

复杂动态系统分析工具在心理学中的应用

崔竞蒙 鲁汶大学 (KU Leuven)

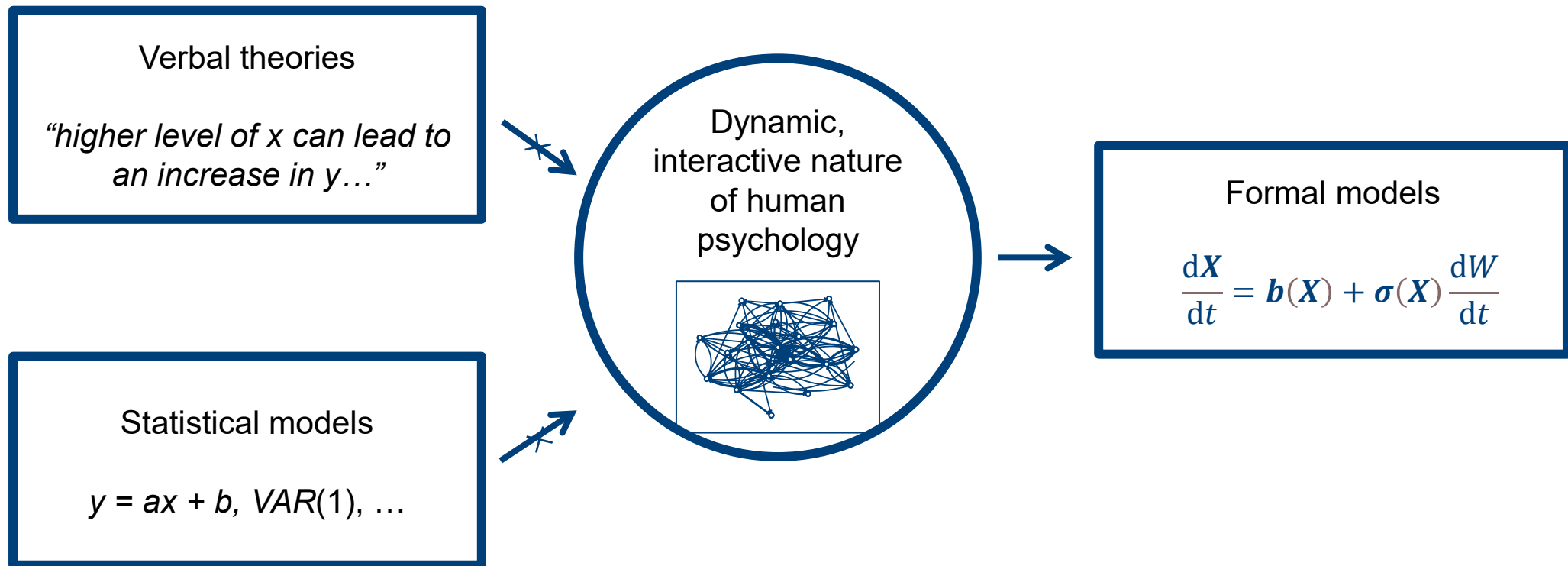
2026-05-28

大纲

- 第一部分：使用广义势能函数方法描述心理学系统
 - 动态系统数学模型及复杂系统理论
 - 对动态系统数学模型的广义势能函数方法
 - 对密集纵向数据的广义势能函数方法
 - 对伊辛网络模型的广义势能函数方法
- 第二部分：临床心理中的突然转变及早期预警信号
 - 临床心理中的突然转变现象和复杂动态系统理解
 - 早期预警信号的研究方法检验
 - 不同类型的心理变化

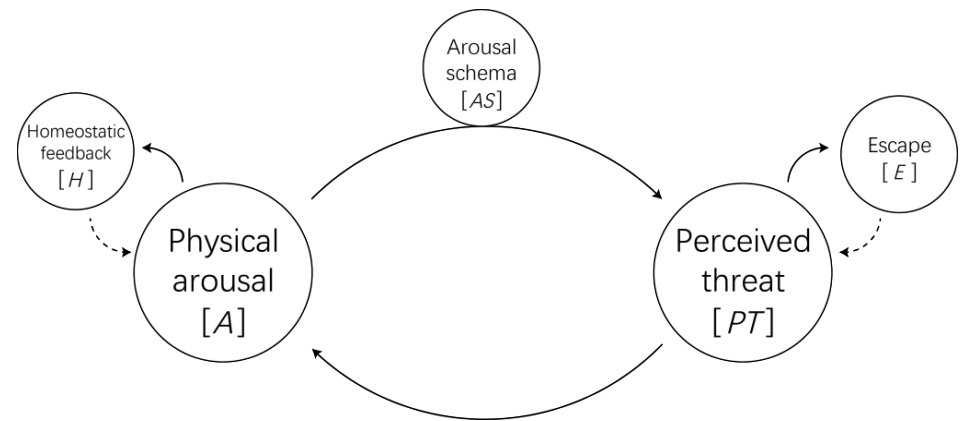
第一部分：使用广义势能函数方法描述心理学系统

动态系统数学模型及复杂系统理论



动态系统数学模型及复杂系统理论

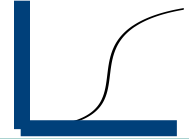
- 示例：Clark的惊恐障碍理论 (1986)
 - 惊恐障碍源于身体唤醒（physical arousal, A）与威胁感知（perceived threat, PT）之间的恶性循环。
 - 惊恐障碍患者会将身体唤醒（physical arousal, A）过度解释为危险信号；这一过度解释过程对应焦虑敏感性（anxiety sensitivity, AS）。
 - 当威胁感知（perceived threat, PT）较高时，个体往往会逃离被感知为威胁的情境，即出现逃避行为（escape, E）。
 -



动态系统数学模型及复杂系统理论

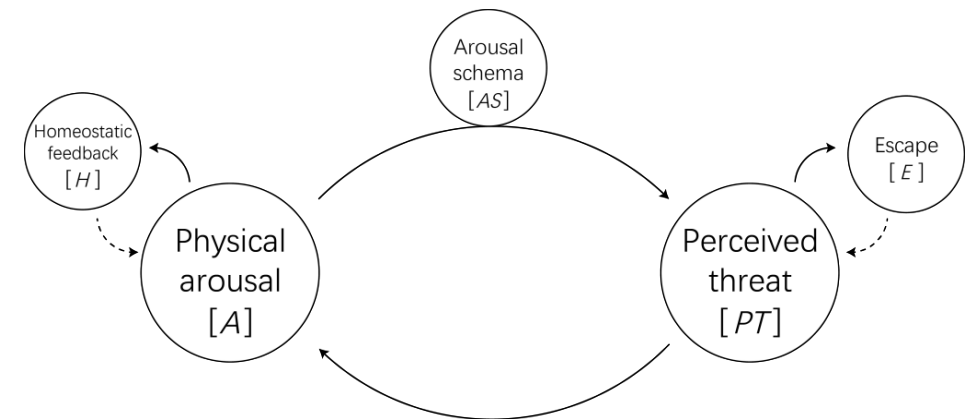
Stochastic differential equations (SDEs)

$$\frac{d\mathbf{X}}{dt} = \mathbf{b}(\mathbf{X}) + \boldsymbol{\sigma}(\mathbf{X}) \frac{dW}{dt}$$

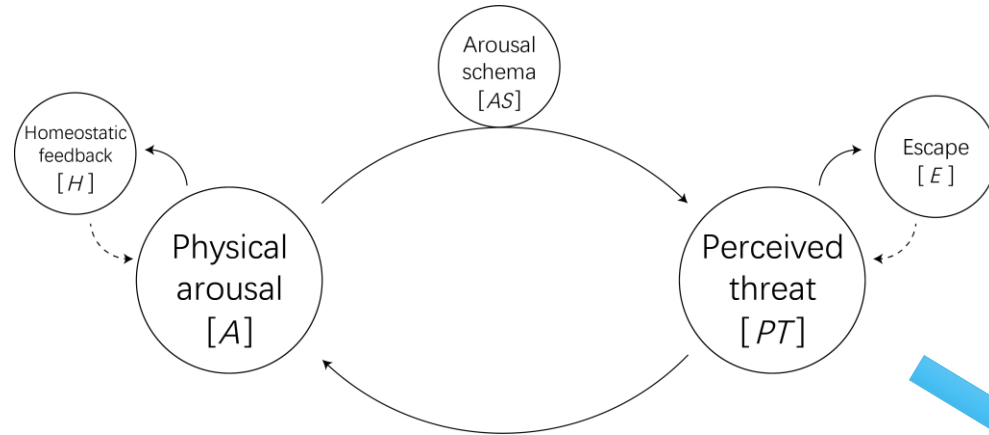


$$\begin{aligned} \frac{dA}{dt} &= r_A(s_{PT,A}PT - A - s_{H,A}H) + \sigma_A \frac{dW}{dt} \\ \frac{dH}{dt} &= r_H\left(\frac{A^{p_{A,H}}}{A^{p_{A,H}} + h_{A,H}^{p_{A,H}}} - H\right) + \sigma_H \frac{dW}{dt} \\ \frac{dPT}{dt} &= r_{PT}\left(\frac{A^{p_{A,PT}}}{A^{p_{A,PT}} + h_{A,PT}^{p_{A,PT}}} - PT - s_{E,PT}E\right) + \sigma_{PT} \frac{dW}{dt} \\ \frac{dE}{dt} &= r_E\left(\frac{PT^{p_{PT,E}}}{PT^{p_{PT,E}} + h_{PT,E}^{p_{PT,E}}} - E\right) + \sigma_E \frac{dW}{dt} \\ \frac{dAV}{dt} &= r_{AV}\left(\frac{AS^{p_{AS,AV}}}{AS^{p_{AS,AV}} + h_{AS,AV}^{p_{AS,AV}}} - AV\right) + \sigma_{AV} \frac{dW}{dt} \\ h_{A,PT} &= 1 - \frac{AS}{0.5 + AS} \\ F &:= \sqrt{A \times PT} \end{aligned}$$

A : Arousal
 H : Homoestatic Feedback
 PT : Perceived Threat
 E : Escape Behavior
 AV : Avoidance
 AS : Arousal Schema
 F : Fear



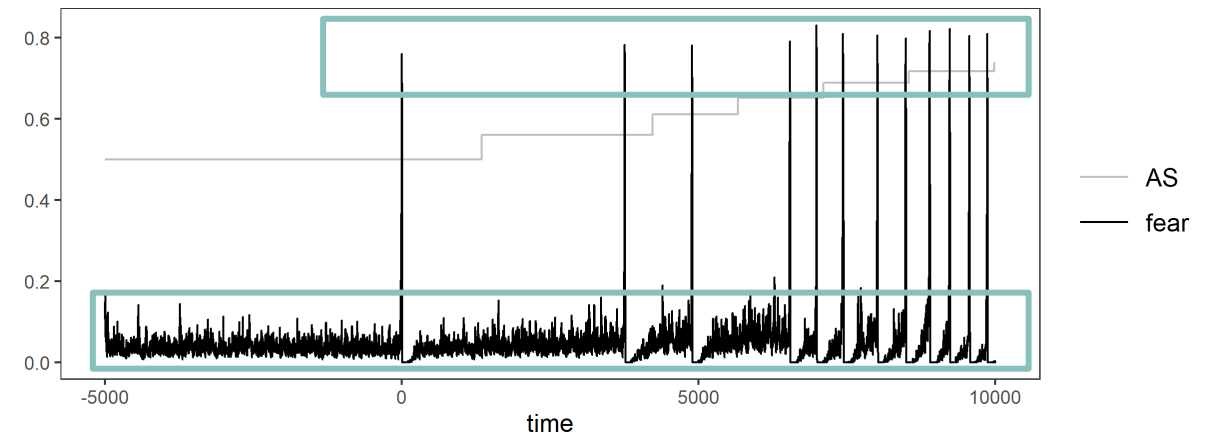
动态系统数学模型及复杂系统理论



$$\frac{dX}{dt} = b(X) + \sigma(X) \frac{dW}{dt}$$

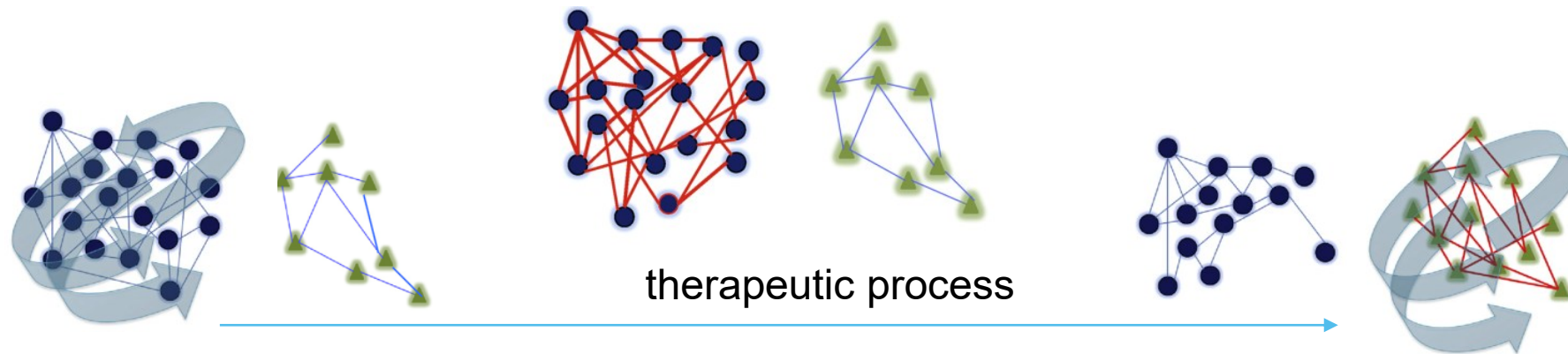


不同的相态 (phases)



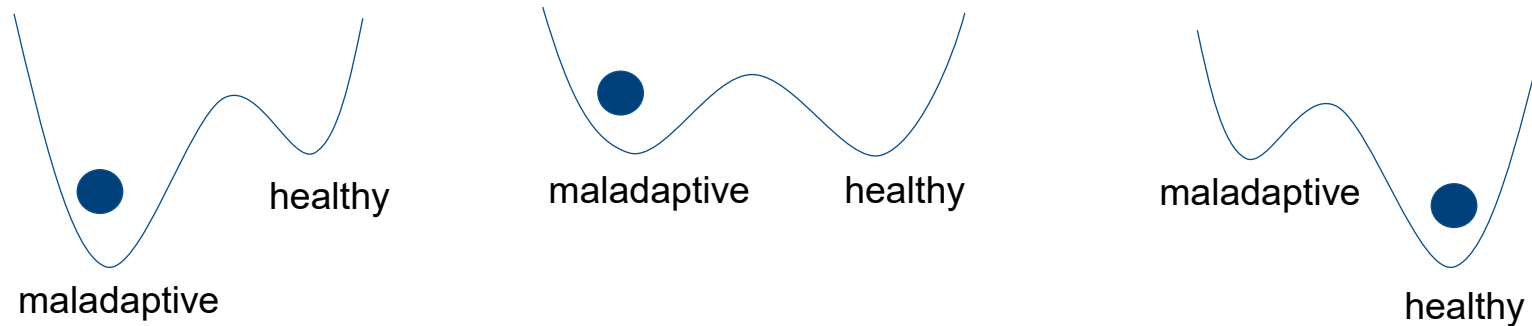
动态系统数学模型及复杂系统理论

- 系统中各元素之间的相互作用会通过自组织（self-organization）形成不同的相态（phases）
- 这些相态可能是健康的，也可能是适应不良的
- 这些相态及其稳定性（stabilities）对于理解个体差异和变化过程（changing processes）非常重要 (Hayes et al., 2015)

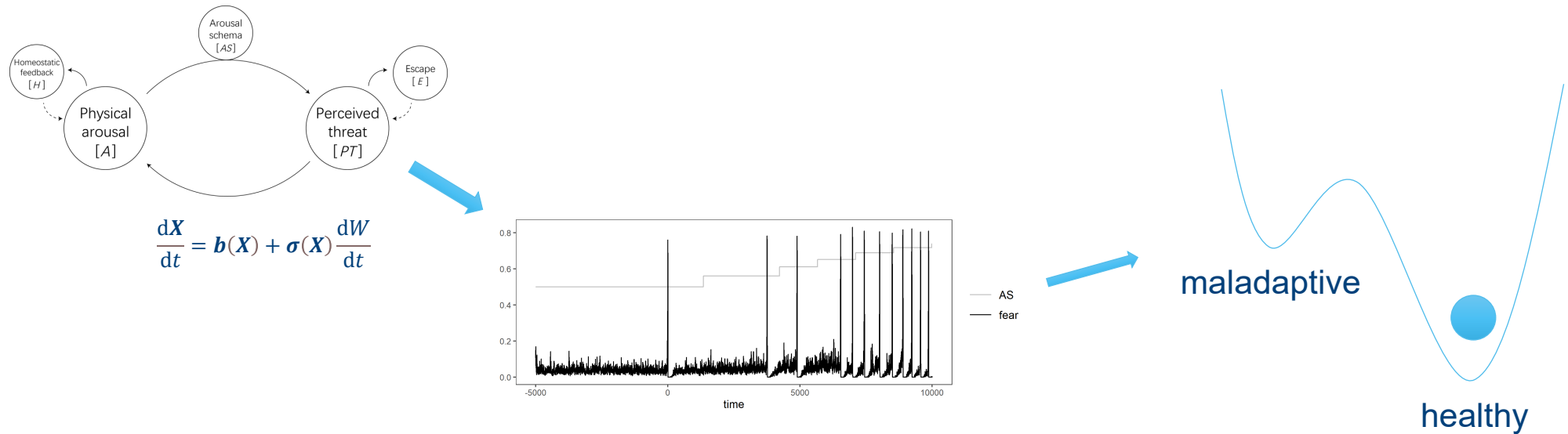


动态系统数学模型及复杂系统理论

- 景观（landscape）隐喻 (Lamothe et al., 2019; Olthof et al., 2023; Wichers et al., 2019)
- 系统状态 → 地形上的小球
 - 在较深的“峡谷”中则稳定；在较浅的“峡谷”中则不稳定
 - 小球倾向于下落到更稳定的位置
- “峡谷”（“吸引子”）对应系统的相态



动态系统数学模型及复杂系统理论



如何计算心理系统的景观函数？

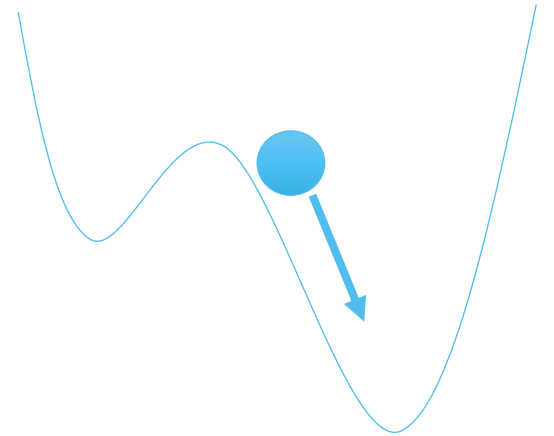
对动态系统数学模型的广义势能函数方法

- 物理学中的势能函数定义在保守系统中

$$\frac{dX}{dt} =^* F = -\nabla_X U \quad U = -\cancel{\int F dX}$$

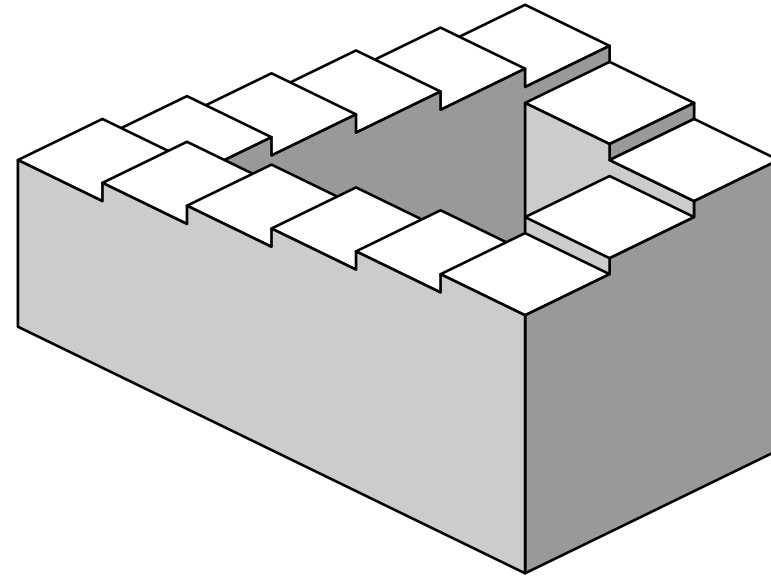
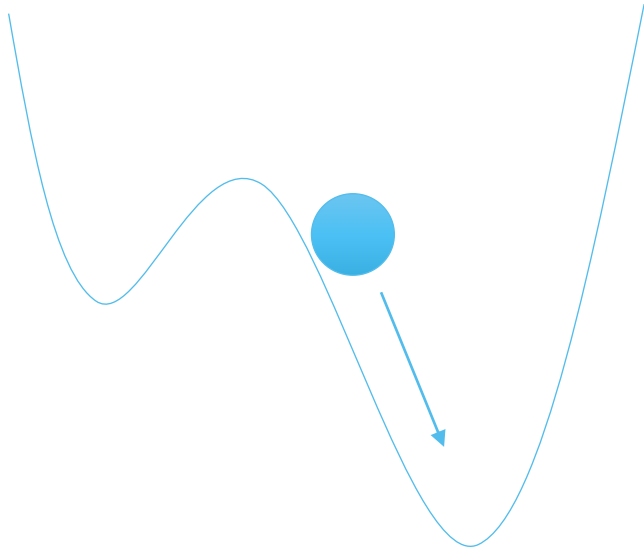
* Zero inertia approximation

不适用于高维度系统



对动态系统数学模型的广义势能函数方法

- “不可能阶梯”



