# 使用面部视频数字水合生物标志物对个性化水合动态进行纵向表征

Janindu Athukorala、D.M.J. Prathapa、Thanveer Ahamed、
Yudara KularathneHii.Health，新加坡

## 摘要

**背景**。水合状态通常通过单次测量进行评估，并依据人群层面的液体摄入目标进行管理，尽管体水分会持续变化，且不同个体对液体的反应可能存在差异。已有研究表明，面部视频数字水合生物标志物能够检测水合状态转变；但该工具是否能够在数小时内追踪个体内的水合状态，尚未得到研究。

**目的**。确定该生物标志物能否以符合生理学规律的方式追踪全天的个体内水合变化，量化不同个体的水合动态及其对相同液体摄入的反应差异，并探索个体反应模式是否能够为个性化水合方案提供依据。

**方法**。五名成年志愿者完成了两项实验。在一项12小时纵向研究中，每位参与者分别完成饮水日和电解质日，两个研究日均采用相同的2.0 L液体摄入计划，并每30分钟进行一次30秒面部视频采集（250段视频）。在一项2小时校准研究中，参与者醒来后先进行基线视频采集，随后饮用500 mL等渗电解质饮料，并每30分钟采集一次视频（25段视频）。研究结局包括评分轨迹、个体内对饮水的反应、每位参与者的扫描间变异和最小显著变化、反应幅度及时间过程、范围内时间（评分 ≥ 50）和稳定性。探索性分析考察了反应是否取决于饮水前的评分，并从首次扫描开始比较两个研究日。

**主要发现**。在 10 天中的 7 天里，参与者当天的首次扫描是在夜间无液体摄入期后进行的，且评分为当天最低。对全部 50 次研究用液体摄入进行分析发现，饮用后的均值变化（+4.0 分值）高于通过置换检验消除时间因素后预期的变化（$p < 0.001$）；而且，反应取决于摄入液体时的状态：评分低于 50 时摄入的 21 次液体均未导致评分下降，均值升幅约为向均值回归所预期升幅的两倍（+11.3 对 +5.7 分值；$p < 0.001$）；评分达到或高于 50 时摄入液体，评分则未出现超出偶然水平的上升。饮用相同的 500 mL 液体后，每位参与者的评分均有所上升（2 小时内的均值变化为 +5.4 至 +12.3 分值），但峰值出现时间因人而异，为 30、60 或 90 分钟，峰值范围为 +7.2 至 +22.6 分值。在完全相同的 2.0 L 饮用安排下，范围内时间从 16% 到 100% 不等；五位参与者晨间评分相近，但电解质日的评分升幅均高于饮水日（均值差为 +7.7 分值）。

**结论**。 面部视频水合生物标志物能够对个体的水合状态进行纵向表征。不同个体的水合轨迹、变异性以及对相同液体摄入的反应存在显著差异，这表明在制定个体化水合方案之前，可能需要进行个人校准。还需开展更大规模的前瞻性研究。

**关键词：**数字生物标志物；水合状态；面部视频；远程光电容积描记术；纵向监测；个性化水合；范围内时间

## 1. 引言

水合状态通常被视为一种静态的群体层面概念。液体摄入指导以人群参考值的形式呈现，例如，欧洲女性和男性的总饮水量分别为 2.0 L/天和 2.5 L/天 [1]，而美国的适宜摄入量分别为 2.7 和 3.7 L/天 [2]。水合状态本身最常

通过单次测量来判断，例如血浆渗透压、尿液指数或体重变化；这些指标都只能反映某一时刻的情况，且在实际应用中各有局限 [3, 4]。即使是公认的指标，也存在显著的生物变异，因此在解读个体测量结果时，固定临界值的参考价值有限 [5]。

新的初步证据表明，面部视频数字水合生物标志物能够检测水合状态的变化[6]。该生物标志物源自远程光电容积描记术（rPPG）相关信号，这些信号可通过普通摄像头捕捉面部皮肤的心血管相关颜色变化 [7, 8], ，且只需一段简短的智能手机视频即可。这使得在日常环境中进行重复、无创测量成为现实。

检测前后较大的变化是必要的第一步，但日常水合状态涉及更小且反复出现的变化。下一个问题是，同一工具能否在个体内纵向监测水合状态：评分如何在一天中变化、如何响应每次饮水，以及在两次饮水之间保持多大程度的稳定性。

有充分理由认为，水合状态既具有动态性，又高度因人而异。体水分会持续更新：通过尿液、呼吸和皮肤流失，并通过饮水和食物得到补充；肾脏水分调节则由精氨酸加压素和口渴机制共同调控[4, 9]。摄入液体必须先离开胃部并被吸收，之后才会改变体内水分分布，而这些步骤的速度取决于饮料容量和成分 [10]。不同饮料在随后数小时内对摄入液体的保留量也存在差异[11]。不同个体之间，习惯性的液体摄入量与不同的尿液水合特征相关[12], ，出汗率和汗液钠浓度也可能相差数倍[13]。

这些差异表明需要制定个性化水合方案。运动医学已建议根据测得的汗液流失量制定个性化液体摄入计划 [14], ，而且与随意饮水相比，个性化策略能够改善液体平衡 [15]。然而，在实验室之外，目前没有实用的方法来观察特定个体对液体的反应。在个性化营养领域，对个体反应的测量显示，同一餐食可能会在不同人群中引发截然不同的血糖反应，从而使建议不再局限于群体平均值 [16]；对单个个体进行重复测量是这一方法的核心 [17]。本研究将同样的思路应用于水合状态，通过对同一组五名个体进行两项互补实验，探讨三个研究目标。

**研究目标**

- **目标 1 – 纵向测量**。 展示数字化水合生物标志物能够在个体内纵向追踪水合状态变化，且呈现的模式在生理学上合理。
- **目标 2 – 水合状态因人而异**。 使用12小时和2小时数据，展示即使液体摄入量相近，不同个体的水合反应仍存在显著差异。
- **目标3 –迈向个人校准**。探讨个体反应模式是否有助于制定未来的个体化水合方案。此目标仅属初步探索；在确定最佳剂量或范围之前，仍需开展规模更大的前瞻性研究。

**次要概念**。变化轨迹、稳定性和范围内时间等纵向指标，可能比单次水合状态测量或每日液体容量目标更有用。

## 2. 方法

### 2.1 研究设计

本研究由同一组五名参与者完成的两项互补实验组成（图1）。

***A. 12*小时纵向研究**

每位参与者均完成两个12小时监测日：先是饮水日，随后是电解质日。在这两天中，参与者均在摄入任何食物或液体之前录制一段面部视频（首次扫描，T0），此后每隔30分钟录制一次，直至T+12 h，因此每天共录制25段视频。液体总摄入量统一设为2.0 L：在五个固定时间摄入1.5 L研究用饮品，并在三个固定时间的餐食期间摄入0.5 L非研究用饮品（茶或咖啡）（表1）。饮水日的研究用饮品为白水；电解质日的研究用饮品为市售即饮型等渗电解质饮料，采用500 mL瓶装（钠12.2 mEq/L、钾8.4 mEq/L、钙7.3 mEq/L、镁4.9 mEq/L；表2）。该饮料还含有每100 mL 5.8 g碳水化合物，全部为糖，并含有甜味剂三氯蔗糖；据制造商称，其渗透压与血液相当。两天中，每位参与者均按照从首次扫描开始计时的同一时间安排进行。参与者按要求使用同一部智能手机录制每段视频，录制时保持坐姿和静止，确保面部完全可见且不说话。每天的餐食、非研究用饮品、症状及药物使用情况均有记录。

**表1.** 12小时研究的标准化饮水和用餐时间表（两天相同）。

| 距首次扫描的时间 | 研究用饮品 | 非研究用饮品（茶/咖啡） | Meal |
|---|---|---|---|
| T0（首次扫描后） | 400 毫升 | – | – |
| T+30 分钟 | – | 150 毫升 | 早餐 |
| T+2 小时 30 分钟 | 300 毫升 | – | – |
| T+4 小时 | – | 150 毫升 | 午餐 |
| T+5 小时30分钟 | 300 毫升 | – | – |
| T+8 小时30分钟 | 250毫升 | – | – |
| T+10 小时 | – | 200毫升 | 晚餐 |
| T+11 小时 | 250毫升 | – | – |
| **总计** | **1,500 毫升** | **500 毫升** | |

研究用饮品在饮水日为白水，在电解质日为等渗电解质饮料。从 T0 到 T+12 h，每 30 分钟录制一段面部视频（每天 25 段）。

**表2**。 等渗电解质饮料的电解质组成。

| 电解质 | 浓度 (mEq/L) | 每升含量 (mg) |
|---|---|---|
| 钠 ($Na^+$) | 12.2 | 280 |
| 钾 ($K^+$) | 8.4 | 330 |
| 钙 ($Ca^{2+}$) | 7.3 | 147 |
| 镁 ($Mg^{2+}$) | 4.9 | 59 |

数值来自 产品标签。盐类：氯化钠；柠檬酸钾、磷酸盐和山梨酸盐；氯化钙；硫酸镁 te.

