

建筑天然光环境的非视觉健康研究综述

A Review of Non-Visual Healthy of Daylight Environment in Building

孙国栋 杜宏武*

SUN Guodong, DU Hongwu*

基金项目: 2025广东省自然科学基金面上项目“基于‘光-景’耦合仿真的珠三角中小学恢复性环境研究”(编号: 2025A1515011815)

摘要

天然光与人类健康息息相关, 其非视觉效应与建筑光环境设计的联系密切。通过系统梳理近 15 年来国内外相关研究成果, 基于天然光非视觉效应的基本特征和研究方向, 分析总结建筑非视觉天然光环境研究相关的空间场景(校园、办公、医疗等)和空间变量、量化指标与标准, 以及主要研究方法。研究发现, 空间变量、气候条件和时间因素共同影响建筑空间的非视觉天然光环境; 城市设计、空间形体、控光界面、室内属性和视点特征 5 类空间变量对非视觉效应具有显著影响; 量化指标与标准仍需进一步完善; 主要研究方法为现场实测和模拟实验。最后展望了非视觉效应在建筑天然光环境中的研究方向与应用。

Abstract

Daylight is closely related to human health, and its non-visual effects are closely associated with the design of the light environment in buildings. By systematically reviewing the relevant research at home and abroad in the past 15 years, based on the basic characteristics and research directions of the non-visual effects of daylight, this paper analyzes and summarizes the relevant spatial scenes(such as campus, office, and medical spaces), spatial variables, quantitative indicators, standards and the main research methods related to the non-visual daylight environment in buildings. The research found that spatial variables, climatic conditions, and time factors jointly affect the non-visual daylight environment of building spaces. Five types of spatial variables—namely urban design, spatial form, light-control interface, indoor attributes, and viewpoint characteristics—significantly influence on the non-visual effects. Quantitative indicators and standards still need to be further improved, and the main research methods can be divided into on-site measurement and simulation experiments. Finally, the research direction and application of the non-visual effects in the daylight environment of buildings are prospected.

文章亮点

- 1) 构建了空间、气候与时间和影响非视觉效应的天然光要素之间的关系图谱, 并对空间变量进行了深入剖析。
- 2) 总结了非视觉天然光环境常见量化指标与标准, 提供了更具适配性的研究方法。
- 3) 提出了建筑非视觉天然光环境设计的关键——“平衡”, 以及实现“平衡”的关键路径。

关键词

非视觉效应; 天然光; 光环境;
健康建筑

Keywords

Non-visual effect; Daylight;
Lighting environment; Healthy
building

收稿日期: 2024-11-21

修回日期: 2025-05-16

自古以来, 人们便意识到天然光不仅能够提供光照与热量, 更是建筑设计中塑造空间与营造氛围的关键要素。工业革命后, 建筑体量增大、城市密集化促使人工光被广泛应

用, 以弥补天然光的不足, 并满足精细作业与提高效率的需求。与此同时, 光环境研究逐渐系统化, 开始以亮度、眩光、均匀度等指标进行量化分析, 推动了视觉健康相关标准的制

定。20 世纪 70 年代起, 能源危机促使人们关注照明节能与天然光的优化利用。随后, 光在非视觉健康领域的重要性被逐步发现, 特别是第三类视网膜神经节感光细胞 (Intrinsic Photosensitive Retinal Ganglion Cells, ipRGCs) 和视黑蛋白^[1] 的研究推动了这一进程。近年来, 天然光因其全光谱、高强度及信息载体功能, 被证实在视觉与非视觉健康方面具有显著优势^[2]。

光环境研究经历了“美学-视觉健康-非视觉健康”和“天然光-人工光-两者结合”的发展路径, 天然光环境对使用者的非视觉生理与心理健康的影响是当下学界的关注焦点。但面对天然光非视觉效应的研究, 仍存在空间变量影响机制不明、量化指标与标准体系缺乏、研究方法适用性不足等问题。文章将梳理相关空间场景与变量, 归纳非视觉指标与标准, 总结研究方法并提出优化建议, 探索非视觉健康导向的建筑光环境设计。

1 光的非视觉效应与相关研究方向

光的非视觉效应 (Non-visual Effect 或 Non-image Forming), 又称光生物效应, 指光通过第二条感光路径对个体的昼夜节律、自主神经系统活动、认知能力及情绪等多种生理和心理功能进行的调节^[3]。

天然光作为重要的授时因子, 对人体昼夜节律的影响主要有 2 个方面: 对褪黑激素的急性抑制反应和调节昼夜节律相位^[4]。已有研究发现“上班族”全天接受高水平昼夜节律有效光会使得相位幅值增大, 从而提升其睡眠质量^[5]。此外, 光是人体情绪调节的重要影响因素, 相关研究发现天然光对建筑内使用者的情绪状态有显著影响^[6]。光对情绪的影响路径较为多样: 一方面, 光可以在不影响生理节律和睡眠的情况下, 通过 ipRGCs 激活或抑制相关脑区的神经活动直接作用于情绪; 另一方面, 光可以通过影响睡眠、褪黑素分泌、单胺传递等间接作用于情绪^[7]。随着相关研究的深入, 人们发现光似乎对人的认知能力也有一定的影响, 主要涉及警觉性、注意力与较复杂的认知执行功能等方面^[8]。目前, 光与认知的作用机制尚不明确, 主要存在 3 种假说: 褪黑素的抑制、特异性脑区和神经网络的激活、生理唤醒水平的提高^[9]。

2 研究方法 with 数据

文章聚焦于非视觉健康与建筑天然光环境的关联研究领域, 以中国知网 (CNKI) 和 Web of Science 为数据源进行检索。中国知网的检索词为“非视觉 × 天然光 + 光生物 × 天然光 + 非视觉 × 日光 + 光生物 × 日光”, 采用按“主题”搜索的方式, 检索范围为“总库”, 限定学科为“建筑科学与工程”。Web of Science 的检索词为 (“non-visual” AND “daylight*”) OR (“non-visual” AND “natural light*”) OR (“non-visual” AND “sunlight*”) OR (“non-image*” AND “daylight*”) OR (“non-image” AND “natural light*”) OR (“non-image”

