

基于无人机超高分辨率高精度定位遥感影像的 棉花株高预测初报

董丽珺^{1,2}, 伍维模^{1,2,3}, 孙淑珍¹, 佐日古丽·阿卜杜克热木¹,
李建成^{1,2}, 赵长巍^{1,2}, 支金虎^{1,2,3}

(1. 塔里木大学农学院, 新疆 阿拉尔 843300; 2. 南疆绿洲农业资源与环境研究中心,
新疆 阿拉尔 843300; 3. 南疆干旱区特色作物遗传改良与高效生产兵团
重点实验室, 新疆 阿拉尔 843300)

摘要: 在棉花生长周期中快速、无损伤、大批量地获取田间棉花的株高, 并进行建模, 为棉花株高的快速检测提供技术支持。本研究基于大疆精灵 4 RTK 无人机搭载高清数码相机组成的低空遥感平台, 获取棉田无人机超高分辨率的遥感影像(GSD=0.33 cm/pixel), 生成数字表面模型(DSM), 同时, 人工测量了 1 126 株棉花花铃期的株高, 并通过便携式 Lite RTK 对棉株顶端进行了厘米级高精度定位。经过对 DSM 和实测株高(H)之间的回归分析, 发现二者存在显著的线性回归关系($R^2=0.88$, RMSE=8.49 cm), 表明基于 DSM 预测的棉花株高具有较高的精度。

关键词: 无人机; 棉花; 株高; 高分辨率

中图分类号: S127; S562 **文献标志码:** A **文章编号:** 2097-2172(2025)05-0467-06

doi: 10.3969/j.issn.2097-2172.2025.05.013

Preliminary Report of Cotton Plant Height Prediction Based on UAV Ultra-high-resolution High-precision Positioning Remote Sensing Image

DONG Lijun^{1,2}, WU Weimo^{1,2,3}, SUN Shuzhen¹, ZORIGULI Abdulkezem¹, LI Jiancheng^{1,2},
ZHAO Changwei^{1,2}, ZHI Jinhu^{1,2,3}

(1. College of Agriculture, Tarim University, Alar Xinjiang 843300, China; 2. South Xinjiang Oasis Agricultural Resources and
Environment Research Centre, Alar Xinjiang 843300, China; 3. Key Laboratory of Genetic Improvement and Efficient
Production of Characteristic Crops in Arid Areas of Southern Xinjiang, Alar Xinjiang 843300, China)

Abstract: Rapid, non-destructive, and high-throughput acquisition of cotton plant height in the field during its growth periods is critical for modeling and supports efficient detection technology. This study utilized a low-altitude remote sensing platform composed of a DJI Wizard 4 RTK UAV equipped with a high-definition digital camera to capture ultra-high-resolution remote sensing images of cotton fields (GSD=0.33 cm/pixel), from which a digital surface model (DSM) was generated. Simultaneously, the height of 1 126 cotton plants at the flowering and boll setting stage was measured and the tops of the cotton plants were positioned with centimetre-level high accuracy by portable Lite RTK. After regression analysis between DSM and measured plant height (H), it was found that there was a significant linear regression relationship between them ($R^2=0.88$, RMSE=8.49 cm), indicating that cotton plant height predicted from DSM achieves high accuracy.

Key words: UAV; Cotton; Plant height; High resolution

棉花(*Gossypium* spp.)是我国重要的经济作物, 新疆棉区在全国棉花产业中具有不可替代的重要地位和作用^[1-2]。株高是评估作物生长发育状况

的一个重要的表型指标, 在判断长势, 以及选种育种方面具有较大的参考价值及实际意义^[3-4]。传统的人工测量棉花株高的方法存在工作量大、

收稿日期: 2024-08-28; 修订日期: 2024-11-26

基金项目: 新疆维吾尔自治区重点研发计划项目(2022B02053-2)。

作者简介: 董丽珺(1999—), 女, 甘肃武威人, 硕士在读, 研究方向为植物营养与环境。Email: m18293594835@163.com。

通信作者: 支金虎(1978—), 男, 甘肃张掖人, 教授, 博导, 主要从事植物营养与环境方面的研究工作。Email: zjhzy@163.com。

效率低等问题，难以满足现代化农业高精度和高效率监测的需求。无人机低空遥感是一种新兴的农业监测技术，具有操作灵活、移动性强、时空分辨率高、高效无损伤测量等优势，已广泛应用于农业精准监测^[5-6]。

