

基于MTA-TPACK动态协作螺旋的AI智能体辅助教学实践

——以热带气旋WISHE机制科学图像生成为例

陈弘正^{1,2*}, 黄龙翔²

¹黄冈师范学院机电与智能制造学院, 湖北 黄冈

²南洋理工大学国立教育学院, 新加坡

收稿日期: 2026年7月20日; 录用日期: 2026年10月4日; 发布日期: 2026年10月13日

摘 要

如何使教师的学科知识在人机协作中转化为可直接应用于课堂教学的科学准确的视觉表征, 是生成式AI赋能科学教育教学实践的核心挑战。本研究以MTA-TPACK动态协作螺旋为分析框架, 将其所刻画的“知识激活-诊断评价-后设修正”过程逻辑编码为基于Gemini平台的AI智能体(GEM), 以支持教师在协作过程中进行判断、选择与调整, 引导教师完成从文献溯源到视觉约束转化、从量规诊断到迭代精修的闭环教学设计协作。以热带气旋风致表面热交换(WISHE)机制为案例, 围绕二次眼墙形成(SEF)与快速增强(RI)展开科学图像的螺旋式优化。结果显示, SEF图像科学准确性由4分跃升至满分, RI由4.7分提升至4.9分。智能体自动输出的可见教学思维(VPT)轨迹, 将隐性学科判断凝练为可追溯的教学资源, 记录了从结构描述到机制解释再到物理完备化的认知跃迁。本研究为以MTA-TPACK为分析视角设计可操作的课堂教学辅助智能工具提供了方法论路径。

关键词

MTA-TPACK, 人工智能智能体, 风致表面热交换, 科学图像视觉化, 可见教学思维, 教学实践

AI Agent for Teaching Practice Grounded in the MTA-TPACK Dynamic Collaboration Spiral

—A Case Study of Scientific Image Generation for the Tropical Cyclone WISHE Mechanism

Hung-Cheng Chen^{1,2*}, Lung-Hsiang Wong²

*通讯作者。

文章引用: 陈弘正, 黄龙翔. 基于MTA-TPACK动态协作螺旋的AI智能体辅助教学实践[J]. 创新教育研究, 2026, 14(10): 23-35. DOI: 10.12677/ces.2026.1410757

Abstract

Transforming teachers' disciplinary knowledge into scientifically accurate visual representations through human-AI collaboration remains a central challenge in applying generative AI to science education teaching practice. Grounded in the MTA-TPACK Dynamic Collaboration Spiral, this study encodes its three-stage process logic—knowledge activation, diagnostic evaluation, and meta-reflective refinement—into an AI agent (GEM) built on the Google Gemini platform, guiding teachers through a closed-loop workflow from literature-grounded constraint translation to rubric-based iterative refinement within an instructional design workflow. Using the Wind-Induced Surface Heat Exchange (WISHE) mechanism of tropical cyclones as an empirical case, spiral-based optimization is conducted across Secondary Eyewall Formation (SEF) and Rapid Intensification (RI). Results show that SEF scientific accuracy rose from 4 to a perfect 5 out of 5, while RI improved from 4.7 to 4.9. The Visible Pedagogical Thinking (VPT) trajectory automatically generated by the agent distills tacit disciplinary judgments into traceable pedagogical resources, documenting a cognitive progression from structural description through mechanistic explanation to physical completeness. This study provides a methodological pathway for designing operational, classroom-ready intelligent tools informed by the MTA-TPACK framework.

Keywords

MTA-TPACK, AI Agent, Wind-Induced Surface Heat Exchange (WISHE), Scientific Image Visualization, Visible Pedagogical Thinking (VPT), Teaching Practice

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

1.1. 研究背景：生成式 AI 与科学图像

科学图像是将复杂科学概念转化为直观视觉表征的重要工具，其发展历程横跨从史前岩画到文艺复兴解剖学精确绘图的漫长演进。近年来，生成式人工智能(Generative AI)技术的迅猛发展——特别是 Midjourney、DALL-E 及 GPT-4o 等文本到图像生成系统——为科学插画的创作提供了前所未有的新途径。这些工具能够基于自然语言提示词快速生成具有高度视觉冲击力的科学图像，极大地拓展了科学传播与课堂教学可视化的可能性[1]-[3]。然而，视觉上令人信服的图像并不等同于科学上准确的表征。AI 系统可能生成外观逼真却在物理机制层面存在严重偏差的“科学幻觉”——例如气流穿过山体而非绕行、对称的降水分布与实际地形效应不符等[4]。

近期相关研究表明，ChatGPT 与 Midjourney 的循环优化工作流可以提升科学插画的准确性[3]，但该方法依赖研究者的个人专业判断，缺乏系统化的理论引导框架。如何确保教师的学科知识能够有效转化为 AI 可理解的视觉约束条件，在视觉美感与科学准确性之间取得平衡，成为亟待解决的问题。

1.2. WISHE 机制的可视化挑战

风致表面热交换(Wind-Induced Surface Heat Exchange, WISHE)机制是解释热带气旋强度与维持的核心物理机制之一[5]-[7], 描述了海面风场与热通量之间的正反馈过程: 强风驱动海表蒸发, 向大气输送大量水汽和潜热, 形成有利于气旋发展的温暖湿润环境; 反过来, 气旋增强导致风速增大, 进一步促进海面热通量, 形成闭合的正反馈回路。WISHE 涉及海洋与大气之间的多重物理过程耦合, 包括角动量守恒、边界层径向流入、潜热释放及垂直运动等。Cheng 和 Wu 的系列研究揭示了 WISHE 在二次眼墙形成(Second Eyewall Formation, SEF)和快速增强(Rapid Intensification, RI)中的关键作用[8][9]。在 SEF 过程中, 切向风场外扩导致外围热通量增加, 超梯度风在边界层顶部产生强制辐合, 诱发新的对流环; 在 RI 过程中, WISHE 正反馈高度集中在最大风速半径(Radius of Maximum Wind, RMW)内, 导致眼墙收缩、暖心深化和对流轴对称化。这些多尺度、非线性特征使得 WISHE 的准确视觉化极具挑战性[3][10]。