AND “sunlight*”) OR (“circadian” AND “daylight*”) OR (“circadian” AND “natural light*”) OR (“circadian” AND “sunlight*”), 采用按“Topic”搜索的方式, 检索范围为“All Databases”, 限定学科为“Engineering or Construction Building Technology or Architecture”。检索时间均限定为 2010 年 1 月 1 日—2025 年 1 月 1 日, 初步筛出文献 423 篇 (中国知网 45 篇, Web of Science 378 篇)。接着初步浏览文献, 并采用 connected paper 等工具, 通过文献之间的交叉引用深度搜索相关文献, 扩充文献数量。

在此基础上, 排除研究重点不是天然光、非视觉健康以及建筑设计的文献; 但如果文献同时涵盖“天然光与人工光”或“视觉与非视觉”等多个研究重点, 则可纳入本次综述。基础性研究主要揭示了非视觉效应对人体的影响规律和路径, 或提供了建筑非视觉天然光环境的研究方法和工具, 建立了评价体系 and 标准, 但未对建筑非视觉天然光环境进行直接研究, 因此本次综述需排除基础性研究。为了信息的准确性和完整性, 并避免主观偏差的积累, 文献筛选需排除相关领域的综述。最终筛选出 59 篇符合研究主题和目标的文献纳入本次综述, 其中办公环境相关研究 23 篇, 校园环境相关研究 13 篇, 医疗环境相关研究 12 篇, 其他场景相关研究 6 篇, 无明确场景相关研究 5 篇。

3 研究的场景和空间变量

3.1 校园环境

天然光对儿童和青少年的生理和心理成长至关重要, 中小学生学习问题与光环境的关联性已得到充分证明^[10], 而昼夜节律、情绪状态、认知能力等非视觉健康问题还需深入研究。目前对校园非视觉天然光环境的研究主要集中于教室空间, 在具体的空间变量方面, 多项研究进行了深入的探讨^[11-18] (表 1), 其中教室朝向、教室进深、窗墙比、窗地比、窗户尺寸、窗台高度、窗户间距、开窗形式、窗户遮阳类型、室内表面反射率、外部建筑表面反射率、室内颜色、视线方向对非视觉效应有显著影响。教室日间使用人工光源照明的频率较高, 故多项研究将天然光和人工光结合考虑^[11,13-15,18]。

研究发现, 学生非在校期间获得的日照水平远高于在校期间, 教室环境通常无法为学生提供非视觉健康所需的光照强度^[19], 尤其是建筑底层的教室^[20]。相比之下, 室外白天光照强度可达 10 000 lux (阴天) ~130 000 lux (晴天)^[21], 更易满足非视觉健康需求。因此 Sojeong Kim 等^[22] 认为白天进行户外活动有助于青少年获取充足的日照, 这是改善青少年睡眠和节律的有效方式。此外, 相关研究发现夏季醒前光照累积量与学生的晨间警觉性、情绪和深睡眠时间显著相关^[23], 但未涉及具体设计。

