

DOI:10.16289/j.cnki.1002-0837.2021.04.007

不同环境中空间定向能力的研究与应用

宋晓蕾^{1,2},葛贤亮³,张凯歌^{1,2},王 丹^{1,2},葛列众^{3*}

(1. 陕西师范大学心理学院, 陕西西安 710062; 2. 陕西省行为与认知神经科学重点实验室, 陕西西安 710062; 3. 浙江大学心理科学研究中心, 浙江杭州 310027)

摘要:为系统分析和探讨不同环境下空间定向能力的深层机制及应用进展,从空间维度的视角出发,系统介绍了目前在地面环境中对物理层面的二维和三维空间定向的测量研究和应用,以及在特因环境中对心理层面空间定向的研究范式以及空间定向障碍与训练的研究;在此基础上提出解释空间定向能力的参照原则假说、空间表征策略理论和空间相容性理论以及特因环境的感觉冲突理论,并尝试从工效学角度为空间定向能力的训练与提高从影响因素、任务范式及研究手段3方面提出展望。

关键词:空间定向;记忆;空间学习;视觉线索;空间定向训练

中图分类号:R853 **文献标识码:**A **文章编号:**1002-0837(2021)04-0328-011

Research and Application Advances of Spatial Orientation Ability under Different Circumstances.

Song Xiaolei, Ge Xianliang, Zhang Kaige, Wang Dan, Ge Liezhong. Space Medicine & Medical Engineering, 2021, 34(4): 328-338

Abstract: To systematically analyze the underlying mechanism of spatial orientation ability under different environments and review the application advances, the measurement study and application of two-dimensional and three-dimensional spatial orientation ability in normal environment, as well as the spatial disorientation and training in special environment from the perspective of spatial dimension were introduced. Then the reference principle hypothesis, the spatial representation strategy theory, the spatial compatibility theory and sensory conflict theory under different conditions were sorted out. Finally, from the aspects of influencing factors, task paradigms and research methods, some ideas and enlightenment for the training and improvement of space orientation ability were put forward.

Key words: spatial orientation; memory; spatial learning; visual cues; spatial orientation training

Address correspondence and reprint requests to: Ge Liezhong, Center for Psychological Science, Zhejiang University, Hangzhou Zhejiang 310027, China

空间定向(spatial orientation)是有机体在所处境中根据参照点或者绝对坐标系统定位正确辨别方向的知觉反应^[1],要求主体编码并记住环境中不同地点的相对位置,然后利用自身的认知结构和空间表征对自己所在的空间的感知觉线索进行迅速而准确的分析和加工,从而对自己姿态、位置和运动做出判断。空间定向的能力是个体空间智能的重要组成部分,也是衡量个体空间智能大小的重要指标。

目前对空间定向的研究主要涉及二维和三维空间认知能力两方面。具体情境包括正常的地面环境,或者是飞行中的特因环境。早期研究中由

于条件所限,多数空间定向研究都通过二维平面向定向任务进行的。近年来,虚拟现实等技术和手段极大地推动了三维空间定向能力的研究。此外,大量空间定向的研究也主要是在地面环境进行的,如空间定向的影响因素、性别差异等问题,而特因环境的研究主要涉及飞行员的空间定向障碍、空间定向能力训练等问题。二者并非割裂的,针对特因环境的研究也会使用地面环境研究的常见范式,地面环境的空间定向能力影响因素在特因环境也会存在。

以往研究多采用不同的任务范式探讨了不同环境下空间定向的规律,任务范式的纷繁复杂及

收稿日期:2020-10-20 修回日期:2021-04-12

基金项目:国家自然科学基金面上项目(32071065);载人航天工程航天医学实验领域项目(HYZHXM03001);中央高校基本科研业务费重点项目(GK202002010)

第一作者:宋晓蕾,女,博士,教授,研究方向为空间认知、人机交互、神经人因学等。E-mail:songxiaolei@snnu.edu.cn

* 通讯作者:葛列众,男,博士,教授,研究方向为人机交互、用户体验和产品可用性、面部认知等。E-mail:0816211@zju.edu.cn

任务情境的差异使其在结果和解释上存在一定分歧。基于此,本文从空间定向的研究内容和范式,影响因素及加工机制的理论解释等方面,系统梳理和介绍空间定向的研究现状。

1 地面环境下空间定向能力测量的研究

根据研究所采用的任务类型,地面环境开展的空间定向测量研究可分为二维空间定向与三维空间定向两种,主要测量物理层面的大尺度空间定向和导航能力。

1.1 二维空间定向能力测量的研究

早期研究中,多数空间定向任务都是通过二维平面任务进行的。典型的二维任务有光点呈现任务和地图阅读任务两种,主要测量个体空间定向能力大小以及其加工机制。

1.1.1 光点呈现任务

光点呈现任务包括相继与同时任务两种:相继任务是先给被试呈现一个目标端点,让其用鼠标指出目标端点的位置,再呈现另一个目标端点,被试再指出它的位置;同时任务是呈现一对目标端点,被试操纵鼠标点击目标端点的位置。其分析指标为位置判断的误差。Zapata 等^[2]采用该任务研究不同倾斜度平面上空间定向的加工机制,发现定向可能是由两个互相配合的机制共同进行的,一个处理位于正面的视觉输入,一个将倾斜面上的视觉输入表征在正面(图1)。

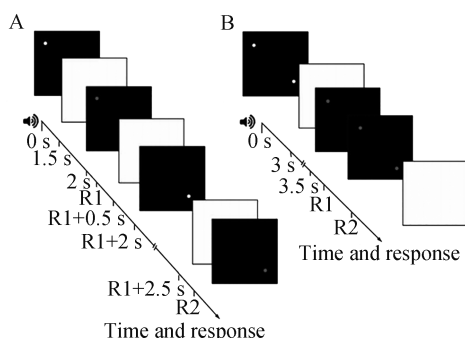


图1 光点呈现任务^[2]
Fig.1 Light spot rendering task^[2]

1.1.2 地图阅读测试任务

给被试观察一幅包括箭头的地图,告知其要在下一页的地图上按指示完成路线。在经过每个拐角时,要求被试告知如何转向。主试负责记录

其正确次数及测试时间。此范式下较经典的工具有马尼版方向感标准测试(the Money Standardize Test of Direction Sense)。该测验主要给被试呈现一张蜿蜒曲折路线的俯瞰图(图2),图中32个转弯中左右转次数相同^[3]。后续研究者在此范式基础上,将呈现图换为电子地图,地图呈现形式也变为3D^[4]。此范式能帮助揭示用户在不同类型地图上的任务绩效,与眼动仪结合还可深度探讨用户视觉表现,如对地标线索与地图呈现方式的偏好,为高效的地图设计提供思路,因此具有较强实际意义。

