

绿色低碳背景下内蒙古土木类大学生工程伦理培养路径—系统动力学建模、情景设计与蒙特卡洛模拟

石静^{1,2}, 赵娜^{1,2,*}, 陈家霖^{1,2}

1. 内蒙古科技大学, 土木工程学院, 内蒙古 包头, 014010

2. 内蒙古自治区高校智能建造与运维工程研究中心, 内蒙古 包头, 014010

摘要: 绿色低碳转型使土木类人才培养由传统的安全、质量和职业规范教育, 进一步延伸至生态责任、资源约束、代际公平和公共利益判断。针对现有研究中培养要素分散、反馈关系刻画不足以及模型缺少可检验性的不足, 构建“工程—人—自然—社会”四维指标体系和由课程教学、实践活动、环境熏陶、社会评价构成的系统动力学模型, 并设计七类培养情景。以固定随机种子进行蒙特卡洛模拟实验, 生成 480 个虚拟个体和 9 个观测时点, 共开展 500 次重复模拟, 检验学习转化系数与衰减系数的参数恢复、轨迹拟合误差和情景排序稳定性。结果表明, 各参数平均估计的最大绝对相对偏差为 4.60%, 绝对相对误差中位数的跨参数中位值为 6.10%; 轨迹均方根误差中位数为 0.0031, 95%分位数为 0.0044。终期 Q 排序与效率排序的 Spearman 相关系数中位数均为 1.00, 2.5%分位数分别为 0.964 和 0.943。模拟条件下, 校企协同情景在 87.6%的重复中取得最高终期综合水平, 实践强化情景在 99.0%的重复中具有最高单位投入累计产出。模拟结果显示, 培养效果最大化与投入效率最大化对应不同的资源配置方案, 提出“课程奠基—实践深化—校企协同—环境巩固—反馈校准”的条件性培养路径, 为内蒙古土木类大学生工程伦理培养提供科学参考。

关键词: 绿色低碳; 工程伦理; 土木类大学生; 系统动力学; 情景设计; 蒙特卡洛模拟

Engineering Ethics Training Pathways for Civil Engineering Students in Inner Mongolia under the Green and Low-Carbon Transition: System Dynamics Modeling, Scenario Design, and Monte Carlo Simulation

Jing Shi^{1,2}, Na Zhao^{1,2,*}, Jialin Chen^{1,2}

1. School of Civil Engineering, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010, Inner Mongolia, China

2. Engineering Research Center for Intelligent Construction and Operation and Maintenance of Universities in Inner Mongolia Autonomous Region, Baotou 014010, Inner Mongolia, China

Abstract: The green and low-carbon transition extends civil engineering talent cultivation from the traditional focus on safety, quality, and professional norms to the incorporation of ecological responsibility, resource constraints, intergenerational equity, and public interest judgment. To address the deficiencies in existing research—fragmented cultivation elements, insufficient characterization of feedback relationships, and the lack of model testability—a four-dimensional “engineering–human–nature–society” indicator system and a system dynamics model composed of course teaching, practical activities, environmental influence, and social evaluation are constructed, together with seven cultivation scenarios. Monte Carlo simulation experiments

with a fixed random seed are conducted, generating 480 virtual individuals, each observed at nine time points, across 500 repeated simulation runs, to examine the parameter recovery of the learning transfer and decay coefficients, trajectory fitting errors, and the stability of scenario rankings. The results show that the maximum absolute relative deviation of the averaged parameter estimates across parameters is 4.60%, and the cross-parameter median of the median absolute relative error is 6.10%; the median trajectory root mean square error is 0.0031, with the 95th percentile at 0.0044. The median Spearman correlation coefficients for both the final Q ranking and the efficiency ranking are 1.00, with 2.5th percentiles of 0.964 and 0.943, respectively. Under the simulated conditions, the university–enterprise collaboration scenario achieves the highest final comprehensive level in 87.6% of the replications, while the practice-enhancement scenario attains the highest cumulative output per unit input in 99.0% of the replications. The simulation results indicate that maximizing cultivation effectiveness and maximizing input efficiency correspond to distinct resource allocation schemes. A conditional cultivation pathway of “curriculum foundation–practice deepening–university–enterprise collaboration–environmental reinforcement–feedback calibration” is thus proposed, providing a scientific reference for the engineering ethics cultivation of civil engineering undergraduates in Inner Mongolia.