3.2 办公环境

相关研究表明办公室日照水平与职员睡眠质量正相关^[24]。Nora Wang 等^[25] 主张将办公环境的日照、窗外景观、

表 1 非视觉效应研究的空间变量与方法

Tab.1 Spatial variables and methods for the study of non-visual effects

空间场景	研究者	主要研究方法	研究的空间变量	对非视觉效应应有显著影响的空间变量
校园环境	Laura Bellia 等 ^[11]	现场实测	外部建筑表面反射率；室内表面反射率	全部
	Maria L. Amundadottir 等 ^[12]	Radiance 渲染 HDR 图像分析	视线方向	全部
	Ignacio Acosta 等 ^[13]	全尺寸实验室实测	窗户尺寸、位置、朝向；桌面、墙面、地面、天花材质	室内表面反射率
	Ramen Munir Baloch 等 ^[14]	注意力测试	窗户尺寸、朝向、玻璃类型、遮阳类型、是否可开启；黑板、墙面材质	窗户尺寸、遮阳类型
	Isabel Escobar 等 ^[15]	ALFA 模拟	玻璃透射率；墙面和地面颜色	全部
	陈启宁，吴蔚 ^[16]	Honeybee 模拟	窗台高度；窗地比；窗户间距	全部
	徐臻杰 ^[17]	缩小等比模型实测	教室朝向；开窗形式；窗墙比；室内墙体颜色	全部
办公环境	李丽妹 ^[18]	现场实测、DIALux evo 模拟	窗墙比；教室进深	全部
	Jozef Hraška, Peter Hartman ^[29]	缩小等比模型实测	外部障碍物颜色	全部
	Peter Hartman 等 ^[30]	缩小等比模型实测	墙壁颜色、反射率；视线方向；视点与窗户的距离；外部障碍物遮挡情况	全部
	Xiaodong Chen 等 ^[31]	现场实测和警觉性、情绪等评价	玻璃颜色；玻璃透光率	全部
	Siobhan Rockcastle 等 ^[32]	Radiance 模拟	房间朝向；工位布局；视线方向；视点与窗户的距离	全部
	Jaka Potočnik, Mitja Košir ^[33]	ALFA 模拟	玻璃颜色和透射率；墙面颜色和反射率	玻璃颜色和透射率
	Mohamed Boubekri 等 ^[34]	睡眠质量评价、认知能力测试	窗户遮阳类型	全部
	Yunyi Zeng 等 ^[35]	现场实测	房间朝向；视点与窗户的距离；视线方向；窗墙比	全部
	Yunyi Zeng 等 ^[36]	DAYSIM 模拟	房间朝向；窗墙比	窗墙比
	Nathan Altenberg Vaz, Mehlika Inanici ^[37]	ALFA 模拟	视线方向；窗户顶部高度；房间朝向；遮阳类型；外部障碍物遮挡情况；房间深度	视线方向；房间朝向；遮阳类型；外部障碍物遮挡情况；房间深度
医疗环境	Jaka Potočnik, Mitja Košir ^[38]	ALFA 模拟	窗墙比；房间尺寸；玻璃透射率；墙面、地面、天花表面反射率；视线方向	窗墙比；玻璃透射率（进深较大时室内表面反射率较为重要）
	Eleni Gkouvelou 等 ^[39]	Lark 模拟	玻璃透射率；房间朝向	玻璃透射率
	李翔，陈滨 ^[40]	现场实测	视点有无办公家具遮挡	全部
	陈晓东 ^[41]	全尺寸实验室实测、警觉性和情绪评价	采光口类型（侧窗 / 天窗）	全部
	Arsalan Gharaveis 等 ^[42]	现场压力、情绪、满意度访谈	窗户尺寸、位置	窗户位置
	Ignacio Acosta 等 ^[45]	DAYSIM 模拟	窗墙比；墙面、地面、天花表面反射率；视线方向	窗墙比；室内表面反射率；视线方向
	Kyle Konis ^[46]	现场实测	视点与窗户的距离；视线方向	与窗户的距离；视线方向
	Nourhan Elsayed, Tarek Rakha ^[47]	DIVA、Climate Studio、ALFA 模拟	病房朝向；视点与窗户的距离；视线方向	病房朝向；视点与窗户的距离；视线方向
医疗环境	Maria Englezou, Aimilios Michael ^[48]	ALFA 模拟	窗墙比；病房朝向；视点位置；视线方向	病房朝向
	蒋靖才 ^[49]	现场实测和 DAYSIM 模拟	视线方向；视点与窗户的距离；病房朝向	视线方向；与窗户的距离；病房朝向
	曹锦波 ^[50]	Ladubug、honeybee 和 DIVA 模拟	病房空间布局；病房朝向	病房空间布局；病房朝向
	姜巍 ^[51]	现场实测、Ladubug 和 honeybee 模拟	病房朝向；窗地比；病房空间布局	窗地比；病房空间布局

视觉眩光、私密性等因素作为整体来评估,不同因素之间可能存在耦合关系。Laura Bellia 等^[26]针对办公空间变量对光谱的影响进行初步探讨,并讨论了昼夜节律刺激、眼部照度、光谱和标准光源之间的关系。Megan Danell 等^[27]结合时间维度和行为维度,采用 EML 和 nvR_D 模型,评估了一天之内侧窗办公室中不同使用者的非视觉光照暴露情况。Jozef Hraška^[28]则探讨了黑视素日光指标在评估室内光环境昼夜节律潜力方面的实际适用性。

在具体的空间变量方面,多项研究进行了深入探讨^[29-41](表1),其中房间朝向、工位布局、工位挡板高度、工位表面材质、采光口类型、窗墙比、玻璃颜色及透射率、窗户遮阳类型、室内表面反射率、室内表面颜色、视线方向、视点与窗户的距离、视点有无办公家具遮挡等变量对非视觉效应有显著影响。与校园环境相似,办公环境日间使用人工光源照明的频率较高,多项研究将天然光和人工照明结合^[35-36,41]。此外,也有研究将非视觉研究与视觉问题^[32-33,38]、热舒适问题^[39]或能耗问题^[36]结合讨论,这对办公光环境设计实践更具指导意义。

3.3 医疗环境

20 世纪初人们便开始关注天然光的疗愈作用,并将日光疗法与医疗建筑设计结合,如帕米欧疗养院(Paimio Sanatorium)。天然光可以直接对患者康复效果产生影响,也可以通过影响患者的睡眠质量、情绪、压力从而间接与康复效果建立关联^[42]。Esther I. Bernhofer 研究发现,住院患者暴露在光照水平不足的环境时,无法实现昼夜节律同步;而疼痛患者暴露在光照水平较高的环境时,通常较少感到疲劳,且其总体情绪障碍指标较低^[43]。相关研究通过分析长达 15 年的住院数据发现,与住在近门病床的患者相比,住在靠窗病床的患者的住院时间较短,这很有可能与病房内天然光的分布特征有关^[44]。

在具体的空间变量方面,多项研究进行了深入的探讨^[42,45-51](表1),其中病房朝向、病房空间布局、窗墙比、窗地比、窗户位置、室内表面反射率、视线方向、视点与窗户的距离对非视觉效应有显著影响。相关研究将视觉与非视觉结合^[42,47-50],对医疗光环境设计实践更具指导意义。但医疗环境的非视觉光环境设计需具体考虑不同的疾病类型,因为天然光对于某些疾病有负面作用,如急性精神病^[52]等。

3.4 其他场景

部分空间场景的研究数量有限,但在一定程度上也能反映这些场景的天然光环境非视觉健康需求和非视觉健康设计的可能性。在居住空间方面,John Mardaljevic 等^[53]构建了一个评估住宅非视觉效应的模型并进行了一系列初步实验,结果显示靠近窗户的位置或有天窗的房间的天然光昼夜节律刺激潜力较大;洛桑联邦理工学院(Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne)的一项研究评估了波士顿(Boston)典型排屋的天然光昼夜节律刺激潜力,并分析了可能促进昼夜节律的设计方法^[54];Jixin Liu 等^[55]利用计算机模拟研究了湘西传统民居的窗墙比和室内表面反射率对非视觉效应的影响,发现室内表面反射率起到关键作

