中图分类号：TU986
文献标识码：A
文章编号：1673-1530(2017)04-0028-06
DOI: 10.14085/j.fjyl.2017.04.0028.06
收稿日期：2017-01-19
修回日期：2017-04-14

面向城市空间的实景视觉体验评价技术

In-situ Assessment of Visual Experience for Urban Space

陈筝 杨云 邱明 罗烨 刘颂
CHENG Zheng, YANG Yun, QIU Ming, LUO Ye, LIU Song

摘要：虽然环境体验在开放空间设计中越来越受到重视，但是准确的描述和测量环境体验却较为困难。本研究介绍了一种基于实景（in situ）体验中的实时（real time）心理物理反馈数据的视觉及综合体验评价新技术，及其在规划设计评价中的应用。研究采用实验手段，利用便携式生物反馈仪和 GPS 采集人在实景体验中的心理物理反馈和空间位置移动数据，并采用情感计算（affective computing）技术对生理指标进行加工和体验预测。通过整合情感数据和空间数据的情感制图（affective mapping）技术，实现对建成环境体验的实景视觉体验评价，识别激发负面体验的环境因素并进行改进设计。

关键词：心理物理；视觉体验评价；情感计算；皮电

基金项目：国家自然科学基金青年基金“基于环境实景感知实证模型的景观视觉规划设计方法研究”（编号 51408429）；城市中国计划“人本尺度的城市空间品质测度——基于街景大数据的机器学习与可穿戴设备实景感知的整合评价”；中央高校基本科研业务费专项资金“基于神经生物测量的环境情绪地图分析技术”

Abstract: Environmental experience draws more and more attention these days, however accurate description and measurement remain tough. This study presents a new visual and comprehensive experience evaluation method based on real time and in-situ psychophysical feedback data and its application in planning and design evaluation. In this study, the physical and psychological feedback and spatial position movement of the human experience were collected by portable biofeedback and GPS devices and processed to make experience prediction using affective computing technology. By integrating the emotional data and the spatial data, with the in-situ and real time visual experience of the built environment evaluated, the environmental factors that stimulate the negative experience can be identified and specific improving strategy could be produced.

Keywords: physiological psychology; visual experience assessment; affective computing; skin conductance

Fund Items: Natural Science Foundation of China “An Evidence-based Model of In Situ Environmental Perception and Its Application to Visual Resource Analysis, Management and Design” (No.51408429); Urban China Initiative “Measuring the Quality of Urban Space via Human-centered Scale: Integrated Assessment via Streetscape Big-data Machine Learning and Wearable In-situ Sensing” ; The Fundamental Research Funds for the Central Universities “Affective Mapping Method Based on Neurobiological Measures”

1 背景

随着社会发展和人民生活水平提高，近期城市建设工作重点逐渐开始从城市粗放增长转移到提高城市宜居性上面来。2017 年 2 月出台的《中共中央国务院关于进一步加强城市规划建设管理工作的若干意见》中明确提到 [1]，城市规划建设管理的总体目标为实现城市有序建设、适度开发、高效运行，努力打造和谐宜居、富有活力、各具特色的现代化城市，让人民生活更美好。由此，追求以人为本，重视城市风貌和环境质量是现阶段我国城市发展的核心战略。

改善城市居民的环境体验对于提高城市宜居性，促进居民健康有重要作用。城市在为其居民提供优质充足的教育、经济、医疗设施而成功改善人们生理健康状况的同时，却无法

陈筝 /1983 年生 / 女 / 四川自贡人 / 博士 / 同济大学景观学系助理教授、硕士生导师 / 研究方向为健康设计（上海 200092）

CHEN Zheng, who was born in 1983 in Zigong Sichuan, is an assistant professor and master supervisor in the Department of Landscape Studies in College of Architecture and Urban Planning, Tongji University. Her research focuses on health design(Shanghai 200092).

杨云 /1993 年生 / 女 / 上海人 / 同济大学景观学系本科生（上海 200092）

YANG Yun, who was born in 1993 in Shanghai, is a student in the Department of Landscape Studies in College of Architecture and Urban Planning, Tongji University. Her research focuses on landscape planning and design (Shanghai 200092).