Keywords: green and low-carbon transition; engineering ethics; civil engineering students; system dynamics; scenario design; Monte Carlo simulation

在碳达峰、碳中和目标和生态文明建设持续推进的背景下,土木工程活动的价值判断已不再局限于工程安全、质量和职业规范,还涉及全生命周期碳排放、生态系统影响、资源代际配置以及公共利益协调。工程伦理教育因此需要帮助学生理解技术决策的社会—生态后果,并在不确定性和多主体利益冲突中形成可论证的责任判断^{[1-3][2]}。对于承担北方生态安全屏障功能、同时具有能源与基础设施转型需求的内蒙古而言,将绿色低碳理念嵌入土木类人才培养具有更加具体的地域情境。

已有研究主要从课程建设、案例教学、实验平台、可持续发展工程教育和本土化工程伦理等方面提出改进思路^[4-11]。这些研究为培养目标和教学载体提供了重要基础,但仍存在三方面不足:一是多把课程、实践、教师、校园文化和行业参与视为相互独立的措施,较少讨论它们之间的反馈与时滞;二是评价多集中于某一时点的认知或态度差异,难以解释伦理素养在四年培养周期中的累积和衰减;三是“综合施策更有效”的判断往往缺少资源约束下的情景比较,难以回答何时投入、优先投入何种环节以及如何形成阶段性组合。

系统动力学(System Dynamics, SD)以存量、流量、反馈回路和时间延迟描述复杂系统行为,适合分析教育干预的累积效应及政策组合^[17,18]。据此提出面向内蒙古高校土木类大学生工程伦理培养的SD模型,旨在解决以下四个问题:第一,四维工程伦理培养目标如何与课程教学、实践活动、环境熏陶和社会评价子系统衔接;第二,不同培养措施通过何种反馈机制影响学生伦理素养;第三,如何在资源约束下比较不同培养情景;第四,在给定纵向数据结构和参数扰动时,模型参数能否被稳定恢复、情景排序能否保持稳健。利用系统动力学建模和蒙特卡洛模拟为内蒙古土木类大学生工程伦理培养路径设计提供科学参考。

1 问题界定与四维分析框架

1.1 工程伦理培养与现实约束

土木类大学生工程伦理培养至少面临四类相互关联的约束。其一,培养目标容易停留在知识传授层面,伦理认知、伦理判断和伦理行动之间缺乏递进设计^[12-15];其二,绿色低碳内容常以零散案例进入课堂,尚未稳定转化为课程目标、教学活动和评价标准;其三,课程设计、实习实训和毕业

设计中的技术任务与伦理反思相互分离，学生缺少在真实利益冲突中进行论证和选择的机会^[5,16]；其四，学校评价主要关注课程成绩，企业、行业和社会对工程师责任的要求难以持续反馈到培养方案。上述约束不是四个孤立问题，而是由制度、资源、参与和学习反馈共同形成的动态结构。

1.2 “工程—人—自然—社会”四维指标体系

将工程伦理素养划分为工程、人、自然和社会四个维度。工程维度回答“工程是否安全、可靠并符合技术规范”；人维度回答“工程师是否诚信、负责并具备伦理判断能力”；自然维度回答“工程决策是否尊重生态边界并降低资源与碳排放负担”；社会维度回答“工程是否维护公共利益、遵守法治要求并回应地域共同体需要”。四个维度既是学生培养结果的评价域，也是模型状态变量的概念来源。候选指标及其模型作用见表 1。

表 1 四维工程伦理培养指标及模型作用			
Table 1 Four-dimensional indicators of engineering ethics training and their roles in the model			
一级指标	二级指标	核心评价问题	在模型中的作用
工程	安全责任、质量意识、技术创新与可持续性、绿色建造与低碳技术	学生能否在技术决策中考虑安全、质量、规范与低碳约束	形成工程规范伦理状态变量
	职业道德、专业诚信、团队协作与社会责任、绿色责任意识	学生能否识别责任主体、说明价值冲突并形成行动	形成人本责任伦理状态变量
自然	生态保护、资源节约、低碳环保与绿色发展	学生能否评价工程全生命周期的生态、资源与碳排放影响	形成自然生态伦理状态变量
	法治意识、公共服务、文化自信与家国情怀、生态文明认同	学生能否权衡公众安全、公共利益、地域文化和代际公平	形成社会公共伦理状态变量

2 系统动力学模型构建

2.1 建模目的与系统边界

模型的目的是不是预测某一学生的个体行为，而是分析高校培养措施在群体层面的长期累积效应和政策组合。时间边界设为四年本科培养周期，建议以学期为基本时间单位；空间边界为内蒙古地区开设土木工程、工程管理、工程造价等相关专业的高校。模型内部包含学校可直接或间接调节的课程、实践、环境和协同变量；宏观政策、行业需求和地域工程实践作为外生情境或反馈变量进入模型。学生家庭背景、个体人格和偶发事件等因素在基础模型中不展开，但应在实证估计中作为异质性来源或控制变量处理。

2.2 子系统划分与反馈机制

课程教学子系统通过课程覆盖、绿色低碳内容融入、案例质量和教师能力影响伦理知识与判断框架；实践活动子系统通过情境模拟、项目实践、企业参与和反思评价把知识转化为行动意愿；环境熏陶子系统通过校园绿色文化、同伴示范和制度规范强化或削弱学生的价值认同；社会评价子系统则把政策要求、行业反馈和公众期待传递给高校，并影响资源投入和培养方案调整。四个子系统共同作用于四类学生工程伦理素养，学生表现和外部评价又反向影响学校投入，形成反馈结构（图 1）。