无人机遥感技术提取株高信息的方法主要有点云激光雷达法、数码相机图像数字表面模型相减法、植被指数-株高模型估测法等^[7-9]。周梦维等^[10]通过无人机搭载小光斑全波形激光雷达(Light detection and ranging, LiDAR)反演了作物株高，取得了较好的预测效果，但是 LiDAR 处理数据过程较为烦琐，成本较高，效率低，在实际工作中存在较大的局限性。牛庆林等^[11]、杨琦等^[12]证明通过无人机高清数码 RGB 影像提取作物株高、叶面积指数具有较高的可行性。颜安等^[13]、石文强等^[14]利用无人机遥感生成数字表面模型，通过克里金插值法获得了较高精度的棉花、大豆株高预测模型。目前，利用无人机遥感技术估测作物株高方面的技术已趋于成熟，但是，基于无人机超高分辨率高精度定位遥感影像的棉花株高预测模型却鲜见报道。为此，我们以南疆棉区棉花株高实测数据为基础，结合通过无人机超高分辨率遥感影像生成的数字表面模型，进行棉花株高建模，并对其精度进行分析，以期为棉花株高的快速监测提供技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

研究区试验田位于新疆生产建设兵团第一师阿拉尔市气象局 (80° 30' ~ 81° 58' E、40° 22' ~ 40° 57' N)，当地平均海拔 1 011 m，地势较平坦，年平均气温 4 ~ 20 ℃，平均年降水量 40.1 ~ 82.5 mm，年平均蒸发量 1 876.6 ~ 2 558.9 mm，地表蒸发强烈，属于典型的暖温带极端干旱荒漠气候^[15-16]。

1.2 供试材料

供试棉花品种为塔河 2 号，由新疆塔里木河种业股份有限公司提供。

1.3 数据获取与预处理

1.3.1 株高 于 2023 年 4 月 28 日播种，采用一膜 6 行的宽窄行(行距 65 cm + 10 cm)种植模式，膜宽 2.05 m，铺设 2 条滴灌带。试验田管理与当地大田

一致。2023 年 8 月 23 日随机选取 1 126 株棉花用卷尺测量株高(地面到自然状态下主茎顶部的垂直高度)。使用便携式 Lite RTK 接收机定位主茎顶部位置，记录经纬度、海拔，定位误差小于 1 cm^[17]。

1.3.2 无人机数据获取与处理 在人工测量株高的同时，使用大疆精灵 4 RTK 多旋翼高精度航测无人机(深圳市大疆创新科技有限公司)搭载高清数码相机采集棉花试验田间高清数码影像，该无人机具有固定和姿态两种模式，可以全方位拍摄数码影像，无人机参数值见表 1。搭载相机型号为 FC6310R，相机影像传感器为 1 英寸 CMOS，有效像素 2 000 万，视场角 84°。照片分辨率为 4 864 × 3 648 像素；光圈为 f/2.8 - f/11。影像获取时间为 2023 年 8 月 23 日 12:00 时，天气晴朗、无风无云，光照强度为 1 × 10⁵ lx，飞行速度为 1 m/s，飞行高度为 13 m，在此飞行高度下无人机遥感影像分辨率为 0.33 cm (GSD=0.33 cm/pixel)，达到超高分辨率影像的水平^[18-19]。利用大疆智图软件进行无人机高清数码影像拼接处理，生成试验田高清数字正射影像(Digital Orthophoto Map, DOM)和数字表面模型(Digital Surface Model, DSM)。

表 1 无人机参数值

参数	参数值
重量/g	1 391
轴距/mm	350
最大上升速度/(m/s)	6
最大水平飞行速度/(km/h)	50
飞行时间/min	30
地面分辨率/cm	0.33
航、旁向重叠率/%	80
波段类型	红、绿、蓝

