CH5}_A - \text{CH10}_B$ 和 $\text{CH5}_B - \text{CH10}_A$ ）
 - 其中前两种方法都较为常见

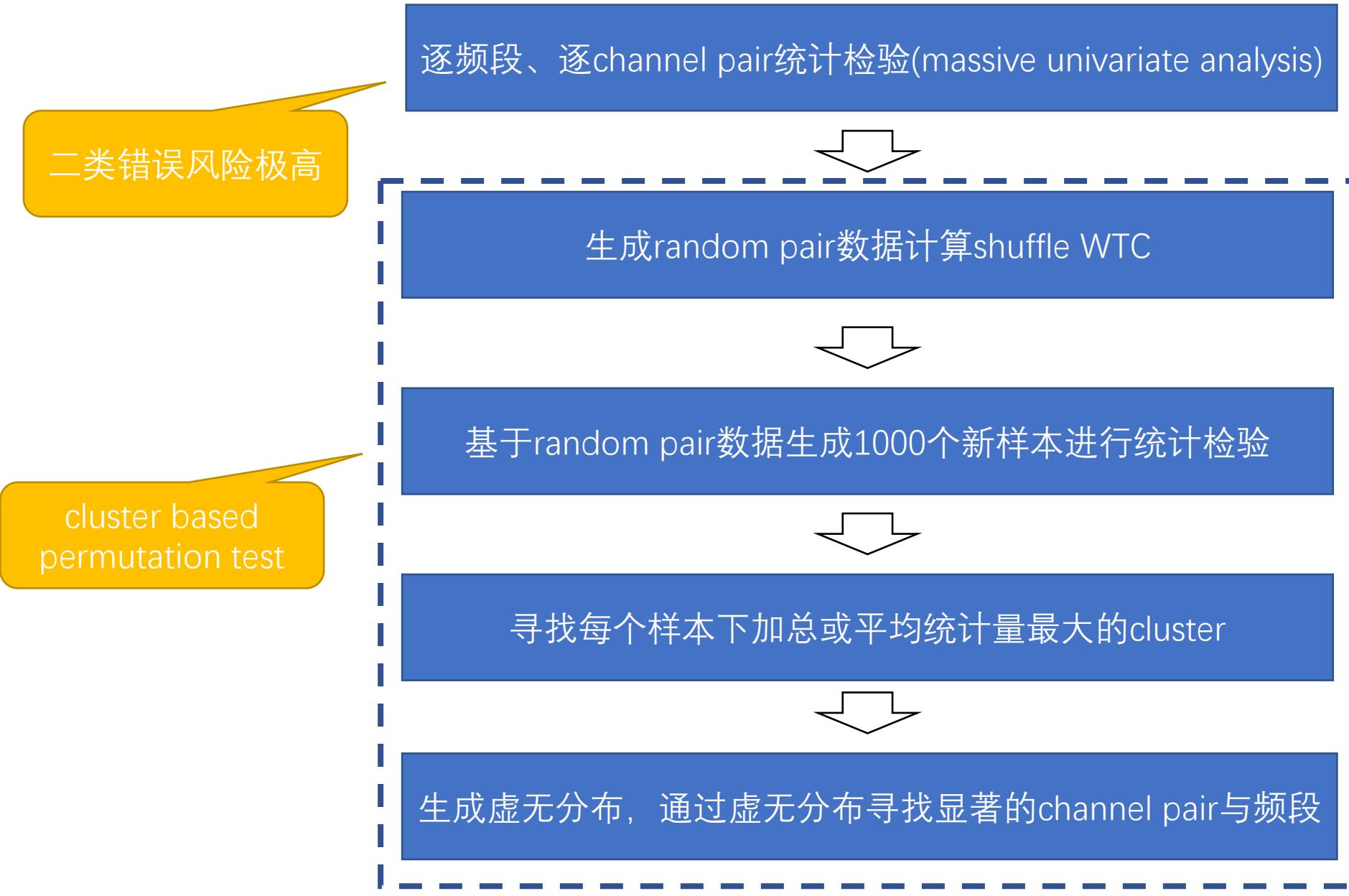
聚焦本研究

- 研究问题：干预组产生冲突的时候是否脑同步更高？
 - 是否有先验的channel pair选择？
 - 无，在layout所有channel pair上进行统计
 - 是否有先验的频段选择？
 - 无，仅排除生理噪声频段
 - 是仅统计aligned channel的WTC还是也统计cross channel的WTC？
 - 统计cross channel WTC
 - dyad内的被试是否有角色区分？
 - 有，男性与女性
- 预期：
 - 干预组在某些特定channel pair和特定频段下，WTC会显著高于控制组

