DOI: 10.16781/j.CN31-2187/R.20240605

·综　述·

晕动症相关生理变化及评估指标研究进展

丁同慧[1]，施晓琼[1]，周　娜[2]，徐　菲[1]，高　玉[3*]
1. 海军军医大学（第二军医大学）第一附属医院耳鼻咽喉头颈外科，上海 200433
2. 海军军医大学（第二军医大学）心理系，上海 200433
3. 海军军医大学（第二军医大学）第一附属医院眼科，上海 200433

［**摘要**］ 晕动症指大脑受到异常运动刺激时触发的应激反应，主要表现为胃部不适、恶心呕吐、头晕头痛等症状。晕动症严重程度和干预效果的评估对于寻找更加合理有效的治疗方法和适应性行为训练方案至关重要。除各项生理指标的变化（包括眼球震颤、脑电数据、胃电与皮电数据、心率变异性、姿势摇摆及体内激素水平）等客观评价外，个体易感性和主观感受的评估量表在临床研究和实践中日益受到国内外学者的重视。本文对晕动症生理指标研究进展以及可用评估量表的应用情况进行综述，为晕动症的筛查、评估、预防和干预提供参考。

［**关键词**］ 晕动症；生理指标；评估量表；Graybiel 晕动症评分

［**引用本文**］ 丁同慧，施晓琼，周娜，等. 晕动症相关生理变化及评估指标研究进展[J]. 海军军医大学学报，2026，47(9)：1234-1241. DOI: 10.16781/j.CN31-2187/R.20240605.

Physiological changes and evaluation indicators in motion sickness: research progress

DING Tonghui[1], SHI Xiaoqiong[1], ZHOU Na[2], XU Fei[1], GAO Yu[3*]
1. Department of Otorhinolaryngology, Head and Neck Surgery, The First Affiliated Hospital of Naval Medical University (Second Military Medical University), Shanghai 200433, China
2. Department of Psychology, Naval Medical University (Second Military Medical University), Shanghai 200433, China
3. Department of Ophthalmology, The First Affiliated Hospital of Naval Medical University (Second Military Medical University), Shanghai 200433, China

［**Abstract**］ Motion sickness is a physiological response triggered by abnormal motion stimulation, presenting with gastric discomfort, nausea, vomiting, dizziness, and headache. Assessment of the severity of motion sickness and the efficacy of interventions is critical for developing more rational and effective therapeutic approaches and adaptive behavioral training protocols. In addition to objective evaluation of physiological indicators such as nystagmus, electroencephalogram, electrogastrogram, electrodermal activity, heart rate variability, postural sway, and hormone levels, assessment scales for susceptibility and subjective symptoms have increasingly gained attention from researchers worldwide in clinical research and practice. This review summarizes the research progress on physiological indicators of motion sickness, as well as the application of common assessment scales, providing a reference for screening, evaluation, prevention, and intervention in motion sickness.

［**Key words**］ motion sickness; physiological indicators; assessment scale; Graybiel motion sickness score

［**Citation**］ Ding T, Shi X, Zhou N, et al. Physiological changes and evaluation indicators in motion sickness: research progress[J]. Acad J Naval Med Univ, 2026, 47(9): 1234-1241. DOI: 10.16781/j.CN31-2187/R.20240605.

晕动症（motion sickness）是指大脑受到异常运动刺激时触发人体应激反应引起的一种以自主神经紊乱为主的综合征，主要表现为胃部不适、恶心呕吐、头晕头痛、冷汗、面色苍白或潮红、体温变化、困倦疲劳等症状[1]。晕动症可以发生在以下两种不同的情景：一是在物理运动期间，例如乘船或其他交通工具，运动方式由平缓切换到摇晃时能诱发晕动症，反之亦可诱发晕动症状[2-4]；二是在

［**收稿日期**］ 2024-08-29　　［**接受日期**］ 2025-02-18
［**作者简介**］ 丁同慧，硕士，主治医师. E-mail: 2279343516@qq.com
*通信作者（Corresponding author）. E-mail: gaoyu@smmu.edu.cn

没有物理运动的情况下，视觉受到运动刺激时（如观看三维电影）也可以诱发晕动症，称为视觉诱发晕动症，它会导致更多的动眼神经功能障碍、定向障碍（包括注意力不集中、眩晕、视力模糊等）和更少的恶心感（包括全身不适、流涎增加、出汗等）[5-7]。调查发现，执行出海任务时晕动症的发生率可达 60% 以上[8-9]。通过监测生理指标的变化并结合主观量表法评估晕动症的严重程度，有利于寻找更加合理有效的预防和干预方法，提升人体在相关场景下的适应能力，减轻晕动症的危害。本文就晕动症的客观生理变化及主观量表评估展开综述，旨在为预防和干预晕动症提供参考。