***B. 2*小时校准研究**

在另一个早晨，每位参与者醒来后录制一段基线面部视频，随后饮用500毫升相同的等渗电解质饮料，并分别在+30、 +60、 +90 和+120 分钟后录制视频（每位参与者共录制五段视频）。在这2小时内未摄入其他食物或饮料。

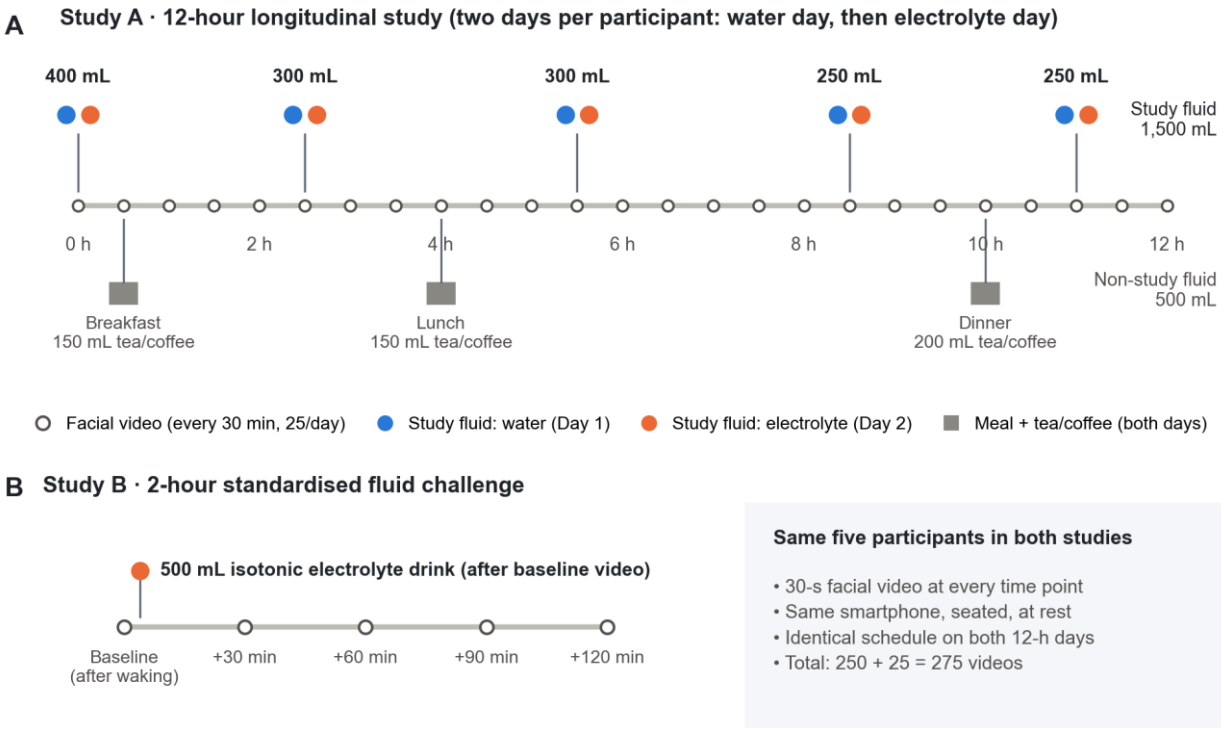



**图1**。研究设计。(A) 12小时纵向研究：每位参与者均完成饮水日和电解质日，两天的研究用饮品安排完全相同（圆形；1,500 mL），并在餐食时饮用茶或咖啡（方形；500 mL），每隔30分钟录制一次面部视频。(B) 2小时校准研究：醒来后录制基线视频，饮用500 mL等渗电解质饮料，之后每隔30分钟录制一次视频。

## 2.2 参与者

五名成年志愿者（三男两女，年龄为26至30岁）参加了两项实验。参与者并非根据特定健康状况进行筛选：体型范围从体重过轻到肥胖（体质指数为18.2–32.6 kg/m2），其中一名参与者患有慢性疾病，正在接受常规药物治疗，并在医生监督下参与研究（表3）。通过问卷记录每位参与者的身高、体重、健康背景、常规药物、月经周期以及每个研究日的症状。所有参与者均同意参加研究，并同意发表匿名健康信息。参与者标记为参与者1至参与者5。

## 2.3 数字化水合生物标志物

该生物标志物通过标准智能手机摄像头录制的30秒面部视频生成水合评分。系统会追踪视频中的面部皮肤区域，并提取与rPPG相关的信号，再由一种专有深度学习模型进行分析；这类模型是为基于视频的生理测量而开发的 [18]。评分范围为0至100；数值越高，表示状态越符合近期摄入液体的情况。50是操作性界限，用于区分更符合水合状态与水合不足状态的两种状态。全部275段视频均使用同一固定版本的评分模型进行评分，且本研究的数据未用于训练或调优该模型。该评分旨在作为一种生活方式数字化生物标志物，用于追踪水合状态变化的方向和模式；它并非用于诊断脱水的诊断检测。

## 2.4 纵向结局

以下结局指标在分析前已预先定义。

- **评分轨迹：**每个12小时日中的25个评分以及2小时研究中的5个评分所构成的序列。
- **个体内变化：**对于每个12小时日中的5次研究用液体摄入（总计50次摄入），饮品反应为摄入后30分钟和60分钟的评分均值减去摄入前即刻的评分。在2小时研究中，变化相对于基线视频表示。

- **个体间变异：**每位参与者的扫描间变异，σ，根据两个12小时日中的48个连续扫描差值（Δ）稳健地估计为 $\sigma = 1.4826 \times$ 中位数$|\Delta| / \sqrt{2}$；每个天内评分的标准差（SD）；以及将评分总方差分解为参与者间、日间和日内成分。

- **有意义的变化：**遵循可靠变化和最小显著变化原则[19, 20]，，只有当变化以95%的置信度超过仅由扫描间变异所预期的变化时，才认为该变化具有意义：当比较两次单独扫描时，LSC为$= 1$；当将一次饮水前单次扫描与两次饮水后扫描的均值进行比较时，LSC为$1.96 \times \sqrt{1.5} \times \sigma$。由于连续扫描差值还包含真实的生理变化，σ，因此LSC是一个保守的（上限）估计值。

- **反应幅度和时间过程（2小时研究）：**相对于基线的峰值变化、达峰时间、120分钟时的变化，以及0–120分钟内的平均变化（变化曲线下面积除以120分钟）。反应分为持续升高（在两个或更多时间点高于最小显著变化，且包括120分钟）、短暂上升（在一个或更多时间点高于最小显著变化，但120分钟时未高于该值），或在没有任何时间点超过最小显著变化时，归为最小显著变化范围内的上升（0–120分钟内平均变化为正）或无上升；有意义的下降则单独记录。
- **范围内时间和稳定性：**范围内时间是一天中评分达到50分或以上的扫描所占百分比；同时还记录了评分持续处于50分或以上的最长连续时段，以及低于50分的超出次数。稳定性是连续扫描之间绝对变化的均值。为将单次测量与全天情况进行比较，我们还计算了在随机时间进行的一次扫描与当天主要状态不一致的概率（即范围内时间及其补数中较小者）。

数据检查后确定的补充分析，考察了饮品反应是否取决于饮用前评分（低于 50 分与 50 分及以上），并以首次扫描为基准，比较每位参与者两个研究日的情况；分析采用相对于首次扫描的变化值，以避免起始水平差异影响比较。这些分析作为探索性分析报告。

### 2.5 统计方法

分析主要为描述性和探索性分析，着重考察个体变化轨迹和个体内比较，并避免根据小样本得出总体层面的结论。研究采用了三项检验，以防止过度解读。首先，单侧符号检验考察当天第一杯饮品后评分上升的频率是否高于偶然情况下预期的 50%。其次，置换检验 [21] 考察研究用液体摄入后评分是否高于根据当天评分分布所预期的水平：在每天内将扫描顺序随机打乱 20,000 次，保留每天的数值，但消除其与饮品摄入时间的对应关系；随后将全部 50 次饮水的观察到的平均饮水反应与打乱后的分布进行比较。由于每个打乱后的研究日保留了相同的评分，因此该检验也考虑了饮品摄入前扫描值异常偏低后向均值回归的影响。第三，Fligner–Killeen 检验 [22] 比较了参与者之间连续扫描差值的离散程度。在探索性分析中，除符号检验外，还采用了 Wilcoxon 符号秩检验（该检验也考虑每次变化的幅度），比较首次扫描与当天其余评分的均值。研究还针对 30–90 分钟时段定义的反应重复进行置换检验，并分别分析摄入量低于 50 和大于或等于 50 的情况；对每个组别，将观察到的平均反应与打乱后的数据中同组摄入对应的平均反应进行比较，而打乱后的数据同样包含向均值回归的影响。两个研究日之间的参与者内差值，以及 2小时挑战期间的平均变化，均采用基于 t 分布的 95% 置信区间进行汇总，并在五名参与者中通过精确符号翻转检验进行检验（可达到的最小单侧

p = 0.031）。报告的 P值未经调整，且仅作探索性解读。分析使用 Python 3.12（NumPy、SciPy 和 pandas）完成；数据和分析代码与研究文件一同存档。