提供对其居民心理健康水平提升的有效支持。因此，对于如何使城市在其自然环境劣势的情况下创造宜居性以提升人们的精神健康水平值得研究。托斯特等指出 [2]，城市环境对心智健康的影响主要来源于两大类心理压力源：一个是高复杂度、高异质性、高变化率的城市景观及其中有害的社会环境，另一个是被迫缩短的社会距离以及对个人空间的入侵。

然而，环境体验如何测量评价却很困难。人类环境体验有情感、感受、认知和行为等多个方面，其中如何描述和测量人们在实景环境中实时体验和情感最为困难 [3]。在早期的实验研究中，研究者主要依靠照片的主观偏好打分和统计分析来了解使用者的体验 [4-5]。一方面由于审美感受本身的主观性和隐晦特点，如何相对科学客观地描述审美体验一直都是审美价值评价的难点；另一方面，视觉分析主要依赖主观回忆描述，研究表明，同样信息置于不同环境往往会给人完全不同的心理感受，但这种影响往往是发生在潜意识下的，不能被感受者充分认知。通过打分所得到的信息不能客观、准确、全面地反映人在实地实景实时的综合视觉感受，因而导致感受信息采集失真。再者，照片打分的研究结论很抽象，难以针对具体景观规划设计予以实际指导。

2 国内外研究现状

国内外关于景观体验的研究主要围绕一个核心问题展开：在个体差异之外，人们对于环境的审美偏好是否具有某种普遍规律性？研究这个问题的一个难点是，即使人们审美偏好确实具有一定的规律性，但受测者自己却很难意识到，所以往往无法准确描述出来。这种现象在心理学上称之为“隐形认知(implicit cognition ）”，往往需要通过一些特殊方法间接测量，比如通过观测人们反应速度的内隐联想测验法（Implicit Association Test）等 [6]。

由于景观心理感受很难测量，大部分研究仅限于理论阶段，实证研究比较匮乏。实证研究相对发展成熟的，主要集中在以照片评价和因子分析为主的视觉评价技术，由 L.B. 利奥波德 [7]、小埃尔伍德・谢弗 [8]、小 R. B. 利顿 [9] 以及开普兰夫妇 [10] 等一系列学者，在 20 世纪 50—60 年代发展完善。该技术主要通过心理学的 Likert 梯度量表，对筛选的照片进行打分，从而得到受测者对于每张照片的心理感受一个量化指标。除了主流的因子分析外，也有学者采用多元线性回归分析 [4]、线性变换 [7] 以及对不同背景人群（如年龄、性别、社会经济特征等）的 ANOVA 组间分析 [11] 等方法来探索影响人们环境审美偏好的因素。视觉评价的技术路线后来为美国国家森林公园局所采用，并在此基础上进行进一步深入研究，并在 70 年代建立起一套相对完整的森林公园视觉定量的评价技术和理性规划方法 [12]，并在 20 世纪 80 年代后期被引入中国 [13]。

国内的景观视觉研究一方面来自于深受诗文、绘画影响下中国古典园林对空间动态音韵感的追求 [14]，及随之产生的动态视觉分析及设计手法，如借景、框景、对景等 [15]；一方面来自于风景名胜区规划的典型景观分类和视觉评价等逻辑分类方法 [16]。在 20 世纪 80 年代美国森林局专家经验法引入后，学者们结合传统视觉分析方法，进一步发展出 BIB-LCJ 审美评价法 [17] 、等距离专家组目视评测法 [18]、视廊因子评价法 [19] 等等一系列适应中国审美心理的专家经验评价方法。

综合来讲，目前以视觉为核心的景观感受研究途径可能存在以下问题：1）视觉分析得到的审美偏好规律往往太过宽泛而缺乏针对性，结论很难被直接应用于个体差异很大的具体项目中；2）完全依靠被测者的主观判断和描述，但被测者在测试过程中较难保持前后标准一致，从而导致误差较大；3）完全依靠照片，不能反映非视觉的其他景观感受途径，如嗅觉、听觉等；4）人们对于环境的心理感受是多维度的，单一的审美偏好不能很好地反映人们复杂的认知过程和心理感受 。

随着心理物理学和认知神经科学的发展，新的技术手段，如脑电、皮电、心电、肌电等，为传统的主观回忆和评价打分提供了新的可能。近年来，随着测量技术的发展和普及，研究者利用心电仪、肌电仪、脑波仪和眼动仪等若干仪器，可以实时记录环境中人对于建筑、开放空间、绿色植物等多种环境要素的反应 [4,20-21]，可以实时捕捉并观察被测者对于不同建成环境的喜好程度及其他心理反应，还能进一步分析人的空间认知过程，比如是否迷路等。这些技术的引入突破了原有仅能使用照片打分、认知地图和问卷访谈等间接方式来探索认知过程的方法，使实时采集人实景实地的感受信息成为可能。随着神经科学研究的推进，发现人的各种思维情感活动常常和特定的脑电波信号相关联。通过对环境视觉认知者脑电信号的采集，可以实时捕捉观察被测者对于建筑、开放空间、绿色植物等多种不同特征环境的脑电活动 [22-24]。在环境设计领域，已运用于基于驾驶员心理的公路景观设计 [25]、基于特殊人群环境认知的城市设计 [26-29]、基于景观感受的植物小环境设计 [30]、绿道设计 [31] 等领域。