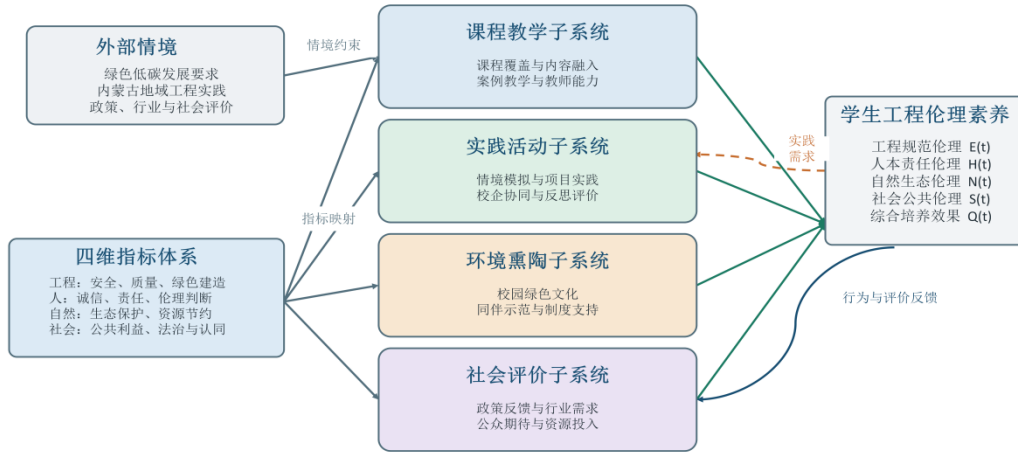


图1 绿色低碳背景下土木类大学生工程伦理培养的SD概念框架

Fig. 1 SD conceptual framework for engineering ethics training of civil engineering students under the green and low-carbon transition

模型包含两类关键反馈。第一类是强化反馈：课程质量提升促进学生参与和学习反馈，较高质量的反馈进一步推动课程改进；绿色低碳内容融入提升生态伦理认同，认同又提高学生参与绿色工程实践的意愿。第二类是平衡反馈：实践教学比重过高可能挤压理论学习时间，资源投入增加也可能面临教师工作量和组织成本约束。因此，课程和实践并非越多越好，路径优化应寻找投入结构与时序的合理区间。原稿中“师资提升—教学效果—社会重视—资源投入—师资提升”应界定为强化回路，而不是负向回路。

2.3 变量与基本方程

设工程规范伦理、人本责任伦理、自然生态伦理和社会公共伦理四个状态变量分别为 $E(t)$ 、 $H(t)$ 、 $N(t)$ 和 $S(t)$ ，均标准化到 $[0,1]$ 区间。每个状态变量由培养增量和认知衰减共同决定。以维度 k 为例，其基本形式为：

$$\frac{dX_k(t)}{dt} = \alpha_k \cdot I_k(t) \cdot [1 - X_k(t)] - \lambda_k \cdot X_k(t), \quad k \in \{E, H, N, S\} \quad (1)$$

其中， $X_k(t)$ 为第 k 类伦理素养存量， $I_k(t)$ 为课程、实践、环境和社会评价共同形成的有效培养投入， α_k 为学习转化系数， λ_k 为遗忘或衰减系数。 $[1 - X_k(t)]$ 表示接近上限时的边际递减。有效培养投入可写为各子系统输入的加权函数：

$$I_k(t) = \beta_k C \cdot C(t) + \beta_k P \cdot P(t - \tau P) + \beta_k V \cdot V(t) + \beta_k R \cdot R(t - \tau R) + \beta_k T \cdot T(t) \quad (2)$$

式中， C 、 P 、 V 、 R 和 T 分别表示课程教学、实践活动、环境熏陶、社会评价和教师能力， τP 与 τR 表示实践经验积累和社会反馈的时间延迟， β 为不同投入对各维度的作用系数。综合培养效果指数定义为：

$$Q(t) = w_E \cdot E(t) + w_H \cdot H(t) + w_N \cdot N(t) + w_S \cdot S(t), \quad \text{且} \sum_k w_k = 1 \quad (3)$$

权重 w_k 可由 AHP 或验证性因子分析获得。需要强调的是，上述方程给出了可运行模型的结构形式，但 α 、 λ 、 β 、 τ 和初值必须在数据支持下确定。未校准前不得据此报告具体百分比提升，也不得把情景排序写成经验结论。主要变量见表 2。

表 2 SD 模型主要变量及测量建议

Table 2 Main variables of the SD model and recommended measurements

变量类别	变量示例	测量或数据来源	单位范围
状态变量	$E、H、N、S$	四维量表、情境判断测验、课程作品评分量规	标准化指数[0,1]
课程输入	课程覆盖 C 、绿色低碳融入度、案例质量	培养方案、课程大纲编码、学生评教、专家评分	比例或标准化指数
实践输入	实践参与 P 、企业项目参与、反思评价质量	实践记录、项目报告、企业导师评价	比例或标准化指数
环境输入	校园绿色文化 V 、同伴示范、制度支持	学生调查、校园活动记录、制度文本编码	标准化指数
反馈输入	社会评价 R 、行业需求、资源投入	毕业生跟踪、用人单位调查、政策文本与经费数据	指数或实际量
模型参数	$\alpha、\lambda、\beta、\tau$	纵向数据估计、文献范围、专家判断与模型校准	依具体方程确定