1　晕动症相关生理指标改变

1.1　眼球震颤　前庭眼反射（vestibulo-ocular reflex）是视觉稳定的重要基础，眼球运动由前庭刺激信息、视觉信息和本体感觉信息共同调控，大部分个体在发生晕动症时会出现眼球震颤，眼球运动一直是晕动症研究的热点。视动性眼球震颤的慢相速度和频率等指标可被用于评估晕动症的易感性和严重程度[10-12]。Lagami 等[12]在研究晕船习服训练的过程中发现，晕船易感个体的眼震最大慢相速度和震颤频率均较低，同时前庭时间常数也明显缩短，这些指标可以预测晕船的严重程度。Sugiura 等[13]研究发现，视觉诱发晕动症易感人群的眼震频率低于不易感者。Guo 等[10]研究发现，视觉诱发晕动症受试者中视动后眼震的发生率约为 70%，其易感性与视动后眼震慢相衰减时间常数及衰减速率显著相关，易感者会表现出较大的慢相衰减时间常数和较慢的衰减速率。Nachum 等[14]通过前庭自旋转试验来评估海员晕动症易感性，观察到晕船易感组与不易感组眼球运动的相位和频率差异具有统计学意义，尽管该指标尚不足以单独用于晕动症易感性评估，但可为晕动易感程度相关研究提供参考依据。Lee 等[15]将表征视觉注视与眼球运动特征的显著图纳入三维卷积网络模型，结合画面运动、立体深度信息实现立体全景视频诱发晕动症程度预测，证实眼动相关特征有助于评估视觉诱发晕动症的风险，但该研究仅基于视频图像特征建模，尚未结合人体客观生理指标进行验证。

眼球震颤作为一项客观性较强的生理指标，可较为准确地反映前庭功能紊乱状态，且具有易于观测、便于量化分析的优势，因此在晕动症相关生理指标研究中具有重要价值，既可用于评估晕动症的严重程度，又可用于预测晕动症易感性。特别是在研究视觉诱发晕动症中，眼球震颤分析得到了广泛应用。

1.2　脑电指标　发生晕动症时，机体会出现头晕头痛、困倦疲劳等症状，这一过程伴随着脑电波的改变。脑电图具有高时间分辨率和设备便携性的优势，是测量晕动症引起脑部神经活动变化的最佳方法之一。Yeo 等[7]研究发现，在虚拟现实环境中，随着晕动症症状的加重，大脑的顶叶和枕叶区域在 θ 和 α 频段的功率谱密度会有所增加，这可能与大脑中负责处理视觉和前庭信号的区域的活动增加有关，初步验证了脑电信号量化评估晕动症严重程度的可行性。赵蕾蕾等[16]研究采用虚拟现实技术模拟自动驾驶时晕动症的发生情况，发现接受自动驾驶的受试者比主动驾驶的受试者更容易产生晕动症状，并且随着晕动程度的增加，运动相关脑区（FC2、Cz）、感觉相关脑区（CP5、P3）和视觉相关脑区（PO2）的脑电信号中 θ 波功率谱重心频率有升高的趋势。脑电信号功率谱重心频率能够表征信号功率谱能量的总体分布情况，是脑电信号全频段能量信息所对应的一个特征频率，比功率谱密度能更全面地描述脑电信号的变化。徐苗[17]的研究也表明受试者在未发生和发生视觉诱发晕动症状态下的脑电信号功率谱重心频率存在显著差异。

Wei 等[18]通过对比视觉诱发晕动症易感组与不易感组之间的脑电图发现，易感组在相干旋转模式作用下（易诱发眩晕的模式）顶叶 N2 波幅（与认知控制、情绪反应等有关）显著增强；在不易感组中，眩晕发作前右颞顶叶和右中央区的脑电信号全局连通性增加，而眩晕发作后右额叶区的脑电信号全局连通性降低；同时 N2 波幅的增多和 θ 波段的相位同步受损与个体晕动症易感性显著相关。该结果表明晕动症的易感性与皮质动态协调功能损害、脑电相位不同步有关。Jang 等[19]发现晕动症易感组的脑电 β 和 γ 频段的绝对功率显著低于非易感组，与初始状态比较，眩晕时两组受试者 δ 频段功率显著增加、α 频段功率显著降低，并且主观症状与客观生理变化趋势相似，表明脑电 β 和 γ 频段的绝对功率有助于评估晕动症易感性。还有研究通过脑电独立调制分析方法分析发现，随着受试者晕动

程度的加剧，运动区、顶叶和枕叶的α和γ频段调制因子激活水平上升，提示晕动症发生时大脑需要调动神经生理资源以调节感觉系统之间的冲突[20]。

上述研究表明脑电指标在晕动症易感性和严重程度评估中具有重要作用。但受自身属性限制，脑电电场向量方向一致性欠佳，信号采集易被受检者的状态、情绪、面部肌肉活动以及环境的温度、湿度等多种因素干扰，且个体之间的脑电数据亦存在较大差异[20-21]。因此，在使用脑电指标评价晕动症易感性和严重程度时，基线状态是不可或缺的，同时需结合其他检查（如眼球震颤和量表评估）综合分析以增强可靠性。此外，开发更精准的脑电测量设备也是研究的一个重点方向。

