

清华大学

综合论文训练

题目：自习教室天然光设计的多目
标优化模型

系 别：建筑学院建筑学系

专 业：建筑学

姓 名：张敬雯

指导教师：张昕 副教授

2023 年 6 月 16 日

关于学位论文使用授权的说明

本人完全了解清华大学有关保留、使用学位论文的规定，即：学校有权保留学位论文的复印件，允许该论文被查阅和借阅；学校可以公布该论文的全部或部分内容，可以采用影印、缩印或其他复制手段保存该论文。

(涉密的学位论文在解密后应遵守此规定)

签 名: 张敬博 导师签名: 张敬博 日期: 2023.6.16

中文摘要

教室作为中小学生长时间所处场所，内部环境对使用者有较大影响。在众多综合因素中，光环境对学生学习效率与健康的影响占较大。在我国现有光环境标准中，大多以教室整体为单位进行评估，然而同一间教室中不同位置的多个个体光环境情况存在较大差异，不能一概而论。

本文在已有个体光环境研究的基础上，使用建筑性能分析插件 Climate Studio 对标准教室模型在临沂的气候条件下进行不同范围的模拟，使用不同的分析方法与标准进行数据处理。

最终成果分为两部分：第一部分构建出对教室光环境新的评估标准；第二部分通过数学建模量化光环境对于个体的正向作用。并通过模拟所得数据进行遮阳方案评估示范。

通过对光环境个体差异化的关注，本文对教室光环境未来的评估做出细化，以获得更优质和健康的教室光环境。

关键词：学校教室光环境；采光标准；采光模拟；Climate Studio；

ABSTRACT

Classrooms, the primary environment for pupils and junior high school students, have a significant impact on them. Among various factors, the lighting environment has a considerable influence on learning efficiency and health. In existing lighting standards in China, the evaluation is mostly conducted based on the overall lighting conditions in whole classrooms. However, there exist individual variations in lighting environments as different positions are scattered within the same classroom, which cannot be generalized.

Building upon previous studies on individual lighting environments evaluation, this paper simulates lighting conditions in standard classrooms model under the climate data set of Linyi, Shandong Province, using the architectural environmental analysis plugin, Climate Studio. Different analysis methods and standards are employed to analyze the data obtained from the simulations.

The research yields two main contributions. Firstly, a new evaluation standard for classroom lighting environment is established. Secondly, the positive impact of the lighting environment on individuals is quantified through mathematical modelling. In addition, the obtained simulation data is used as an example to evaluate and demonstrate shading solutions.

By focusing on individual lighting environments and considering local climatic conditions, this research provides insights into the assessment and improvement of classroom lighting. The proposed evaluation standard and quantitative analysis contribute to creating healthier and more conducive learning environments for students.

Keywords: School classroom lighting environment; Daylighting standards; Daylighting simulation; Climate Studio;

目 录

| | |
|-------------------------------|-----------|
| 第 1 章 引言 | 1 |
| 1.1 研究背景 | 1 |
| 1.2 研究现状 | 1 |
| 1.3 研究内容与技术路线 | 4 |
| 第 2 章 研究模型设定 | 6 |
| 2.1 模拟参数 | 6 |
| 2.2 模拟结果 | 8 |
| 2.3 既有研究的验证 | 12 |
| 第 3 章 遮阳方案评估标准研究 | 14 |
| 3.1 拟解决的关键问题 | 14 |
| 3.2 不合格个体数的观察与评价对象确立 | 14 |
| 3.3 “光环境达标线”的确立 | 17 |
| 第 4 章 效用模型建立 | 22 |
| 4.1 理论模型 | 22 |
| 4.2 针对个体的教室光环境效用模型 | 23 |
| 4.2.1 描述性统计 | 23 |
| 4.2.2 模型建立 | 25 |
| 4.3 效用计算模型 | 29 |
| 4.3.1 个体获得的综合效用 | 29 |
| 4.3.2 标准判定后的效用模型 | 31 |
| 第 5 章 结论与展望 | 33 |
| 5.1 结论 | 33 |
| 5.1.1 模型功能简述 | 33 |
| 5.1.2 遮阳方案评估 | 33 |
| 5.2 研究局限 | 34 |
| 5.2.1 模拟误差分析 | 34 |

| | |
|-----------------------|----|
| 5.2.2 时间与采样误差分析 | 34 |
| 5.3 模型应用的展望 | 35 |
| 插图索引 | 36 |
| 表格索引 | 37 |
| 参考文献 | 38 |
| 致 谢 | 40 |
| 声 明 | 41 |
| 附录 A 外文资料的书面翻译 | 42 |
| 附录 B 图纸合集 | 60 |

第1章 引言

1.1 研究背景

中小学生绝大部分时间都生活在学校教室中，而教室环境是一个综合因素的室内环境系统。现有研究表明，组成这个系统的物理布局、空间长、宽、高[1]，家具摆放，光环境，湿度，热环境等室内环境因素影响环境质量，[2][6]同时，对共享办公室的研究表明，人们对办公室的环境有或多或少的偏好，同一空间内所处的不同位置和正在进行的活动均影响人们的表现和认知。[3][4]

其中，以 Peter Barrett 为首，对于小学生进行的教室设计元素对学习进步影响的研究表明，光环境占影响学生进步因素的最大比例，大约为 21%。[2]同时，若建筑符合绿色评级，足够的照度也会有益于学生的用眼健康。[5]由此可推断，空间中不同的个体会因为光环境的不同产生认知效率和进步速度的变化。

然而，教室照明的解决方案是不固定的，照明偏好的个体差异较大，即同时不同位置在环境产生统一变化的时候受到的影响不同，不同人在同一环境下对光环境感到舒适的需求也不尽相同。这得到了相应的实验数据证实，在同一教室光环境下，不同位置的学生确实产生出不同的主观评价、认知表现、神经生理。[7]另一方面，有关山东乐陵市 80 所中小学校教室采光照明检测结果显示，在同一间教室中，不同的区域也确实因为客观环境布置对光环境产生局部影响。[8]因此，本文建议应寻求一种较为灵活的教室照明方案，即从以教室为单位的光环境设计转向更为细致的以个体课桌为单位的光环境设计，同时可为用户自主调节提供相当的灵活度。

1.2 研究现状

我国的现有标准对教室光环境已有一定程度上的规范。目前大多数中小学教室光环境设计遵守的国标主要以整个教室为单位，并且将光照要求具象为设计手法要求，以达到“冬至日满窗日照不小于 2 小时”。[9]同时规定大部分基于建筑“朝向以南向和东南向为主”的标准而制定。[10]而行标则进一步在使用时段以及不同类型教室中做出更细节的要求。[11]

现有标准控制教室光环境的方式主要通过对桌面平均照度，照度均匀度，以及冬至日满窗日照时间等数据提出要求，采光和照明分别制定标准。[18]评估过程往往以一个教室为单位。除了常规在桌面写字的情况，还可能考虑到学生在室内不同活动模式的需求，从而给出不同的规定。对形体设计做出指导的标准规定了窗地比。有更细致的标准会要求考虑到教室家具有布置，不宜反射眩光。[9]

在满足标准的情况下，教室绝大部分课桌可满足标准要求，然而不同区域的课桌会出现光照过量/不足的情况，对学生用眼造成负担。现有研究指出标准的可改进之处，并已经对课桌以列为单位进行采光方案研究。[12]并以个体课桌为单位，考虑位置对于人在光环境下的认知影响，获得较为理想的融合照度数据。[7]

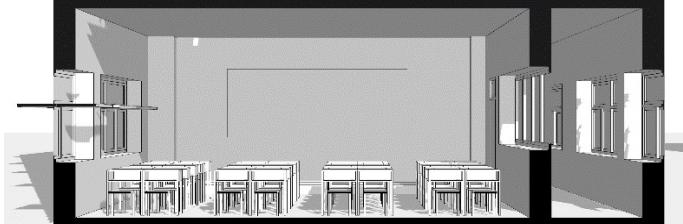
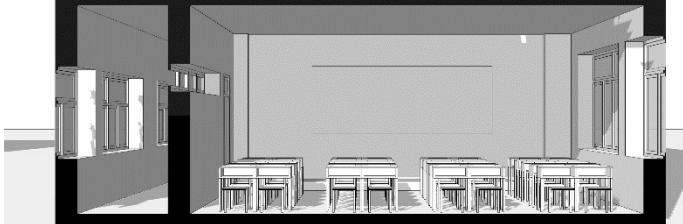
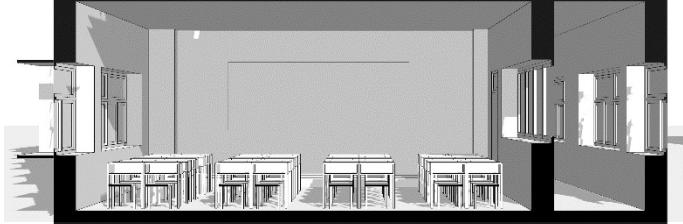
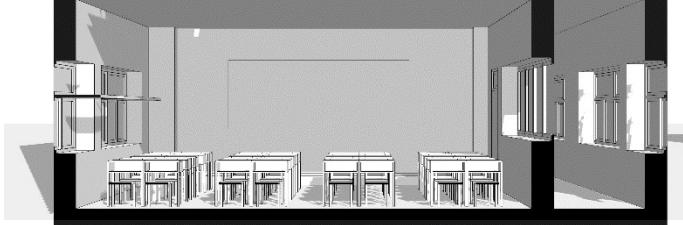
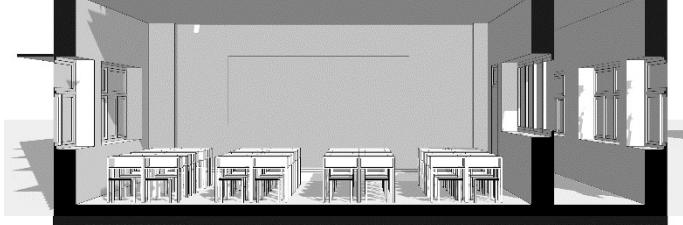
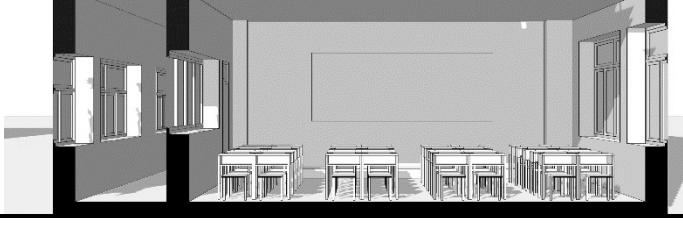
现有技术已经可以实现单独对不同区域的个体桌面进行光照调节，[13]同时也可以基于对教室的监控实现智能调节的功能达到节能的目的。[4][15]

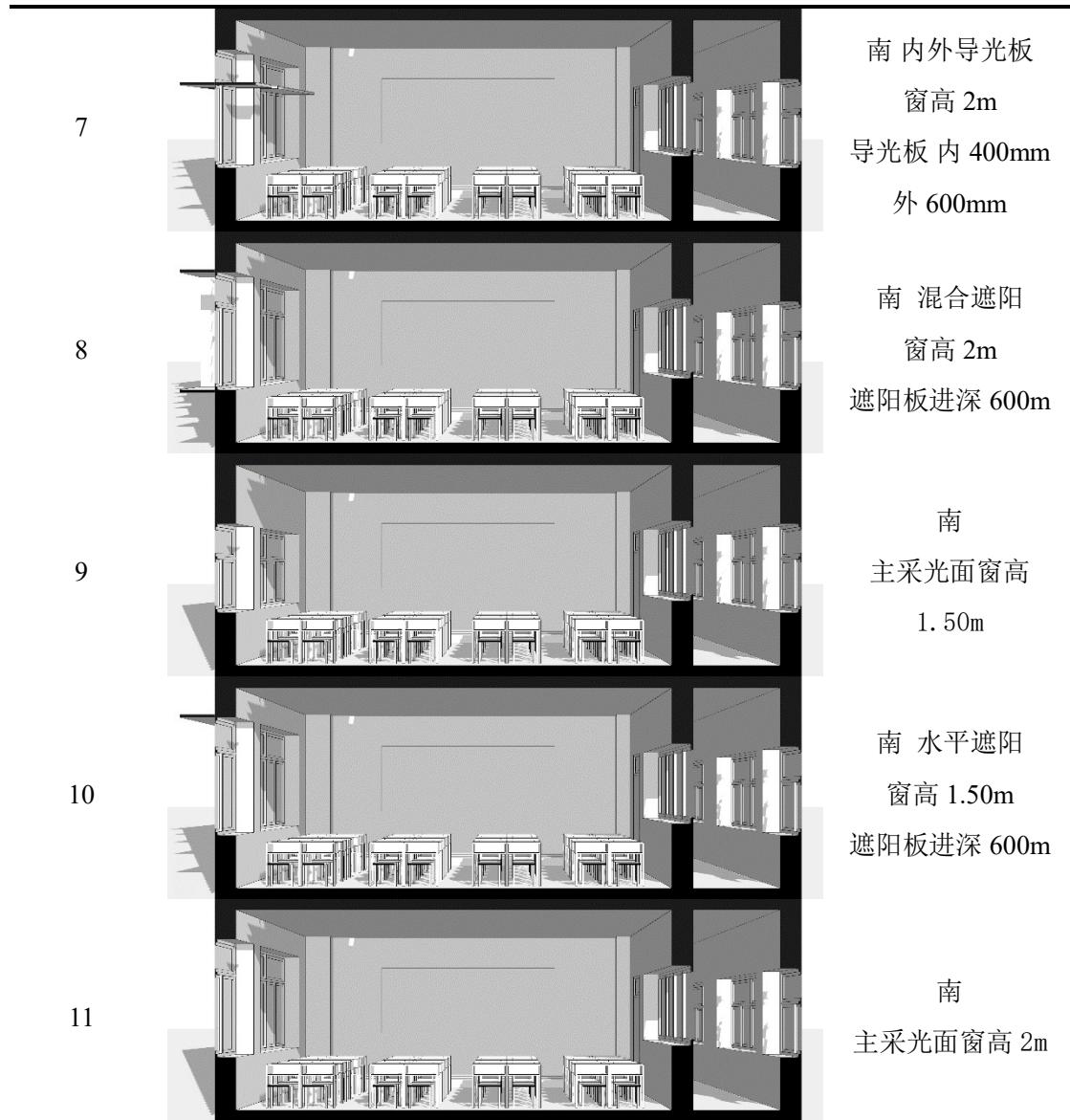
研究现状对光环境的评判标准进行了标准规定，不同的研究将不同位置带来的影响引入教室光环境的研究变量中，并对标准进行了理论上的优化。而技术的发展说明，现有技术理论上可以满足优化后的规范需求。但尚未有一个明确的应用方案指导技术的使用，同时理论方面也需要将不同的结论都细化至个体单位后再进行结合。

基于目前已有的标准和研究成果，还需要以座位为单位模拟遮阳的采光方案。另一方面，通过照明设计方案，使得光环境调整至人眼与心理都较为舒适的状态。而从应用技术方面，调整环境的依据不仅有节能，Moeiz Miraoui 的研究中提到，教室应形成一个智能系统，依据人的行为模式来调整状态和环境。[14]需在此基础上进行使用方法的规范和方案设计，使得照明调节更加以人的活动需求为依据。

近些年来学校建筑多采用双侧采光，即除了主采光面开 2-3 扇窗，教室开门侧也会开窗对楼道进行采光。而遮阳措施除了使用窗帘或百叶窗等动态遮阳手段，还有遮阳板等结构性外遮阳措施。根据张昕等人对个体光环境研究，对近年建造的学校建筑遮阳措施案例调研，梳理整理出数种遮阳方案如水平遮阳、混合遮阳、导光板等，各类方案和开窗高度相互排列组合后有 8 种，加入 2 种北向采光方案和 2 种不遮阳的南向空白方案进行对照，最后采用共 11 种方案以研究。[12]本文将参考该研究中 11 种方案进行研究，分别如表 1.1 所示。

表1.1 11种遮阳方式设定

| 方案编号 Project No. | 教室剖面图示意 Section | 参数设定 Settings |
|------------------------|--|---|
| 1 |  | 南 内外导光板 窗高 1.50m 导光板 内 400mm 外 600mm |
| 2 |  | 北 南向减窗 南窗高 450mm 主采光面窗高 2m |
| 3 |  | 南 混合遮阳 窗高 1.50m 遮阳板进深 600m |
| 4 |  | 南 内导光板 窗高 1.50m 导光板 内 400mm |
| 5 |  | 南 水平遮阳 窗高 1.50m 遮阳板进深 600m |
| 6 |  | 北 主采光面窗高 2m |



1.3 研究内容与技术路线

根据上述需求，教室采光与照明系统在已有的标准规定下，还需要以个体为单位的细化方案，以此优化教室光环境，并对学生的用眼健康与认知学习进步产生积极影响。

在现有的标准中，教室照明多为多单位统一调控，并且学校教室的遮阳方案没有明确的选择依据，多为通过市场调研进行选择，而非经过光环境评估结果。而现有研究推进至以列为单位，仍然需要进一步进行划分研究。

对于此问题，本文分析，现有的研究成果产生的问题可能由于已有研究的评价体系建立在过往的标准上进行修改，而过往的标准大部分都以多人为单位进行评估，所以绝大多数使用平均值等统计方法描述多个数据，以此代表整体的采光效果。

因此，本文将尝试针对个体拟定新的判定标准。该新标准将对每个个体进行一次判断，以此来决定每个座位上的光环境是否达到标准。最终的遮阳判定标准将选择合格个体更多的方案。

本研究将结合现有的研究成果，研究较为合理的采光方案。使用软件 Climate Studio 进行光照策略评估，在以列划分桌椅得到的结论基础上，进一步以行划分桌椅进行模拟研究，得到综合行和列影响后效果最佳的采光方案及数据。

在此结论基础上，在学校建筑的现有标准基础上进一步推进，结合相关研究以及临沂当地工程建设经验，通过调研、模拟，针对临沂当地所使用的技术和地域光气候特点，制定出改进后适用于临沂当地学校教室的光环境标准。本文的技术路径如图 1.1 所示。

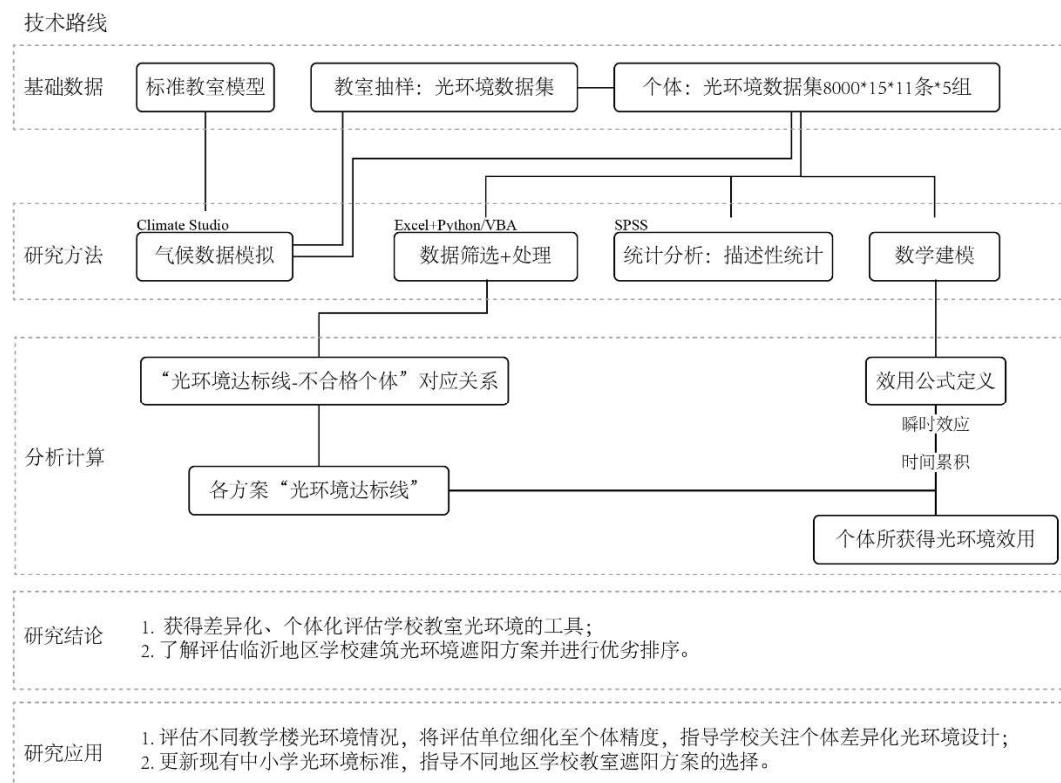


图1.1 技术路径示意图

第2章 研究模型设定

2.1 模拟参数

使用 Climate Studio 进行教室采光模拟时，需确定所使用模型的各类参数、尺寸和数据。本文中模拟参考了张昕等人的研究模型[12]，使用的是由标准反推的教室尺寸，具体尺寸为 7800mm（进深）*9300mm（面宽）。教室的布局参考目前大多数中小学建筑设计，采取单廊单侧的方式。整个学校以教室每层 3 间教室，每栋楼五层，三栋楼并排的布局进行排列。教室内部桌椅摆放为双人桌 4 组，每组 2 列，每列 6 座。桌面尺寸为 0.60m*0.40m。对于个体的采光模拟，设置采样点时，在水平面上，每个点对应一张课桌，如图 2.1 所示。为避免与高度 750mm 的课桌面重合产生模拟误差，采样点的高度设置为该教室地面向上移动 760mm，即桌面上方 10mm。

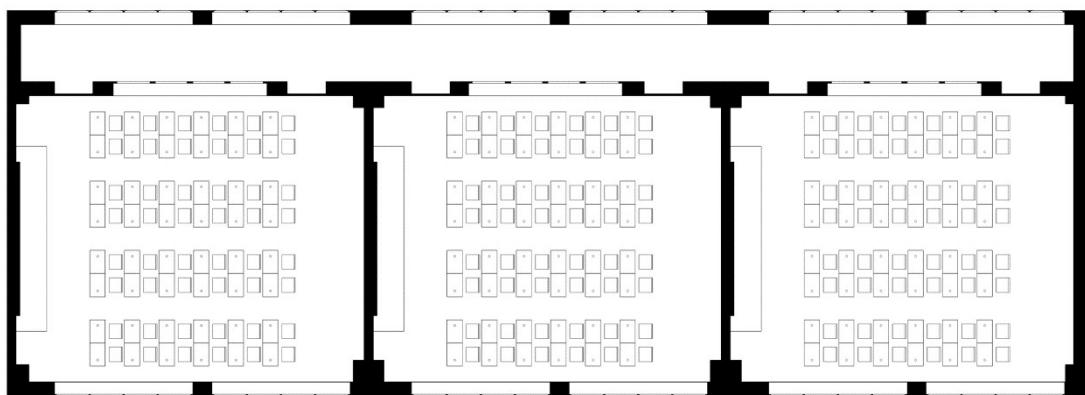


图2.1 教室布局平面图与采样点位置示意

在一些案例中，中小学会采取使用连廊将三栋教学楼相互连接，所以在此处本文将首先讨论六种教学楼布局。分别是将三栋教学楼的主采光面面向南侧和北侧，再分别讨论两种朝向种教学楼使用东侧、西侧以及没有连廊的情况。

本文研究使用的模拟软件是建模软件 Rhino 的建筑环境性能分析插件 Climate Studio。本研究将使用该软件模拟教室内课桌面上的照度值，根据软件提供的数据分析计算后续的指标，从而拟定合适的标准。

在该软件中我们选取临沂当地的 TMYx 气候文件。TMYx 文件是从美国 NOAA 的综合表面数据库中每小时天气数据得出的典型气象数据，Climate

Studio 插件中载入的是 2004-2018 版本，是最新数据，可以用于大多数气象数据分析。

设定气候数据后，对教室的材质进行设置。选取用常见的教室材料，对不同平面的反射比与透射比进行赋值。不同平面所用材料与材料数值设置如表 2.1 所示。

表2.1 材料设定表

| 模型部件 Model | 材质 Material | 反射率 Reflectance | 可见光透射率 TVIS |
|---------------|------------------------------------|--------------------|----------------|
| 外部地面 | Concrete Grey Exterior floor Tiles | 18.38% | |
| 教室地面 | Grey Ceramic Tile Floor | 53.82% | |
| 外墙 | Exterior Concrete wall | 71.10% | |
| 内饰面板 | White Painted Walls | 83.99% | |
| 走廊墙面 | White exterior corridor wall | 78.61% | |
| 天花板 | White Painted Ceiling | 88.42% | |
| 窗框 | Aluminum Brown Window Mullion | 7.66% | |
| 窗户玻璃 | dear - Clear (Krypton) | | 0.774 |
| 柱子 | Column E14 526 | 82.13% | |
| 教室门 | Beige wooden door | 78.95% | |
| 教室门框 | Door Frame 7 3014 | 74.94% | |
| 桌椅面 | Wood Laminate Table Top | 50.92% | |
| 金属桌椅腿 | Table Leg E14 526 | 35.46% | |
| 黑板 | Blackboard | 3.89% | |
| 讲台 | Wooden Floor Planks | 10.71% | |
| 遮光板 | Opaque Roller Shade | 43.24% | |
| 导光板反射层 | Exterior White wall | 80.55% | |

使用软件的 Daylight Availability 功能对教室光环境进行模拟，时间段选择在 8am.-4pm.，即我国大多数中小学学生在教室长时间伏案写作学习的时间段。模拟结束后导出每一个采样点的数据文件、一年中每小时照度数据文件以及相关图像可视化结果（如图 2.2）。