2.4 参数估计与模型检验方案

参数估计应遵循“数据优先、专家补充、校准修正”的顺序。首先，通过课程文件、学生问卷、实践记录和毕业生跟踪数据获得可直接观测变量；其次，对不能直接观测的作用系数和时间延迟，采用德尔菲法或专家区间判断形成先验范围；再次，以近三届或近三年学生工程伦理素养数据拟合模型，使模拟轨迹与历史变化尽可能一致。若仅有横截面数据，应明确模型只用于结构探索，不能作时间预测。

模型检验至少包括五项内容：一是量纲一致性检验，确保方程两端单位一致；二是边界充分性检验，检查关键反馈是否遗漏；三是极端条件检验，考察课程投入为零、实践投入达到上限等条件下模型行为是否合理；四是历史拟合检验，可采用均方根误差（RMSE）和 Theil 不等系数评价模拟值与观测值的偏差；五是灵敏度分析，对关键参数进行±10%、±20%和±30%的局部扰动，并在数据允许时采用 Sobol 方法检验参数交互和全局稳健性。只有通过上述检验后，情景结果才可进入经验性比较。

3 培养路径情景设置与可检验命题

3.1 情景设置

为避免在缺少数据时任意指定高低参数，采用“基准水平—单项强化—组合强化—动态强化”的情景结构。完成数据采集后，可把基准水平设为样本中位数，将“强化”设为可行政策范围内的上四分位水平，并通过敏感性区间呈现结果，而不使用单一任意值。七类情景见表 3。

表 3 培养路径的七类情景设计

Table 3 Seven scenarios for engineering ethics training pathways

编号	情景名称	主要调整变量	政策含义	需要比较的核心问题
B0	基准情景	各变量保持现状或历史趋势	作为所有政策实验的参照	若不增加干预，四维素养如何演化
S1	课程强化	C 、绿色低碳融入度、教师能力	增加必修内容并跨课程嵌入伦理模块	课程投入能否快速提升认知及其持续性
S2	实践强化	P 、案例质量、反思评价	增加情境模拟、项目实践和伦理复盘	实践时滞后是否形成更持续的行为改变

表 3 培养路径的七类情景设计 (续)

Table 3 Seven scenarios for engineering ethics training pathways(continued)

编号	情景名称	主要调整变量	政策含义	需要比较的核心问题
S3	绿色低碳融入	生态案例、全生命周期评价、校园文化 V	突出地域生态工程和低碳建造议题	自然生态伦理是否得到定向提升
S4	企业参与	企业项目、导师评价、行业反馈 R	把真实工程冲突和行业责任引入培养过程	外部评价能否缩短知识与实践的距离
S5	校企协同	C 、 P 、 R 和教师能力协同提升	课程、实践和企业反馈形成闭环	组合效应是否超过单项投入之和
S6	渐进强化	干预强度随学年分阶段提高	先认知奠基, 再实践深化, 最后综合应用	动态投入是否兼顾效果、成本与可实施性

3.2 模型行为的假设

假设 1: 课程强化对工程伦理认知具有较短的作用时滞, 但在缺少实践与反馈支持时可能出现边际递减。该命题来自课程输入直接作用于知识与判断框架, 而素养接近上限时增长空间收窄。后续应比较 S1 与 B0 在前四个学期的状态增量及后续维持程度。

假设 2: 实践强化的初期效应可能慢于课程强化, 但对行为意愿和跨情境伦理判断的持续作用更强。该命题依赖实践经验积累的时间延迟, 应通过不同 τP 设定和纵向测量检验, 而不能仅依据期末单点成绩判断。

假设 3: 课程、实践和企业反馈之间可能存在互补关系, 校企协同情景的效应不应预先设定为必然最优。只有当交互系数显著为正, 且在成本约束和参数扰动下仍保持优势, 才能认为组合措施产生协同效应。

假设 4: 教师能力和制度支持可能通过多个子系统发挥放大作用, 但其形成周期较长。模型应同时考虑培训投入、教师工作量和组织成本, 检验短期强化与持续建设之间的权衡。

3.3 情景比较指标

情景比较不只看四年末的单一得分, 需分析五类指标。一是终期水平 $Q(T)$, 反映培养周期结束时的综合状态; 二是累计效应 $AUC = \int Q(t)dt$, 反映整个培养周期的受益程度; 三是达标时间, 记录 $Q(t)$ 达到预设培养标准所需的学期数; 四是边际产出, 即单位新增投入带来的 Q 增量; 五是稳健性, 考察参数变化、样本异质性和外部情境变化下情景排序是否稳定。若获得成本数据, 还应进行成本—效果比较, 避免把资源投入最多的情景机械地判定为最优。

