

基于三维地形路网的农田生物质运输路线损耗评价方法

王欢¹ 肖淦¹ 叶思菁² 欧聪³ 马瑞明⁴ 孙玲莉¹

(1. 天津财经大学统计学院, 天津 300222; 2. 北京师范大学地理学部, 北京 100875;
3. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101; 4. 生态环境部卫星环境应用中心, 北京 100094)

摘要: 针对二维路径距离难以反映农田生物质收储运输中地形起伏和道路绕行影响的问题, 提出基于三维地形路网的路线等效损耗评价方法。以河北省阜平县为研究区, 基于农田分布和道路网络筛选农田邻近运输起点, 通过道路中心线加密采样和 DEM 高程赋值构建三维地形路网。提取累计爬升、累计下降、坡度扰动强度和路网曲折度等损耗因子, 建立路线等效损耗距离模型, 并采用二维低估率和路线损耗增幅评价二维路径估算偏差。18 条典型路线分析结果表明, 二维低估率为 6.90% ~ 22.92%, 平均值为 11.22%; 路线损耗增幅为 7.42% ~ 29.73%, 平均值为 12.87%。三维几何长度增幅较小, 等效损耗增加主要受累计爬升、下坡控制、坡度扰动和路网曲折影响。研究结果可为农田生物质运输路线优化和能耗评估提供参考。

关键词: 农田生物质; 三维地形路网; 路线损耗; 等效损耗距离; DEM

中图分类号: S126; S216 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2026)20-0074-08

OSID:



Route-loss Evaluation Method for Farmland Biomass Transportation
Based on Three-dimensional Terrain Road Network

Wang Huan¹ Xiao Gan¹ Ye Sijing² Ou Cong³ Ma Ruiming⁴ Sun Lingli¹

(1. School of Statistics, Tianjin University of Finance and Economics, Tianjin 300222, China

2. Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

3. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

4. Satellite Environment Application Center, Ministry of Ecology and Environment, Beijing 100094, China)

Abstract: Aiming to account for the effects of terrain undulation and road detours that cannot be adequately reflected by two-dimensional route distance in farmland biomass transportation, a route equivalent loss evaluation method was proposed based on a three-dimensional terrain road network. Taking Fuping County, Hebei Province, as the study area, farmland-adjacent transportation origins were identified by using farmland distribution and road network data, and a three-dimensional terrain road network was constructed through road centerline densification and DEM elevation assignment. Cumulative elevation gain, cumulative descent, slope disturbance intensity, and road network tortuosity were extracted as loss factors to establish an equivalent loss distance model. Two-dimensional route estimation bias was evaluated by using the two-dimensional underestimation rate and route loss increase rate. Results for 18 typical routes showed that the underestimation rate ranged from 6.90% to 22.92%, averaging 11.22%, while the route loss increase rate ranged from 7.42% to 29.73%, averaging 12.87%. The increase in three-dimensional geometric length was small, and the equivalent loss increase was mainly affected by cumulative elevation gain, downhill control, slope disturbance, and road network tortuosity. The method can provide a reference for route optimization and energy consumption assessment in farmland biomass transportation.

Key words: farmland biomass; three-dimensional terrain road network; route loss; equivalent loss distance; DEM

0 引言

秸秆等农田生物质是农业废弃物资源化利用的重要对象,其收储运输成本直接影响后续利用效率。在农业绿色低碳发展和秸秆综合利用要求不断高的背景下,提高农田生物质收储运输效率具有现实意义^[1-2]。由于农田生物质具有季节性强、分布分散、单位质量价值低和经济运输半径有限等特点,从农田到收储节点的转运过程易产生较高运输成本、能源消耗与温室气体排放,相关供应链模型也表明原料空间分散会显著影响运输组织效率^[3-5]。在丘陵山区和山前过渡区域,农田斑块较破碎,道路网络受山体、沟谷、坡面和居民点布局影响明显,运输路线常表现出绕行距离长、坡度变化频繁和累计爬升较大的特征。若仅采用二维道路距离或平面最短路径表示运输代价,难以反映地形起伏和道路绕行对路线损耗的影响。

在已有相关研究中,农田生物质资源评价、秸秆收储运输模式、供应成本、收储设施选址及作业装备等方面已有较多成果。秸秆收集作业装备研究为田间离散生物质收集提供了机械化支撑^[6]。在农机路径规划方面,相关研究主要集中在农业机械导航路径规划^[7-8]、农机全覆盖路径规划^[9-11]等方面。农机跨区域调度研究可为收储运输组织提供调度思路,农机通行影响研究提示道路和地面条件会改变作业代价,交通沿线耕地整治选址研究则为农田空间组织与节点配置提供了借鉴。

上述研究为农田生物质运输评价和农机转运路径组织提供了参考,但仍难以充分反映复杂地形条件下路线损耗。现有收储运输研究多以二维道路距离或运输成本作为主要约束,对道路沿线高程变化、累计爬升和坡度波动产生的附加损耗考虑不足。路径规划和车辆能耗研究虽然关注道路坡度、路径长度和行驶工况等因素,但多面向一般车辆路径优化或农机田间作业场景,较少同时结合农田空间来源、真实道路网络和地形起伏条件。对于丘陵山区农田生物质运输,运输路线不仅受道路长度影响,还受坡度变化、下坡控制和路网绕行等因素影响。因此,有必要建立一种面向农田生物质收储运输场景的路线损耗计算方法,用于比较二维路径估算与三维地形路网条件下运输损耗之间的差异。