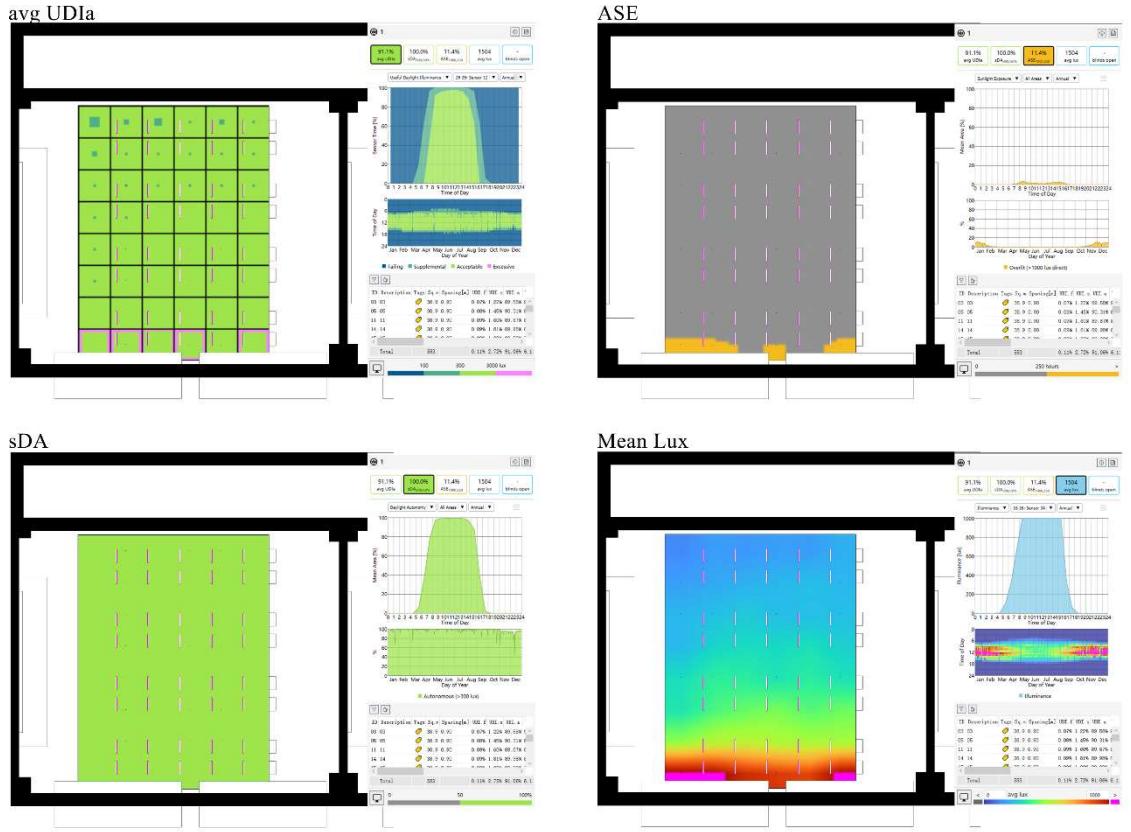


图2.2 软件模拟界面及可得可视化数据

2.2 模拟结果

在做大规模的模拟之前，对3栋教学楼的45间教室进行模拟，采样点均匀分布在主采光面窗户上，得到结果用以对教室进行抽样。此处讨论连廊在东侧、连廊在西侧和没有连廊的情况，分别对应教室面向东侧和教室面向西侧两种布局，一共六种情况，如图2.3。对六种教学楼的布置都进行模拟后，模拟结果发现，有无连廊和连廊位置都非常影响采光效果，为了单纯讨论教室的座位位置对照明的影响，本文将着重讨论无连廊的情况。

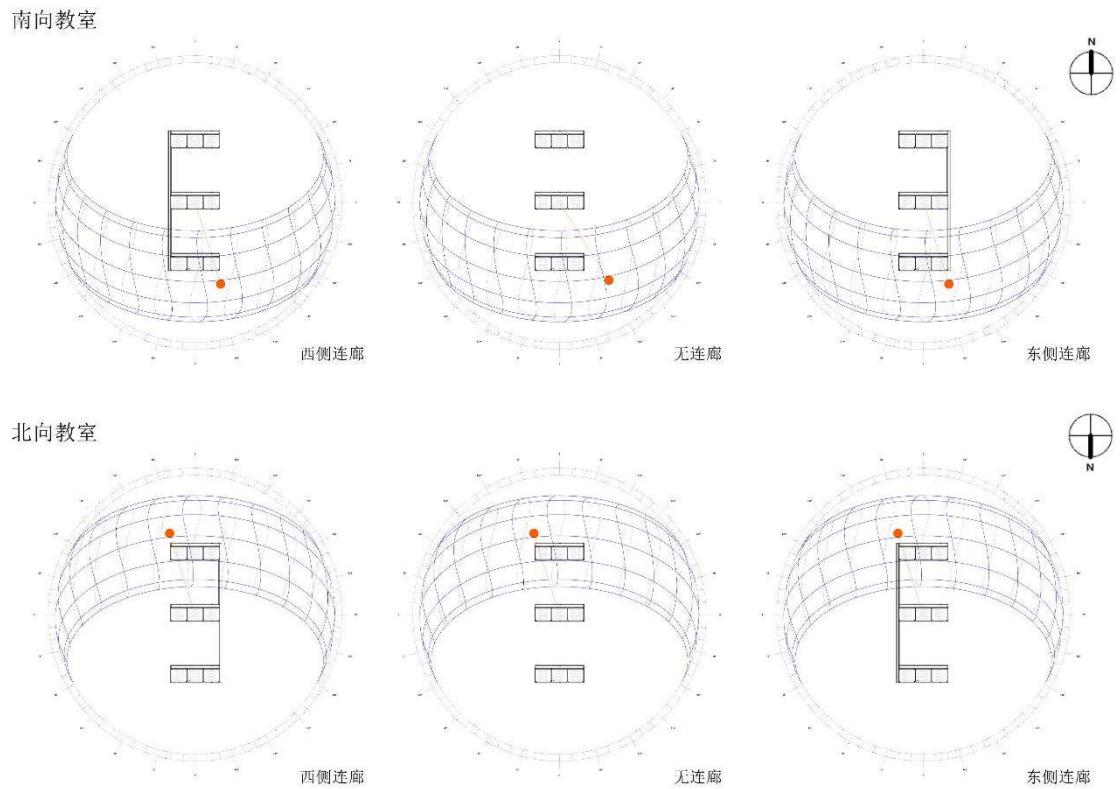


图2.3 教室楼群连接方式与朝向布局情况

同时，教室位于教学楼的位置也很大程度影响到教室的采光效果，为确定照顾到不同采光效果的教室，这一步将对比出每栋教学楼采光效果最好和最差的分别2间，以及效果中等的1间。给三栋楼的教室进行编号，用于描述教室位置，编号的情况如图2.4所示。

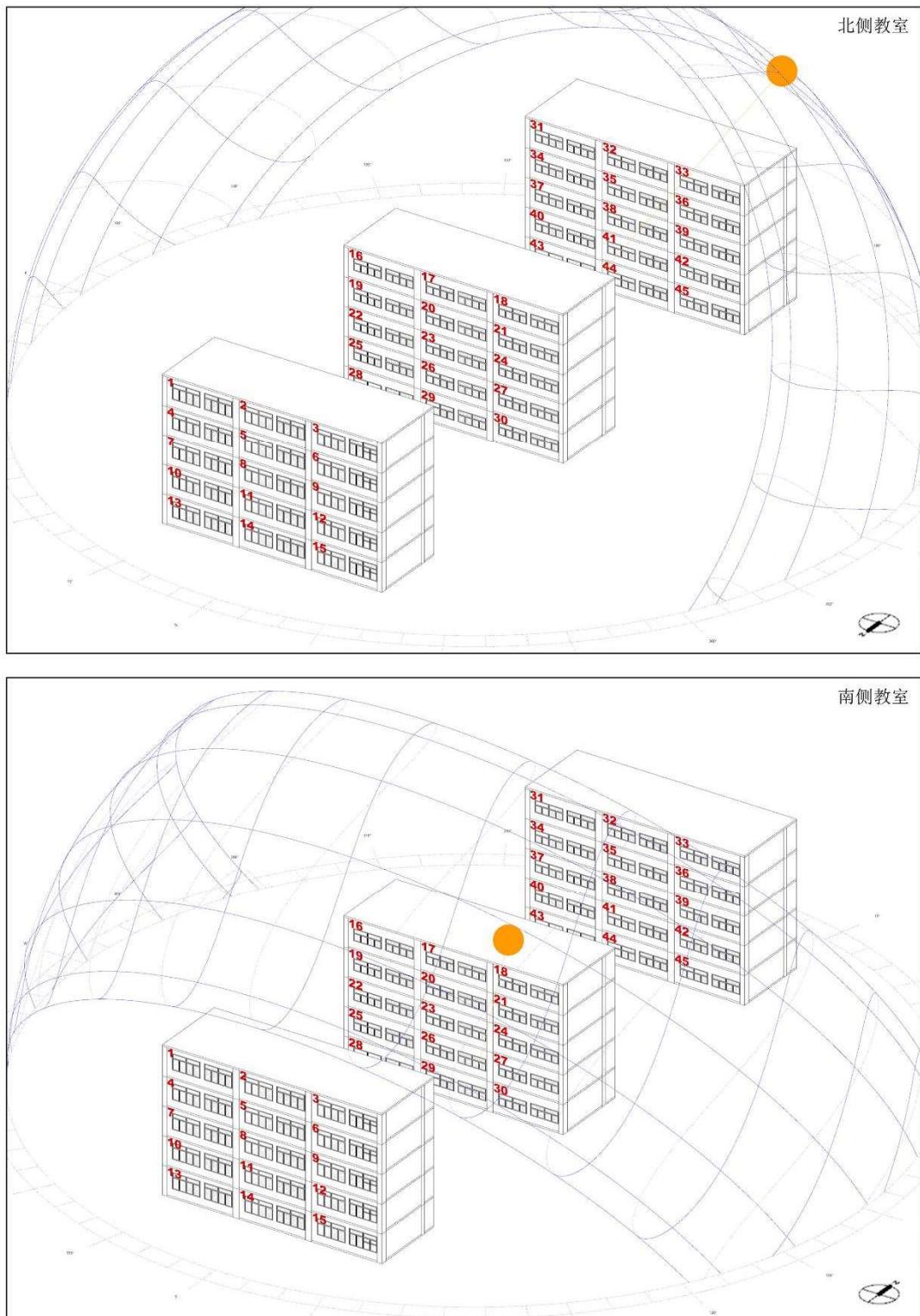


图2.4 教室编号布局情况

以章节 2.1 中所设置的参数进行模拟。模拟结果如图 2.5 所示，上方为每种教学楼布局中每个编号教室窗口的平均照度情况比较，下方是每种情况三栋楼之间的平均照度对比。

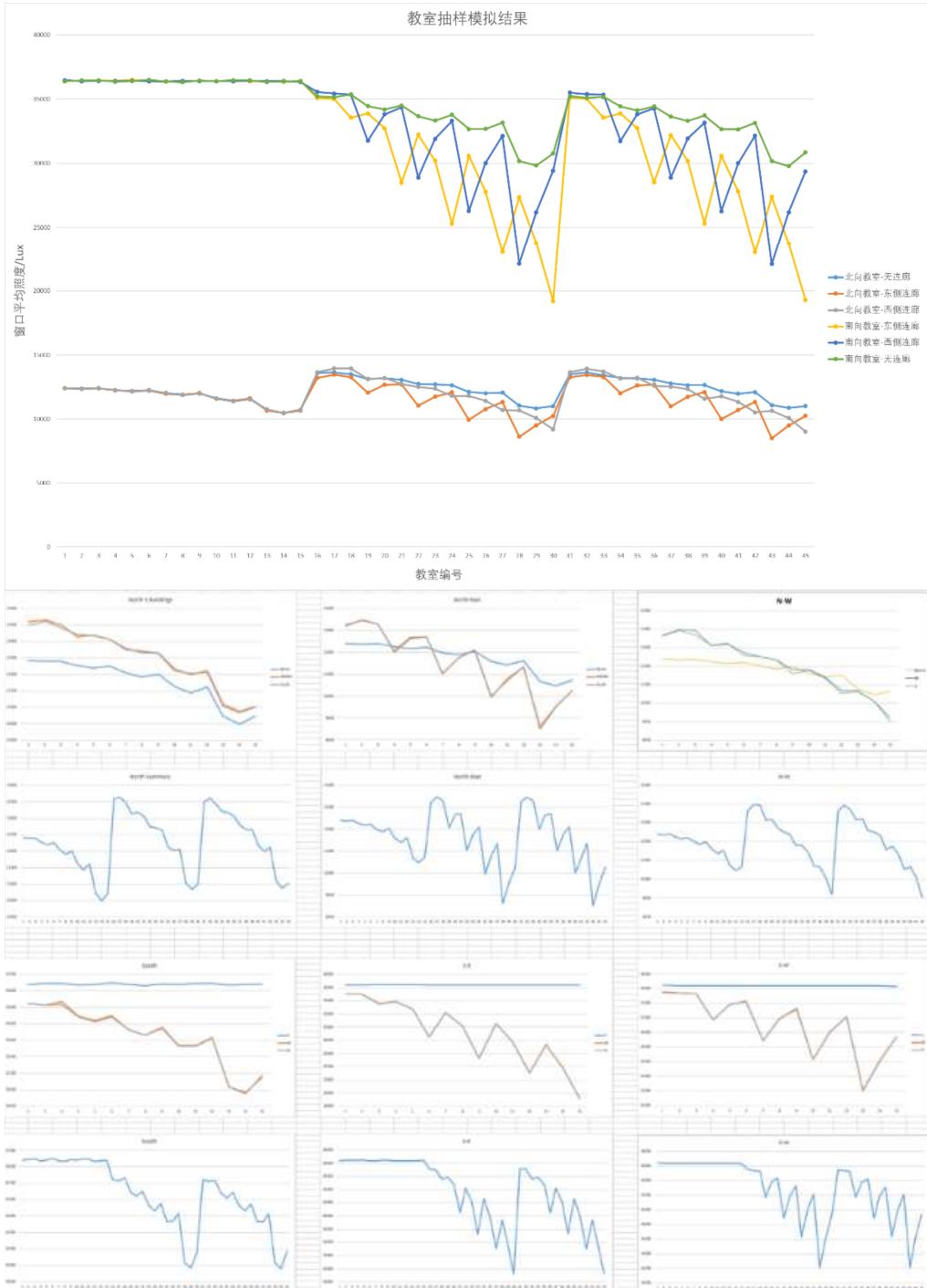


图2.5 教室抽样模拟结果

本文只讨论无连廊的情况，选取无连廊的情况下，北向教室和南向教室两种布局。对比教室与教室之间的模拟平均照度情况，每栋楼中挑选出的三种光环境水平的教室编号如表 2.2 所示。

表2.2 教室抽样结果汇总

| 教室朝向 | 教室编号 | 光照条件情况 |
|------|-------------------|--------|
| 南 | 3,11,16,18,31,33 | 优 |
| | 5,22,37 | 中 |
| | 14,15,28,29,43,44 | 差 |
| | 1,3,16,17,31,32 | 优 |
| 北 | 9,23,39 | 中 |
| | 13,14,29,30,44,45 | 差 |

2.3 既有研究的验证

对于基于位置的教室光环境评估，已经有研究将精度细化到以列为单位进行研究。为了对比先前研究中不同软件与不同地区的差别，首先以先前研究中的模拟方法进行模拟，并以先前的标准进行分析。

2020 年张昕等人的研究通过调研现有不同中小学的遮阳方案，总结出 11 种因窗高、朝向、遮阳措施而产生不同的方案，并建模进行模拟[12]。

模拟的范围选取了每个抽样出的教室最内侧和最外侧两列桌椅作为采样单位，通过模拟进行 DA_{300lx}[50%] 和 ASE_{1000lx}[250] 的计算，获得每种遮阳方案的数据后进行进一步的分析。本文研究也将使用新的软件 Climate Studio 和临沂当地的气候数据进行同样标准下的模拟。

既有的研究选取了最靠近主采光面与最远离主采光面的两列桌椅，主要关注这两列桌椅的采光不良时间。该标准选取了桌面天然光照度超过 3000lx 的时间占比用于评估最靠近主采光面一列的采光不良利用时间占比，选取 50% 时间桌面天然光不足 300lx 的时间占比用于评估教室最深处一列桌椅的采光不良时间占比。将两种不同的采光不良利用时间占比的加和定义为平均各列的天然光不良利用时间占比。模拟结果如图 2.6 所示，其中 1 号方案（教室南向采光加导光板遮阳）成为除北向采光方案以外采光不良利用时间占比情况比较好的方案。与已有研究中的结果相符。

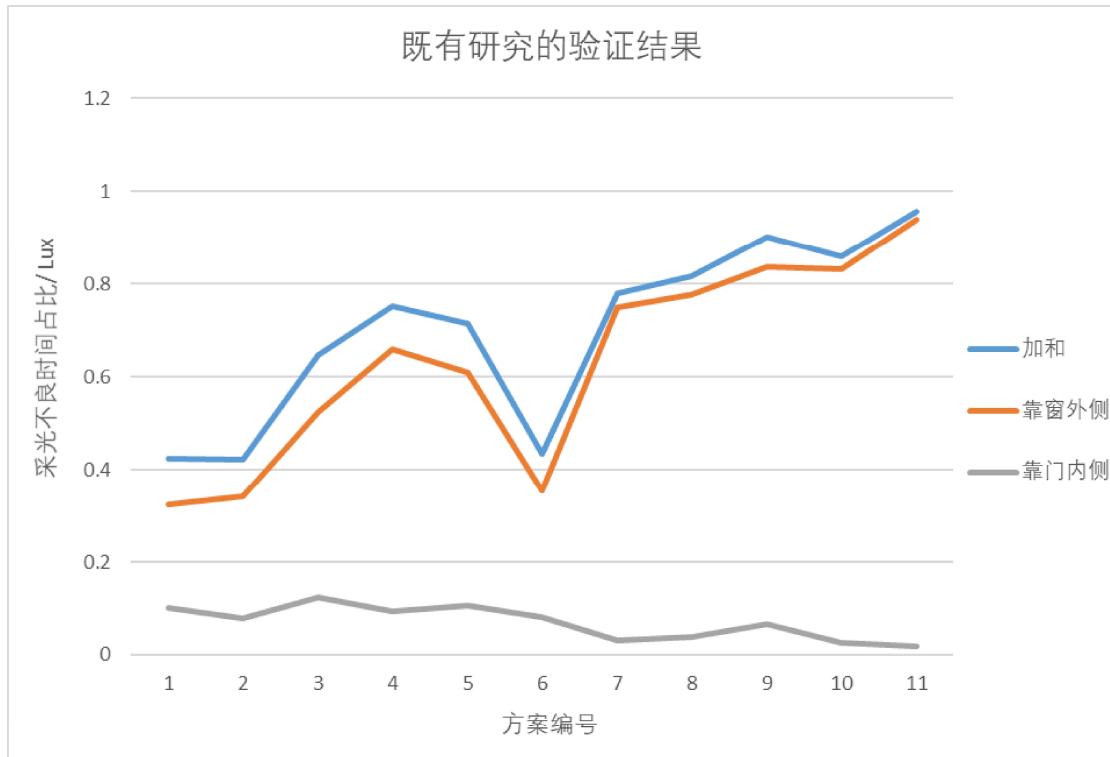


图2.6 既有研究的验证结果

第3章 遮阳方案评估标准研究

3.1 拟解决的关键问题

对于既有的研究，数据的处理方式主要为以列为单位的平均值，在这种数据处理方法下，不同数据之间的差别会被严重削弱。但若要注重个体感受，平均值不是最好的用于评估的标准。对于极端过度采光和采光不足的个体，使用平均值评估出的结果并不能代表其感受。

本文将初步新拟定标准，对每个座位进行 UDI 数值的模拟。对于一个个体，选出 UDI_f、UDI_s 和 UDI_e 的数值进行相加，即加和桌面采光不足（小于 300lx）和桌面采光过度（大于 3000lx）的时间占比，定义为采光不良利用时间占比。在此定义“光环境达标线”为一“采光不良利用时间占比”的标准数值，将得出数值与“光环境达标线”进行对比，若超过该标准数值，则定义该个体为采光不良个体。利用此判断方法对不同的遮阳方案进行评估。

对于新标准，主要矛盾在于如何确定上文提到的标准数值。对于样本数据来讲，若提高标准，则有更少的个体通过标准线，但合格个体的采光质量较为优质；若降低标准，会有更多个体通过标准线，但大部分个体的采光质量将不会非常优秀。对于用于确定标准的样本数据，标准不影响样本客观的采光效果，但是标准的选择和确立将在后续实际应用中影响遮阳方案的选择，从而影响到实际方案的遮阳效果。因此确立新标准的最大问题在于，如何找到在尽可能少地放宽标准的同时，让更多人通过标准的临界点。

3.2 不合格个体数的观察与评价对象确立

在新标准的研究下，首先要确定研究对象的范围是多大。在这里本研究在既有研究范围基础上进行两次尝试，既有研究中只分别取两列中比较明显的一种采光不良的情况进行讨论。首先再次对靠近主采光面和远离主采光面的两列座位进行模拟，分别取靠近主采光面一列的“过量采光时间占比”和教室深处一列的“采光不足时间占比”加和与不同“光环境达标线”标准进行对比。第二次则对两列都取“采光不足时间占比”和“过量采光时间占比”进行加和，与不同“光环境达标线”标准进行对比。两次比较结果分别如图 3.1 所示。

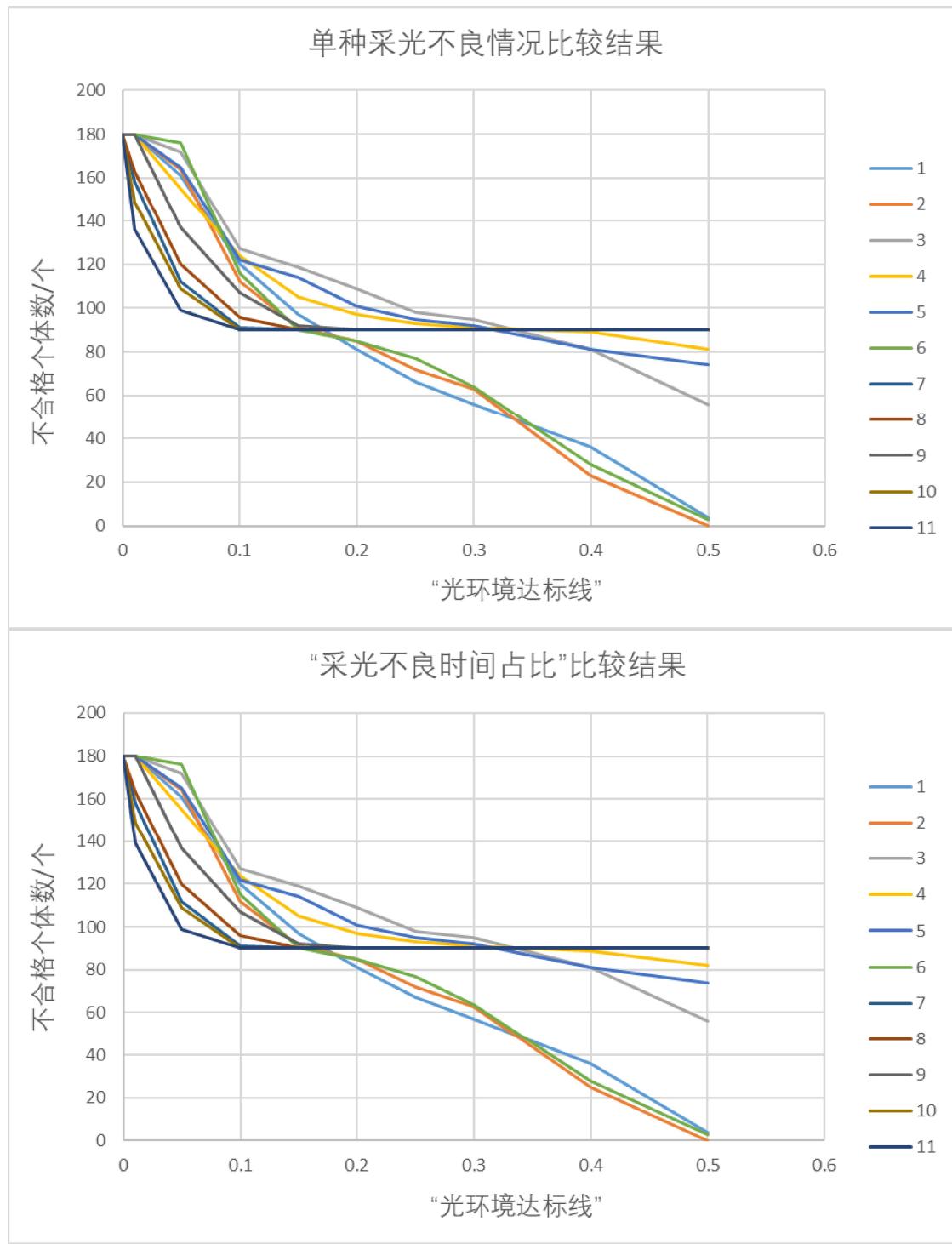


图3.1 以列为单位判断不合格个体数模拟结果

随着“光环境达标线”逐渐宽松，部分方案中不合格个体个数不再进行变动。其原因是靠近主采光面的一列个体在部分遮阳方案中“过度采光时间占

比”较高，若只将这两列个体列为研究对象的范围，不合格个体数量可以浮动的空间较小。另一方面，若想更加考虑个体的感受，应尽可能减少个体被其他个体代替的统计操作。因此，本研究将考虑把抽样教室中所有的个体都列入研究对象范围。

另一组对比在同一种遮阳方案中不同附加设定的情况下进行。在使用 1 号遮阳方案的情况下，做两组对比：在使用时间均为 8am-6pm 的情况下，加动态遮阳与不加动态遮阳进行对比；在均不使用动态遮阳的情况下，使用时间 8am-6pm 和 8am-4pm 之间进行对比。结果如图 3.2 所示。