## 3. 结果

### 3.1 参与者特征

全部275个预定视频（12小时研究中的250个和2小时研究中的25个）均可用，并纳入分析。参与者特征汇总于表3中。该组具有有意的异质性：一名参与者的体质指数正常且无健康状况问题，两名参与者超重，一名参与者肥胖，另一名参与者体重过轻。参与者3患有多种慢性疾病，并接受常规药物治疗；参与者5患有偏头痛，并在饮水日经历了一次偏头痛发作。三名参与者报告，在电解质日仅饮用电解质饮料而未饮用白水，因而感到不适。

**表3**。 参与者特征。

| 参与者 | Sex | 年龄（岁） | 身高（cm） | 体重（kg） | BMI（kg/m2） | BMI 类别（世界卫生组织） | 健康背景 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 参与者1 | M | 26 | 170.2 | 62 | 21.4 | 正常 | 无医学疾病；无常规药物。 |
| 参与者2 | M | 29 | 176.8 | 102 | 32.6 | 肥胖（等级 I） | 无医学疾病；无常规药物。 |
| 参与者3 | M | 30 | 173.7 | 82 | 27.2 | 超重 | 慢性肾脏疾病、慢性阻塞性肺疾病、Hypertension、睡眠困难和焦虑；规律使用抗高血压药物、抗血小板药物和抗焦虑药物。 |
| 参与者4 | F | 30 | 157.5 | 63 | 25.4 | 超重 | 无医学疾病；无常规药物。常规28天月经周期；研究日期间无月经症状。 |
| 参与者5 | F | 29 | 169.0 | 52 | 18.2 | 体重过轻 | 偏头痛，正在服用常规预防性药物。饮水日：偏头痛发作，服用了镇痛药。电解质日：月经’轻微头痛。 |

健康背景由参与者自行报告。

### 3.2 12小时纵向水合模式

在全部10个监测日中，水合评分全天都有变化（图2），日内范围为19.8至36.3分值；每天的范围都超过了该参与者自身的最小显著变化。轨迹的四个特征与预期的水合生理学相符（图3）。

首先，早晨扫描通常是当天评分的低点。夜间无液体摄入期后进行的当天首次扫描，在10天中的7天是当天25个评分中的最低值（按偶然情况预期为0.4天），在10天中的9天处于最低四分位。10天中有8天评分低于50，平均为41.5分值，而当天其余时段的平均值为54.5分值（10天中有9天在当天较晚时段评分更高；Wilcoxon符号秩检验 p = 0.002）。

其次，当天第一杯饮品之后，只要当天开始时评分低于 50，评分就会升高（图3A）。在这 8 天中，评分均有所升高（变化中位数为 +14.5 分，范围为 +1.8 至 +24.0；单侧符号检验 p = 0.004），并在一小时内达到 50 或以上。开始时评分达到或高于 50 的两天均属于参与者1，在这两天中评分没有升高（分别为 −1.9 和 −0.6 分）。这 10 天中，评分有 8 天升高（变化中位数为+13.8 分；单侧符号检验 p = 0.055；威尔科克森符号秩检验 p = 0.007）。其中 4 例的首次饮水反应超过了参与者自身的最小显著变化（参与者2两天分别为 +14.1 和 +22.0 分；参与者3的电解质日为 +24.0 分；参与者5的电解质日为 +16.5 分）。

第三，饮水后评分升高的频率高于随机情况下的预期。在全部50次研究用液体摄入中，平均饮水反应为+4.0分值；而在通过置换检验移除扫描时间后，该数值为0.0 ± 1.1分值（均值± 标准差），当

扫描时间通过置换检验被移除时（p < 0.001；图3B）；当反应定义为30–90分钟内的反应时，结果保持不变（+3.5分值；p < 0.001）。六次摄入产生了超过个人最小显著变化的升高，而随机情况下预期为1.6次（p = 0.002）。对较晚饮用的较少量饮品（250–300 mL）的反应较小：40次较晚摄入中有24次使评分升高，平均变化为+2.1分值，其中2次升高超过了最小显著变化。

第四，反应取决于摄入液体时所处的状态（图3C）。在评分低于 50 时摄入的 21 次液体中，没有一次摄入后评分下降：其平均反应为 +11.3 分，约为打乱后的数据中向均值回归所预期的 +5.7 分的两倍（p < 0.001）；无论是当天第一杯饮品（8 次摄入；+14.8 vs +5.5 分；p = 0.022），还是较晚饮用的饮品（13 次摄入；+9.2 vs +5.7 分；p = 0.041），这一模式都成立。当评分已达到或超过 50 时摄入液体，之后的评分上升并未超出偶然水平（29 次摄入；−1.3 vs 预期的 −2.3 分；p = 0.17）；而仅有的两次超过最小显著变化的评分下降，都发生在评分较高时摄入液体之后（61.0 分和 61.2 分）。由于较晚饮用的饮品中大多数（40 次中的 27 次）是在评分达到或超过 50 时摄入的，因此其平均反应较小。