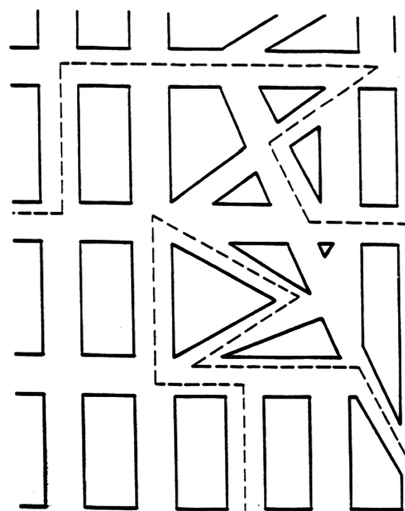


图2 马尼版方向感标准测试^[3]
Fig.2 The Money Standardize Test of Direction Sense^[3]

1.2 三维空间定向能力测量的研究

近20年空间定向能力的研究逐渐开始在三维环境条件下进行,三维环境又可为虚拟现实场景和真实场景。真实场景常使用寻路任务,虚拟现实场景和技术在寻路任务与竞技场任务中均有使用。

1.2.1 寻路任务

一般来说,寻路任务指的是完成一定路线的动态的过程。依照其完成任务的环境,可分外真实场景与虚拟场景。真实场景寻路任务包括室内外环境与水迷宫,虚拟场景寻路任务有城市街景地图^[4-5]、虚拟迷宫^[6-7]、虚拟室内外环境^[8-9]。寻路任务一般分为学习阶段和导航阶段。

虚拟水迷宫测验(virtual water maze)是较典型的一项寻路任务。由 Schoenfeld 等^[10]在动物水迷宫实验基础上开发,旨在反映被试在获得一

系列突出地标后,通过自然环境导航的能力。被试需要在一个虚拟岛屿中找到隐藏的宝箱。该地方的学习任务相当于标准水迷宫问题的隐藏平台范例。被试将在岛上移动,必须找到并记住隐藏盒子的位置。因此,直到参与者的位置直接与其位置相关时才可见。该岛的海岸位于远端空间,由两个固定的(灯塔和风车)和 2 个可移动的(帆船游艇和俘虏气球)地标标记。4 个远端地标分别位于北、东、南和西的位置(图 3)。

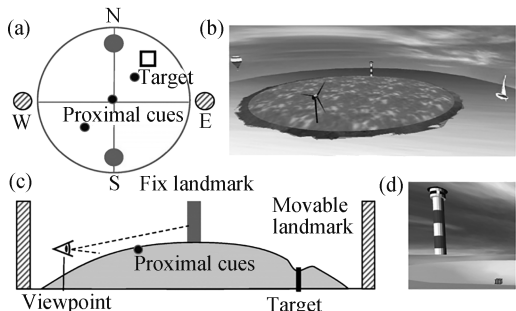


图 3 虚拟水迷宫测验^[10]
Fig. 3 Virtual water maze^[10]

虚拟罗盘定位任务(virtual compass pointing task, VCP)由 Schoenfeld 等^[10]在 2010 年提出,研究者曾采用上述两测验探讨虚拟空间定向任务中的个体差异表现,发现年轻人以及男性在空间学习和空间定位上的优势效应。

采用寻路任务的研究,大多着重探讨空间定向的个体差异及环境对个体空间定向能力的影响。个体差异包括性别、年龄、认知风格等。Coluccia 等^[11]曾提到定向能力的性别差异与任务难度有关。不同性别被试所采取的策略也存在差异,女性更偏好路标信息,而男性更偏好路线或整体信息。但 Liao 等^[4]发现,在三维地图寻路任务中,男性会转而偏好使用路标信息。Murias 等^[9]结合寻路任务与 fMRI(functional magnetic resonance imaging)技术对各年龄段被试空间定向能力开展的研究表明,成人右侧海马、海马旁区到与自我中心导航策略和注意力控制相关脑区的功能连接在任务中显著增加。至于认知风格,一般认为场独立型被试空间能力较强,但在一些研究中,认知方式对空间定向能力并无显著影响^[6]。环境影响主要涉及各种环境线索或内外环境的影响,如部分研究关注增加环境线索是否有利于空间定向,另一些研究关注被试如何利用与加工这

些线索。如作为空间失定向的表现之一,导航困难就发生在航天员在舱段间寻路的过程中,因此也有空间定向障碍训练以寻路任务形式进行。

1.2.2 竞技场任务

该任务始于 Cheng^[12]的竞技场范式,多用于研究再定向过程中个体对环境线索的利用。Buckley 等^[13]对其改良后,利用 MazeSuite 软件,开发出风筝竞技场任务,将整体线索与局部线索对被试的影响分离开来。任务在交互式虚拟现实环境中进行。根据任务阶段,被试分别在竞技场内部(有路标线索)与外部(无路标线索)完成任务(图 4)。Buckley 等通过这项任务探讨了空间定向过程中环境中心表征的加工机制,以及路标线索与几何线索对空间定向的影响。此外,此类任务中所用的 MazeSuite 是一组包括编程与数据分析在内的独立软件,具有简单快速易学的优点,不少研究都曾使用其构建各种虚拟场景。

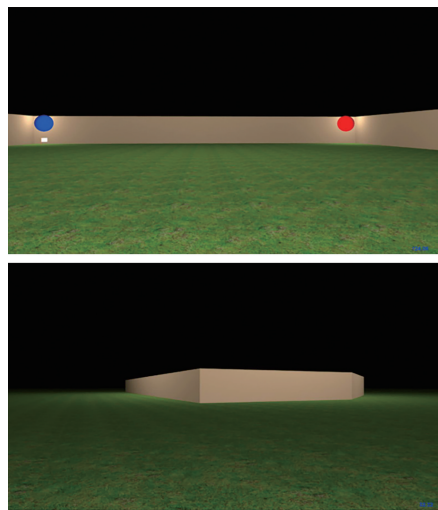


图 4 风筝型竞技场^[13]
Fig. 4 Kite-shape arena^[13]

上述 4 类空间定向任务多用于测量地面环境的空间定向能力或导航能力,也即地理意义上大尺度空间的空间定向或导航能力测量,当然也可用于飞行员空间定向能力的选拔和训练等环节。

2 特因环境空间定向能力的研究与空间定向障碍

在航空航天飞行中,飞行空间定向是飞行员、航天员对地空目标、飞行状态、位置以及自身与飞行环境之间空间关系识别和判断的一种认知过

程^[14]。从飞行训练的角度讲,飞行定向不仅表现在对方向的识别和判断上,而且还包括对飞行的速度和高度以及飞机姿态的判断和控制。因此,它也被认为是飞行能力结构中最核心的要素。如有研究发现,空间定向与飞行绩效存在密切关系^[15];空间定向可通过飞行员的决策判断,间接影响飞行员的飞行安全技术^[16]。鉴于此,不少研究者建议将空间定向能力作为选拔飞行机组人员的重要依据。因此,目前航空飞行中空间定向能力的研究也基本围绕空间定向障碍以及空间定向能力的训练等问题展开。