从图 3.2 的结果来看，尽管在使用同一种遮阳的方案的情况下，不同的使用习惯和时间段会产生出不同的气象模拟结果，从而产生不同的“光环境合格线-不合格个体数”的对应关系。也证明了，对于浮动情况各异的气候条件，会产生不同的客观限制，不能使用一种确切的标准数值进行绝对的判定，而是根据不同的气候条件动态调整规范后进行评估。

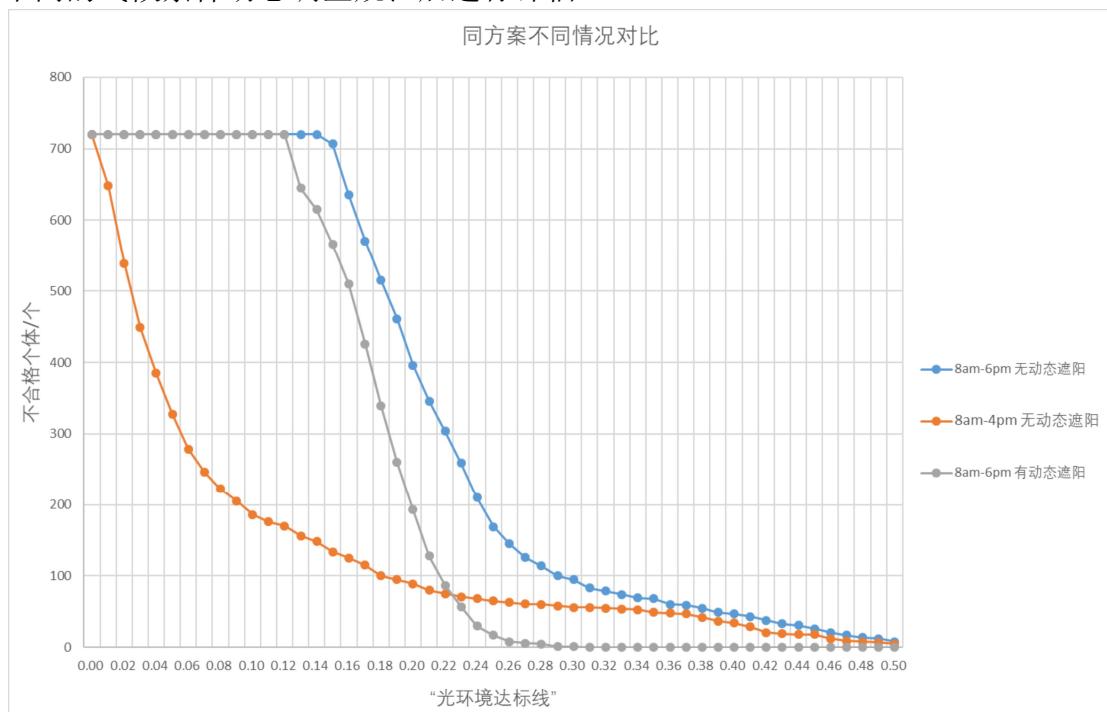


图3.2 不同时间范围与是否添加动态遮阳的结果对比

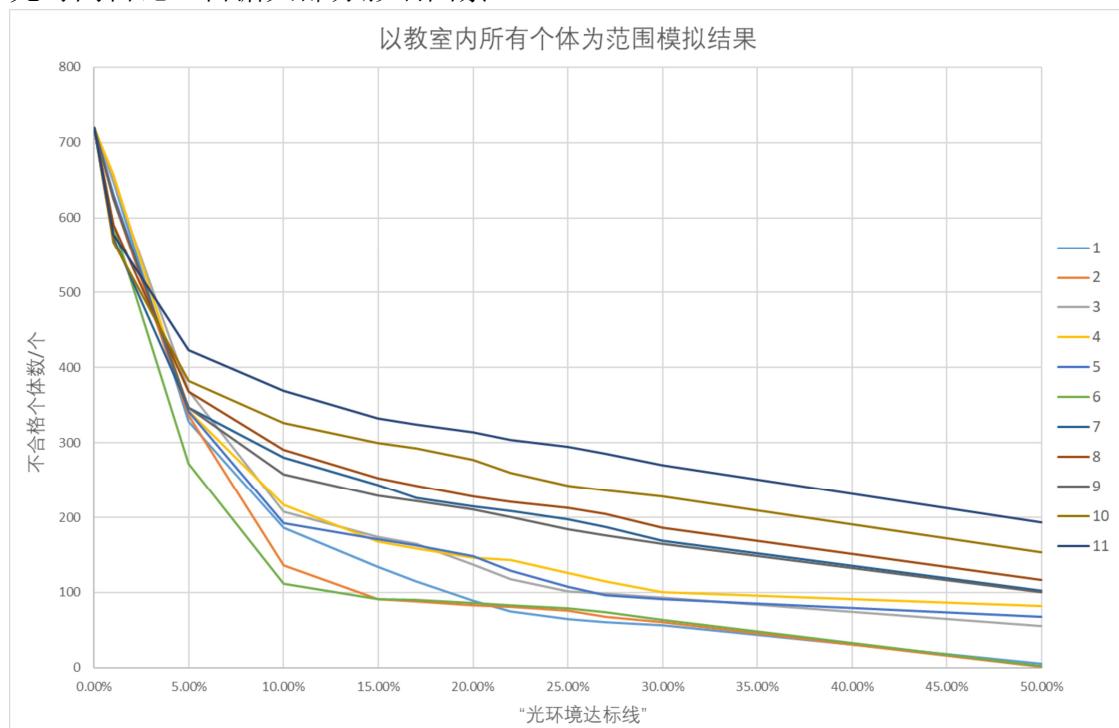
3.3 “光环境达标线”的确立

为尝试确定“光环境达标线”，本研究模拟所有遮阳方案中相应抽样教室的个体采光情况。采样全部抽样教室中的所有 48 个座位，采样点水平坐标与桌面位置对齐，高度为距离该教室地面上 760mm，即桌面上 10mm 以避免重合面带来误差。

对 UDI 进行详细数据分析，采取同样对“采光不足时间占比”和“过量采光时间占比”的概念定义，加和获得“采光不良利用时间占比”数据，分别与不同的标准进行对比，以此分析不同“光环境达标线”情况下个体不合格数量的变化趋势，尝试找到临界值。

在粗略估计中，以 0% 为最小标准线，50% 为最大标准线，分别细化不合格个体从无到有和变化趋势最大的几个区间范围。分别为 0%-5%, 10%-25% 等，分别进行不合格个体数量的粗略统计。

得到的 11 种遮阳方案中，不合格个体与“光环境达标线”的关系如图 3.3 所示。在 11 种方案中，“光环境达标线”设置较为严格的时候，教室朝向北方的 2 号和 6 号方案有较大优势，可能因为“采光不良利用时间占比”中，“过量采光时间占比”占据大部分影响因素。



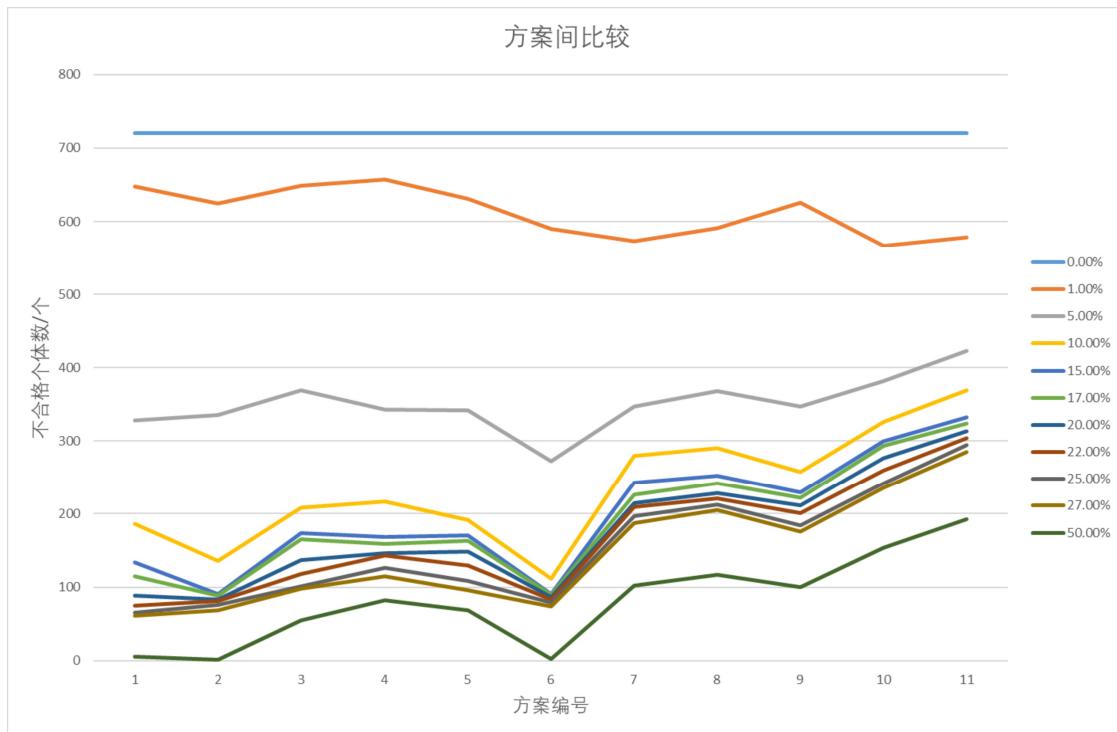


图3.3 以教室内所有个体模拟结果

对于本次模拟，不同方案之间的初步比较结果：除去两个北向采光方案，表现普遍最佳的是1号方案：双侧导光板遮阳方案，与以列为单位的研究成果基本一致。在尝试不同的“光环境达标线”的过程中，可以发现从1%过渡到5%的过程之中，不合格个体数量大幅度下跌，这意味着尽可能小的降低合格标准的同时可以使得更多人满足要求，故可以考虑将“光环境达标线”的制定限制在这个范围区间内。

同时，为了对比不同条件下的中小学建筑采光情况，本文也使用同样遮光方案做了单向采光教学楼的模拟，研究对象范围与本小节中双向采光的情况一致，均为抽样教室中所有的桌椅个体。结果如图3.4所示。北向采光的两个方案优势更加明确，除了这两个方案以外，1号双侧导光板遮阳方案依旧有较为明显的优势，只是不合格个体数量大幅度跌落的区间双侧采光的情况有所不同。

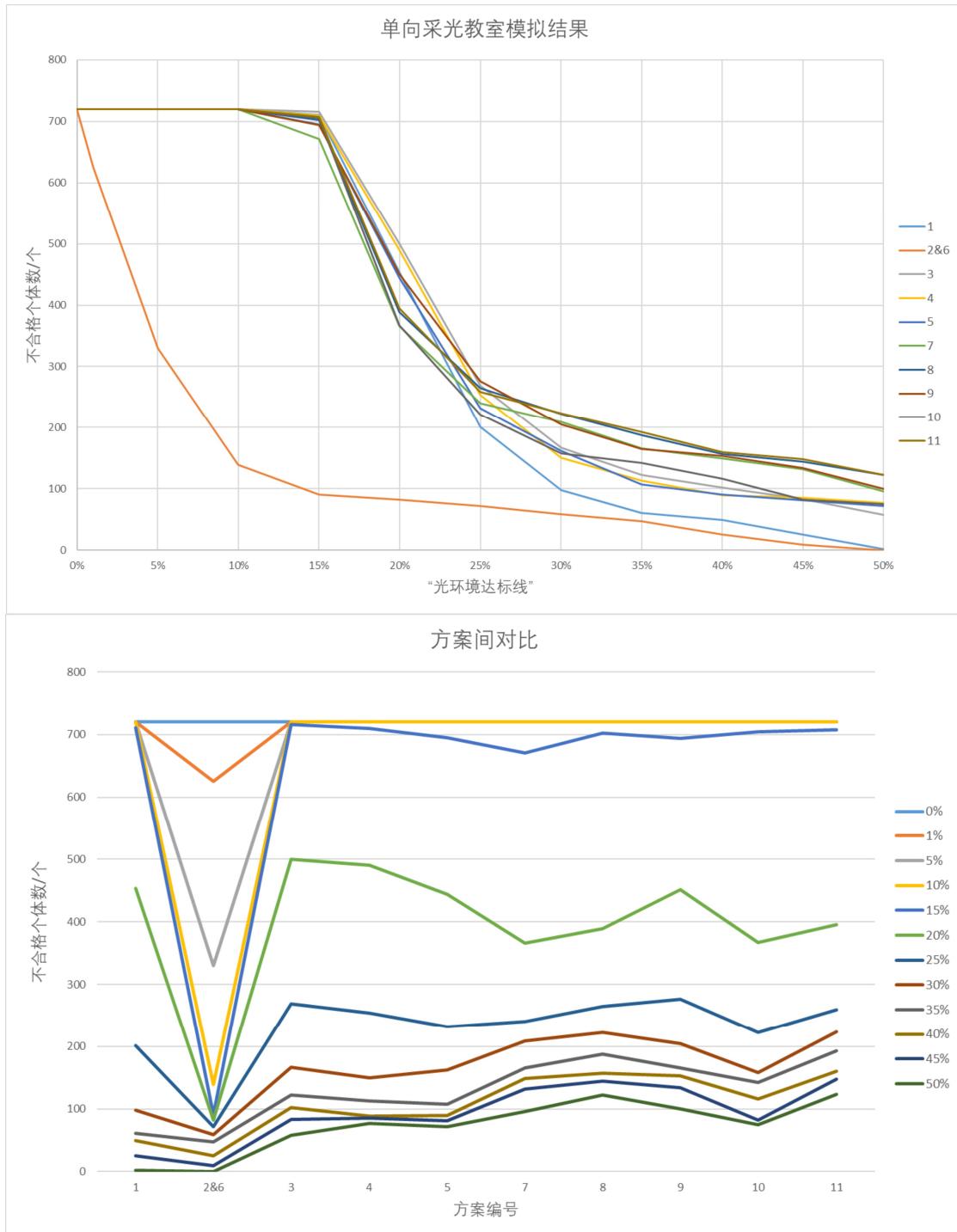


图3.4 单向采光教室模拟结果

为得到“光环境达标线”，使用图3.3中，取全班48个采样点、双向采光的模拟结果，做更细致的研究。对“光环境达标线”的尝试范围进行更细致的划

分。即在 0%-50%区间中，每 1%对所有方案抽样出的所有个体进行一次判定。得到的光环境达标线-不合格个体数曲线结果如图 3.5 所示。

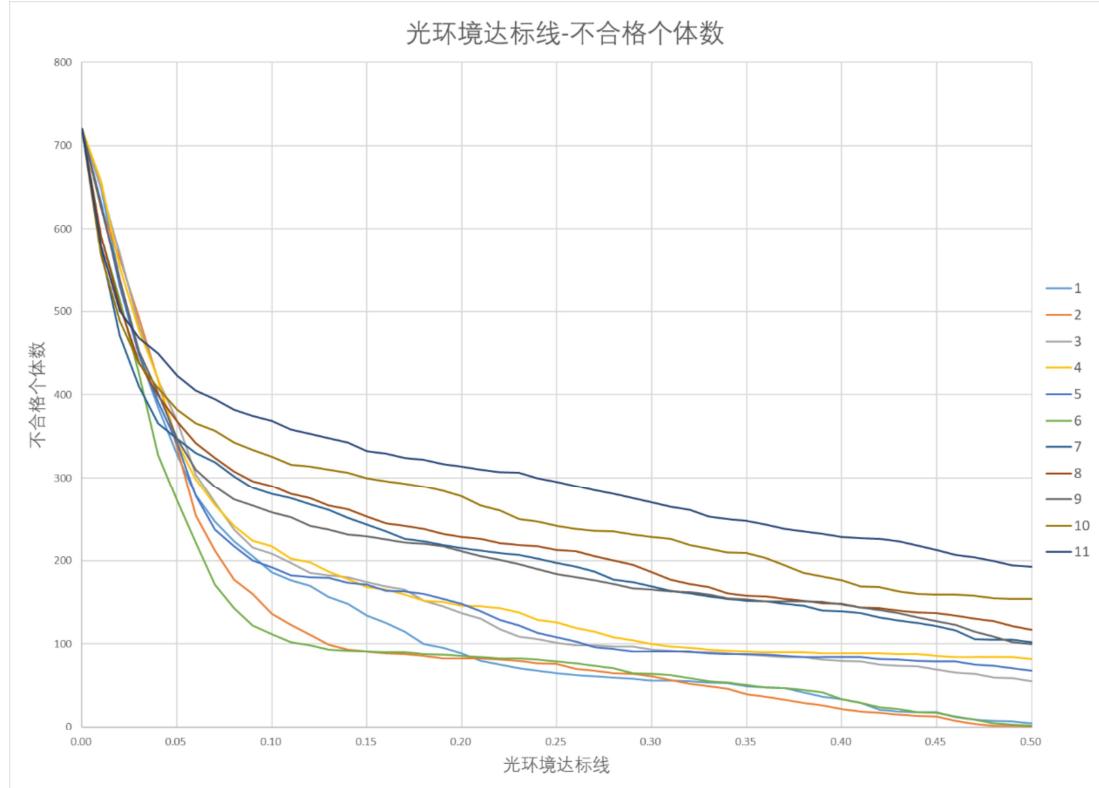


图3.5 精度为1%的光环境达标线-不合格个体数曲线

对曲线每 0.01 的区间进行一次斜率计算，即可得到每种遮阳方案中同一标准变化差值间不合格个体减少幅度最大的情况。取变化最大处为“光标准达标线”。则每个方案的“光标准达标线”如表 3.1 所示。

表3.1 各方案的“光环境达标线”

| 方案 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 |
|-----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| 达标线 | 2% | 1% | 3% | 2% | 2% | 1% | 1% | 1% | 1% | 1% | 1% |

在阶段性结论中，“光环境达标线”与不合格个体个数之间在 11 种遮阳方案的加持下，各自可以建立客观的对应关系。在第 3 章中，本文通过不同的模拟范围与模型进行了多次模拟，确定了在本文新制定的标准下最适用的评估范围设定，并且通过计算斜率的方式确定了每种方案的“光环境达标线”。

然而对于使用教室的个体来讲，不同的采光状况不能仅仅通过“光环境达标线”和不合格个体数量的关系一概而论。还要考虑照度合适的区间内，不同照度产生的影响。同时也要考虑，是否不同的采光不良的情况下会产生同等的不良效应。以及在时间积累的过程中，采光的效果会因此出现非线性的改变。

所以对于个体在教室光环境中的体验，还需要更加细致的讨论与计算。

第4章 效用模型建立

由上文可得，除了“光环境达标线”和“不合格个体数量”的客观对应关系以外，应将以上其他因素纳入考虑中，本研究将再次细化采光效果对于个体的影响，同时也要考虑如何计算得出比较精准的“光环境达标线”，而非粗略的范围尝试。需要进行比较详细的数学模型建立。

需要解决的主要问题为如何将人受到多大程度的正面光环境作用通过可视的、可比较的数值表达出来，并将其他因素纳入考虑范围作用于这个结果。

4.1 理论模型

由第3章结尾可知，“光环境达标线”和“不合格个体”此消彼长，但若想通过单独一个“光环境达标线”就完成评估也不够细致。在获取光环境得到的数据稳定的情况下，可以使用已有的数据对个体在该光环境内的综合情况进行评估。此处可以引用一个经济学含义进行代称：效用，即消费者在消费商品或者服务的过程中，欲望被满足的程度。

要计算一个个体在所处教室光环境中给其带来的效用，需要在一个递进的逻辑下进行数学模型建立。首先需要提取影响光环境效用的变量进行关系建立；其次根据不同的动态调光偏好模型也可以知道，不同人对不同的照度区间有不同的偏好，要考虑不同照度区间内人的不同偏好频率；进一步还需要考虑时间累积带来的影响，当桌面采光情况不良时间足够长的时候会带来更多的负面效应；最后再加上在新的标准下，对于每个个体判断是否“合格”的因素对效用的作用。

当建立出教室光环境对个体提供的效用模型后，就可以评估每个位置的采光状况，并且可以算出每个遮阳方案的整体效用以进行方案之间的互相比较。这种评估方法可以同时考虑到个体和整体方案，不会因为统计学上的数据处理，使用平均值等手法忽略差异较大的个体感受。

4.2 针对个体的教室光环境效用模型

4.2.1 描述性统计

对教室全部个体进行模拟得到的数据，本文首先选取可以大致描述一个座位光照情况的平均照度（Mean Lux），目的是对所有方案中所有教室所有座位模拟出来的数值进行基本的情况估计。对每个方案选取 48 组来自 15 个抽样教室的数据，进行平均值统计，以代表该方案中，一间“标准”教室中该位置的桌面照度值。使用 SPSS 统计学软件对数据集进行描述性统计和分析，其中分析的数据包含平均值，极值，标准差等数据，并进行直方图绘制。结果如表 4.1 所示。

表4.1 描述性统计数据结果

| 方案 Project | 平均值 Mean Value | 平均值标准差 Std. Err | 最小值 Min | 最大值 Max | 标准差 Std. Dev | 范围 Range |
|---------------|-------------------|--------------------|------------|------------|-----------------|-------------|
| 1 | 1513.263 | 166.7412 | 578.04 | 4848.34 | 1155.217 | 4270.3 |
| 2 | 1235.272 | 92.61007 | 655.05 | 2842.88 | 641.6214 | 2187.83 |
| 3 | 1884.018 | 27.79933 | 1405.63 | 2119.21 | 192.5994 | 713.58 |
| 4 | 2026.018 | 335.72 | 580.88 | 8866.51 | 2325.937 | 8285.63 |
| 5 | 2001.733 | 330.5804 | 546.56 | 8606.32 | 2290.328 | 8059.76 |
| 6 | 1323.9777 | 89.72612 | 680.68 | 2889.11 | 621.64078 | 2208.43 |
| 7 | 2533.35 | 341.4178 | 771.55 | 9117.19 | 2365.412 | 8345.64 |
| 8 | 2975.064 | 417.2299 | 785.49 | 10547.56 | 2890.653 | 9762.07 |
| 9 | 2848.292 | 470.3912 | 657.53 | 11694.73 | 3258.966 | 11037.2 |
| 10 | 3276.458 | 431.6849 | 807.74 | 10771.13 | 2990.801 | 9963.4 |
| 11 | 4160.4048 | 597.71494 | 922.84 | 14564.79 | 4141.09059 | 13641.95 |

由表 4.1，描述性统计的结果可以看出，11 种方案之间存在较大差异性。11 号方案的照度水平平均值较大，两个北向采光方案 2 号与 6 号的照度平均值较低。所有方案的最小值都超过 300lx，说明大部分座位的平均照度值都可以满足人的基本伏案读写需求，但是最大值除了 2 号、3 号与 6 号方案，最大值都超过 3000lx，说明过量采光的情况较为普遍。

除此以外，个体与个体之间在所有的方案种都呈现出明显的差异性。所有方案的范围跨度都较大，说明对于一间教室中，桌面照度的数值是分布不均匀的，标准差也较为明显。只有3号方案相较于其他方案较为稳定。对于个体差异性的结论也可以更加直观地在如下图4.1所呈现的情况下得出。直方图的横轴代表不同的照度区间，以1000lx为一个单位，纵轴表示“标准”教室中的48个结果落在该区间内的频率。可以看到首先11个方案的图像分布情况较为不同，同时也均不符合正态分布规律，数据之间没有什么强相关性和规律，同时也分布得较为分散。更加证明了根据个体情况进行评估标准建模的重要性。

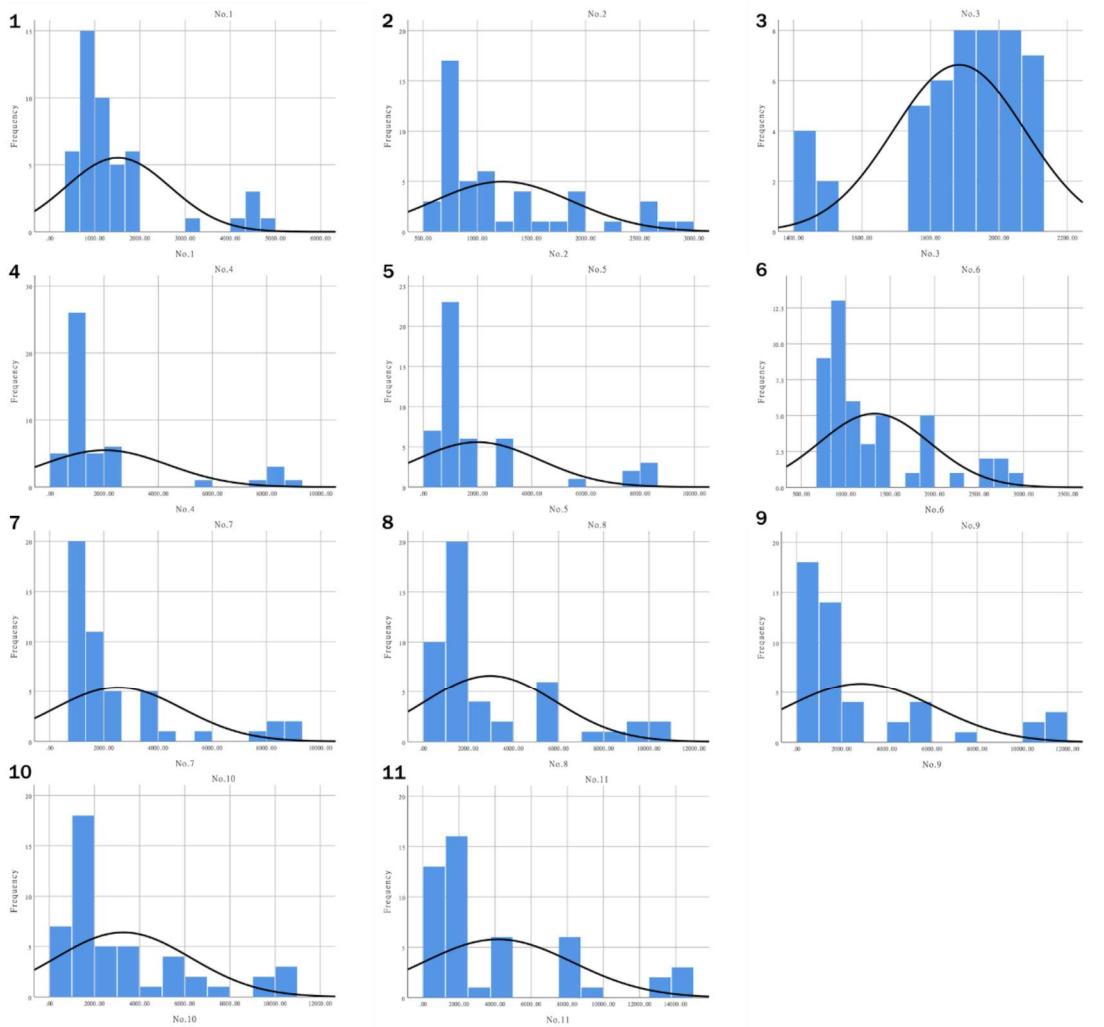


图4.1 11种方案中一间“标准”教室的直方图

4.2.2 模型建立

对于不同遮阳方案之间的对比与排序关系由光环境作用于个体的效用所决定。在此首先选出模拟中影响光环境对人的效用的两个变量。本文主要聚焦于关于照度的细化研究，故首先提取平均照度 E 数值，又因教室作为学生成长时间停留区域，受到不同光环境作用的时间很重要，故提取有效天然光照度自治时间占比 UDI_a，使用这两个变量进行对满意度效用 U_i 的定义(4-1):

$$U_i = W_E \times |E - E_0| + W_{UDI} \times UDI \quad (4-1)$$

其中 W_E 和 W_{UDI} 分别为有关 E 与 UDI 的权重。对于每一个方案的每一个个体，所接受到的桌面采光参数 E 与 UDI_a，可以使用变异系数法计算得出二者对应的信息权重。