massive univariate analysis



dyadic水平分析框架

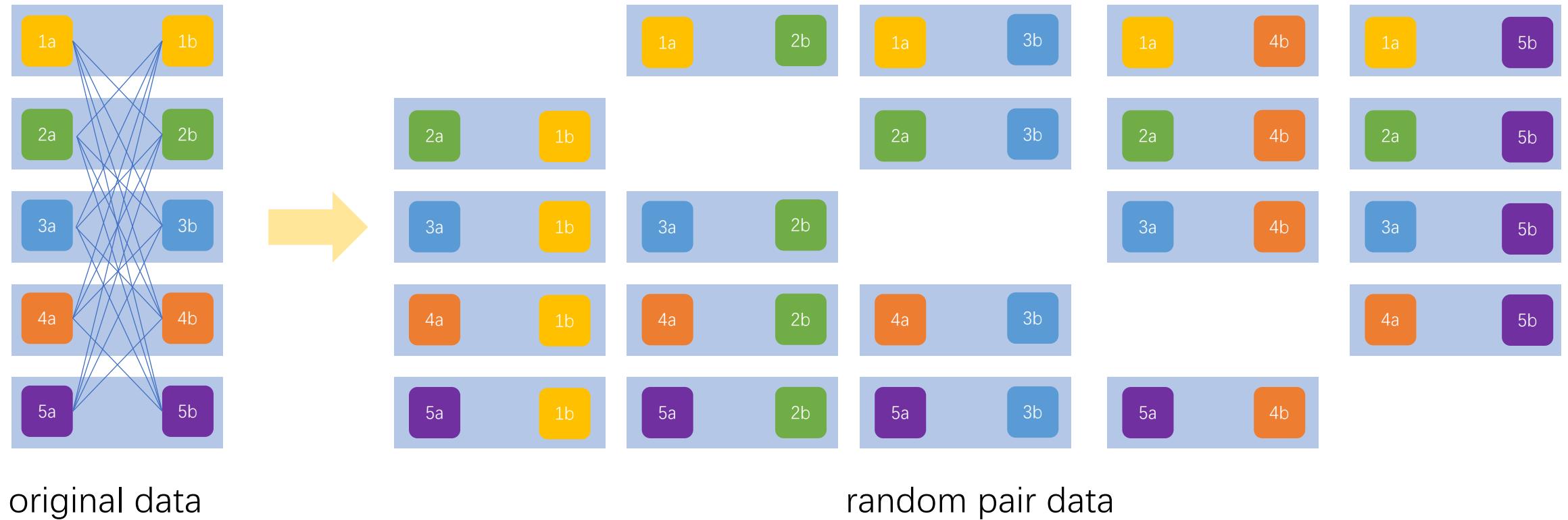


生成random pair数据

- 现在我们已经获得了真实样本下在冲突时干预组脑同步 vs 控制脑同步的统计检验结果，但是还不能直接通过该结果的显著性 ($\alpha=0.05$) 来寻找有意义的频段和channel pair
 - 因为我们一共进行了 $<fs \times ch\ pair \times lag>$ 次t检验，一类错误的风险极大；这就要求我们进行多重比较校正
- 在cluster-based permutation test中，统计显著性阈值是通过虚无分布来决定的，为了生成虚无分布我们首先需要生成随机配对的虚假数据

生成random pair数据

- 在hyperscanning研究中，虚假数据主要是通过一种叫做random pair的方法实现的
 - 这种方法是所有dyad内交流的被试错配，计算其实根本没有在交流的被试的脑同步性