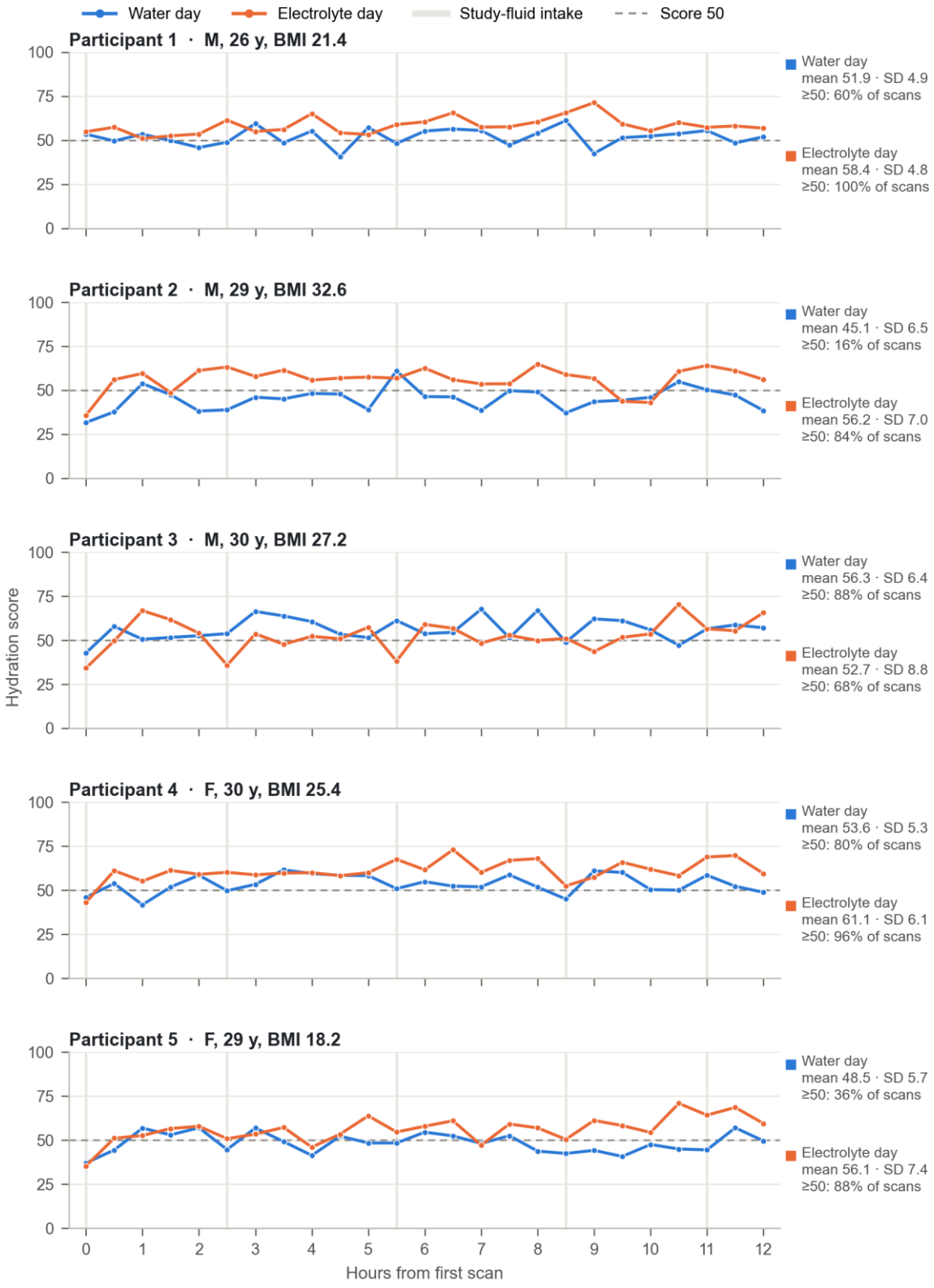



**图2**。饮水日（蓝色）和电解质日（橙色）各参与者的12小时水合评分轨迹。浅色竖条表示研究用液体摄入量（400、300、300、250和250毫升）；虚线表示评分为50。右侧：日均值、标准差以及评分达到或超过50的扫描百分比。

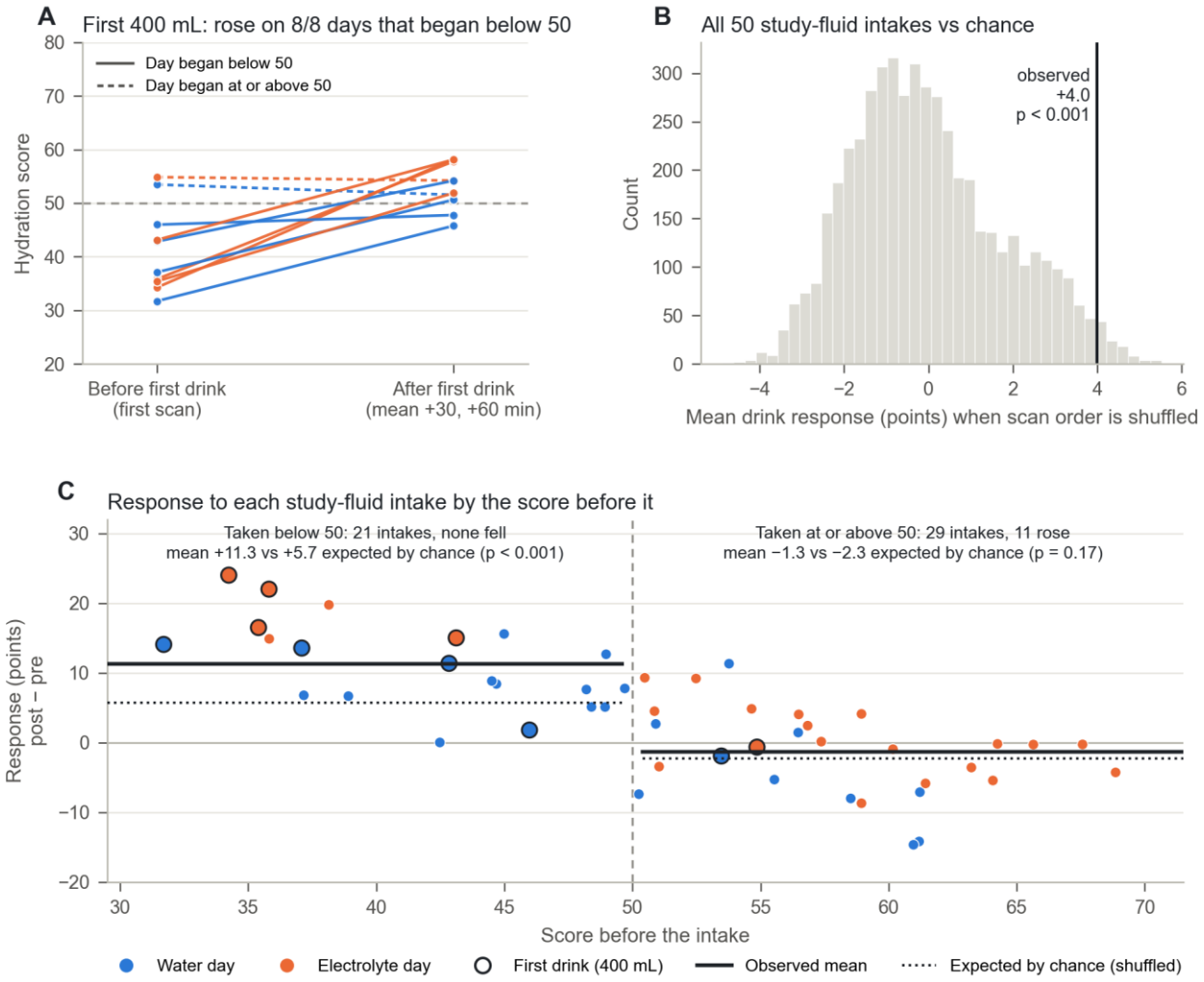



**图3**。12小时研究中的饮水反应。(A) 所有10天中，当天第一杯饮品饮用前的评分，以及饮用后+30 和+60 分钟评分的均值；虚线标出起始评分达到或超过50的两天。(B) 全部50次研究液体摄入的平均饮水反应，与每天打乱扫描顺序后得到的分布进行比较（图中显示5,000次打乱；报告的p值采用20,000次打乱计算）。(C) 将每次液体摄入的反应与摄入前的评分作图；实线表示摄入前评分低于50和达到或超过50时观测到的平均反应，点线表示打乱后的数据中偶然情况下的预期均值，空心标记表示当天第一杯饮品。

### 3.3 不同个体的水合反应存在差异

不同参与者从一次扫描到下一次扫描的评分变化幅度各不相同（图4A）。扫描间变异范围为5.1分（参与者1）至7.7分（参与者3）（Fligner–Killeen检验 $\chi 2 = 13.5$，自由度 =4，p值 = 0.009）。相应的两次扫描间最小显著变化范围为14.2至21.4分，因此，15分的变化超过了参与者1的测量变异，但未超过参与者3的测量变异。相比之下，参与者的平均水平差异很小：评分总方差中，66.1%来自天内（随时间变化），24.9%来自同一参与者的两天之间（即水日与电解质日之间；见下文），仅有9.0%来自参与者之间。因此，参与者之间的区别不在于平均评分，而在于评分的变化方式（图4B）。

曲线形状反映了这些差异（图2）。参与者1是唯一一位在两天开始时评分均达到或超过50分（53.5和54.9分）的参与者，并且两天的评分波动范围均约为20分；在电解质日，

评分始终不低于50分。参与者2在两天开始时的评分都是组内最低的（31.7和35.8分）；在饮水日，评分一整天大部分时间都低于50分（范围内时间为16%），其中五次饮用中的三次饮用前评分分别为31.7、38.9和37.2分。参与者3的评分波动最大：在电解质日，前3次饮用前评分均降至34–38分，饮用后则上升了15至24分。参与者4在两天的大部分时间里评分均达到或超过50分（扫描结果中分别占80%和96%）。参与者5在发生偏头痛发作的饮水日里，大部分时间评分低于50分（范围内时间为36%），且每次饮用前评分都低于50分；而在电解质日，评分有88%的时间达到或超过50分。

两个研究日之间在参与者个体内也存在差异（图7C、D）。在饮用任何研究用饮品之前，两个研究日的晨间评分相近（电解质日减饮水日，均值 −1.5 分值；范围为 −8.6 至 +4.1）。从这一初始水平出发，所有五名参与者在电解质日的评分升幅均高于饮水日（相对于首次扫描的变化差异均值为 +7.7 分值；95%置信区间为4.5至10.8；精确符号翻转检验p值为 = 0.031），且从第一杯400毫升饮品开始即出现这一差异（平均反应为 +15.4 对 +7.8 分值；五名参与者在电解质日的反应均较大）。较晚饮用的饮品在两个研究日产生了相似的反应（+2.0和+2.2分值）；差异在于两次饮品之间评分维持得有多好。在四次较晚饮用的饮品之前，饮水日有20次观察中的11次评分跌破50，而电解质日仅有20次中的2次；五名参与者中有四人在电解质日的范围内时间更长（均值87%对56%；表 4，图7A）。例外是参与者3：其从首次扫描开始的升幅在电解质日更大，但该日的起始评分低了8.6分，且其均值评分和范围内时间并未更高（52.7对56.3分值；68%对88%）。由于饮水日始终先于电解质日，因此这些差异应在随机顺序研究中加以确认。