1.3. 研究目的

Chen 和 Wong 提出的 MTA-TPACK 动态协作螺旋框架将静态 TPACK 知识资源与动态的元任务觉察(Meta-Task Awareness, MTA)理论结合[4][11][12], 通过迭代的“生成-评价-修正”循环产出可见教学思维(Visible Pedagogical Thinking, VPT), 但其操作仍高度依赖人工执行[4]。本研究旨在将该框架所刻画的协作过程逻辑落实为可操作的 AI 智能体(GEM) workflow, 并以 WISHE 机制为实证案例验证其效果。需要指出的是, 本研究并非将 MTA 本身编码为一种生成机制, 而是使系统支持教师在过程中进行判断、选择与调整; MTA 则作为分析透镜, 用以解释此人机协作中知识的动态运作。具体目标: (1) 阐述 MTA-TPACK 过程逻辑向 GEM 功能模块的系统性映射; (2) 通过 SEF 与 RI 两个子机制的图像生成过程展示面向教学实践的人机协作 workflow; (3) 分析 VPT 轨迹报告作为可复用课堂教学资源的潜力。

2. 理论基础与 GEM 设计

2.1. MTA-TPACK 动态协作螺旋回顾

MTA-TPACK 动态协作螺旋由 Chen 和 Wong 提出[4], 是对经典 TPACK 框架的理论扩展[13], 旨在解释生成式 AI 环境下教师如何将静态知识资源动态地激活与协调。该框架由三个核心构念组成。静态 TPACK 资源基础构成底层, 包括学科内容知识(Content Knowledge, CK)、教学知识(Pedagogical Knowledge, PK)和技术知识(Technological Knowledge, TK)。然而面对生成式 AI 产出的不确定性, 仅凭静态知识积累不足以应对[14]。元任务觉察(MTA)被喻为“动态导航引擎”, 用以解释三类知识在迭代人机交互中如何被动态运作与协调[11][12]。MTA 不同于传统元认知——后者侧重监控个体自身任务执行, MTA 的独特之处在于关注任务框架的调节: 不仅关注如何执行任务, 更关注 AI 的参与如何重塑了任务的目标、结构与评价标准。需要强调的是, MTA 并非元认知的一个子类, 而是以反思性元认知与分布式认知为理论基础的整合性构念; 它也不应被理解为一种高阶提示词技巧(advanced prompting technique)——其关切超越提示词层次(beyond prompting), 进入对任务本身如何被 AI 参与所重塑的元层次觉察。在 CK 层面, MTA 使学科理解成为认识论过滤器(epistemic filter), 引导教师判断 AI 表征是否符合科学约束; 在 PK 层面, MTA 支持人机能动性(human-AI agency)分配的监控与调节; 在 TK 层面, MTA 将焦点从操作熟练度转向对 AI 生成自主性的意识。

生成-评价-修正协作螺旋源自 Wong 的学习设计与评价链(Chain of Learning Design and Evaluation, CoLDE) [12], 是 MTA 驱动下人机交互的过程实例化。在生成阶段, 人类专家通过指定提示词将任务相关知识外化; 在评价阶段, AI 依据学科标准对 AI 制品(artifact)进行审查, 发挥诊断功能, 揭示意图表征与实际输出之间的偏差; 在修正阶段, 评价洞见被用于调整后续迭代的规格与策略。跨越多次迭代, 该

序列形成上升螺旋而非封闭回路——每个循环基于先前评价构建，逐步稳定人类意图与 AI 输出的对齐。可见教学思维(VPT)是此协作螺旋的最终产出，并以量规锚定的证据结构为特征：以学科机制而非时间线索索引评价、使评价推理显性化、由理论引导反思焦点[4]。

2.2. 从框架到智能体：GEM 的设计思路

本研究的核心贡献在于将 MTA-TPACK 所刻画的三阶段协作过程逻辑系统性地映射为 AI 智能体的功能模块。需要说明的是，GEM 并非 MTA 的“实现”或替代——MTA 仍是解释人机协作中判断与取舍的分析性构念；GEM 则是依据该过程逻辑设计的支持系统，为教师的判断、选择与调整提供结构化支架。该智能体基于 Google Gemini 平台开发，命名为“VPT 科学图像协作大师”，其系统提示词严格对应理论

的三阶段结构，遵循以下设计原则：

第一阶段映射：知识激活与视觉化映射。对应 MTA-TPACK 中静态 TPACK 资源的激活过程。GEM 在教师提出科学概念时首先询问是否有先备知识档案(如 PDF 或文献)，体现“档案优先”原则——确保 CK 来自可靠学术来源而非 AI 训练记忆。若教师未提供文献，GEM 调用搜索功能检索并结构化整理关键信息。在此基础上，GEM 整理“科学机制与视觉指标对比表”，将物理机制转化为具体可观察的视觉特征，直接对应 Chen 和 Wong 论文中 Table 1 的映射逻辑[4]。在教师确认前不得进入生图阶段，确保教师作为“教学设计者”的主体性。

第二阶段映射：评分量表生成与诊断评价。对应 MTA-TPACK 中评价阶段的认识论过滤功能。GEM 依预设流程自动生成五分评分量表，包含“科学准确性”与“视觉清晰度”两个维度及各等级锚定描述。图像生成后，GEM 依量规执行逐条评分并输出结构化诊断报告，将人类专家的评价功能部分地嵌入 AI 操作流程，实现评价的结构化与可追溯性。