对动态系统数学模型的广义势能函数方法

- 广义势能函数 (Wang et al., 2018)
 - 利用系统稳态分布和玻尔兹曼分布

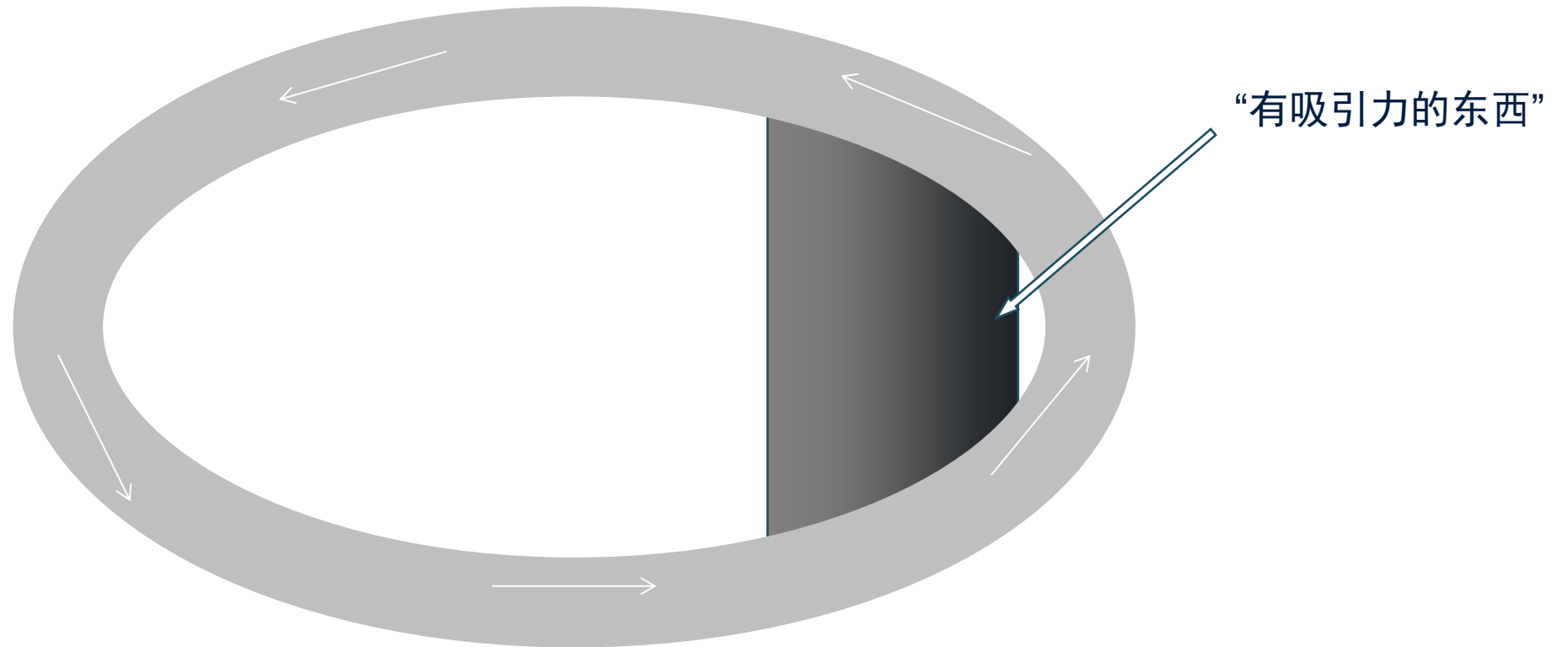
$$U(\mathbf{X}) = -\ln P_{SS}(\mathbf{X})$$

- 对函数形式要求宽松
 - 可以使用蒙特卡洛方法估计
- 什么是稳态分布？

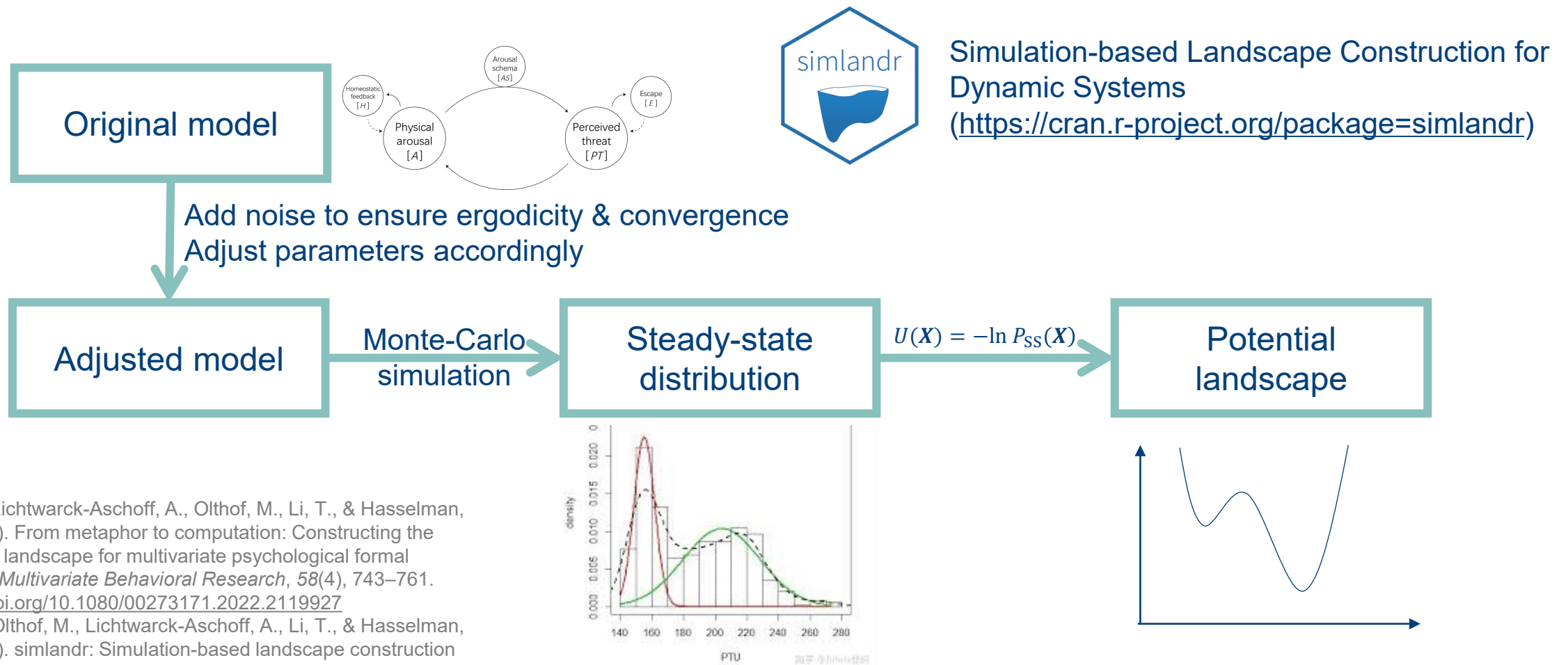
对动态系统数学模型的广义势能函数方法



对动态系统数学模型的广义势能函数方法



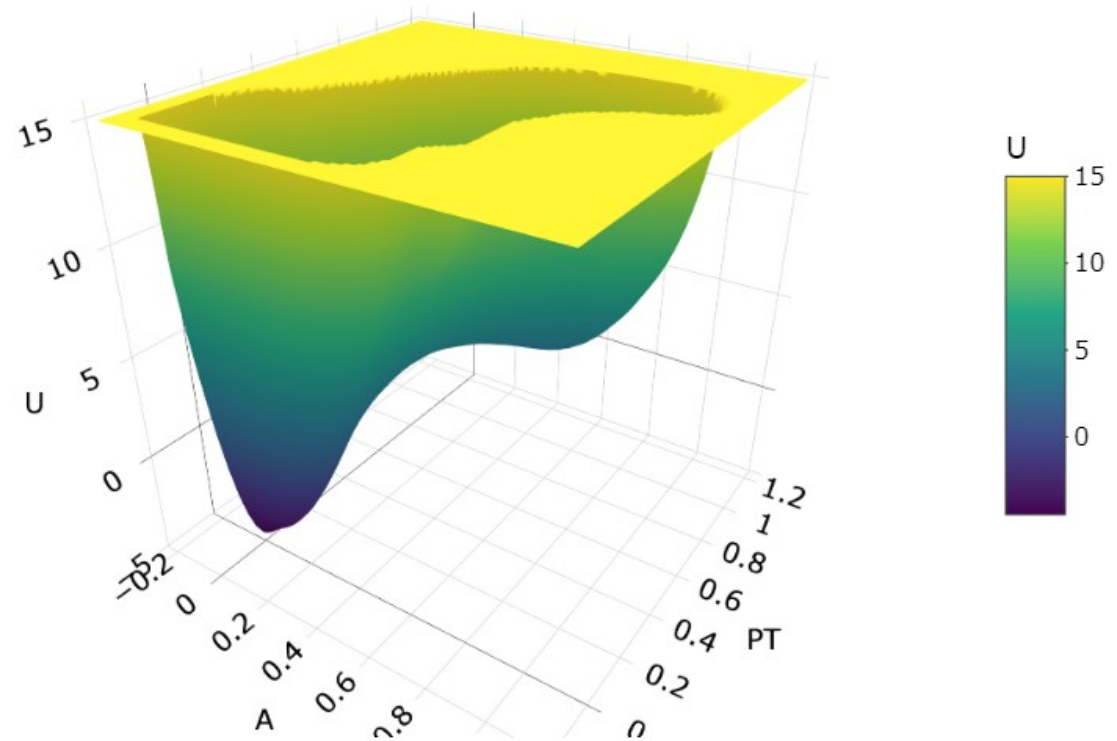
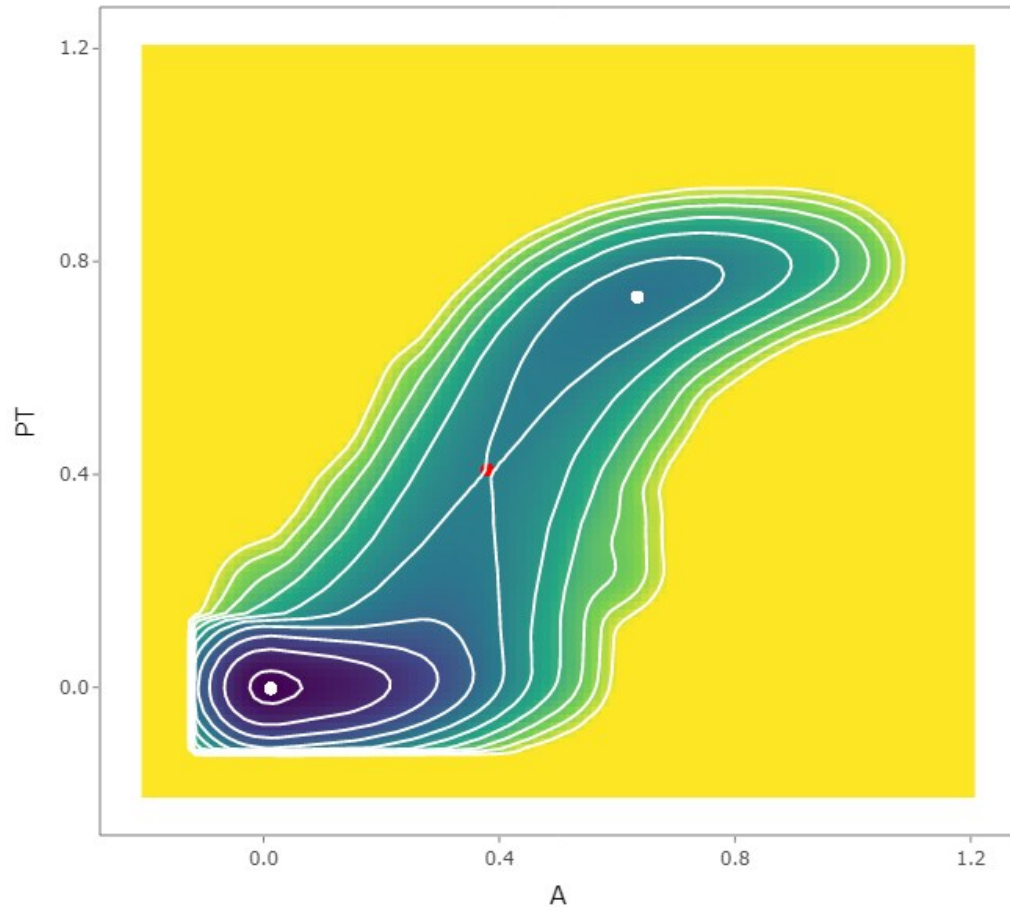
对动态系统数学模型的广义势能函数方法



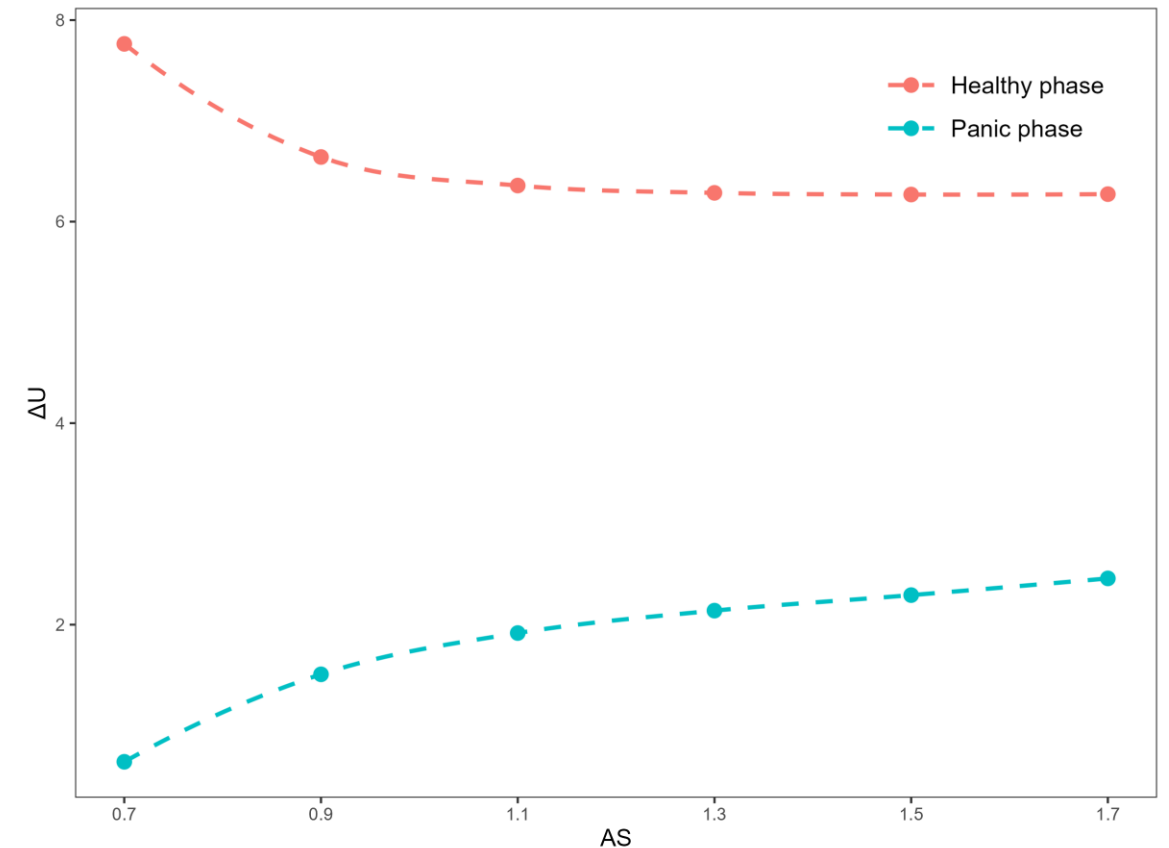
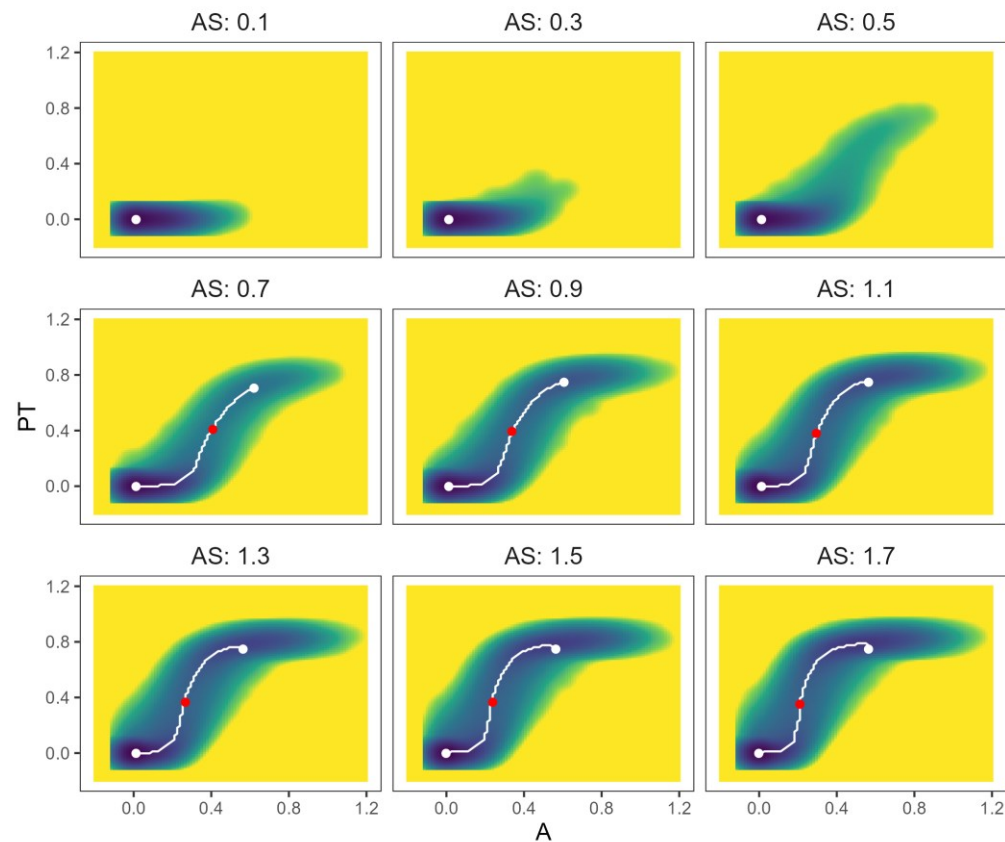
Cui, J., Lichtwarck-Aschoff, A., Olthof, M., Li, T., & Hasselman, F. (2023). From metaphor to computation: Constructing the potential landscape for multivariate psychological formal models. *Multivariate Behavioral Research*, 58(4), 743–761. <https://doi.org/10.1080/00273171.2022.2119927>

Cui, J., Olthof, M., Lichtwarck-Aschoff, A., Li, T., & Hasselman, F. (2026). simlandr: Simulation-based landscape construction for dynamical systems. *The R Journal*, 17(4), 173–191. <https://doi.org/10.32614/RJ-2025-039>

对动态系统数学模型的广义势能函数方法



对动态系统数学模型的广义势能函数方法



对密集纵向数据的广义势能函数方法

- 如何从动态系统的角度进行实证研究？
- 密集纵向数据
 - 经验抽样方法 (experience sampling method)
 - 视频辅助回忆

对密集纵向数据的广义势能函数方法

- 经验抽样方法
 - 使用智能设备发放问卷
 - 一天数次，持续一到两周
 - 关注心理状态随时间变化



Mestdagh, M., Verdonck, S., Piot, M., Niemeijer, K., Kilani, G., Tuerlinckx, F., Kuppens, P., & Dejonckheere, E. (2023). m-Path: An easy-to-use and highly tailorable platform for ecological momentary assessment and intervention in behavioral research and clinical practice. *Frontiers in Digital Health*, 5. <https://doi.org/10.3389/fdgth.2023.1182175>

对密集纵向数据的广义势能函数方法

ViMeR: A free software application for interval-based video-mediated recall





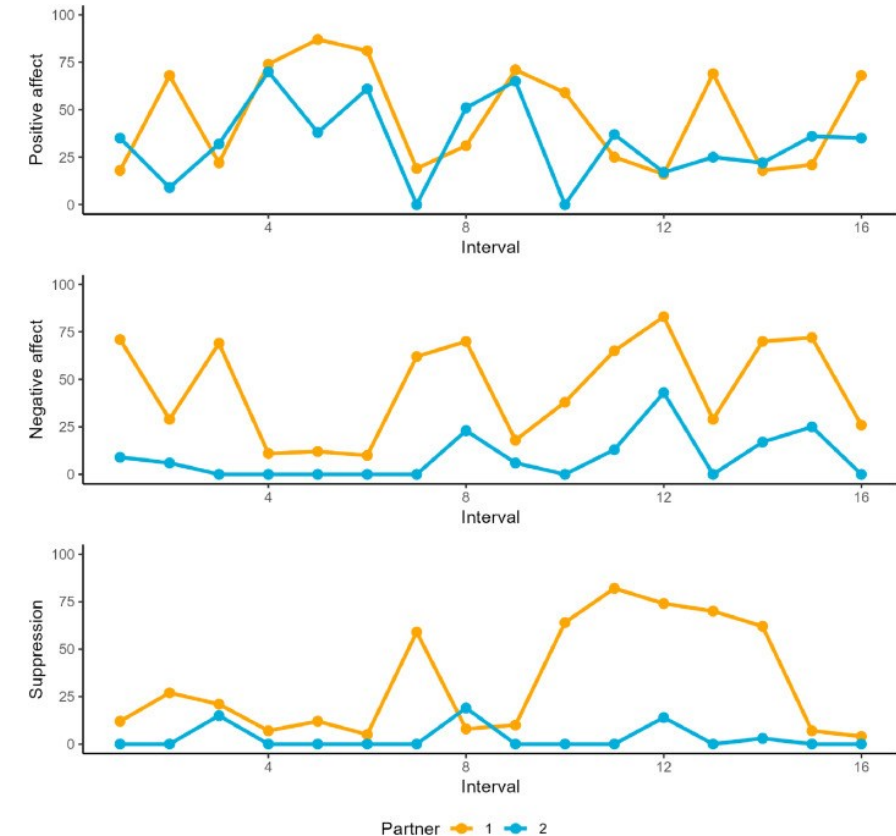
Scene

In the previous movie segment ...