3 研究方法

本研究通过心理物理手段利用便携式生物反馈仪，记录实景环境下人们的生理反应，包括脑电、心电、皮电、表情肌肌电、皮温、呼吸等，通过情感计算（affective computation）方法描述人的心理感受。本研究

邱明 /1993 年生 / 男 / 海南海口人 / 同济大学景观学系本科生（上海 200092）
QIU Ming, who was born in 1993 in Haikou, Hainan province, is a student in the Department of Landscape Studies in College of Architecture and Urban Planning, Tongji University. His research focuses on landscape planning and design(Shanghai 200092).

罗烨 /1984 年生 / 女 / 安徽寿县人 / 博士 / 同济大学软件学院助理教授 / 研究方向为计算机视觉、显著性检测和行为识别（上海 200092）

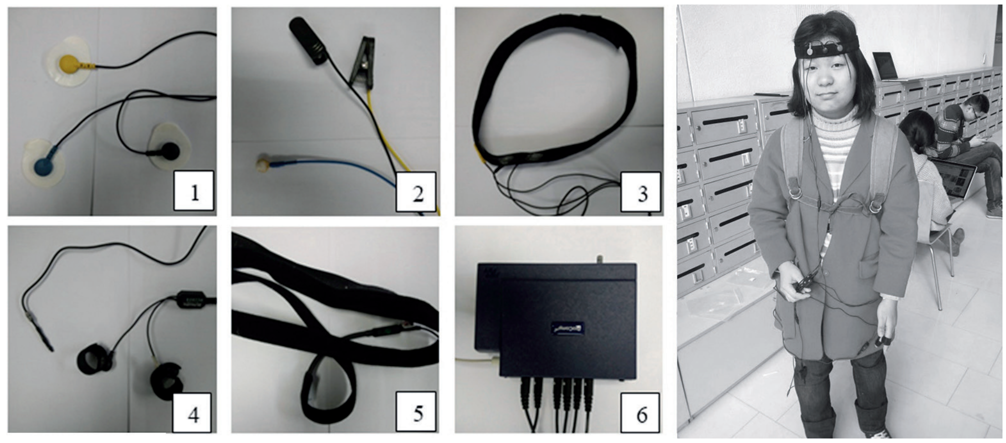
LUO Ye, who was born in 1984 in Shouxian Anhui, is an assistant professor in the School of Soft Engineering, Tongji University. Her research focuses on computer vision, saliency detection and behavior recognition (Shanghai 200092).

邀请了 4 位被试者在规定路线上行走 3 次，每一次中间给予一定休息时间。他们被要求以稳定的中等速度行走以将劳累影响降到最低。每一轮行走，被试者都头戴六通道 Procom Infiniti 仪器和 Garmin etrex20 GPS，并配以摄像记录，每个指标数据通过数据记录装置连接到电脑（图 1）。

实验路线位于上海同济大学本部校园，长约 15 分钟。路线被分为 8 个区段，其中包括开放场地、密集小巷、自然空间、硬质场地以及嘈杂交通道路的人行道等。每一段行走之后，被试者都需要对环境感受以及实验中他们注意到的各种可能引起情绪变化的因素或干扰进行回忆描述，并且对行走路线进行打分。在生理记录的同时，我们对全程行走过程都进行了录像记录。

在情感研究中，情感效价和情感唤醒度是两个非常重要的维度。本实验中，我们选用了 6 个生理指标（表 1），分别是心电、脑电、表情肌肌电、皮电、皮温和呼吸。其中，表情肌肌电（EMG）和呼吸（HR）可以反映人的情感效价（valence），即人在空间中的愉悦程度；皮电（EEG）和皮肤导电反应（SCR）可以反映情感唤醒度，即人对环境刺激的反应强度。

以皮电的数据处理为例，皮电数据包含了一个随基本生理变化而缓慢稳定变化的基础信号（Tonic Component）和一个实时响应外界环境刺激的间歇性信号（Phasic Component）。在本实验中，我们首先对皮电原始信号进行滤波降噪（高通滤波，低通滤波）。然后将与受外界刺激产生的情感变化不相关的基础信号（tonic，图 2-1 灰线）从中分离得到皮肤导电反应（skin conductance response，皮电导，图 2-2），反映了和情感密切相关的自主神经反应。



