黑土地保护型农业基础设施转型的数字孪生仿真平台构建与多目标优化

朱仁军

长春工业大学人文信息学院 吉林 长春 130000

【摘　要】：黑土地保护型农业基础设施转型同时牵涉土壤保育、灌排调度、保护性耕作、田间道路和设施维护等目标。本文识别黑土层厚度、土壤水分、有机质含量、侵蚀沟发育和机具作业扰动等关键数据，分析转型条件、平台适配评价和目标响应关系，提出实体设施对象化、数据采集时序化、孪生模型可更新和决策输出可反馈的构建思路。平台运行应把水土保持、灌排效率、机具配置和维护优先级放入同一推演场景中比较，使基础设施改造从单项建设转向连续感知、模型映射和协同决策。

【关键词】：黑土地保护；农业基础设施；数字孪生；仿真平台；多目标优化

DOI:10.12417/2811-0536.26.10.030

引言

东北黑土区承担粮食稳产和耕地质量提升任务，农田基础设施更新已不能只停留在沟渠整修、道路硬化或单点监测层面。灌排系统、田间道路、防护林带、保护性耕作机具和监测网络之间存在明显联动：水分调度改变土壤压实和侵蚀风险，机具通行影响秸秆覆盖连续性，维护滞后会放大局部地块的流失与排涝压力。数字孪生平台把实体设施、传感数据、遥感识别和作业记录转成可更新的虚拟对象，使不同改造方案在实施前能够比较水土保持、作业效率、投入强度和维护负荷。

1 黑土地保护型农业基础设施转型条件统计分析

1.1 耕地保护目标与设施短板占比

黑土地保护的工程对象并非单一耕地地块，而是由排水沟、蓄排工程、田间道路、侵蚀沟治理设施、防护林带和保护性耕作装备组成的连续系统。国家黑土地保护工程把农田基础设施建设、土壤侵蚀治理、耕地质量监测评价和肥沃耕作层培育作为并列任务，说明基础设施转型首先要把黑土层厚度、耕作层稳定性和水土流失风险纳入同一口径[1]。现实短板集中在排水末端水位反馈不足、田间道路与保护性机具衔接不足、侵蚀沟治理设施缺少季节性巡检记录等位置。若仍按单项工程验收判断效果，平台难以识别沟渠修复对下游湿涝、机具压实和秸秆覆盖连续性的连带影响。

1.2 孪生对象时序与数据类型识别

数字孪生平台要把黑土地基础设施拆解为可定位、可计量、可更新的对象。空间对象包括沟渠断面、道路宽度、田块边界、防护林带位置和侵蚀沟治理节点；时序对象包括土壤水分日变化、降雨径流过程、作业轨迹、机具载荷和维护工单。遥感影像适合识别地表覆盖、侵蚀沟扩展和作物长势，地面传感补足水分、有机质和黑土层厚度读数，机具终端反映耕作扰动、路线和深度。不同数据的时间粒度差异明显，平台构建时应区分分钟级设备状态、日尺度水分变化、季节性作业记录和年度耕地质量评价。

2 数字孪生平台构建适配评价

2.1 黑土地设施孪生模型构架

平台构架可分为物理设施层、数据采集层、孪生模型层和决策输出层。物理设施层承载灌排沟渠、田间道路、防护林带、保护性耕作机具和土壤监测点；数据采集层接入土壤水分、有机质含量、黑土层厚度、侵蚀沟发育、机具作业和气象信息；孪生模型层把设施几何、土壤水分、耕作扰动和作业调度转成可联算对象[2]。决策输出层再比较水土保持目标、灌排调度、机具配置、维护优先级和目标权衡，使实体设施变化沿数据链进入模型，并把模型输出反馈到田间维护和改造排序中。

2.2 数据权重分配与量化映射方法

多目标调节应把水土保持、排涝安全、作业效率和维护成本分别转成可比较的量化对象，但权重不能脱离黑土地保护的主目标。黑土地保护工程把旱地肥沃耕作层目标控制在 30cm 以上、水田肥沃耕作层控

基金项目：本文系吉林省教育厅科学研究项目“吉林省黑土地保护技术赋能农业基础设施现代化转型的路径研究”（JJKH20261955KJ）的阶段性成果。

制在 20—25cm；平台把设施单元目标厚度设置为 25cm 或 30cm，并把数据更新分为 1h、2h、4h、6h、24h 和 72h 六档。渠道与侵蚀沟治理节点安排更短更新间隔，以捕捉降雨后水位、冲刷和堵塞变化；防护林带和田间道路更新周期相对较长，但仍要与作业窗口和维护优先级同步。三类响应曲线用于检查保护约束增强后的目标权衡。平台参数映射口径见表 1。

表 1 黑土地保护型基础设施孪生参数映射口径

设施单元	黑土层目标厚度(cm)	监测周期(d)	孪生更新间隔(h)	水土保持权重(无量纲)	作业扰动权重(无量纲)
灌排渠道	25	3	6	0.28	0.12
田间道路	25	15	24	0.12	0.24
侵蚀沟治理节点	30	2	4	0.34	0.10
防护林带	30	30	72	0.22	0.08
保护性耕作机具	25	1	2	0.16	0.30
土壤监测点位	30	1	1	0.26	0.16