1.3　胃电指标　机体受到各种各样的运动刺激后，副交感神经兴奋，腹腔内胃肠器官的电活动也会发生变化，其中胃电指标相对容易测量且无创（使用电极片贴在腹部来测量），尤其是在恶心和呕吐发作之前和发作期间，胃电活动会发生显著变化，因此，胃电图亦可反映晕动症引发的外周生理响应。有研究发现，晕动症发作过程中，胃电图振幅、主频率和高功率谱密度百分比增加，而功率谱密度峰值因子却下降明显[22]。航天失重环境下的观测同样证实，晕动症发作前后存在明显胃电节律紊乱，60%～80%的频谱能量分布于胃动过缓与胃动过速频段[23]。还有研究发现驾驶模拟器诱发眩晕时，基于胃电慢波提取的特征可能有助于描述异常胃电信号，用于眩晕时胃电活动分析[24]。

近年来，随着信号采集设备、信号处理技术和计算机建模方法的不断进步，高分辨率胃电体表映射技术逐步得到应用。这种非侵入性体表绘图能够高效检测和描述胃电节律紊乱，通过算法可以有效去除基线漂移和噪声，自动检测胃电慢波激活时间，快速生成包含激活时间、传导速度场、信号幅度和时间间隔信息的高分辨率地图及数据动画，为客观评估恶心程度提供了更加可靠的分析手段[25]。

值得注意的是，虽然胃电图能够可靠地评估恶心程度，但晕动症发作期间并不是所有个体都会出现恶心呕吐症状，恶心呕吐的程度也不能完全反映晕动状态，单一胃电指标不适合用于晕动症的整体性评价。此外，同一个体每次发作时恶心呕吐的程度存在较大变异，胃电指标也容易受检测环境、饮食因素及心理因素的干扰，因此，需结合其他检查指标进行联合分析，以保障评估的可靠性。

1.4　皮电指标　晕动症发生时由于自主神经紊乱，皮肤出汗量增加，皮肤的电阻会发生变化，导致可测量的皮肤电位改变，因此皮电信号也被用来预测晕动症的严重程度[26-27]。然而，Eftekharifar 等[28]研究发现皮电信号并没有随着晕动程度的增加而出现明显变化。Smyth 等[29]研究也认为，单独使用皮电或皮肤温度均无法稳定、准确地实时表征个体晕动症的严重程度。皮肤电活动个体间变异程度较高，将其单独用于晕动症实时评估缺乏充分说服力。为保障实验数据准确性，研究过程中需要消除受试者皮肤电信号基线本底差异带来的干扰，确保分析结果精准可靠。

1.5　心率变异性（heart rate variability，HRV）　心率受自主神经系统调控。晕动症发作时机体自主神经功能紊乱，不仅会影响心率水平，还能造成 HRV 发生明显改变，因此心电相关指标常被用于晕动症外周生理响应观测[30-31]。有研究同步采集脑电、胃电与心电信号，探究个体对虚拟现实旋转刺激的晕动症易感性差异。结果显示，胃电图对恶心相关症状具备更好的识别能力，虚拟现实刺激可诱发 HRV 出现明显改变，脑电信号则有助于区分受试者对不同运动刺激的易感性差异[32]。在一项航海晕动症的研究中发现，晕船高度敏感的人群在受到视觉运动刺激时，其 HRV 指标会发生显著变化，表现为低频功率增加、高频功率减少、低频/高频功率比值升高，而低敏感人群则没有这种明显反应，故研究者认为 HRV 指标可尝试用来预测晕动症的严重程度[33]。Ponsiglione 等[34]认为从应用角度看，可靠的 HRV 指标可以在真实环境中（如自动驾驶车辆）早期发现和持续监测晕动症，应推动无接触式心脏感应技术以实现无干扰监测。Park 等[35]在研究视觉诱发晕动症时亦发现，受试者的晕动程度与心率变化存在较强的联系。由于 HRV 与神经系统活动密切相关，其可能是衡量晕动症严重程度微小变化的有用指标。为保障实验结果的可靠性，研究需排除其他干扰因素的影响，尽量保证单一变量设计原则，以确保实验数据有效。即使如此，仅仅通过观察心率变化并不能准确反映晕动症严重程度，仍需结合其他生理指标乃至主观量表评估才能确保试验的准确性[32]。

1.6　姿势摇摆　姿势摇摆是指人体在保持平衡时，身体会自然地做出姿势上的调整，这种调整是由前庭系统控制的。当晕动症发作时，这种自然的姿势改变会变得更加明显，且姿势摇摆幅度随着晕动程度的加重而增加。关于姿势摇摆的分析，目前主要集中于如何通过观察人体的姿势改变来预测晕动症的发生[36]。有研究表明，那些在保持平衡时姿势摇摆幅度较大的人，在面对颠簸的环境时更容易眩晕；此外，晕动症会改变个体的身体姿势，通过对身体被动约束可以有效减少晕动症的发生[37-38]。刘明明[39]使用虚拟现实模拟驾驶来诱发晕动症，通过加速计、平衡板采集受试者的姿势摇摆数据，提取出能够区分眩晕和非眩晕状态的有效指标。Turner 等[40]研究发现刺激前后的姿势摇摆差异可用于评估晕动症的易感性。然而许多研究者认为姿势摇摆并不能说明晕动症的发生，将眩晕与平衡联系在一起存在偏倚[41-43]。不同研究中身体姿势变化的测量方法不尽相同，导致结论差异较大，因此建立统一观测标准或研发新型量化手段以表征躯体姿势摇摆特征具有重要价值，有利于提升后续同类研究的规范性、可重复性与严谨性。