1

1 实验设备及佩戴外观：1）心电，2）脑电，3）表情肌肌电，4）皮温皮电，5）呼吸，6）放大器

The sensors of the experiemental device (1 EKG, 2 EEG, 3 EMG, 4 skin conducance and temperature, 5 respiration, 6 signal amplifier) and a pariticipant with the device

表 1 本实验采用的生理反馈数据及指标

Tab. 1 Physiological measures and indicators used in the experiment

生理数据	数据通道	计算指标	采样率	对应情绪
心电	A: ECG HR (smoothed)	心跳	1024	情绪效价
	A: ECG LF Total Power	In (LF/HF)	16	情绪唤醒
	A: ECG HF Total Power	In (LF/HF)	16	情绪唤醒
	A: ECG HR mean (bpm)	心跳	1024	情绪效价
	A: ECG peak freq. mean (Hz)	心跳	16	情绪效价
	A: ECG LF/HF (means)	In (LF/HF)	16	情绪唤醒
脑电	C: EEG ERP N400~700	EEG	256	情绪唤醒
表情肌肌电	D: EMG	EMG	256	情绪效价
	D: EMG mean (uV)	EMG	256	情绪效价
皮电	E: Skin Cond	皮电导	256	情绪唤醒
	E: Skin Cond mean (uS)		256	情绪唤醒
皮温	F: Temp	皮温	256	情绪唤醒
呼吸	G: Abd Resp	呼吸	256	情绪唤醒

4 研究发现

我们的初期实验表现出较好的实验结果，通过生理测量，较为准确地捕捉到被试者回忆描述的实景行走时的情绪波动。

4.1 识别环境体验关键点

基于对携带地理信息生理指标的分析，我们可以描绘空间环境中的情感分布，环境体验的关键点（积极或消极）在其中可以得到直观的体现，如图 3。结合随后的问卷访谈我们得知生理测量反映的情感变化能较好地反映被试者当时的体验。位置 1 左侧有较多人在打篮球，被试者在经过的时候都觉得很有意思。位

刘颂 /1968 年生 / 女 / 福建武平人 / 博士 / 同济大学景观学系教授、博士生导师 / 研究方向为景观规划设计及其技术方法（上海 200092）

LIU Song, who was born in 1968 in Wuping Fujian, is a professor and doctoral supervisor in the Department of Landscape Studies in College of Architecture and Urban Planning, Tongji University. Her research focuses on landscape planning and design and technology (Shanghai 200092).

置2～3的地区不亲人的建筑尺度导致道路空间高宽比较大，路侧又有机动车和自行车停靠，环境体验很差；位置4被主要交通通道穿过，该通道上有较多车辆穿行，所以被试者反应都会有些紧张。位置5～6之间是被试者的宿舍区，在走近之前他们会觉得有些紧张（因为带着仪器），经过后又放松下来。拐过位置7，被试者均反映因看到实验终点而感到高兴。

4.2 结合访谈提出具有针对性的设计指导

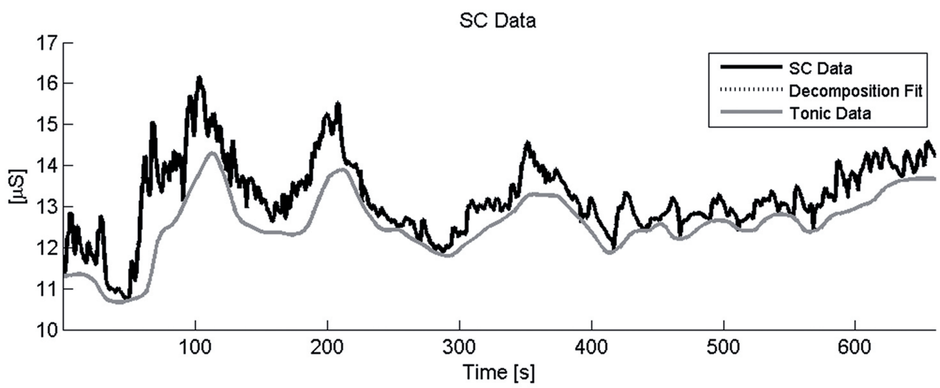
通过确定的关键点和具有细节的情感变化信息，访谈可以更好地兼顾针对性、全面性与开放性。与经常限制设计可能性的优选答案不同，基于生理证据的访谈更有可能启发设计者，并且可以从中推导出更实用的设计指南。