用;单泓景^[56]以南京的老年公寓为研究对象,采用现场实测和计算机模拟结合的方法对其天然光的非视觉效应进行评估。此外,吴蔚等^[57]利用自研工具对一处由厂房改造的办公空间进行采光研究,并提出相应的采光优化方案。开罗大学(Cairo University)的一项研究通过分析历史建筑中人在天然光下的情绪等主观反应,为天窗修缮工作提供建议^[58]。

另有部分研究未限定明确的空间场景,但也通过现场实测、缩小等比模型实测和模拟等方法研究了楼距、窗墙比、室内表面颜色、室内表面反射率、视线方向、视点与窗户的距离、遮阳位置等空间变量对非视觉效应的影响^[59-60];还有部分研究考虑了人工照明^[59-60],具有探索性。

3.5 空间场景和空间变量研究总结

天然光非视觉研究主要集中在办公、医疗和校园环境,尤以办公场景最为常见。究其原因这是 3 类场景的日间使用时间长,受光影响大,研究价值高。不同场景下影响非视觉效应的空间变量存在差异,主要由于不同场景的基本功能需求不同(如教室使用人群的视线方向较固定,而办公空间、住宅的较灵活),以及使用人群的感受差异(如青少年对光更敏感,而老年人敏感度较低)。

国际照明协会^[61]、Parisa Khademagha 等^[62]、Kyle Konis^[63]总结和分析了影响非视觉效应的天然光要素,包括光谱、光强、照射方向、暴露时间、暴露时长和暴露历史。其中,前 3 项为天然光本身的特征,后 3 项为时间特征。在具体设计层面,根据前文所述,对建筑天然光环境非视觉效应具有显著影响的空间变量可归纳为 5 类:城市设计、空间形体、控光界面、室内属性和视点特征(图 1),这些空间变量主要通过影响天然光本身的特征进而影响非视觉效应。

城市设计是天然光环境设计的第一步。采光口与外部遮挡物之间的距离会直接影响室内接收到的日光量,而传统间距规范大多侧重于视觉任务,忽视了非视觉需求。地面、植物及周边建筑表面等城市环境特征也会间接改变室内光谱特征。空间形体会影响天然光在室内的分布,合理的空间布局是促进使用者非视觉健康的前提。东西朝向的空间具有较大的非视觉潜力,但眩光问题突出;进深则影响满足非视觉需求强度的天然光的可达位置。另外人们在空中花园、庭院和廊道等室外和半室外空间更容易获得天然光照射,因此可补偿在室内缺失的非视觉效益。控光界面如窗、洞口、遮阳系统是控制天然光进入室内的关键环节。窗的位置、类型、尺寸、玻璃性能等会直接影响进光量与光谱特征。遮阳构件亦影响光的强度、方向与光谱,其形成的光影效果对非视觉效应的影响仍有待深入研究。控光界面设计还需统筹眩光控制、热舒适、能耗与景观视野。室内属性对非视觉健康的影响主要体现在室内表面特征上。另外,家具布置会改变受光方向,进而影响人眼对光的接收。视点特征会直接影响照射入人眼的光线情况,空间光环境特征的呈现也随视点特征的变化而转变,故研究将视点特征归入空间变量。其中,视线方向、视点与采光口的距离对非视觉效应的影响较大。

除空间变量外,气候条件如地理位置、天空类型和季节

也会影响天然光的光谱和强度^[35]，因此常被纳入研究。时间因素也可能影响非视觉效应，部分研究已采用动态的评价指标^[20]。总体来看，空间变量、气候条件和时间因素与天然光要素之间存在着复杂的潜在关系，共同影响建筑空间的非视觉天然光环境，对此文章构建了关系图谱（图2），相关研究变量的筛选应多方面考虑。

4 非视觉天然光环境量化指标与标准

根据影响非视觉效应的天然光要素的分类，非视觉天然光环境的量化指标主要分为仅涉及天然光特征的静态指标和结合时间特征的动态指标^[64]（表2）。在静态指标方面，最常采用的是生物节律刺激值（Circadian Stimulus, CS）和黑视素等效照度（Equivalent Melanopic Lux, EML）。CS 范围为 0 到 0.7，已有研究表示，CS 达到 0.3 时人体便可获得较好的昼夜节律刺激^[5]，因此光环境评价中常以此为最低阈值。EML 是 WELL 建筑标准（WELL Building Standard）对光环境评价采用的主要量化指标，根据 WELL V2(Q4 2022) 的评价标准，当符合增强天然采光性能标准的空间在 9: 00—13: 00 的 EML 达到 120 lux 或 180 lux 时，可分别获得 1 分或 3 分；当未符合增强天然采光性能标准的空间在 9: 00—13: 00 的 EML 达到 150 lux 或 240 lux 时，可分别获得 1 分或 3 分。国际照明委员会发布的标准（CIE S 026: 2018）中引入了黑视素等效日光照射度（Melanopic EDI）这一新指标，在近几年的相关研究中已有应用^[20,48]。WELL 标准也表示 Melanopic EDI 可替代 EML 进行量化评价，如 EML 为 240 lux 相当于 Melanopic EDI 为 218 lux。相关照明、神经学、睡眠与昼夜节律研究领域的专家则认为日间室内的 Melanopic EDI 应达到 250 lux，并优先采用天然采光达到这一阈值^[65]。在动态指标方面，最常采用的是生物节律刺激自主性（Circadian Stimulus Autonomy, CSA）和非视觉直接反应（Direct Response, R_D ）。CSA 是基于天然光自主性（Daylight Autonomy, DA）的概念衍生出的指标，而 DA 已在天然光度量上得到广泛应用。 R_D 则是一个相对值（0~1），计算基础是 Maria L. Amundadottir 等^[12]提出的非视觉直接反应模型（Non-visual Direct-response, nvR_D ），该预测模型同时考虑了天然光本身的特征、暴露的时间序列、时长和历史，具有较好的全面性，但其准确性和严谨性仍需考量。由于对动态指标的探索仍处于起步阶段，阈值标准尚未达成共识，目前有研究提出 R_D 的最低阈值应为 4~4.2^[12]。需要注意的是，以上的“照度”均为入眼方向的垂直照度。