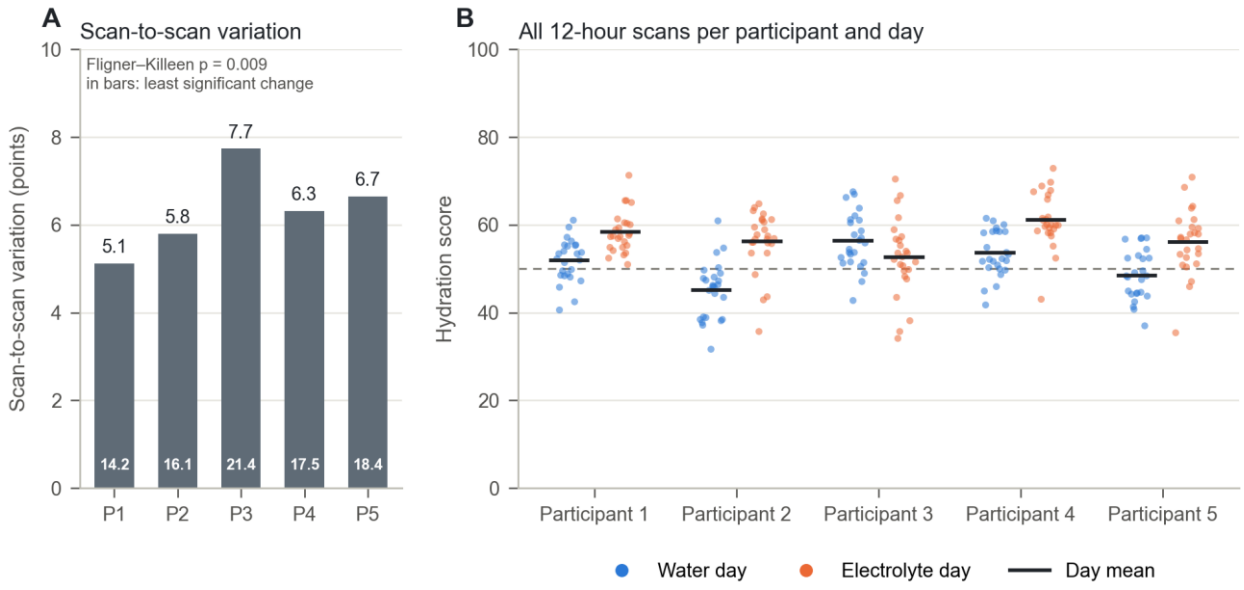



**图4**。个体间差异。(A) 根据两个12小时日内的48个连续扫描差值估算的每位参与者的扫描间变异；柱状图中的数字表示两次扫描之间相应的最小显著变化。(B) 每位参与者每天的所有12小时扫描；黑色柱表示日均值，虚线标示评分50。

**表 4**。 每位参与者每天的 12小时纵向指标。

| 参与者 | Day | Mean | SD | 范围 | 范围内时间范围 (%) | 最长运行 ≥ 50 (h) | 超出次数 < 50 | 稳定性 | 第一 scan | 第一-饮料反应 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 参与者1 | 水 | 51.9 | 4.9 | 40.7–61.2 | 60 | 1.5 | 8 | 6.7 | 53.5 | −1.9 |
| 参与者1 | 电解质 | 58.4 | 4.7 | 51.0–71.4 | 100 | 12.0 | 0 | 4.5 | 54.9 | −0.6 |
| 参与者2 | 水 | 45.1 | 6.5 | 31.7–61.0 | 16 | 0.5 | 3 | 6.7 | 31.7 | +14.1 |
| 参与者2 | 电解质 | 56.2 | 7.0 | 35.8–64.8 | 84 | 7.0 | 2 | 6.0 | 35.8 | +22.0 |
| 参与者3 | 水 | 56.3 | 6.4 | 42.8–67.6 | 88 | 7.5 | 2 | 7.3 | 42.8 | +11.4 |
| 参与者3 | 电解质 | 52.7 | 8.8 | 34.2–70.5 | 68 | 2.5 | 6 | 9.1 | 34.2 | +24.0 |
| 参与者4 | 水 | 53.6 | 5.3 | 41.7–61.6 | 80 | 5.0 | 4 | 5.9 | 46.0 | +1.8 |
| 参与者4 | 电解质 | 61.1 | 6.1 | 43.1–73.0 | 96 | 11.5 | 0 | 6.0 | 43.1 | +15.0 |
| 参与者5 | 水 | 48.5 | 5.7 | 37.1–57.1 | 36 | 1.0 | 6 | 6.0 | 37.1 | +13.5 |
| 参与者5 | 电解质 | 56.1 | 7.4 | 35.4–70.9 | 88 | 4.5 | 2 | 7.1 | 35.4 | +16.5 |

每天从首次扫描（T0）到T+12 h，每隔30分钟扫描一次，共扫描25次。范围内时间：评分为≥ 50的扫描次数占25次扫描的百分比。最长连续时段：从首次到最后一次符合条件的扫描所测得的最长连续时段，其中每次扫描的评分均为≥ 50,（最长12小时）。稳定性：相邻扫描之间平均绝对变化（分值）。首次扫描：进食或饮用任何液体前的评分（T0）。首次饮水反应：首次饮用400毫升饮品前的评分，与+30 和+60 分钟时评分的均值之差。

### 3.4 2小时校准反应

每位参与者在接受相同的标准化液体挑战后评分均有所上升，但上升的时间和幅度各不相同（图5，表5）。醒来后的基线评分范围为35.9至55.3。在20次饮水后扫描中，有19次高于参与者的基线，且五名参与者在2小时内的变化均值均为正值。参与者5在30分钟时达到峰值（+10.6分值），参与者1在60分钟时达到峰值（+18.5分值），而参与者2、3和4在90分钟时达到峰值（分别为+14.8、 +22.6和+7.2分值）。参与者1上升最早，在30分钟和60分钟时均超过个人最小显著变化。参与者3在30分钟时出现下降（−7.9分值），这是唯一一次低于基线的饮水后扫描，随后在90分钟时上升至超过最小显著变化。参与者2直到90分钟时才达到50分，并在120分钟时回落至40.1。参与者4和5的评分在30分钟时即达到50分，随后保持在该水平附近，其升幅处于个人最小显著变化范围内。

因此，峰值变化范围为+7.2至+22.6分，差异约为三倍，峰值出现在30至90分钟。所有参与者的基线变化均值在30分钟时为+6.2分，60分钟时为+10.5分，90分钟时为 +12.6分，120分钟时为+7.7分；从60分钟起，五名参与者的变化均为正值（图5，最后一个面板）。由于参与者的最小显著变化各不相同，同样的分值变化对不同个体的意义也不同：上升15分超过了参与者1的测量变异范围（最小显著变化为14.2分），但对其他四名参与者而言仍在测量变异范围内（16.1至21.4分）。在完整2小时内取均值（变化曲线下面积除以120分钟），基线变化均值范围为+5.4分（参与者4）至+12.3分（参与者1），组均值为+8.3分（95%置信区间：5.2至11.4；表5）。

在12小时研究中，与之可比的事件——电解质日的首次饮水（同样为400 mL的饮品，也是在夜间时段后饮用）——并未重现2小时挑战测试中的个体模式（表5）。两种设置之间的差异可能对此有所解释。首先，在12小时研究中，首次饮水后30分钟饮用了配茶或咖啡的早餐，而2小时挑战测试是在未进食的情况下进行的。其次，起始状态不同：参与者1在两个12小时日开始时均高于50，且首次饮水后评分没有上升；但在2小时挑战测试开始时，其评分略低于50（48.7分值），并最早上升至超过最小显著变化的幅度。起始状态并非唯一因素，因为参与者3在挑战测试开始时高于50（55.3分值），在最初下降后仍上升至超过最小显著变化的幅度。由于每人仅进行了一次挑战测试，这些观察结果仍属初步发现。

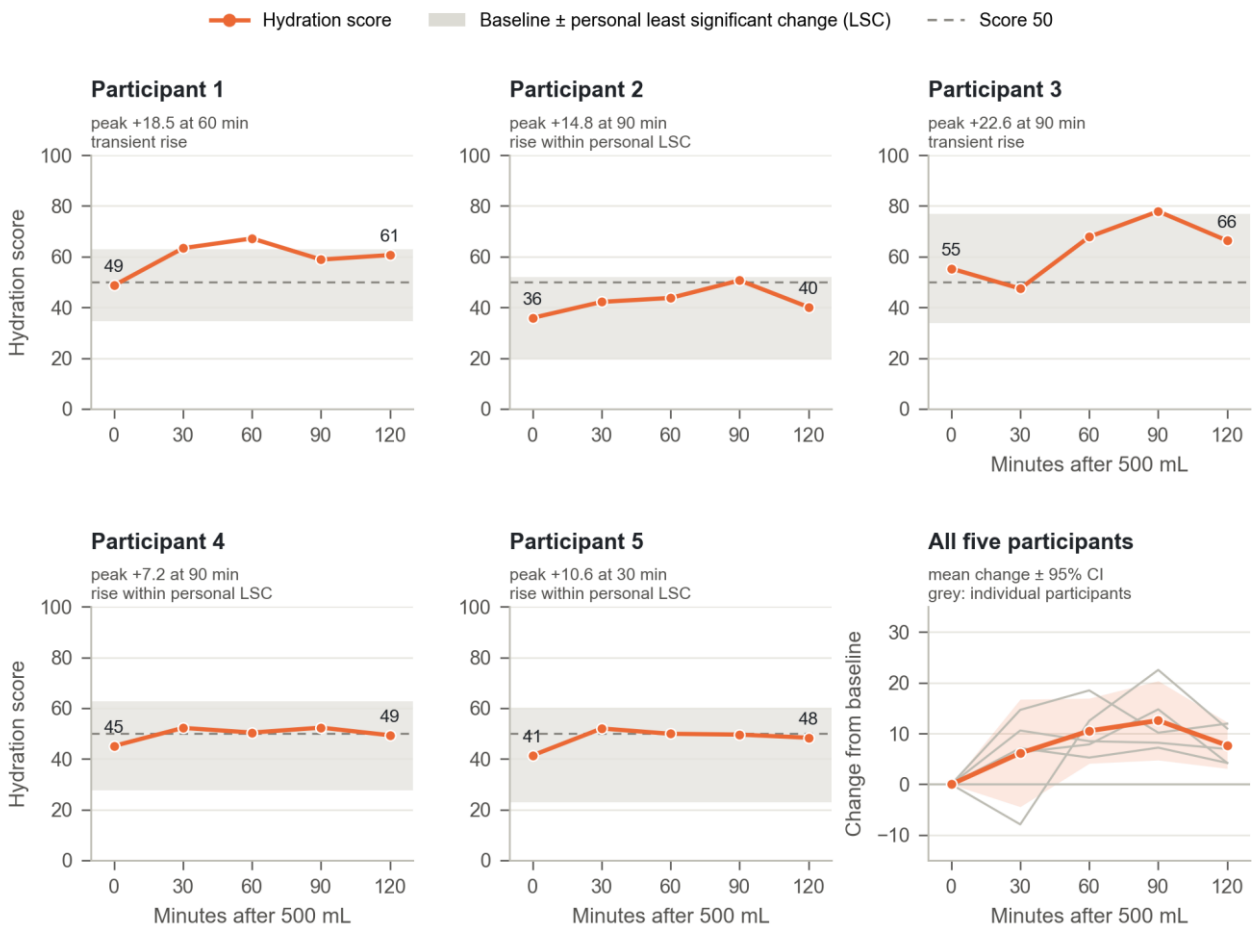



**图5**。对标准化2小时挑战测试的响应（醒来后录制基线视频，再饮用500 mL等渗电解质饮料）。灰色带：基线± 参与者根据其12小时数据得出的两次扫描之间的最小显著变化。虚线：评分50。最后一个面板：五位参与者的基线均值变化（± 95% CI）；灰线表示各参与者。