基于此,本文提出一种基于三维地形路网的农田生物质运输路线损耗评价方法。以河北省阜平县为研究区,利用农田分布数据、真实道路网络和 DEM (Digital elevation model) 数据构建农田邻近运输路线样本,提取路线长度、累计爬升、坡度扰动和

路网曲折度等损耗因子,建立路线等效损耗距离模型,分析二维路径距离对运输损耗的低估程度。期为农田生物质收储运输路线选择、农机转运组织和运输能耗评估提供参考。

1 研究区与数据

以河北省保定市阜平县为研究区。阜平县位于太行山东麓,地形起伏较大,道路网络受沟谷、坡面和居民点布局影响明显。研究区农田多分布于河谷、缓坡和村庄周边,斑块较分散,运输路线存在道路绕行、坡度变化和累计爬升等现象。该区域可用于开展三维地形路网条件下农田生物质运输路线损耗评价。研究区路网及农田分布如图 1 所示。

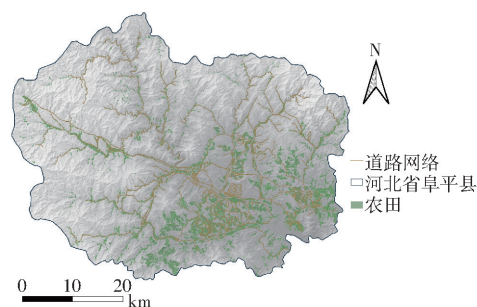


图 1 研究区道路网络和农田分布

Fig. 1 Distribution of road network and farmland in study area

采用 DEM、道路网络、农田分布和行政边界数据。DEM 数据来源于地理空间数据云,空间分辨率为 30 m,用于提取道路沿线高程及坡度变化信息;道路网络数据来源于地理空间数据云,用于构建运输路线并计算路线长度和路网曲折度;农田分布数据采用 CropLayer-2020 全国 2 m 农田分布数据产品^[12-14],用于识别农田邻近区域并筛选运输起点。已有 30 m 年度耕地数据集、30 m 土地覆盖数据产品及耕地数据精度评价研究^[15]为多源耕地数据使用与不确定性认识提供了参考;行政边界数据来源于国家基础地理信息数据,用于界定研究区范围及图件表达。

为保证多源数据的一致性,将 DEM、道路网络、农田分布和行政边界数据统一至同一投影坐标系并裁剪至研究区范围。在此基础上,通过道路网络拓扑修正与连通性优化构建有效路网。结合农田分布数据建立农田—路网邻近约束时,参考耕地利用变化、耕地资源新认知体系和耕地资源利用“五化”态势等研究对耕地空间演变与利用约束的认识^[16-18]、耕地“非农化”样本分类和“非粮化”治理研究对耕地用途管制的处理思路^[19-21],并结合耕地细碎化评价研究对田块破碎性和空间组织的认识^[22],将候选

运输起点吸附至可通行道路节点,形成农田邻近运输路线样本。进一步基于道路中心线加密采样与DEM 高程赋值,构建包含三维几何及坡度信息的道路数据结构,为路线损耗因子提取与等效损耗距离计算提供基础。

2 研究方法

2.1 技术路线

面向农田生物质收储运输场景,构建基于三维地形路网的路线损耗评价指标。包括路线基础指

标、地形起伏指标、路网形态指标和评价结果指标。其中,路线基础指标包括二维路径长度和三维路径长度,用于反映路线几何长度差异;地形起伏指标包括累计爬升、累计下降和坡度扰动强度,用于反映道路沿线高程变化及坡度波动对运输损耗的影响;路网形态指标采用路网曲折度表示,用于反映实际道路相对于起终点直线连接的绕行程度;评价结果指标包括二维低估率和路线损耗增幅,用于评价二维路径距离对运输损耗的低估程度。路线损耗评价指标见表 1。

表 1 路线损耗评价指标
Tab.1 Evaluation indexes of route loss

类型	评价指标	含义	作用
路线基础	二维路径长度 L_i	平面道路网络中路线长度	作为二维基准距离
	三维路径长度 L'_i	考虑高程变化后路线长度	表征几何长度修正
地形起伏	累计爬升 H_i^+	路线沿程正向高程增量累计值	表征上坡附加损耗
	累计下降 H_i^-	路线沿程负向高程增量累计值	表征下坡控制损耗
	坡度扰动强度 σ_i	路线坡度沿程变化程度	表征坡度波动影响
路网形态	路网曲折度 τ_i	实际路线长度与起终点直线距离比值	表征道路绕行程度
评价结果	二维低估率 ε_i	二维路径距离相对三维修正损耗的低估程度	评价二维估算偏差
	路线损耗增幅 ρ_i	三维修正损耗相相对二维基准距离增加幅度	评价路线附加损耗