第三阶段映射：后设修正与思维显性化。对应 MTA-TPACK 中修正阶段和 VPT 产出。GEM 基于诊断结果自动输出提示词调整建议——例如从描述性词汇转向结构化约束——以提高量表分数。对话结束时 GEM 自动整理 VPT 轨迹，记录从初始构思到最终产出的决策逻辑。GEM 的输出风格被设定为“专业且具启发性”，始终将教师定位为设计主体；GEM 在流程中定位为执行结构化步骤的支持系统，而“动态导航引擎”一喻指向的是教师的 MTA，而非智能体本身。表 1 总结了三阶段与 GEM 功能的对应关系。

Table 1. Correspondence between the three stages of MTA-TPACK and GEM functional modules
表 1. MTA-TPACK 三阶段与 GEM 功能模块的对应关系

协作螺旋阶段	核心功能	GEM 对应模块	教师角色
知识激活	将 CK 转化为视觉约束	文献分析→科学机制与视觉指标对比表	提供文献、确认映射
诊断评价	依据学科标准审查 AI 输出	五分量表自动生成→图像诊断	审核结果、决定接受与否
后设修正与 VPT	调整约束并记录决策	修正建议→VPT 轨迹整理	执行修正、验证报告

注：MTA 作为分析透镜贯穿三阶段，用以解释教师在各阶段的判断与调整，而非任一阶段的操作模块。

2.3. GEM 的技术架构与实现

GEM 并非通过应用程序接口(API)编程或外部程序封装实现，而是在 Google Gemini 平台上以自然语言系统指令配置的自定义智能体。其可复制性因而不繫于源代码的公开，而繫于提示词架构的显式化：工作流的每一项约束——阶段划分、闸门条件、评价维度——均以教师可读、可修改的自然语言形式存在。Wong 在论述后设提示词时代的教学设计时指出，早期智能辅导系统(ITS)的编排逻辑运行于后台且不为使用者所见，生成式 AI 则使任务结构、学习目标与反思焦点得以在语言层面前台化[12]。本研究的

实现方式正落在这一转向之上：教师面对的不是不透明的功能黑箱，而是一份可检视、可重构的流程规格。

从设计模式看，该工作流可刻画为一个带有人机回路闸门(human-in-the-loop gating)的有限状态机；而闸门之所以必要，其理据来自 MTA 理论对当前技术转折的判断。Wong 指出，当 AI 由被动应答转为主动建议下一步时，提示词的显性劳动固然减少，使用者对系统所生成脚手架的隐性依赖却随之上升，教师是否仍掌握教学逻辑因而成为新的风险[12]。闸门即针对此一风险的结构化设计：它把原本由系统内部完成、对使用者不可见的阶段推进，重新外显为一个必须由教师作出判断的决策点。

两道闸门分别对应 MTA 在不同技术情境中的两种运作方式。第一道闸门设于图像生成之前，教师须确认机制与视觉指标的映射表及版面逻辑，此处所要求的是提示词时代的 MTA——在委派任务之前厘清任务的深层意图、结构与评价标准[12]。第二道闸门设于每轮诊断之后，教师须对 AI 输出的评分与修正建议作出接受、修正或终止的裁断，此处所要求的则是后设提示词时代的 MTA——对 AI 所提供的脚手架进行诠释与共同导航：这一诊断的依据何在？其建议预设了什么？哪一部分的教学意图因而被支持或被遮蔽[11][12]？

跨越多轮循环，闸门的另一作用是将各次生成串接为具有连续性的轨迹，而非彼此孤立的片段式提示，此即学习设计与评价链(CoLDE)在工具层面的落实[12]。也因此，GEM 并不生产 MTA，而是为 MTA 的运作提供可被占据的位置：闸门创造判断的时机，判断本身仍须由教师作出。此一区分同时界定了本设计的限度——若教师以例行确认通过闸门，结构上的机会便无法转化为实质的元任务觉察。

该架构另内建两项约束以维持评价的学科基准。其一为档案优先：流程启动即要求教师提供先备文献，仅在无文献时才退回检索归纳，藉此使内容知识来自可查核的学术来源而非模型的训练记忆。其二为量规锚定：评分依预先生成的双维度量规逐项执行，输出为结构化诊断报告而非自由评论，使每一次评价均可追溯与复核。此外，在生成提示词之前另设有版面判定步骤，依知识结构的类型——对比、因果或循环——在网格式、多层次剖面与放射循环等布局之间给出建议，使表征形式与知识结构相匹配。

上述控制结构及其与 MTA 的对应关系如图 1 所示。

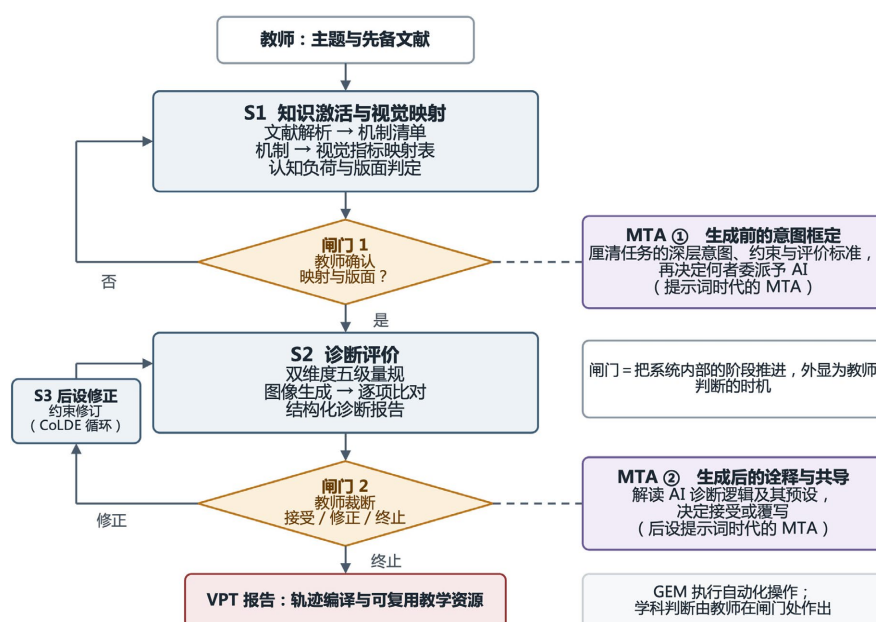


Figure 1. Control structure of the GEM workflow and its correspondence with meta-task awareness
图 1. GEM 工作流的控制结构及其与元任务觉察的对应关系