2.1 空间定向障碍

空间定向障碍(spatial disorientation)是指飞行员在三维空间飞行中对飞行姿态、位置和运动状况发生的错误判断^[17]。在载人航天中,微重力等特因环境对航天员认知能力的改变是巨大的^[17-19]。因为人的空间认知是建立在重力和线性加速度的信息、半规管提供的角加速度信息、视觉信息和本体感受器的压力信息等4种感觉输入的基础上,这4种感觉输入相互协调作用,共同维持在重力条件下正常的空间认知。在地面上,重力是个人姿态定向的最好参照。而在微重力条件下,当自我方位有所变化时,虽然重力这一参照不存在,没有来自重力-惯性方面的信息,但是神经系统内(主要是视觉系统)仍存在对个体姿态的判断,它会提供方位变化的信息。而此时,前庭系统则由于失重导致无法觉察到自我姿态的变化,这样就产生了感觉冲突^[18]。这种对自我姿态变化的冲突信息会导致空间认知障碍,如对身体位置和运动的错觉,进而影响人在航天活动中的工作绩效,如有研究发现航天员在失重状态下,凭借视觉指导,可以保持正常的空间定向能力,但会增加他们的反应时间^[19]。

由空间定向障碍引发的飞行事故亦有很多。根据 Zhbanko 等^[20]的研究表明,在2009年至2013年间,空间定向障碍引发飞行事故总事故的比重由22%增加到60%。在空间站等具有复杂三维结构的大型航天器中,空间定向障碍严重影响航天员的工作进程,部分航天员甚至在在轨30天后仍然存在空间定向障碍。如果航天员能够进行相关的飞行前体验和适应性训练,将减少空间定向障碍的发生。因此开展对空间定向障碍的机

理研究以及对抗训练非常必要。

2.2 空间定向能力训练

为保证飞行安全,减少空间定向障碍可能带来的事故,必须通过训练改善相关人员的空间定向能力。微重力环境下的感觉冲突主要由前庭系统造成,因此可借助蹦床、旋梯、离心机或电动转椅等设备实现前庭系统对加速度的脱敏;也可采用头低位卧床法帮助受训者适应失重环境。训练效果因具体方法不同而异^[21]。

虚拟现实也是一种很好的训练途径,受训者在其中获得的环境体验与要完成的任务与现实类似。刘相等^[22]从两类导航策略出发,提出局部正向训练法与整体正向训练法。实验发现,接受整体正向训练法的被试指向精确度高于接受局部正向训练法的被试,且前者对实验环境的掌握较好。而后者虽对实验环境中的地标与路线掌握较好,但其完成任务的时间显著受任务类型影响,较为不稳定。

姜国华等^[23]基于虚拟现实设计了一套飞行前空间定向训练系统。系统由力反馈设备、高性能头盔显示设备与各项软件组成,以实现良好的沉浸体验。此系统模拟微重力下航天员在航天器内的各种情境,指标多样,可广泛应用于各类训练与实际任务。其后还通过实例计算得出,层次分析思想和粗糙集理论综合用于训练评价中,所得评价结果更为科学。

综上,以往关于空间定向能力测量的研究主要围绕操作者的行为绩效展开,从早期的二维空间定向能力测试向现在的三维空间定向能力测试转变,测试方式有地图、模拟环境与真实环境等3种;同时基于不同任务情境下空间定向能力对任务绩效的重要性影响,除了关注地面环境外,也关注特因环境下空间定向能力的测试研究,并尝试开发一些空间定向能力训练系统从行为训练的角度以提高操作者的空间定向能力,如目前已经开发出一些基于现实与虚拟的空间定向训练系统,运用到航天员训练中。然而如何利用已有设备及技术使得航天员更加科学高效地熟悉工作环境、获取空间知识和掌握任务技能,还是尚待解决的问题之一。如何在众多的空间定向任务中筛选出无论在正常还是特因环境中均适合的空间定向能力的有效研究范式,也是目前尚未解决的问题。

之一。

3 空间定向能力的研究范式

本文根据刺激类型、反应方式及分析指标等,总结出以下 5 类空间定向的研究范式。

3.1 主观视觉垂直/水平范式

主观视觉垂直范式是一种心理物理学实验。它要求被试在没有方向线索的情况下,判断所呈现的线条与主观感受到的重力线是否垂直,根据被试每次作答的结果,拟合出其主观视觉垂直线,再将这条主观垂直线与实际的重力线做对比,分析两者间的误差。主观视觉水平任务与其原理、流程类似,但实验材料中所用的重力线改为水平线。任务常见于医学或神经生理学领域,通常用于研究不同身体姿势下,眼睛、身体、头部等各通道信息对方向感知的影响。虽然任务在正常地面环境中进行,由于其结果涉及空间定向的加工机制,因此也可帮助理解特因环境下的空间定向^[24-26]。Kheradmand 等^[26]借助此任务将感觉误差量化,并通过贝叶斯模型建立人体在部分身体保持倾斜状态下的空间定向框架。在该框架中,信号的可靠性(感觉相似性)和大脑遇到该信号的机会(先验概率)共同决定了在此框架进行空间定向时对信号的神经估计。

3.2 观点采择范式

向被试呈现一个包含不同物品图片和一个带有问题的关于物品方向关系的“箭头圈”。同时,页面上会呈现一个问题,要求被试想象站在物品图片中的某个物品(圆圈的中心)上面面向另一个物品(在圆圈顶部),从中心画一个箭头,来表示从圆圈中心物品到第三个物品的方向^[27]。所画箭头角度与真实角度的差值即为分析指标。此范式的典型测量工具较多,从刺激呈现方式考虑,可将这些工具分为二维与三维测量工具。目标倾角测试与地图倾角测试为典型二维任务(图 5)。VPT 测试(visual perspective-taking viricle)则为典型的三维任务。将此范式应用于大尺度空间,将目标物体改为真实、常见的地标后,此范式还可运用测量个体空间定向能力中的方向感,或用于阿兹海默症的临床诊断。

3.3 路线描述范式

路线描述任务(route description test)是被

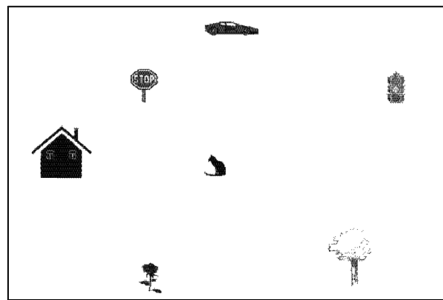


图 5 观点采择范式示意图^[27]
Fig. 5 Perspective taking test^[27]