I saw an animal that looks most like a

☐ Bird
☐ Bunny
☐ Tiger
☐ None

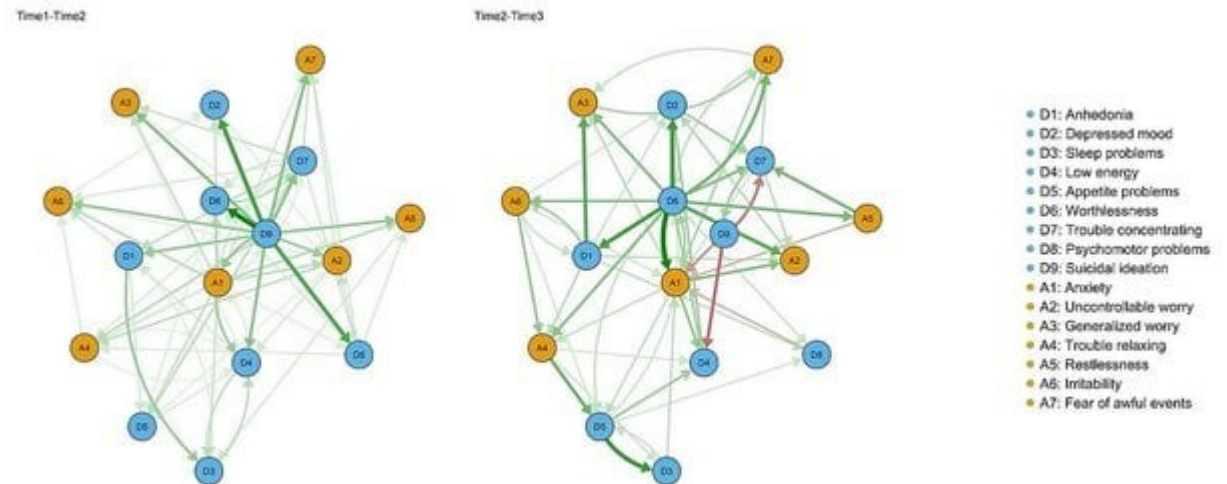
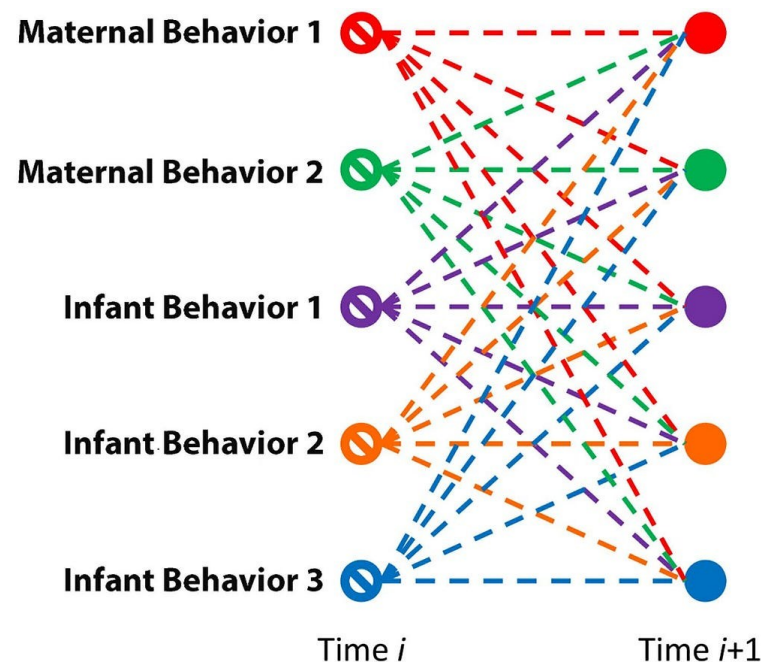
I think they tried to show...



Meers, K., Verhees, M. W. F. T., Kuppens, P., Versyp, O., & Ceulemans, E. (2025). ViMeR: A free software application to support interval-based video-mediated recall. *Methods in Psychology*, 13, 100215. <https://doi.org/10.1016/j.metip.2025.100215>

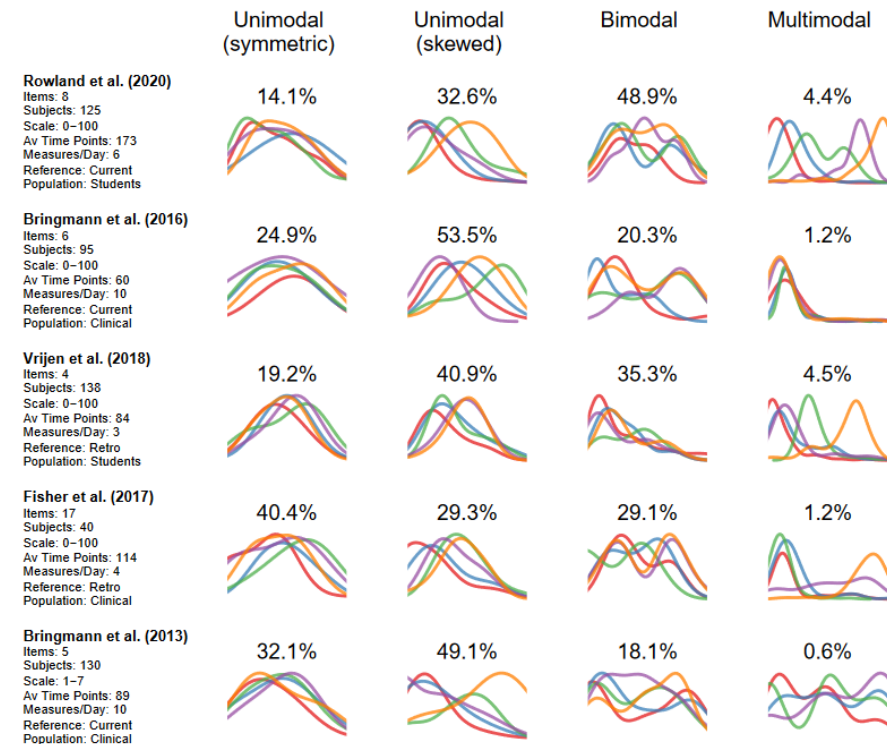
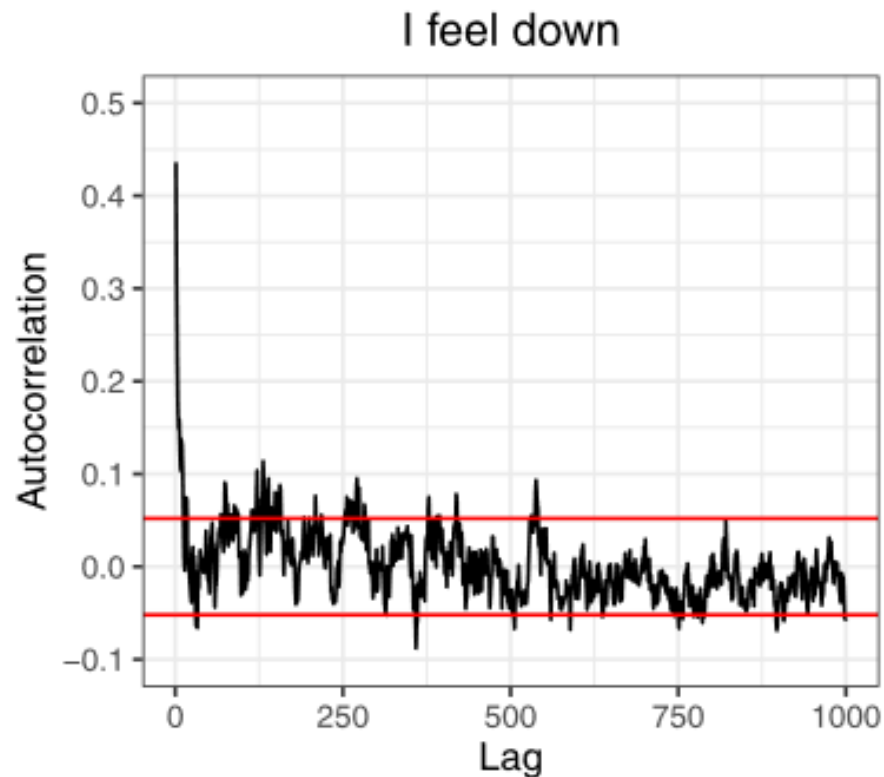
对密集纵向数据的广义势能函数方法

- 传统分析方法：线性模型
 - 向量自回归，网络模型，动态结构方程.....



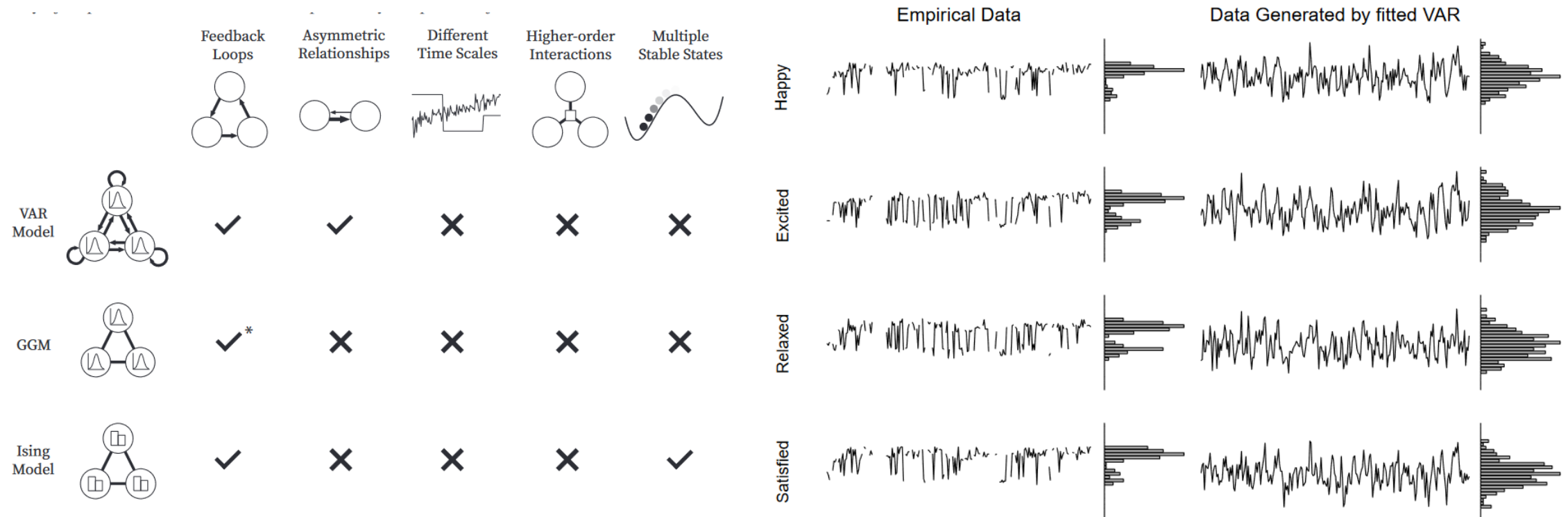
对密集纵向数据的广义势能函数方法

- 密集纵向数据中的复杂特征 (Olthof et al., 2020; Haslbeck et al., 2023)



对密集纵向数据的广义势能函数方法

- 传统方法难以对这些特征进行描述 (Haslbeck et al., 2021; 2023)

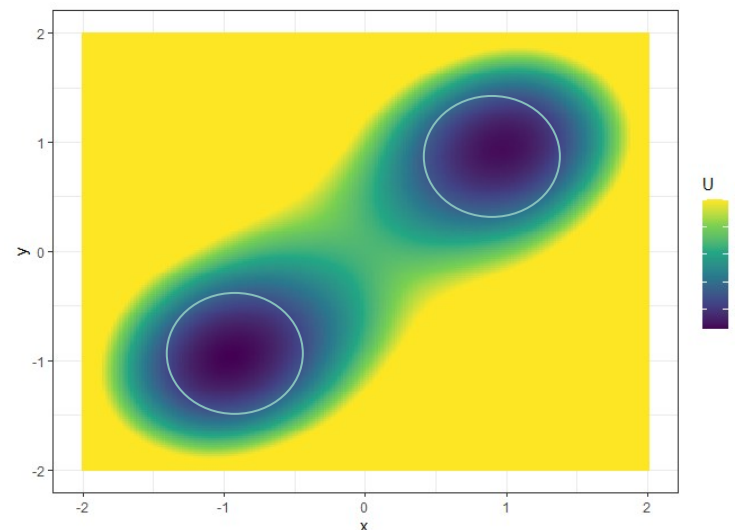
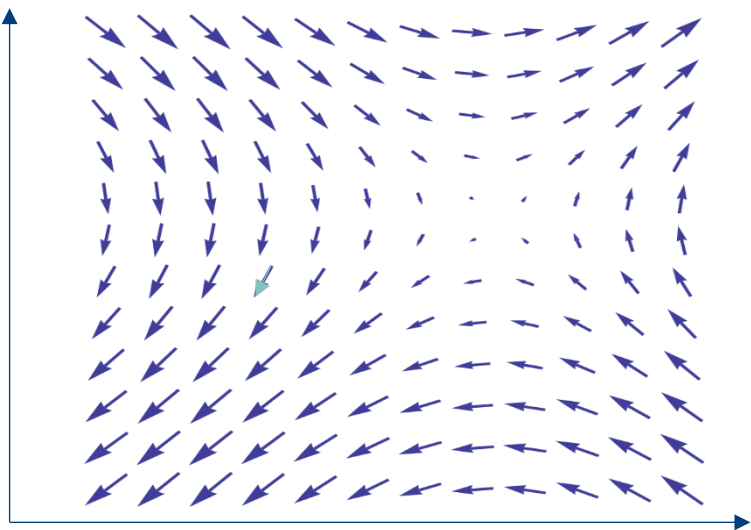


对密集纵向数据的广义势能函数方法

- 更加灵活的估计方式
 - 允许非线性动力学
 - 允许两个或多个相态
 - 对心理过程的简化假设更少
 - 适用于心理数据

对密集纵向数据的广义势能函数方法

- 数据量少，无法直接使用密度估计
- 两步估计
 - 非参数拟合漂移扩散方程（用向量场表示）
 - 从漂移扩散方程计算稳态分布，得到广义势能函数



Cui, J., Hasselman, F., & Lichtwarck-Aschoff, A. (2023). Unlocking nonlinear dynamics and multistability from intensive longitudinal data: A novel method. Psychological Methods. <https://doi.org/10.1037/met0000623>

对密集纵向数据的广义势能函数方法

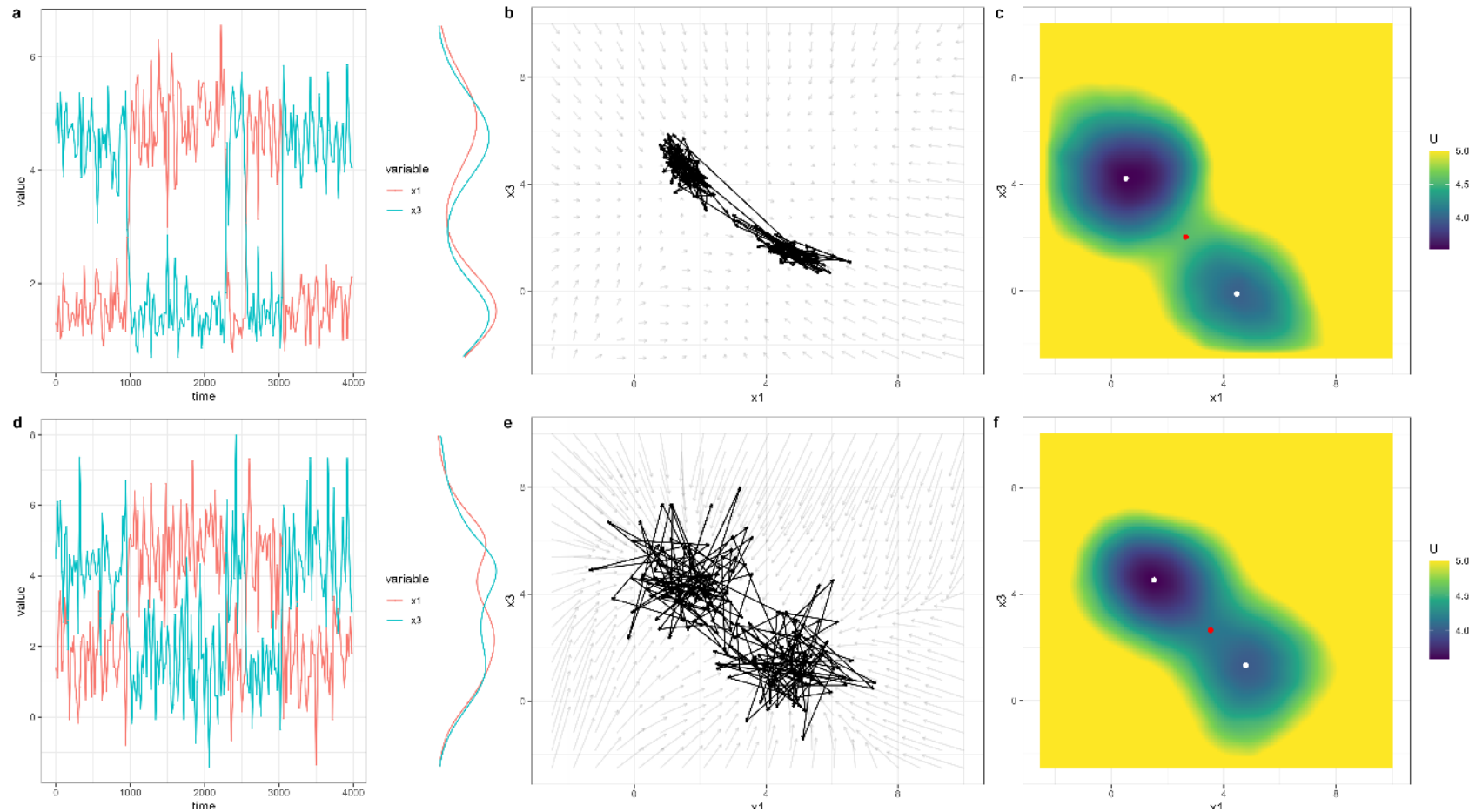
- 数据到向量场：多元向量场核估计

$$\hat{\mu}(\mathbf{x}) = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} K(\mathbf{x}_i - \mathbf{x})(\mathbf{x}_{i+1} - \mathbf{x}_i)}{\sum_{i=1}^n K(\mathbf{x}_i - \mathbf{x})},$$

- 从向量场到广义势能函数：simlandr

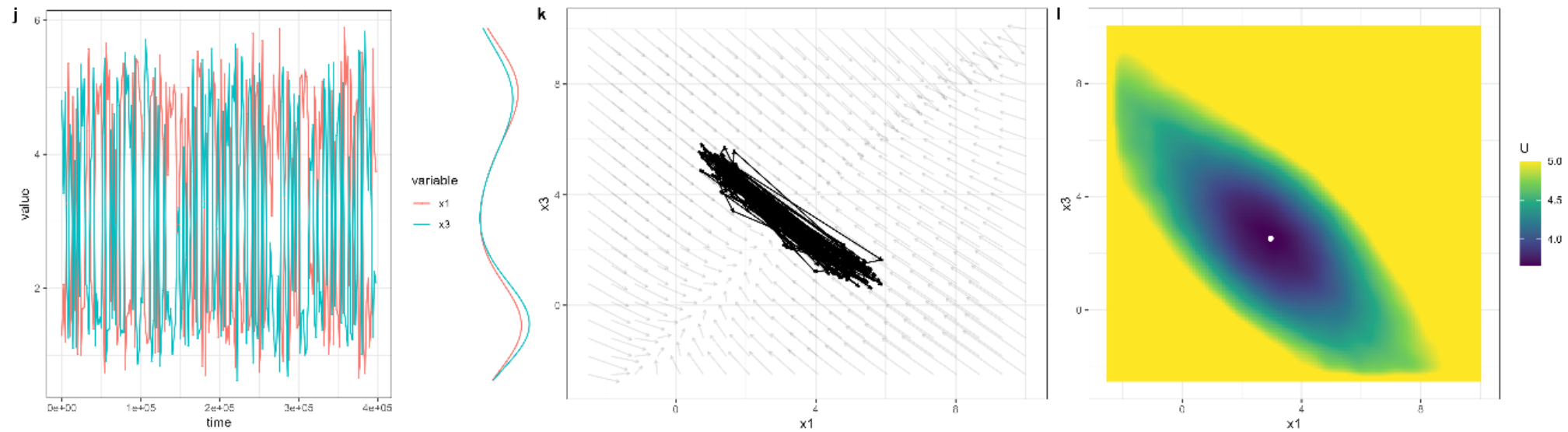
$$U(\mathbf{x}) = -\ln P_{SS}(\mathbf{x}),$$