UDI_a 为有效天光照度自治时间占比，该指标数值越大越好，在公式中作为正向指标使用。E 为平均照度， E_0 为学生在室内工作时，室内天然光照度的最佳值，根据标准取 500lx，对于 $|E-E_0|$ 的值来讲，数值越小越好。 $|I-I_0|$ 在公式中作为负向指标，需要使用公式(4-2)对其进行正向化处理：

$$E'_i = \frac{1}{\max |E - E_0| + |E - E_0|} \quad (4-2)$$

将经过该公式正向化的 $|E-E_0|_i$ 的数值定义为 E'_i ，则公式(4-1)应迭代为公式(4-3)，并使用 E'_i 进行系数计算：

$$U_i = W_E \times E'_i + W_{UDI} \times UDI \quad (4-3)$$

计算出每个方案中，一间教室的 48 个座位各有一组权重系数。此处只表示其中一组数据。参考表 4.2，例如对于 1 号遮阳方案的所有教室中，编号为 0 号的桌椅个体，权重计算方式如表格所示。

表4.2 基于变异系数法得出的E与UDI_a相关信息权重（以1号方案0号座位为例）

| 编号 Number | 标准差 Standard Deviation | | 平均值 Mean Value | 信息内容 Information content | 权重 Weight |
|--------------|---------------------------|--------------------------|--------------------------|-----------------------------|----------------------------|
| | (σ) | | (μ) | ((K=σ/μ)) | (Wi=Ki/ΣK) |
| | 0 | 平均照度 UDI _a | 0.000238218 0.7243105 | 0.011149044 0.079610686 | 0.122841306 0.877158694 |

除此之外，对于个体的效用，除了 UDI 和平均照度 E 的评判标准，还应考虑采光带来的“瞬时效应”和“时间累积效应”，即不同人对于更细化的桌面照

度的喜好以及采光不良的照度区间内经过时间累积带来可感觉到的视疲劳效应，并在两个方面做细化与定义。

1) 瞬时效应

根据偏好动态调光实验，人对不同照度的喜好有一定聚集性，比起UDI的标准更为细致。根据 Boyce[17]的偏好动态调光实验，其中展示了一天中不同参与者选择的照度范围，以及选择的比例。该结论如表 4.3 所示，根据该表可以得出人在工作室对于桌面照度在 100lx-1200lx 之间的的时候，偏好比例分布情况。

表4.3 基于Boyce的偏好动态调光实验得出的人对桌面照度的偏好分布

| 照度区间 | 100-200 | 200-300 | 300-400 | 400-500 | 500-600 | 600-700 | 700-800 | 800-900 | 900-1000 | 1000-1100 | 1100-1200 |
|------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|----------|-----------|-----------|
| 比例分布 | 0.0% | 9.1% | 51.5% | 12.1% | 6.1% | 9.1% | 3.0% | 6.1% | 0.0% | 0.0% | 3.0% |

在该实验中，由于调光范围的选取范围限制，需要扩充计算出的偏好动态调光实验范围至 100lx 以下及 3000lx 以上。将该文献中 33 人对不同照度区间的偏好分布通过图像表达，如图 4.2 中的散点所示。为预测照度超出 100lx-1200lx 范围照度对应的偏好比例，将该散点图进行分段非线性回归，得到图中曲线。

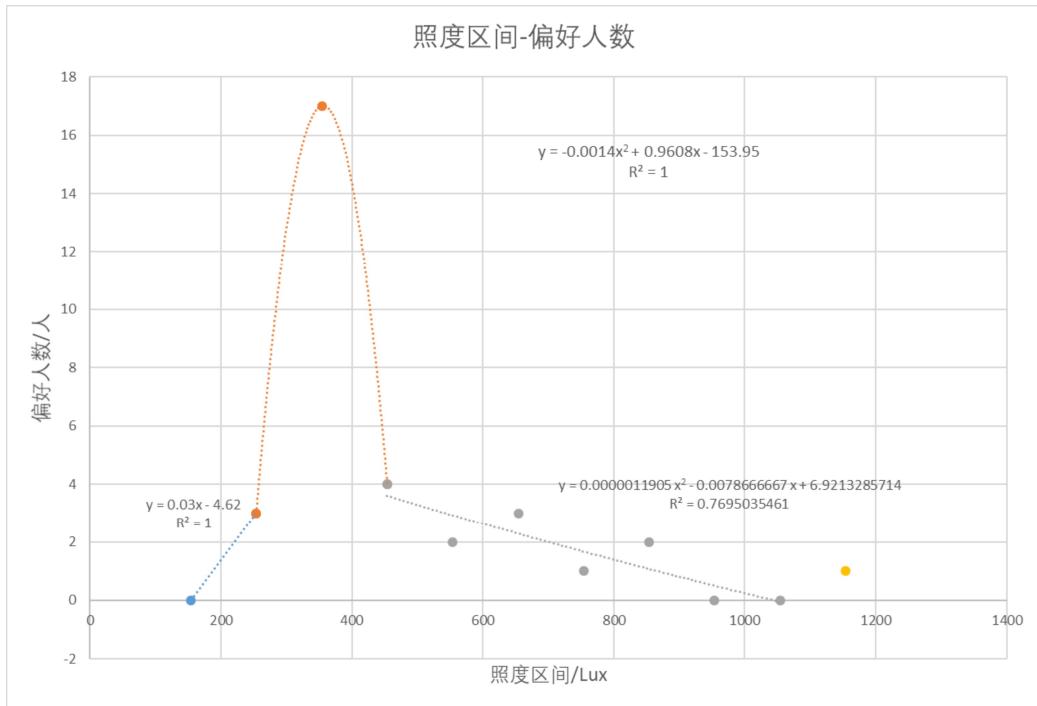


图4.2 照度区间-偏好比率对应散点图

其中，Boyce 的实验中由于灯具和控制器的限制，照度变化大约在 100lx-1200lx 区间，对于这个有真实数据的区间，可以对其按 100lx 进行数据分箱，其他则粗略划分为>3000lx, <100lx, 1200lx-3000lx 的情况。利用图表中拟合函数，即可估算出其他区间的偏好比率。此时所有比率求和不等于 1，需要重新在求和等于 1 的情况下重新分配比率，完整的桌面照度-偏好比率表格如表所示。

表4.4 基于分段函数求得人对桌面照度的偏好分布

| 照度区间 | <100 | 100-200 | 200-300 | 300-400 | 400-500 | 500-600 | 600-700 |
|------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 比例分布 | -17.00% | 0.00% | 16.35% | 92.63% | 21.79% | 15.96% | 12.45% |

| 照度区间 | 700-800 | 800-900 | 900-1000 | 1000-1100 | 1100-1200 | 1200-3000 | >3000 |
|------|---------|---------|----------|-----------|-----------|-----------|---------|
| 比例分布 | 9.08% | 5.84% | 2.72% | -0.26% | -3.11% | -23.76% | -32.69% |

根据人的不同偏好，可以相应用于不同照度下的 UDI 相应进行加权 P，P 的数值由台灯调光喜好实验的人员偏好比例。在此之上进行有关 UDI 部分的公式改写，得出：

$$UDI_i = \sum P_i UDI_i \quad (4-4)$$

2) 累积效应

对于采光情况不太好的情况，随着时间累积，会导致视疲劳一定程度加重。将 UDI 分为采光较为正常的情况和采光明显不良的情况，即将 100lx-3000lx 以及该区间外的 UDI 分为两部分。

考虑到对于“采光不足”的情况可以针对个体区域进行照明设计进行调节，若采取动态遮阳的手段弥补“采光过量”的问题可能会影响教室其他个体，故在此认为“采光不足”的时间累积的不良影响相应较小。上文瞬时效应的讨论中，<100lx 和 >3000lx 的偏好比率关系也符合这种情况。本文采用这种假设并采用上文中的偏好比率。

细化讨论采光不良的照度区间。其中，累积的时间时长和对于不同采光不良的照度区间的偏好都是影响结果的变量。在此引用常量 T，即视疲劳积累临界时间。本文尝试用两种自变量与常量 T 进行比较，分别为 UDI 与客观采光不良时间长度数值。

使用有关 UDI_i 的公式(4-4)进行迭代，其中比较数值为 UDI 时，统一量纲后，构建数学模型得到：

$$UDI_i = \sum P_{\text{正常}} t_{\text{正常}} + \sum P_{<100lx} (t_{<100lx} - T) + \sum P_{>3000lx} (t_{>3000lx} - T) \quad (4-5)$$

参考 Rui Dang 有关视疲劳的研究实验[13]，实验持续 15min，被试者可以感受到视疲劳。在此将常量 T 的数值取为 15min。在该数学模型中， $P_{<100lx}$ 和 $P_{>3000lx}$ 取值为负，在采光不良时间不超过 15min 的时候，采光不良部分带来的效用为正，但累积时间越长，效用越小；若累积时间超过 15min，则该部分带来的效用会转换为负值，带来不良效应。

综合以上影响因素，根据公式(4-5)，得到各方案 UDI 影响的效用部分如表 4.5 所示。

表4.5 基于公式(4-5)所得各方案UDI效用结果

| | | | | | | |
|--------|---------|----------|----------|----------|---------|----------|
| 遮阳方案 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| UDI 效用 | 46.0003 | 73.04037 | 10.31859 | -56.5515 | -21.061 | 47.00467 |

| | | | | | |
|--------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 遮阳方案 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 |
| UDI 效用 | -211.202 | -234.297 | -191.729 | -320.974 | -447.439 |

若使用 UDI 与常量 T 进行比较讨论，则构建数学模型为：

$$UDI_i = \sum P_{\text{正常}} UDI_{\text{正常}} + \sum P_{<100lx} (UDI_{<100lx} - T) + \sum P_{>3000lx} (UDI_{>3000lx} - T) \quad (4-6)$$

根据公式(4-6)，在该模型的情况下讨论得到各方案效用如表 4.6 所示。

表4.6 基于公式(4-6)所得各UDI方案效用结果

| | | | | | | |
|--------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 遮阳方案 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| UDI 效用 | 69.63045 | 63.09129 | 78.14285 | 57.27329 | 69.25283 | 42.91193 |

| | | | | | |
|--------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 遮阳方案 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 |
| UDI 效用 | 0.276167 | 0.100673 | 22.07739 | -17.9603 | -41.4911 |

4.3 效用计算模型

4.3.1 个体获得的综合效用

由表 4.5 与表 4.6 的结果，可以求出 UDI 的两重递进逻辑后得到的阶段性效用结果。使用这两种结果分别代入公式(4-3)，得到对于每个个体未经过标准判定的光环境效用结果。每种方案即可通过对个体效用的求和得到对光环境的效用较为量化的值 U，计算公式为(4-7)：

$$U = \sum U_i \quad (4-7)$$

关于 11 种方案中抽样个体的效用总和，由于 4.2.2 中第 2)部分分别讨论了两种情况，故两种情况分别对应一种结果，分别如表 4.7 与表 4.8 所示，方案间数据对比如图 4.3 所示：

表4.7 基于公式(4-3)所得各方案综合效用结果 (对应表4.5)

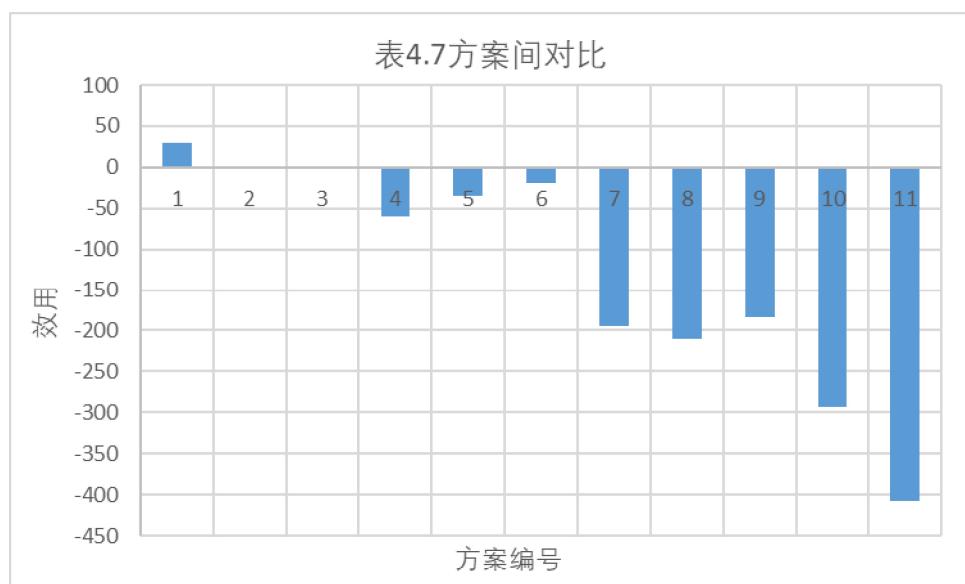
| 遮阳方案 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 综合效用 | 30.29758 | 0.357465 | -2.40758 | -59.3812 | -34.2882 | -18.6746 |

| 遮阳方案 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 |
|------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 综合效用 | -194.989 | -210.549 | -183.131 | -293.718 | -407.628 |

表4.8 基于公式(4-3)所得各方案综合效用结果 (对应表4.6)

| 遮阳方案 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 综合效用 | 44.98388 | 21.26815 | 54.21828 | 35.37166 | 45.42548 | 10.11923 |

| 遮阳方案 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 |
|------|----------|----------|----------|----------|---------|
| 综合效用 | -12.1593 | -11.1319 | 7.393726 | -26.7529 | -43.848 |



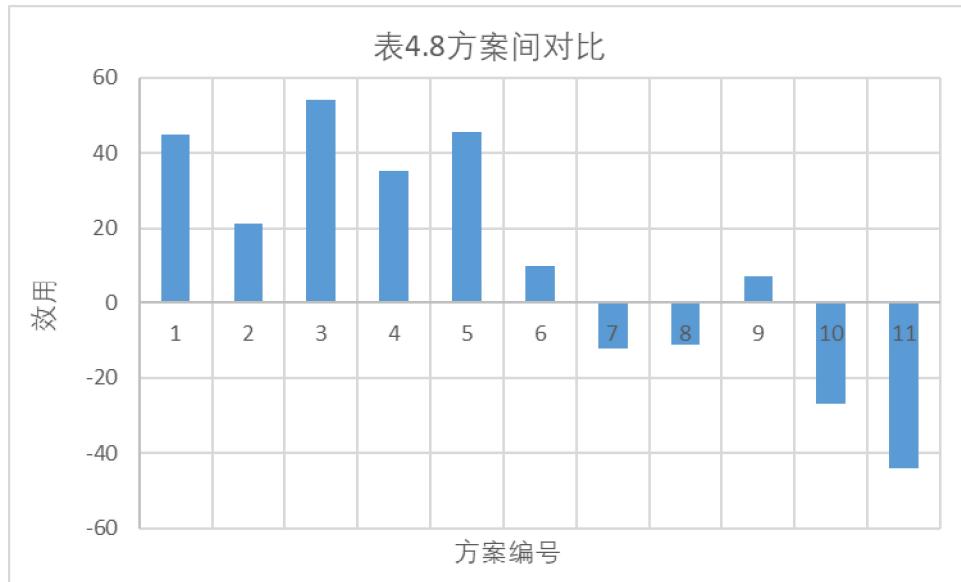


图4.3 方案间光环境对个体效用比较

4.3.2 标准判定后的效用模型

在 4.3.1 章节的讨论中，示范了对于软件模拟出的数据集进行效用计算的过程。这种处理方法可以对每一个个体进行效用计算。但若是希望在关注个体的情况下，同时对不同遮阳方案里所有抽样教室进行整体的描述，并且将整体的特征作为一种影响因素加入考虑中，则还需要经过 2.3 所阐述的标准判定。在此建立以下数学模型(4-8)以解决该问题：

$$U = \sum (k \times U_i) \quad (4-8)$$

其中引入系数 k 指标准判定系数，定义为对第 i 号个体是否为“不合格个体”的量化系数。当该个体通过“光环境达标线”的判定时， $k=1$ ；若没有通过达标线，则 $k=0.8$ 。该方法可以通过判断一个方案抽样出的个体整体通过标准判定的情况，并将判定结果作为影响因素引入效用计算中。则在这部分讨论中，通过公式(4-8)计算得出的结果如表 4.9 和表 4.10 所示，方案间的效用数值对比如图 4.4 所示。

表4.9 基于公式(4-8)所得各方案综合效用结果（对应表4.5）

| 遮阳方案 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 综合效用 | 27.47339 | 0.789057 | 2.939035 | -43.8036 | -23.8106 | -14.1614 |

| 遮阳方案 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | |
|------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 综合效用 | -154.203 | -166.449 | -144.964 | -232.851 | -323.731 | |
| 遮阳方案 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| 综合效用 | 37.47544 | 17.07571 | 45.9532 | 30.13211 | 38.18901 | 8.249921 |

表4.10 基于公式(4-8)所得各方案综合效用结果 (对应表4.6)

| 遮阳方案 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 |
|------|----------|----------|----------|---------|----------|
| 综合效用 | -9.04515 | -8.09969 | 6.514692 | -20.574 | -34.1802 |

表4.9 方案间对比

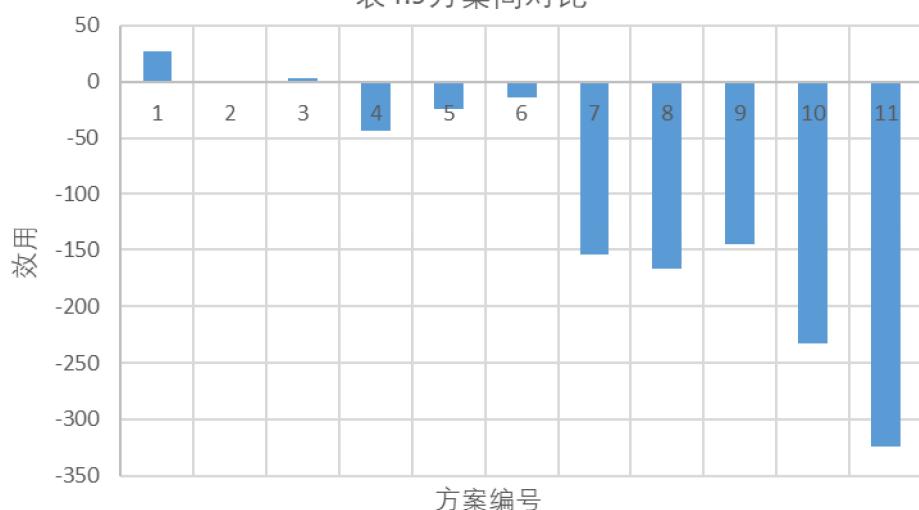


表4.10 方案间对比

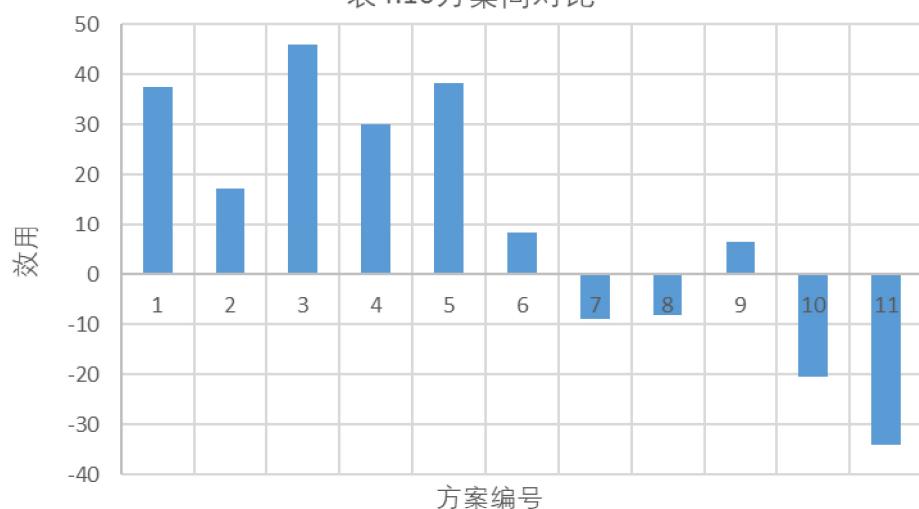


图4.4 使用“光环境达标线”对方案评估后光环境对个体效用比较

第5章 结论与展望

5.1 结论

5.1.1 模型功能简述

本文为解决如何通过评估个体光环境来选择教室光环境构成策略的问题，制定了新的策略标准，讨论了如何细化量化教室光环境对使用者带来的正向影响。

所得成果中，2.3 的评估标准可以供光环境标准制定者提供参考，通过实际采样标准学校建筑采光数据计算出适合该地区的“光环境标准线”，并用以对同地区的其他学校建筑教室。对比现有的标准，该标准的特点是聚焦于通过对个体的光环境情况进行判断来衡量方案的整体情况，更加注重同一间教室内不同位置所受到的光照条件的个体差异性。

在第 4 章中，本文通过引用经济学概念“效用”来描述用以量化个体受到光环境带来的正向影响数值。通过两重递进逻辑（瞬时效应，时间累积）两方面来讨论其他细节因素可能带来的影响。通过数学模型建立，可以对每种方案里的 15 间教室中，每间教室内 48 个个体，每个个体进行效用计算。互相对比个体之间的情况，供现实情况中分析、统计或比较个体光照情况时使用（如聚焦光环境情况较差的个体、个体光环境效用大致分布情况等）。

通过结合 2.3 和第 4 章的结果进行数学建模，当使用关注个体状况的标准来描述一种方案的整体教室光环境情况时，可以将其作为一种影响因素加入效用计算中。得到的结果是相对关注个体的情况下，每种方案的整体光环境效用。该结果可以用于对比不同遮阳方案之间的效用，为一间教室对遮阳方案的选择提供新的参考标准。

5.1.2 遮阳方案评估

使用 Climate Studio 模拟得到临沂当地气候下，标准教室组成的典型教学楼的采光情况数据，代入本文所得模型中进行计算。得到以下结果：

- 1) 不同采光方案中所求得的“光环境达标线”不同，从光环境达标线-不合格个体曲线图上大致可以看出 1 号、2 号、3 号、5 号、6 号为采光情况比较好的方案；

- 2) 不使用 2.3 拟定的新标准对个体进行判定时，对于个体的光环境效用计算，得到的两种结果中，前五种较好的遮阳方案排序为：
1>2>3>6>5 和 3>5>1>4>2；
- 3) 在使用标准进行判定，并将判定结果作为影响因素加入效用计算之后，两种结果中前五种较好的遮阳方案排序为：1>3>2>6>5 和
3>5>1>4>2；

5.2 研究局限

5.2.1 模拟误差分析

本文研究都是基于软件模拟数据得到的结果而进行的模型建立。由于地点限制，不能去实际检测。模拟数值与实际测量数值可能会有一些差距，可能会是因为现实中的学校建筑周围环境中植物行道树密度较大，并且相近的楼之间也会产生互相遮挡关系，会比模拟出的结果要暗一些。而本文研究中为了简化影响因素，只讨论了没有连廊和周围遮挡物的教学楼遮阳方案效果，模拟所得数据相较现实情况更亮，而有效采光照度自治的范围规定维持在 300lx-3000lx 之间，导致更多个体被判定为“过度采光”的时间占比数值比实际情况更长，最终导致第 3 章所得到的每个方案的“光环境达标线”较为严格，实际测量数据所得结果可能会得到更为宽松的“光环境达标线”数值。

Climate Studio 作为一款建筑环境性能分析软件，以渐进式路径跟踪的方式使用 Radiance 引擎模拟光。但由于每次计算的过程都是首先收集一次数据初始估计值，而后再随着追踪到的光路累积起来进行去噪，这种动态的过程导致同一模型同一参数的情况下每一次模拟之间数据有所不同。在不同模型之间互相作比较的时候可能会有少量的误差。

5.2.2 时间与采样误差分析

由于时间限制与技术限制，本研究只做了临沂气候下学校教室的模拟。说明结论不一定适用于所有的城市地区对学校建筑的光环境评估工作。不同城市之间的光环境从国标中的光气候分区划定即可看出客观差异性。同时，只针对模拟结果中有的光环境数据进行了模型建立，主要集中在照度 I 与 UDI 两个变量中。没有考虑其他因素如照度均匀度等因素。在考虑时间累积带来的影响