在此基础上,首先筛选农田邻近运输起点,构建典型运输路线样本;然后结合 DEM 和道路网络构建三维地形路网,提取路线损耗因子;进一步建立路线等效损耗距离模型,并采用二维低估率和路线损耗增幅评价路线损耗差异。技术路线如图 2 所示。

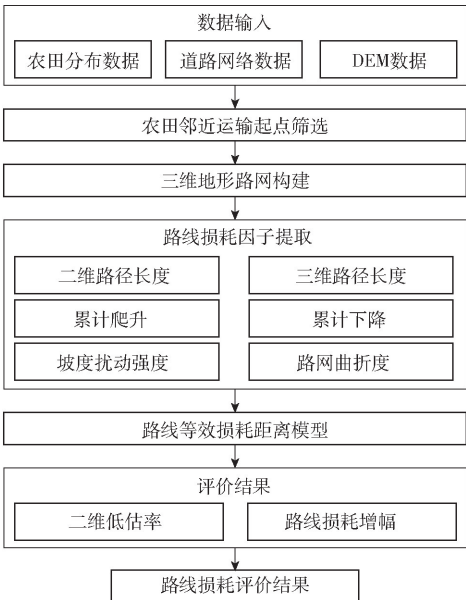


图 2 农田生物质运输路线损耗评价技术路线

Fig.2 Technical route of route loss evaluation for farmland biomass transportation

2.2 农田邻近运输起点筛选

为使路线样本来源于实际农田周边区域,基于农田候选像元与道路网络构建农田-路网邻近约束。

候选点由农田候选像元映射获得,并在道路网络中搜索最近可通行道路节点。实际处理中,候选搜索容差(农田邻近阈值) δ_f 取 1 200 m;当农田候选点至最近道路节点距离不超过 1 200 m 时,将其吸附至该道路节点,作为有效候选运输起点;超过 1 200 m 的候选点予以剔除。最终入选运输起点均为道路网络节点,因此道路接入距离为 0 m。设 P_i 为第 i 个农田候选点, R 为可通行道路节点集合,候选点保留判别式为

$$C_i = \begin{cases} 1 & (D(P_i, F) \leq \delta_f, D(P_i, R) \leq \delta_r) \\ 0 & (\text{其他}) \end{cases} \quad (1)$$

式中 C_i ——候选点保留判别变量
 $D(P_i, F)$ ——候选点至最近农田图斑距离
 $D(P_i, R)$ ——候选点至最近道路距离
 δ_r ——道路接入阈值

根据上述候选搜索容差和道路节点吸附规则,共获得 308 个农田邻近候选路网节点。为避免样本集中于局部区域,按照地貌单元和空间分布进行分层筛选:在深山区、浅山丘陵区 and 山前过渡区分别选取 6 个代表性起点,并兼顾候选节点周边农田分布、道路连通性和沿线高程起伏差异,最终形成 18 个典型运输起点。为保证不同起点路线损耗具有可比性,选取位于研究区主要可通行路网汇聚位置、且与 18 个起点均保持连通的拟定收储节点 T01 作为统一目标节点。不进行收储设施选址优化,T01 仅用

于构建相同终点条件下路线对比样本,不代表最优收储设施选址结果。

2.3 三维地形路网构建

三维地形路网是在二维道路网络基础上叠加高程、坡度和三维长度等属性形成的道路网络。在道路拓扑检查和连通性处理基础上,按 50 m 间隔对道路中心线进行加密采样,并将 DEM 高程赋值至道路采样点。根据相邻采样点平面距离和高程差,计算采样段三维长度和坡度,形成带有道路连接关系的三维地形路网,并为基于图搜索的最短路径计算提供基础^[23]。

高程赋值过程,DEM 与道路网络统一至同一投影坐标系后进行采样匹配,采样点高程采用双线性插值获取。对 DEM NoData 值、高程突变点和异常坡度采样段进行检查;对于明显偏离相邻采样点连续变化趋势的异常值,采用邻近有效高程点线性插值修正。为降低 30 m DEM 局部噪声对短采样段坡度和累计爬升计算的影响,在不改变路线总体高程趋势的前提下,对局部异常波动进行必要的移动平均平滑处理。

路线搜索方面,以处理后的可通行道路节点和道路边构建道路图 $G(V, E)$,道路边仅保留拓扑连通且能够接入路网的通行路段。Dijkstra 算法采用非负、可加的边段等效损耗权重进行搜索,边段权重由边段三维长度、正向高程变化、下坡控制和局部坡度扰动项构成;路网曲折度属于路线级评价指标,在最短路径确定后再计算并纳入路线等效损耗评价。以起点至 T01 累计边段权重最小作为最短路径判定依据,并剔除拓扑断裂、不可连通或无法接入道路网络的候选点。

设第 i 条路线包含 n_i 个采样点,相邻采样点二维平面距离为 d_{ij} ,高程差为 Δh_{ij} 。二维路径长度和三维路径长度计算式分别为

$$L_i = \frac{\sum_{j=1}^{n_i-1} d_{ij}}{1\ 000} \quad (2)$$

$$L'_i = \frac{\sum_{j=1}^{n_i-1} \sqrt{d_{ij}^2 + \Delta h_{ij}^2}}{1\ 000} \quad (3)$$