以位置2和位置3为例，在此两处关键点中参与者均体现了负面情感。在采访中，他们大多提到停放的汽车和两座高楼之间的人行道，并且别无选择地在没有人车分流的路面行走，更加深了他们的不安全感。同样，位置4也显示出强烈的消极情感反应。根据参与者的叙述，他们被混凝土建筑包围，身处在完全与自然环境隔绝的圆形广场中间也使他们深感不适。其他负面因素还包括：缺少安心停留之处，建筑高大压抑，交通和行人噪声嘈杂。因此，我们可以得出结论：位置5的建筑灰空间和植物的缺失、道路和建筑物的整体规模感和建筑与广场的高宽比给人带来了极强的消极影响，繁忙的交通和人群也是强化负面情感的因素之一。

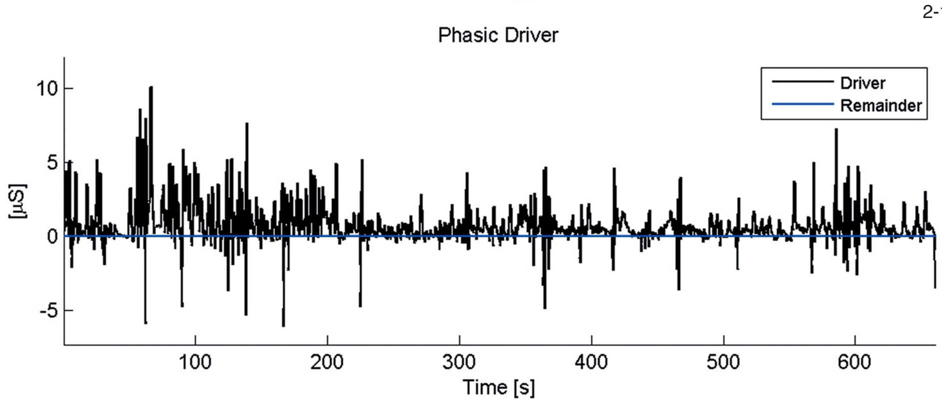
通过情感映射地图和访谈，我们识别出最容易造成人压力和负面情绪的景观节点，并在此基础上提出了具体的城市设计建议（图4），具体包括：