除此之外，还有一类指标从心理与行为维度上出发，针对非视觉对情绪、认知等方面的影响进行量化评估^[31,34]（表2）。这一维度的量化存在一定难度，因为指标的变化可能受到视觉因素的影响，且难以估计影响的程度。目前相关研究较少，且针对非视觉健康的设计要求也尚未形成统一标准。

5 非视觉天然光环境主要研究方法

非视觉天然光环境的主要研究方法可分为现场实测和模拟实验。现场实测通常包括对室内外照度、光谱功率分布、室内外相关色温或色品坐标、室内各材料的光学性质（表面反射率、玻璃透射率等）等的记录，将实测数据代入计算公式可得到非视觉效应的静态和动态量化指标。也可在现场采用心理主观评价和认知评价工具，如评价情绪的正负性情绪量表（Positive and Negative Affect Schedule, PANAS），评价警觉性的卡罗林斯卡嗜睡量表（Karolinska Sleepiness Scale, KSS），评价认知能力、警觉性和注意力的 GO/NOGO 测试和精神运动警觉性测试（Psychomotor

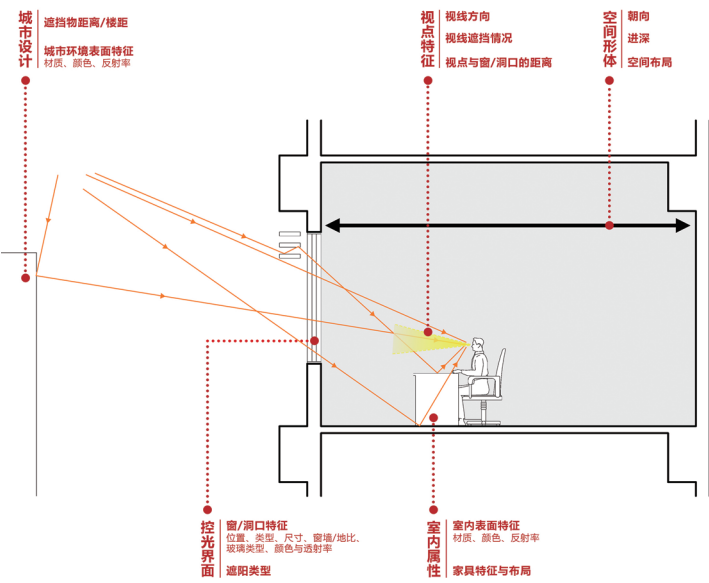


图1 5类对建筑天然光环境非视觉效应具有显著影响的空间变量示意图
Fig.1 Schematic diagram of five spatial variables that significantly affect the non-visual effects of daylight in buildings

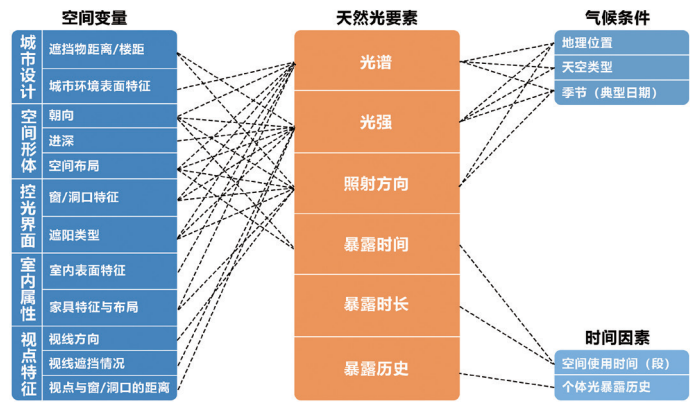


图2 空间、气候与时间和影响非视觉效应的天然光要素之间的潜在关系
Fig.2 Potential relationships among spatial, climatic, temporal factors and daylight elements that affect non-visual effects

表 2 非视觉效应的量化指标
Tab.2 Quantitative indicators of non-visual effects

指标类别	非视觉效应指标	说明
静态指标	生物节律刺激值 (CS)	评估光对褪黑素的抑制能力
	生物节律照度 (Circadian Light, CL _A)	反映单位光照对非视觉通道的激活程度
	黑视素等效照度 (EML)	基于 ipRGCs 对光的响应函数进行加权换算的照度值
	黑视素等效日光照度 (Melanopic EDI)	基于 D65 标准日光光谱进行规范换算的标准化照度值
	相对黑视素效能系数 (Relative Melanopic Efficacy Coefficient, RME)	表示相对于标准光源激发黑视素通路的效率
	昼夜节律频率 (Circadian Frequency, CF)	特定日分析周期内视向量达到或超过最低节律刺激阈值的年度达标天数占比
	有效节律刺激区域百分比 (Circadian Effective Area, CEA)	每日某空间内满足或超过最低节律刺激阈值的面积所占的百分比
动态指标	生物节律刺激自主性 (CSA)	全年空间满足某个节律刺激最低阈值并持续一定时间的天数百分比
	非视觉累积反应 (R ₀)	反映在某一时刻, 基于过去一段时间暴露历史的非视觉综合反应强度
	全年刺激频率 (Stimulus Frequency, SF)	量化某一时间窗口内的光照刺激有效性
	光照暴露累积量 (Light Exposure Accumulation, LEA)	反映个体在一段时间内受到的总光照量
心理与行为指标	情绪正负性	描述情绪体验的积极或消极程度
	主观困倦程度	主观困倦程度高时, 警觉性低
	总体准确率 (Overall Accuracy, OA) 和平均反应时间 (Mean Response Time, RT)	平均反应时间越短、总体准确率越高反映警觉性、注意力水平和认知能力越高
	匹兹堡睡眠质量指数 (Pittsburgh Sleep Quality Index, PSQI)	一个月内睡眠质量的主观评价
	总睡眠时间、估计的入睡和醒来时间、睡眠效率等睡眠指标	反映客观的睡眠质量