对密集纵向数据的广义势能函数方法



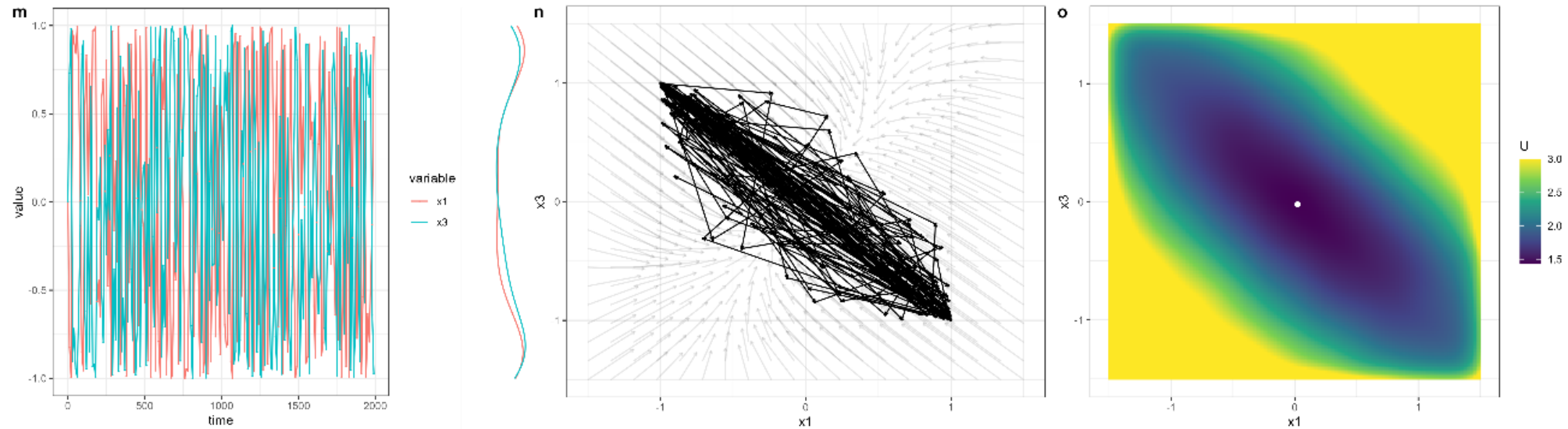
对密集纵向数据的广义势能函数方法

- 动力学性质和分布密度的区别？ -- 采样频率不足



对密集纵向数据的广义势能函数方法

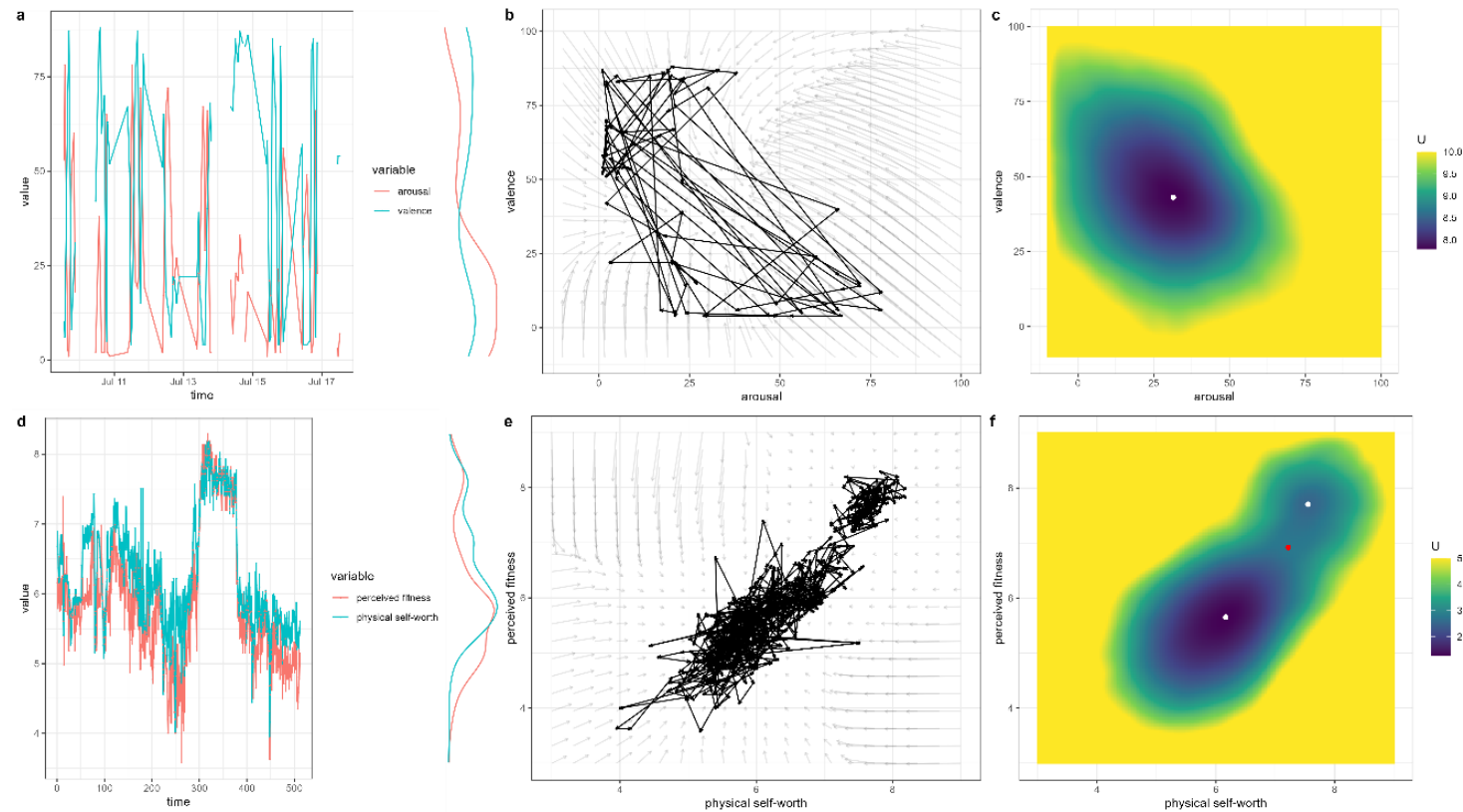
- 动力学性质和分布密度的区别？ -- 极端回应倾向



- 双稳态和双峰分布的区别

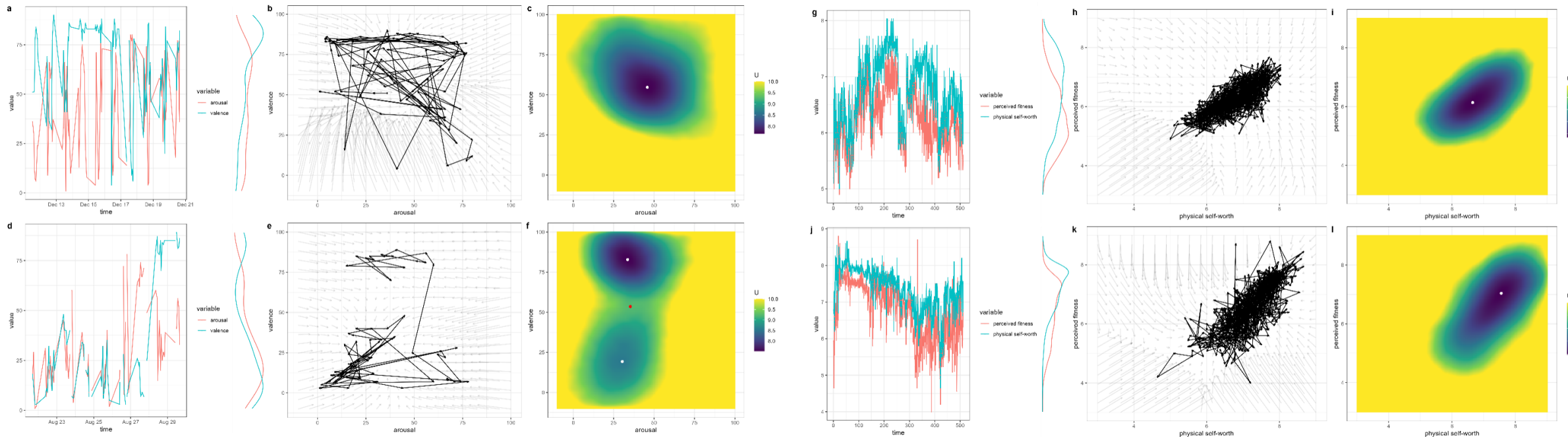
对密集纵向数据的广义势能函数方法

- 实证研究数据



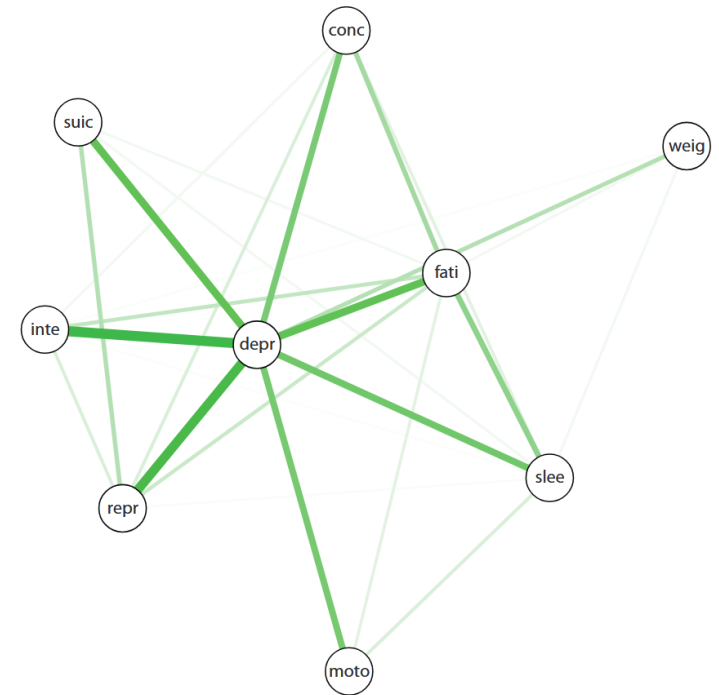
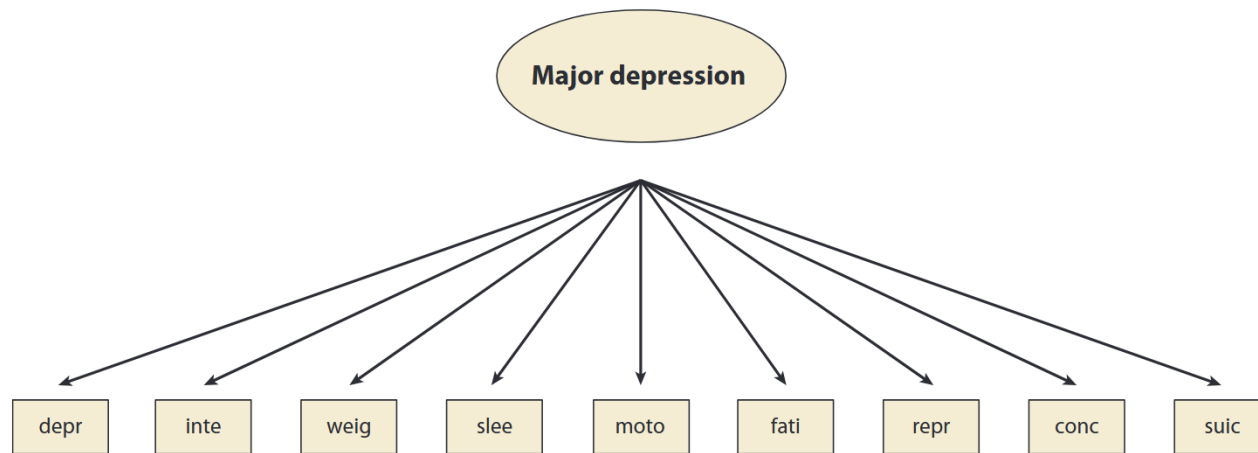
对密集纵向数据的广义势能函数方法

- 明显的个体异质性



对伊辛网络模型的广义势能函数方法

- 症状网络理论和网络模型
 - 心理疾病可能并不来自一个独立的疾病“实体”，而是来自症状间的相互作用 (Borsboom & Cramer, 2013)

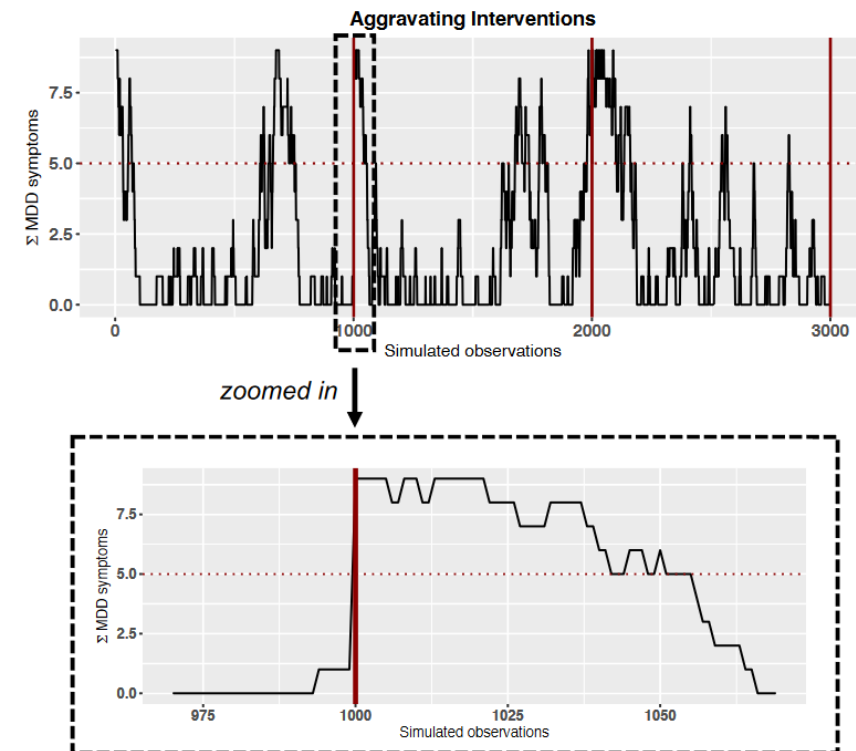
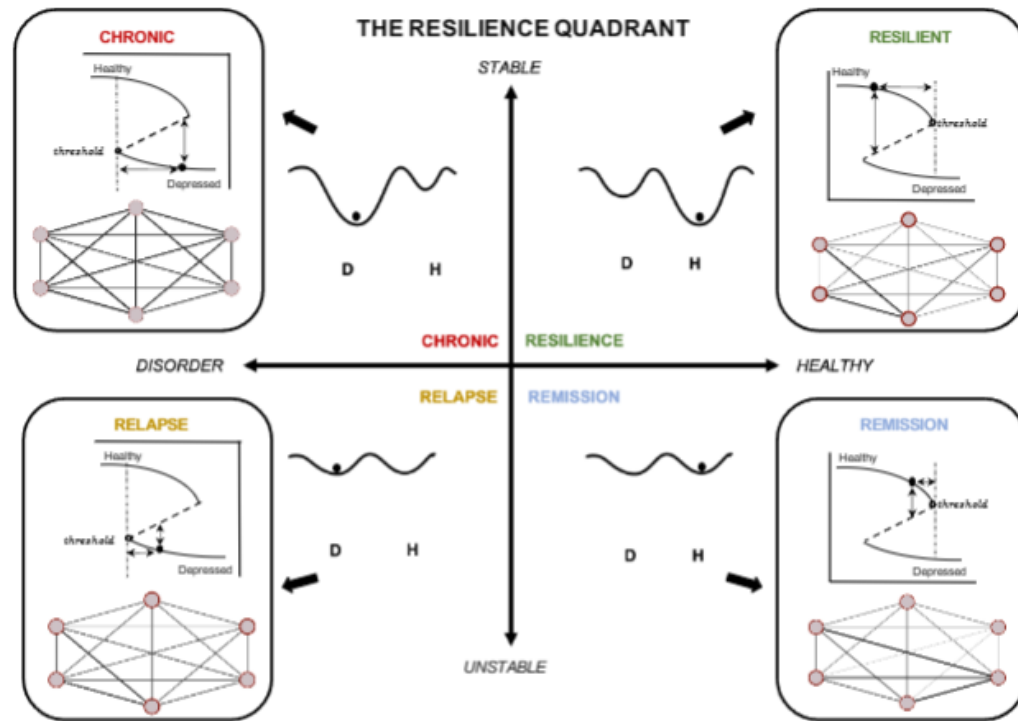


对伊辛网络模型的广义势能函数方法

- 症状网络理论和网络模型
 - 连接更紧密的网络 → 更容易互相激活
→ 更稳定的疾病状态 → 更强的易感性
 - 如何研究症状网络的稳定性？

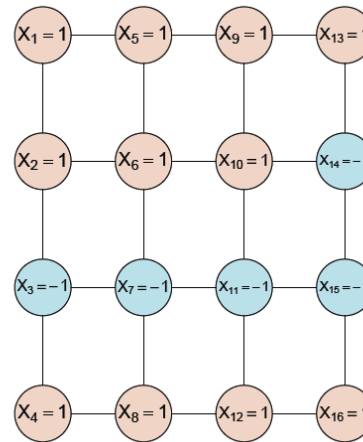
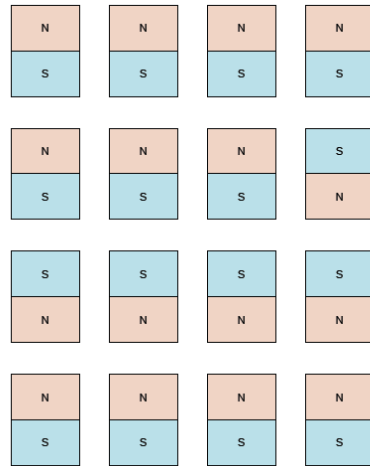
对伊辛网络模型的广义势能函数方法

- 之前的工作：长时间模拟 应激后的状态分布和最终状态 (Lunansky et al., 2025)



对伊辛网络模型的广义势能函数方法

- 分析伊辛网络模型
 - 线性模型只能呈现单一稳态 (Hoekstra et al., 2026)



Dr. Gaby Lunansky
UvA/AMC

Cui, J., Lunansky, G., Lichtwarck-Aschoff, A., Mendoza, N., & Hasselman, F. (2026). Quantifying the stability landscapes of psychological networks. Behavior Research Methods, 58, 68. <https://doi.org/10.3758/s13428-025-02917-7>