1）避免沿着路径停车。

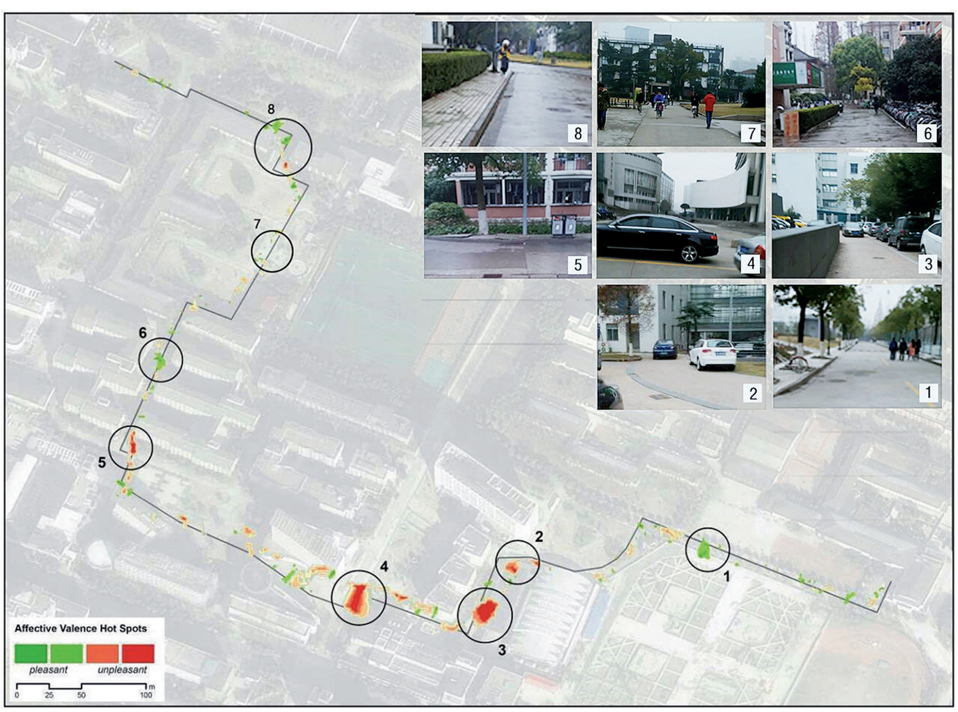
用绿化适当分割铺装场地。绿带不仅将自然元素带到某一地点，而且有助于人们对空间



2-1



2-2



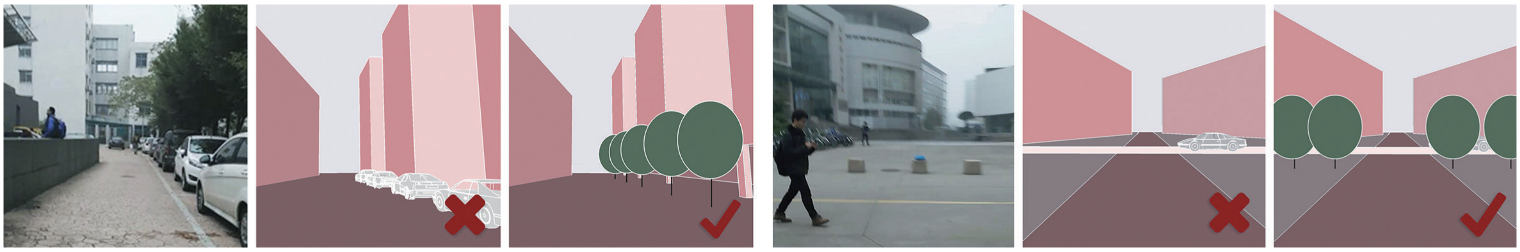
3

2-1 原始时域皮电信号（黑）及其中基础成分
Raw skin conductance signal in time domain(black) and the tonic component extracted

2-2 去掉基础成分的时域皮电信号
Processed skin conductance signal in time domain after removing tonic component

3 基于心理物理反馈的环境体验评估
Environmental experience assessment based on psycho-physiological measures

4 对于关键体验点设计建议
Design suggestions for enviromental stressors



4

尺度的整体认识。绿化不仅仅是从视觉上给硬质空间普遍灰冷的色调中带来怡人的绿色，更重要的是，绿化本身的尺度形成了巨型空间中的二次限定，从而弱化不适宜的街道高宽比所带来的压迫感，使得整个空间尺度在环境体验与舒适度上得到很大程度的改善。其次，噪声的削弱也可以辅助形成更良好的整体空间感受。

2）调整路面高程以分离人和车辆。

机动车道与人行车道在同一水平高程上的无所区分加强了人的不安全感，从而影响了人的空间感受。在行走中人对环境体验的主观注意力都集中在车流情况，从而削弱了对环境的感知。以本实验中所选定的该空间点为例，建筑入口的平台与行道树形成了良好的从室内到室外的过渡空间，然而机动车道的贯穿很大程度上削弱了空间体验。

3）添加缓冲剂以缓解交通的负面影响。

交通对人情绪的负面影响不仅仅在于行走的不安全感，还在于其带来的噪音、人流混乱和尾气污染等其余效应。因而结合情绪数据在主要受交通因素影响的空间内，有针对性地添加景观缓冲剂有极大的必要性。

5 展望

探究人由空间环境引发的情感是理解人空间体验的核心。对使用者可能的空间体验的深刻理解和准确预测，对于设计师如何通过景观空间的设计介入并触发人的情感反应以及相关行为活动也至关重要。随着生活水平逐渐提高，中国城市和景观规划设计行业的主要任务也从为新增城市人口提供基本住房和设施保障逐渐转换到创造高品质城市生活空间上，这离不开对人情感体验的关照和设计考虑。将情感纳入风景园林设计将会是风景园林实践的发展趋势。虽然人的环境体验很重要，但如何有效准确测量和评价人们在环境中的真实体验却一直是个难点。本研究提出了一个崭新的生理情绪测量技术。本技术可以在真实环境下实时记录人的生理情绪，并以此来计算情绪体验。通过这种方法，我们可以在真实现场测量人全面的多感官体验。比如在高架路下面的人行道上，影响人环境体验的要素除了看见的车辆之外，还有刺耳的喇叭、浓浓的带着热气的汽油味道、车辆从身旁呼啸而过的飒飒冷风、空气中扬尘打在脸上的微微辣疼，这一切通过照片、录像、甚至先进的虚拟现实技术都很难准确地全方位再现。除了实景实时环境体验记录之外，由于该技术可以锁定具体个体，所以研究者可以进一步深入分析具体群体的不同体验，比如同样是在一个公园热闹的休息区，成年人和小孩的情绪体验有没有不同？残障人士和健康群体有没有不同？我们也可以深入分析特殊场景的环境体验，比如同样是黄山，皑皑白雪满树银枝的冬景和红叶浸染的秋景有没有区别？日出、日落的黄山和中午有没有区别？该技术可以帮助设计师更好地理解人在空间环境中的真实情感感受，从而进一步设计更能体现人情绪反应的空间环境。