1.7　体内激素等分子变化　晕动症发作时，机体处于应激状态，下丘脑－垂体－肾上腺皮质轴的活动明显加强，机体内的促肾上腺皮质激素释放激素、促肾上腺皮质激素、皮质醇及肾素水平会相应升高。Grigoriev 等[44]发现，前庭刺激诱发晕动症过程中伴随广泛的神经内分泌功能激活，促肾上腺皮质激素释放激素、皮质醇等多种激素的升高与个体晕动症易感性密切相关。王建洪等[45]对晕车病患者进行前庭刺激训练，发现血清类固醇激素变化与机体对晕车刺激的耐受程度有关。还有研究发现晕动症发病时血管加压素释放水平升高，且与恶心强度呈正相关[46]。相较于女性，男性对晕动症的耐受能力更强，这一人群差异提示内分泌系统能够影响个体晕动症易感性[4]。虽然现有研究显示晕动症发生时伴随着体内激素的变化，但激素水平具有非常大的变异性，限制了其在晕动症定量评估中的应用价值。

1.8　其他生理指标　晕动症发作时，机体常表现出呼吸节律改变、血压波动等自主神经反应，这些生理指标虽可作为辅助参考依据，但个体响应差异显著，难以实现标准化定量评估[47]。此外，晕动症发作时还伴随着体温、血氧水平等变化，由于这些指标个体之间变异性大、易受各种因素影响，参考价值相对较低[48-49]。

2　晕动症相关主观量表评价

2.1　Graybiel 量表　Graybiel 量表由美国国家航空航天局的研究者于 1968 年提出，为经典的晕动症评估量表。量表对面色改变、出汗、恶心、呕吐 4 项症状计分，单项最高分 16 分，根据总分将晕动症分为不同的等级：N（无反应，0 分）、MⅠ（轻度不适，1 分）、MⅡB（中度不适 B 级，2～3 分）、MⅡA（中度不适 A 级，4～7 分）、MⅢ（重度不适，8～15 分）、F（极重度反应，16 分及以上）[50]。在湿热环境中，机体在没有发生晕动症的情况下也会出现面色改变和出汗，因此张雷等[51]认为湿热环境下应用 Graybiel 量表评价晕动症时可以考虑剔除出汗和面色改变，以简化评价过程并减少偏倚。

2.2　晕动症易感性问卷（motion sickness susceptibility questionnaire，MSSQ）　MSSQ 由 Golding 开发，并在 1998 年进行了修订，可用于评估晕动症易感性。问卷分为 A 部分（童年期）和 B 部分（成年期），每部分都包含了一系列的问题，可用于了解个体在不同情境下经历晕动症症状的频率和严重程度。其缺点为评分项目繁多，受试者接受度和完成度可能较差，故后来将其简化为简短晕动症易感性问卷（MSSQ-short）。MSSQ-short 包含 18 个问题，相较于原版条目数量更少、评分体系更加简化，但仍保持了良好的信度和效度。它已被翻译成包括中文在内的多种语言版本，用于不同文化和语言背景下人群晕动症的评估。潘磊磊等[52]根据中国人特点对 MSSQ 进行系列改进，发现应用修订版 MSSQ 可以有效判断晕船易感性。李晓纹等[53]基于原版 MSSQ 制订了中文简化版 MSSQ 的长量表（MSSQ-L）和短量表（MSSQ-S），评价结果显示中文简化版 MSSQ-L 和 MSSQ-S 在信度和效度方面表现良好，同时 MSSQ-S 具有良好的区分度，可以作为一种简单高效的评估晕动症易感性的工具。

2.3　视觉诱发晕动症易感性量表（visually induced motion sickness susceptibility questionnaire，VIMSSQ）　VIMSSQ 是 Keshavarz 和 Golding 团队近年来新开发的问卷，专门用于评估在使用视觉设备（如虚拟现实、电影院或智能手机）时发生晕动

症的易感性。它基于个体过去使用视觉设备时的经历，通过调查恶心、头痛、头晕、身体疲劳和眼睛疲劳 5 类症状的发生频率来评估视觉诱发晕动症的易感性[54]。VIMSSQ 具有良好的信度，Cronbach's α 系数为 0.84，并且与模拟器病问卷（simulator sickness questionnaire，SSQ）具有显著相关性（相关系数为 0.58），表明其可以作为预测视觉诱发晕动症的有用工具[55]。卢佳美等[56]将其简化并汉化后在大学生群体中使用，发现其仍然有良好的信度和效度。