试听取路线描述,路线描述的初始方向和主要方向一致或不一致,之后被试完成指示任务或地图绘制任务,范式所用路线见图 6。常用该范式研究路线描述的初始方向和主要方向对被试方位判断的影响。Meneghetti 等^[28]研究发现从空间描述中得出的心理表征是特定的,其方向受到主要前行方向和初始方向的影响。但因该范式需要被试听取空间描述,并不适合在有一定噪声的空间站环境中使用。其在研究中所使用的虚拟迷宫任务也是此范式下较经典的任务之一。

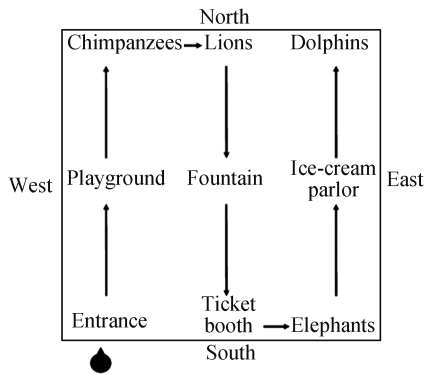
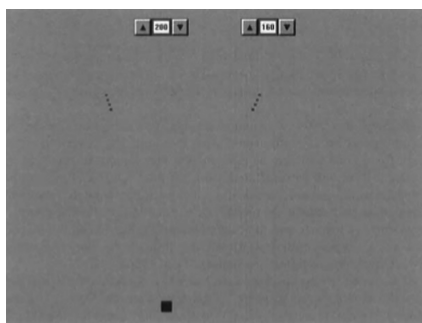


图 6 路线描述范式示意图^[28]
Fig. 6 Route description test^[28]

3.4 空间定向动态测试范式

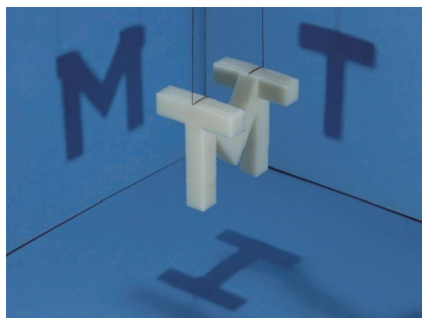
在计算机屏幕上出现红色和蓝色两个圆点,要求被试尽快将这两个圆点移向某个目标位置^[29](图 7)。该任务以两个圆点的平均角度偏移量(圆点初始位置和目标位置连成的线段与最终圆点移到的位置和目标位置连成的线段之间的角度)作为准确度指标,平均角度偏移量越高,操作越不准确。此范式多用来考察飞行员的空间定向能力,还可揭示个体认知风格于空间定向能力的影响。

图7 空间定向动态测试范式^[29]Fig. 7 The spatial orientation dynamic task-revised^[29]

3.5 空间想象范式

刘儒德等^[30]曾提出,被试根据地图进行空间定向过程由目标搜索和空间想象组成。在利用前文吉尔福特-齐默尔曼空间定向测试进行的研究中,发现个体进行空间定向时常采用空间想象或重定位两种策略。因此,空间定向与空间想象存在诸多关联,也有一些空间定向研究利用空间想象范式进行。空间想象范式的任务通常是判断不同视角下的物体形态,如图8所示。此空间定向任务采用投影范式让被试空间想象不同视角下是什么字母,反应指标为反应时与正确率。成对MRT(mental rotation test)测验与张琪^[31]借助MIT模型编制的任务,都是此范式下的经典任务。曾有学者借助头低位卧床法,并采用类似任务探讨模拟失重状态下心理旋转脑机制的变化,发现此状态并未改变心理旋转的脑加工机制。与空间想象方法类似的客体心理旋转在模拟失重状态下的主要激活区域为顶叶运动区,同时需要额叶体感系统进行代偿^[32]。该任务对于揭示个体因素如身体与脑部状态对空间定向能力的影响具有一定作用。

上述4类范式多用于航空航天领域等特因环

图8 MIT模型示意图^[31]Fig. 8 MIT model^[31]

境中心理层面的空间定向能力测试,主要围绕空间定向的测量、行为绩效以及作用机制展开;但是以往范式缺乏地面与天基等特因环境的对比研究,难以满足对长期飞行任务航天员的空间认知能力稳定性与变化规律揭示的需求。因此如何选择最好、最有效的范式,以揭示天基环境中影响空间定向能力的因素,实现良好的空间站空间设计,并最终显著提高航天员的绩效水平就显得至关重要。

4 空间定向能力的影响因素

相对早期研究,近30年来研究者开始注重探讨影响空间定向能力的因素,深入理解影响因素也有助于提高个体空间定向能力。Newman^[33]提出空间定向障碍的影响因素可从飞行员自身、飞行器、操作与环境等方面考虑,Zhdanko等^[20]收集并分析了440名飞行员的相关数据,补充提出了交互因素,并将这5类因素概括为飞行员-飞行器-环境系统。将空间定向即空间定向障碍的影响因素分为3类:基本认知能力、个体因素、外部环境因素。

4.1 基本认知能力

个体的基本认知能力与空间定向能力高度相关。丹笑颖等^[34]发现飞行员的空间定向能力、情景记忆、数字工作记忆和心算效率显著高于常模。空间速度知觉、视觉搜索速度、再认记忆等能力对某些人控交会对接任务绩效指标也会产生影响。晏碧华等^[35]进一步发现,飞行员使用整体、动态权衡的策略会使其在空间定向动态任务中表现出高空间定向能力。老年人前测语义理解能力也可预测后测定向能力。速度知觉、视觉搜索速度、再认记忆等能力对某些人控交会对接任务绩效指标也会产生影响。

各项空间能力对个体完成定向任务的绩效存在影响^[36]。比如空间视角变换能力(或观点采择能力)、空间可视化能力与趋向灵活性。失重条件下物体可能以各种姿态呈现,航天员需要将物体旋转到熟悉的方向再进行空间定向判断,因此空间视角变换能力与空间可视化能力对空间定向有很重要影响。利用虚拟仿真环境对被试进行空间定向训练时,空间可视化能力强的受试者训练效果更好。Richard^[37]和Vidal等^[38]均发现趋向灵