**表5**。2小时校准研究中的响应，以及12小时研究中相应事件的响应。

| 参与者 | 基线 | Δ 30 | Δ 60 | Δ 90 | Δ 120 | 均值 Δ 0–120 | 峰值Δ (分钟) | LSC | 相对于最小显著变化的分类 | 12小时首次饮用电解质日 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 参与者1 | 48.7 | +14.7 | +18.5 | +10.2 | +12.0 | +12.3 | +18.5 (60) | 14.2 | 短暂上升 | −0.6 |
| 参与者2 | 35.9 | +6.3 | +7.9 | +14.8 | +4.2 | +7.8 | +14.8 (90) | 16.1 | LSC内上升 | +22.0 |
| 参与者3 | 55.3 | −7.9 | +12.5 | +22.6 | +11.0 | +8.2 | +22.6 (90) | 21.4 | 短暂上升 | +24.0 |
| 参与者4 | 45.1 | +7.1 | +5.3 | +7.2 | +4.2 | +5.4 | +7.2 (90) | 17.5 | LSC内上升 | +15.0 |
| 参与者5 | 41.4 | +10.6 | +8.5 | +8.2 | +7.0 | +7.7 | +10.6 (30) | 18.4 | LSC内上升 | +16.5 |

Δ,各时间点（分钟）相对于基线的变化（分值）。均值 Δ 0–120，即2小时内相对于基线的平均变化（变化曲线下面积除以120分钟）。LSC：两次扫描之间的最小显著变化（$1.96 \times \sqrt{2} \times \sigma$）。LSC内上升：平均变化为正，但没有任何时间点超过LSC。最后一列：12小时研究中首次饮用400 mL电解质饮料后的反应（+30 和+60分钟时的均值减去饮用前评分）。

## 3.5 稳定性和范围内时间

相近的平均分掩盖了截然不同的变化轨迹（图 6）。饮水日的参与者1、电解质日的参与者3以及饮水日的参与者4，其平均分彼此相差不超过2分值（分别为51.9、52.7和53.6）。参与者1和参与者4的分散程度也几乎相同（标准差分别为4.9和5.3分值；范围约为20分值），但参与者1有8次低于50，并有60%的时间处于范围内，而参与者4有4次低于50

次，80% 的时间处于范围内，并连续 11 次扫描保持在 50 分或以上。参与者3当天的均值相同，分值跨度为 36 分（34.2 至 70.5），饮用饮品前曾降至 34–38 分。

这十天中，平均分的范围为45.1至61.1，范围内时间为16%至100%，稳定性为4.5至9.1分（图 7A、B；表 4），尽管每位参与者都遵循相同的2.0 L液体摄入计划。在随机时间进行的一次扫描，与当天主要状态不一致的概率为0–40%（均值为19%）；也就是说，整体而言约每五次读数中就有一次不一致，而有些日子甚至高达五次中两次。因此，单次读数或每日液体容量目标只能反映水合状态在一天中的实际变化情况的一部分。