须说明的是，图 1 刻画的是流程的控制结构，而非模型的内部机制。GEM 在各状态中执行的是文本解析、结构化输出与量规比对等自动化操作；其间的学科判断与取舍仍由教师承担，MTA 则用以解释这些判断如何在流程中被调用、检验与调整。

3. 科学图像生成实例：热带气旋 WISHE 机制

本章以 WISHE 机制为实证案例，围绕 SEF 与 RI 两个子主题，按 MTA-TPACK 三阶段展开教学图像的协作设计叙述。

3.1. 第一阶段：知识激活与视觉化映射

教师向 GEM 提出“热带气旋 WISHE 机制”主题并上传五篇参考文献[5]-[9]。GEM 严格遵循操作流程，首先进入知识激活阶段，询问教师是否有其他先备知识档案。在确认以五篇文献为参考后，GEM 基于文献内容系统归纳 WISHE 核心物理逻辑：(1) 能量来源——气旋能量完全依赖海表潜热与感热通量；(2) 正反馈循环——强风驱动焓通量交换，增加边界层相当位温，激发更强对流，增强暖心结构，进而产生更强风速；(3) 与 CISK (Convective Instability of the Second Kind) 的差异——增强速率对热量传递系数高度敏感，但对摩擦阻力系数相对不敏感；(4) 结构影响——WISHE 在眼墙外的反馈是驱动风场扩张与 SEF 的关键。GEM 据此生成初版“科学机制与视觉指标对比表”。

教师审阅后提出关键反馈：“需要增加二次眼墙或快速增强的视觉限制。”接下来 GEM 随即解析 Cheng 和 Wu 的论文[8] [9]，将 SEF 与 RI 的关键机制整合进更新后的对比表。更新后的新增指标包括：双重对流环结构与“护城河(Moat)”区域(SEF)、眼墙收缩与暖心深化的垂直剖面特征(RI)、超梯度风的气流喷发特征。表 2 展示经教师确认的最终版对比表。

Table 2. Mapping of WISHE scientific mechanisms to observable visual indicators
表 2. WISHE 机制科学机制与视觉指标对比表

科学机制	物理描述	可观察视觉指标
海气热交换反馈	表面风速与海表焓通量正反馈	热量流线密度随风速增加而增强
边界层能量累积	低层相当位温升高与梯度建立	亮橘色至深红色渐层展现能量聚集
SEF	切向风场外扩，超梯度风产生辐合	双重对流环与护城河区域
RI	RMW 内能量集中，暖心深化	眼墙收缩、深色暖心、对称结构
超梯度风	边界层顶部径向流减速并向上喷发	眼墙底部径向流入及垂直上升箭头

Table 3. Operational definitions for the presence-level assessment of WISHE visual indicators
表 3. WISHE 机制视觉指标存在性判定标准

视觉指标	缺失	部分呈现	清晰呈现
海气热交换箭头	图像中无可识别的海表能量通量箭头，或箭头与风场无空间关联	存在能量箭头但分布均匀，未呈现与风速的正相关梯度	箭头密度与长度随风速增加而显著增强，明确呈现 WISHE 正反馈的空间异质性
边界层能量渐层	气旋底层无色彩编码，或仅为装饰性颜色	存在暖色调但缺乏从外围向内核的渐进式过渡	亮橘色至深红色渐层清晰可见，且与眼墙位置空间对应
双重眼墙与护城河特征	仅呈现单一眼墙，无次级对流环	外围有云带暗示但护城河下沉区未明确区分	主眼墙与二次眼墙独立可识，护城河区域伴有明确的下沉流线
眼墙收缩与暖心	眼墙宽松无收缩趋势，无可识别的暖心结构	眼区稍窄但缺乏“体育场效应”，或暖心垂直层次不明显	眼墙陡峭向内倾斜呈现体育场效应，中上层暖心垂直延伸清晰可见
超梯度风喷发	无可识别的径向流入转向特征	存在上升气流指示但未与地形/眼墙底部空间锚定	眼墙底部呈现明确的径向流入转垂直喷发的流线结构

为确保评价的系统性与可追溯性, 本研究参照 Chen 和 Wong [4] 的量规设计方法, 制定了 WISHE 机制专属的结构化评价量规。表 3 定义了各视觉指标在“缺失”“部分呈现”与“清晰呈现”三个等级上的操作性判定标准; 表 4 则提供了科学准确性与视觉清晰度两个维度的五分整体评分锚定描述。后续 3.2 节中的所有诊断评分均依据上述量规执行。

Table 4. Holistic scoring anchors for scientific accuracy and visual clarity of WISHE images
表 4. WISHE 图像科学准确性与视觉清晰度评分锚定描述

分数	科学准确性锚定描述	视觉清晰度锚定描述
5	完美呈现海气热交换箭头与风速的比例关系, 双重眼墙或眼墙收缩特征完备, 超梯度风与下沉流场物理自洽	图像结构层次分明, 剩面与 3D 深度感引导视觉焦点, 标签无误且不干扰主体
4	包含所有核心指标, 但热交换箭头与风速的空间对应关系稍显模糊, 或护城河/暖心的物理边界不够锐利	视觉美感佳, 主要特征清晰, 但背景杂讯稍多或色彩对比可进一步优化
3	呈现气旋结构, 但 WISHE 的“表面回馋”特征仅以简单符号或文字带过, 缺乏机制层面的动态表征	图像可读, 但科学特征与艺术装饰分界不清, 教学重点不突出
2	仅呈现普通台风图像, 缺乏热交换与能量回馋的视觉表征	构图混乱, 无法引导学生观察到 WISHE 的物理逻辑
1	科学概念完全错误(如将能量来源标示为地形摩擦)或存在严重 AI 幻觉	图像模糊或充满视觉干扰, 无教学使用价值