活性和空间定向能力的显著相关。

4.2 个体因素

人机系统都处于一定环境中,其工作效率必将受环境影响。环境因素或通过影响人的情绪间接对绩效产生影响,或通过身体器官的直接作用而对绩效产生影响。航天员在轨飞行面临着繁重的作业压力以及失重、隔离、狭小等环境应激因素,并产生应激反应。空间飞行状态下心境障碍虽罕见,但个体会发生较明显的焦虑和抑郁情绪。从工作记忆与空间注意的角度出发,这些消极情绪都将消耗个体的认知资源,增加其工作负荷,从而影响个体工作效率。地面环境尚且如此,航空航天等特因环境更甚,能否控制消极情绪将会影响航天员的工作绩效^[39]。

当飞行员疲劳度较高或具有其他生理不适症状,空间定向障碍的发生率就相对较高,普通感冒也可能影响飞行员的前庭功能。此外,发生空间定向障碍的原因还有飞行员的注意力被分散、认知风格、语言交流、风险决策、任务饱和,以及飞行人员潜意识中倾向依赖前庭定向^[40]。

4.3 外部环境因素

空间定向通常可以通过识别环境属性来实现,例如校园中已知的建筑物或走廊上的可识别的绘画,以及在长期空间记忆中与具有相同属性的影响线索相匹配。以往研究把空间定向中的环境属性分为几何线索和自然线索^[12]。Cheng 首先研究了几何和自然线索在空间定向中的作用,发现重新定向时大鼠使用几何线索并忽略自然线索。越来越多证据表明,人类和其他动物将环境线索与路径整合结合起来,以确定航行过程中的空间定向^[41-42]。Kelly 等^[42]进一步发现环境线索的数量和模糊性影响运动过程中空间定向的维持,认为维持定向比再定位更为复杂,需综合使用两类线索。线索显著性的影响与所处环境有关。而当任务负荷较大,或缺少视觉线索时,空间定向障碍出现的可能性也将大大提升。

除上述因素外,人机交互方式也会影响空间定向。Ruddle 等^[43]认为头盔式显示设备可以使用户形成更准确地认知地图,但 Aoki 等^[44]的研究认为头盔式与桌面式显示设备训练结果没有显著差异。此外,卡瓦连科与波诺马连科等认为,发生空间定向障碍的根本原因之一就是现有视觉显

示器不能保持空间定向^[40]。

5 空间定向的理论解释

有研究认为人体对方向和距离记忆与认知是分离的,它们的处理分别基于 3 种神经元子系统:负责结合各感官信息与前庭系统信息的前庭皮层、头部朝向细胞系统以及负责处理位置和自我信息的海马体^[45]。还有研究提出前额叶与顶颞网的广泛脑区参与了空间定向过程^[46]。Lambrey 等^[47]针对内侧颞叶在空间定向中的作用提出,左内侧颞叶在记忆路线顺序上具有重要作用,而非仅负责形成认知地图。基于以往空间定向神经生理相关研究,提出参照原则假说、空间表征策略理论、空间相容性理论,以及针对特因环境空间定向障碍提出感觉冲突理论。

5.1 参照原则假说

由 Werner 等^[48]提出,选择环境的一个方向作为空间定向的基础,并对其他物体位置按照这个参照方向进行编码;检索时,这个参考方向被假定为提供一种自然的方式来访问空间记忆(类似于在地图上指向北方),并且作为回忆空间的最准确的方向。非参照方向虽可被重新调用,但这需要额外的心理空间和时间,并会累积误差。

有研究表明,空间描述的心理表征在记忆中按照一定方向进行组织,它取决于路线描述的初始方向^[49-51]。Shelton 等^[52]考察了个体对室外环境的路线描述,发现路线描述的初始方向与前行的主要方向一致。Meneghetti 等^[28]进一步研究显示,被试形成了与最初方向有关的空间描述心理表征,但随着行进路线的进行,最初方向心理表征的作用越来越小。

根据 Nori 等^[53]的研究,最初方向是否会影响定向任务,与被试获取环境知识的表征有关。使用地标与路线表征时更易受到最初方向影响,在定向任务中出错更多。Pazzaglia 等^[54]认为,高心理旋转能力者偏向使用路线与动态表征,他们在接受训练后更少受最初方向影响。

5.2 空间表征策略理论

O'Keefe 等^[55]提出了空间学习和记忆理论。其假设存在两种不同的空间表征系统:认知地图和分类系统,两者可以并行运作。当外线索较弱或较差时,其能够促进基于认知地图的空间学习。

认知地图系统基于非自我中心策略,它包含不同地标空间关系的地图。相反,分类系统则基于一个自我中心的策略,包括引导和定向。然而,引导策略涉及到接近或者避免特定的线索,定向策略则涉及到以身体为中心进行转向应对线索。Dameri 等^[56]证明两栖动物也更喜欢身体中心线索(定向反应),而非视觉线索(引导反应)。Kozhevnikova 等^[57]发现策略的采用与所处环境有关。此外,女性更爱使用自我中心策略^[58]。

5.3 空间相容性理论

空间相容性效应是指刺激与反应的空间位置一致时反应更快、正确率更高的现象。该理论认为在进行反应时,刺激自身的属性会对反应产生影响。若刺激与反应位置相同则为相容,任务绩效更好。比如当被试进行指向任务时,若任务要求的目标方向与反应方向一致,将发生空间相容效应,被试反应速度较快。当被试以自我中心参照系学习空间知识时,这种效应尤其容易出现,因为自我中心参照系与身体的关联性较大,但也与经验有关。若个体对某空间较为熟悉,并对该空间形成表征,那么不管学习的视角与空间参照系是否相容,都会基于已有表征作出反应。而当已有空间表征的方向与学习方向不一致时,空间相容性效应将不再显著^[59]。

5.4 特因环境中的感觉冲突理论

从生理机制角度来看,针对空间定向障碍的理论解释主要是感觉冲突理论,该理论认为特因环境中被试执行空间定向任务时,感觉运动信息的干扰产生的空间冲突是产生空间定向障碍的原因。感觉运动信息指的是感觉和运动时的身体经验。空间冲突指的是本体和想象状态的差异,这些差异分为两种^[60]:①物体方位差异(object direction disparity, ODD),是想象视角和真实视角间的差异;②头部朝向差异(head direction disparity, HDD),是观察者真实朝向和想象朝向的差异。研究者使用定向任务发现改变面部朝向的任务引发了更大的空间冲突^[61]。之后 May 继续用该任务并结合记忆范式发现测试环境和学习环境不同时,被试的表现更好,说明实际物理方向的感觉运动信息减弱时,被试能更好地进行想象视角,这一结论为该假设提供了进一步的佐证^[61]。

综上所述,二维空间定向的参照原则假说主

要基于个体进行空间定向判断时参照点的选择而提出,三维空间定向的空间表征策略理论则主要涉及不同空间表征策略的选择,空间相容性理论则从刺激与反应的空间匹配关系考察其对空间定向的影响与促进,而特因环境空间定向障碍则是感觉冲突的结果。