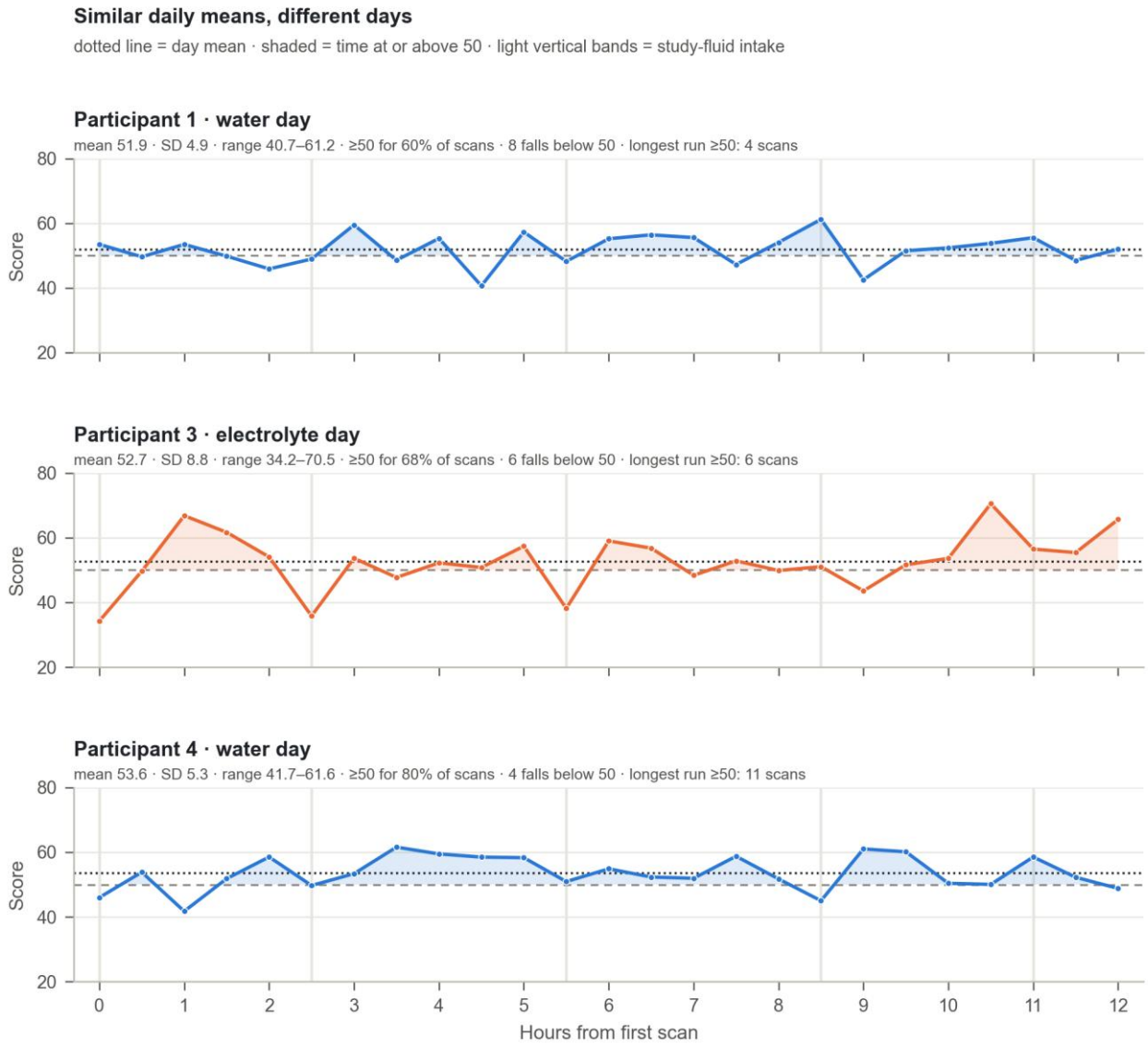



**图 6**。相似的日均值，不同的每日表现。三个日均值相差不超过 2 分的日子，但分布、低于 50 分的情况以及范围内时间各不相同。点线：日均值；阴影：评分达到或高于 50 分的时间；浅色竖带：研究用液体摄入量。

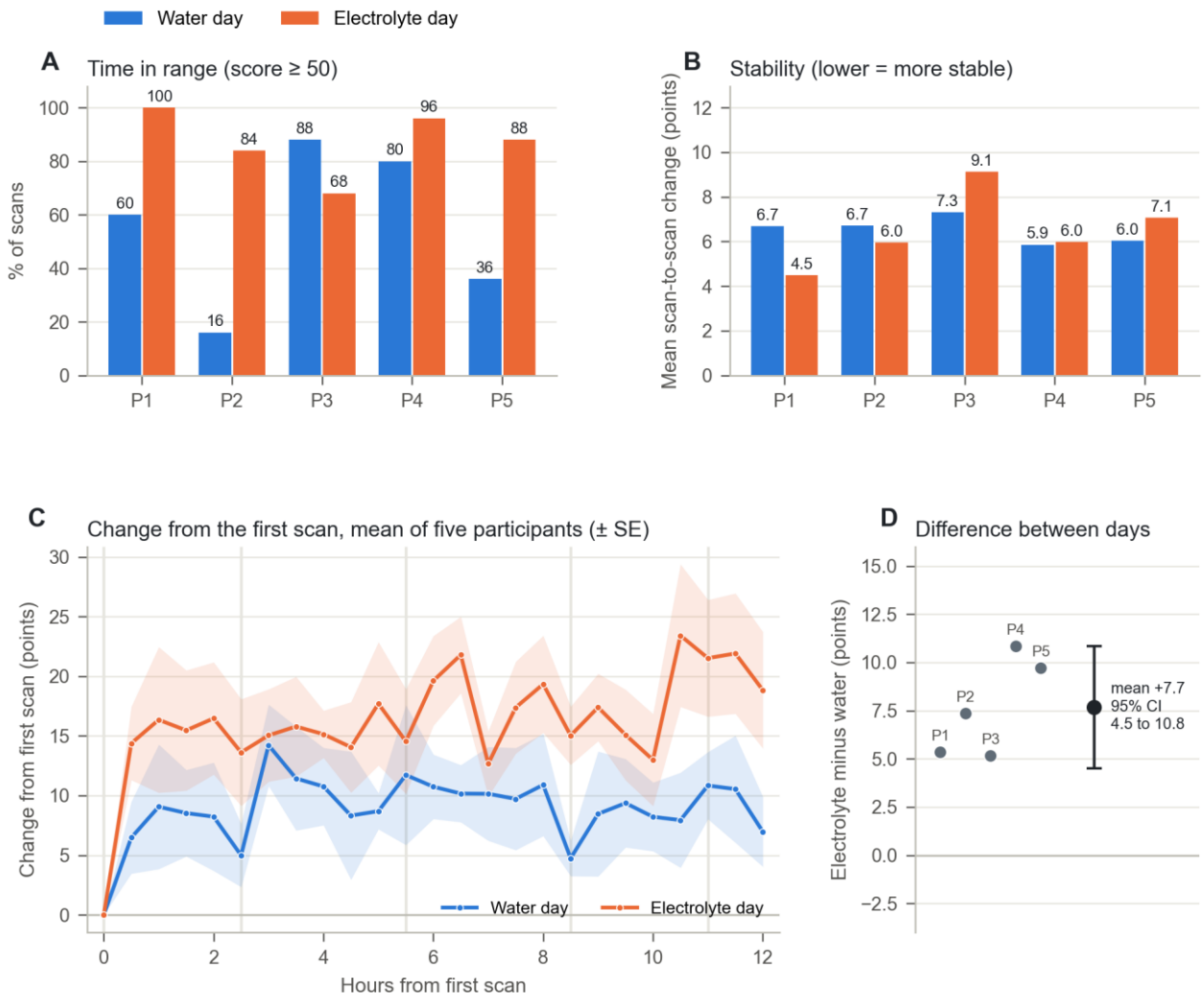



**图 7**。 在相同的 2.0 L 液体摄入计划下，各参与者每天的范围内时间（A；评分达到 50 分或以上的扫描所占百分比）和稳定性（B；连续扫描间绝对变化的均值）。（C）水日和电解质日中，相对于当天首次扫描的变化在五名参与者间的均值（阴影：± 1 标准误；垂直色带：研究用液体摄入）。（D）各参与者两天之间（电解质日减去水日）相对于首次扫描的平均变化之差，以及均值和 95% 置信区间。

## 4. 讨论

### 4.1 主要发现

面部视频水合生物标志物可用于纵向追踪，而不仅仅是检测状态在前后时点的变化。在12小时日中，评分在夜间无液体摄入期后的早晨达到低点；若当天开始时评分低于50，则首次饮水后评分会上升；饮水后的评分也高于根据其自身分布随机预测的水平。反应取决于摄入液体时的状态：评分低于50时饮水，之后评分始终会上升；而评分已经达到或高于50时饮水（包括大多数较晚摄入的250–300 mL饮品），则不会出现这种情况。这符合生理学规律。水约占成人体重的50%至60%[9],，因此，饮用250–300 mL液体使总体水量增加不到1%；当体水分已充足时，低渗液体负荷会抑制精氨酸加压素，并在数小时内大部分经尿液排出，

而在水分不足后，摄入液体会有更多被潴留[4, 11, 27]。因此，在水分不足时饮用饮品后持续上升，而在水合状态处于范围内时饮用饮品后变化不大的模式，支持了这一纵向信号具有生理学合理性（目标 1）。

两个研究日之间的差异符合既有的体液生理学认识，不过，由于研究日的顺序固定，因此解读时需谨慎。钠和钾含量较高的饮料（如口服补液盐和牛奶）比白水更易潴留，随后数小时产生的尿液也较少[11], ；在水合状态正常的成年人中，含 27 或 52 mmol/L 钠的饮品也比含 7 或 15 mmol/L 钠的饮品更易潴留[28]。在本研究数据中，电解质日优势在第一杯饮品后便显现，并在较晚饮用的饮品之间持续存在；此时正是更易观察到潴留效果的阶段。相比之下，两个研究日中较晚饮用的饮品所引起的即时反应相似。本研究所用饮品（钠含量为 12.2 mmol/L）还含有钾、钙、镁和碳水化合物，因此，任何效果的大小可能取决于饮料成分；要确认这一点，还需开展纳入不同钠含量饮品的随机顺序比较。

### 4.2 水合状态因人而异

不同个体表现出不同的基线模式，以及对相似液体摄入量的不同反应（目标2）。在相同的时间安排下，范围内时间占一天的比例从16%到100%不等；饮用同样的500 mL液体后，峰值可能出现在30、60或90分钟时，峰值大小相差约三倍；而且，不同参与者所需的变化幅度也不同，只有超过测量变异才可识别，尽管他们的平均评分相近。这些差异体现在动态变化上，而非水平本身。多种生理因素可能造成这一结果：夜间水分不足的程度、胃排空和吸收速度（不同个体之间有所差异）[10, 29], 肾脏水和钠的调节、身体成分、月经周期影响对体液调节的作用[23], 以及健康状况和药物等因素，例如参与者3的情况。测量因素也可能有所影响，包括特定面部、皮肤类型和设备被捕捉的效果。由于只有五名参与者，无法将这些因素彼此区分。无论是哪种情况，实际结果都相同：对每个人而言，同样的评分变化不能作完全相同的解释。

个体模式与参与者的特征一致，但由于参与者仅有五人，这些结果仅具有说明性。参与者1是唯一一名体质指数正常且无健康状况的参与者，也是唯一一名两次12小时日开始时评分均达到或超过50分的参与者；其扫描间变异最小，并且对标准化饮料表现出最大的早期反应（30分钟时为+14.7分，超过个人最小显著变化）。参与者2患有肥胖，其晨间评分最低，饮水日中仅有16%的时间处于范围内，这与人群中体质指数越高、水合不足越明显的关联一致 [30]。参与者3患有慢性肾病和肺病，并服用常规药物，其评分变异最大，也是唯一一名电解质日评分不高于饮水日的参与者。

### 4.3 迈向个人校准

个体反应曲线最终或可用于制定个性化补水建议（目标3）。这些数据揭示了个人校准的三个要素。第一是个人变异测量：最小显著变化的范围为14.2至21.4分值，因此，上升15分对一个人而言是明确的信号，对另一个人而言则处于测量变异范围内。第二是对标准化挑战测试的个人反应曲线；在本研究中，其变化幅度、时间和持续性各不相同。第三是摄入液体时的状态：当评分低于50时，饮用同一种饮料后评分会升高；但若评分已处于范围内，则不会升高。因此，个人方案应根据个人测得的状态安排液体摄入时间，而不能只看时钟。2小时挑战测试与12小时研究中相应的首次饮用后反应并不十分一致，这表明反应曲线需要在

标准化条件下测量，并结合起始状态进行解读。在反应曲线可用于剂量设定之前，必须通过在更大样本中重复进行挑战测试来确认其再现性（图 8）。

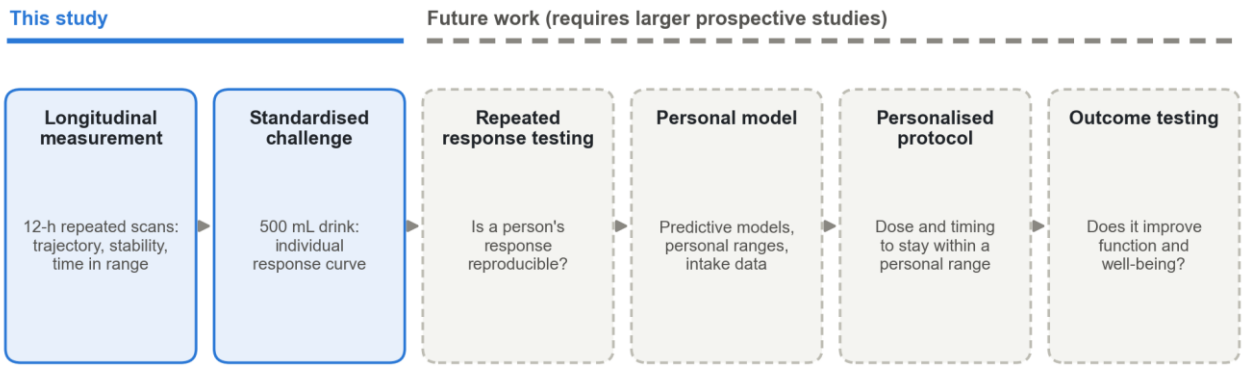



**图 8**。 从纵向测量到个性化水合方案的路径。实线框：本研究已涉及的内容。虚线框：需要更大规模前瞻性研究的未来工作。

### 4.4 变化轨迹与稳定性的重要性

研究发现，均值相近的天数，其分布范围和范围内时间可能存在显著差异。这表明，应将水合状态视为一个动态范围，而非单次测量（次要目标）。连续血糖监测提供了先例：除平均血糖外，还会报告范围内时间和血糖变异性，因为这些指标能提供均值无法呈现的信息 [24]。在本研究数据中，约每五次扫描就有一次与当天的主要状态不一致（某些天最多达到五次中的两次），而相同的每日液体摄入量对应的范围内时间从 16% 到 100% 不等。本文采用的 50 分是评分的操作性界限，并非经结局验证的目标值；适当的个人范围仍有待确定。