3.2. 第二阶段：迭代诊断与优化

本研究设计的 GEM 基于 Cheng 和 Wu 设计首轮结构化提示词[8] [9], 采用 3D 剖面透视视角, 核心约束包括主眼墙(窄而密集的垂直云塔)、发展中的二次眼墙(较宽的积雨云环)、两者间的护城河区域、以及海气界面密集的发光能量箭头。此外, GEM 特别记录了视觉策略选择理由: 使用剖面图而非俯视图, 是为了同时观察边界层热交换(底层)与深对流发展(高层)的因果链结。

3.2.1. SEF 阶段的生成 - 评价 - 修正循环

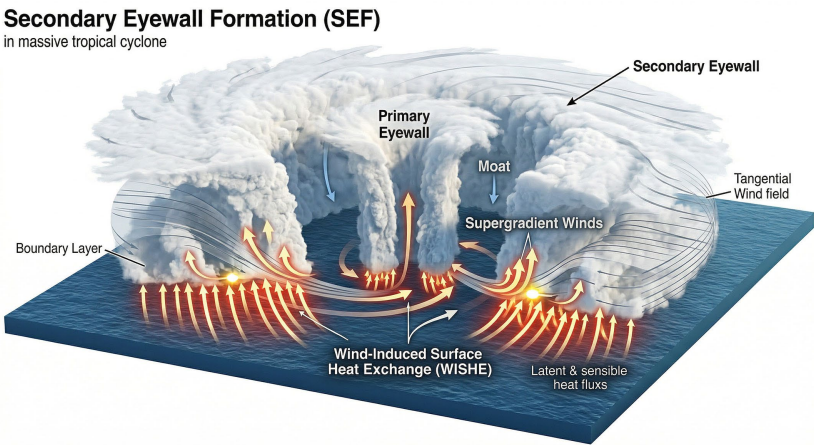


Figure 2. First-round generated image for the SEF stage
图 2. SEF 阶段第一轮生成图像

针对二次眼墙形成(SEF)阶段的视觉化, 在第一轮生成与诊断(如图 2)中, 科学准确性为 4/5, 视觉清晰度则为 5/5。GEM 输出的诊断结果显示, 图像正确呈现了主眼墙、二次眼墙及护城河结构, 底层橙色

箭头(WISHE 反馈)与蓝色箭头(径向流入)区分清晰;但 WISHE 的核心正反馈——“风速增加导致热通量增加”——在二次眼墙下方的能量箭头密度上未与主眼墙形成比例动态感。最终, GEM 输出的诊断文本记录为:“这是一张具备 5 分潜力的 4 分图像——描述了 SEF 的结构,但解释 WISHE 动态机制的能力可进一步强化。”而修正策略则建议如下:(1) 要求箭头呈现从外围向内增强的梯度;(2) 将超梯度风从静态箭头改为“螺旋喷发”流线;(3) 加强主眼墙暖心的深红色渐层。

第二轮优化与诊断(如图 3)过程如下。由提示词引入“热通量梯度效果”——橘色能量箭头在两个眼墙下方最密集且最长,外围较短稀疏;同时加入“超梯度风喷发区”——使用明亮青色螺旋流线展示从水平流入到垂直喷发的转变。诊断评分的结果如下:科学准确性 4.8/5,视觉清晰度 5/5。GEM 输出的诊断结果显示,能量箭头密度梯度成功捕捉了风速与热通量的正相关,但护城河区域仍有少量上升感,建议进一步强调该区下沉气流。

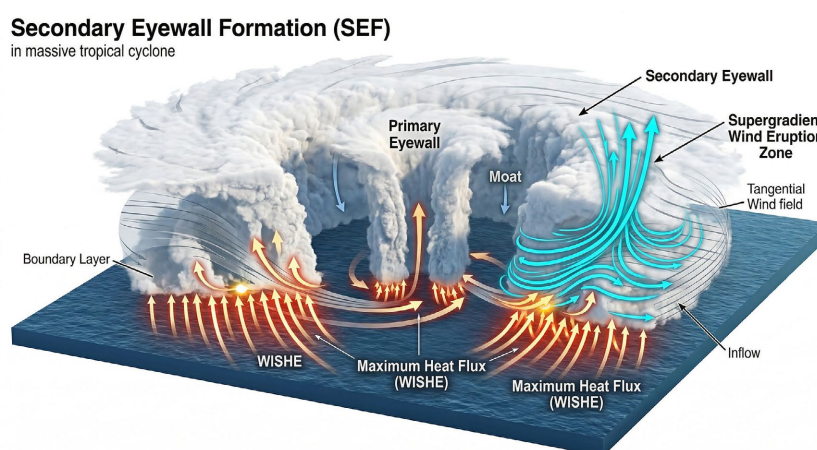


Figure 3. Second-round generated image for the SEF stage

图 3. SEF 阶段第二轮生成图像

第三轮则为精修与最终诊断(如图 4)。在加入“在两个眼墙之间使用精细有组织的淡蓝色下沉流线代表强制大气下沉”后获满分 5/5。GEM 输出的诊断结果为:图像精确呈现了 WISHE 机制的空间异质性,超梯度风喷发与护城河下沉区形成完美的次级环流闭合——这不仅是结构图,更是动力平衡图。