1.4 研究方法

将 DSM 和 1 126 株棉花样本的 Lite RTK 的经纬度测量值导入 ArcGIS 10.2 软件，提取株高样本点的 DSM 值。将棉花株高(H)作为因变量，分别以棉花 DSM 值、棉花 DSM - 裸地高程差值、棉花 Lite RTK 高程 - 裸地高程差值为自变量，建立线性回归预测模型。采用决定系数(R^2)、均方根误差(RMSE)来评估株高预测模型的精度。 R^2 代表方程自变量对株高的解释能力， R^2 越大表明预测模型对株高解释能力越强；RMSE 代表观测值与真实值之间的偏差，RMSE 越小表明偏差越小，对株高的估测精度越高。采用 R4.2.2 软件进行十折交叉验

证对模型进行检验, 采用 ArcGIS 10.2 进行地理图层绘制, 使用 Origin 2021 软件进行数据图绘图^[20]。

$$R^2=\frac{\sum_{i=1}^n(x_i-\bar{x})(y_i-\bar{y})^2}{n\sum_{i=1}^n(x_i-\bar{x})\sum_{i=1}^n(y_i-\bar{y})^2}$$
$$RMSE=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n(y_i-x_i)^2}{n}}$$

式中 x_i 表示实测值, $\bar{x}$ 表示实测均值; y_i 表示预测值, $\bar{y}$ 表示预测值均值; n 为预测模型样本数量。

2 结果与分析

2.1 棉花试验田高清正射影像

使用无人机对棉花试验田进行连续拍摄, 获

得单张遥感影像图(封三彩图 1), 拼接后生成高清正射影像 (DOM)(封三彩图2), 从 DOM 中可以清晰地观测到棉田中棉花的生长情况存在差异, 中间和西边棉花长势较好, 东边的长势较弱, 并有明显的缺苗现象。由棉花试验田数字表面模型 (DSM)可以看出, 由于高程值与棉花株高成正比, 即 DSM 图像内颜色越深表示试验田内对应位置的棉花株高越高(封三彩图3)。