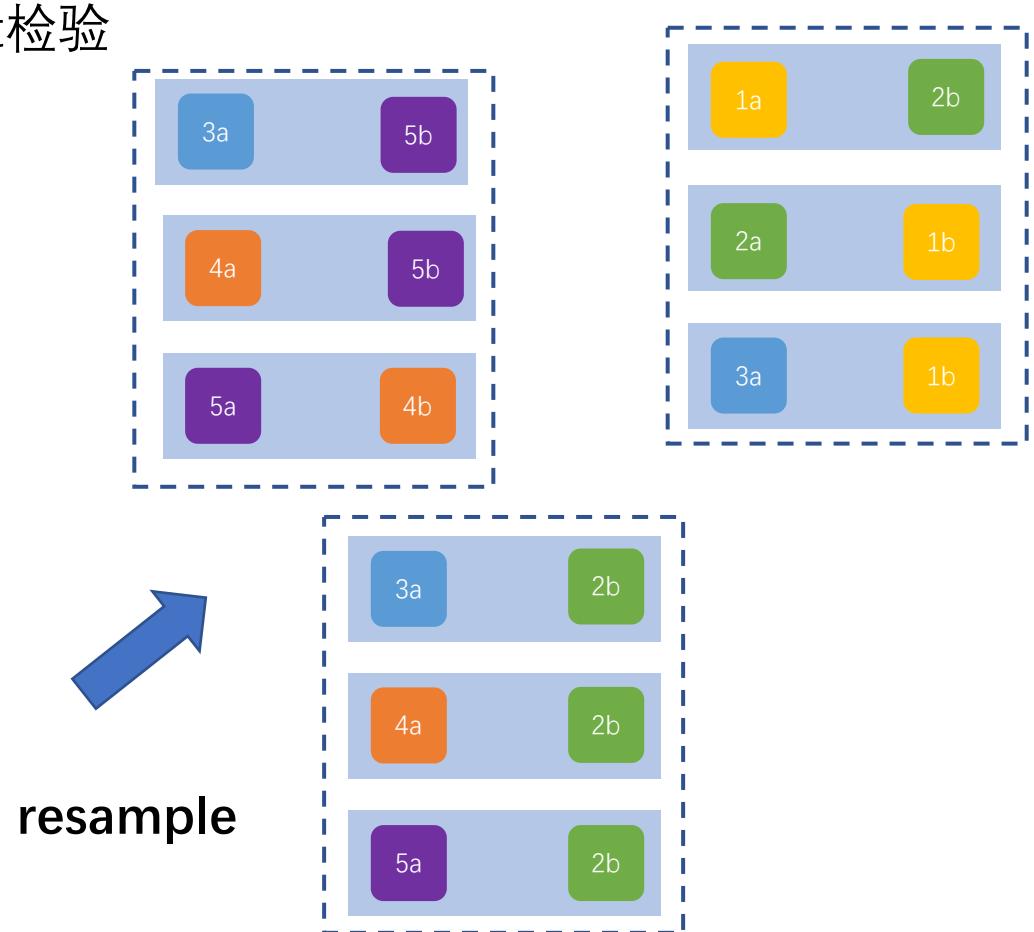
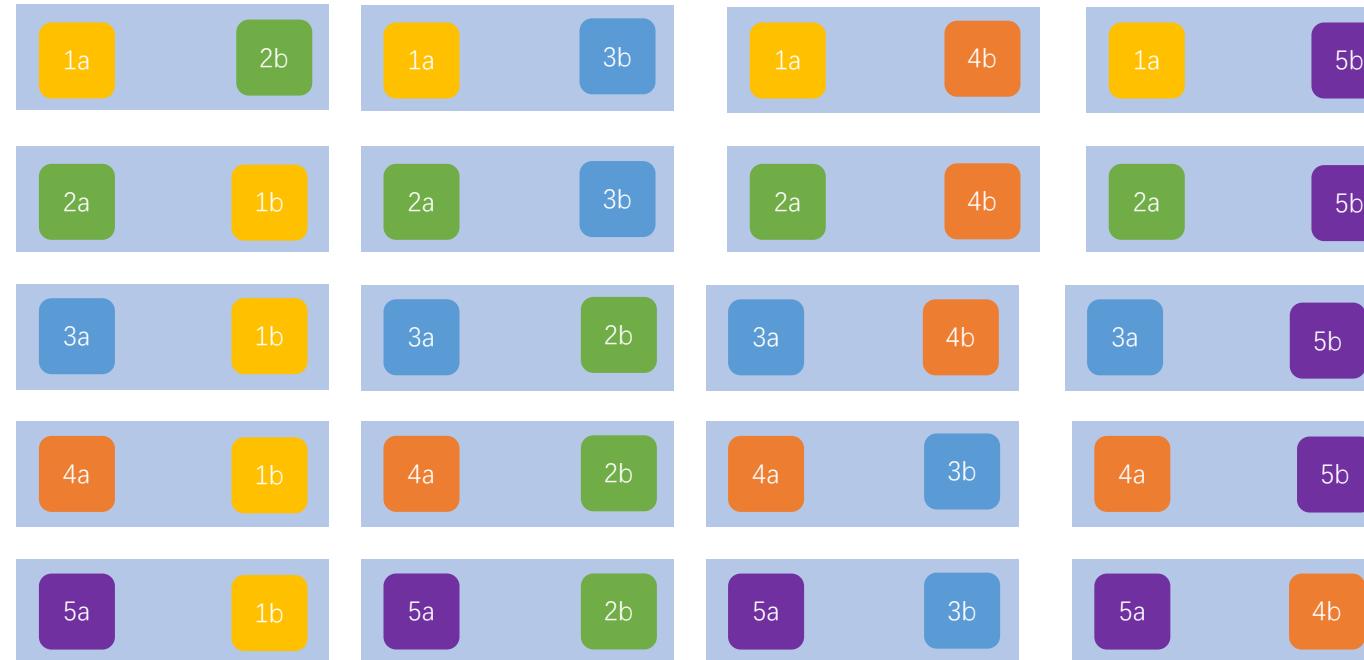