4 蒙特卡洛模拟与数值实验结果

4.1 情景模拟目的与实验设计

由于目前没有可核验的问卷、访谈、课程记录或纵向跟踪数据, 本节采用合成纵向数据开展蒙特卡洛数值实验。模拟回答的是: 在既定数据生成机制、误差水平和缺失模式下, SD 模型能否恢复生成参数、保持轨迹拟合精度, 并在参数和实施强度扰动后维持情景排序。它不回答某所高校的培养措施是否已经产生真实效果。

每次蒙特卡洛重复生成 480 个虚拟个体, 基准情景 B0 和渐进强化情景 S6 各 240 个; 每个个体从入学基线至第 8 学期形成 9 个观测时点的 E 、 H 、 N 和 S 记录。四维初始均值分别设为 0.42、0.44、0.38 和 0.40, 维度间相关系数为 0.45, 个体初始标准差为 0.075; 学习转化系数 α 的生成值为 0.20~0.24, 衰减系数 λ 为 0.050~0.060。测量误差标准差设为 0.035, 过程扰动标准差设为 0.008, 缺失率由基线的 0 逐步增加至第 8 学期的 12%。随机种子固定为 20260723, 共完成 500 次独立重复。

课程 C 、实践 P 、环境 V 、社会反馈 R 和教师能力 T 的基准输入依次设为 0.45、0.35、0.42、0.30 和 0.43。S6 按学期逐步增加五类投入，S1~S5 按表 3 实施单项或组合强化。为检验结果对设定变化的敏感性，每次重复均扰动作用结构、四维综合权重和情景实际执行强度。所有设定均为透明的模拟假设，不来源于学校现场调查。

4.2 参数估计、扰动方案与评价指标

参数估计使用 B0 与 S6 的组别—时间均值，并把差分方程写为 $\Delta X_k = \alpha_k I_k (1 - X_k) - \lambda_k X_k$ 。对每个维度分别采用有界最小二乘估计 α_k 和 λ_k ；虚拟学生是模拟中的独立单位，重复测量先汇总为组别—时间均值后进入参数恢复。评价指标包括平均估计、相对偏差、绝对相对误差中位数、95%分位绝对误差和轨迹均方根误差（RMSE）。情景稳健性以终期 Q 、累计增量 ΔAUC 、单位新增投入产出和情景排名为指标，并比较估计排序与生成排序的 Spearman 相关系数。所有区间均为 500 次重复的经验模拟分位区间，不进行假设显著性检验。

4.3 模型有效性：参数恢复、轨迹误差与排序稳定性

500 次重复中，八个核心参数平均估计的绝对相对偏差均不超过 4.60%。学习转化系数 α 的绝对相对误差中位数为 3.70%~5.29%，衰减系数 λ 为 6.91%~9.34%，其 95%分位绝对误差最高达到 26.08%，表明衰减参数比学习转化参数更难稳定识别。轨迹 RMSE 中位数为 0.0031，95%分位数为 0.0044。终期 Q 排序和效率排序的 Spearman 相关系数中位数均为 1.00，2.5%分位数分别为 0.964 和 0.943。图 2 表明，在 9 个观测时点、输入可观测且模型设定正确的条件下，参数误差没有系统性改变主要情景排序；但这仍是内部数值有效性，而不是外部经验有效性。

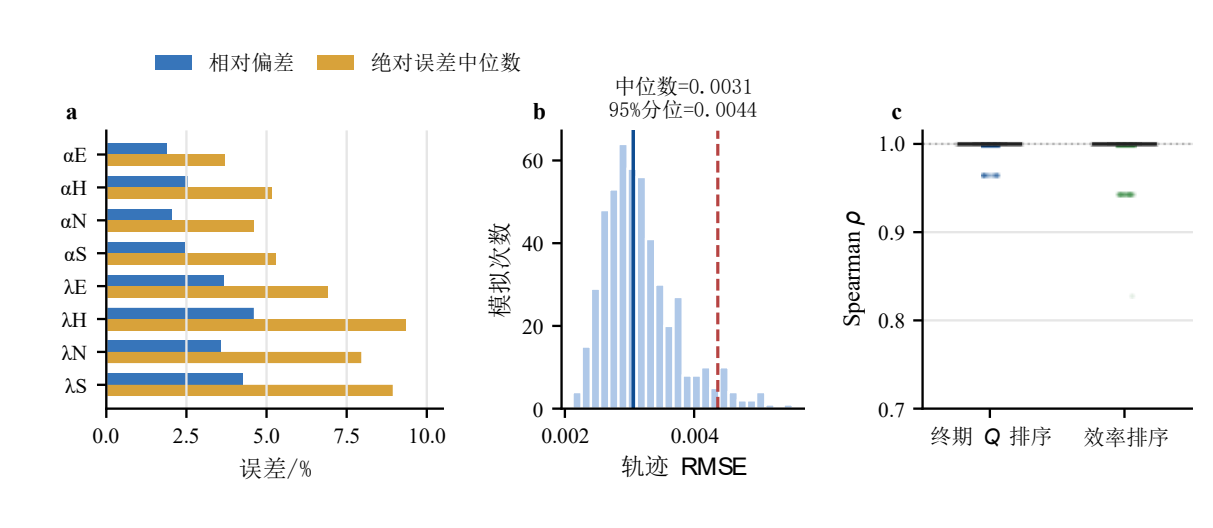


图 2 蒙特卡洛模拟的参数恢复与稳定性检验

Fig. 2 Parameter recovery and stability tests in the Monte Carlo simulation

注：a 为 8 个核心参数的平均相对偏差和绝对相对误差中位数；b 为 500 次重复的轨迹 RMSE 分布；c 为终期 Q 排序和效率排序与生成排序之间的 Spearman 相关系数分布。箱体表示四分位区间，中线表示中位数，点表示一次独立蒙特卡洛重复。