经上述处理,二维道路网络被扩展为包含平面距离、高程、坡度和路网连接关系的三维地形路网。

2.4 路线损耗因子提取

基于三维地形路网,提取反映路线长度、地形起伏和道路绕行特征的损耗因子。将累计爬升、累计下降、坡度扰动强度和路网曲折度作为等效损耗距离模型的主要输入因子,将二维路径长度、三维路径

长度、净高差和平均坡度作为辅助解释指标。

累计爬升和累计下降计算式分别为

$$H_i^+ = \sum_{j=1}^{n_i-1} \max(0, \Delta h_{ij}) \quad (4)$$

$$H_i^- = \sum_{j=1}^{n_i-1} \max(0, -\Delta h_{ij}) \quad (5)$$

坡度扰动强度计算式为

$$\sigma_i = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^{n_i-1} (s_{ij} - \bar{s}_i)^2 d_{ij}}{\sum_{j=1}^{n_i-1} d_{ij}}} \quad (6)$$

式中 s_{ij} ——采样段坡度,按高程差与平面距离之比计算

$\bar{s}_i$ ——长度加权平均坡度

采用长度加权方式可降低短采样段和 DEM 局部波动对坡度指标的影响。

路网曲折度计算式为

$$\tau_i = \frac{L_i}{L_i^s} \quad (7)$$

式中 L_i^s ——路线起终点二维直线距离,km

τ_i 越大,表示道路绕行程度越高。

2.5 路线等效损耗距离模型

为比较二维路径距离与三维地形路网条件下路线损耗之间的差异,建立路线等效损耗距离模型。既有秸秆供应成本研究和收储运模式比较研究结果表明,运输距离、收储环节与能耗是影响秸秆利用经济性的关键因素^[24-25];连续供应模型和收储设施选址研究也提示路线组织与节点布局会改变供应稳定性和运输成本^[26-27]。在此基础上,该模型将三维路径长度、累计爬升、下坡控制、坡度扰动和路网曲折等因素折算为等效运输距离,用于不同路线间的相对损耗比较,不直接估算车辆实际燃油消耗。

设第 i 条路线的二维基准等效损耗距离为 E_i ,其值等于二维路径长度对应的米制距离,即 $E_i = \sum d_{ij} = 1\ 000 L_i$,则三维地形修正等效损耗距离计算式为

$$E'_i = \sum_{j=1}^{n_i-1} \sqrt{d_{ij}^2 + \Delta h_{ij}^2} + \alpha_h H_i^+ + \alpha_d H_i^- + \beta_s \sigma_i \sum_{j=1}^{n_i-1} d_{ij} + \beta_c \left(\sum_{j=1}^{n_i-1} d_{ij} - D_i^s \right) \quad (8)$$

式中 E'_i ——三维地形修正等效损耗距离,m

D_i^s ——路线起终点二维直线距离,m

α_h 、 α_d 、 β_s 、 β_c ——爬升、下坡控制、坡度扰动和路网曲折修正系数

二维低估率和路线损耗增幅计算式分别为

$$\varepsilon_i = \frac{E'_i - E_i}{E'_i} \times 100\%$$

(9)

$$\rho_i = \frac{E'_i - E_i}{E_i} \times 100\%$$

(10)

参数取值方面,参考道路坡度反演和坡度-油耗影响研究对爬坡与道路坡度损耗的认识^[28-29],并结合车辆功率型油耗模型及生态驾驶/路径油耗模型综述中对速度、载荷和工况因素的处理思路^[30-31],采用相关文献默认参数作为修正系数取值依据,并结合本文路线尺度统一为等效距离折算系数。该模型用于不同路线之间的相对损耗比较,不直接估算车辆实际燃油消耗。模型修正系数取值及含义如表 2 所示。

表 2 模型修正系数取值及含义

Tab.2 Values and interpretations of model correction coefficients

修正系数	数值	来源	含义
α_h	74.32	参考文献[28-31]并经等效距离折算确定	单位累计爬升折算为等效距离的爬升修正系数
α_d	14.86	参考文献[28-31]并经等效距离折算确定	单位累计下降折算为等效距离的下坡控制修正系数
β_s	16.00	参考文献[28-31]并经等效距离折算确定	坡度扰动强度对等效距离的修正系数
β_c	0.05	参考文献[28-31]并经等效距离折算确定	路网曲折绕行项对等效距离的修正系数

参数转换时,累计爬升项通过 $\alpha_h H_i^+$ 折算为上坡附加等效距离,下坡项通过 $\alpha_d H_i^-$ 表征下坡制动、低速控制和不可完全回收的附加损耗,坡度扰动项通过 $\beta_s \sigma_i \sum_{j=1}^{n_i-1} d_{ij}$ 表征坡度频繁波动对运输稳定性的影响,路网曲折项通过 $\beta_c \left(\sum_{j=1}^{n_i-1} d_{ij} - D_i^s \right)$ 表征实际道路相对于起终点直线连接的绕行损耗。上述参数均服务于路线间相对损耗评价,后续可结合实测载荷、车速、路面条件和燃油消耗数据进一步校准。