生成random pair数据

- 如果有组间变量，则random pair在每个组内独立进行
- 对于我们的示例实验而言：
 - 控制组5对被试random pair后生成20对虚假数据
 - 干预组5对被试random pair后生成20对虚假数据
- 之后，我们对这共计40对被试进行和之前一样的dyadic level分析，计算它们在task和rest下的WTC

重抽样

- 对所有新生成的random pair完成dyadic-level分析后，我们就需要在群体水平分析生成虚假分布
 - 每次从20对虚假干预组抽出5对被试，再从20对虚假控制组抽出5对被试构成一个虚无样本
 - 这样的抽样重复1000次，每次都进行和之前一样的t检验

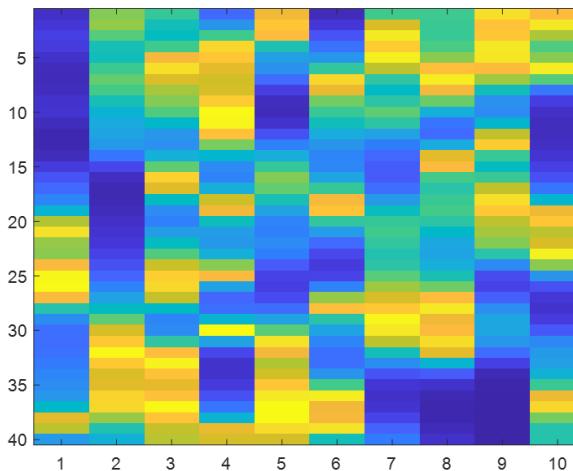


重抽样

- 对1000个虚无样本，每个虚无样本都进行和之前一样的群体水平分析