表 4 蒙特卡洛模拟中核心参数的恢复结果（500 次重复）

Table 4 Recovery of core parameters in the Monte Carlo simulation (500 replications)

参数	生成值	平均估计	相对偏差/%	绝对相对误差中位数/%
αE	0.240	0.245	1.88	3.70
αH	0.220	0.226	2.55	5.18

表 4 蒙特卡洛模拟中核心参数的恢复结果（500 次重复）（续）

Table 4 Recovery of core parameters in the Monte Carlo simulation (500 replications) (continued)				
参数	生成值	平均估计	相对偏差/%	绝对相对误差中位数/%
αN	0.200	0.204	2.04	4.62
αS	0.210	0.215	2.46	5.29
λE	0.055	0.057	3.67	6.91
λH	0.050	0.052	4.60	9.34
λN	0.060	0.062	3.56	7.95
λS	0.055	0.057	4.26	8.94

4.4 情景模拟结果与路径识别

在同时扰动作用结构、四维权重和情景实际执行强度后，S5 校企协同情景的终期 Q 均值最高（0.6040），其 2.5%~97.5%模拟分位区间为 0.5932~0.6147；S6 渐进强化次之（0.5975）。在 500 次重复中，S5 和 S6 分别有 87.6%和 12.4%的概率取得最高终期 Q 。按单位新增投入的 ΔAUC 衡量，S2 实践强化的平均效率最高（0.0811），并在 99.0%的重复中排名第一；S1 和 S4 仅分别在 0.8%和 0.2%的重复中居首。图 3 和表 5 共同表明，效果最大化与效率最大化并不对应同一情景。

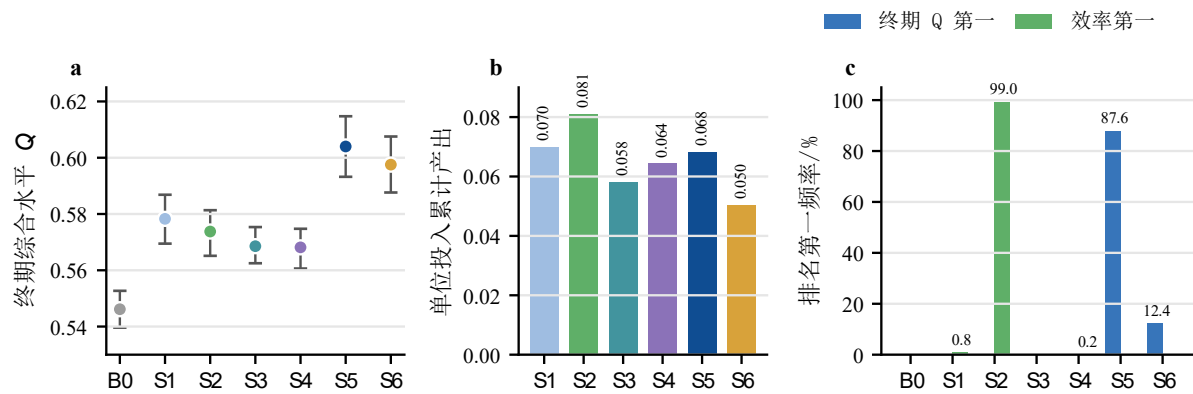


图 3 七类培养情景的蒙特卡洛模拟结果

Fig. 3 Monte Carlo simulation results for the seven training scenarios

注：a 为终期 Q 均值及 2.5%~97.5%模拟分位区间；b 为单位新增投入的累计增量 ΔAUC ；c 为各情景在 500 次重复中排名第一的频率。图示区间为模拟分位区间，不是真实学生样本的置信区间。

表 5 七类培养情景的蒙特卡洛模拟结果（500 次重复）

Table 5 Monte Carlo simulation results for the seven training scenarios (500 replications)				
情景	终期 Q 均值	2.5%~97.5%模拟区间	ΔAUC 均值	单位投入累计产出
B0 基准	0.5462	0.5396~0.5527	0.0000	—
S1 课程强化	0.5783	0.5695~0.5868	0.1679	0.0699
S2 实践强化	0.5738	0.5651~0.5813	0.1434	0.0811
S3 绿色低碳融入	0.5686	0.5625~0.5754	0.1159	0.0582
S4 企业参与	0.5681	0.5606~0.5747	0.1134	0.0644
S5 校企协同	0.6040	0.5932~0.6147	0.3057	0.0683
S6 渐进强化	0.5975	0.5876~0.6075	0.1733	0.0504