2.6 路线损耗分级与典型路径验证

依据路线损耗增幅 ρ_i ,将 18 条典型路线按分位数划分为相对低损耗、中损耗和高损耗 3 类。该分级仅用于研究区样本内部比较,不作为普适性损耗等级阈值。在各损耗等级中选取代表性路线,比较二维路径长度、三维路径长度、累计爬升、坡度扰动强度、二维低估率和路线损耗增幅等指标,分析不同路线损耗差异及其来源,并检验所建方法对路线损

耗差异的区分能力。

3 结果与分析

3.1 路径样本筛选结果

基于候选搜索容差和道路节点吸附规则,在研究区内共获得 308 个农田邻近候选路网节点。其中,候选搜索容差取 1 200 m,超过该距离的农田候选点予以剔除;最终入选起点均已吸附至道路网络节点,道路接入距离为 0 m。综合考虑候选节点的地貌分区、空间分布、周边农田斑块分布、道路连通性和沿线高程起伏差异,按深山区、浅山丘陵区 and 山前过渡区分层筛选形成 18 个典型运输起点,并以拟定收储节点 T01 作为统一目标节点,构建 18 条农田生物质运输路线。T01 位于研究区主要可通行路网汇聚位置,与 18 个起点均保持连通,用于确保不同起点路线损耗计算具有相同终点条件;本文不涉及收储设施选址优化,T01 不代表最优收储节点。

18 条典型路线分布于研究区西部山地、中部浅山丘陵和东南部山前过渡区域,覆盖了农田斑块分散、道路绕行明显和高程起伏差异较大的典型运输情形。经路网最短路径搜索,各起点均可获得至 T01 的有效运输路线,可用于后续损耗因子提取和等效损耗距离计算。路线样本及拟定收储节点空间分布见图 3。

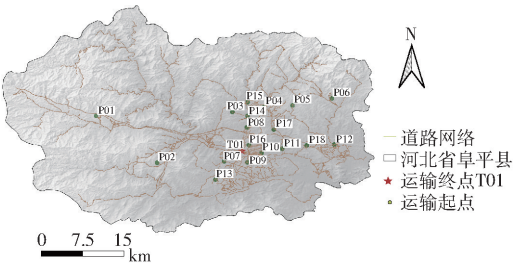


图 3 农田邻近运输起点与拟定收储节点分布

Fig.3 Distribution of farmland-adjacent transportation starting points and proposed collection node

3.2 三维地形路网损耗因子特征

基于道路中心线加密采样和 DEM 高程赋值,提取 18 条典型路线的二维路径长度、三维路径长度、累计爬升、坡度扰动强度和路网曲折度等损耗因子。根据路线起点位置和沿线地形起伏特征,将 18 条路线划分为深山区、浅山丘陵区 and 山前过渡区。该划分仅用于本文样本比较,不作为严格地貌区划。

表 3 为不同地形区域路线损耗因子。深山区路线平均二维路径长度为 49.72 km,路网曲折度为 3.23,均高于其他区域,说明该区域道路绕行现象较明显。浅山丘陵区路线平均二维路径长度为 23.78 km,路网曲折度为 3.04,低于深山区但仍存

在一定绕行。山前过渡区路线平均二维路径长度为 17.83 km,路线较短,但平均累计爬升达到 52.17 m,说明短距离路线中仍可能存在较明显的高程变化。

表 3 不同地貌单元路线损耗因子

Tab. 3 Route loss factors in different geomorphic units				
地貌单元	路线数	L_i/km	H_i^+/m	τ_i
深山区	6	49.72	53.50	3.23
浅山丘陵区	6	23.78	27.33	3.04
山前过渡区	6	17.83	52.17	2.78

从二维路径长度和三维路径长度对比看,各地形区域三维路径长度增幅均较小。这是因为道路平面距离远大于相邻采样点高程差,单纯由几何长度引起的增量有限。但累计爬升、坡度扰动和路网曲折度在不同区域之间差异较明显,说明农田生物质运输路线损耗不能仅用二维路径长度表示,还需结合地形起伏和道路绕行因素进行分析。上述结果表明,不同地形区域在累计爬升和路网曲折度等方面存在明显差异,这些因素将进一步影响路线等效损耗。

3.3 等效损耗距离评价结果

基于路线等效损耗距离模型,计算 18 条典型路线的二维低估率和路线损耗增幅。结果表明,18 条路线的二维低估率为 6.90% ~ 22.92%,平均值为 11.22%;路线损耗增幅为 7.42% ~ 29.73%,平均值为 12.87%。按样本分位数划分后,相对低损耗、中损耗和高损耗路线各 6 条。总体来看,仅采用二维路径距离会低估农田生物质运输路线实际损耗。

从空间分布看,不同损耗等级路线在研究区内呈现一定差异(图 4)。高损耗路线多分布于地形起伏较大、道路绕行明显区域,而相对低损耗路线多位于地形较为平缓区域,说明地形条件和路网结构对路线损耗具有显著影响。

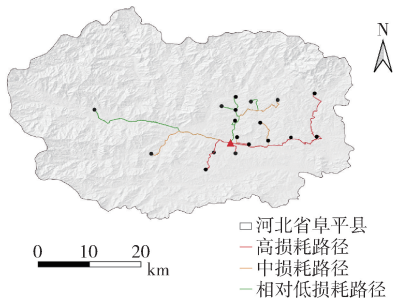


图 4 农田邻近起点至拟定收储节点路线损耗等级空间分布
Fig. 4 Spatial distribution of route loss grades from farmland-adjacent starting points to proposed collection node