- 最后我们会获得 $1000 * 4$ 个time-lag张t-map和p-map

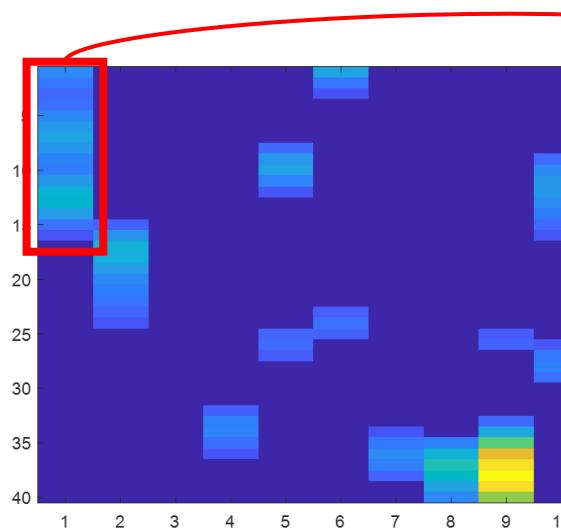
生成虚无分布

- 一般我们会对每个time-lag生成一个虚无分布，这里以一个time-lag为例



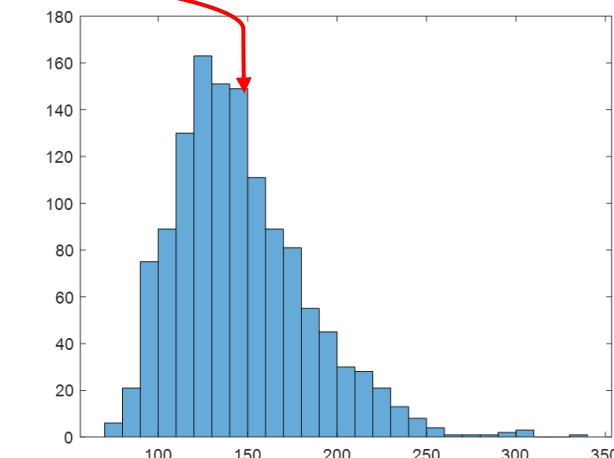
shuffle t-map

生成 $p < 0.05$ 的mask
→



选取频域方向上最长或t值总和最大的cluster，计算其sum t值

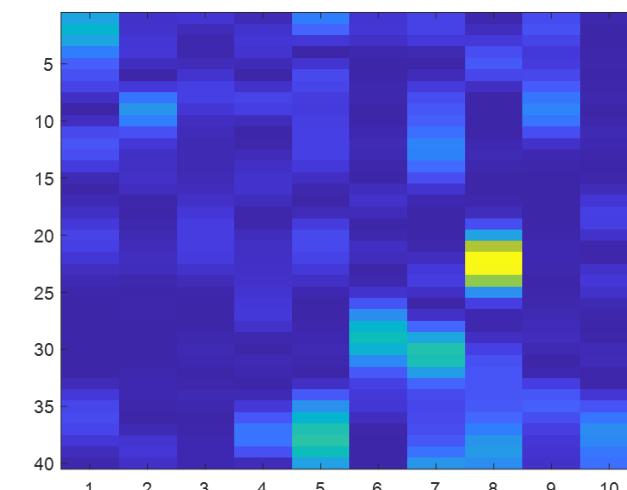
这样就获得了一个虚无样本产生的最大t值



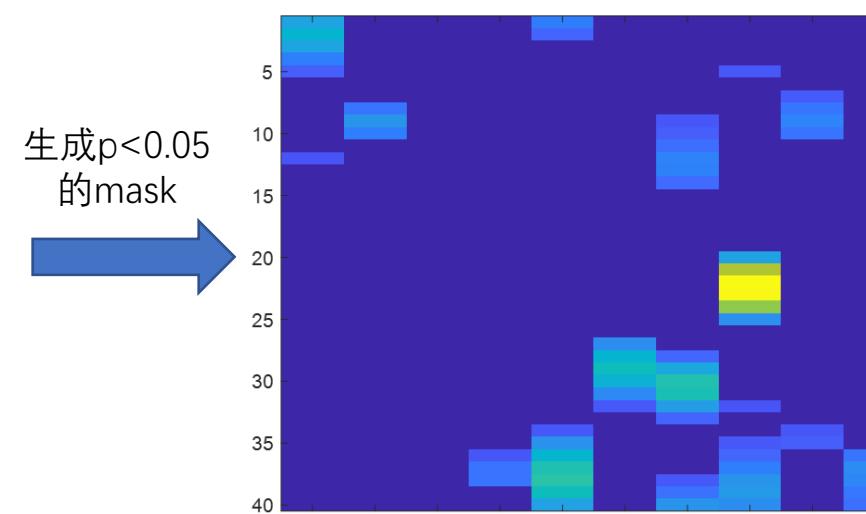
每个虚无样本产生的最大t值汇总起来，我们就得到了一个“最大随机噪音分布”