6 空间定向研究的应用

综合过往研究,可以将高低空间定向能力判定的具体应用领域分为3方面:

1) 飞行员的选拔与训练。空间定向能力是飞行技能中最核心的因素之一,是确保飞行质量、维护飞行安全所必须的一项重要心理品质。空间定向可通过飞行员的决策判断,间接影响飞行员的飞行安全,且与飞行绩效存在密切关系^[15]。鉴于此,不少研究者建议将空间定向能力作为筛选飞行员的重要依据。近年来因空间定向障碍发生的飞行事故呈上升趋势^[20],因此,如何利用空间定向任务对飞行员进行高效的选拔与训练非常重要。

2) 载人航天中航天员空间定向能力的促进与改善。航天员在空间失重环境下执行任务时,往往由于长期在轨飞行,人体前庭系统、视觉系统和运动系统发生感觉冲突,引起航天员对周围物体所处的方向和位置产生错误的判断,部分航天员甚至在在轨30天后仍然存在空间定向障碍,而以往研究的数据结果和结论主要是在地面或航空飞行环境中获得,缺乏长期失重条件下的相关研究,失重环境对空间定向能力的影响作用的规律和机理尚不清楚。

3) 用户中心的地图与导航工具开发。空间定向能力不同的个体,在使用地图的方式、策略与绩效上也存在一定差异。有研究使用圣芭芭拉方向感问卷筛选出高低空间能力者,并通过星云隧道任务考查其偏好使用的空间参考框架。结果发现,空间参考框架的使用与空间能力高低存在关系,高空间能力者偏好使用自我中心的参考框架^[62]。此外,相较高空间能力者,一些低空间能力者在定向过程中需要将多种线索结合。个体在参考框架与线索的使用的差异,导致了他们在不同类型地图或导航下的绩效差异。房慧聪等^[63]发现,高定向策略(异自我中心策略的一种)的男

性不受导航方式影响,低定向策略的男性在标志导航方式下绩效更高。当导航信息通过听觉呈现时,导航信息包含的空间术语也会影响被试的绩效。也有研究直接针对空间能力与导航方式开展,其中导航方式分为视觉导航、语音导航和两者结合导航。结果发现,高空间能力者在视觉导航模式下表现优于语音导航,低空间能力者则相反^[64]。在一定程度上,这些研究结果能够启发以用户为中心的导航工具开发,也可将其结果迁移至飞行器导航设计或航天员空间定向能力训练上。

7 展望

空间定向是一个复杂的过程,依赖于许多基本的认知功能。以往关于空间定向的研究基本围绕正常个体空间定向能力的规律探索、影响因素以及研究范式展开,得出不同因素对空间定向的重要影响。但以往研究偏重于基础研究,其研究结果并不能直接指导工效学设计,促进空间定向培训项目的开发。为推进研究应用化,本文提出 3 点展望:

1)从影响因素来看,本文总结出三大类影响因素如何作用于空间定向能力,其中机制如何尚不完全清楚,对影响因素及其机制的探讨有利于开发提升定向能力的培训项目。目前,这些培训项目多针对前庭功能开展,而特因环境下空间定向能力影响因素并不只存在于生理方面,还与飞行员所处环境因素和身心状态有关。

2)从任务范式来看,当前空间定向研究范式种类繁多,但缺乏系统性比较,不同范式之间的相关性、区分度、信效度及适用情况尚不清楚,这使具体研究中研究者不知采取何种有效范式。今后有必要在范式间进行比较研究,以选拔适合飞行员与特因环境空间定向能力测试的范式与任务,为进一步探索特因环境中空间定向能力影响因素及设计针对性培训项目提供便利。此外,目前研究任务多数借助计算机进行,但计算机相对 VR 有其局限性,今后可借助 VR 技术降低操作难度、避免无关刺激干扰。

3)以往研究多集中于行为方面的探讨,与技术的结合较少,而 fMRI、眼动仪、PET、TMS、tDCS、脑磁描记法等有助于探讨空间定向的具体

机制。借助 fMRI、EEG 等有助于了解空间定向的神经生理机制^[9],借助眼动技术得到的结果也可用于优化地图制作^[65-66],也有研究借助 EEG 探讨失重环境下心理旋转的认知机制变化,这项技术或许也可以用在空间定向脑机制的探讨中。

〔参考文献〕

- [1] Lawton CA, Morrin KA. Gender differences in pointing accuracy in computer-simulated 3D mazes[J]. Sex Roles, 1999, 40(1): 73-92.
- [2] Zapata LP, Aznarcasanova JA, Torroalves N, et al. Are first-order disparity gradients spatial primitives of the orientation of lines on the ground plane? [J]. Psychology and Neuroscience, 2014, 7(3): 285-299.
- [3] Rainville C, Marchand N, Passini R. Performances of patients with a dementia of the Alzheimer type in the standardized road-map test of direction sense[J]. Neuropsychologia, 2002, 40(5): 567-573.
- [4] Liao H, Dong W. An exploratory study investigating gender effects on using 3D maps for spatial orientation in wayfinding[J]. ISPRS International Journal of Geo-information, 2017, 6(3):60.
- [5] Dong W, Liao H. Eye tracking to explore the impacts of photorealistic 3D representations in pedestrian navigation performance[J]. ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2016,6: 641-645.
- [6] 高雪原,董卫华,童依依,等.场认知方式、性别和惯用空间语对地理空间定向能力影响的实验研究[J].地球信息科学学报,2016,18(11):1513-1521.
Gao XY, Dong WH, Tong YY, et al. Study on the influence of field cognitive style, gender and spatial terminology on geographical spatial orientation ability: based on experiments in virtual space[J]. Journal of Geo-information Science, 2016, 18(11): 1513-1521.
- [7] 李晶,周晶,朱静雅.虚拟场景中的信息类型对路径整合效率的影响[J].心理科学,2019,42(3):514-520.
Li J, Zhou J, Zhu JY. The effect of different virtual Scenes information types on path integration efficiency[J]. Journal of Psychological Science, 2019, 42(3): 514-520.
- [8] 应申,庄园,黄丽娜,等.性别和认知差异对三维空间寻路结果的影响[J].武汉大学学报(信息科学版),2020,45(3):317-324.
Ying S, Zhuang Y, Huang N, et al. Impact of gender, cognitive difference in 3D scenes on wayfinding[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2020,45(3): 317-324.
- [9] Murias K, Slone E, Tariq S, et al. Development of spatial orientation skills: An fMRI study[J]. Brain Imaging and Behavior, 2019, 13(6): 1590-1601.
- [10] Schoenfeld R, Lehmann W, Lepow B. Effects of age and sex in mental rotation and spatial learning from virtual environments[J]. Journal of Individual Differences. 2010,31(2): 28-82.
- [11] Coluccia E, Louse G. Gender differences in spatial orientation: A review[J]. Journal of environmental psychology, 2004, 24(3): 329-340.
- [12] Cheng K. A purely geometric module in the rat's spatial representation[J]. Cognition, 1986, 23(2):149-178.
- [13] Matthew G. Buckley, Alastair D. et al. Thinking outside of the box II: Disrupting the cognitive map[J]. Cognitive Psychology, 2019, 108:22-41.
- [14] 游旭群,晏碧华.视觉空间能力的认知加工特性[J].陕西师范大学学报(哲学社会科学版),2004,(2):102-107.