数值结果给出三层路径含义：第一，若目标是在资源较充足时提高四年末综合伦理素养，应以

S5 校企协同为重点,通过课程、实践、行业反馈和教师支持的组合投入形成互补;第二,若预算约束较强,应优先强化 S2 实践环节,以较低的新增投入获得较高累计收益;第三,S6 渐进强化虽然不是效率最优方案,但能够把组织压力分散到不同学年,并维持较高终期水平。因此,更可实施的条件性路径是“课程奠基—实践深化—校企协同—环境巩固—反馈校准”,而不是把某一单项情景视为对所有高校都有效的固定处方。

5 面向教学实践的路径实施方案

基于模型结构,形成一个待验证的渐进式实施方案。第一学年以工程伦理基本概念、公众安全和绿色低碳导论为主,在《土木工程概论》等课程中建立共同认知框架;第二学年通过材料、结构、施工和项目管理课程嵌入伦理模块,使用内蒙古地域案例训练问题识别;第三学年增加情境模拟、角色扮演、企业导师参与和真实项目案例,强化多主体利益权衡;第四学年在实习、课程设计和毕业设计中设置伦理影响说明、全生命周期评价和反思报告,使伦理判断进入综合工程决策。该方案对应 S6 情景,其有效性仍需通过准实验或纵向跟踪验证。

教学案例应突出内蒙古工程实践中的特点,优先选择荒漠化治理、黄河流域生态保护、草原与高寒地区基础设施、牧区饮水安全、矿区生态修复、装配式建筑、绿色建材和新能源基地建设等主题。每个案例应明确工程决策、利益相关方、生态与碳排放约束、可选方案及其伦理后果,并与四维指标和评价量规对应。

现场教学评价宜采用班级层面的准实验或阶梯式实施设计。案例验证时,选择培养基础相近的自然班设置干预组和常规教学组,在干预前一周(T0)、学期末(T1)和T1后约12周(T2)进行匿名编码追踪。独立分析单位为学生,班级和个体分别作为聚类与重复测量来源;主要结局预先限定为工程规范伦理、人本责任伦理、自然生态伦理和社会公共伦理四个维度。分析应采用混合效应模型检验组别 $\times$ 时间交互,报告效应量及95%置信区间,并对次要结局使用 Benjamini-Hochberg 方法控制多重比较。量表缺失、注意检查、异常短时长和重复记录的处理规则应在数据分析前确定。只有真实前后测轨迹与 SD 预测在方向和幅度上均可接受时,才能据此校准参数并评价具体培养路径。

6 讨论

6.1 参数恢复结果与模型可识别性

参数恢复结果显示,学习转化系数 α 的误差整体小于衰减系数 λ 。其可能原因在于, α 直接对应课程、实践和反馈投入带来的增量信号,而 λ 通过既有状态水平发挥作用,更容易与测量误差、个体差异和有限观察窗口混淆。这意味着后续现场研究不能只依赖学期初和学期末两个测量点,还应增加逐学期过程记录、低强度阶段或干预撤除后的追踪,以提高衰减和时滞参数的可识别性。

轨迹 RMSE 较低且情景排序相关系数中位数达到 1.00,说明在当前生成机制下,参数估计误差通常不会改变主要政策比较。但终期 Q 排序和效率排序的 2.5%分位数分别降至 0.964 和 0.943,表明效率排序对输入成本、作用权重和实施强度的扰动更敏感。同时,低 RMSE 部分源于数据生成模型与估计模型结构一致,因而只能支持模型的内部一致性,不能证明其已经准确描述真实学生的成长轨迹。

6.2 培养效果与投入效率的目标权衡

情景实验最重要的发现不是某一方案“绝对最优”,而是培养目标改变会导致最优资源配置发生转换。S5 的终期 Q 比 B0 高 0.0578,并以 87.6%的排名第一频率体现组合投入的优势;但 S2 的单位

投入累计产出为 0.0811, 高于 S5 的 0.0683, 并在 99.0%的重复中保持效率第一。这说明校企协同更适合追求长期综合水平, 实践强化更适合预算约束下的边际投入决策。若仅依据终期 Q 配置资源, 可能忽略组织成本; 若只依据效率, 又可能低估课程、环境和行业反馈的协同价值。

对于内蒙古高校, 可将结果转化为分层实施策略: 课程基础薄弱的专业先完成伦理概念与绿色低碳案例奠基, 在新增资源有限时优先扩充项目实践和情境决策训练; 具备企业导师、实习基地和行业反馈条件后, 再升级为校企协同组合。S6 渐进强化可作为组织实施框架, 把课程、案例、项目和综合评价分散到四个学年。这种路径是由数值实验提出的待检验决策规则, 而不是对内蒙古科技大学现实培养成效的确认。