从统计关系看,路线损耗增幅随累计爬升总体呈上升趋势,但不同路线间仍存在一定离散性(图 5)。表明,除累计爬升外,坡度扰动和路网曲折

等因素同样对路线损耗产生重要影响。部分二维路径长度较短的路线,存在明显坡度变化或道路绕行时,仍表现出较高损耗增幅,进一步说明二维路径长度难以单独表征运输过程实际损耗。

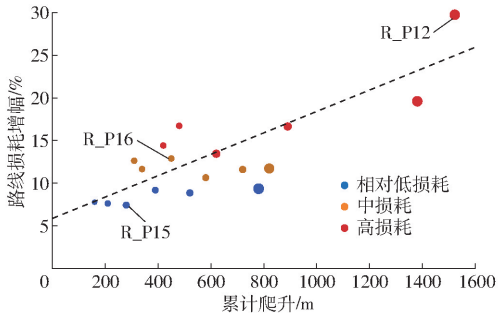


图 5 累计爬升与路线损耗增幅关系
Fig. 5 Relationship between cumulative elevation gain and route loss increase rate

3.4 典型路径对比分析

为进一步分析不同路线损耗差异的形成机制,选取相对低损耗路线 R_P15、中损耗路线 R_P16 和高损耗路线 R_P12 进行典型对比,其高程剖面见图 6。

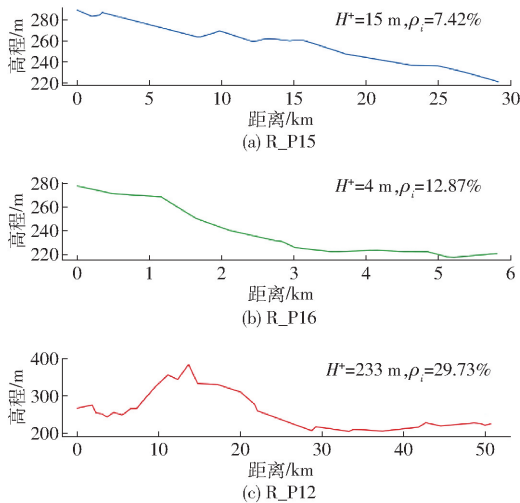


图 6 典型路线三维地形剖面
Fig. 6 Three-dimensional terrain profiles of typical routes

R_P15 为相对低损耗路线,二维路径长度为 28.88 km,累计爬升为 15 m,二维低估率为 6.90%,路线损耗增幅为 7.42%。该路线沿程高程变化平缓,累计爬升较小,地形修正后附加损耗较低。R_P16 为中损耗路线,二维路径长度为 5.73 km,累计爬升为 4 m,二维低估率为 11.41%,路线损耗增幅为 12.87%。该路线虽然距离较短,但局部坡度变化较为明显,导致其损耗增幅高于 R_P15。R_P12 为高损耗路线,二维路径长度为 50.70 km,累计爬升达到 233 m,二维低估率为 22.92%,路线损耗增幅为 29.73%。该路线存在明显的持续爬坡过程,累计爬升显著,是其附加损耗较高的主要原因。

典型路线对比结果表明,二维路径长度不能单独解释路线损耗差异。短距离路线在存在坡度扰动、下坡控制或路网绕行时,仍可能产生较高损耗;而长距离路线在累计爬升较大的情况下,损耗增幅更为显著。上述结果表明,路线等效损耗距离能够综合反映地形起伏和路网结构对运输损耗的影响。

典型路线对比结果还表明,路线损耗增幅 ρ_i 能够在一定程度上区分不同路线在三维地形路网条件下附加运输损耗。农田生物质运输路线损耗不宜仅以二维路径距离判断,还需综合考虑累计爬升、坡度扰动和路网曲折等因素。

4 结论

(1)提出了一种基于三维地形路网的农田生物质运输路线损耗评价方法,以农田分布数据约束运输起点,结合道路网络与DEM构建三维地形路网,提取累计爬升、累计下降、坡度扰动强度和路网曲折度等关键损耗因子,建立路线等效损耗距离模型,实现了二维路径距离与三维地形条件下等效运输损耗的统一度量与对比分析。

(2)以河北省阜平县为研究区开展应用分析,基于农田-路网邻近关系获得308个候选路网节点,并筛选形成18条典型运输路线。结果表明,18条路线二维低估率为6.90%~22.92%,平均值为11.22%;路线损耗增幅为7.42%~29.73%,平均值为12.87%。三维几何长度相对于二维路径长度增幅较小,而等效损耗的增加主要来源于累计爬升、下坡控制、坡度扰动及路网曲折等因素,表明仅采用二维路径距离难以准确反映实际运输损耗。