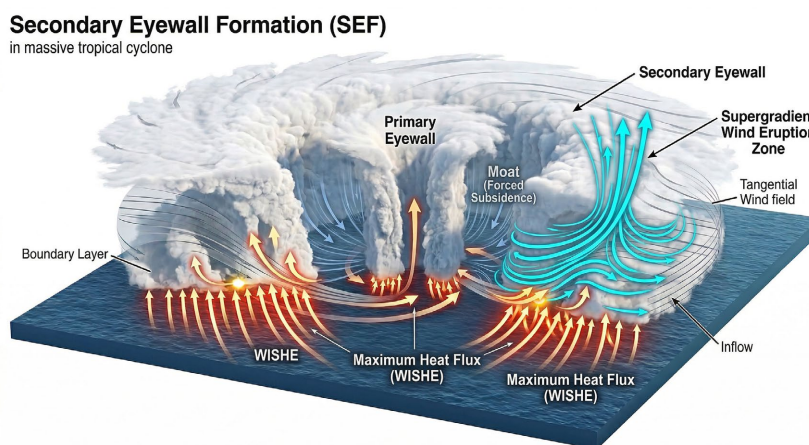


Figure 4. Third-round generated image for the SEF stage

图 4. SEF 阶段第三轮生成图像

3.2.2. RI 阶段的生成 - 评价 - 修正循环

GEM 接下来基于 Cheng 和 Wu 进行 RI 专属知识激活[9], 并提取核心物理机制, 包括: 核心 WISHE 强反馈(能量在 RMW 内极度集中)、眼墙收缩(RMW 向中心靠拢, 眼区变小)、深层暖心(中高层温度显著高于环境场)及轴对称对流(对流环变得完整均匀)。为了强化教学重点, 教师明确指定侧重“眼墙收缩的动力感”。在此条件下, GEM 生成的提示词包含以下核心约束, 包括: 异常狭窄的眼区, 眼墙云向中心显著倾斜以创造“体育场效应(Stadium Effect)”; 边界层突出的向内径向流箭头在眼墙基部急剧汇聚转为垂直喷发; 极密集金橙色能量箭头集群, 密度远高于 SEF 阶段, 体现能量在内核区的高度集中等重要现象。

在第一轮生成与诊断中(如图 5), 科学准确性为 4.7/5, 视觉清晰度达到 5/5。检视图 5 内容呈现以下特征, 包括眼墙收缩到位, 底层能量箭头在 RMW 内极度集中, 但暖心的“垂直深度”与“温度梯度”层次感不足。针对此类不足 GEM 的修正建议包括: 在眼区中心加强从 12 km 延伸至 5 km 的深红色垂直柱状梯度; 底层流入箭头增加“向内汇聚并旋转”的动态感。最后, 第二轮优化与诊断结果如图 6 所示。其中, 科学准确性为 4.9/5, 视觉清晰度则达到满分 5/5。图 6 中可以发现体育场效应明显, 暖心垂直深度准确反映强烈下沉增温, 构图极其紧凑, 与 SEF 的“扩张感”形成强烈对比。表 5 汇总各轮评分轨迹。

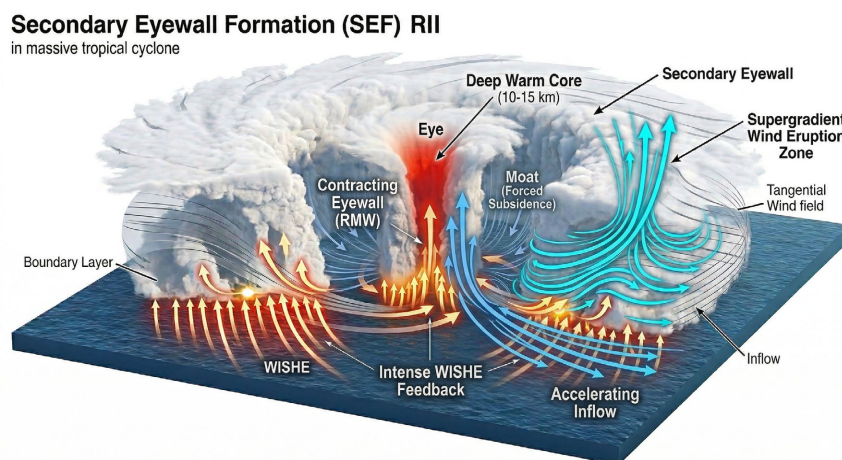


Figure 5. First-round generated image for the RI stage

图 5. RI 阶段第一轮生成图像

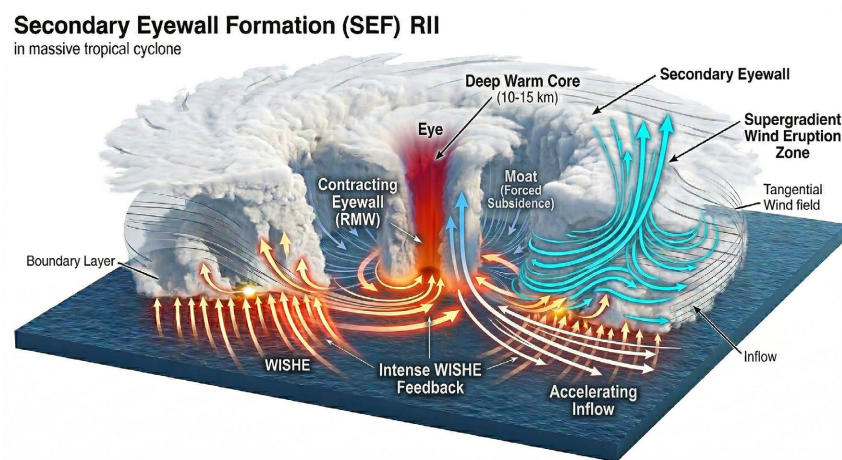


Figure 6. Second-round generated image for the RI stage

图 6. RI 阶段第二轮生成图像

Table 5. Evaluation trajectory across iterative cycles for the SEF and RI stages
表 5. SEF 与 RI 各轮次评分轨迹