时，由于模拟的数据文件只提供全年按小时计的照度数据，这里使用的数据颗粒度仍然不够细致。

同样由于时间限制，模型建立后没有进行使用场景的模拟，比如实践指导照明设计等。导致该模型有一定的理论局限性。需要后续进行实践后与其他研究成果进行互相验证来保证该模型的应用广泛性。

以上的局限性都是可以进一步讨论与研究后精进的。

5.3 模型应用的展望

本文讨论了一种对教室光环境新的评估方式，并对此进行了模型建立。该模型可以指导更新现有的学校建筑光环境评估标准，将现有的中小学建筑教室光环境评估标准细化至对每个个体进行采光评估。

例如在标准《团体标准 T/CIES 030-2020 中小学教室健康照明设计规范》中，虽然已经是现有标准中相对来讲较新、较细致、较有针对性的规范，但对遮阳方案的选择仍然缺少详细的指导。5.3.1 中“靠窗侧课桌桌面的天然光照度超过 3000lx’的时候应采取遮阳系统降低照度”[18]建议更新为“靠窗侧课桌桌面的天然光照度超过 3000lx’的时候应参考 6.1.3 小节遮阳设计指导的内容，挑选自身地区气候条件与使用习惯下效果最优的采光方案”。第 6.1.3 小节遮阳设计中，建议更新为“对于南向教室，建议根据自身地区气象数据计算出‘光环境合格线’。在该地区的学校可以使用该‘光环境达标线’代入教室光环境效用模型，计算出各方案的光环境总效用，对比得出效用最优的方案。”6.2 小节人工照明设计中，建议增加要求“使用该‘光环境达标线’代入教室光环境效用模型，计算出对于个体的光环境效用，对比找到采光情况较差个体，重点进行照明设计”。

虽然本文研究中，遮阳方案之间相互比较的由于数据的误差有一定局限性，但提供了一套可行的评估工具。可以根据当地的气候条件与数据对遮阳方案进行筛选，而不是直接决策使用市面上流通最广泛的遮阳方式。

另一方面，在将来本文结论和模型建立思路可以指导教室的照明设计。每个个体在照明的环境中，根据融合照度数据再进行一次评估。可以通过该模型对每个人在照明后的环境中受到教室光环境效用再次进行计算。尽可能做到效用优化达到最大。

插图索引

| | | |
|-------|----------------------------------|----|
| 图 1.1 | 技术路径示意图 | 5 |
| 图 2.1 | 教室布局平面图与采样点位置示意 | 6 |
| 图 2.2 | 软件模拟界面及可得可视化数据 | 8 |
| 图 2.3 | 教室楼群连接方式与朝向布局情况 | 9 |
| 图 2.4 | 教室编号布局情况 | 10 |
| 图 2.5 | 教室抽样模拟结果 | 11 |
| 图 2.6 | 既有研究的验证结果 | 13 |
| 图 3.1 | 以列为单位判断不合格个体数模拟结果 | 15 |
| 图 3.2 | 不同时间范围与是否添加动态遮阳的结果对比 | 16 |
| 图 3.3 | 以教室内所有个体模拟结果 | 18 |
| 图 3.4 | 单向采光教室模拟结果 | 19 |
| 图 3.5 | 精度为 1% 的光环境达标线-不合格个体数曲线 | 20 |
| 图 4.1 | 11 种方案中一间“标准”教室的直方图 | 24 |
| 图 4.2 | 照度区间-偏好比率对应散点图 | 27 |
| 图 4.3 | 方案间光环境对个体效用比较 | 31 |
| 图 4.4 | 使用“光环境达标线”对方案评估后光环境对个体效用比较 | 32 |

表格索引

| | | |
|--------|--|----|
| 表 1.1 | 11 种遮阳方式设定 | 3 |
| 表 2.1 | 材料设定表 | 7 |
| 表 2.2 | 教室抽样结果汇总..... | 12 |
| 表 3.1 | 各方案的“光环境达标线” | 20 |
| 表 4.1 | 描述性统计数据结果 | 23 |
| 表 4.2 | 基于变异系数法得出的 E 与 UDI_a 相关信息权重（以 1 号方案 0 号座位为例） | 25 |
| 表 4.3 | 基于 Boyce 的偏好动态调光实验得出的人对桌面照度的偏好分布 | 26 |
| 表 4.4 | 基于分段函数求得人对桌面照度的偏好分布 | 27 |
| 表 4.5 | 基于公式(4-5)所得各方案 UDI 效用结果 | 29 |
| 表 4.6 | 基于公式(4-6)所得各 UDI 方案效用结果 | 29 |
| 表 4.7 | 基于公式(4-3)所得各方案综合效用结果（对应表 4.5） | 30 |
| 表 4.8 | 基于公式(4-3)所得各方案综合效用结果（对应表 4.6） | 30 |
| 表 4.9 | 基于公式(4-8)所得各方案综合效用结果（对应表 4.5） | 31 |
| 表 4.10 | 基于公式(4-8)所得各方案综合效用结果（对应表 4.6） | 32 |

参考文献

- [1] LLORENS-GÁMEZ M,HIGUERA-TRUJILLO J L, OMARREMENTERIA C S,et al.The impact of the design of learning spaces on attention and memory from a neuroarchitectural approach: A systematic review[J].Frontiers of Architectural Research,2022,11(3):542-560.
- [2] Barrett, Peter & Davies, Fay & Zhang, Yufan & Barrett, Lucinda. (2015). The impact of classroom design on pupils' learning: Final results of a holistic, multi-level analysis. Building and Environment. 59. 10.1016/j.buildenv.2015.02.013.
- [3] Galasiu A D, Veitch J A. Occupant preferences and satisfaction with the luminous environment and control systems in daylit offices: a literature review[J]. Energy and buildings, 2006, 38(7): 728-742.
- [4] Villa C, Labayrade R. A suitable and energy-efficient luminous environment for a shared office[J]. Lighting Research & Technology, 2016, 48(6): 755-770.
- [5] Singh P, Arora R. Classroom illuminance: Its impact on students' health exposure & concentration performance[C]//Proceedings of the International Ergonomics Conference HWWE. 2014.
- [6] Castilla N, Llinares C, Bravo J M, et al. Subjective assessment of university classroom environment[J]. Building and Environment, 2017, 122: 72-81.
- [7] 崔思瑶,张昕.位置如何影响大学生自习行为的认知和评价——一项基于神经建筑学视角的自然实验世界建筑,2022(11):114-115.DOI:10.16414/j.wa.2022.11.015.
- [8] 潘翠萍,邓胜芝.山东省乐陵市 80 所中小学校教室采光照明检测结果[J].河南预防医学杂志,2022,33(08):616-618+626.DOI:10.13515/j.cnki.hnjpm.1006-8414.2022.08.015.
- [9] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB50099-2011 中小学校设计规范[S]//中华人民共和国国家标准. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- [10] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB 50033-2013 建筑采光设计标准[S]//中华人民共和国国家标准. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
- [11] 中国照明学会. T/CIES 030-2020 中小学教室健康照明设计规范[S]
- [12] 张昕,周昕怡,陈晓东.从“教室采光”到“课桌采光”——基于不良利用时间占比的中小学教室采光标准重评估[J].世界建筑,2021(03):36-41+126.DOI:10.16414/j.wa.2021.03.008.
- [13] Sun B, Zhang Q, Cao S. Development and implementation of a self-optimizable smart lighting system based on learning context in classroom[J]. International journal of environmental research and public health, 2020, 17(4): 1217.

- [14] Miraoui M. A context-aware smart classroom for enhanced learning environment[J]. International Journal on Smart Sensing and Intelligent Systems, 2018, 11(1): 1-8.
- [15] Yuan B, Li J, Liu Z, et al. Research on Classroom Lighting Energy Saving System Based on YOLOv3[C]//Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing, 2021, 1871(1): 012007.
- [16] Rui Dang, Yuxing Liu, Suo Chang, The impact patterns of classroom lighting parameters on visual fatigue and a mathematical model, Building and Environment, Volume 234, 2023, 110193, ISSN 0360-1323.
- [17] Boyce PR, Veitch JA, Newsham GR, Jones CC, Heerwagen J, Myer M, Hunter CM. Occupant use of switching and dimming controls in offices. Lighting Research and Technology 2006;38:358-378.
- [18] GB7793-2010 中小学校教室采光和照明卫生标准

致 谢

感谢我的导师张昕老师对本论文的指导，感谢崔思瑶学姐帮助我查漏补缺，补充科学常识和基本技能，感谢我的朋友谢汀宸带我入门理论模型所使用的基础知识，启发我的研究思路。感谢我的朋友们成为我毕设期间的精神支柱，也感谢家人信任我选择的道路。本科最后一学期遇到新的领域，感谢我在此期间的珍惜与努力。

想起大一的夏天我也在张昕老师的设计课上学习，甚至身边的人都相似，这之间的四年像是没有发生过。想来夏天和夏天之间也没有那么久，有始有终，相逢终有别，各位来日再见。

声 明

本人郑重声明：所呈交的学位论文，是本人在导师指导下，独立进行研究工作所取得的成果。尽我所知，除文中已经注明引用的内容外，本学位论文的研究成果不包含任何他人享有著作权的内容。对本论文所涉及的研究工作做出贡献的其他个人和集体，均已在文中以明确方式标明。

· 签 名: 孙海霞 日期: 2023.6.16

附录 A 外文资料的书面翻译

The impact patterns of classroom lighting parameters on visual fatigue and a mathematical model

教室照明参数对视觉疲劳的影响模式及其数学模型

Rui Dang, Yuxing Liu, Suo Chang

天津大学建筑学院，天津市建筑物理环境与生态技术重点实验室，中国天津，
300072

摘要

在教室里，由不利非视觉影响造成的视觉疲劳会降低学习效率并影响眼睛健康。为了维持教室照明环境的质量，设置一个能将视觉疲劳降至最低的照明参数组合非常关键。然而，通过传统的方式（结合照度和色温）来描述照明质量，无法直观地表达人类视野中照明环境的复杂性。因此，本研究引入了亮度梯度的概念，并基于亮度和相关色温（CCT）定义了 20 个教室照明的照明参数。本文采用主观问卷调查与闪光临界融合频率测试相结合的实验方法，从 20 个照明参数中提取出对综合视觉疲劳指数(VF)有显著影响的 4 个参数，即方向性的亮度梯度（D31 和 D12）、亮度的平均值（ L_m ）和相关色温 CCT。基于四个照明参数对视觉疲劳的影响，建立了有利于减少视觉疲劳的最佳照明参数范围。此外，本文还建立了一个预测视觉疲劳（VF）的数学模型，即 $VF=g(D31, D12, L_m, CCT)$ ，为评估和改善教室照明质量提供了一个定量工具。

1 引言

作为物理环境的重要组成部分，照明是建筑绿色、健康和可持续发展的主要指标之一[1,2]。照明环境不仅刺激视觉感官，如视觉敏锐度和空间感知，还能在一定程度上影响人们的生理节律、生理状态和心理状态。这被称为光的非视觉效应[3,4]。近几十年来，光的非视觉效应受到了越来越多研究者的关注。特别是对于教室照明来说，不良的照明条件会导致视觉疲劳，影响学生的身心健康和学习效率，进而对他们的整体健康和发展产生重大影响[5]。

2003 年，国际照明委员会(CIE)提出了与非视觉效应相关的元素，包括光强度、光谱、时间、持续时间和暴露模式等 [6]。其中，光强度和光谱作为最重要的两个组成部分已经得到广泛研究。在室内照明研究中，Kruithof 首先使用照度和色温表征了光强度和光谱的变化，并基于主观评价结果建立了经典的照明舒适分类平面模型 [7]。尽管随后一些学者对 Kruithof 的研究结论提出了质疑和修正 [8-10]，但本研究提出的研究范式仍然被广泛应用于室内照明研究。随着室内照明的非视觉影响研究的深入，Kruithof 及相关研究所使用的照明参数和主观评价方法的局限性变得越来越明显。一方面，仅基于主观调查的评价结果很难准确传达室内照明的非视觉影响。另一方面，用于量化光强度的照度参数未能充分反映视网膜上的光强度及其在视野中的分布。

近年来，照明的非视觉影响的研究越来越多地涉及到生理指标。例如，Huiberts 等人在不同照明条件下测量了一系列生理指标，如心率和血压，发现环境照度对这些生理指标有明显影响[11]。在另一项研究中，Chellappa 等人通过分析褪黑激素水平和主观警觉度的变化，研究了色温对人体的非视觉影响。他们发现，主观警觉度与褪黑激素水平密切相关，且两者受光源的相关色温影响。特别是在 6500K 下，人体分泌更多褪黑激素并保持高水平的警觉度[12]。这些研究表明，使用生理指标提供了更准确的基础，以评估照明的非视觉影响，并将其与主观评价结果结合起来，可以提供更全面的了解这些影响。

另外，存在大量用于衡量建筑照明环境质量的指标，如有用日照照度(UDI)、日照系数(DF)、年日照曝光量(ASE)等指标，在研究和工程领域中广泛用于评估用户的视觉舒适度[13-15]。然而，这些指标大多数主要与宏观时间尺度上的自然光有关，导致对纯人工照明环境或短期视觉舒适度的评估有限。此外，上述指标主要基于照度，而亮度是代表人类视网膜上光的强度的物理量，因此提供了更直观的反映照明条件和人类行为的信息[16]。然而，在照明研究的早期阶段，由于测量技术的限制，亮度很少使用。最近关于教室照明环境的研究已经开始包括亮度因素。邱等人通过分析照明参数如点照度、空间亮度分布和统一眩光值研究了教室照明质量，并建议在教室新的照明设计标准中应特别考虑亮度[17]。刘等人研究了环境亮度对眼科工作效率和生理指标的影响，并提出在教室整体环境亮度在标准偏差范围内 ($300\text{-}800\text{ cd/m}^2$) 的对比度下，参与者显示出良好的工作效率和眼部表现[18]。然而，上述研究并不适合进行亮度指标的定量分析和选择。与单一亮度指标相比，视野亮度分布是空间光环境的三维描述，它与照度、强度分布均匀性、强度对比度和眩光等因素之间

有明确的关系[19,20]。为了量化亮度分布，蔡等人使用了在计算机图像识别领域常用的亮度梯度的概念来进行照明评估[21]。然而，他们研究中定义的大量亮度梯度数据使评估分析和数学建模变得复杂。

总之，课堂照明的关键问题是通过了解照明参数对视觉疲劳的影响并定量评估这些影响来缓解视觉疲劳并确保眼睛健康。本研究在实验室中重现了36个课堂照明设置，并确定了影响视觉疲劳的20个照明参数。通过使用主观问卷调查和关键闪烁融合频率测试的组合，确定了四个关键照明参数对视觉疲劳的综合指数（VF）有实质性影响。确定了上述四个参数与它们对视觉疲劳的影响之间的关系以及最小化视觉疲劳的理想照明设置范围。最后，还开发了一种预测课堂照明视觉疲劳的数学模型。本研究的方法如图1所示。

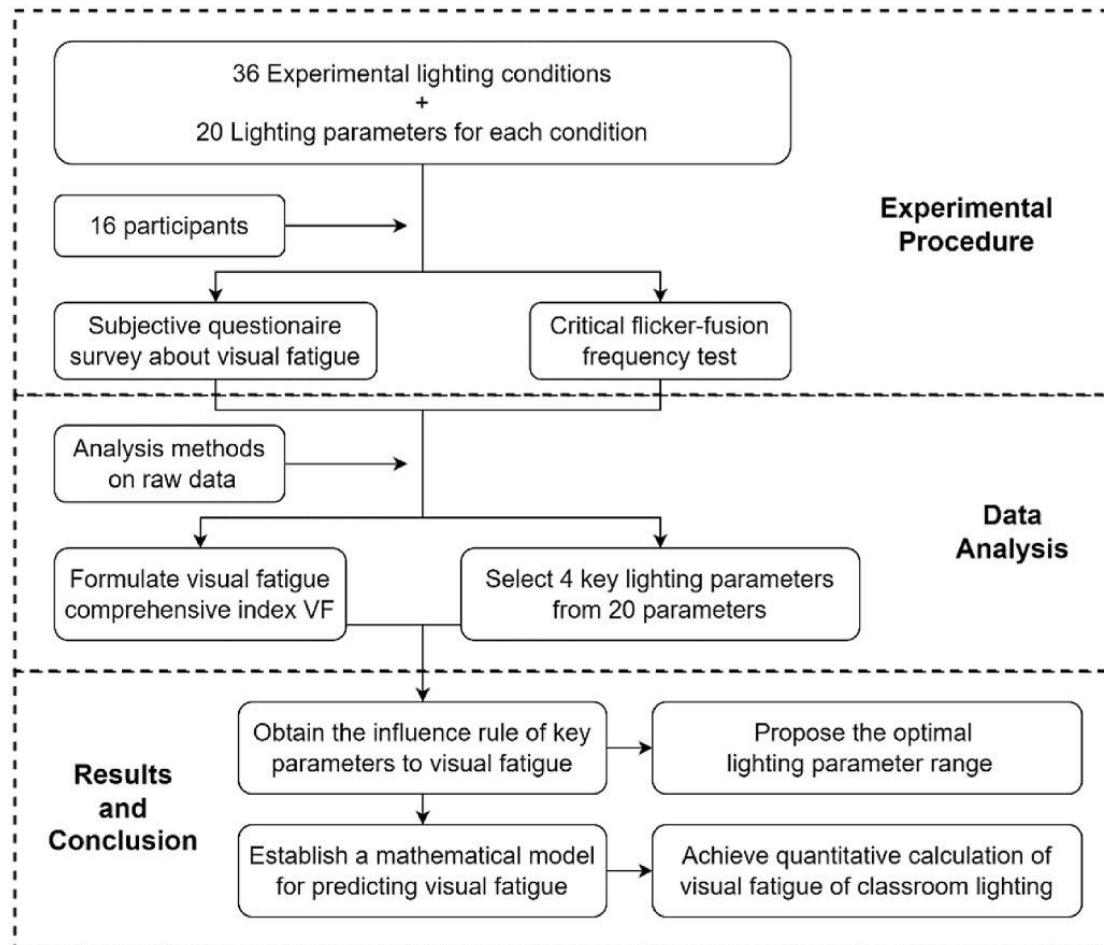


图1 研究方法

2 实验

2.1 实验场景

在实验室内设置了一个可调节的教室照明场景，如图 2 所示。教室的尺寸为 12 米（长）×6 米（宽）×4 米（高）。黑板放置在教室前部，18 张 1.2 米×0.6 米的桌子被放置，其中 C2 桌用作实验参与者的测试位置。在教室的天花板上水平和垂直间隔 2 米放置了 18 个 EC202060WA01C-X LED 灯，其光通量和色温可以在 2700K 至 6000K 范围内以 1% 的增量连续调节。四种反射系数在 0.6 至 0.9 之间的壁纸窗帘被安装在教室的侧墙上。这些窗帘可以通过卷帘系统替换，产生四种不同的空间亮度分布，而不需要修改 LED 灯的特性。

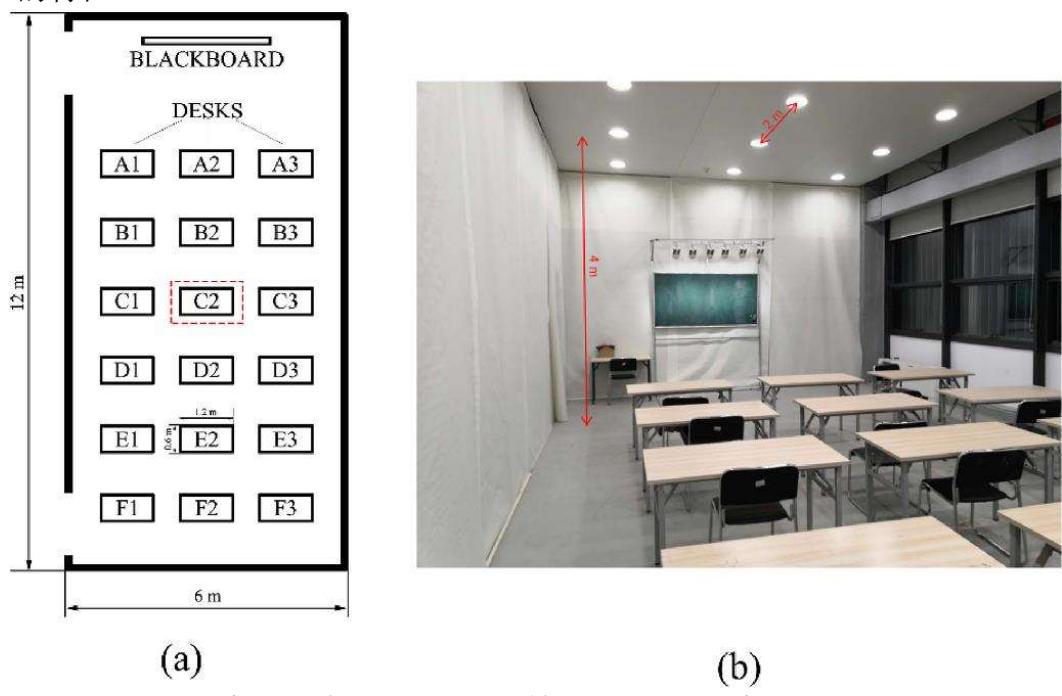


图2 实验室中的设置: a) 教室平面, b) 实验场景

2.2 实验条件

为确保实验环境稳定，以实现准确量化，实验在纯人工光照条件下进行。通过调整 LED 灯的设置，设置了三种不同的色温（3000K, 4300K 和 5500K），以及三种不同的照度水平（300lx, 500lx 和 1000lx）照射在桌面上。同时，通过调整壁纸窗帘，产生了 4 种不同的墙面反射系数，分别为 0.6、0.7、0.8 和 0.9。总共考虑了 $3 \times 3 \times 4 = 36$ 种实验教室照明条件的组合。根据相关标准，实验桌面的其他照明质量参数被设计成符合基本视觉舒适度的最低要求，包括统一眩光等级小于 19、照度均匀性大于 0.6 和光源的色彩再现指数大于 80 [22]。

在图 2(a)中的位置 C2，使用 Konica Minolta CA-2000 色彩分析仪对 36 种不同的实验教室照明条件进行了测量，测试范围是确保与参与者视野一致的。在每个实验条件下，测量了 980×980 像素的现场光度分布矩阵数据。为了便于数据处理，首先使用区域生长算法降低了上述像素矩阵的维数 [23]，然后将每个 196×196 像素矩阵用作亮度分区，将像素矩阵划分为 5×5 亮度分区。计算每个分区的平均亮度，并将其存储为 $L_1 \sim L_{25}$ ，如图 3(a)所示。一方面，基于图 3(a)中视野中央部分（即 13 号区域），确定了八个方向上的亮度梯度参数。如图 3(b)所示，每个方向上分为两个级别，共 16 个亮度梯度参数。另一方面，根据图 3(a)中 25 个分区的平均亮度（即 $L_1 \sim L_{25}$ ），计算了视野的平均亮度 (L_m)、亮度的标准差 (L_u) 和视野中心的亮度 (L_c)。

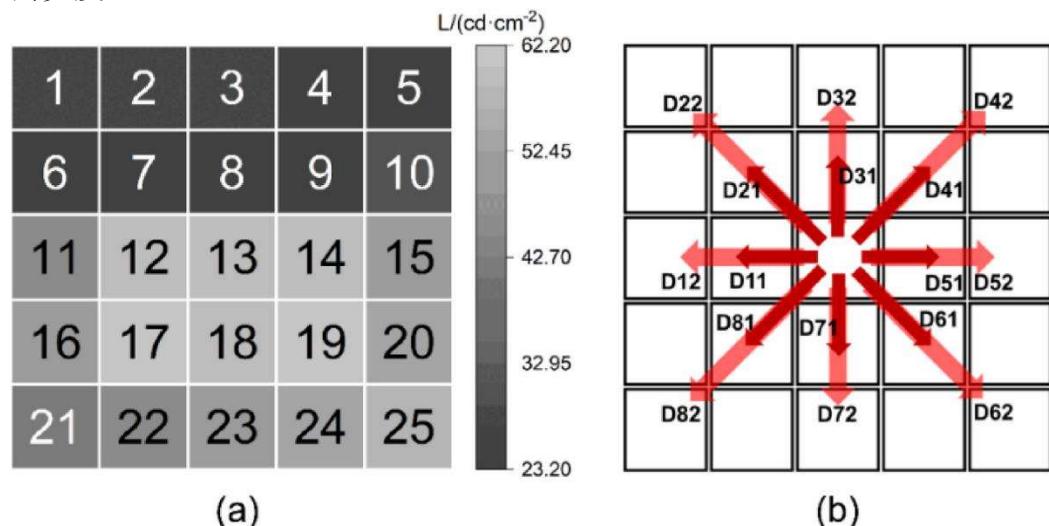


图3 视觉亮度的划分：(a) 5×5 视觉亮度分区，(b) 8 个方向的亮度梯度。

通过上述计算，得到了 19 个反映视野亮度局部和整体特征的参数，包括 16 个方向亮度梯度参数 $D_{11} \sim D_{82}$ ，平均视觉亮度 L_m ，亮度标准差 L_u 和视野中心的亮度 L_c 。结合 LED 的 CCT，共确定了 20 个影响参与者视觉疲劳的照明参数，如表 1 所示。

Table 1

20 parameters affecting visual fatigue of classroom lighting.