Vigilance Task, PVT), 评价认知能力的战略管理模拟 (Strategic Management Simulation, SMS) 等, 以及测量脑电、心率、核心体温等^[3]生理数据, 进行心理与行为评价。部分实测通过搭建实验室进行, 如全尺寸实验室和缩小等比模型。但从目前的研究来看, 现场实测具有很大局限性: 一是现实的天然光条件不稳定, 变化大, 限制了实验的可重复性; 二是现实的天然光条件控制变量较为困难, 无法验证某些假设; 三是实测耗时耗力, 成本高昂, 长期的现场实测可能对空间使用者的工作与生活造成不便。

而模拟实验可解决这些问题。模拟实验包括常规的计算机软件模拟和影像媒介模拟。目前常规的计算机模拟软件包括基于 Radiance 平台的动态光环境模拟软件 ALFA、Lark 和 DAYSIM, 基于 Grasshopper 平台的 Honeybee、照明设计软件 DIALux 等, 这些模拟软件的可靠性已被大量研究验证。常规的计算机软件模拟方便快捷, 适用场景较多, 但无法评价心理与行为等维度上的非视觉效应。

多项研究证明, 在人因环境实验中照片、视频、立体图像、VR 技术 (Virtual Reality) 等影像媒介在许多方面与现实环境具有很高的 consistency^[66], 可替代真实光环境进行相关实验。VR 借助头戴式显示器等设备给使用者创造了一个可沉浸式体验和多维度交互的虚拟空间, 配合心理主观评价、认知评价工具和生理数据测量, 可从心理与行为维度评价非视觉效应^[58]。

6 结语

文章通过系统梳理和分析近年来发表的重要文献, 总结了不同空间场景中空间变量对天然光非视觉效应的影响, 将空间变量归纳为城市设计、空间形体、控光界面、室内属性和视点特征 5 类, 结合气候条件、时间因素构建关系图谱, 并对现有量化指标、标准以及主要研究方法进行了适用性和局限性的分析。为使文章更聚焦于具体的建筑设计, 本研究筛选的文献数量有限, 未来相关综述可适当扩大文献筛选范围, 使结论更加全面。

目前, 具体空间变量对非视觉天然光环境的影响在相关研究中已基本达成共识, 从建筑设计层面对非视觉天然光环境进行改善是可行且有效的。非视觉健康导向下的建筑设计不仅需要从 5 类空间变量入手操作, 更要考虑空间场景的适配性。非视觉健康导向下建筑设计的关键在于“平衡”: 任务驱动和光舒适下的视觉要求与非视觉健康需求之间的平衡、天然采光与人工照明之间的平衡、空间基本功能和其他物理环境要求与非视觉光环境需求之间的平衡。而实现平衡的关键是在设计阶段和建成环境评价中建立综合性的评价体系, 或是将非视觉健康的空间要求和量化指标融入其他成熟的评价体系中。

当前建筑天然光非视觉效应的研究仍处于初期阶段, 尚缺乏统一的评价体系和标准, 特别是在动态及心理行为评价方面存在不足。多数研究仍采用静态方法, 暴露历史、时间

与时机的研究尚不深入,对动态暴露的机制认知不清。未来研究应结合动态与静态评价标准以及多种研究方法,全面评估非视觉效应,推动引入动态暴露机制,并将研究拓展至更多空间场景。完善天然光环境非视觉效应评价体系并融入相关设计策略,将有助于构建健康、绿色、人性化的建筑环境。

注:图片均为作者自绘。

参考文献:

- [1]BERSON D M, DUNN F A, TAKAO M. Phototransduction by retinal ganglion cells that set the circadian clock[J]. Science, 2002, 295 (5557): 1070-1073.
- [2]WIRZ-JUSTICE A, SKENE D J, MÜNCH M. The relevance of daylight for humans[J]. Biochemical Pharmacology, 2021, 191: 114304.
- [3]侯丹丹, 罗明, 郝洛西, 等. 光的非视觉生物效应评价方法及其质量评估模型的构建 [J]. 照明工程学报, 2024, 35 (3): 1-15.
- [4]何美亨, 汝涛涛, 李乐, 等. 日间光暴露对睡眠的优化效果及作用机制 [J]. 心理科学进展, 2023, 31 (9): 1698-1713.
- [5]FIGUEIRO M G, STEVERSON B, HEERWAGEN J, et al. The impact of daytime light exposures on sleep and mood in office workers[J]. Sleep Health, 2017, 3 (3): 204-215.
- [6]BOUBEKRI M, HULL R B, BOYER L L. Impact of window size and sunlight penetration on office workers' mood and satisfaction: A novel way of assessing sunlight[J]. Environment and Behavior, 1991: 23 (4): 474-493.
- [7]李芸, 汝涛涛, 李丝雨, 等. 环境光照对情绪的影响及其作用机制 [J]. 心理科学进展, 2022, 30 (2): 389-405.
- [8]WEBB A R. Considerations for lighting in the built environment: Non-visual effects of light[J]. Energy and Buildings, 2006, 38 (7): 721-727.
- [9]汝涛涛, 李芸, 钱柳, 等. 环境光照的认知功效及其调节因素与作用机理 [J]. 心理科学进展, 2019, 27 (10): 1687-1702.
- [10]DOLGIN E. The myopia boom[J]. Nature, 2015, 519: 276-278.
- [11]BELLIA L, PEDACE A, BARBATO G. Lighting in educational environments: An example of a complete analysis of the effects of daylight and electric light on occupants[J]. Building and Environment, 2013, 68: 50-65.
- [12]AMUNDADÓTTIR M L, ROCKCASTLE S, KHANIE M S, et al. A human-centric approach to assess daylight in buildings for non-visual health potential, visual interest and gaze behavior[J]. Building and Environment, 2017, 113: 5-21.
- [13]ACOSTA I, CAMPANO M Á, LESLIE R, et al. Daylighting design for healthy environments: Analysis of educational spaces for optimal circadian stimulus[J]. Solar Energy, 2019, 193: 584-596.
- [14]BALOCH R M, NICHOLE MAESANO C, CHRISTOFFERSEN J, et al. Daylight and school performance in European schoolchildren[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2021, 18 (1): 258.
- [15]ESCOBAR I, ORDUNA-HOSPITAL E, APORTA J, et al. Efficient daylighting: the importance of glazing transmittance and room surface reflectance[J]. Buildings, 2024, 14 (10): 3108.
- [16]陈启宁, 吴蔚. 基于视觉与非视觉效应的教室采光多目标优化 [J]. 照明工程学报, 2020, 31 (6): 61-68, 80.
- [17]徐臻杰. 健康建筑导向下深圳地区高校普通教室自然光环境研究 [D]. 深圳: 深圳大学, 2022.
- [18]李丽妹. 苏州地区中小学教室光环境非视觉效应评估与优化研究 [D]. 苏州: 苏州大学, 2023.
- [19]DHARANI R, LEE C F, THENG Z X, et al. Comparison of measurements of time outdoors and light levels as risk factors for myopia in young Singapore children[J]. Eye, 2012, 26 (7): 911-918.
- [20]郝慧羽, 徐俊丽, 高雨晴, 等. 底层教室全年光环境的视觉与非视觉效应评估——基于 Lark 2.0 光谱模拟工具 [J]. 建筑科学, 2024, 40 (4): 271-279.
- [21]NORTON T T, SIEGWART JR J T. Light levels, refractive development, and myopia—a speculative review[J]. Experimental Eye Research, 2013, 114: 48-57.
- [22]KIM S, CASEMENT M D. Promoting adolescent sleep and circadian function: A narrative review on the importance of daylight access in schools[J]. Chronobiology International, 2024, 41 (5): 725-737.
- [23]DONG Y, ZHANG X. Study on the effect of awakening daylight in dormitories on morning alertness, mood, fatigue and sleep quality of college students[J]. Building and Environment, 2021, 203: 108060.
- [24]BOUBEKRI M, CHEUNG I N, REID K J, et al. Impact of windows and daylight exposure on overall health and sleep quality of office workers: a case-control pilot study[J]. Journal of Clinical Sleep Medicine, 2014, 10 (6): 603-611.
- [25]WANG N, BOUBEKRI M. Design recommendations based on cognitive, mood and preference assessments in a sunlit workspace[J]. Lighting Research & Technology, 2011, 43 (1): 55-72.
- [26]BELLIA L, PEDACE A, BARBATO G. Daylighting offices: A first step toward an analysis of photobiological effects for design practice purposes[J]. Building and Environment, 2014, 74: 54-64.
- [27]DANELL M, ÁMUNDADÓTTIR M L, ROCKCASTLE S. Evaluating temporal and spatial light exposure profiles for typical building occupants[C]//Proceedings of the 11th Annual Symposium on Simulation for Architecture and Urban Design. San Diego: Society for Modeling and Simulation International, 2020.
- [28]HRAŠKA J. Nonvisual aspects of daylight in the built environment[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. IOP Publishing, 2022, 1252 (1): 012063.
- [29]HRAŠKA J, HARTMAN P. Colour of external shading obstacles and circadian stimulus of indoor daylighting[J]. Advanced Materials Research, 2014, 899: 283-287.
- [30]HARTMAN P, HANULIAK P, MAŇKOVÁ L, et al. The effect of the colour selection for internal surfaces on non-visual daylight human response[J]. Advanced Materials Research, 2014, 1057: 231-240.
- [31]CHEN X, ZHANG X, DU J. Glazing type (colour and transmittance), daylighting, and human performances at a workspace: A full-scale experiment in Beijing[J]. Building and Environment, 2019, 153: 168-185.
- [32]ROCKCASTLE S, ÁMUNDADÓTTIR M L, ANDERSEN M. The case for occupant-centric daylight analytics: a comparison of horizontal illumination and immersive view[C]//Building Simulation. Rome: International Building Performance Simulation ASSOC-IBPSA, 2019.
- [33]POTOČNIK J, KOŠIR M. Influence of commercial glazing and wall colours on the resulting non-visual daylight conditions of an office[J]. Building and Environment, 2020, 171: 106627.
- [34]BOUBEKRI M, LEE J, MACNAUGHTON P, et al. The impact of optimized daylight and views on the sleep duration and