虽然本研究提出了一个对环境体验生理情绪量化测量的新方法，但是作为一个小样本的前期研究（pilot study），目前的研究尚存在诸多问题。对城市空间体验的量化评价尚需更严格的实验控制和全样本实验，有待进一步通过实验优化以下方面：1）进一步区分生理情绪反应的固有环境诱因和其他诱因，比如哪些是由固有环境因素引起的心理感受，哪些是由场地活动内容（等可变因素）引起的心理感受。可延长行走时间采集更多的空间刺激点，并通过访谈进行人员检核（member check），进一步分析空间刺激的类型；2）需要对实验对象（人）的专注度进行控制和引导，借以对实景环境进行更严格的控制，最小化突发因素引起的情感变化影响实验结果。研究可以在扩大样本的情况下采用平均叠加的方法，缩小难以避免的个体样本误差（比如正好一辆自行车擦肩而过受到惊吓）。

最后，此项技术可以继续和地理信息协作平台和增强现实等技术结合，建立一个整体的室外设计作业支持系统。其中生物反馈技术可以弥补在整体环境感知和情感绘图中主观意识的不足，可以清楚地描绘环境负面施压因子以及正向吸引因子，从而为规划和设计提供更好的定量参考。据此，设计师可以给出更有针对性的反馈，以改善空间环境体验，此类对于触发人正向情感反应的空间环境的设计积累与参考都将对往后的空间设计有所裨益。

致谢：

感谢参与实验的本科生宁雪莲、杨汶、邓文欣、吕诗阳、黄铭钰、赵洋、郑志诚、张煊阁、张曜麒、宋一飞、李明、何晓帆、陈亦凡、苏日。

注释：

① 文中图表均根据作者数据自绘。

参考文献 (References):

[1] 中共中央国务院 . 中共中央国务院关于进一步加强城市规划建设管理工作的若干意见 [M]. 北京： 新华社，2016.
THE STATE COUNCIL CPC. The State Council CPC on the Further Strengthening of the Management of Urban Planning and Construction [M]. Beijing: Xinhua News, 2016.

[2] TOST H, CHAMPAGNE F A, MEYER-LINDENBERG A. Environmental influence in the brain, human welfare and mental health[J]. Nature Neuroscience, 2015, 18(10): 1421-1431.

[3] 陈筝，刘悦来，刘颂 . 美国景观视觉资源规划设计方法评析及新技术改进潜力分析 [J]. 风景园林，2015，(5) ： 111-117.
CHEN Z, LIU Y, LIU S. A Review of Landscape Visual Resource Planning and Design Methods in the United States and Potential Improvements via New Techniques[J]. Landscape Architecture, 2015, (5): 111-117.

[4] SHAFER E L, JR., BRUSH R O. How to Measure Preferences for Photographs of Natural Landscapes[J]. Landscape Planning, 1977, (4): 237-256.

[5] SHAFER E L, JR. , RICHARDS T A. A Comparison of Viewer Reactions to Outdoor Scenes and Photographs of Those Scenes[M]. USDA Forest Service Research Paper NE-302. Upper Darby, Pennsylvania; Northeastern Forest Experiment Station. 1974.

[6] GREENWALD A G, MCGHEE D E, SCHWARTZ J L. Measuring individual differences in implicit cognition: the implicit association test[J]. Journal of personality and social psychology, 1998, 74(6): 1464.

[7] LEOPOLD L B. Landscape Esthetics [J]. Natural History, 1969, 78(8): 37-45.

[8] LITTON R B, JR. Forest Landscape Description and Inventories: A Basis for Land Planning and Design [M]. USDA Forest Service Research Paper PSW-49. Berkeley, California; Pacific Southwest Forest and Range Experiment Station. 1968.

[9] ROLAND P, GULYAS B. Visual imagery and visual representation[J]. Trends in neurosciences, 1994, 17(7): 281-287.

[10] KAPLAN S, KAPLAN R. Cognition and environment: functioning in an uncertain world[M]. New York: Praeger, 1982.

[11] KAPLAN R. Some Methods and Strategies in the Prediction of Preference [M]//ZUBE E H, BRUSH R O, FABOS J R. Landscape Assessment: Values, Perceptions and Resources. Stroudsberg, Pennsylvania; Dowden, Hutchinson and Ross, Inc. 1975: 118-29.

[12] U.S.D.A. FOREST SERVICE. National Forest Landscape Management[M]. The Visual Management System, Agricultural Handbook No 462. Washington, D.C.: U.S. Government Printing Office,1975.

[13] 刘滨谊 . 遥感辅助的景观工程 [J]. 建筑学报，1989，(7): 41-46.
LIU B. Three-scale Remote Sensing Landscape Engineering [J]. Journal of Architecture, 1989, (7): 41-46.