对伊辛网络模型的广义势能函数方法

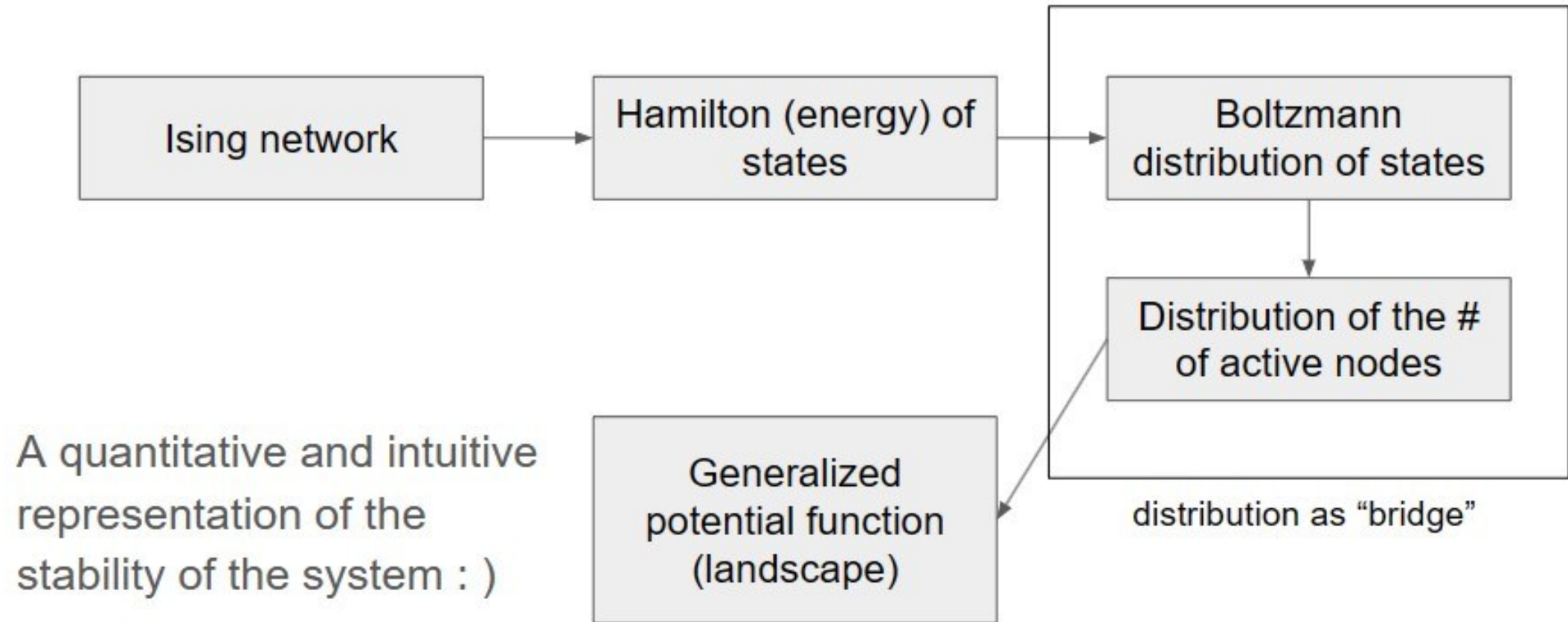
- 伊辛系统的哈密顿量（对于微观状态）

$$\mathcal{H} = - \sum_{\langle i,j \rangle} J_{ij} s_i s_j$$

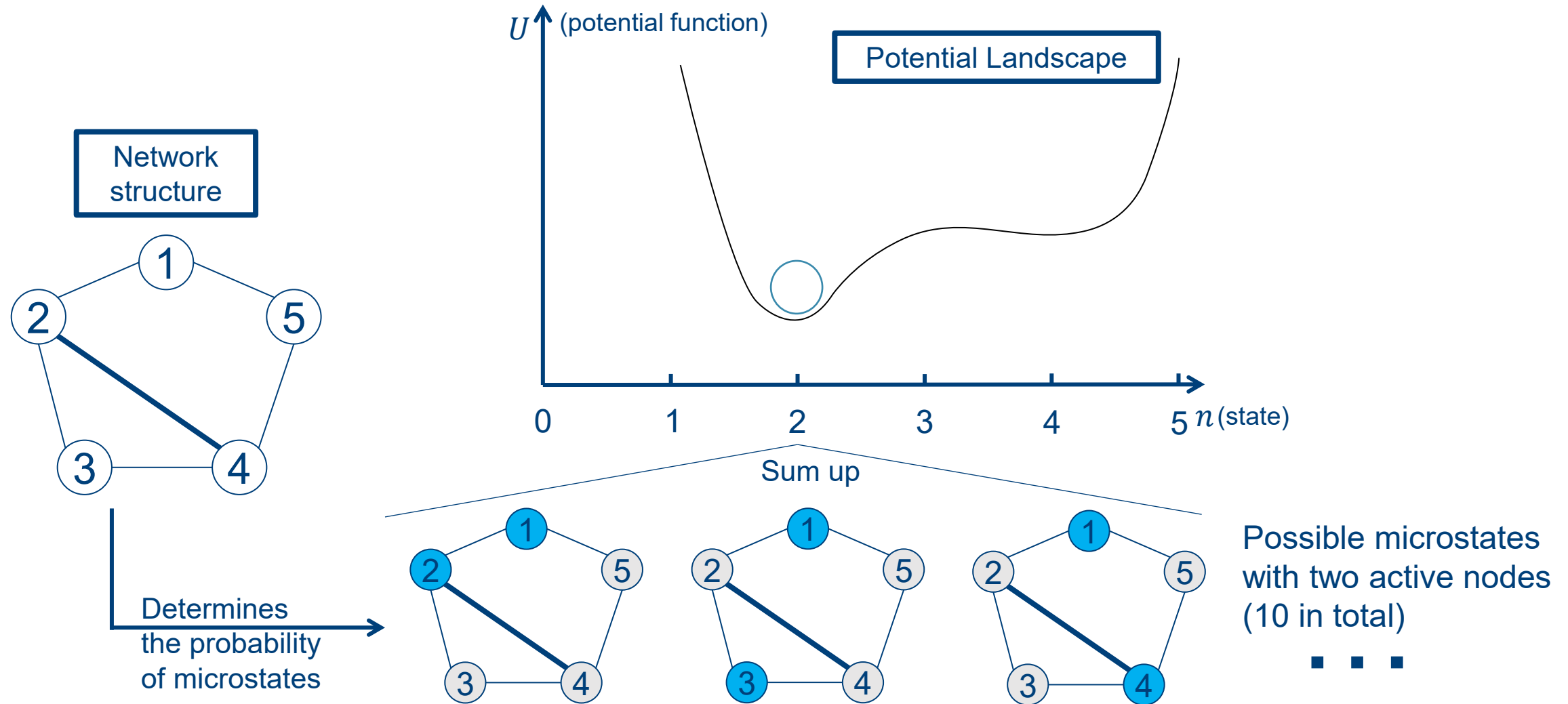
- 宏观状态：激活的症状数量
- 使用稳态分布进行加总

$$P_{ss} = \exp(-\beta U)$$

对伊辛网络模型的广义势能函数方法

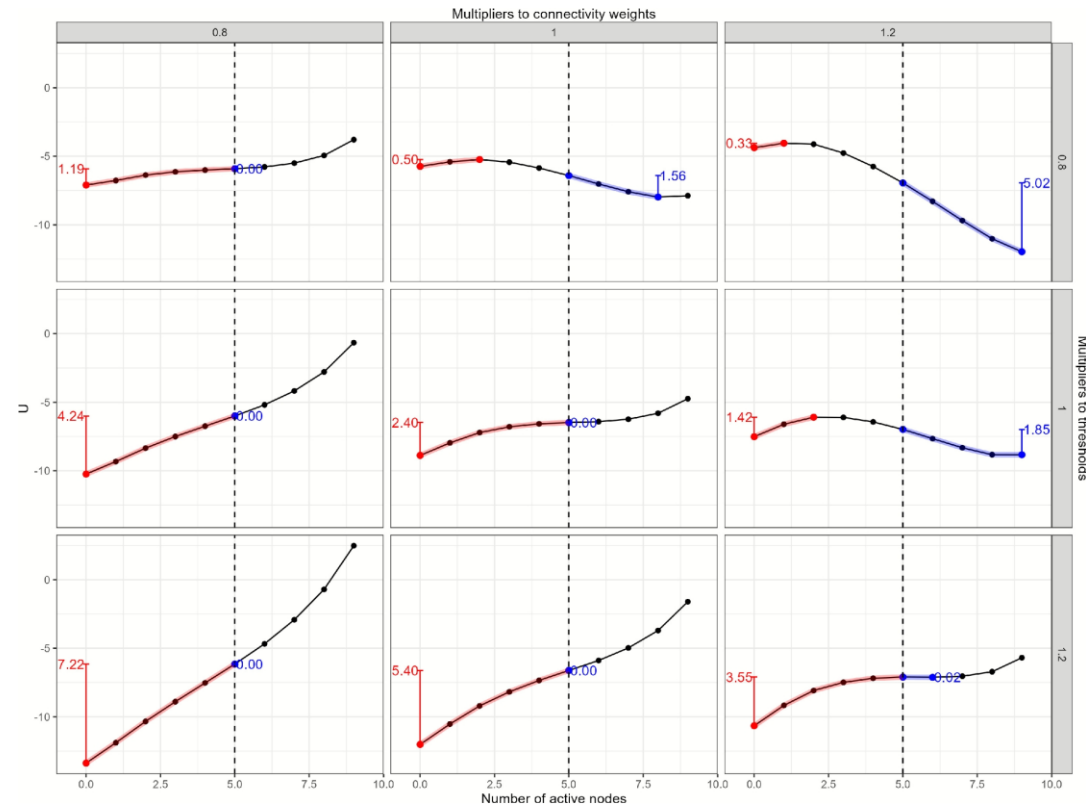


对伊辛网络模型的广义势能函数方法



对伊辛网络模型的广义势能函数方法

- `Isinglandr::shiny_Isingland_MDD()`



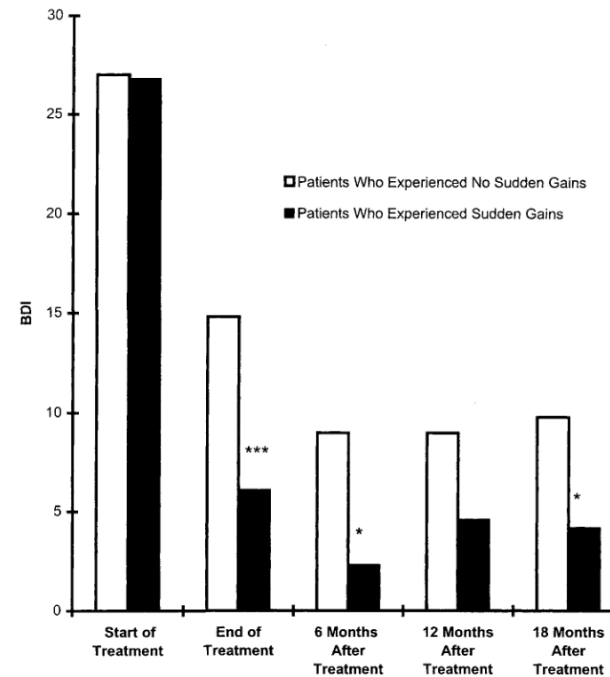
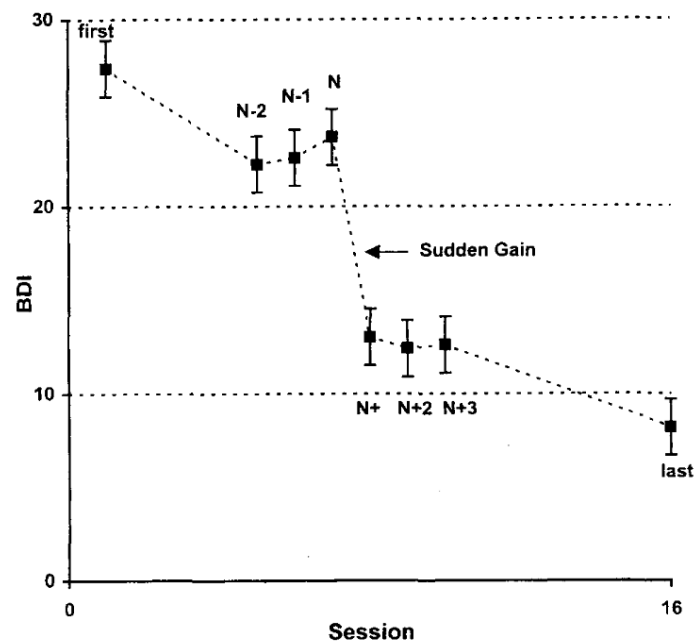
第一部分总结

- 广义势能函数方法可以对心理系统的稳定性做出定量描述
 - 对于普遍动力学方程描述的系统：对稳态分布进行蒙特卡洛估计
 - 对于实证数据：首先拟合漂移扩散方程
 - 对于伊辛网络：通过哈密顿量和稳态分布汇总信息
- 优势：
 - 连接心理学理论和模型/数据
 - 直观描述相对复杂的非线性多稳态系统
- 注意：
 - 广义势能函数不是对系统动力学特征的完整描述

第二部分：临床心理中的突然转变及早期预警信号

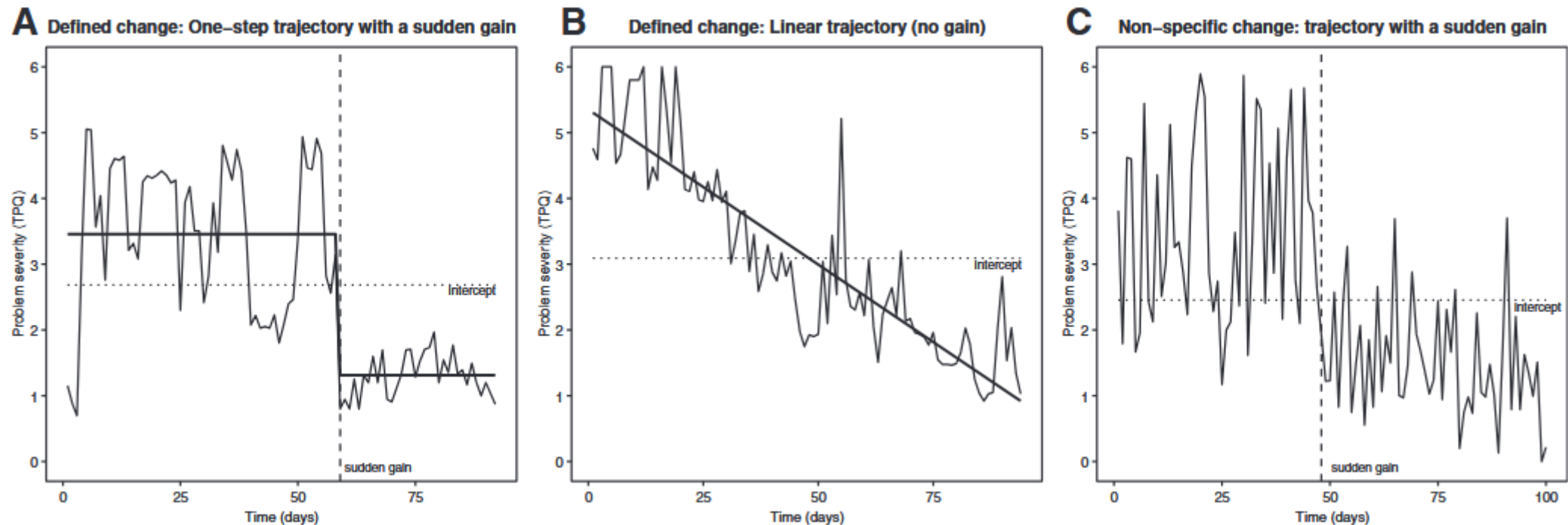
临床心理中的突然转变现象和复杂动态系统理解

- 许多患者的心理症状程度会发生突变而非渐变 (Tang & DeRubeis, 1999)
 - 单次或数次治疗期间的突变占症状减轻总量的较大部分
 - 与长时间追踪效果相关



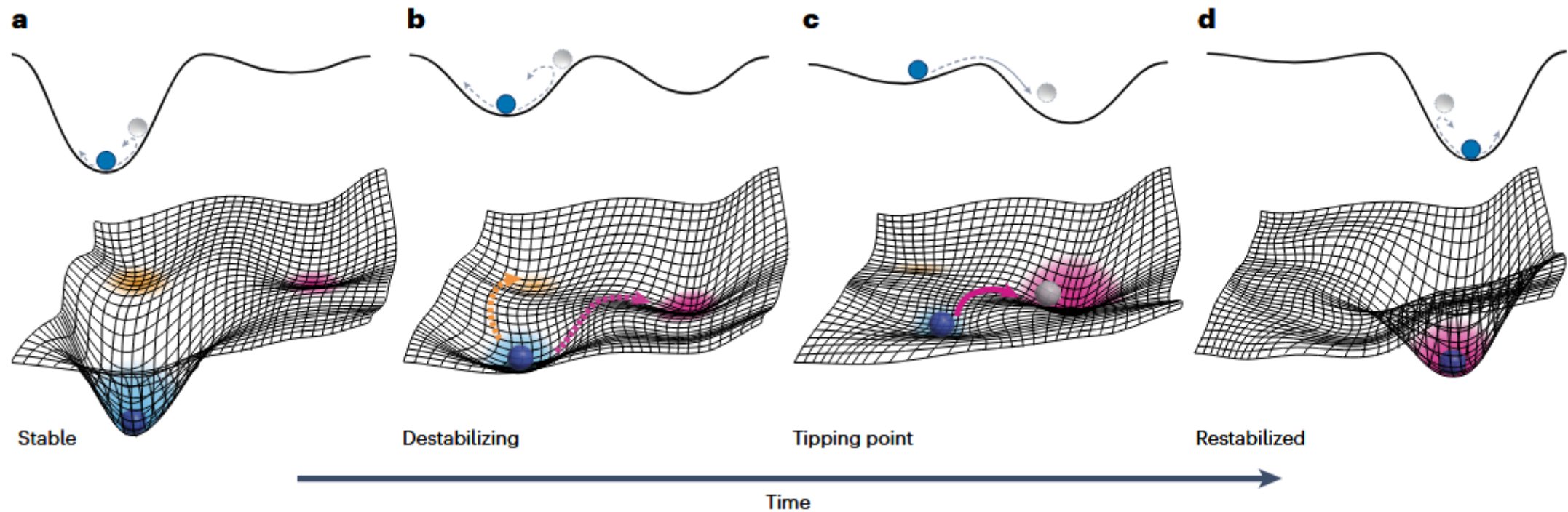
临床心理中的突然转变现象和复杂动态系统理解

- 经验抽样研究中同样发现类似的现象 (Helmich et al., 2020)
 - 突然好转：所有参与者中的28%，明显好转参与者中的58%



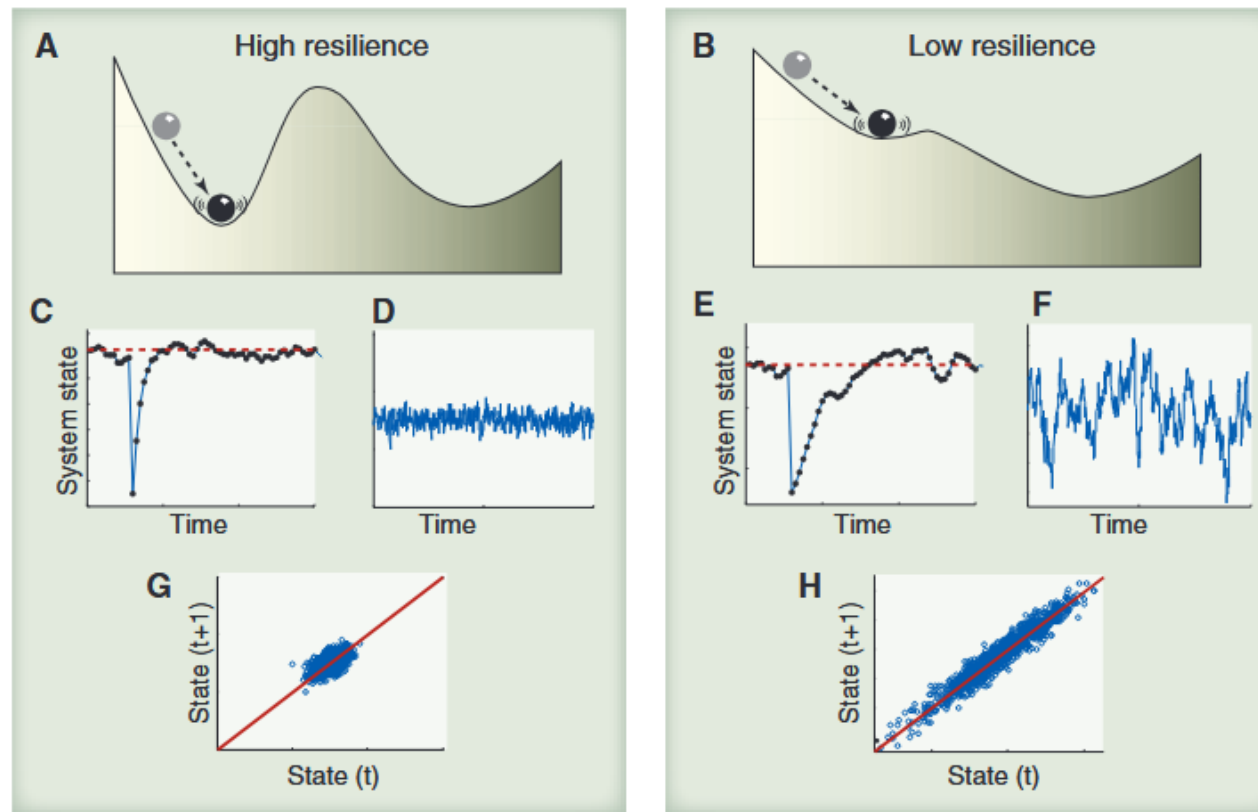
临床心理中的突然转变现象和复杂动态系统理解

- 复杂动态系统解释：临界相变 (critical phase transition, Helmich et al., 2024)



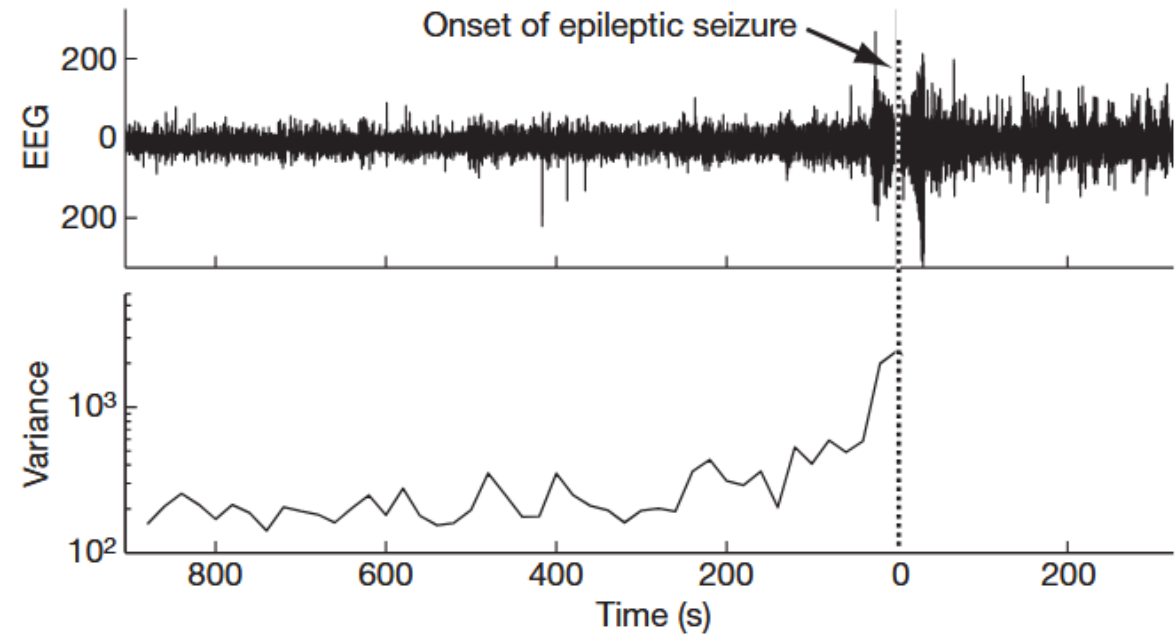
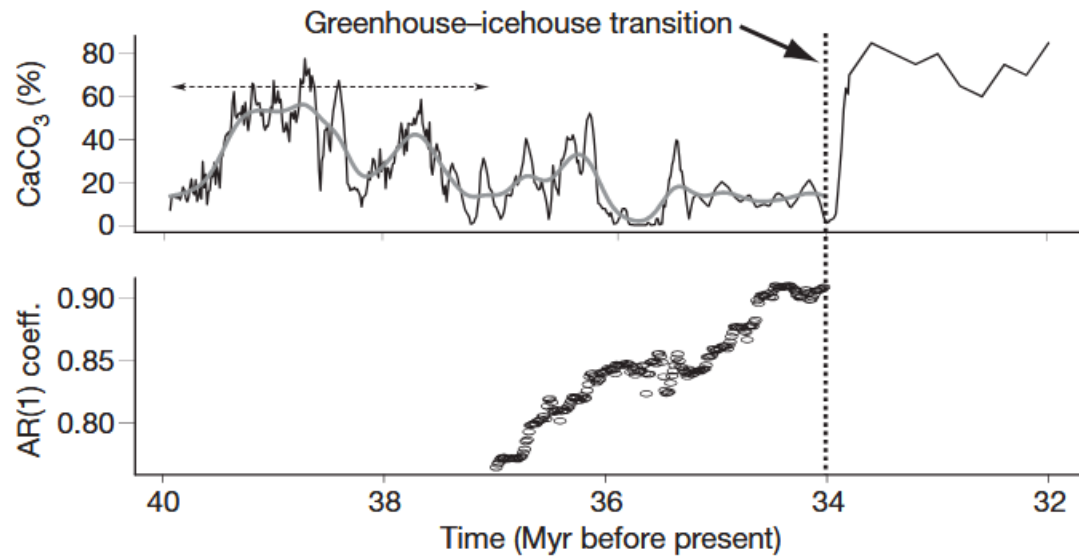
临床心理中的突然转变现象和复杂动态系统理解