基于虚无分布寻找显著channel pair与频段

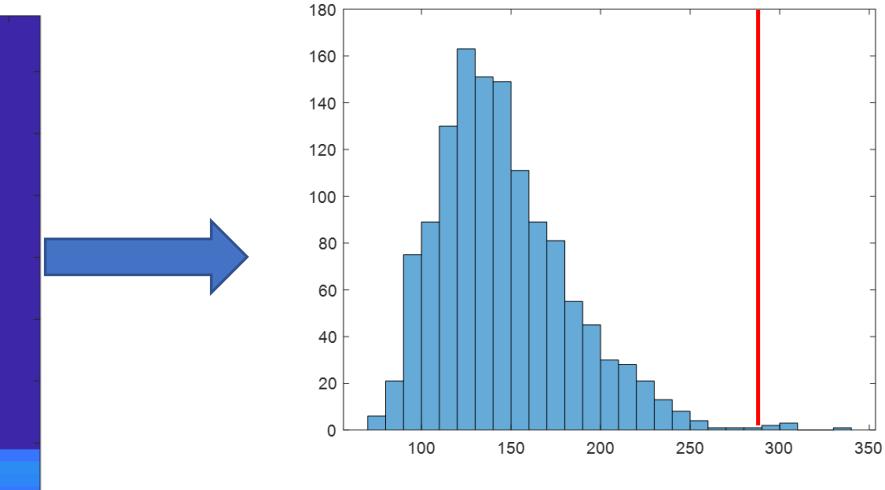
寻找显著channel pair与频段的方法与之前十分类似



real t-map



选取所有的cluster, 计算其sum t值



比较每个cluster的sum t值在虚无分布中的位置, 超过95%即可视为显著

保存显著的结果即可完成所有分析

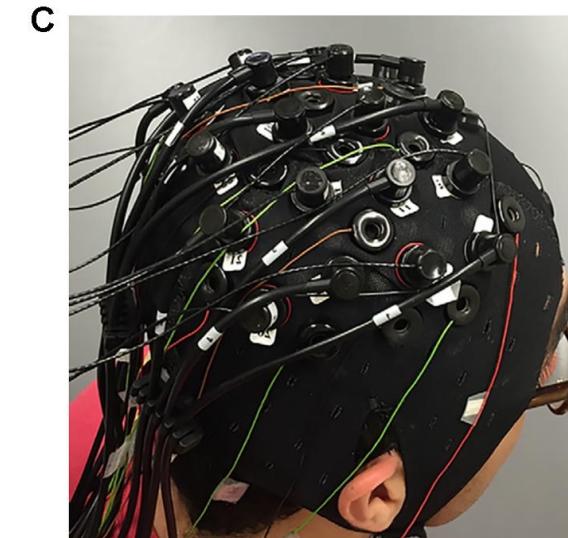
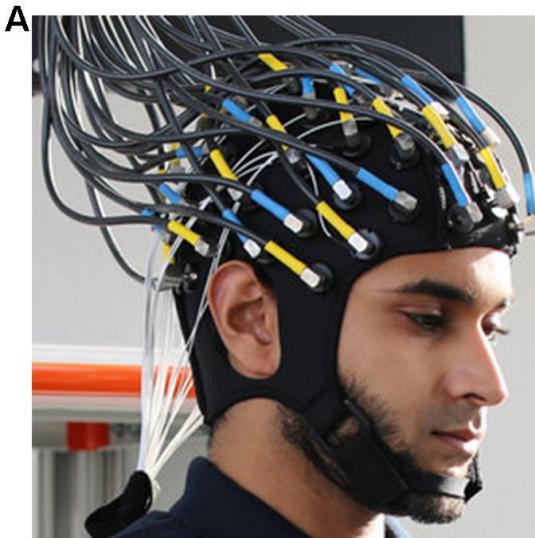
深入数据挖掘

其他分析 – 示例

- 在确定初步结果后可以根据自己的研究主题进行很多深入分析：
- 行为-神经相关
 - 行为与问卷测量
 - 在吵架结束后让被试评价感受到的冲突水平，计算WTC和冲突水平均值的相关性
 - 在实验前测量被试的共情能力，看WTC和冲突水平的相关是否受到共情能力的调节
 - 编码
 - 根据实验中录制的视频编码被试的冲突行为，通过比较冲突行为发生vs未发生时的WTC判断脑同步是否特异于冲突行为
 - 以每次冲突行为发生为event marker，看WTC是在冲突事件发生前就升高了还是冲突事件发生后才升高
 - etc.