| No. | Variable name | Symbol | Calculating Method |
|-----|--|-----------------|--|
| 1 | Luminance gradient | D ₁₁ | L ₁₃ -L ₁₂ |
| 2 | | D ₁₂ | L ₁₃ -L ₁₁ |
| 3 | | D ₂₁ | L ₁₃ -L ₇ |
| 4 | | D ₂₂ | L ₁₃ -L ₁ |
| 5 | | D ₃₁ | L ₁₃ -L ₈ |
| 6 | | D ₃₂ | L ₁₃ -L ₃ |
| 7 | | D ₄₁ | L ₁₃ -L ₉ |
| 8 | | D ₄₂ | L ₁₃ -L ₅ |
| 9 | | D ₅₁ | L ₁₃ -L ₁₄ |
| 10 | | D ₅₂ | L ₁₃ -L ₁₅ |
| 11 | | D ₆₁ | L ₁₃ -L ₁₉ |
| 12 | | D ₆₂ | L ₁₃ -L ₂₅ |
| 13 | | D ₇₁ | L ₁₃ -L ₁₈ |
| 14 | | D ₇₂ | L ₁₃ -L ₂₃ |
| 15 | | D ₈₁ | L ₁₃ -L ₁₇ |
| 16 | | D ₈₂ | L ₁₃ -L ₂₁ |
| 17 | Mean visual luminance | L _m | (L ₁ + ... +L ₂₅)/25 |
| 18 | Luminance of central vison | L _c | L ₁₃ |
| 19 | Standard deviation of visual luminance | L _u | Std. (L ₁ , L ₂ , ..., L ₂₅) |
| 20 | Correlated Color Temperature | CCT | Direct measuring |

2.3 实验计划

该研究共招募了 16 名测试志愿者（8 名男性和 8 名女性），年龄在 20 至 26 岁之间。志愿者的视力经过测试，确保他们具有至少 5.0 的视力（或矫正视力），并且没有眼部疾病。每位志愿者在不同条件下参与了一项为期 15 分钟的视觉疲劳实验，模拟了学生在教室中进行日常自习的状态。在实验过程中，志愿者保持坐姿，可以自由阅读放在桌子上的 A4 纸上的文字内容，类似于自习时的情况。他们被提供了笔进行简单的书写或注释。每个条件之间给予了 10 分钟的休息时间以缓解视觉疲劳。主观评估和生理测试被用来评估视觉疲劳。

在主观评估方面，使用了一份 5 级评估问卷来获得疲劳感（SFF）的分数。参与者被要求根据他们在每种条件下所经历的视觉疲劳程度来完成图 4 中描述的问卷。

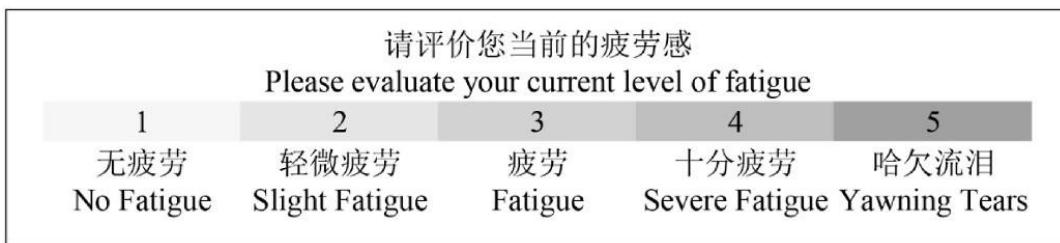


图4 主观评价问卷

对于生理测试，参与者的临界闪烁融合频率（CFF）是用 BD-II-118 临界闪烁融合频率仪测量的。该测试的前提是，人眼可以辨别一定频率的闪烁。而处于辨别临界状态的闪烁频率被称为临界闪烁-融合频率，它与视力和大脑意识呈正相关[24]。因此，它可以用来评估个人的视觉疲劳。根据前面提到的原则，在每次试验之前和之后都要测量参与者的临界闪烁融合频率。CFF 的差值 (Δ CFF) 被用作视觉疲劳的评价指标，数值越小说明照明条件引起的视觉疲劳越小。

3 分析

3.1 视觉疲劳（VF）综合评价指标的构建

图 5 显示了 16 名参与者在 36 种设置下的评估和测试结果。横坐标是 16 名参与者主观疲劳评分（SFF）的平均值，纵坐标是临界闪烁融合频率下降的平均值 (Δ CFF)。

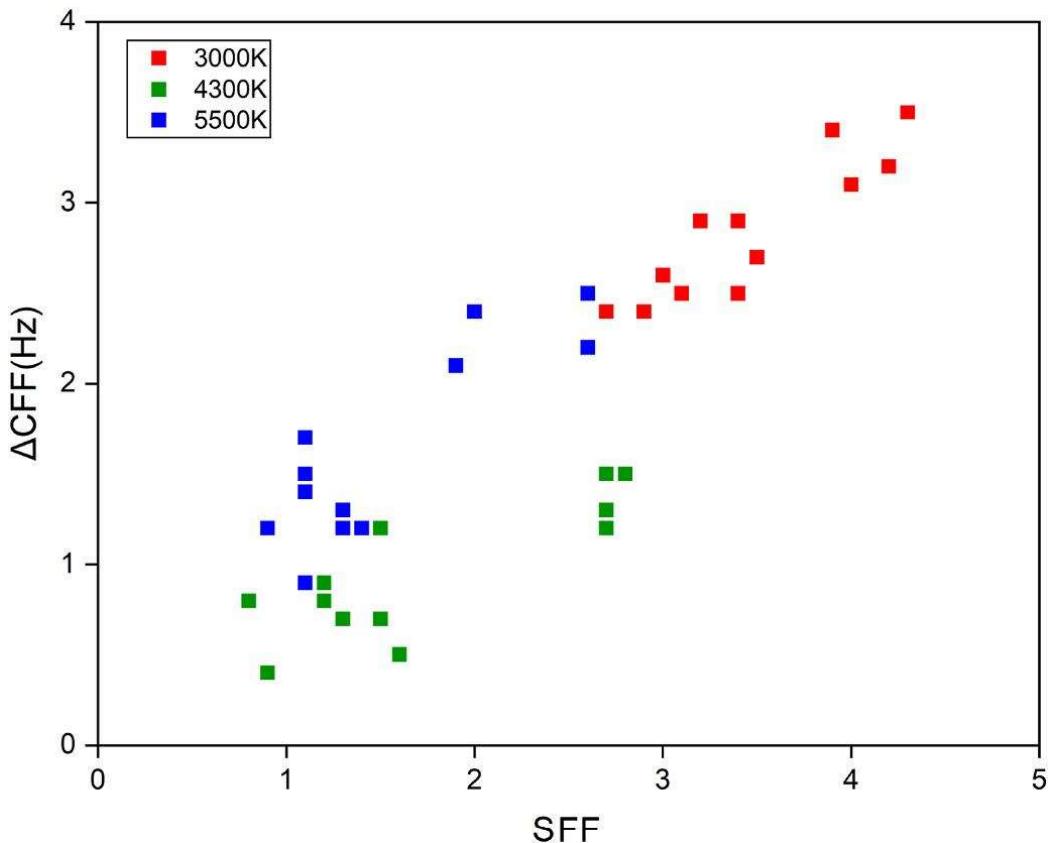


图5 36种情况下 SFF 和 ΔCFF 的分布

如图 5 所示, SFF 和 ΔCFF 之间存在正相关关系, 并且线性分布得到确认 ($R^2=0.7584$)。这一结果与现有理论一致, 即临界闪烁融合频率可以客观反映主观疲劳[24]。如表 2 所示, 可以使用变异系数法计算出两者的信息权重。

表 2 表明, SFF 和 ΔCFF 的权重分别为 0.538 和 0.462。然后, 可以使用线性加权方法将 SFF 和 ΔCFF 合并, 以表征 VF, 如公式 (1) 所示。

$$VF = 0.538 \times SFF + 0.462 \times \Delta CFF \quad (1)$$

Table 2

Objective weights of SFF and ΔCFF based on coefficient of variation.

| | Standard Deviation (σ) | Mean Value (μ) | Information Content ($K = \sigma/\mu$) | Weight ($w_i = K_i/\sum K$) |
|--------------|---------------------------------|----------------------|--|-------------------------------|
| SFF | 0.303 | 0.413 | 0.732 | 0.538 |
| ΔCFF | 0.285 | 0.455 | 0.627 | 0.462 |

* Results are calculated from normalized raw data.

3.2 影响 VF 的关键照明参数的选择

表 1 列出了对视觉疲劳 (VF) 产生影响的 20 个照明参数。为了确定并数学建模这些照明参数对 VF 的影响，有必要从这 20 个参数中选择关键参数。使用公式 1 计算了每种设置下的 VF 值，并计算了 20 个参数与 VF 之间的最大信息系数 (MIC)，以确定前者对后者的影响显著性。MIC 是衡量两组变量之间相关性的指标，取值范围为 0 到 1。MIC 越接近 1，两组变量之间的相关性越强。在本研究中，可以认为当 $\text{MIC} \leq 0.4$ 时，表示两个变量之间相关性较低[25]。MIC 计算结果如图 6 所示。

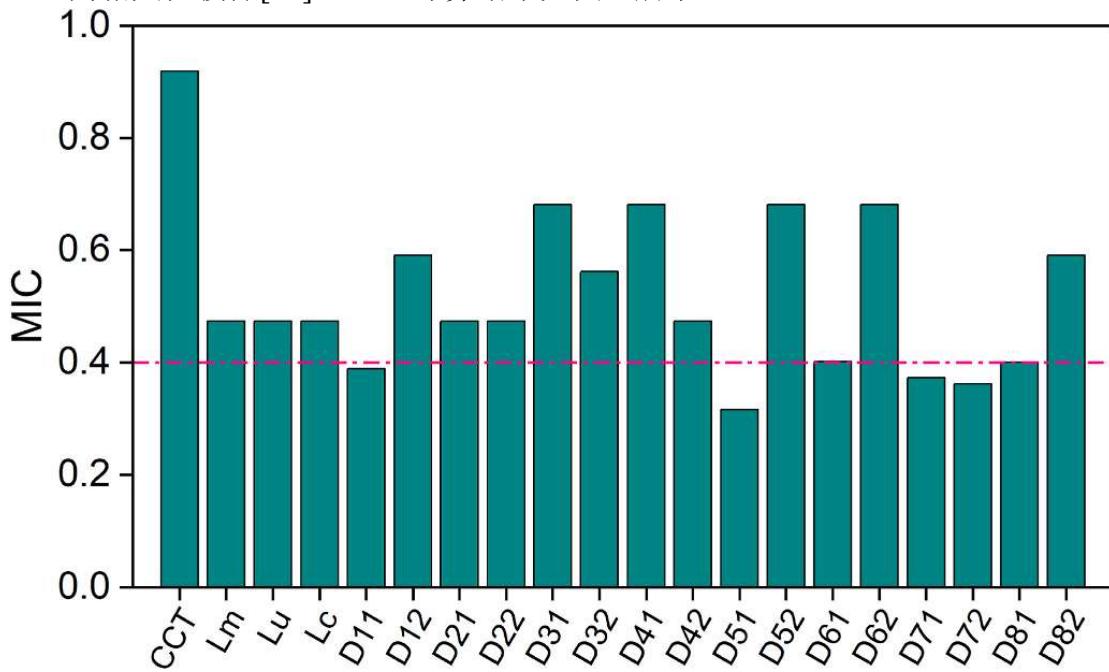


图6 VF 和 20 个照明参数之间的最大信息系数 (MIC)

如图 6 所示，20 个参数中有 6 个参数 (D_{11} 、 D_{51} 、 D_{61} 、 D_{71} 、 D_{72} 和 D_{81}) 的 $\text{MIC} \leq 0.4$ 。这些结果可能是由以下因素引起的：首先，如图 2(b) 所示，五个参数 (D_{11} 、 D_{51} 、 D_{61} 、 D_{71} 和 D_{81}) 位于视野的中心附近，表示桌面上各个方向的亮度梯度变化。然而，在相同的实验条件下，当桌面上存在相对均匀的亮度分布时，这五个参数的微小变化无法引起人类视觉系统的敏感性以及疲劳差异。其次， D_{72} 指向较低的视野，该视野在实验中被参与者身体部位的图像占据。这可能导致对该参数的关注程度较低，从而对疲劳产生较小的影响。因此，其他 14 个照明参数被选为进一步分析的主要参数。

此外，由于视野中的亮度分布是连续的，各个亮度参数之间很可能存在相关性。需要进一步分析以确定这 14 个主要参数中最相关的参数。首

先，由于 CCT 不是亮度参数，将其单独考虑。然后计算剩下的 13 个亮度参数的 MIC 值，以确定这些参数之间的相关程度（见图 7）。

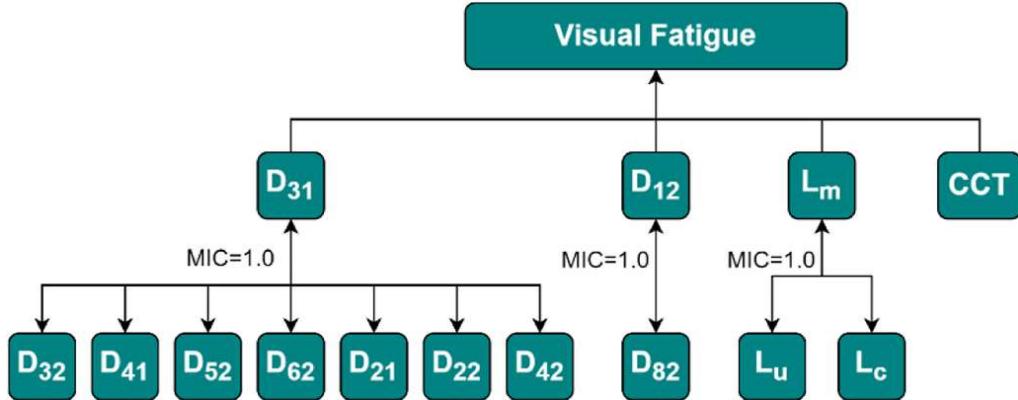


图7 通过 MIC 在 14 个主要参数之间选择关键照明参数

如图 7 所示，有 7 个参数（D32、D41、D52、D62、D21、D22 和 D42）与 D31 之间存在强相关性（MIC = 1.0），表明 D31 可以代表这 7 个参数。类似地，D82 可以由 D12 代表，Lu 和 Lc 可以由 Lm 代表。此外，D31 和 D12 是反映视野主要方向上亮度局部特征的方向性亮度梯度，而 Lm 是平均亮度，提供了视野中整体亮度特征的信息。CCT 是一个独立于其他参数存在的非亮度参数。根据上述调查，最终确定 D31、D12、Lm 和 CCT 为影响 VF 的关键照明参数。

4 结果

4.1 关键照明参数对视觉疲劳的影响

图 8 绘制了四个关键参数下 VF 的分布图。关键亮度参数（D31、D12 和 Lm）绘制在 x 轴上，使用公式 1 计算的 VF 值绘制在 y 轴上。CCT 由点的颜色表示。每个图中包含了 36 个散点，对应 36 个照明实验设置。散点结果用于简单拟合曲线以描述 VF 的变化， R^2 值大于 0.85。

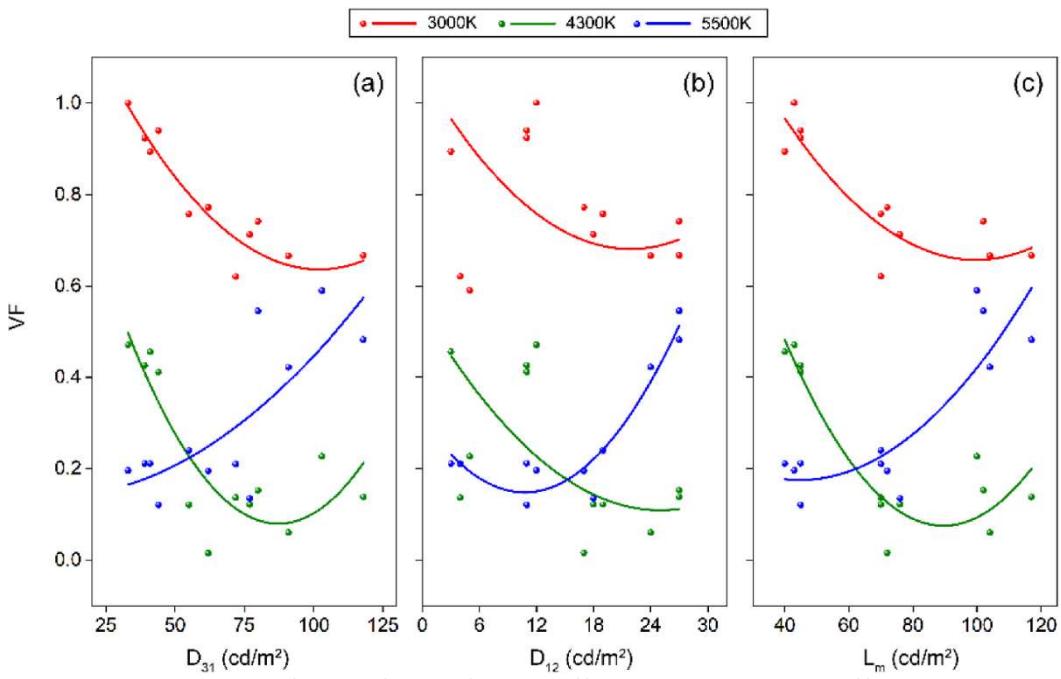


图8 通过 MIC 在 14 个主要参数之间选择关键照明参数

图8揭示了以下信息：

首先，在3000K的低CCT下，随着D31、D12和Lm的增加，VF值减小。然而，在这些条件下，参与者经历了较高水平的视觉疲劳（ $VF > 0.6$ ），这表明不应该在教室照明中使用低CCT的光源。

其次，在4300K的中等CCT下，随着D31、D12和Lm的增加，VF整体呈负趋势。尽管当D31和Lm超过一定阈值时，VF略微增加，但参与者仍然经历了较低水平的视觉疲劳（ $VF < 0.2$ ）。这表明在教室使用中等CCT的光源时，应增加环境亮度和亮度分布参数。推荐以下范围： $75 \text{ cd/m}^2 < D31 < 100 \text{ cd/m}^2$ 、 $D12 > 18 \text{ cd/m}^2$ 、 $80 \text{ cd/m}^2 < Lm < 100 \text{ cd/m}^2$ 。

第三，在5500K的高CCT下，随着D31、D12和Lm的增加，VF增加。VF从小于0.2的状态增加到大于0.5的状态。这表明在教室中使用高CCT的光源时，应适当降低环境亮度和亮度分布参数。因此，建议以下亮度参数： $D31 < 50 \text{ cd/m}^2$ ， $6 \text{ cd/m}^2 < D12 < 18 \text{ cd/m}^2$ ， $Lm < 60 \text{ cd/m}^2$ 。此外，CIE的报告指出，高CCT的光源相对较多地发射蓝光，这对人眼极具刺激性。因此，高CCT的光源亮度会对用户健康产生负面影响。这与我们研究的结果一致。

总之，在低CCT的环境中，任何空间亮度分布都会引起相对强烈的视觉疲劳。因此，不建议在教室照明中使用低CCT的光源。在中等CCT的环境中，通过增加空间亮度分布可以减轻视觉疲劳，而在高CCT的环境中，

通过降低空间亮度分布可以减轻视觉疲劳。就视觉疲劳而言，这两种选择都满足照明要求。然而，中等 CCT 比高 CCT 更有效，而中等 CCT 下较高的亮度比高 CCT 下较低的亮度更有利于教室中的视觉工作。因此，建议选择中等 CCT 且较高亮度参数的光源进行教室照明。

4.2 基于关键照明参数的视觉疲劳计算

为了定量预测教室照明引起的视觉疲劳，使用实验数据开发了一个预测模型，其中四个关键照明参数 (D_{31} 、 D_{12} 、 L_m 、CCT) 作为自变量，VF 作为因变量。由于在有限范围内任何函数都可以用多项式逼近，多项式回归经常用于复杂实际问题的模型开发。因此，本研究也使用了这种方法进行数学建模。对于本研究的多元多项式问题，基本挑战是确定模型形式，即多项式中包含的项和次数[27]。

根据图 7 中的分析结果，VF 受到亮度参数 (D_{31} 、 D_{12} 或 L_m) 和 CCT 的耦合的影响。也就是说，对于给定的亮度参数，VF 的变化趋势取决于 CCT。因此，首先尝试了表面拟合，如图 9 所示，分别以 D_{31} 、 D_{12} 和 L_m 作为 x 轴，CCT 作为 y 轴，VF 作为 z 轴。

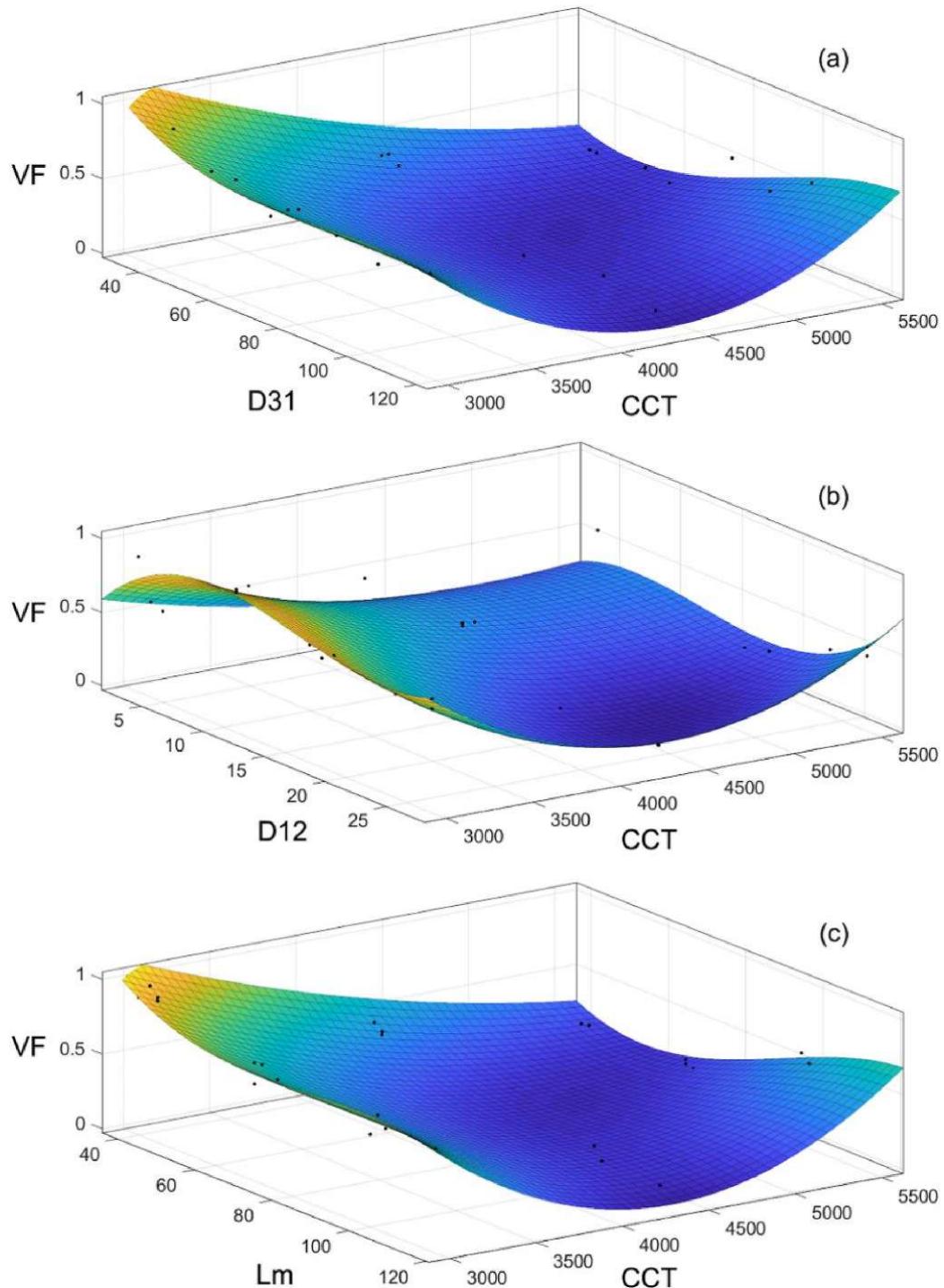


图9 VF 关于亮度参数和 CCT 的拟合曲面图:

(a) VF-D₃₁-CCT, (b) VF-D₁₂-CCT, (c) VF-L_m-CCT

通过拟合，得到了与这三个表面相对应的二元多项式 $VF = f_1(D_{31}, CCT)$ 、 $VF = f_2(D_{12}, CCT)$ 和 $VF = f_3(L_m, CCT)$ 。多项式表示如下（公式 2~4）：

$$\begin{aligned}
VF &= f_1(D_{31}, CCT) \\
&= 3.755 - 0.02478 \times D_{31} - 4.920 \times 10^{-4} \times CCT + 6.428 \times 10^{-4} \times D_{31}^2 \\
&\quad - 1.811 \times 10^{-5} \times D_{31}CCT - 1.415 \times 10^{-9} \times CCT^2 - 2.174 \times 10^{-6} \times D_{31}^3 \\
&\quad - 1.540 \times 10^{-8} \times D_{31}^2CCT + 2.813 \times 10^{-9} \times D_{31}CCT^2
\end{aligned} \tag{2}$$

$$\begin{aligned}
VF &= f_2(D_{12}, CCT) \\
&= 1.663 - 0.350 \times D_{12} - 6.355 \times 10^{-4} \times CCT - 0.01184 \times D_{12}^2 - 9.971 \\
&\quad \times 10^{-5} \times D_{12}CCT + 6.569 \times 10^{-8} \times CCT^2 + 1.623 \times 10^{-4} \times D_{12}^3 + 1.085 \\
&\quad \times 10^{-6} \times D_{12}^2CCT + 8.357 \times 10^{-9} \times D_{12}CCT^2
\end{aligned} \tag{3}$$

$$\begin{aligned}
VF &= f_3(L_m, CCT) \\
&= 3.313 - 0.03011 \times L_m - 8.399 \times 10^{-6} \times CCT + 8.318 \times 10^{-4} \times L_m^2 \\
&\quad - 2.416 \times 10^{-5} \times L_mCCT - 5.434 \times 10^{-8} \times CCT^2 - 3.069 \times 10^{-6} \times L_m^3 \\
&\quad - 2.495 \times 10^{-9} \times L_m^2CCT + 3.312 \times 10^{-9} \times L_mCCT^2
\end{aligned} \tag{4}$$