- 早期预警信号 (early warning signals) (Scheffer et al., 2012)



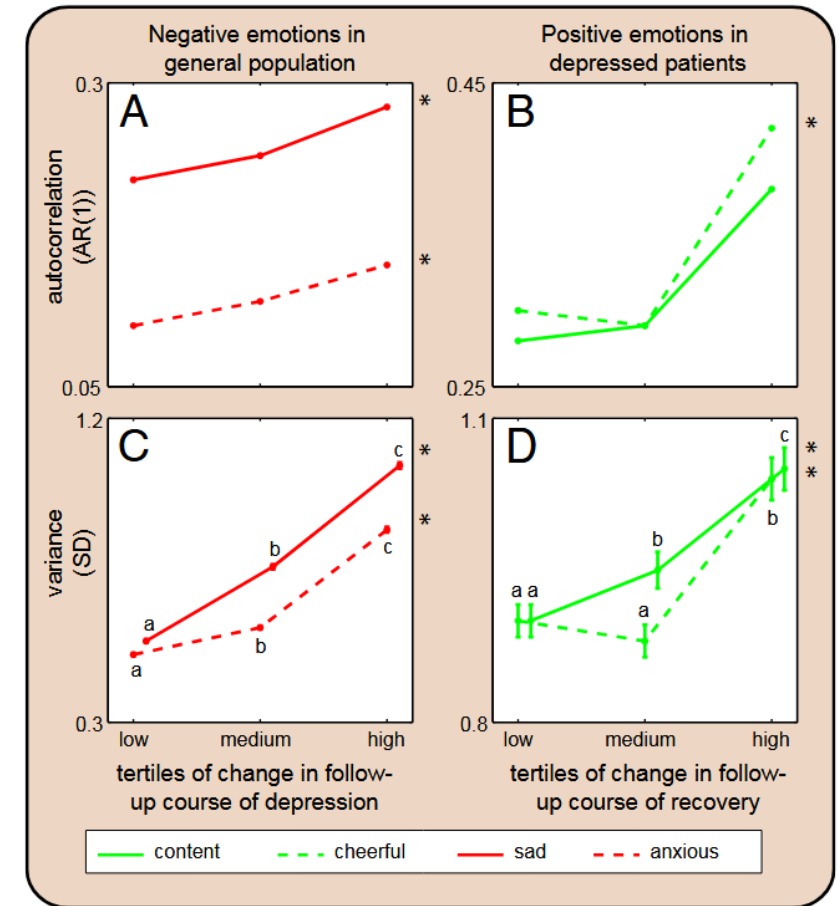
临床心理中的突然转变现象和复杂动态系统理解

- 自然科学/神经科学的研究 (McSharry et al., 2003; Dakos et al., 2008)



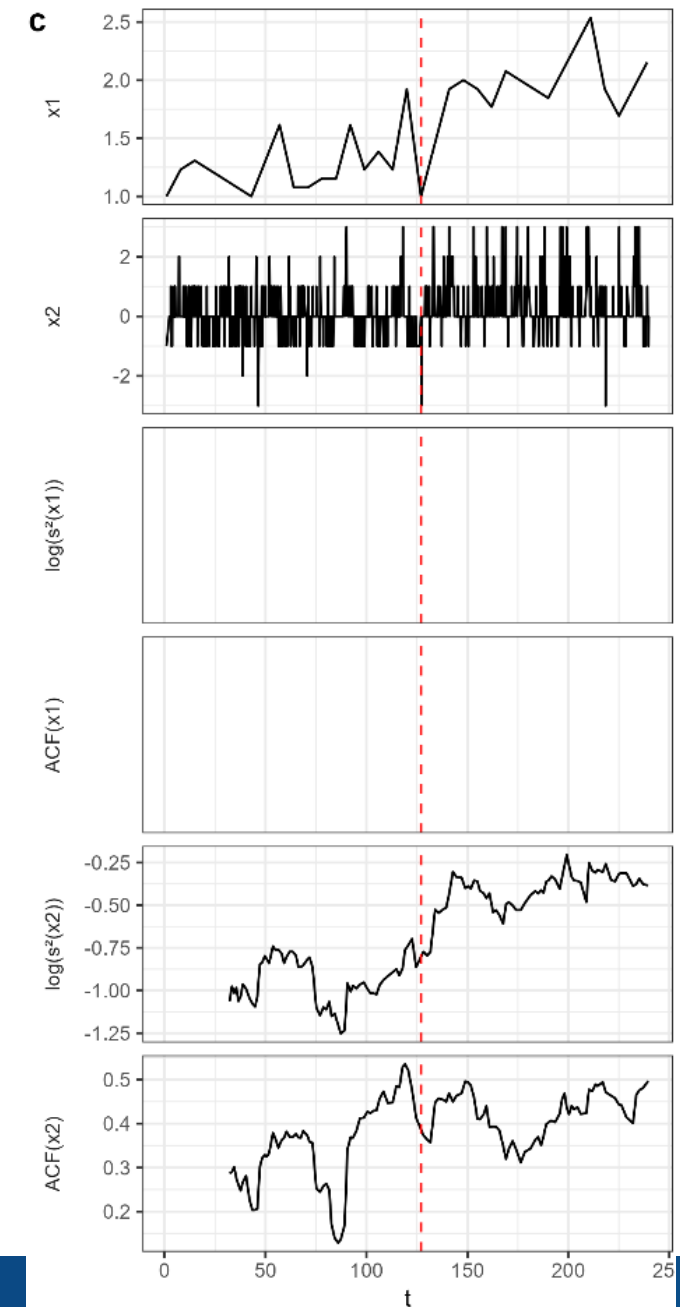
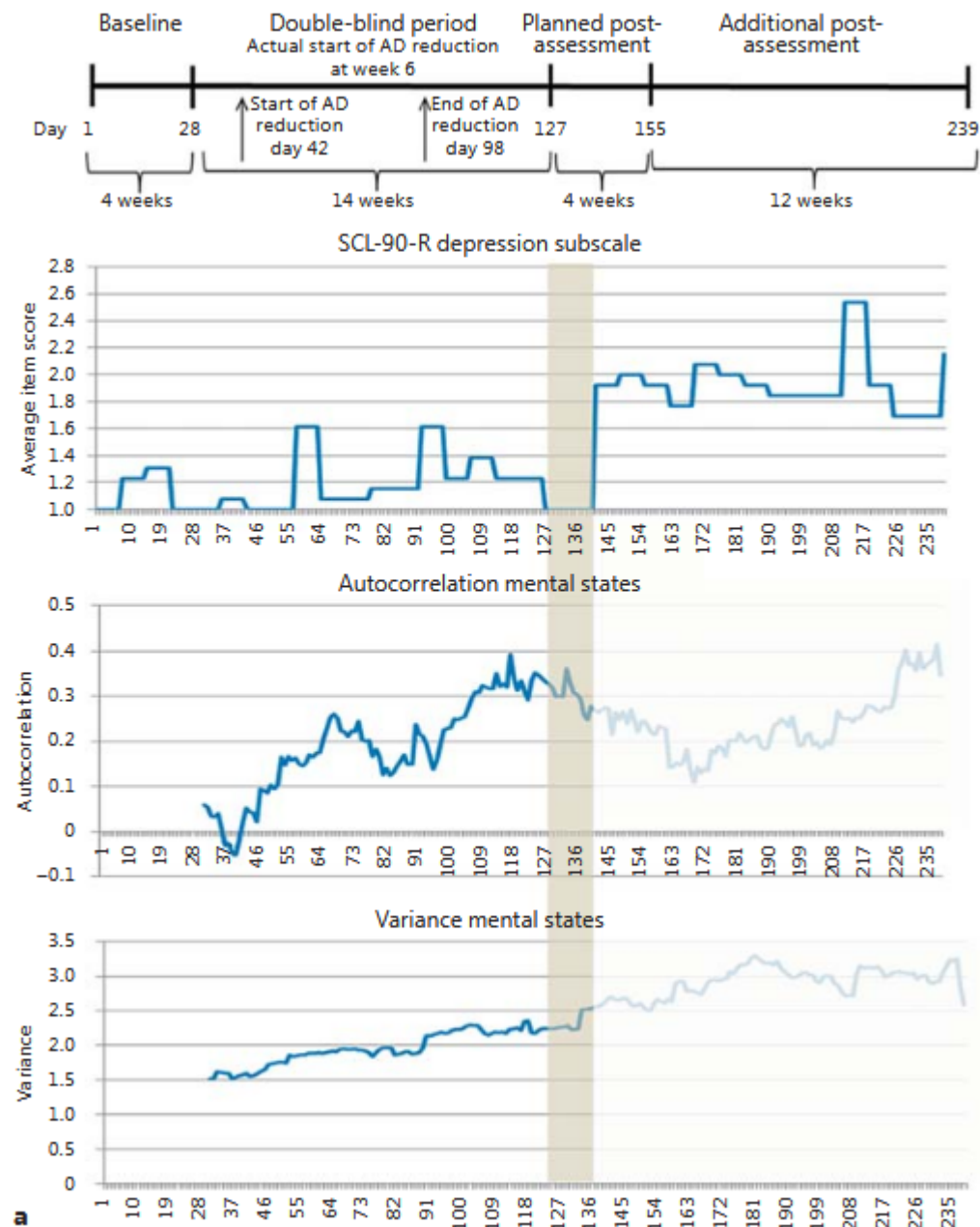
临床心理中的突然转变现象和复杂动态系统理解

- 心理学中的早期预警信号研究
 - 标准差和自相关系数与症状缓解程度有关 (van de Leemput et al., 2014)
 - (just in time intervention)
 - 但后续研究的结论不一致
部分个体/部分指标有效，但预测效果有限 (Helmich et al., 2024)



临床心理中的突然转变现象和复杂动态系统理解

- 讨论：如果请你设计一个研究，你会怎么做？
 - 不需要是完美的方案
 - 不需要考虑资源可及性但要考虑可行性和伦理
 - 如果想不出你认为合适的方案，也可以提出你认为不合适的方案



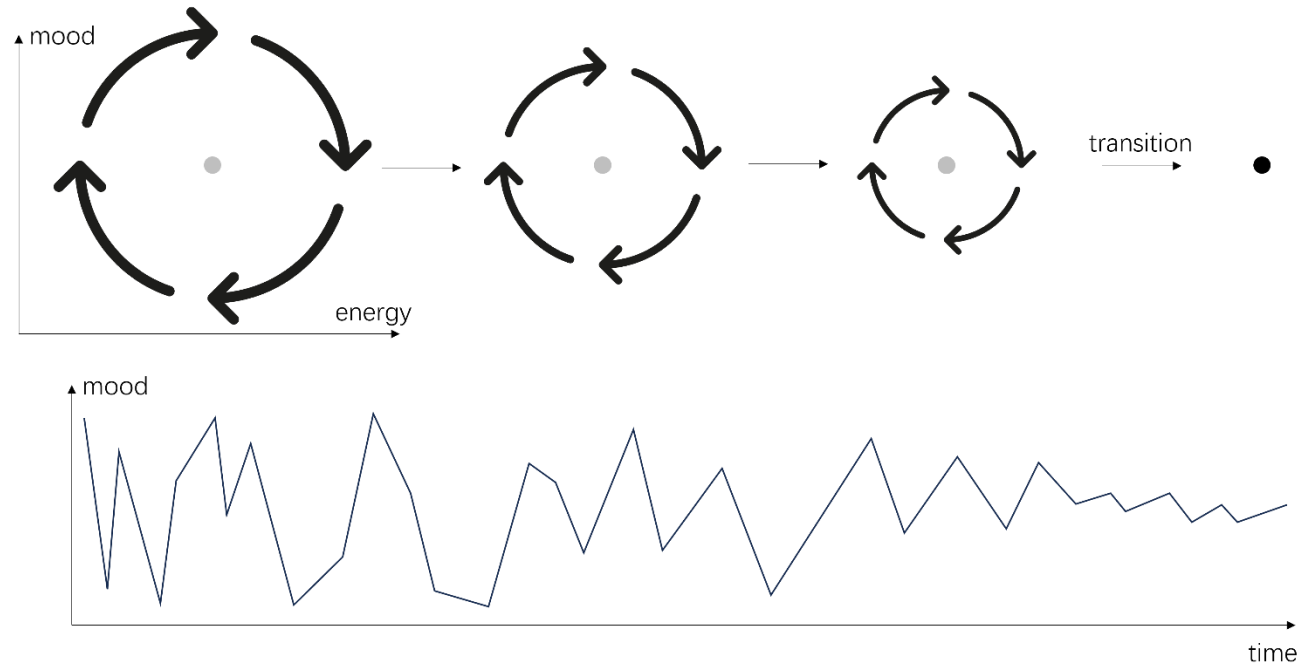
早期预警信号的研究方法检验

- 数学推导：测量早期预警信号需要满足什么条件？
 - 1. 系统需要从一个点吸引子 (point attractor) 出发
 - 2. 早期预警信号的测量时间需要严格早于突变
 - 3. 早期预警信号和突变出现在相同的变量上
- 如果不满足这些条件会发生什么问题？

Cui, J., Olthof, M., Hasselman, F., & Lichtwarck-Aschoff, A. (2025). Examining the research methods of early warning signals in clinical psychology through a theoretical lens. *BMC Psychiatry*, 25, 261. <https://doi.org/10.1186/s12888-025-06688-5>

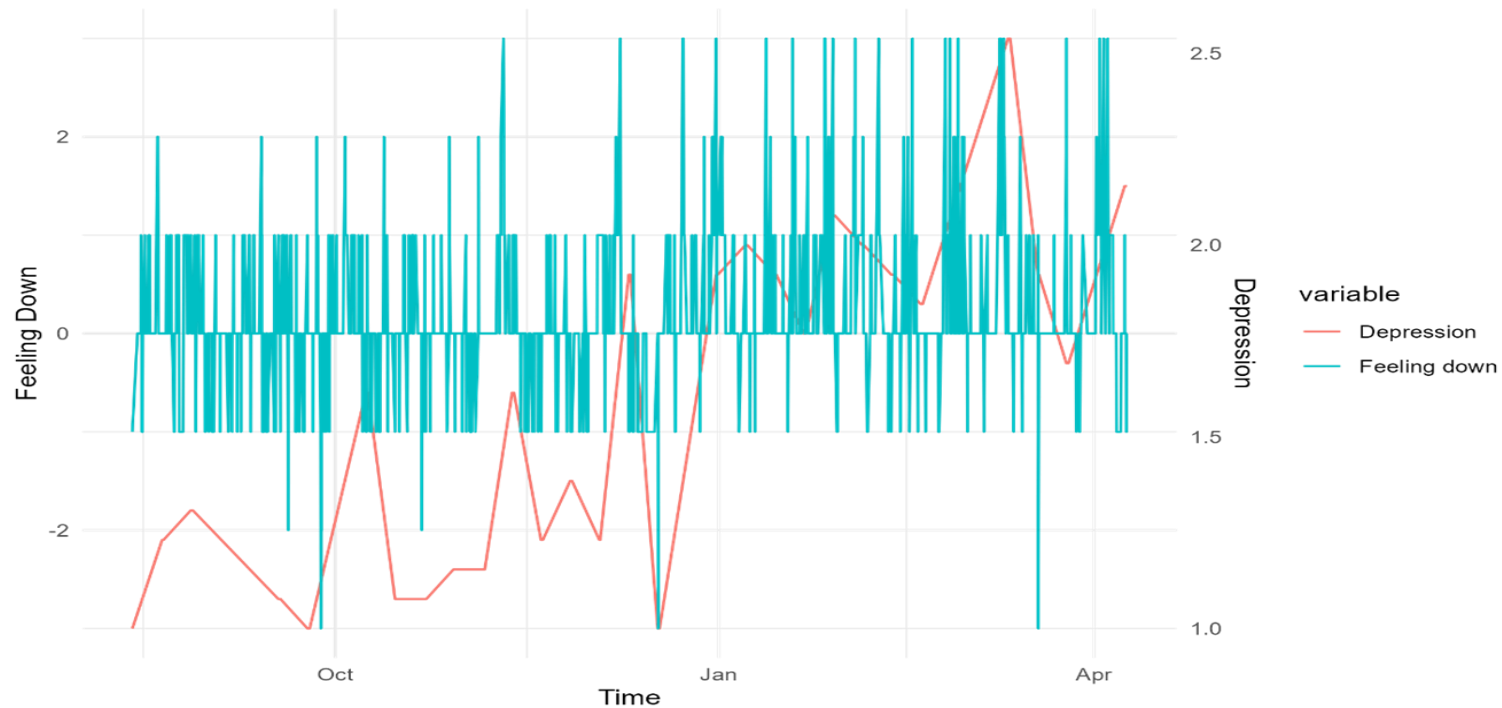
早期预警信号的研究方法检验

- 条件1：系统需要从一个点吸引子 (point attractor) 出发
 - 方差和自相关系数体现系统稳定性
 - 如果从极限环 (limit circle) 出发？