- You XQ, Yan BH. Characteristics of the cognition processing of human visual ability in space[J]. Journal of Shaanxi Normal University(Philosophy and Social Sciences Edition), 2004, (2): 102-107.
- [15] 王永刚,左笑颖. 飞行安全技术影响因素及其作用机制研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2019, 15(5):186-192.
- Wang YG, Zuo XY. Research on the factors affecting flight safety technology and its mechanism[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2019, 15(5):186-192.
- [16] 姚钦,陈珊,张琳,等. 高性能战斗机飞行员空间定向能力与相关指标的关系分析[J]. 中华航空航天医学杂志, 2018, 29(1): 8-13.
- Yao Q, Chen S, Zhang L, et al. Analysis on the correlation of high performance fighter pilot's spatial orientation ability with related indicators[J]. Chinese Journal of Aerospace Medicine, 2018, 29(1): 8-13.
- [17] 郝晨汝,池子强,赵瑞斌,等. 空间定向障碍评价方法研究[J]. 河北工业科技, 2018, 35(1): 43-48.
- Hao CR, Chi ZQ, Zhao RB, et al. Research of spatial disorientation evaluation method[J]. Hebei Journal of Industrial Science and Technology, 2018, 35(1):43-48.
- [18] Glasauer S, Mittelstaedt H. Perception of spatial orientation in microgravity[J]. Brain Res Rev, 1998, 28 (1-2): 185-193.
- [19] Fowler B. A review of cognitive and perceptual motor performance in space[J]. Aviat Space Environ Med, 2000, 71(9):A66-A68.
- [20] Zhdanko IM, Blaguinin AA, Chistov SD, et al. Aviation accidents due to spatial disorientation and positional illusions over the period from 2009 to 2013[J]. Human Physiology, 2019, 45(7):725-729.
- [21] 贾大光,李学山. 飞行员空间定向能力训练研究[J]. 军事体育进修学院学报, 2012, 31(4):44-46.
- Jia DG, Li XS. On the function and training of the 'orientation-setting ability' for pilot[J]. Journal of PLA Institute of Physical Education, 2012, 31(4):44-46.
- [22] 刘相,刘玉庆,朱秀庆等. 基于虚拟现实的航天员舱内导航训练方法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2017, 29(1):101-107.
- Liu X, Liu YQ, Zhu XQ, et al. Virtual reality based training methods for navigation in space station[J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2017, 29(1):101-107.
- [23] 姜国华,刘玉庆,朱秀庆,等. 虚拟现实技术在空间站舱内定向训练中的应用[J]. 载人航天, 2015, 21(2):115-120.
- Jiang GH, Liu YQ, Zhu XQ, et al. Application of Virtual Reality in Spatial Orientation Training for Space Station[J]. Manned Spaceflight, 2015, 21(2):115-120.
- [24] Alberts BB, Selen LP, Bertolini G, et al. Dissociating vestibular and somatosensory contributions to spatial orientation[J]. Journal of Neurophysiology, 2016, 116(1): 30-40.
- [25] Kheradmand A, Winnick A. Perception of upright: Multisensory convergence and the role of temporo-parietal cortex[J]. Frontiers in Neurology, 2017, 8: 552.
- [26] Kheradmand A, Oteromillan J. Spatial orientation: Model-based approach to multi-sensory mechanisms[J]. Progress in Brain Research, 2019: 209-223.
- [27] Hegarty M, Waller D. A dissociation between mental rotation and perspective-taking spatial abilities[J]. Intelligence, 2004, 32(2): 175-191.
- [28] Meneghetti C, Pazzaglia F, De Beni R, et al. Mental representations derived from spatial descriptions: the influence of orientation specificity and visuospatial abilities[J]. Psychological Research-psychologische Forschung, 2015, 79(2): 289-307.
- [29] Contreras MJ, Colom R, Hernandez JM, et al. Is static spatial performance distinguishable from dynamic spatial performance? A latent-variable analysis. [J]. Journal of General Psychology, 2003, 130(3): 277-288.
- [30] 牟书,刘儒德,舒华,等. 可旋转地图和固定地图的定位效率研究[J]. 应用心理学, 2005, (1): 67-72.
- Mou S, Liu RD, Shu H, et al. Effectiveness of Spatial Orientation of the Rotated Map and the Static Map[J]. Chinese Journal of Applied Psychology, 2005, (1): 67-72.
- [31] 张琪. 三维视角转换空间能力测量工具的开发与验证[D]. 杭州: 浙江理工大学理学院, 2017.
- Zhang Q. The development and validation of the measurement tool for three dimensional perspective taking spatial ability[D]. Hangzhou: Science College of Zhejiang Sci-Tech University; 2017.
- [32] 段矫博. 模拟失重状态心理旋转认知加工脑机制[D]. 西安: 第四军医大学医学心理系, 2015.
- Duan JB. Cognitive processing mechanism of mental rotation under simulated weightlessness condition[D]. Xi'an: Department of medical psychology, Fourth Military Medical University; 2015.
- [33] Newman DG. An overview of spatial disorientation as a factor in aviation accidents and incidents[EB/OL]. (2019-08-22) [2020-09-01]. <http://www.atsb.gov.au/publications/2007/b20070063.aspx>.
- [34] 丹笑颖,万憬,戴成祥等. 不同机种飞行员基本认知能力的特征及其意义[J]. 中国行为医学科学, 2004, (4):92-93.
- Dan XY, Wan J, Dai CX, et al. Study on the basic perceptibility in pilots [J]. Chinese Journal of Behavioral Medical Science, 2004, (4):92-93.
- [35] 晏碧华,游旭群,杨仕云. 飞行员在空间定向动态任务中的加工优势[J]. 人类工效学, 2011, 17(4):5-8.
- Yan BH, You XQ, Yang S Y. Processing advantage on the spatial orientation dynamic test-revised of civil pilots[J]. Chinese Journal of Ergonomics, 2011, 17(4):5-8.
- [36] 郭俊鹏,姜国华,刘玉庆. 虚拟训练仿真中空间定向能力的影响因素分析[J]. 载人航天, 2016, 22(4): 530-536.
- Guo JP, Jiang GH, Liu YQ. Influential factors analysis of spatial orientation ability in virtual training simulation[J]. Manned Spaceflight, 2016, 22(4): 530-536.
- [37] Richards JT, Oman CM, Shebilske WL, et al. Training, transfer, and retention of three-dimensional spatial memory in virtual environments[J]. Journal of Vestibular Research Equilibrium & Orientation, 2002, 12 (5-6): 223-238.
- [38] Vidal M, Berthoz A. Navigating in a virtual 3D maze: Body and gravity, two possible reference frames for perceiving and memorizing[J]. Spatial Cognition and Computation, 2005, 5(2): 139-161.
- [39] Aureliu L, Gina R, Jeremy R. et al. Threat-evoked anxiety disrupts spatial working memory performance: An attentional account[J]. Cognitive Therapy and Research, 2003, 27(5):489-504.
- [40] 陈炎琰,钟方虎,吴铨,等. 空间定向障碍致军事飞行事故概述[J]. 人民军医, 2016, 59(5): 450-452.
- Chen YY, Zhong FH, Wu S, et al. An overview of military flight accidents caused by space orientation obstacle [J]. People's Military Surgeon, 2016, 59(5):450-452.
- [41] Nardini M, Jones P, Bedford R, et al. Development of cue integration in human navigation. [J]. Current Biology, 2008, 18(9): 689-693.
- [42] Kelly JW, Mcnamara TP, Bodenheimer B, et al. Individual differences in using geometric and featural cues to maintain spatial orientation: Cue quantity and cue ambiguity are more important than cue type[J]. Psychonomic Bulletin & Review 2009, 16 (1), 176-181.
- [43] Ruddle RA, Payne SJ, Jones D M. Navigating large-scale virtual environments: What differences occur between helmet mounted and desk-top displays? [J]. Presence: Teleoperators and Virtual Environments, 1999, 8(2): 157-168.