主题	轮次	图像	科学准确性	视觉清晰度	关键修正点
SEF	第一轮	图 2	4/5	5/5	WISHE 箭头缺乏梯度感
SEF	第二轮	图 3	4.8/5	5/5	护城河上升感残留
SEF	第三轮	图 4	5/5	5/5	次级环流闭合完备
RI	第一轮	图 5	4.7/5	5/5	暖心深度与温度梯度不足
RI	第二轮	图 6	4.9/5	5/5	体育场效应与暖心深化达标

3.3. 第三阶段：思维显性化(VPT)报告

由 GEM 自动整理的 VPT 报告记录了从抽象文献知识到可用于课堂教学的具象图像的完整决策逻辑。在知识激活决策阶段：图像上将焓通量映射为“发光能量箭头”，超梯度风映射为“青色螺旋喷发”，采用剖面图以同时观察底层热交换与高层对流的因果链。而在迭代路径追溯阶段：SEF 现象的刻划经历了三个关键转折——第一轮(结构建立)发现 WISHE 箭头过于均匀，无法展现正反馈的空间关联；第二轮(机制强化)引入梯度约束强制箭头密度随风速变化，但护城河区域仍过于混乱；第三轮(物理完备化)加入补偿性下沉气流，实现次级环流闭合。而 RI 现象刻划阶段的核心转折则从“空间布局”转向“能量密度”——刻意将所有橘色箭头压缩在极窄内核区，对应至论文中“RMW 内热通量对 RI 贡献效率最高”的结论[9]。

在教学应用上，建议可将 SEF 与 RI 最终图像并置，引导学生观察三个层面差异——眼区直径(SEF 宽大、RI 紧缩)、能量分布(SEF 双峰分布、RI 单峰极致集中)、暖心状态(SEF 受能量分散影响结构较宽、RI 暖心剧烈深化)。也可以进一步引导学生思考问题如：“如果海表温度降低，图中哪部分箭头最先变短？”以及“为什么眼睛变小反而风速更快？”——分别带出 WISHE 能量依赖性和角动量守恒的物理观念。表 6 展示 SEF 与 RI 的综合对比。

Table 6. Comparative summary of SEF and RI in the VPT trajectory report
表 6. VPT 报告中 SEF 与 RI 的综合对比

对比维度	SEF	RI
结构取向	扩张	收缩
能量分布	双峰，外围热通量增加	单峰，内核极致集中
暖心状态	能量分散，结构较宽	剧烈深化，垂直层次明显
WISHE 作用	驱动外围风场扩张	RMW 内高效集中
教学重点	结构独立性与次级环流	动力加速与正反馈效率

VPT 报告末尾 GEM 主动提出后续选项：包括整理教学引导手册、探索新主题(如地形对 WISHE 的干扰)、或生成标签去除的“挖空版本”供学生填图练习——体现流程设计将决策记录转化为教学行动方案的结构化输出能力。须说明的是，VPT 轨迹所记录的是决策的结果与理由，属制品层证据。

4. 结论与展望

4.1. 研究贡献与局限

本研究贡献体现在三个层面。首先在理论层面，研究表明，MTA-TPACK 所刻画的协作过程逻辑

可被有效编码为 AI 智能体的操作流程, 而 MTA 作为解释层的理论定位得以保持, 核心约束(档案优先原则、教师确认机制、物理与视觉双维度评分量表)被嵌入智能体行为逻辑, 为教育技术领域“将教学理论转化为 AI 工具”提供了方法论路径。其次, 在实践层面, SEF 阶段从“结构描述”(4/5)经“机制解释”(4.8/5)至“物理完备化”(5/5)的渐进提升, RI 阶段从 4.7/5 到 4.9/5 的系统性优化, 表明 GEM 能有效引导教师将抽象大气动力学知识转化为科学准确的视觉表征。最后, 在方法论层面, VPT 轨迹报告则追溯了驱动评分变化的学科决策逻辑——“从平均分布到梯度分布”反映 WISHE 公式的视觉化、“从静态箭头到喷发流线”对应超梯度风的动力学转化——使其超越简单过程日志成为可复用的教学设计资源。

本研究存在若干局限, 首先是实证集中于单一领域(热带气旋动力学), 故而 GEM 在其他学科中的适用性尚待验证; 其次, 系列的人机协作仅涉及单一教师, 其高度领域专业性可能放大 GEM 表现; 再次, 评分由作者完成难免存在偏颇之虑, 适时的引入独立评分者可进一步增强效度。最后, 本研究的证据止于制品层: VPT 轨迹记录的是协作的外显输出, 教师判断的即时认知历程则未同步采集。

4.2. 面向可扩展性的设计延伸

可扩展性的难题不在流程的简化, 而在起步成本与认识论责任之间的张力。现行流程预设教师既能提供权威文献, 又能判定量规是否合理——这正是 MTA 得以发挥认识论过滤作用的前提, 却同时构成非专家教师的使用门槛。若为降低门槛而移除这些前提, 协作将退回单向的提示词试误; 若维持前提不变, 工具的适用范围则受限学科专家。

一种折衷设计是量规辅助生成模块: 由 GEM 依主题自动草拟一套“足够好(good-enough)”的初始量规, 教师以逐条确认或修改的方式定稿, 而非从零撰写。此设计的风险须一并指出——若教师仅以“全部接受”处理, 评价标准的来源即由学科权威退化为 AI 生成物, 认识论过滤随之弱化。相应的配套约束包括: 强制逐条确认、对缺乏文献支持的条目标注不确定性, 以及保留“此条存疑”的标记以供事后查核。

与之配套的是分层脚手架设计: 依教师的学科与技术熟练程度, 在量规来源、闸门设置与提示词控制自由度上提供差异化支持——新手层以模板化约束换取起步的可行性, 专家层则以流程的可略过性换取灵活性(详见附录表 A1)。此一设计取向的原则是: 脚手架的强度可以调整, 但不宜取消教师作出判断的位置。