2.4　晕动症评估问卷（motion sickness assessment questionnaire，MSAQ）　MSAQ 是一种用于评估晕动症严重程度的问卷，特别关注个体可能经历的特定症状[57]。MSAQ 包含 16 个条目，参与者在运动刺激结束约 1 h 后作答，每个选项从“一点也不”到“非常严重”评分为 1～9 分，所有 16 个选项得分之和占满分的百分比为最终得分。MSAQ 作为有效的评估工具，将晕动症症状划分为胃肠道、中枢、外周、睡眠相关 4 个维度进行表征，并相应地形成了 MSAQ-GI、MSAQ-C、MSAQ-P、MSAQ-SR 子量表。该量表同样能够用于视觉诱发晕动症的评估[58]。

2.5 晕动症严重程度量表（motion sickness severity scale，MSSS）　MSSS 是用来快速评估晕动症严重程度的量表，旨在评估实时晕动症症状，特别是恶心和呕吐这些核心症状。MSSS 仅有 1 个条目，评分为 0～6 分，其中 0 分表示无症状，6 分表示呕吐，被评估者选择最能描述其当前状态的选项。这个量表的设计注重于简洁性和快速完成，特别是对于经历恶心或呕吐的参与者，以便于在运动刺激期间反复使用。MSSS 与总体严重程度印象量表和 MSAQ 评分高度相关，具备良好的效标效度与区分效度，适合晕动症试验过程中进行多次动态症状监测[59]。

2.6　恶心概况量表及痛苦程度量表　恶心概况量表由 Muth 等[60]创建，用于评估恶心的程度，分为胃肠道不适（如恶心反胃等）、躯体不适（如头昏出冷汗等）及情绪不适（如烦躁害怕等）3 个维度。痛苦程度量表由 Bos Jelte 等[61]创建，是一个单维度问卷，类似于视觉模拟量表评分体系，0 分表示无症状，10 分代表剧烈呕吐。这两个量表使用简便、易于理解，在研究中可与其他量表配合应用[62]。

2.7　其他量表　晕动症问卷（motion sickness questionnaire，MSQ）、SSQ、前庭症状指数量表（vestibular symptom index，VSI）、快速晕动症量表（fast motion sickness scale，FMS）、虚拟现实病问卷（virtual reality sickness questionnaire，VRSQ）等亦可以对晕动症进行预测及评估，在晕动症相关研究中应用较为广泛[62]。

3　小　结

晕动症发病时机体会出现各种各样的生理改变，部分生理指标与晕动症严重程度、易感性存在良好的正相关关系，如眼球震颤、脑电指标。通过测量这些指标可以评估疾病的严重程度及干预后的效果，其缺点在于这些指标需要专业设备采集、专业人员进行数据分析。另有一些生理指标虽然与晕动症严重程度有很强的相关性，但无法精准、全面地反映晕动症发生情况，如胃电指标、皮电指标、HRV、激素水平及姿势摇摆等。它们容易受到外界因素的干扰，如胃电数据容易受皮肤阻抗、受试者的身材、检查环境、饮食因素及心理因素的干扰，皮电数据测量受环境温度和湿度、个体生理状态及心理因素等影响。其优势在于数据相对容易采集和分析，故具有一定的参考价值。开展晕动症相关研究时，广泛采集各类生理指标并实施多指标综合分析，可有效提高研究结果的精准度。生理数据采集和分析需耗费大量人力物力，现有仪器也难以便捷、实时地监测发作时的生理改变，未来可发展集成化可穿戴设备，实时记录多项客观生理指标，借助后台大数据分析，动态评估受试者状态与晕动症严重程度，为及时干预或状态调整提供依据。

鉴于各类生理指标存在各自的优势与局限性，在评估晕动症易感性、症状严重程度时，结合主观量表 / 问卷进行综合评估具有重要价值。在资源有限的情况下，问卷 / 量表评估可显著减少工作量，并获得相对可靠的结果。需要注意的是，不同量表 / 问卷评估侧重点存在差异，在开展研究时，可根据研究目的选择合适的量表 / 问卷，并尽可能采集客观的生理指标（包括发作间歇期和发作时），规范设置研究终点，进一步提高研究结论的可信度。由于量表评估存在主观性，受试者有时难以准确回忆发作期间的各类不适，未来可推动量表标准化与数据电子化建设，如搭建移动端健康应用平台，支持

受试者即时填报量表，降低回忆偏倚，提高量表评估的准确性。

[参 考 文 献]

[1] Millet G P. Space medicine in the era of civilian spaceflight[J]. N Engl J Med, 2019, 380(25): e50. DOI: 10.1056/NEJMc1905104.

[2] de Thierry de Faletans C, Misericordia M, Vallier J M, et al. Effects of dynamic visual feedback system on seasickness[J]. Appl Ergon, 2024, 119: 104318. DOI: 10.1016/j.apergo.2024.104318.