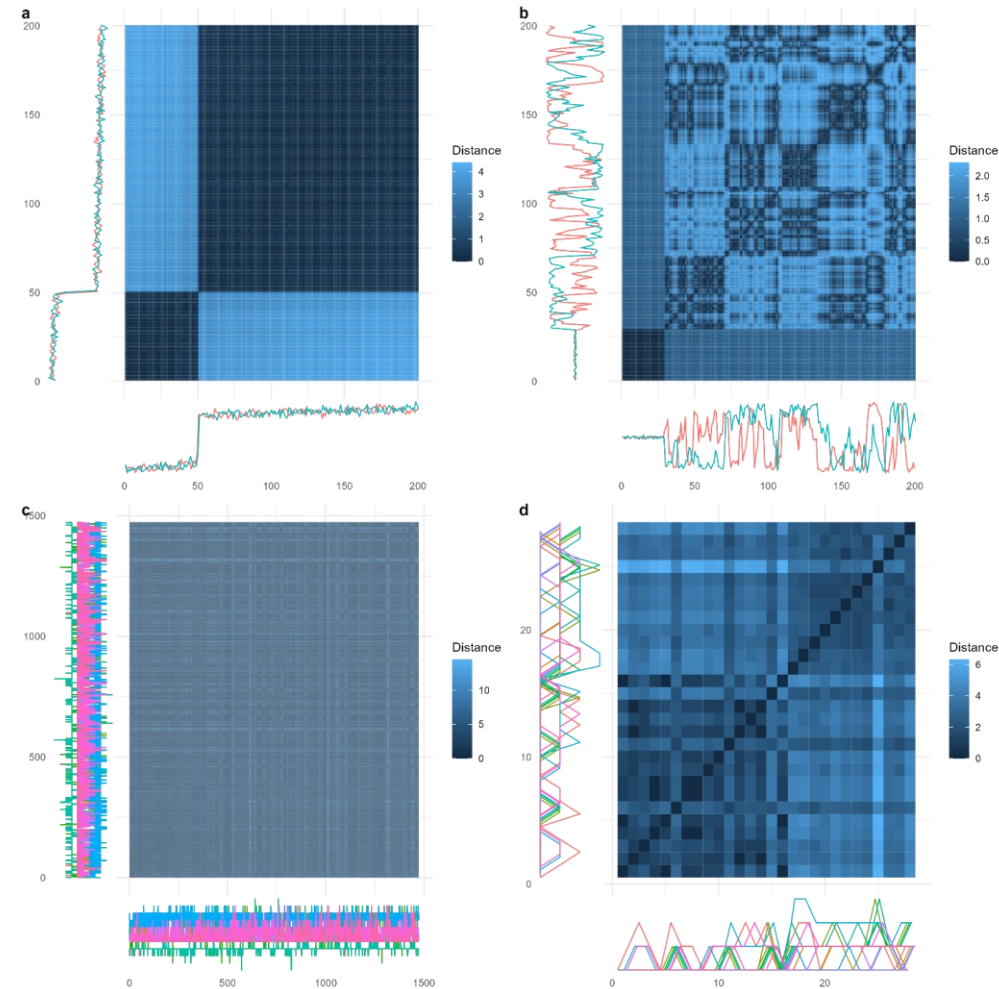
早期预警信号的研究方法检验

- 条件1：系统需要从一个点吸引子 (point attractor) 出发
 - 如果系统没有离开点吸引子？



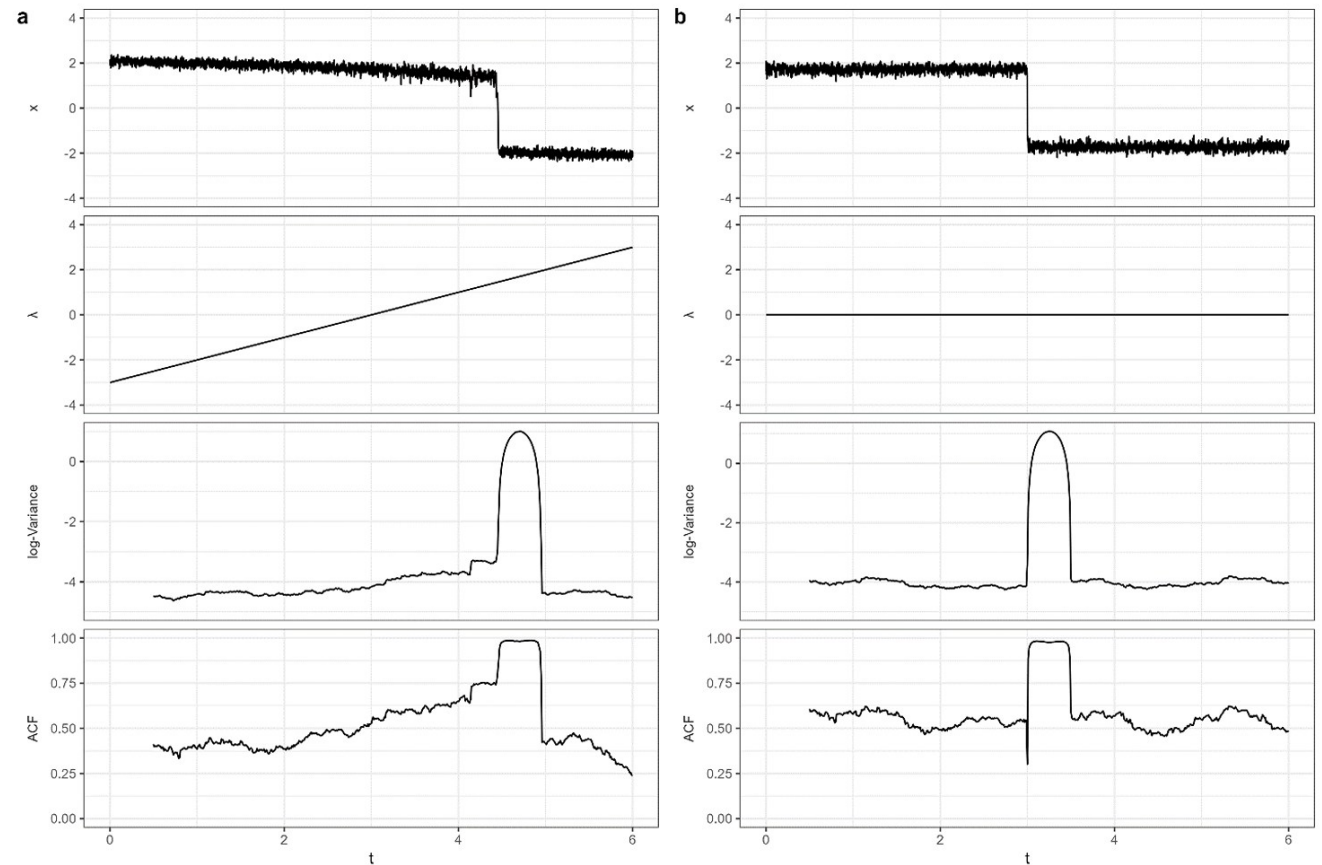
早期预警信号的研究方法检验

- 条件1：系统需要从一个点吸引子 (point attractor) 出发
 - 使用距离图 (distance plot) 作为描述性检验



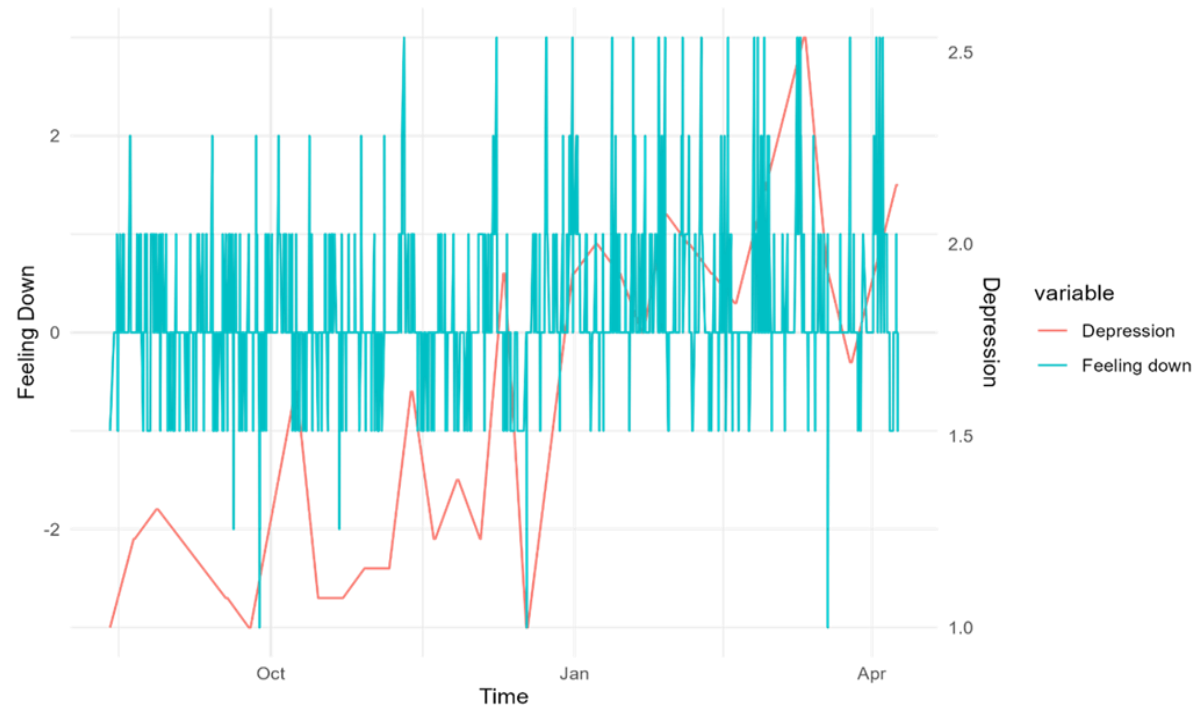
早期预警信号的研究方法检验

- 2. 早期预警信号的测量时间需要严格早于突变
 - 突变本身也会引起方差和自相关系数的增加
 - 固定时间前后测：无法确定早期预警信号测量时间是否包含突变本身



早期预警信号的研究方法检验

- 3.早期预警信号和突变出现在相同的变量上
 - 没有“自变量”和“因变量”的区分

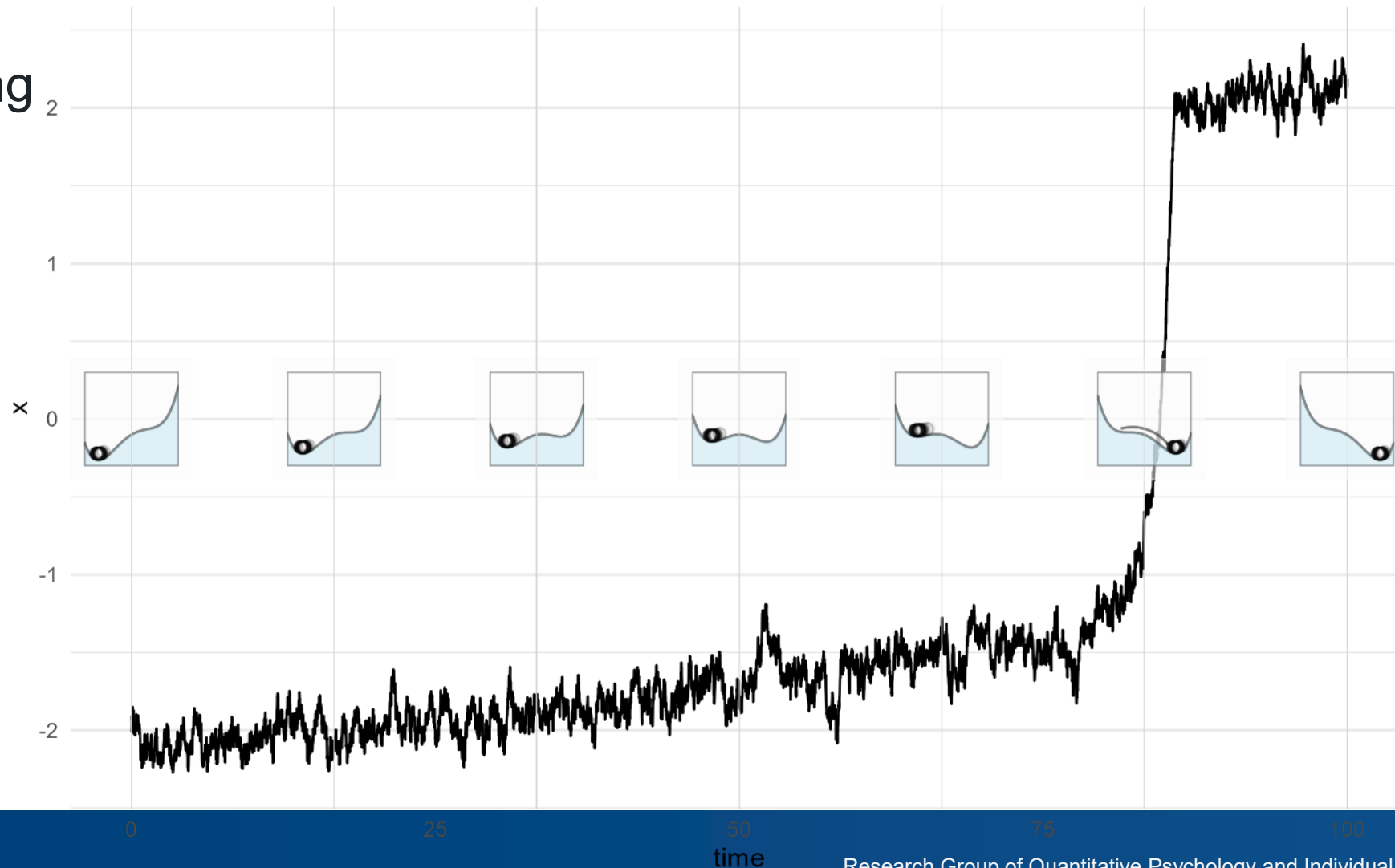


不同类型的心理变化

- 系统变化不一定按早期预警信号假设的方式进行
- 还有什么原因可能导致动态系统的变化？

不同类型的心理变化

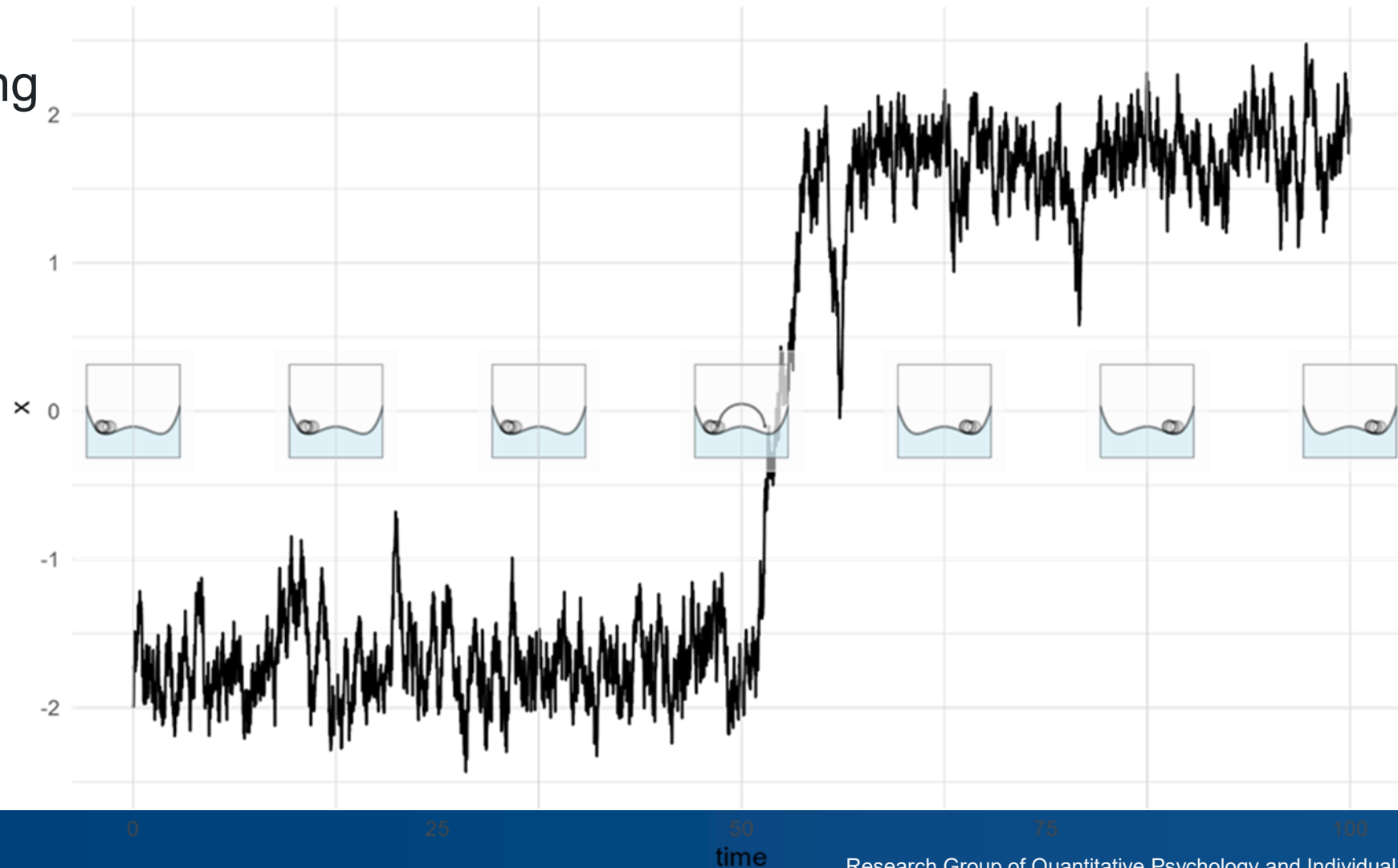
- B-tipping



Cui, J., Hasselman, F., Olthof, M., & Lichtwarck-Aschoff, A. (2025). Understanding types of transitions in clinical change: An introduction from the complex dynamic systems perspective. *Journal of Psychopathology and Clinical Science*, 134(4), 469–482. <https://doi.org/10.1037/abn0000991>