2.2 棉花株高的预测

2.2.1 基于棉花 DSM 值的预测 由图 4 可以看出, 基于棉花 DSM 值和实测株高建立的线性模型

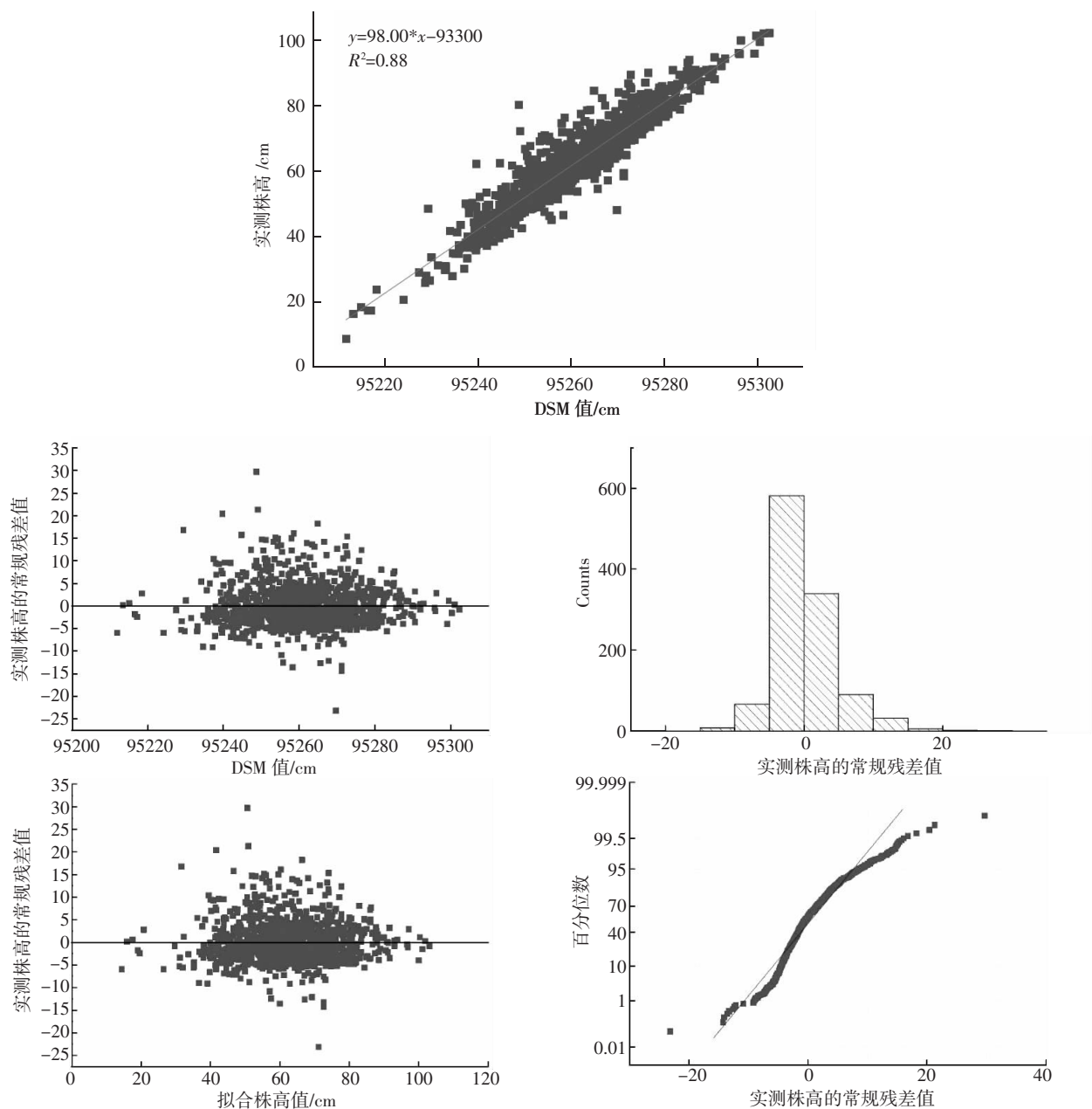


图 4 实测株高与 DSM 拟合图

的 $R^2=0.88$, $RMSE=8.49$ cm。通过 R4.2.2 软件对所得到的线性模型进行十折交叉验证得 $R^2=0.88$, 通过残差值可以看出实际测量值和拟合值之间的差近似服从正态分布, 说明线性模型的合理性以及数据的可靠性。

2.2.2 基于棉花 DSM-裸地高程差值的预测 由图 5 可以看出, 基于棉花 DSM-裸地高程差值建立的株高线性回归预测模型 $R^2=0.88$, $RMSE=15.97$ cm, 采用十折交叉验证得到 $R^2=0.88$ 。实测株高与拟合株高的残差值近似服从正态分布, 即对于线

性拟合模型的精确度有了可靠的数据支持。

2.2.3 基于棉花 Lite RTK 高程-裸地高程差值的预测 由图 6 可以看出, 以 Lite RTK 实测棉花高程值与裸地高程值的差值(棉花 Lite RTK 高程-裸地高程差值)为自变量, 与株高建立的线性拟合模型 $R^2=0.90$, $RMSE=8.52$ cm, 十折交叉验证得到 $R^2=0.90$ 。从残差分析来看近似服从正态分布, 基于棉花 Lite RTK 高程-裸地高程差值的线性回归预测模型 R^2 和 $RMSE$ 均略高于基于棉花 DSM 值的模型。