- cognitive performance of office workers[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2020, 17 (9) : 3219.
- [35]ZENG Y, SUN H, LIN B, et al. Non-visual effects of office light environment: Field evaluation, model comparison, and spectral analysis[J]. Building and Environment, 2021, 197: 107859.
- [36]ZENG Y, SUN H, LIN B. Optimized lighting energy consumption for non-visual effects: A case study in office spaces based on field test and simulation[J]. Building and Environment, 2021, 205: 108238.
- [37]ALTENBERG VAZ N, INANICI M. Syncing with the sky: daylight-driven circadian lighting design[J]. Leukos, 2021, 17 (3) : 291-309.
- [38]POTOČNIK J, KOŠIR M. Influence of geometrical and optical building parameters on the circadian daylighting of an office[J]. Journal of Building Engineering, 2021, 42: 102402.
- [39]GKOUVELOU E, MOSKOVELI D, KHANIE M S. Non-visual daylight potential in offices: a parametric study[C]//IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Bristol: IOP Publishing, 2023, 1196 (1) : 012081.
- [40]李翔, 陈滨. 北向单侧采光办公房间的非视觉效应研究 [J]. 建筑科学, 2018, 34 (2) : 34-41.
- [41]陈晓东. 基于非视觉效应的办公空间天然光与人工光集成应用研究 [D]. 北京: 清华大学, 2023.
- [42]GHARAVEIS A, SHEPLEY M M C, GAINES K. The role of daylighting in skilled nursing short-term rehabilitation facilities[J]. HERD: Health Environments Research & Design Journal, 2016, 9 (2) : 105-118.
- [43]BERNHOFER E I, HIGGINS P A, DALY B J, et al. Hospital lighting and its association with sleep, mood and pain in medical inpatients[J]. Journal of Advanced Nursing, 2014, 70 (5) : 1164-1173.
- [44]PARK M Y, CHAI C G, LEE H K, et al. The effects of natural daylight on length of hospital stay[J]. Environmental Health Insights, 2018, 12: 1-7.
- [45]ACOSTA I, LESLIE R, FIGUEIRO M G. Analysis of circadian stimulus allowed by daylighting in hospital rooms[J]. Lighting Research & Technology, 2017, 49 (1) : 49-61.
- [46]KONIS K. Field evaluation of the circadian stimulus potential of daylit and non-daylit spaces in dementia care facilities[J]. Building and Environment, 2018, 135: 112-123.
- [47]ELSAIED N, RAKHA T. A framework to simulate the non-visual effects of daylight on the cognitive health of mild cognitive impairment (MCI) people[C]//ASHRAE Topical Conference Proceedings. American Society of Heating, Refrigeration and Air Conditioning Engineers, Inc. Britton: IBPSA Publications, 2020.
- [48]ENGLEZOU M, AIMILIOS M. Evaluation of visual and non-visual effects of daylighting in healthcare patient rooms using climate-based daylight metrics and melanopic metrics[J]. E3S Web of Conferences, 2022, 362: 1-8.
- [49]蒋靖才. 南京地区医院建筑视觉与非视觉效应的天然采光研究 [D]. 南京: 南京大学, 2018.
- [50]曹锦波. 广州地区综合性医院病房视觉与非视觉效应采光研究 [D]. 广州: 广州大学, 2020.
- [51]姜巍. 寒地医院产科病房的非视觉效应天然光环境研究 [D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2022.
- [52]AGUGLIA A, BORSOTTI A, CUNIBERTI F, et al. The influence of sunlight exposure on hospitalization in emergency psychiatry[J]. Chronobiology International, 2017, 34 (10) : 1413-1422.
- [53]MARDALJEVIC J, ANDERSEN M, ROY N, et al. Daylighting metrics for residential buildings[C]//Proceedings of the 27th Session of the CIE. Sun City, South Africa: CIE Central Bureau, 2011.
- [54]ANDERSEN M, GOCHENOUR S J, LOCKLEY S W. Modelling 'non-visual' effects of daylighting in a residential environment[J]. Building and Environment, 2013, 70: 138-149.
- [55]LIU J, LI Z, ZHANG Z, et al. Evaluation and Optimization of Interior Circadian Daylighting Performance for the Elderly in Traditional Dwellings: A Case Study in Western Hunan, China[J]. Sustainability, 2024, 16 (9) : 3563.
- [56]单泓景. 养老建筑天然光非视觉效应研究 [D]. 南京: 南京大学, 2017.
- [57]吴蔚, 陈启宁. 基于视觉与非视觉效应的旧工业厂房改造采光设计研究 [J]. 照明工程学报, 2022, 33 (5) : 205-213.
- [58]MARZOUK M, ELSHARKAWY M, MAHMOUD A. Analysing user daylight preferences in heritage buildings using virtual reality[J]. Building Simulation, 2022, 15 (9) : 1561-1576.
- [59]CAI W, YUE J, DAI Q, et al. The impact of room surface reflectance on corneal illuminance and rule-of-thumb equations for circadian lighting design[J]. Building and Environment, 2018, 141: 288-297.
- [60]HARTMAN P, MAŇKOVÁ L, HANULIAK P, et al. Evaluation of Indoor Daylight Focused on the Human Circadian System[J]. Applied Mechanics and Materials, 2019, 887: 511-518.
- [61]VAN BOMMEL W J M, VAN DEN BELD G J. Lighting for work: a review of visual and biological effects[J]. Lighting Research and Technology, 2004, 36 (4) : 255-266.
- [62]KHADEMAGHA P, ARIES M B C, ROSEMAN A L P, et al. Implementing non-image-forming effects of light in the built environment: A review on what we need[J]. Building and Environment, 2016, 108: 263-272.
- [63]KONIS K. A novel circadian daylight metric for building design and evaluation[J]. Building and Environment, 2017, 113: 22-38.
- [64]蒋靖才, 吴蔚. 采光照明非视觉效应的评价方法综述 [J]. 照明工程学报, 2018, 29 (3) : 129-136, 140.
- [65]BROWN T, BRAINARD G, CAJOCHEN C, et al. Recommendations for healthy daytime, evening, and nighttime indoor light exposure[J]. PLOS Biology, 2020, 20 (3) : e3001571.
- [66]MOSCOSO C, MATUSIAK B, SVENSSON U P, et al. Analysis of stereoscopic images as a new method for daylighting studies[J]. ACM Transactions on Applied Perception (TAP), 2015, 11 (4) : 1-13.

作者简介:

孙国栋 / 1999 年生 / 男 / 广东湛江人 / 硕士 / 华南理工大学建筑学院 (广州 510641) / 专业方向为公共建筑设计

杜宏武 (* 通信作者) / 1970 年生 / 男 / 河南西平人 / 博士 / 华南理工大学建筑学院, 亚热带建筑与城市科学全国重点实验室 (广州 510641) / 教授 / 研究方向为高密度环境、住区及城市公共空间 / E-mail: philipdu@126.com