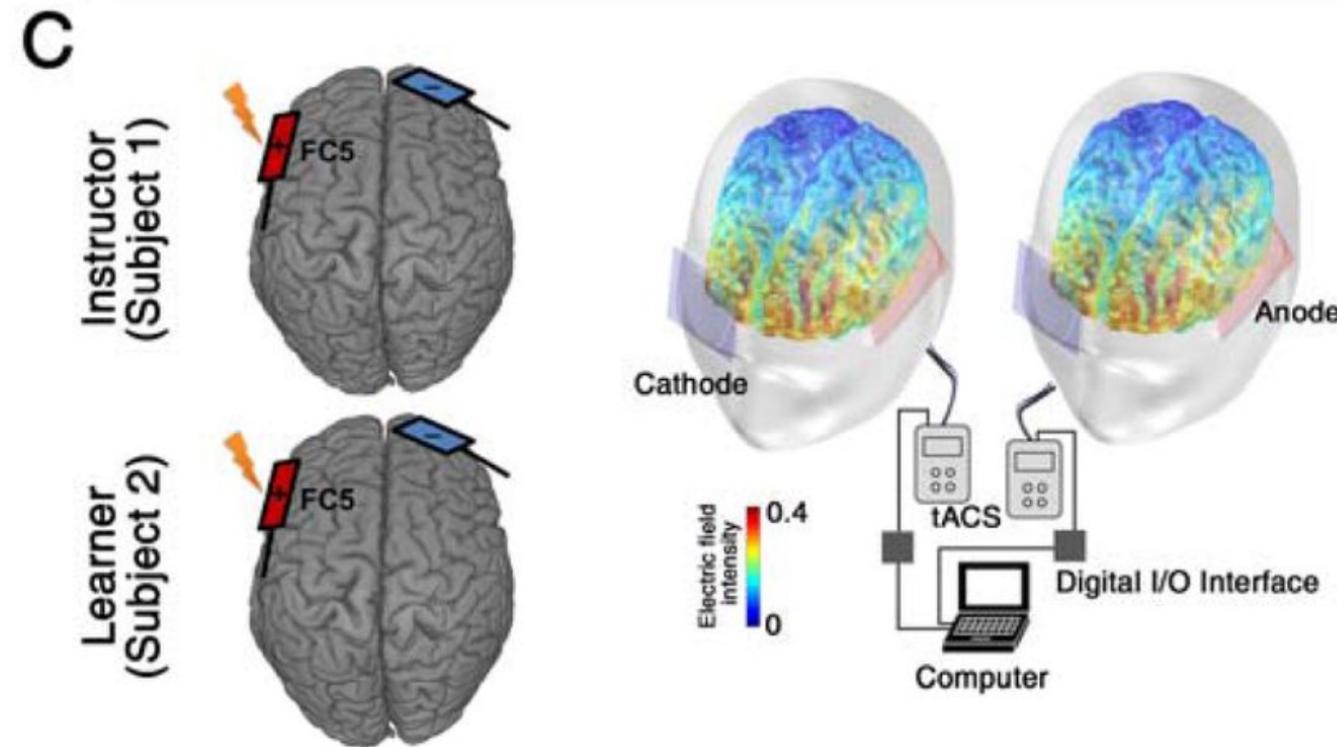
其他分析

- 多模态整合
 - 在交流过程中可以同步采集EEG、GSR等数据，进行多模态整合分析



其他分析

- 多脑刺激分析



其他分析

- 多人群体互动



source

- Demo data and code today
 - https://github.com/manipulative/fnirs_hyperscanning_tutorial
- HyPyP: a Hyperscanning Python Pipeline
 - <https://github.com/ppsp-team/HyPyP>

谢谢！