[14] 宗白华 . 美学散步 [M]. 上海：上海人民出版社，1981.
ZONG B. Aesthetics walk[M]. Shanghai: Shanghai People's Publishing House, 1981.

[15] 彭一刚 . 中国古典园林分析 [M]. 北京：中国建筑工业出版社，1986.
PENG Y. Chinese classical garden analysis[M]. Beijing: China Construction Industry Press, 1986.

[16] 丁文魁 . 风景科学导论 [M]. 上海: 上海科技教育出版社，1993.
DING W. Introduction to Landscape Science[M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Education Press, 1993.

[17] 俞孔坚 . 自然风景质量评价研究 -BIB-LCJ 审美评判测量法 [J]. 北京林业大学学报，1988，10（2）： 1-11.
YU K. Study on Natural Landscape Quality Evaluation - BIB-LCJ Aesthetic Judgment Measurement Method[J]. Journal of Beijing Forestry University, 1988, 10(2): 1-11.

[18] 吴必虎，李咪咪 . 小兴安岭风景道旅游景观评价研究 [C]// 地理学的理论与实践——纪念中国地理学会成立九十周年学术会议文集 .1999.
WU B, LI M. Study on the Evaluation of Tourism Landscape in Xiaoxing'anling Scenic Spot[C]// Theory and Practice of Geography—Commemorative Collection of the 90th Anniversary of the Establishment of Chinese Geographical Society. 1999.

[19] 张巧，刘洪杰，郑韵怡，等 . 景观视觉廊道评价初探——以惠州西湖风景名胜区为例 [J]. 广东园林，2010，32（1）: 5-9.
ZHANG Q, LIU H, ZHENG Y, et al. A Study on the Evaluation of Landscape Vision Corridor—A Case Study of Huizhou West Lake Scenic Spot[J]. Guangdong Garden, 2010, 32 (1): 5-9.

[20] 陈筝，SCHULZ S，吴杭彬，等 . 面向城市设计的环境实景感知实证研究 [J]. 南方建筑，2016，(4) ： 10-14.
CHEN Z, SCHULZ S, WU H, et al. Experimental study of environmental realism perception for urban design[J]. South Architecture, 2016, (4): 10-14.

[21] 陈筝，翟雪倩，叶诗韵，等 . 恢复性自然环境对城市居民心智健康影响的荟萃分析及规划启示 [J]. 国际城市规划，2016，(4) ： 16-26.
CHEN Z, ZHAI X, YE S, et al. Numerical analysis and planning implications of the effects of restorative natural environment on urban residents' mental health[J]. International Urban Planning, 2016, (4): 16-26.

[22] HE Y, CHEN Z, YU Y. Visual experience in natural environment promotes better brain functions than built environment?[C]// 5th International Conference on Cognitive Neurodynamics. Sanya, Hainan, China; Springer. 2015.

[23] CHEN Z, HE Y, YU Y. Natural environment promotes deeper brain functional connectivity than built environment?[J]. BMC Neuroscience, 2015, 16(S 1): 294.

[24] CHEN Z, HE Y, YU Y. Enhanced functional connectivity properties of human brains during in-situ nature experience [J]. PeerJ, 2016, 4: e2210.

[25] LIN C-T, CHUNG I-F, KO L-W, et al. EEG-based assessment of driver cognitive responses in a dynamic virtual-reality driving environment[J]. Biomedical Engineering, IEEE Transactions on, 2007, 54(7): 1349-1352.

[26] THOUSANDS TO SHAPE £8 MILLION AGE-FRIENDLY DESIGN PROJECTS. (2013-09-04)[2017-04-12]. https://www.epsrc.ac.uk/newsevents/news/designprojects.

[27] CHEN Z, SCHULZ S, QIU M, et al. Bio-sensory affective mapping for urban design[M]. Environment and Behavior Research Association Conference 2016. Chongqing, 2016.

[28] CHEN Z, SCHULZ S, NING X, et al. China: Bio-sensory real-time affective mapping[J]. Access by Design, 2016, (146): 30-31.

[29] CHEN Z, SCHULZ S, HE X, et al. A pilot experiment on affective multiple biosensory mapping for possible application to visual resource analysis and smart urban landscape design[M]. REAL CORP 2016. Hamburg, Germany, 2016.

[30] QIN J, ZHOU X, SUN C, et al. Influence of green spaces on environmental satisfaction and physiological status of urban residents[J]. Urban Forestry & Urban Greening, 2013, 12(4): 490-497.

[31] ASPINALL P, MAVROS P, COYNE R, et al. The urban brain: analysing outdoor physical activity with mobile EEG [J]. British jaokuournal of sports medicine, 2013, (0): 1-6.

（编辑 / 任京燕）