虽然公式（2~4）没有在一个单独的多项式中包含所有四个关键照明参数（D₃₁、D₁₂、L_m和CCT），但它们的多项式形式和较高的拟合优度（R²>0.8）仍然可以作为综合模型开发所需的项数和次数的指导。此外，研究证明了具有相同目标的不同预测模型可以组合使用，从而显著提高组合模型的预测准确性[28,29]。因此，将公式（2~4）的模型组合，得到了预测视觉疲劳 VF 的综合模型：VF = g(D₃₁, D₁₂, L_m, CCT) = k₁ · f₁ + k₂ · f₂ + k₃ · f₃。最终的多项式形式如公式（5）所示。

$$\begin{aligned}
VF &= g(D_{31}, D_{12}, L_m, CCT) \\
&= \beta_1 D_{31} + \beta_2 D_{31}^2 + \beta_3 D_{31}^3 + \beta_4 D_{31}CCT + \beta_5 D_{31}CCT^2 + \beta_6 D_{31}^2CCT + \beta_7 D_{12} \\
&\quad + \beta_8 D_{12}^2 + \beta_9 D_{12}^3 + \beta_{10} D_{12}CCT + \beta_{11} D_{12}CCT^2 + \beta_{12} D_{12}^2CCT + \beta_{13} L_m \\
&\quad + \beta_{14} L_m^2 + \beta_{15} L_m^3 + \beta_{16} L_mCCT + \beta_{17} L_mCCT^2 + \beta_{18} L_m^2CCT + \beta_{19} CCT \\
&\quad + \beta_{20} CCT^2 + \beta_{21}
\end{aligned} \tag{5}$$

公式（5）包含了公式（2-4）中的基本项和相应的次数。可以使用多项式回归来建立最终的目标模型，通过确定参数 β_i ($i = 1, 2, 3, \dots, 21$) 的值。因此，使用来自不同实验条件的 D₃₁、D₁₂、L_m 和 CCT 数据作为自变量，使用公式（1）计算得到的 VF 数据作为因变量，利用公式（5）中描述的多项式形式进行回归以解决 β_i ，并得到公式（6）中描述的预测模型。

该模型的 R² 值为 0.991，表明它可以解释 99.1% 的 VF 变化，其拟合度高于任何 $VF = f_i$ ($i = 1, 2, 3$) 模型。综上所述，成功构建了公式（6）所示的模型 $VF = g(D_{31}, D_{12}, L_m, CCT)$ 。可以使用该模型根据本研究中定义和选择的教室照明的关键参数（D₃₁、D₁₂、L_m 和 CCT）来预测视觉疲劳（VF）。预测值越大，表示视觉疲劳程度越高。

$$VF = g(D_{31}, D_{12}, L_m, CCT)$$

$$\begin{aligned}
&= -3.270 \times 10^{-2} \times D_{31} - 3.149 \times 10^{-4} \times D_{31}^2 + 1.637 \times 10^{-6} \times D_{31}^3 \\
&\quad + 2.655 \times 10^{-5} \times D_{31} CCT - 3.695 \times 10^{-9} \times D_{31} CCT^2 + 9.761 \times 10^{-9} \\
&\quad \times D_{31}^2 CCT + 8.327 \times 10^{-2} \times D_{12} - 4.374 \times 10^{-3} \times D_{12}^2 + 8.771 \times 10^{-5} \\
&\quad \times D_{12}^3 - 5.444 \times 10^{-6} \times D_{12} CCT - 7.158 \times 10^{-10} \times D_{12} CCT^2 + 1.257 \\
&\quad \times 10^{-7} \times D_{12}^2 CCT - 1.432 \times 10^{-2} \times L_m + 1.390 \times 10^{-3} \times L_m^2 - 6.103 \\
&\quad \times 10^{-6} \times L_m^3 - 5.116 \times 10^{-5} \times L_m CCT + 7.008 \times 10^{-9} \times L_m CCT^2 \\
&\quad - 4.132 \times 10^{-10} \times L_m^2 CCT - 7.262 \times 10^{-8} \times CCT^2 + 2.222 \times 10^{-4} \\
&\quad \times CCT + 2.896
\end{aligned} \tag{6}$$

5 讨论

5.1 有关照明参数对视觉疲劳影响的讨论

在图 10 中展示了本研究中照明条件的范围，被描述为阴影，并处于 Kruithof 曲线（K 曲线）所描述的视觉舒适区域之内。因此，本研究中描述视觉疲劳的规律也是基于视觉舒适的，这与 K 曲线的结论并不冲突。同时，图 10 还同时展示了教室照明优先推荐的最佳设置：在中等 CCT 为 4300K 的情况下，选择相对较高的亮度条件 ($75 \text{ cd/m}^2 < D_{31} < 100 \text{ cd/m}^2$, $D_{12} > 18 \text{ cd/m}^2$, $80 \text{ cd/m}^2 < L_m < 100 \text{ cd/m}^2$)。这种状态既可以确保低视觉疲劳又具有视觉舒适性，反映了非视觉效应和视觉效应之间的平衡和协调。

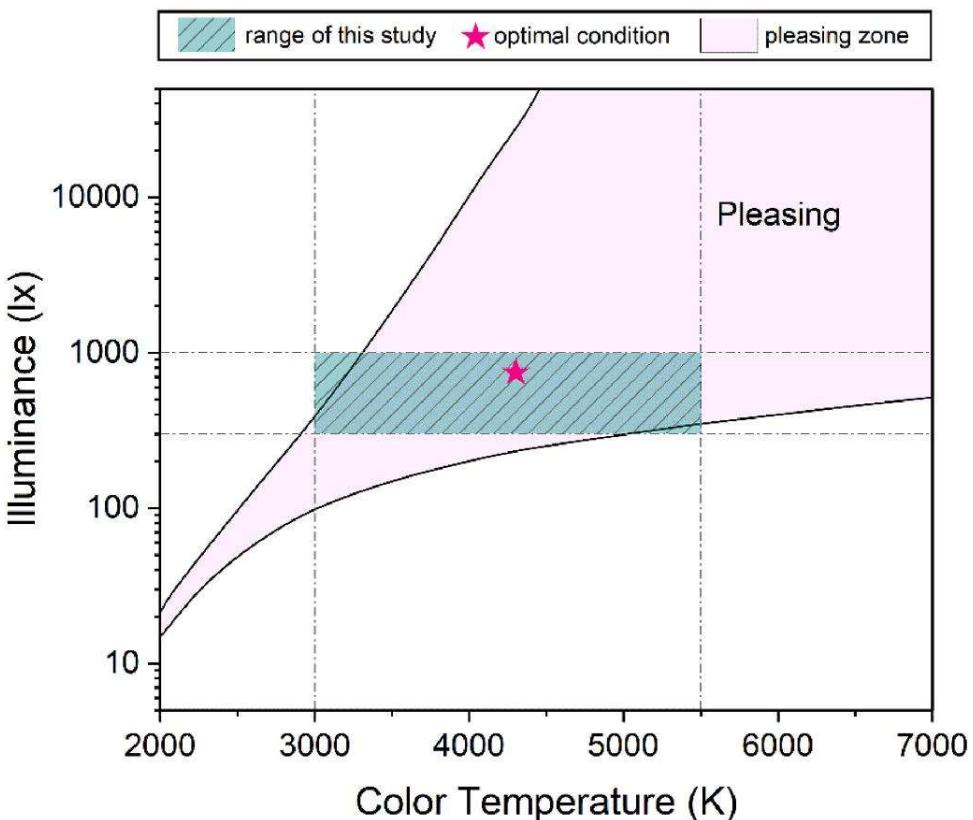


图10 本研究中的范围与 Krui thof 曲线的比较

5.2 有关视觉疲劳数学模型的讨论

使用回归方法建立模型可能会产生随机误差。残差误差是对随机误差的估计，必须满足某些假设才能得到有效的回归模型。换句话说，在正确的模型中，残差应该具有正态分布，其期望值为 0，波动范围恒定[30]。为了进一步验证模型 $VF = g(D31, D12, Lm, CCT)$ 的可靠性，进行了残差分析。将实验得到的 VF 值减去由公式(6)推导得到的预测 VF 值，得到数学模型的每个实验条件的残差。以残差值为纵坐标，预测 VF 值为横坐标，绘制残差分布散点图如图 11 所示。

图 11 显示，残差在零线两侧呈散布状，形成水平带状分布。这表明残差的波动范围是稳定的，不随预测值的大小而变化[30,31]。对残差进行了 Shapiro-Wilk 正态性检验，结果显示 p 值为 $0.1458 > 0.05$ ，表明残差符合正态分布。正态性是统计学中随机变量的重要特征，正态性检验表明残差值的大小分布是随机的[32]。基于这些发现，可以得出结论，本研究所开发的模型具有很高的可靠性，能够在可接受的误差范围内准确预测由教室照明引起的视觉疲劳。

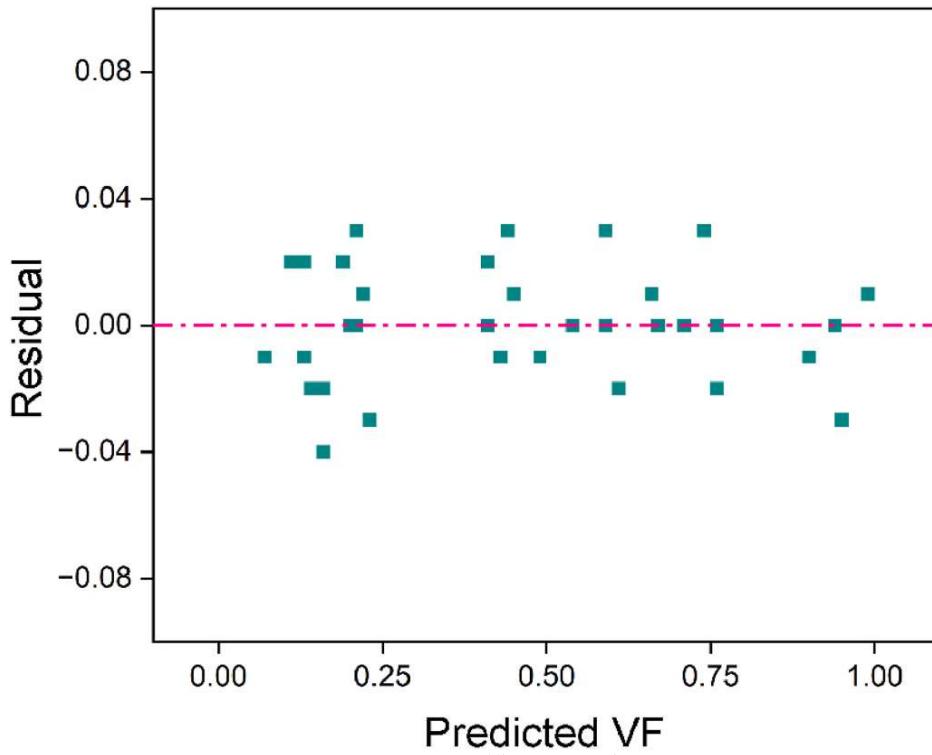


图11 模型的残差图

需要强调的是，该模型是基于参与者在教室中以自学模式进行的静态视觉感知。在教室照明符合相关标准的前提下[22]，在这种行为模式下，学生的视觉领域中不会暴露任何光源。本研究中定义的亮度参数直接反映了人眼感知的环境反射光，不受光源的观察角度、灯具的二次光学效应、环境反射因素等影响。因此，该模型对于在固定位置和稳定视野的这种自学模式下预测由教室照明引起的视觉疲劳具有一定的普适性。然而，由于人类行为模式的多样性和不同行为模式下的照明需求差异[33]，当视野频繁且剧烈变化时，光源可能直接暴露在视野中，本研究中定义的亮度梯度参数可能无效。同样，在使用投影仪或电子屏幕进行教学的教室场景中，视野中的视觉环境也会受到极大干扰[18]，这将对该模型的准确性和适用性产生显著影响。

6 结论

在本研究中，引入了亮度梯度的概念，并基于亮度和色温的传统值确定了教室照明的 20 个照明参数。通过主观评价调查和关键闪烁融合频率的客观检测，建立了一个综合指标 VF 来描述教室照明的视觉疲劳。从这 20

个照明参数中提取出了影响视觉疲劳的四个关键参数：定向亮度梯度 D31 和 D12，亮度均值 Lm，以及相关色温 CCT。

在教室照明中，研究了四个关键照明参数对视觉疲劳（VF）的影响，并发现在低色温条件下视觉疲劳通常较高。在中等色温条件下，通过增加亮度参数可以减轻视觉疲劳，而在高色温条件下，通过降低亮度参数可以降低视觉疲劳。在教室照明中，推荐使用中等色温和相对较高的亮度参数组合的光源，最佳参数范围为色温约为 4300K，D31 约为 $75\text{cd/m}^2 < \text{D31} < 100\text{cd/m}^2$, $\text{D12} > 18\text{cd/m}^2$, $80\text{cd/m}^2 < \text{Lm} < 100\text{cd/m}^2$

针对教室照明，开发了视觉疲劳预测模型 $\text{VF} = g(\text{D31}, \text{D12}, \text{Lm}, \text{CCT})$ ，其拟合度达到了 99.1%。该模型可以基于 D31、D12、Lm 和 CCT 这四个关键照明参数准确预测教室照明中的视觉疲劳 VF，为评估和设计教室照明环境提供了定量工具。

参考文献（或书面翻译对应的原文索引）

- [1] Rui Dang, Yuxing Liu, Suo Chang, The impact patterns of classroom lighting parameters on visual fatigue and a mathematical model, Building and Environment, Volume 234, 2023, 110193, ISSN 0360-1323.

原文索引：<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.110193>

附录 B 图纸合集

自习教室天然光设计的多目标优化模型

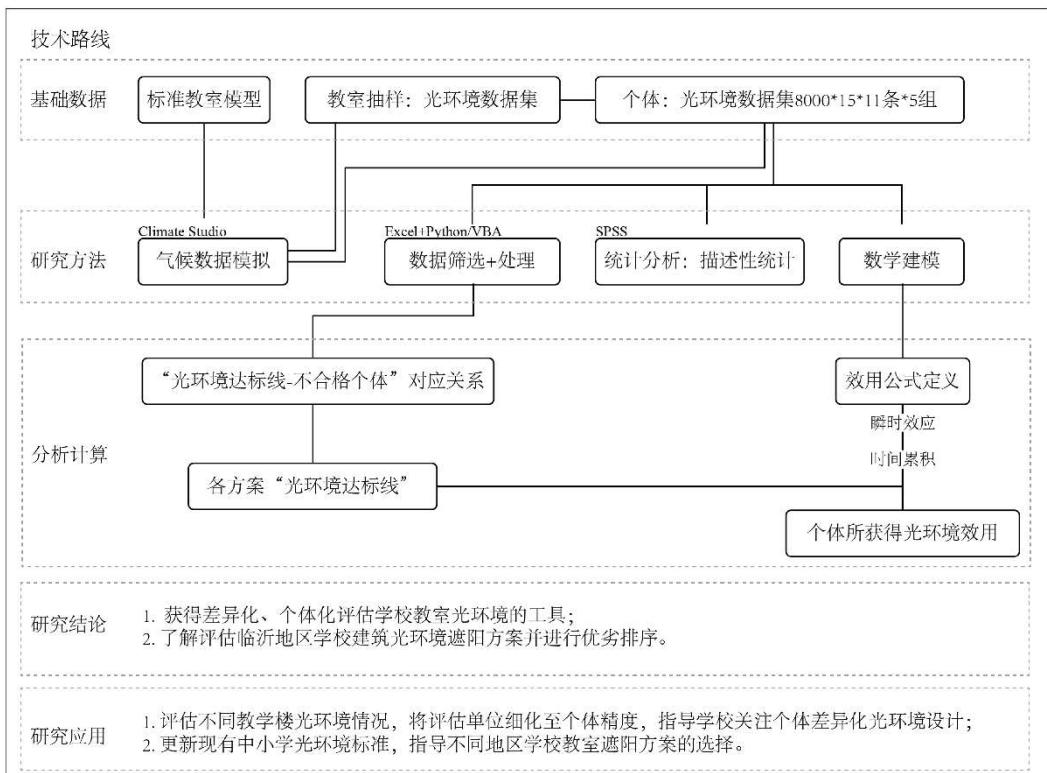
摘要

教室作为中小学生长时间所处场所，内部环境对使用者有较大影响。在众多综合因素中，光环境对学生学习效率与健康的影响占较大。在我国现有光环境标准中，大多以教室整体为单位进行评估，然而同一间教室中不同位置的多个个体光环境情况存在较大差异，不能一概而论。

本文在已有个体光环境研究的基础上，使用建筑性能分析插件 Climate Studio 对标准教室模型在临沂的气候条件下进行不同范围的模拟，使用不同的分析方法与标准进行数据处理。

最终成果分为两部分：第一部分构建出对教室光环境新的评估标准；第二部分通过数学建模量化光环境对于个体的正向作用。并通过模拟所得数据进行遮阳方案评估示范。

技术路径



本文将尝试针对个体拟定新的判定标准。该新标准将对每个个体进行一次判断，以此来决定每个座位上的光环境是否达到标准。最终的遮阳判定标准将选择合格个体更多的方案。

本研究将结合现有的研究成果，研究较为合理的采光方案。使用软件 Climate Studio 进行光照策略评估，在以列划分桌椅得到的结论基础上，进一步以行划分桌椅进行模拟研究，得到综合行和列影响后效果最佳的采光方案及数据。

在此结论基础上，在学校建筑的现有标准基础上进一步推进，结合相关研究以及临沂当地工程建设经验，通过调研、模拟，针对临沂当地所使用的技术和地域光气候特点，制定出改进后适用于临沂当地学校教室的光环境标准。本文的技术路径如图 1.1 所示。

自习教室天然光设计的多目标优化模型

基本设定

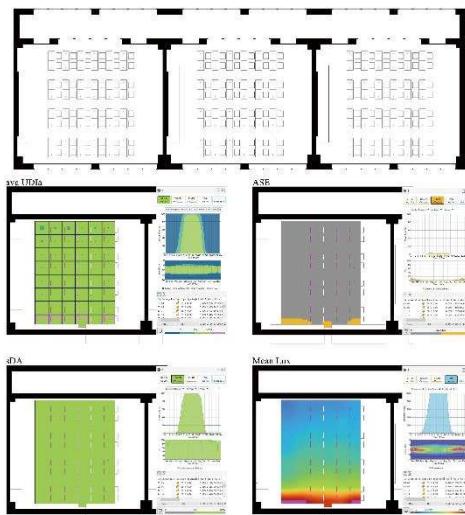


表2.1- 材料设定表。

| 模型部件 | 材质 | 反射率 | 可见光透射率 |
|---------|------------------------------------|-------------|--------|
| Model | Material | Reflectance | TVIS |
| 外部地面。 | Concrete-Grey-Exterior floor-Tiles | 18.38% | |
| 教室地面。 | Grey Ceramic Tile Floor | 53.82% | |
| 外墙。 | Exterior-Concrete wall | 71.10% | |
| 内饰面板。 | White-Painted Walls | 83.99% | |
| 走廊墙面。 | White-exterior-corridor-wall | 78.61% | |
| 天花板。 | White Painted Ceiling | 88.42% | |
| 窗框。 | Aluminum-Brown-Window-Mullion | 7.66% | |
| 窗户玻璃。 | clear-Clear (Krypton) | | 0.774 |
| 柱子。 | Column E14-526 | 82.13% | |
| 教室门。 | Beige wooden door | 78.95% | |
| 教室门框。 | Door Frame 7-3014 | 74.94% | |
| 桌椅面。 | Wood-Laminate-Table-Top | 50.92% | |
| 金属桌椅腿。 | Table Leg E14-526 | 35.46% | |
| 黑板。 | Blackboard | 3.89% | |
| 讲台。 | Wooden-Floor-Planks | 10.71% | |
| 遮阳板。 | Opaque-Roller-Shade | 43.24% | |
| 导光板反射层。 | Exterior-White-wall | 80.55% | |

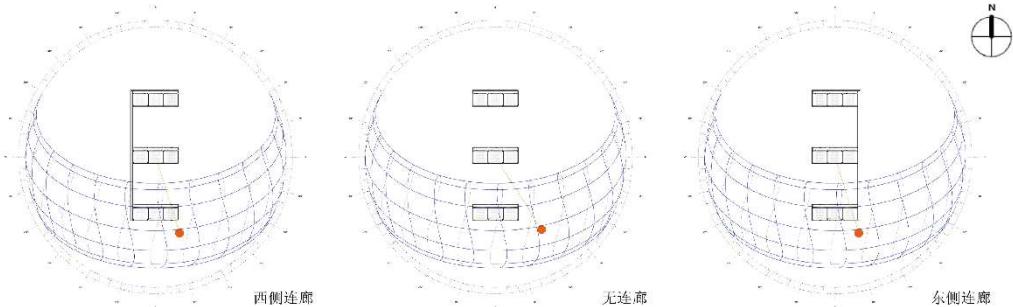
11种遮阳方案设定

| 表1.1- 11种遮阳方式设定 | | | | | |
|-----------------|---------|---|-------------|---------|--|
| 方案编号 | 教室剖面图示意 | 参数设定 | 方案编号 | 教室剖面图示意 | 参数设定 |
| Project No. | Section | Settings | Project No. | Section | Settings |
| 1# | | 南-内外导光板。 窗高 1.50m。 导光板-内 400mm。 外 600mm。 | 7# | | 南-内外导光板。 窗高 2m。 导光板-内 400mm。 外 600mm。 |
| 2# | | 北-南向减窗。 南窗高 450mm。 主采光面窗高 2m。 | 8# | | 南-混合遮阳。 窗高 2m。 遮阳板进深 600m。 |
| 3# | | 南-混合遮阳。 窗高 1.50m。 遮阳板进深 600m。 | 9# | | 南- 主采光面窗高 1.50m。 |
| 4# | | 南-内导光板。 窗高 1.50m。 导光板-内 400mm。 | 10# | | 南-水平遮阳。 窗高 1.50m。 遮阳板进深 600m。 |
| 5# | | 南-水平遮阳。 窗高 1.50m。 遮阳板进深 600m。 | 11# | | 南- 主采光面窗高 2m。 |
| 6# | | 北- 主采光面窗高 2m。 | | | |

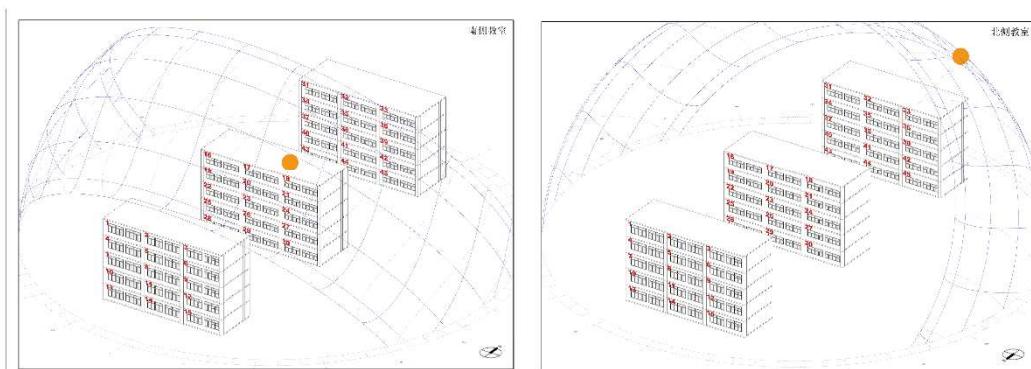
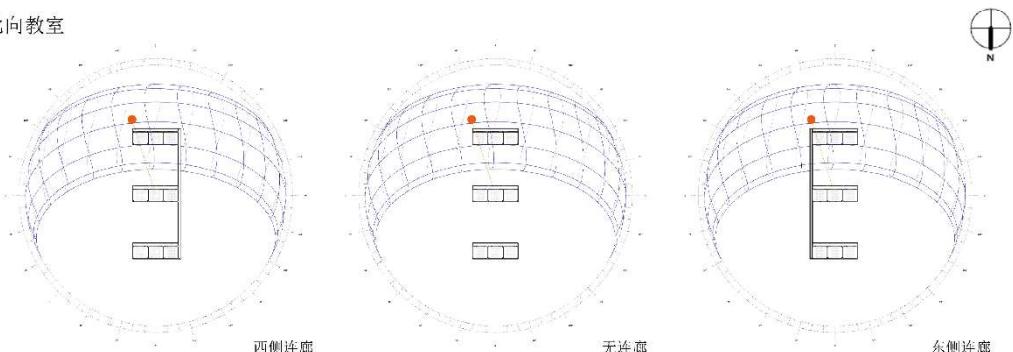
自习教室天然光设计的多目标优化模型