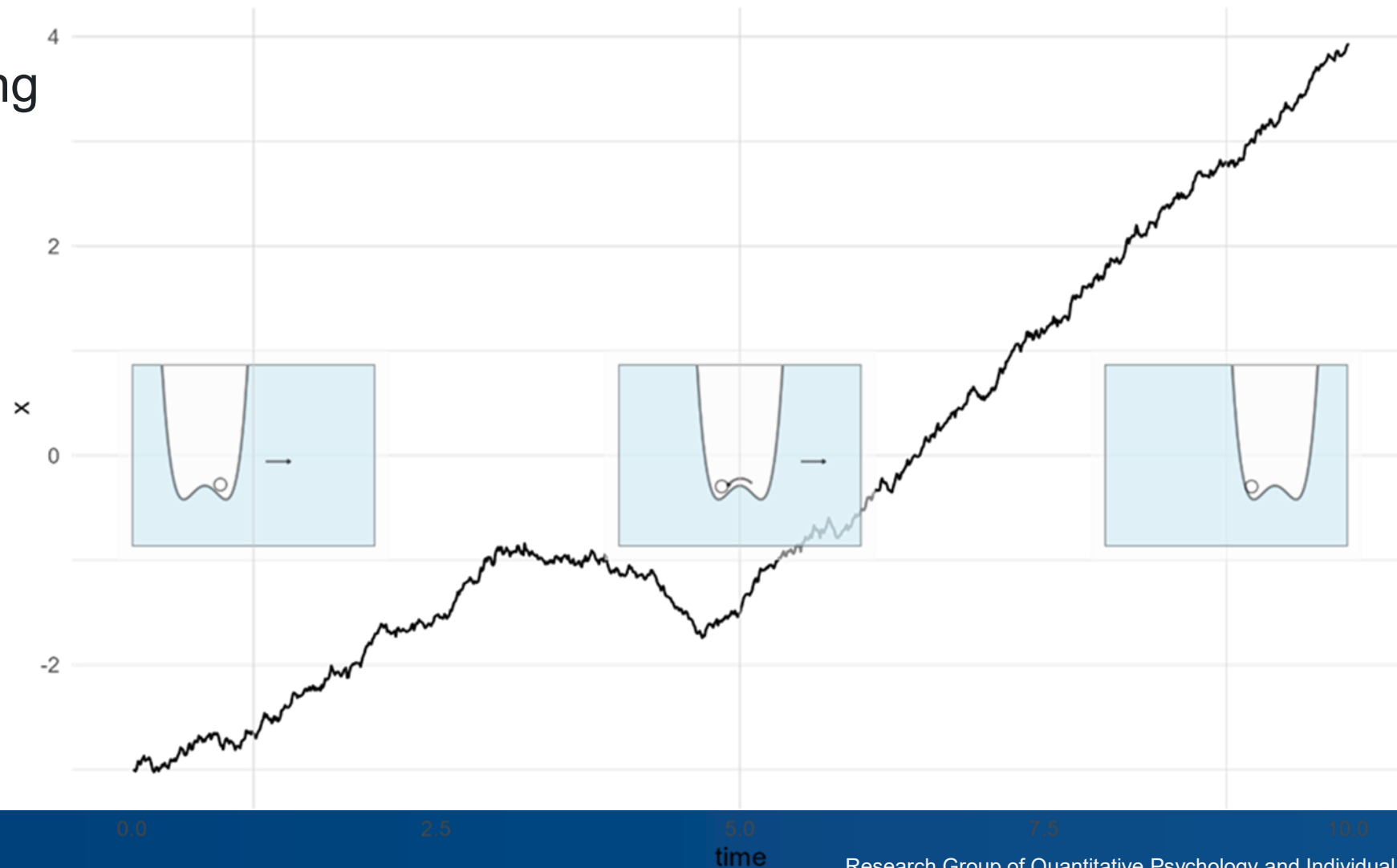
不同类型的心理变化

- N-tipping



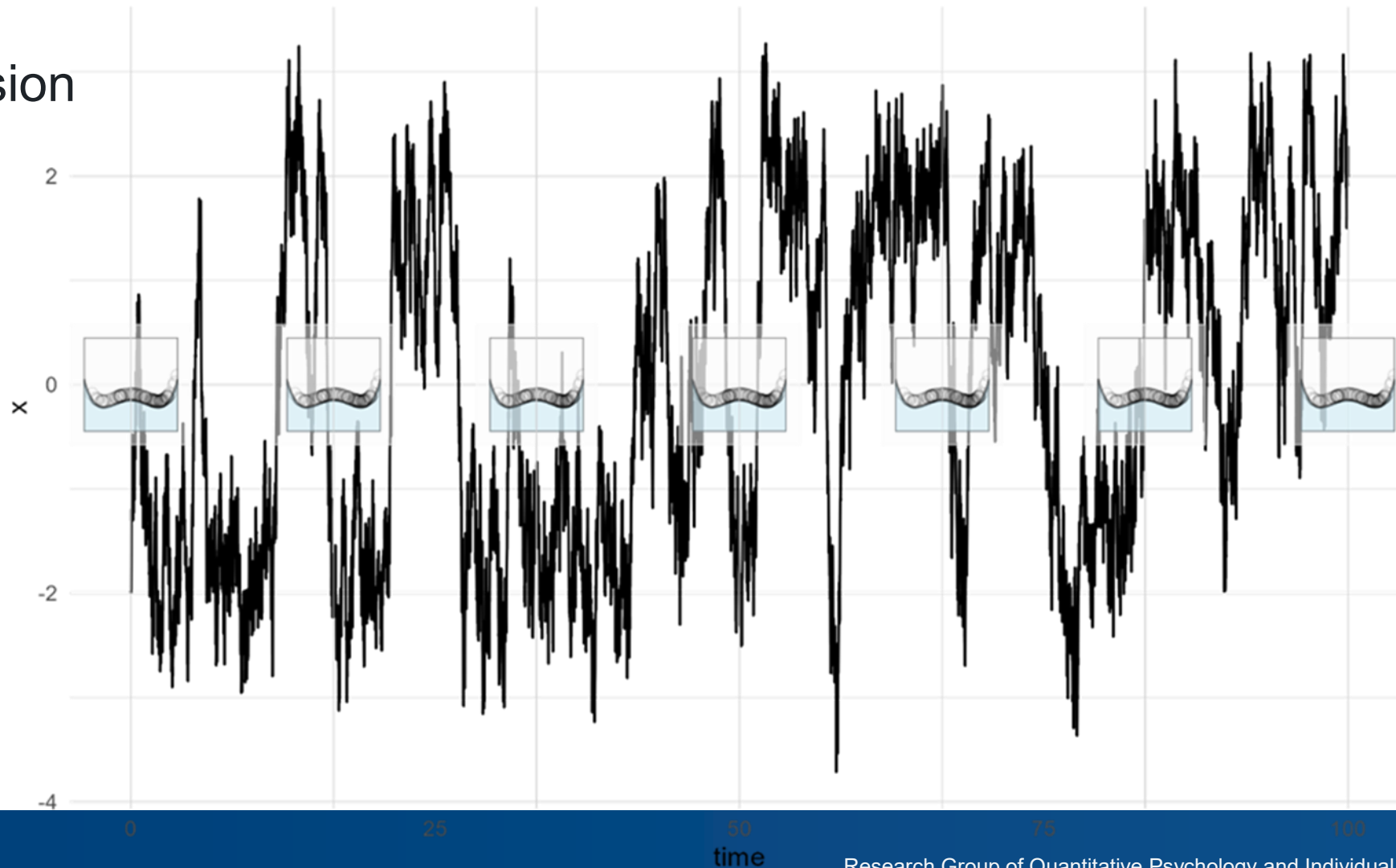
不同类型的心理变化

- R-tipping



不同类型的心理变化

- N-diffusion



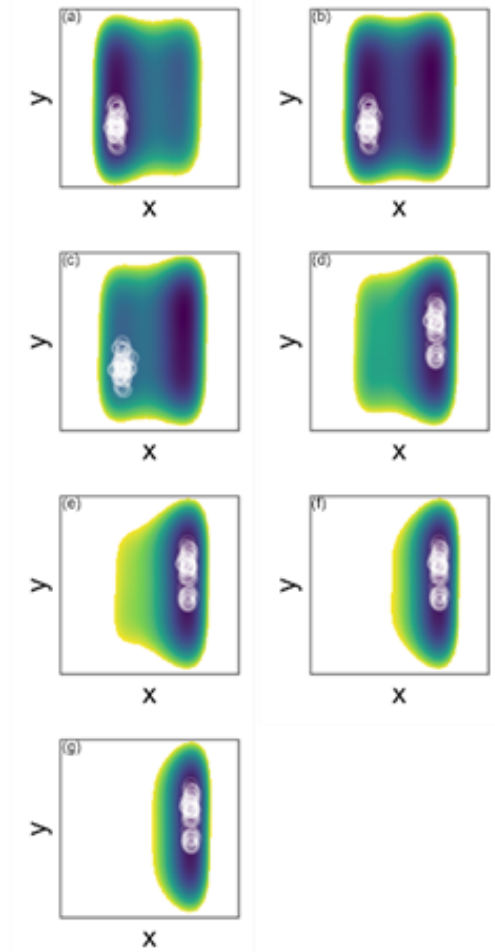
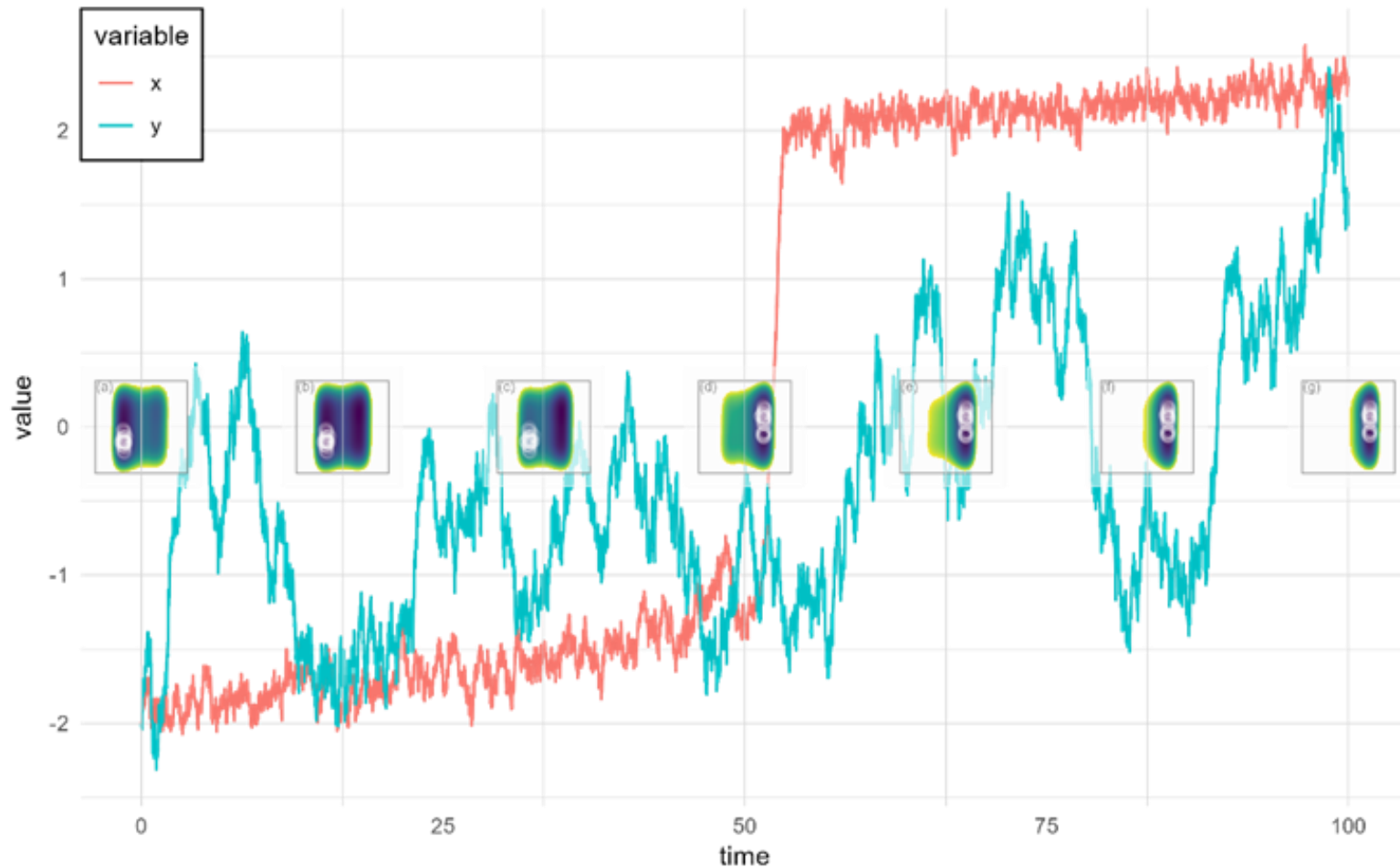
不同类型的心理变化

Transition type	Main cause	Predictability
B-tipping	Destabilization of the current attractor	Yes (under conditions)
N-tipping	Sudden, large perturbation	No
R-tipping	Moving rate of the attractor exceeds the ability of the system to follow	Yes (under conditions)
N-diffusion	Constant, large perturbations	N/A (always happening)

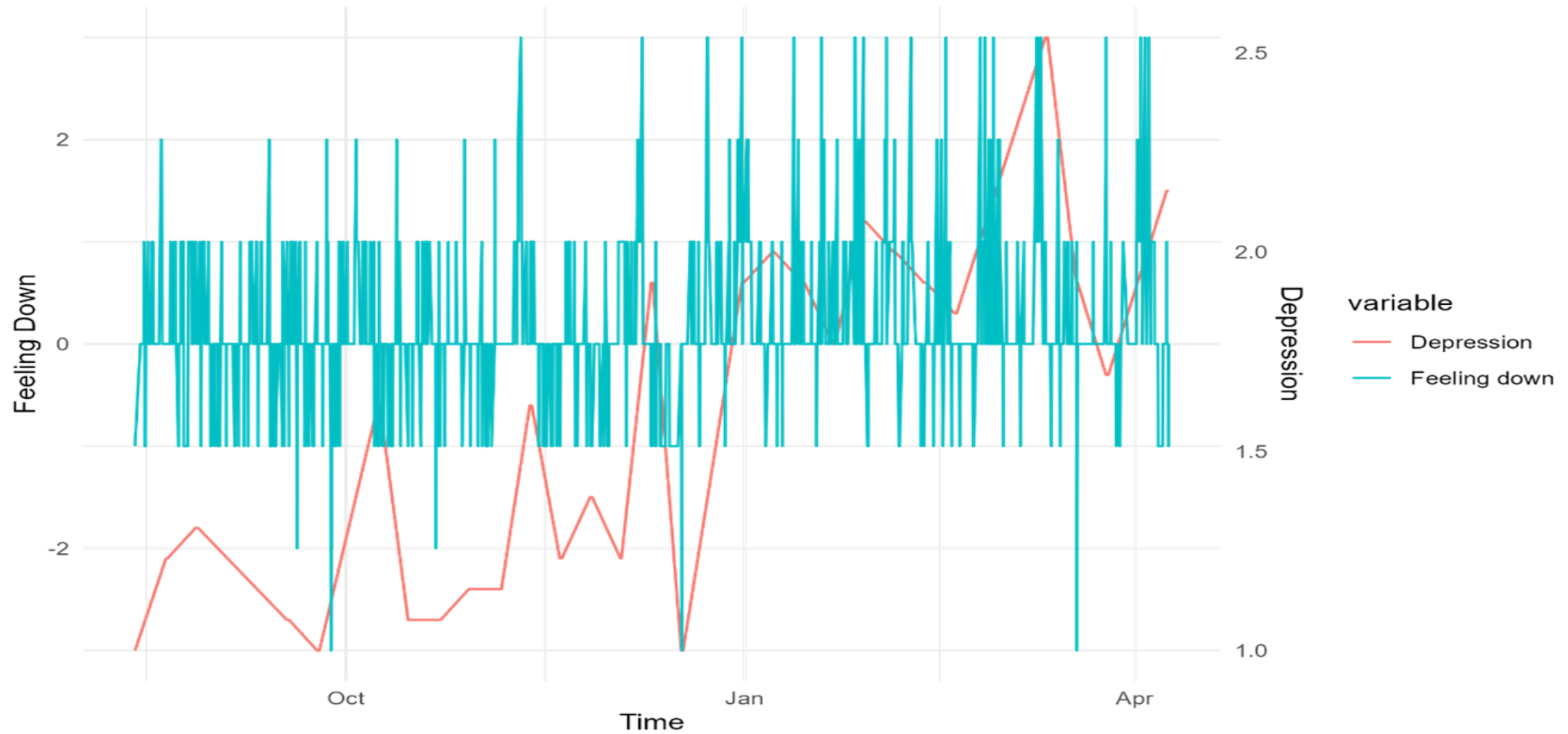
不同类型的心理变化

- 小球位置：系统状态 (state)，较低层级
- 地形形状：系统控制变量 (control parameter)，较高层级
- 实际场景中由于存在众多层级，可能在不同视角下的转变类型不同

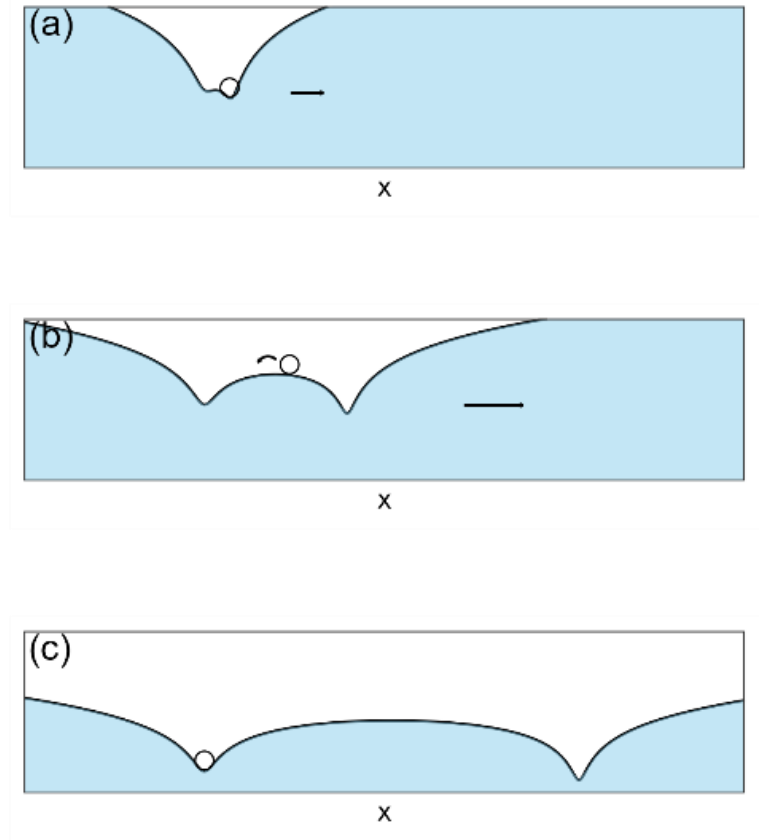
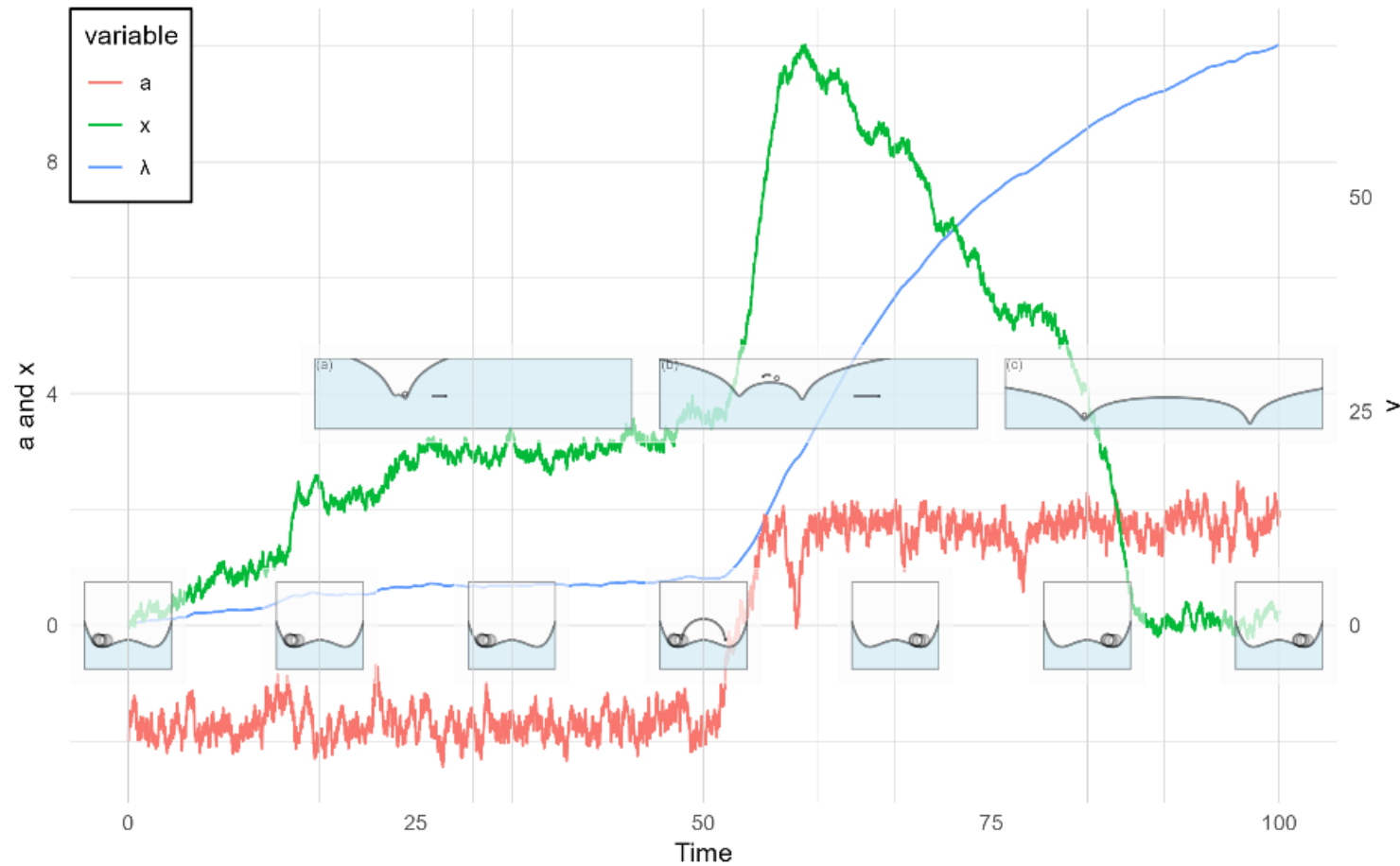
不同类型的心理变化



不同类型的心理变化

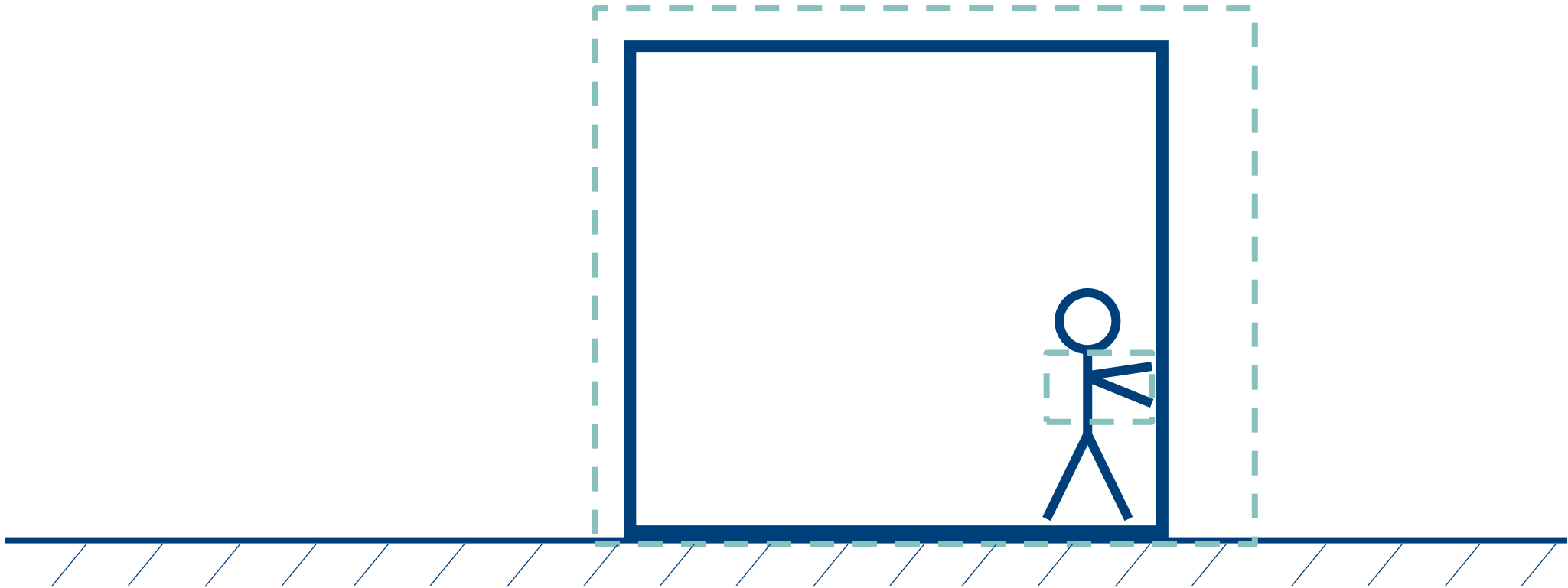


不同类型的心理变化



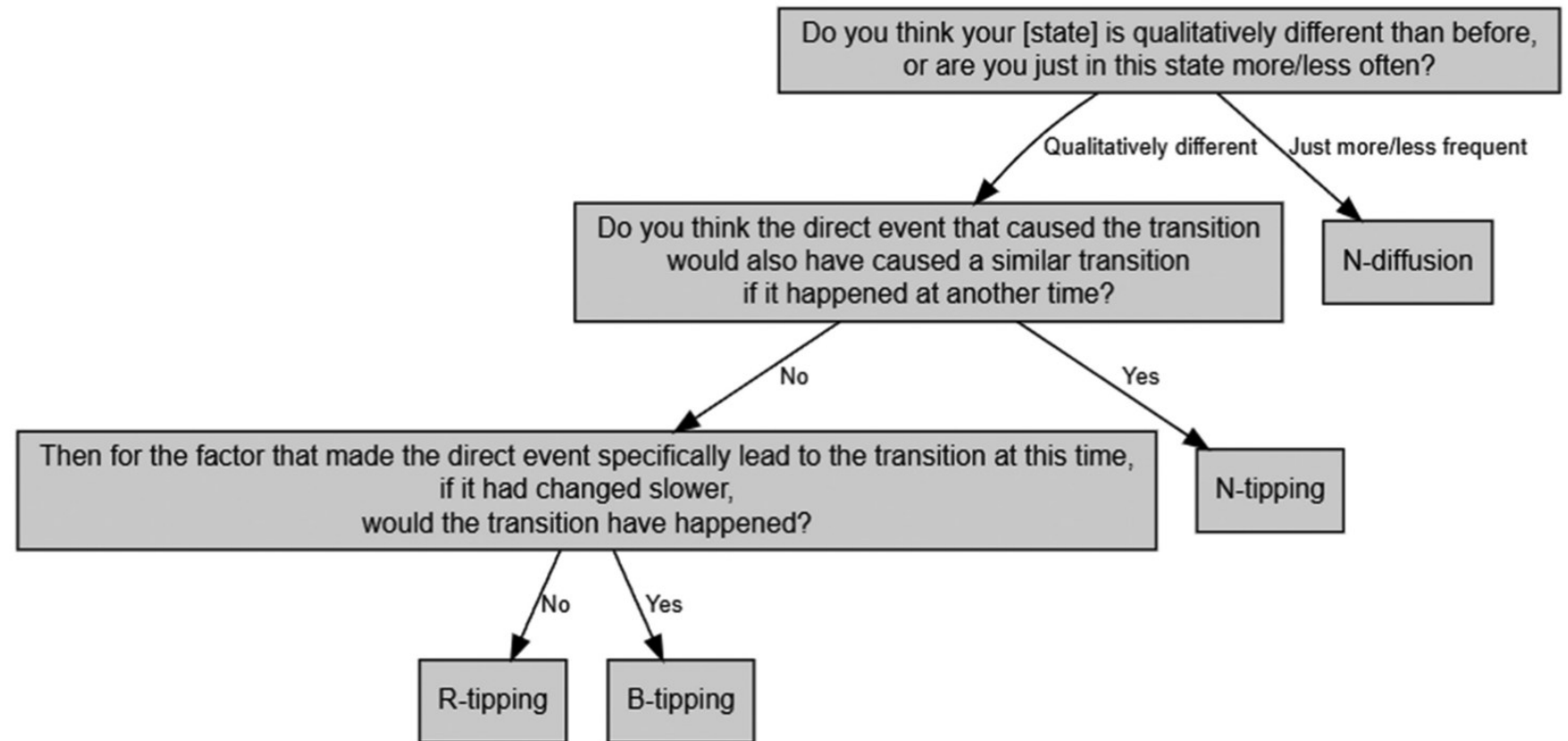
不同类型的心理变化

- 定义系统边界



不同类型的心理变化

- 区分系统的转变类型
 - 控制条件下的实验
 - 寻找早期预警信号
 - 引入定性方法



第二部分总结

- 早期预警信号是基于复杂动态系统理论提出的一种实际应用方式，但严格的实证检验需要保证研究方法 with 理论一致。
- 心理变化可能对应不同的动态系统变化形式，对应不同的实际应用方向，实证研究区分需要基于理论开发研究方法。

感谢上述工作的合作者



Prof. Anna
Lichtwarck-Aschoff
University of Groningen



Dr. Fred Hasselman
Radboud University



Dr. Merlijn Olthof
University of Groningen
& Radboud University



Prof. Tiejun Li
Peking University



Dr. Norman B. Mendoza
The Educational University
of Hong Kong

谢谢大家！

- Contact: jingmeng.cui@kuleuven.be
- Website: <https://jingmeng-cui.netlify.app/>