[3] 段博，姜树军，徐洪涛. 航海运动病防治研究进展[J]. 中国研究型医院，2017，4(1)：42-46. DOI: 10.19450/j.cnki.jcrh.2017.01.010.

[4] Keshavarz B, Golding J F. Motion sickness: current concepts and management[J]. Curr Opin Neurol, 2022, 35(1): 107-112. DOI: 10.1097/wco.0000000000001018.

[5] Watanabe H, Wang T Y, Ando H, et al. Visually induced symptoms questionnaire (VISQ): a subjective evaluation method for biomedical effects induced by stereoscopic 3D video[J]. Appl Ergon, 2024, 117: 104238. DOI: 10.1016/j.apergo.2024.104238.

[6] Kaufeld M, Bourdeinik J, Prinz L M, et al. Emotions are associated with the genesis of visually induced motion sickness in virtual reality[J]. Exp Brain Res, 2022, 240(10): 2757-2771. DOI: 10.1007/s00221-022-06454-z.

[7] Yeo S S, Kwon J W, Park S Y. EEG-based analysis of various sensory stimulation effects to reduce visually induced motion sickness in virtual reality[J]. Sci Rep, 2022, 12(1): 18043. DOI: 10.1038/s41598-022-21307-z.

[8] 赵后雨，屠志浩，瞿靖芮，等. 海军舰艇部队官兵晕船与晕车情况及其相关性分析[J]. 海军医学杂志，2020，41(2)：139-142，158. DOI: 10.3969/j.issn.1009?0754.2020.02.006.

[9] 王俊骏，姜英杰，潘磊磊，等. 海军飞行员晕船现状及对飞行作业能力的影响[J]. 中华航海医学与高气压医学杂志，2022，29(5)：597-600. DOI: 10.3760/cma.j.cn311847-2021-0204-00045.

[10] Guo C C T, Chen D J Z, Wei I Y, et al. Correlations between individual susceptibility to visually induced motion sickness and decaying time constant of after-nystagmus[J]. Appl Ergon, 2017, 63: 1-8. DOI: 10.1016/j.apergo.2017.03.011.

[11] Clément G, Reschke M F. Relationship between motion sickness susceptibility and vestibulo-ocular reflex gain and phase[J]. J Vestib Res, 2018, 28(3/4): 295-304. DOI: 10.3233/VES-180632.

[12] Lagami D, Gutkovich Y E, Jamison A, et al. Seasickness susceptibility and the vestibular time constant: a prospective study[J]. Exp Brain Res, 2024, 242(1): 267-274. DOI: 10.1007/s00221-023-06745-z.

[13] Sugiura A, Ono R, Itazu Y, et al. [Analysis of characteristics of eye movement while viewing movies and its application][J]. Nihon Eiseigaku Zasshi, 2022, 77: 21004. DOI: 10.1265/jjh.21004.

[14] Nachum Z, Gordon C R, Shahal B, et al. Active high-frequency vestibulo-ocular reflex and seasickness susceptibility[J]. Laryngoscope, 2002, 112(1): 179-182. DOI: 10.1097/00005537-200201000-00031.

[15] Lee T M, Yoon J C, Lee I K. Motion sickness prediction in stereoscopic videos using 3D convolutional neural networks[J]. IEEE Trans Vis Comput Graph, 2019, 25(5): 1919-1927. DOI: 10.1109/TVCG.2019.2899186.

[16] 赵蕾蕾，李翀，季林红，等. 基于虚拟现实的自动驾驶模式中晕动受试者的脑电特征[J]. 清华大学学报(自然科学版)，2020，60(12)：993-998. DOI: 10.16511/j.cnki.qhdxxb.2020.25.001.

[17] 徐苗. 基于EEG的视觉诱导晕动症评估初步研究[D]. 重庆：重庆大学，2017.

[18] Wei Y, Okazaki Y O, So R H Y, et al. Motion sickness-susceptible participants exposed to coherent rotating dot patterns show excessive N2 amplitudes and impaired theta-band phase synchronization[J]. Neuroimage, 2019, 202: 116028. DOI: 10.1016/j.neuroimage.2019.116028.

[19] Jang K M, Kwon M, Nam S G, et al. Estimating objective (EEG) and subjective (SSQ) cybersickness in people with susceptibility to motion sickness[J]. Appl Ergon, 2022, 102: 103731. DOI: 10.1016/j.apergo.2022.103731.

[20] Chuang S W, Chuang C H, Yu Y H, et al. EEG alpha and gamma modulators mediate motion sickness-related spectral responses[J]. Int J Neural Syst, 2016, 26(2): 1650007. DOI: 10.1142/S0129065716500076.

[21] Andrievskaia P, Berti S, Spaniol J, et al. Exploring neurophysiological correlates of visually induced motion sickness using electroencephalography (EEG)[J]. Exp Brain Res, 2023, 241(10): 2463-2473. DOI: 10.1007/s00221-023-06690-x.

[22] Gruden T, Popović N B, Stojmenova K, et al. Electrogastrography in autonomous vehicles: an objective method for assessment of motion sickness in simulated driving environments[J]. Sensors (Basel), 2021, 21(2): 550. DOI: 10.3390/s21020550.