(3)典型路线对比结果表明,路线损耗增幅能够有效表征不同地形路网条件下附加运输损耗。高损耗路线R_P12累计爬升达到233 m,对应损耗增幅为29.73%;中损耗路线R_P16虽路径较短,但受局部坡度变化和路网形态影响,损耗增幅仍高于低损耗路线R_P15。说明短距离路线在复杂地形条件下同样可能产生较高附加损耗。本文方法可为农田生物质收储运输路线优化、农机调度组织及运输能耗评估提供参考。后续可结合车辆载荷、行驶速度、路面条件及实测能耗数据,对模型参数进行进一步校准与优化。

参 考 文 献

- [1] 丛宏斌,姚宗路,赵立欣,等. 中国农作物秸秆资源分布及其产业体系与利用路径[J]. 农业工程学报, 2019, 35(22): 132-140.
Cong Hongbin, Yao Zonglu, Zhao Lixin, et al. Distribution of crop straw resources and its industrial system and utilization path in China[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(22): 132-140. (in Chinese)
- [2] 杨传文,邢帆,朱建春,等. 中国秸秆资源的时空分布、利用现状与碳减排潜力[J]. 环境科学, 2023, 44(2): 1149-1162.
Yang Chuanwen, Xing Fan, Zhu Jianchun, et al. Temporal and spatial distribution, utilization status, and carbon emission reduction potential of straw resources in China[J]. Environmental Science, 2023, 44(2): 1149-1162. (in Chinese)
- [3] 刘城宇,贺正楚,卢小龙. 可持续发展目标下农作物秸秆收集运输的碳减排优化分析[J]. 农业工程学报, 2022, 38(10): 239-248.
Liu Chengyu, He Zhengchu, Lu Xiaolong. Optimization analysis of carbon emission reduction from crop straw collection and transportation under the sustainable development goals[J]. Transactions of the CSAE, 2022, 38(10): 239-248. (in Chinese)
- [4] Fang Y R, Shi W J, Xie G H. Implications of wheat straw logistic systems for bioenergy sustainable development in China: costs, energy consumption, and GHG emissions[J]. Science of the Total Environment, 2022, 837: 155633.
- [5] Wang S, Yin C B, Jiao J, et al. StrawFeed model: an integrated model of straw feedstock supply chain for bioenergy in China[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2022, 185: 106439.
- [6] 谢伟,李旭,方志超,等. 水稻秸秆收集与连续打捆复式作业机设计[J]. 农业工程学报, 2019, 35(11): 19-25.
Xie Wei, Li Xu, Fang Zhichao, et al. Design of compound machine for rice straw collecting and continuous baling[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(11): 19-25. (in Chinese)
- [7] 周俊,何永强. 农业机械导航路径规划研究进展[J]. 农业机械学报, 2021, 52(9): 1-14.
Zhou Jun, He Yongqiang. Research progress on navigation path planning of agricultural machinery[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(9): 1-14. (in Chinese)
- [8] 陈凯,解印山,李彦明,等. 多约束情形下的农机全覆盖路径规划方法[J]. 农业机械学报, 2022, 53(5): 17-26, 43.
Chen Kai, Xie Yinshan, Li Yanming, et al. Full coverage path planning method of agricultural machinery under multiple constraints[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(5): 17-26, 43. (in Chinese)
- [9] 杨昊天,王良民,刘路,等. 基于区块链的农机跨区域调度模型构建与应用[J]. 农业工程学报, 2022, 38(11): 31-40.
Yang Haotian, Wang Liangmin, Liu Lu, et al. Model construction and application of agricultural machinery cross-region scheduling based on blockchain[J]. Transactions of the CSAE, 2022, 38(11): 31-40. (in Chinese)
- [10] 丁肇,李耀明,唐忠. 轮式和履带式车辆行走对农田土壤的压实作用分析[J]. 农业工程学报, 2020, 36(5): 10-18.
Ding Zhao, Li Yaoming, Tang Zhong. Compaction effects of wheeled and tracked vehicles on farmland soil[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(5): 10-18. (in Chinese)
- [11] 余述琼,赵晶,孔祥斌,等. 基于占补一体化的交通沿线土地综合整治项目选址[J]. 农业工程学报, 2022, 38(12): 270-279.