### 4.5 技术变异与生物变异

偶尔会出现不合乎预期的读数。在饮水日，参与者1的一次扫描（250 次中的 0.4%；4 小时 30 分时为 40.7 分）与前后两次扫描的差异均超过该参与者的最小显著变化，而前后两次扫描彼此一致；如此幅度的体水分变化并在一小时内逆转，在生理上并不合理，因此更可能是技术因素所致。分析中保留了所有扫描结果。在实际应用中，采用信号质量门控和重复扫描规则可减轻此类读数的影响。

参与者的健康状况和背景也各不相同。参与者3的慢性肾脏疾病、肺病和降压药物会改变体液与电解质调节，并可能影响皮肤灌注；参与者3也是唯一一位电解质日评分未高于饮水日的参与者。参与者5在饮水日发生了偏头痛发作，当天所有饮用前评分均低于50。这些观察结果仅为描述性结果，不能据此确定因果关系。

基于 rPPG 的测量存在已知局限性：它容易受到光照、运动、摄像头和视频压缩的影响，且准确性可能因皮肤类型而异 [8, 25]。此外，晨间测量与醒来时伴随的心血管变化同时发生，例如晨间血压升高 [26], ，这些变化可能在不受液体摄入量影响的情况下影响 rPPG 衍生信号。最后，根据单次饮用前扫描计算的饮品反应容易受到向均值回归的影响，尤其是在扫描间变异较大的参与者中；选择置换检验是因为它能考虑到这一点，出于同样的原因，按饮用前评分进行的分析将各组液体摄入量与打乱后的数据中采用相同选择的结果进行了比较。

### 4.6 局限性

- **样本量较小**。 五名参与者足以进行详细的个体描述，但不足以进行总体推断。
- **探索性设计**。 分析为描述性分析，p值未针对多重比较进行校正，且部分分析（反应对饮用前评分的依赖性，以及根据首次扫描对两个研究日进行的比较）是在查看数据后定义的；这些结果需要在前瞻性研究中进行确认。

- **异质性参与者**。 体型和健康状况差异很大，这体现了现实世界的多样性，但限制了个体之间的比较。

- **需要重复研究和更大规模的验证队列**。 每位参与者完成了一次2小时挑战，且未设置不饮水对照，因此个体反应曲线的再现性尚不明确。饮水日始终先于电解质日，参与者也知道自己饮用了哪种饮品，因此无法区分顺序、预期和饮品效应。研究未同步采集生化参照指标（例如血浆渗透压或尿液指标），每30分钟采样一次也无法解析更快的变化，健康背景则由参与者自我报告。

### 4.7 未来方向

下一步工作将直接针对这些局限性展开（图 8）：

- **更大规模的校准研究**，将标准化挑战应用于更多参与者，并按随机顺序比较不同钠含量的水和电解质饮料。
- **重复反应测试**，以确定个人的反应曲线是否可重复，包括设置不饮用饮品的对照组。

- **预测建模**，根据偶尔进行的扫描和已知的液体摄入量预测个体变化轨迹。
- **个性化范围**，根据每个人自身的基线和变化情况来确定。
- **智能水瓶集成**，以便在扫描的同时自动记录液体摄入量。
- **结局测试**，在未来开展的前瞻性研究中，确定维持个人水合范围是否能改善认知、功能及身心健康结局。

## 5. 结论

面部视频水合生物标志物可用于纵向监测水合状态。不同个体的水合轨迹各不相同，而标准化液体挑战测试则揭示了不同的个体反应模式。这些发现为个性化水合监测和未来制定个体化水合方案奠定了初步基础。

**作者信息**。 所有作者均隶属于新加坡的 Hii.Health。

**利益冲突**。 Hii.Health 开发了本研究评估的面部视频数字水合生物标志物。

## 参考文献

[1] 欧洲食品安全局膳食产品、营养与过敏科学小组（NDA）。关于水的膳食参考值的科学意见。《欧洲食品安全局期刊》。2010年；8(3):1459。[2] 美国医学研究所。《水、钾、钠、氯化物和硫酸盐的膳食参考摄入量》。华盛顿特区：美国国家科学院出版社；2005年。[3] Armstrong LE。水合状态评估：难以捉摸的金标准。《美国营养学会杂志》。2007年；26(5 Suppl):575S–584S。[4] Cheuvront SN，Kenefick RW。脱水：生理学、评估与运动表现影响。《综合生理学》。2014年；4(1):257–285。[5] Cheuvront SN，Ely BR，Kenefick RW，Sawka MN。脱水评估标志物的生物变异与诊断准确性。《美国临床营养学杂志》。2010年；92(3):565–573。

[6] Kularathne Y，Prathapa DMJ，Ahamed T，Athukorala J，Perera T。真实世界禁食模型中用于追踪水合状态转变的面部视频数字水合生物标志物评分验证。arXiv [预印本]。2026年。arXiv:2611.14993。[7] Verkruysse W，Svaasand LO，Nelson JS。利用环境光进行远程容积描记成像。Opt Express。2008年；16(26):21434–21445。[8] McDuff D。生理生命体征的摄像头测量。ACM Comput Surv。2023年；55(9):176。[9] Popkin BM，D'Anci KE，Rosenberg IH。水、水合状态与健康。Nutr Rev。2010年；68(8):439–458。[10] Leiper JB。摄入液体的去向：影响人类饮料胃排空和肠道吸收的因素。Nutr Rev。2015年；73(Suppl 2):57–72。[11] Maughan RJ，Watson P，Cordery PA，等。评估不同饮料影响水合状态潜力的随机试验：饮料水合指数的开发。《美国临床营养学杂志》。2016年；103(3):717–723。[12] Perrier E，Vergne S，Klein A，等。不同习惯性液体摄入水平的自由生活成年人中的水合生物标志物。Br J Nutr。2013年；109(9):1678–1687。[13] Baker LB。运动员的出汗率和汗液钠浓度：方法学及个体内/个体间变异综述。Sports Med。2017年；47(Suppl 1):111–128。[14] Sawka MN，Burke LM，Eichner ER，Maughan RJ，Montain SJ，Stachenfeld NS。美国运动医学会立场声明：运动与液体补充。Med Sci Sports Exerc。2007年；39(2):377–390。[15] Li H，Early KS，Zhang G，Ma P，Wang H。改善高温环境下液体平衡和间歇性运动表现的个性化水合策略。Nutrients。2024年；16(9):1341。[16] Zeevi D，Korem T，Zmora N，等。通过预测血糖反应实现个性化营养。Cell。2015年；163(5):1079–1094。[17] Schork NJ。个性化医疗：开展单人试验的时机已到。Nature。2015年；520(7549):609–611。[18] Chen W，McDuff D。DeepPhys：利用卷积注意力网络进行基于视频的生理测量。载于：欧洲计算机视觉会议（ECCV）论文集；2018年。[19] Jacobson NS，Truax P。临床意义：在心理治疗研究中界定有意义变化的统计方法。J Consult Clin Psychol。1991年；59(1):12–19。[20] Glüer CC，Blake G，Lu Y，Blunt BA，Jergas M，Genant HK。精密度误差的准确评估：如何测量骨密度测量技术的再现性。Osteoporos Int。1995年；5(4):262–270。[21] Ernst MD。置换方法：精确推断的基础。Stat Sci。2004年；19(4):676–685。[22] Fligner MA，Killeen TJ。尺度的无分布双样本检验。J Am Stat Assoc。1976年；71(353):210–213。[23] Stachenfeld NS。性激素对体液调节的影响。Exerc Sport Sci Rev。2008年；36(3):152–159。[24] Battelino T，Danne T，Bergenstal RM，等。连续血糖监测数据解读的临床目标：国际目标范围内时间共识的建议。Diabetes Care。2019年；42(8):1593–1603。[25] Nowara EM，McDuff D，Veeraraghavan A。皮肤类型和性别对非接触式光电容积描记法测量影响的荟萃分析。载于：IEEE/CVF计算机视觉与模式识别会议研讨会（CVPRW）论文集；2020年。[26] Kario K。血压晨峰与心血管风险：证据与观点。Hypertension。2010年；56(5):765–773。[27] Hobson RM，Maughan RJ。水合状态与小剂量酒精的利尿作用。Alcohol Alcohol。2010年；45(4):366– 373。[28] Maughan RJ，Watson P，Cordery PAA，等。水合充足状态下，饮料中的蔗糖和钠而非咖啡因含量会影响其在人体内的潴留。Int J Sport Nutr Exerc Metab。2019年；29(1):51–60。[29] Péronnet F，Mignault D，du Souich P，等。利用重水标记摄入水在人类体内的吸收、分布和消失进行药代动力学分析。Eur J Appl Physiol。2012年；112(6):2213–2222。[30] Chang T，Ravi N，Plegue MA，Sonneville KR，Davis MM。美国成年人水合不足、身体质量指数与肥胖：美国国家健康与营养调查 2009–2012年。Ann Fam Med。2016年；14(4):320–324。