[23] Harm D L, Sandoz G R, Stern R M, et al. Changes in gastric myoelectric activity during space flight[J]. Dig Dis Sci, 2002, 47(8): 1737-1745. DOI: 10.1023/a:1016480109272.

[24] Popović N B, Miljković N, Stojmenova K, et al. Lessons learned: gastric motility assessment during driving simulation[J]. Sensors (Basel), 2019, 19(14): 3175.

DOI: 10.3390/s19143175.

[25] Carson D A, O'Grady G, Du P, Gharibans A A, et al. Body surface mapping of the stomach: new directions for clinically evaluating gastric electrical activity[J]. Neurogastroenterol Motil, 2021, 33(3): e14048. DOI: 10.1111/nmo.14048.

[26] Irmak T, Pool D M, Happee R. Objective and subjective responses to motion sickness: the group and the individual[J]. Exp Brain Res, 2021, 239(2): 515-531. DOI: 10.1007/s00221-020-05986-6.

[27] Kim H G, Lim H T, Lee S, et al. VRSA net: VR sickness assessment considering exceptional motion for 360° VR video[J]. IEEE Trans Image Process, 2019, 28(4): 1646-1660. DOI: 10.1109/TIP.2018.2880509.

[28] Eftekharifar S, Thaler A, Bebko A O, et al. The role of binocular disparity and active motion parallax in cybersickness[J]. Exp Brain Res, 2021, 239(8): 2649-2660. DOI: 10.1007/s00221-021-06124-6.

[29] Smyth J, Birrell S, Woodman R, et al. Exploring the utility of EDA and skin temperature as individual physiological correlates of motion sickness[J]. Appl Ergon, 2021, 92: 103315. DOI: 10.1016/j.apergo.2020.103315.

[30] 李聪聪，张敏，黄立桂，等. 运动病客观评价方法研究进展[J]. 中华耳科学杂志，2021，19(6)：987-991. DOI: 10.3969/j.issn.1672-2922.2021.06.021.

[31] 赵琦，宁北芳，谢渭芬. 运动病发病机制及诊治的研究进展[J]. 第二军医大学学报，2020(11)：1260-1266. DOI: 10.16781/j.0258-879x.2020.11.1260.

[32] Tian N, Boulic R. Who says you are so sick? An investigation on individual susceptibility to cybersickness triggers using EEG, EGG and ECG[J]. IEEE Trans Vis Comput Graph, 2024, 30(5): 2379-2389. DOI: 10.1109/TVCG.2024.3372066.

[33] Wang J Q, Qi R R, Pan L L, et al. Motion sickness and resting energy expenditure in Chinese male adults[J]. Aerosp Med Hum Perform, 2016, 87(4): 360-366. DOI: 10.3357/AMHP.4438.2016.

[34] Ponsiglione A M, Guerrini L, Pierucci S, et al. Investigation of heart rate variability indices in motion sickness[J]. Sensors, 2026, 26(7): 2114. DOI: 10.3390/s26072114.

[35] Park S, Ha J, Kim L. Effect of visually induced motion sickness from head-mounted display on cardiac activity[J]. Sensors (Basel), 2022, 22(16): 6213. DOI: 10.3390/s22166213.

[36] 沈振乾，孙斐，王瑶，等. 虚拟现实下视觉诱发晕动病生理评估及治疗方式研究进展[J]. 中国医学科学院学报，2023，45(6)：980-986. DOI: 10.3881/j.issn.1000-503X.15443.

[37] Li R, Walter H, Curry C, et al. Postural time-to-contact as a precursor of visually induced motion sickness[J]. Exp Brain Res, 2018, 236(6): 1631-1641. DOI: 10.1007/s00221-018-5246-y.

[38] Walter H J, Li R, Munafo J, et al. Unstable coupling of body sway with imposed motion precedes visually induced motion sickness[J]. Hum Mov Sci, 2019, 64: 389-397. DOI: 10.1016/j.humov.2019.03.006.

[39] 刘明明. 裸眼 3D 及视觉诱导晕动症评估研究[D]. 重庆：重庆大学，2018.

[40] Turner A, Markey M, Le P, et al. Disorientation effects, circulating small ribonucleic acid, and genetic susceptibility on static postural stability[J]. Heliyon, 2023, 9(3): e14413. DOI: 10.1016/j.heliyon.2023.e14413.

[41] Dennison M, D'Zmura M. Effects of unexpected visual motion on postural sway and motion sickness[J]. Appl Ergon, 2018, 71: 9-16. DOI: 10.1016/j.apergo.2018.03.015.

[42] Hald M, Devantier L, Ovesen T. Motion sickness and postural control among Danish adolescents[J]. Int J Pediatr Otorhinolaryngol, 2022, 158: 111139. DOI: 10.1016/j.ijporl.2022.111139.