- Yu Shuqiong, Zhao Jing, Kong Xiangbin, et al. Site selection of land consolidation along the transportation using integrated occupation and reclamation of cultivated land[J]. Transactions of the CSAE, 2022, 38(12): 270–279. (in Chinese)
- [12] Jiang H, Ku M, Zhou X, et al. CropLayer: a 2 m resolution cropland map of China for 2020 from Mapbox and Google satellite imagery[J]. Earth System Science Data, 2025, 17: 6703–6729.
- [13] Tu Y, Wu S, Chen B, et al. A 30 m annual cropland dataset of China from 1986 to 2021[J]. Earth System Science Data, 2024, 16: 2297–2316.
- [14] Yang J, Huang X. The 30 m annual land cover dataset and its dynamics in China from 1990 to 2019[J]. Earth System Science Data, 2021, 13: 3907–3925.
- [15] Zhang C, Dong J, Ge Q. Quantifying the accuracies of six 30 m cropland datasets over China: a comparison and evaluation analysis[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2022, 197: 106946.
- [16] 原晋涛, 陈万旭, 曾杰. 中国耕地利用变化时空分异特征及对耕地 NPP 的影响[J]. 自然资源学报, 2023, 38(12): 3135–3149.
- Yuan Jintao, Chen Wanxu, Zeng Jie. Spatio-temporal differentiation of cropland use change and its impact on cropland NPP in China[J]. Journal of Natural Resources, 2023, 38(12): 3135–3149. (in Chinese)
- [17] 叶思菁, 宋长青, 高培超, 等. 地理空间视角下耕地资源新认知体系构建[J]. 农业工程学报, 2023, 39(9): 225–240.
- Ye Sijing, Song Changqing, Gao Peichao, et al. Construction of the new cognitive system for arable land resources from geospatial perspective[J]. Transactions of the CSAE, 2023, 39(9): 225–240. (in Chinese)
- [18] 叶思菁, 宋长青, 程昌秀, 等. 中国耕地资源利用的“五化”态势与治理对策[J]. 中国科学院院刊, 2023, 38(12): 1962–1976.
- Ye Sijing, Song Changqing, Cheng Changxiu, et al. Five issues and countermeasures of China cropland resource use[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2023, 38(12): 1962–1976. (in Chinese)
- [19] 厉芳婷, 张过, 石婷婷, 等. 耕地“非农化”遥感解译样本分类体系及应用[J]. 农业工程学报, 2022, 38(15): 297–304.
- Li Fangting, Zhang Guo, Shi Tingting, et al. Classification system and application of remote sensing interpretation samples of cultivated land “non-agriculturalization”[J]. Transactions of the CSAE, 2022, 38(15): 297–304. (in Chinese)
- [20] 袁源, 王亚华, 徐萍. “非粮化”治理视角下的耕地用途管制: 应对逻辑与体系构建[J]. 自然资源学报, 2024, 39(4): 942–959.
- Yuan Yuan, Wang Yahua, Xu Ping. Cultivated land use control from the perspective of “non-grain” governance: response logic and framework construction[J]. Journal of Natural Resources, 2024, 39(4): 942–959. (in Chinese)
- [21] 尹君锋, 宋长青, 叶思菁, 等. 中国耕地“非粮化”的研究进展及其多尺度治理框架[J]. 地理学报, 2026, 81(3): 683–704.
- Yin Junfeng, Song Changqing, Ye Sijing, et al. Research progress and multi-scale governance framework of non-grain use of cultivated land in China[J]. Acta Geographica Sinica, 2026, 81(3): 683–704. (in Chinese)
- [22] 李希明, 黄秋昊, 吕剑成, 等. 基于功能分区与多聚类算法集成的耕地细碎化评价及整治[J]. 农业工程学报, 2022, 38(6): 274–282.
- Li Ximing, Huang Qiuhaohao, Lü Jiancheng, et al. Evaluation and consolidation of cultivated land fragmentation based on integration of function zoning and multi-cluster algorithms[J]. Transactions of the CSAE, 2022, 38(6): 274–282. (in Chinese)
- [23] Dijkstra E W. A note on two problems in connexion with graphs[J]. Numerische Mathematik, 1959, 1: 269–271.
- [24] 刘华财, 阴秀丽, 吴创之. 秸秆供应成本分析研究[J]. 农业机械学报, 2011, 42(1): 106–112.
- Liu Huacai, Yin Xiuli, Wu Chuangzhi. Study on straw supply cost[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(1): 106–112. (in Chinese)
- [25] 徐亚云, 田宜水, 赵立欣, 等. 不同农作物秸秆收储运模式成本和能耗比较[J]. 农业工程学报, 2014, 30(20): 259–267.
- Xu Yayun, Tian Yishui, Zhao Lixin, et al. Comparison of cost and energy consumption of different crop straw collecting-storing-transportation modes[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(20): 259–267. (in Chinese)
- [26] 霍丽丽, 吴娟娟, 赵立欣, 等. 华北平原地区玉米秸秆连续供应模型的建立及应用[J]. 农业工程学报, 2016, 32(19): 203–210.
- Huo Lili, Wu Juanjuan, Zhao Lixin, et al. Establishment and application of continuous supply model of corn straw in North China Plain[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(19): 203–210. (in Chinese)
- [27] 王雪, 常志州, 王效华, 等. 泗洪县车门乡稻麦秸秆收储设施选址[J]. 农业工程学报, 2015, 31(22): 250–255.
- Wang Xue, Chang Zhizhou, Wang Xiaohua, et al. Crop straw collecting and storage facility location for Chemen Township of Sihong County[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(22): 250–255. (in Chinese)
- [28] Fan P F, Song G H, Zhu Z J, et al. Road grade estimation based on large-scale fuel consumption data of connected vehicles[J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2022, 106: 103262.
- [29] Boriboonsomsin K, Barth M. Impacts of road grade on fuel consumption and carbon dioxide emissions evidenced by use of advanced navigation systems[J]. Transportation Research Record, 2009, 2139: 21–30.
- [30] Rakha H A, Ahn K, Moran K, et al. Virginia tech comprehensive power-based fuel consumption model: model development and testing[J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2011, 16(7): 492–503.
- [31] Zhou M, Jin H, Wang W. A review of vehicle fuel consumption models to evaluate eco-driving and eco-routing[J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2016, 49: 203–218.