- [44] Aoki H, Oman CM, Buckland DA, et al. Desktop-VR system for preflight 3D navigation training[J]. *Acta astronautica*, 2008, 63(7): 841-847.
- [45] Lobel E, Kleine J F, Bihan D L, et al. Functional MRI of galvanic vestibular stimulation [J]. *Neuroimage*, 1998, 80(5): 2699-2709.
- [46] Eleanor AM, Neil B, John O. Human spatial navigation: Cognitive maps, sexual dimorphism, and neural substrates [J]. *Current Opinion in Neurobiology*, 1999, 9(2): 171-177.
- [47] Lambrey S, Séverine S, Dupont S, et al. Reference frames and cognitive strategies during navigation: Is the left hippocampal formation involved in the sequential aspects of route memory? [J]. *International Congress Series*, 2003, 1250: 261-274.
- [48] Werner S, Schmidt K. Environmental reference systems for large-scale spaces[J]. *Spatial Cognition and Computation*, 1999, 1(4): 447-473.
- [49] Shelton AL, McNamara TP. Orientation and perspective dependence in route and survey learning[J]. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory and Cognition*, 2004, 30(1): 158-170.
- [50] Wilson PN, Tlauka M, Wildbur DJ, et al. Orientation specificity occurs in both small and large-scale imagined routes presented as verbal descriptions[J]. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory and Cognition*, 1999, 25(3): 664-679.
- [51] Wildbur DJ, Wilson PN. Influences on the first-perspective alignment effect from text route descriptions[J]. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 2008, 61(5): 763-783.
- [52] Shelton AL, McNamara TP. Spatial memory and perspective taking[J]. *Memory & Cognition*, 2004, 32(3): 416-426.
- [53] Nori R, Giusberti F. Cognitive styles: Errors in directional judgments[J]. *Perception*, 2003, 32(3): 307-320.
- [54] Pazzaglia F. Text and Picture Integration in Comprehending and Memorizing Spatial Descriptions[M]. Boston: Springer. *Understanding Multimedia Documents*, 2008: 43-59.
- [55] O'Keefe J, Nadel L. The Hippocampus as a Cognitive Map[M]. Oxford: Clarendon Press, 1978.
- [56] Daneri MF, Casanave EB, Muzio RN, et al. Use of local visual cues for spatial orientation in terrestrial toads (*Rhinella Arenarum*): The role of distance to a goal[J]. *Journal of Comparative Psychology*, 2015, 129(3): 247-255.
- [57] Kozhevnikov M, Cheng LR, Kozhevnikov M, et al. Effect of environment immersivity on encoding strategies of spatial tasks [J]. *Procedia Manufacturing*, 2015, 3: 5059-5066.
- [58] Fernandes H, Costa P, Filipe V, et al. A review of assistive spatial orientation and navigation technologies for the visually impaired[J]. *Universal Access in The Information Society*, 2019, 18(1): 155-168.
- [59] Wang Q, Taylor HA, Brunye TT, et al. East is not right: Spatial compatibility differs between egocentric and cardinal retrieval[J]. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 2019, 72(5): 1250-1279.
- [60] May M. Imaginal perspective switches in remembered environments: Transformation versus interference accounts [J]. *Cognitive Psychology*, 2004, 48(2): 163-206.
- [61] May M. Imaginal repositioning in everyday environments: effects of testing method and setting[J]. *Psychological Research*, 2007, 71(3): 277-287.
- [62] 周日. 虚拟现实空间中参照系偏好的个体差异[D]. 天津: 天津师范大学教育学院, 2020.
- Zhou R. Individual differences in preference of spatial reference frame in virtual reality[D]. Tianjian: Educational college of Tianjin Normal University, 2020.
- [63] 房慧聪, 周琳. 性别、寻路策略与导航方式对寻路行为的影响[J]. *心理学报*, 2012, 44(8): 1058-1065.
- Fang HC, Zhou L. The effect of gender, wayfinding strategy and navigational support on wayfinding behaviour [J]. *Acta Psychologica Sinica*, 2012, 44(8): 1058-1065.
- [64] Jing L. Different spatial terms in navigation system for Chinese drivers[J]. *Cognitive Processing*, 2012, 13(1): 229-232.
- [65] Dong W, Zhan Z, Liao H, et al. Assessing similarities and differences between males and females in visual behaviors in spatial orientation tasks[J]. *ISPRS international journal of geo-information*, 2020, 9(2): 115.
- [66] 董卫华, 廖华, 詹智成, 等. 2008 年以来地图学眼动与视觉认知研究新进展[J]. *地理学报*, 2019, 74(3): 599-614.
- Dong WH, Liao H, Zan ZC, et al. New research progress of eye tracking-based map cognition in cartography since 2008[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2019, 74(3): 599-614.

(责任编辑:高 慧)