[43] Horiuchi K, Imanaka K, Ishihara M. Postural sway in the moving room scenario: new evidence for functional dissociation between self-motion perception and postural control[J]. PLoS One, 2021, 16(9): e0257212. DOI: 10.1371/journal.pone.0257212.

[44] Grigoriev A I, Nichiporuk I A, Yasnetsov V V, et al. Hormonal status and fluid electrolyte metabolism in motion sickness[J]. Aviat Space Environ Med, 1988, 59(4): 301-305.

[45] 王建洪，胡珍，龙盈，等. 前庭功能训练治疗晕车病的临床疗效及对血清类固醇激素水平影响的分析[J]. 中华耳科学杂志，2020，18(2)：333-338. DOI: 10.3969/j.issn.1672-2922.2020.02.022.

[46] Russomano T, da Rosa M, dos Santos M A. Space motion sickness: a common neurovestibular dysfunction in microgravity[J]. Neurol India, 2019, 67(Suppl): S214-S218. DOI: 10.4103/0028-3886.259127.

[47] Strupp M, Dieterich M, Zwergal A, et al. [Diagnosis and treatment options in vertigo syndromes][J]. Nervenarzt, 2015, 86(10): 1277-1290. DOI: 10.1007/s00115-015-4389-3.

[48] Peck K, Russo F, Campos J L, et al. Examining potential effects of arousal, valence, and likability of music on visually induced motion sickness[J]. Exp Brain Res, 2020, 238(10): 2347-2358. DOI: 10.1007/s00221-020-05871-2.

[49] 沈振乾，任甜甜，王瑶，等. 晕动病生理指标评估与治疗方法研究进展[J]. 中华耳科学杂志，2022，20(4)：640-644. DOI: 10.3969/j.issn.1672-2922.2022.04.019.

[50] Maffert A, Beust L. Preliminary study after two years of use of Nausicaa system for seasickness management[J]. Int Marit Health, 2022, 73(4): 172-177. DOI: 10.5603/IMH.2022.0030.

[51] 张雷，茆俊峰，吴晓农，等. 湿热环境下晕动病评分Graybiel法的改良[J]. 第二军医大学学报，2014，35（6）：684-688.

[52] 潘磊磊，王俊骎，祁瑞瑞，等. 修改版晕动症易感性问卷用于晕船易感性判断[J]. 第二军医大学学报，2016，37（2）：220-224. DOI: 10.16781/j.0258-879x.2016.02.0220.

[53] 李晓纹，潘帅，王帆，等. 中文简化版运动病易感性量表的制订与评价[J]. 中华医学杂志，2024，104（22）：2041-2050. DOI: 10.3760/cma.j.cn112137-20240127-00210.

[54] Keshavarz B, Murovec B, Mohanathas N, et al. The visually induced motion sickness susceptibility questionnaire (VIMSSQ): estimating individual susceptibility to motion sickness-like symptoms when using visual devices[J]. Hum Factors, 2023, 65(1): 107-124. DOI: 10.1177/00187208211008687.

[55] Golding J F, Rafiq A, Keshavarz B. Predicting individual susceptibility to visually induced motion sickness by questionnaire[J]. Front Virtual Real, 2021, 2: 576871. DOI: 10.3389/frvir.2021.576871.

[56] 卢佳美，石林谣，邱传经，等. 视觉诱发运动病易感性量表的汉化及信效度检验[J]. 听力学及言语疾病杂志，2024，32（3）：193-199. DOI: 10.3969/j.issn.1006-7299.2024.03.001.

[57] Talsma T M W, Hassanain O, Happee R, et al. Validation of a moving base driving simulator for motion sickness research[J]. Appl Ergon, 2023, 106: 103897. DOI: 10.1016/j.apergo.2022.103897.

[58] Molefi E, McLoughlin I, Palaniappan R. Transcutaneous auricular vagus nerve stimulation towards visually induced motion sickness reduction: a pilot study[J]. Annu Int Conf IEEE Eng Med Biol Soc, 2023, 2023: 1-4. DOI: 10.1109/EMBC40787.2023.10340374.

[59] Czeisler M É, Pruski J M, Wang P, et al. Validation of the motion sickness severity scale: secondary analysis of a randomized, double-blind, placebo-controlled study of a treatment for motion sickness[J]. PLoS One, 2023, 18(1): e0280058. DOI: 10.1371/journal.pone.0280058.

[60] Muth E R, Stern R M, Thayer J F, et al. Assessment of the multiple dimensions of nausea: the Nausea Profile (NP)[J]. J Psychosom Res, 1996, 40(5): 511-520. DOI: 10.1016/0022-3999(95)00638-9.

[61] Bos Jelte E, MacKinnon Scott N, Anthony P. Motion sickness symptoms in a ship motion simulator: effects of inside, outside, and no view[J]. Aviat Space Environ Med, 2005, 76(12): 1111-1118.

[62] 卢佳美，李晓纹，王帆，等. 视觉诱发运动病的研究进展[J]. 空军航空医学，2024（1）：66-70. DOI: 10.3969/j.issn.2097-1753.2024.01.015.

［本文编辑］　孙　岩