表 1 中，侵蚀沟治理节点和灌排渠道的水土保持权重较高，保护性耕作机具和田间道路的作业扰动权重较高；监测周期与孪生更新间隔共同决定平台对降雨、排涝和机具进地变化的响应速度。

表 1 完成设施单元、目标厚度、监测周期和目标权重的静态映射后，还要判断保护约束变化对平台输出的方向性影响。黑土地保护工程中，水土保持响应、作业效率和维护负荷并不总是同步改善，约束强度提高可能带来更好的侵蚀控制，也可能压缩机具作业窗口并增加巡检维护压力。同一参数组还要进入响应曲线，观察三类目标在中等约束区间的相互牵制关系。目标权衡响应曲线见图 1。

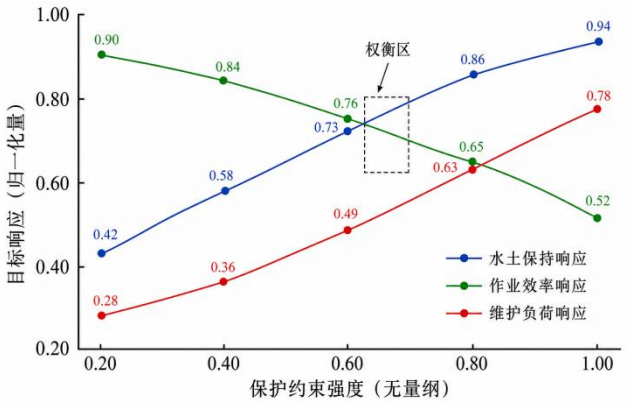


图 1 保护约束强度下平台多目标响应关系

图 1 中，保护约束强度由 0.20 升至 1 时，水土保持响应由 0.42 升至 0.94，维护负荷响应由 0.28 升至 0.78，作业效率响应由 0.90 降至 0.52；中部权衡区说明平台不能只追求单一保护目标，还要同时控制作业效率损失和维护负荷上升。

3 孪生平台多目标优化成效评价

3.1 强化感知投入与设备配置成效

感知设备配置的成效体现在模型输入误差下降和维护响应前移。土壤水分传感器应布设在易涝低洼、坡耕地汇流和典型黑土层监测点，遥感影像用于补充大范围覆盖变化，机具终端记录作业深度、速度和压实风险[3]。当平台能够把这些信息同时映射到沟渠、道路和田块对象，改造排序便不再只看单个设施损坏程度，而会优先处理对水土保持目标和作业扰动影响更大的节点。低频人工巡查适合防护林带完整性、道路边坡和设施破损复核，高频传感承担水分、水位和机具运行状态更新。

3.2 规范推演流程与参数管理效果

推演流程应从实体对象建模、数据清洗、参数映射、情景比较到决策反馈连续运行。实体对象建模阶段统一沟渠断面、道路宽度、田块边界和监测点编码；数据清洗阶段剔除传感器离线、作业轨迹漂移和遥感云遮挡引起的异常值；参数映射阶段把土壤水分、黑土层厚度、侵蚀沟风险和作业扰动写入对应设施对象[4]。情景比较不替代现场试验，其作用是比较改造顺序、灌排调度和机具配置的相对影响。参数管理越规范，平台输出越容易被农田建设、农机作业和耕地质量监测共同使用。

3.3 重点调节耕作保护协同目标响应

排涝安全、土壤保育、机具通行和维护成本经常在同一地块内形成约束冲突。平台先锁定黑土层稳定和侵蚀风险底线，再比较道路改造、沟渠疏浚、机具路径调整和维护时点效果。同一地块若水分长期偏高，单纯加深沟渠可能提高排水能力，却可能改变坡面汇流和侵蚀沟发育；同步调整机具路径和秸秆覆盖后，水土保持目标与作业效率更容易兼顾。平台输出应转化为维护节点、作业窗口、机具路线和监测重点，使数字孪生推演转向辅助决策。

4 结语

黑土地保护型农业基础设施转型要把工程设施、耕地质量、农机作业和维护管理放在同一数字孪生平台中处理。平台构建应以实体设施对象化、采集数据时序化、孪生模型可更新和决策输出可反馈为主线，

避免把系统简化为监测看板。多目标调节先守住黑土层稳定、侵蚀控制和排涝安全底线，再比较机具配置、灌排调度和维护优先级。持续积累土壤、气象、设施和作业记录后，平台可为黑土地保护工程提供更细的改造排序、风险识别和协同作业依据。

参考文献：

[1] 高佳,杨宇,刘正佳.农业新质生产力赋能黑土地保护利用:基本逻辑、价值意蕴与路径选择[J].东北大学学报(社会科学版),2026,28(2):13-21.

[2] 赵锋.农业机械深松整地技术在黑土地保护领域的应用研究[J].农民致富之友,2026,(7):81-83.

[3]刘国斌,李思圻.农业信息化对东北黑土地保护影响机理及效应分析[J].情报科学, 2026,44(3):122-130+174.

[4] 张倩,张英慧.生态农业与黑土地保护:北大荒的经验与挑战[J].黑龙江社会科学,2026,(2):64-72.