6.3 数值实验边界与现场验证要求

模拟结果仍受四类边界约束: 初值、误差、缺失和参数范围由研究者设定; 候选指标与四维权重尚未经过真实学生量表和情境判断测验确认; 模拟未包含班级聚类、教师差异、专业选择偏差和校企资源异质性; 四年在校模型也不能直接推断毕业后的工程伦理行为。因此, 后续应取得伦理审查批准或豁免确认, 形成经内容效度和因子分析检验的测量工具, 收集至少 T0、T1、T2 三个时点并尽可能包含逐学期过程数据的纵向样本, 采用班级层面的准实验或阶梯式设计估计组别 $\times$ 时间效应, 报告效应量、95%置信区间和缺失处理规则, 再以真实数据校准模型并开展跨学校外部验证。

7 结论

围绕绿色低碳背景下内蒙古高校土木类大学生工程伦理培养, 构建了由四维培养目标、四个培养子系统、四类伦理素养状态变量和多重反馈关系组成的 SD 模型, 提出七类情景及相应比较指标, 并通过 500 次蒙特卡洛重复检验参数恢复、轨迹误差和情景排序稳定性。数值实验表明, 模型在既定生成机制下具有较好的内部可识别性; 校企协同在终期综合水平方面更有优势, 实践强化在单位投入累计产出方面更有优势, 渐进强化则具有分散组织压力和保持较高终期水平的价值。据此, 提出“课程奠基—实践深化—校企协同—环境巩固—反馈校准”的条件性培养路径, 并根据高校资源基础在效果目标与效率目标之间进行分层选择。

参考文献

- [1] 陈刚. 工程伦理学与可持续发展[J]. 自然辩证法研究, 2007, (10): 33-35.
- [2] 石昕羽. 基于《水利工程伦理学》探究水利工程建设中的生态伦理[J]. 人民黄河, 2024, 46(3): 167.
- [3] 张俊杰. 习近平科技伦理思想及其当代价值[J]. 中共福建省委党校学报, 2016, (8): 27-31.
- [4] 孙亮, 徐震, 佟德志. 高等工程教育中课程思政的“八个维度”[J]. 天津师范大学学报(社会科学版), 2023, (3): 64-71.
- [5] 张恒力, 南铭琪. 工程伦理教育综合实验平台设计探析[J]. 自然辩证法研究, 2024, 40(3): 138-144.
- [6] 薛顺利, 徐渝, 何正文. 如何促进节能节材的绿色再制造工程[J]. 中国科技论坛, 2007, (8): 100-103+113.
- [7] 张炜, 王良. 全球可持续发展工程教育的概念内涵、实践策略及其经验启示[J]. 高等工程教育研究, 2021, (3): 69-75.
- [8] Blockley D I, Dias P. Managing conflict through ethics[J]. Civil Engineering and Environmental Systems, 2010, 27(3): 255-262.
- [9] 吕辉雄, 陈少华. 《低碳生活与绿色文明》教学方法探索与实践[J]. 西南师范大学学报(自然科学版), 2017, 42(8): 144-146.
- [10] 王进, 彭好琪. 工程伦理教育的中国本土化诉求[J]. 现代大学教育, 2018, (4): 85-93+113.
- [11] Rodriguez-Nikl T, Schaff K P. Practical ethical frameworks for civil engineering and environmental systems[J]. Civil Engineering and Environmental Systems, 2023, 40(3): 176-194.
- [12] 刘玉. 大学工程伦理教育若干问题探讨[J]. 江苏高教, 2024(3): 91-97.
- [13] 马廷奇, 秦甜帆. 工程伦理教育的逻辑起点、现实困境与实践路径[J]. 高教发展与评估, 2022, 38(5): 93-104+124.
- [14] 林健, 衣芳青. 面向未来的工程伦理教育[J]. 高等工程教育研究, 2021, (5): 1-11.

- [15] 丛杭青, 周恩泽. 新时代中国工程师的德性培养[J]. 浙江工业大学学报(社会科学版), 2022, 21(3): 249-255.
- [16] 潘鹏程, 李一丹, 王薇. 土木工程从业人员工程伦理行为意愿影响因素研究[J]. 工程经济, 2022, 32(7): 31-42.
- [17] Forrester J W. Industrial Dynamics[M]. Cambridge, MA: MIT Press, 1961.
- [18] Sterman J D. Business Dynamics: Systems Thinking and Modeling for a Complex World[M]. Boston: Irwin/McGraw-Hill, 2000.

基金项目: 内蒙古自治区教育科学“十四五”规划课题“绿色低碳发展背景下的内蒙古土木类大学生工程伦理培养路径研究”(NGJGH2024546), 内蒙古科技大学 2025 年度教育改革研究项目“专业认证导向与 OBE 理念深度融合的工程管理人才培养体系构建与实践”(JY2025067)。

第 1 作者简介: 石静(2002-), 女, 硕士在读, 研究方向: 碳中和与可持续发展。E-mail: 2025023119@imust.edu.cn。

***通讯作者简介:** 赵娜(1983-), 女, 硕士研究生, 副教授, 研究方向: 建筑节能与环境可持续发展。E-mail: zhaonapopo2010@imust.edu.cn。