预实验：教室抽样

南向教室



北向教室

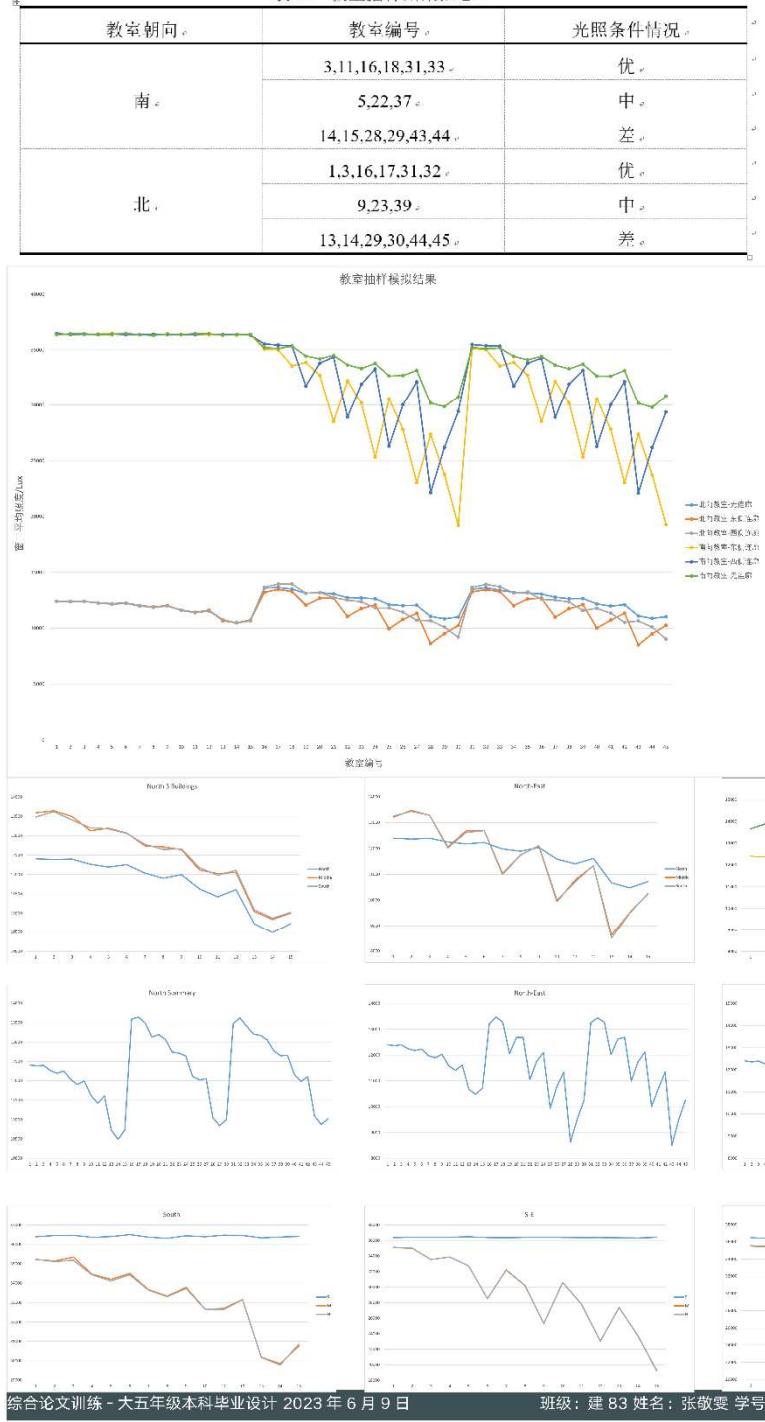


在做大规模的模拟之前，对 3 栋教学楼的 45 间教室进行模拟，采样点均匀分布在主采光面窗户上，得到结果用以对教室进行抽样。此处讨论连廊在东侧、连廊在西侧和没有连廊的情况，分别对应教室面向东侧和教室面向西侧两种布局，一共六种情况，如图 2.3。对六种教学楼的布置都进行模拟后，模拟结果发现，有无连廊和连廊位置都非常影响采光效果，为了单纯讨论教室的座位位置对照明的影响，本文将着重讨论无连廊的情况。

同时，教室位于教学楼的位置也很大程度影响到教室的采光效果，为确定照顾到不同采光效果的教室，这一步将对比出每栋教学楼采光效果最好和最差的分别 2 间，以及效果中等的 1 间。给三栋楼的教室进行编号，用于描述教室位置，编号的情况如图 2.4 所示。

自习教室天然光设计的多目标优化模型

表2.2 教室抽样结果汇总



同时，教室位于教学楼的位置也很大程度影响到教室的采光效果，为确定照顾到不同采光效果的教室，这一步将对比出每栋教学楼采光效果最好和最差的分别2间，以及效果中等的1间。给三栋楼的教室进行编号，用于描述教室位置，编号的情况如图2.4所示。

自习教室天然光设计的多目标优化模型

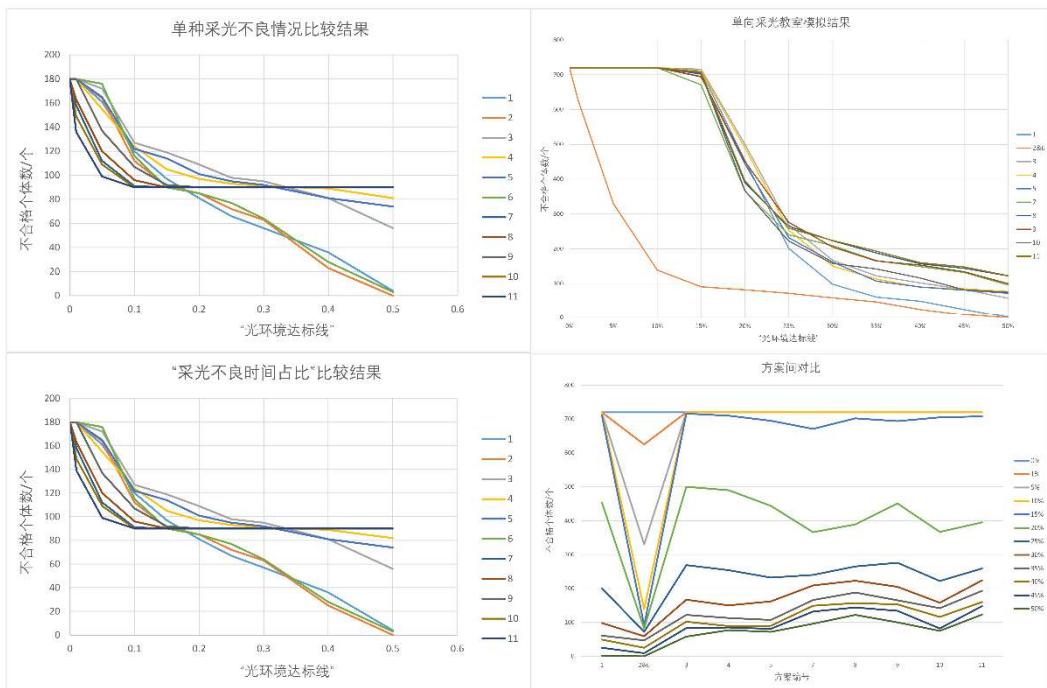
验证既有研究



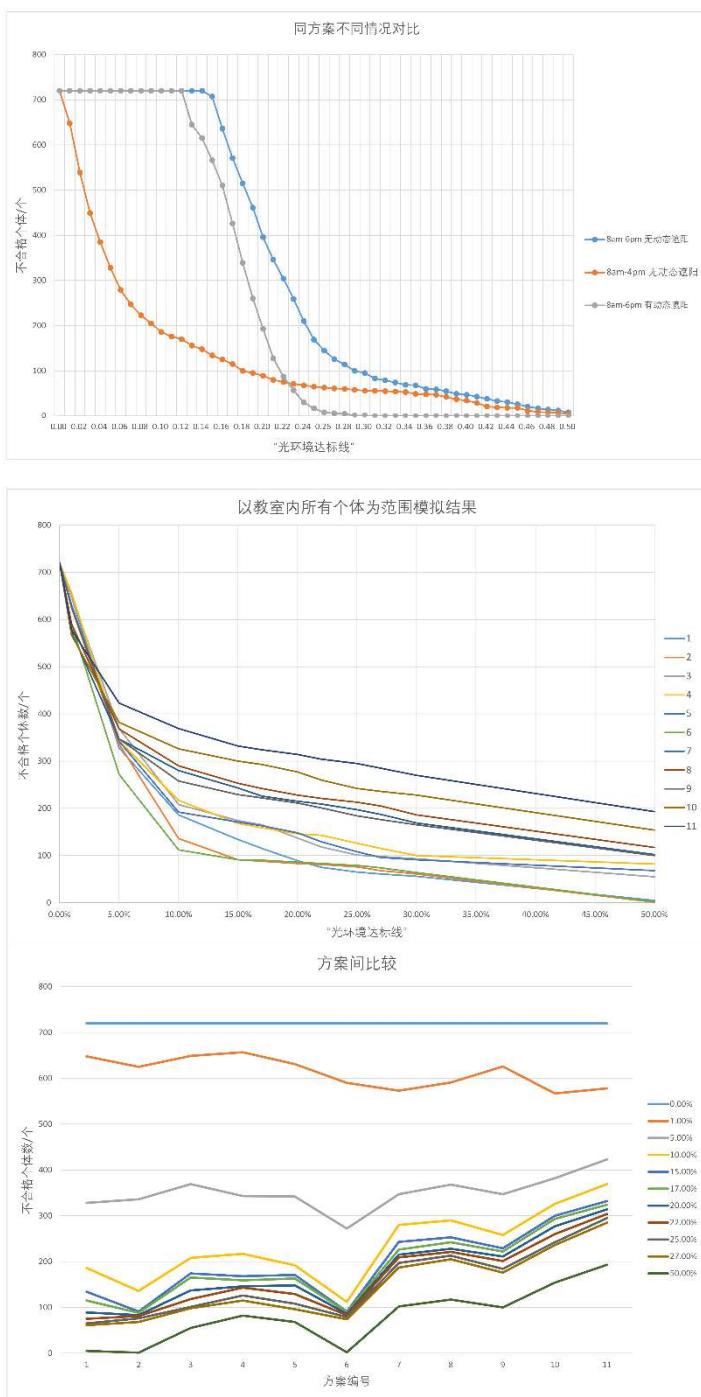
既有的研究选取了最靠近主采光面与最远离主采光面的两列桌椅，主要关注这两列桌椅的采光不良时间。该标准选取了桌面天然光照度超过 3000lx 的时间占比用于评估最靠近主采光面一列的采光不良利用时间占比，选取 50% 时间桌面天然光不足 300lx 的时间占比用于评估教室最深处一列桌椅的采光不良时间占比。将两种不同的采光不良利用时间占比的加和定义为平均各列的天然光不良利用时间占比。

模拟结果如图 2.6 所示，其中 1 号方案（教室南向采光加导光板遮阳）成为除北向采光方案以外采光不良利用时间占比情况比较好的方案。与已有研究中的结果相符。

确认采样范围 + 采光类型



自习教室天然光设计的多目标优化模型



从图3.2的结果来看，尽管在使用同一种遮阳的方案的情况下，不同的使用习惯和时间段会产生出不同的气象模拟结果，从而产生不同的“光环境合格线 - 不合格个体数”的对应关系。

也证明了，对于浮动情况各异的气候条件，会产生不同的客观限制，不能使用一种确切的标准数值进行绝对的判定，而是根据不同的气候条件动态调整规范后进行评估。

在粗略估计中，以0%为最小标准线，50%为最大标准线，分别细化不合格个体从无到有和变化趋势最大的几个区间范围。分别为0%-5%, 10%-25%等，分别进行不合格个体数量的粗略统计。

得到的11种遮阳方案中，不合格个体与“光环境达标线”的关系如图3.3所示。在11种方案中，“光环境达标线”设置较为严格的时候，教室朝向北方的2号和6号方案有较大优势，可能因为“采光不良利用时间占比”中，“过量采光时间占比”占据大部分影响因素。

对于本次模拟，不同方案之间的初步比较结果：除去两个北向采光方案，表现普遍最佳的是1号方案；双侧导光板遮阳方案，与以列为单位的研究成果基本一致。在尝试不同的“光环境达标线”的过程中，可以发现从1%过渡到5%的过程之中，不合格个体数量大幅度下跌，这意味着尽可能小的降低合格标准的同时可以使得更多人满足要求，故可以考虑将“光环境达标线”的制定限制在这个范围内。

自习教室天然光设计的多目标优化模型

光环境达标线

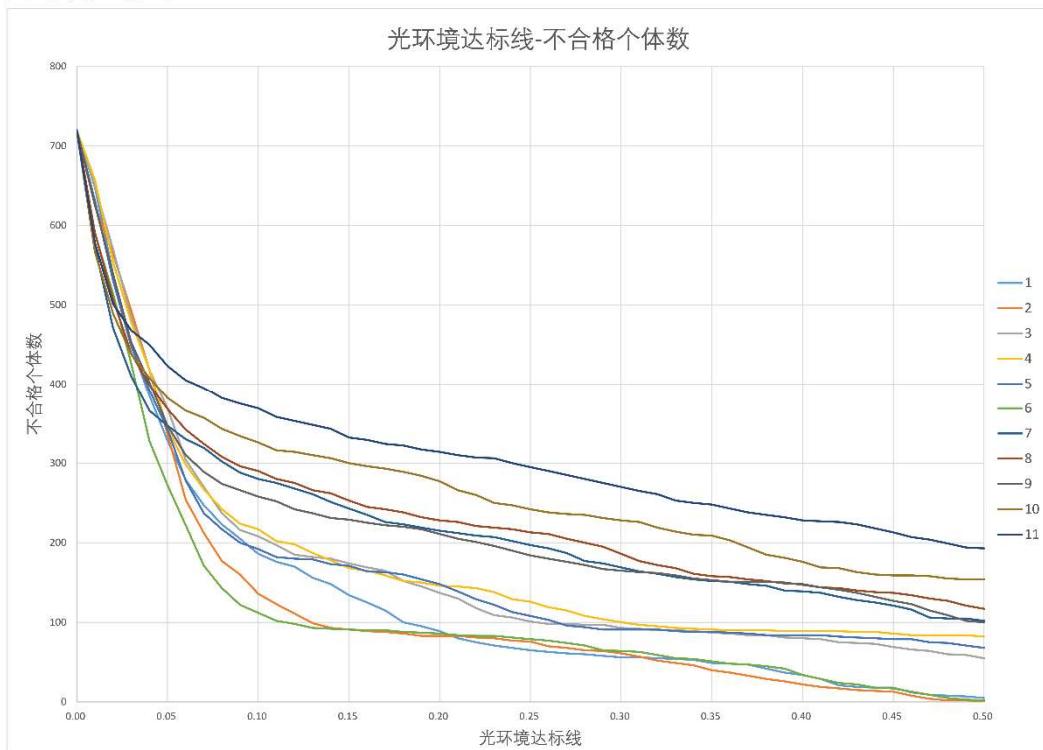


表3.1 各方案的“光环境达标线”。

| 方案 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 |
|-----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| 达标线 | 2% | 1% | 3% | 2% | 2% | 1% | 1% | 1% | 1% | 1% | 1% |

描述性统计

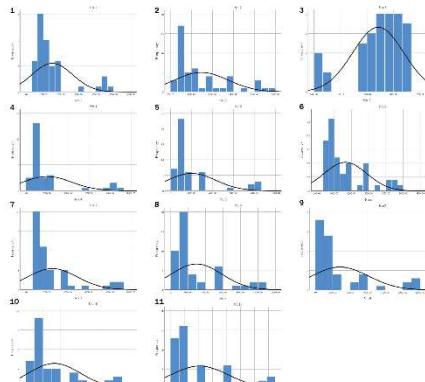


表4.1 描述性统计数据结果。

| Project | Mean Value | 平均值标准差 | 最小值 | 最大值 | 标准差 | 范围 |
|---------|------------|-----------|---------|----------|------------|----------|
| 1 | 1513.263 | 166.7412 | 578.04 | 4848.34 | 1155.217 | 4270.3 |
| 2 | 1235.272 | 92.61007 | 655.05 | 2842.88 | 641.6214 | 2187.83 |
| 3 | 1884.018 | 27.79933 | 1405.63 | 2119.21 | 192.5994 | 713.58 |
| 4 | 2026.018 | 335.72 | 580.88 | 8866.51 | 2325.937 | 8285.63 |
| 5 | 2001.733 | 330.5804 | 546.56 | 8606.32 | 2290.328 | 8059.76 |
| 6 | 1323.9777 | 89.72612 | 680.68 | 2889.11 | 621.64078 | 2208.43 |
| 7 | 2533.35 | 341.4178 | 771.55 | 9117.19 | 2365.412 | 8345.64 |
| 8 | 2975.064 | 417.2299 | 785.49 | 10547.56 | 2890.653 | 9762.07 |
| 9 | 2848.292 | 470.3912 | 657.53 | 11694.73 | 3258.966 | 11037.2 |
| 10 | 3276.458 | 431.6849 | 807.74 | 10771.13 | 2990.801 | 9963.4 |
| 11 | 4160.4048 | 597.71494 | 922.84 | 14564.79 | 4141.09059 | 13641.95 |

自习教室天然光设计的多目标优化模型

$$U_i = W_E \times |E - E_0| + W_{UDI} \times UDI$$

$$E' = \frac{1}{\max |E - E_0| + |E - E_0|}$$

$$U_i = W_E \times E' + W_{UDI} \times UDI$$

$$UDI_i = \sum P_i UDI_i$$

根据偏好动态调光实验，人对不同照度的喜好有一定聚集性，比起UDI的标准更为细致。根据Boyce[17]的偏好动态调光实验，其中展示了一天中不同参与者选择的照度范围，以及选择的比例。该结论如表4.3所示，根据该表可以得出人在工作室对于桌面照度在100lx-1200lx之间的时候，偏好比例分布情况。

在该实验中，由于调光范围的选取范围限制，需要扩充计算出的偏好动态调光实验范围至100lx以下及3000lx以上。将该文献中33人对不同照度区间的偏好分布通过图像表达，如图4.2中的散点所示。为预测照度超出100lx-1200lx范围照度对应的偏好比例，将该散点图进行分段非线性回归，得到图中曲线。

表4.2 基于变异系数法得出的E与UDI_a相关信息权重(以1号方案0号座位为例)

| 编号 Number | 标准差 Standard Deviation | 平均值 (μ) | 信息内容 (K=σ/μ) | 权重 (Wi=Ki/ΣKi) |
|-----------------|----------------------------|--------------------------|----------------------------|----------------------------|
| 0 平均照度 UDI_a | 0.000002656 0.057662856 | 0.000238218 0.7243105 | 0.011149044 0.079610686 | 0.122841306 0.877158694 |

表4.4 基于分段函数求得人对桌面照度的偏好分布

| 照度区间 Lux | <100 | 100-200 | 200-300 | 300-400 | 400-500 | 500-600 | 600-700 |
|-------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 比例分布 | -17.00% | 0.00% | 16.35% | 92.63% | 21.79% | 15.96% | 12.45% |

| 照度区间 Lux | 700-800 | 800-900 | 900-1000 | 1000-1100 | 1100-1200 | 1200-3000 | >3000 |
|-------------|---------|---------|----------|-----------|-----------|-----------|---------|
| 比例分布 | 9.08% | 5.84% | 2.72% | -0.26% | -3.11% | -23.76% | -32.69% |

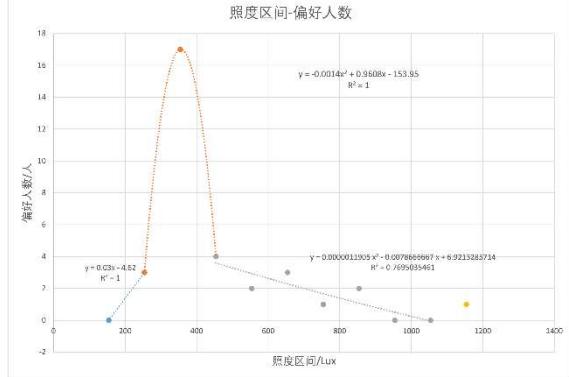


表4.5 基于公式(4-5)所得各方案UDI效用结果

| 遮阳方案 | 1. | 2. | 3. | 4. | 5. | 6. |
|-------|---------|----------|----------|----------|---------|----------|
| UDI效用 | 46.0003 | 73.04037 | 10.31859 | -56.5515 | -21.061 | 47.00467 |

$$UDI_i = \sum P_{正常} I_{正常} + \sum P_{<100lx} (I_{<100lx} - T) + \sum P_{>3000lx} (I_{>3000lx} - T)$$

$$UDI_i = \sum P_{正常} UDI_{正常} + \sum P_{<100lx} (UDI_{<100lx} - T) + \sum P_{>3000lx} (UDI_{>3000lx} - T)$$

对于采光情况不太好的情况，随着时间累积，会导致视疲劳一定程度加重。将UDI分为采光较为正常的情况和采光明显不良的情况，即将100lx-3000lx以及该区间外的UDI分为两部分。

细化讨论采光不良的照度区间。

其中，累积的时间时长和对于不同采光不良的照度区间的偏好都是影响结果的变量。在此引用常量T，即视疲劳积累临界时间。本文尝试用两种自变量与常量T进行比较，分别为UDI与客观采光不良时间长度数值。

$$U = \sum U_i$$

$$U = \sum (k \times U_i)$$

其中引入系数k指标准判定系数，定义为对第i号个体是否为“不合格个体”的量化系数。当该个体通过“光环境达标线”的判定时，k=1；若没有通过达标线，则k=0.8。该方法可以通过判断一个方案抽样出的个体整体通过标准判定的情况，并将判定结果作为影响因素引入效用计算中。

表4.10 基于公式(4-8)所得各方案综合效用结果(对应表4.6)

| 遮阳方案 | 1. | 2. | 3. | 4. | 5. | 6. |
|------|----------|----------|---------|----------|----------|----------|
| 综合效用 | 37.47544 | 17.07571 | 45.9532 | 30.13211 | 38.18901 | 8.249921 |

表4.6 基于公式(4-6)所得各UDI方案效用结果

| 遮阳方案 | 7. | 8. | 9. | 10. | 11. |
|-------|---------|---------|----------|---------|----------|
| UDI效用 | 211.202 | 234.297 | -191.729 | 320.974 | -447.439 |

| 遮阳方案 | 7. | 8. | 9. | 10. | 11. |
|-------|----------|----------|----------|----------|----------|
| UDI效用 | 0.276167 | 0.100673 | 22.07739 | -17.9603 | -41.4911 |

表4.10 基于公式(4-8)所得各方案综合效用结果(对应表4.6)

| 遮阳方案 | 1. | 2. | 3. | 4. | 5. | 6. |
|------|----------|----------|---------|----------|----------|----------|
| 综合效用 | 37.47544 | 17.07571 | 45.9532 | 30.13211 | 38.18901 | 8.249921 |

表4.6 基于公式(4-6)所得各UDI方案效用结果

| 遮阳方案 | 7. | 8. | 9. | 10. | 11. |
|------|----------|----------|----------|---------|----------|
| 综合效用 | -9.04515 | -8.09969 | 6.514692 | -20.574 | -34.1802 |

综合论文训练记录表

| | | | | | | | |
|-------------------------------|--|--|--|----|------------|----|------|
| 学生姓名 | 张敬雯 | | | 学号 | 2018010063 | 班级 | 建 83 |
| 论文题目 | 自习教室天然光设计的多目标优化模型 | | | | | | |
| 主要内容以及进度安排 | <p>主要内容</p> <p>室作为中小学生长时间所处场所，内部环境对使用者有较大影响。在众多综合因素中，光环境对学生学习效率与健康的影响占较大。在我国现有光环境标准中，大多以教室整体为单位进行评估，然而同一间教室中不同位置的多个个体光环境情况存在较大差异，不能一概而论。</p> <p>本文在已有个体光环境研究的基础上，使用建筑性能分析插件 Climate Studio 对标准教室模型在临沂的气候条件下进行不同范围的模拟，使用不同的分析方法与标准进行数据处理。</p> <p>最终成果分为两部分：第一部分构建出对教室光环境新的评估标准；第二部分通过数学建模量化光环境对于个体的正向作用。并通过模拟所得数据进行遮阳方案评估示范。</p> <p>进度安排</p> <p>Week1-2：临沂城投集团的代表性学校项目汇总；与学校光环境相关的标准；近年典型的学校采光作法。</p> <p>Week3-4：（实地调研）与建设方、学校方座谈，了解学校项目光环境基本情况、学生的使用问题；（软件学习）Climate Studio；（模拟建模）用 Rhino 软件建立临沂教学建筑的研究模型作为研究对象。</p> <p>Week5-9：（模拟&拟定新标准）在 Climate Studio 中调入研究模型，对于多组南北向采光策略进行评估，获取不同位置的气候数据，对光环境评判标准重新进行设计。</p> <p>Week10-11：（数学建模）对个体座位的光环境给人带来的正向影响进行数学建模，使得其可以进行量化评估。</p> <p>Week12-15：（论文撰写&标准编写）根据采光策略优化方案，编写健康照明标准中的采光章节；根据数学建模结果对不同方案进行比较，优化方案比较的方法。</p> | | | | | | |
| | 指导教师签字: <u>陈</u> 考核组组长签字: <u>陈</u> | | | | | | |
| | 2023 年 3 月 15 日 | | | | | | |
| | 论文选题内容、研究计划可行，同意通过中期考核 | | | | | | |
| | 考核组组长签字: <u>陈</u> | | | | | | |
| | 2023 年 4 月 14 日 | | | | | | |
| <i>3月15日</i> 中期考核意见 | | | | | | | |

| | |
|--------|---|
| 指导教师评语 | <p>论文对目前学校教室光环境标准评估对象不够注重个体差异性的问题，进行了讨论研究。为现阶段标准的更新提供了指导方向，同时也为个体在光环境中受益程度进行量化，提供了比较方法，并提出了评价指标。该论文论述内容逻辑清晰，研究方法合理，体现了良好的学术研究能力。同意通过综合论文训练的审核。</p> <p>指导教师签字: 张帆</p> <p>2023年6月9日</p> |
| 评阅教师评语 | <p>论文通过数学模型建立量化了个体光环境的情况，为标准的更新和实践需求提供了理论指导依据。论述逻辑清晰，内容详实，达到综合论文训练的要求。</p> <p>评阅教师签字: 蓝朝阳</p> <p>2023年6月9日</p> |
| 答辩小组评语 | <p>答辩洋洋洒洒，表达准确，达到了本科毕业的基本要求，同意通过。</p> <p>答辩小组组长签字: 张帆</p> <p>2023年6月9日</p> |

总成绩: B+
教学负责人签字: 王晓东

2023年6月14日