4.3. 未来研究方向

因此, 未来研究可在以下方向展开: (1) 多学科迁移验证, 特别是视觉约束逻辑与气象学存在显著差异的学科; (2) 教师培训准实验研究, 比较使用与不使用 GEM 的教师在图像生成质量上的差异; (3) VPT 的外部验证, 考察非参与者能否仅凭 VPT 报告理解科学机制并迁移至自身教学设计; (4) 不同 AI 平台(如 Claude、ChatGPT、Doubao)上的智能体设计与表现比较; (5) 本研究聚焦于制品层证据(VPT)——未来研究可进一步采集历程层证据(如有声思维法), 以探究教师如何在各个决策闸门中运作 MTA, 并验证闸门是否成为 MTA 发挥作用的关键情境。(6) 分层脚手架与量规辅助生成模块的可用性研究——检验不同专业程度的教师在对应该层级下的使用成效, 并考察量规来源(AI 草拟或教师自订)对认识论过滤强度的影响。

总之, 本研究展示了以 MTA-TPACK 为理论透镜、经由过程逻辑落地为智能工具支持的实践路径。当学科机制与评价标准被明确嵌入 AI 操作流程时, AI 系统能够作为一种反思媒介(reflective medium)——不是替代教师的专业判断, 而是帮助教师将内在心智模型外化为可见的教学思维, 最终服务于科学教育的课堂实践。

基金项目

本文受国家自然科学基金面上项目“似台风涡旋通过复杂地形的路径动力模式”(项目编号:42275064)、黄冈师范学院校教学研究项目“教育大语言模型于现代教育技术的应用研究”(项目编号:2024CE35)及博士基金项目“似台风涡旋通过地形模拟与大语言模型融合应用”(项目编号:204202535904)的资助。

参考文献

- [1] Al-Amin, M., Ali, M.S., Salam, A., Khan, A., Ali, A., Ullah, A., Alam, M.N. and Chowdhury, S.K. (2024) History of Generative Artificial Intelligence (AI) Chatbots: Past, Present, and Future Development. arXiv:2402.05122.
- [2] Chen, H.C. (2023) Harnessing AI for Scientific Illustration: Exploring Tornado Dynamics through Midjourney. 2023 12th International Conference on Awareness Science and Technology (iCAST), Taichung, 9-11 November 2023, 136-141. <https://doi.org/10.1109/icast57874.2023.10359310>
- [3] 陈弘正. 基于生成式人工智能的热带气旋科学插画优化——风致表面热交换(WISHE)物理机制可视化[J]. 教育学报, 2026, 4(1): 13-19.
- [4] Chen, H.C. and Wong, L.H. (2026) The MTA-TPACK Dynamic Collaboration Spiral: Making Pedagogical Thinking Visible in Human-AI Scientific Visualization for Sustainable Teacher Innovation. *Sustainability*, **18**, Article 2718. <https://doi.org/10.3390/su18062718>
- [5] Emanuel, K.A. (1991) The Theory of Hurricanes. *Annual Review of Fluid Mechanics*, **23**, 179-196. <https://doi.org/10.1146/annurev.fl.23.010191.001143>
- [6] Emanuel, K.A. (2003) Tropical Cyclones. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, **31**, 75-104. <https://doi.org/10.1146/annurev.earth.31.100901.141259>
- [7] Montgomery, M.T. and Smith, R.K. (2017) Recent Developments in the Fluid Dynamics of Tropical Cyclones. *Annual Review of Fluid Mechanics*, **49**, 541-574. <https://doi.org/10.1146/annurev-fluid-010816-060022>
- [8] Cheng, C.J. and Wu, C.C. (2018) The Role of WISHE in Secondary Eyewall Formation. *Journal of the Atmospheric Sciences*, **75**, 3823-3841. <https://doi.org/10.1175/jas-d-17-0236.1>
- [9] Cheng, C.J. and Wu, C.C. (2020) The Role of WISHE in the Rapid Intensification of Tropical Cyclones. *Journal of the Atmospheric Sciences*, **77**, 3139-3160. <https://doi.org/10.1175/jas-d-20-0006.1>
- [10] Smith, R.K. and Montgomery, M.T. (2016) Understanding Hurricanes. *Weather*, **71**, 219-223. <https://doi.org/10.1002/wea.2776>
- [11] Wong, L.H. (2025) The Prompt Is Not Enough: Rethinking AI-Learner Interaction in the Post-Prompting Era. *International Conference on Computers in Education*, **2**, 311-319. <https://doi.org/10.58459/icce.2025.6063>
- [12] Wong, L.H. (2025) Transforming Education with Generative AI: Designing for Post-Prompting Era. *Information and Technology in Education and Learning*, **5**, Inv-p003. <https://doi.org/10.12937/itel.5.1.inv.p003>
- [13] Mishra, P. and Koehler, M.J. (2006) Technological Pedagogical Content Knowledge: A Framework for Teacher Knowledge. *Teachers College Record: The Voice of Scholarship in Education*, **108**, 1017-1054. <https://doi.org/10.1111/j.1467-9620.2006.00684.x>
- [14] Mishra, P., Warr, M. and Islam, R. (2023) TPACK in the Age of ChatGPT and Generative AI. *Journal of Digital Learning in Teacher Education*, **39**, 235-251. <https://doi.org/10.1080/21532974.2023.2247480>

附 录

Table A1. Tiered scaffolding design for teachers with differing levels of expertise
表 A1. 面向不同专业程度教师的分层脚手架设计

层级	量规来源	闸门设置	提示词控制	教师角色
新手	GEM 草拟，教师逐条确认	全闸门保留，附范例提示	模板化，仅填写关键约束	判定者
熟手	教师提供文献，GEM 映射	全闸门保留	半开放，可增修约束	设计者
专家	教师自订量规	可选择性略过确认闸门	完全自订	主导者

注：无论层级为何，评价标准的最终认定权均归属教师；分层调整的是脚手架强度，而非认识论责任的归属。