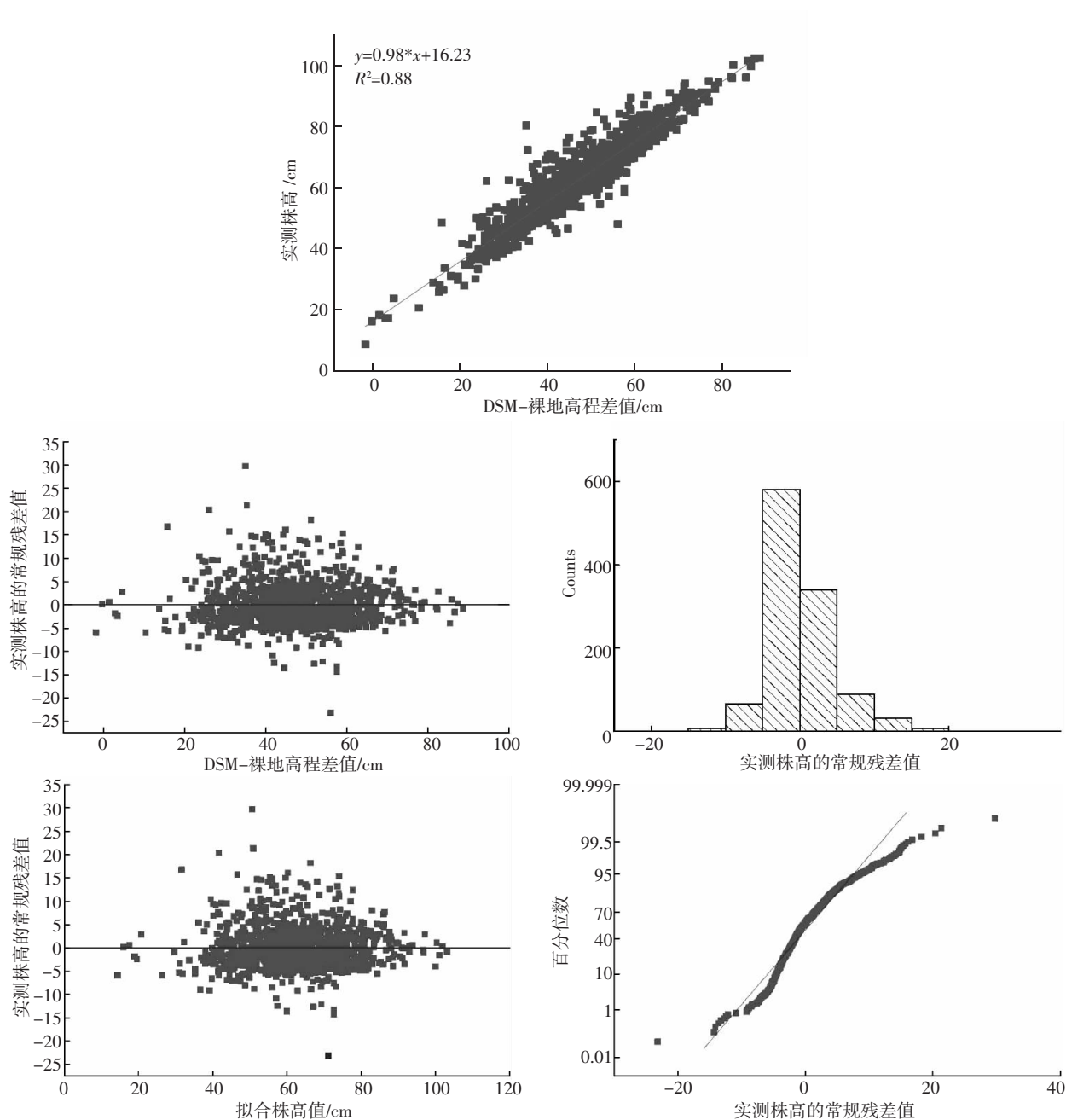


图 5 实测株高与 DSM-裸地高程差值拟合图

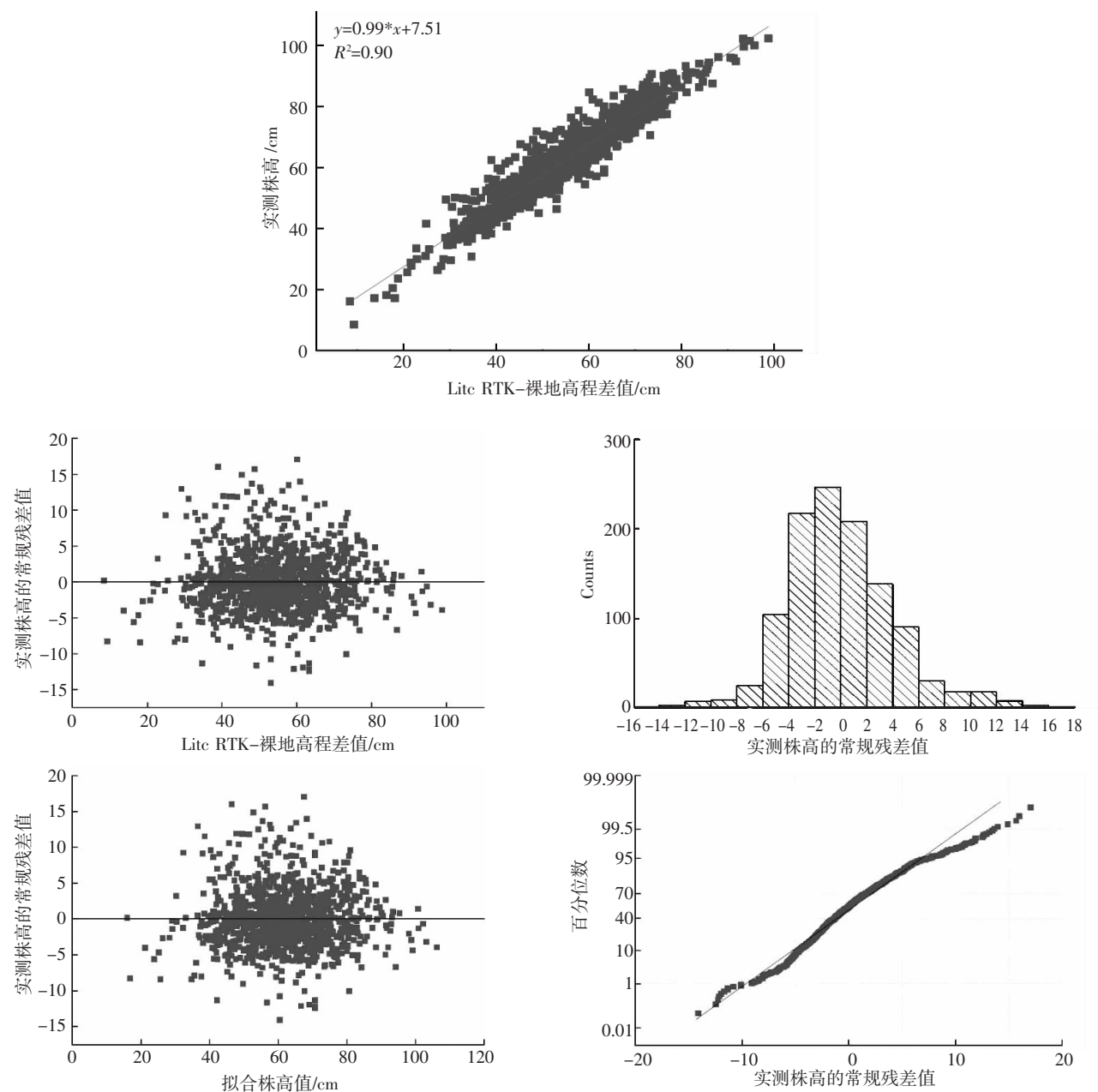


图6 实测株高与 Lite RTK-裸地高程差值拟合图

3 讨论与结论

及时监测和预测农作物的长势是提高农业生产效率的有效途径。无人机遥感技术可以实时或定期监测作物生长过程中的物理指标及环境因素等, 以此评估和预测作物的生长情况和生产潜力^[21]。本研究利用人工测量的 1 126 株棉花的株高, 通过便携式 Lite RTK 对棉株顶端进行了厘米级高精度定位, 同时, 利用大疆精灵 4 RTK 无人机搭载高清数码相机组成的低空遥感平台, 获取棉田无人机超高分辨率的遥感影像(GSD=0.33 cm/pixel), 生成了数字表面模型(DSM)和数字正射影像(DOM), 建

立了基于株高的线性回归预测模型, 模型具有较高的预测精度。

通过作物 DSM 预测株高对于现代农业的精准管理具有重要的应用价值, 目前在玉米、高粱等高秆作物中已有广泛应用。牛庆林等^[11]基于无人机高清数码影像结合地面实测株高数据生成 DSM, 提取玉米的田间株高, 精度较高, 实测株高和 DSM 提取的株高高度拟合($R^2=0.93$, $RMSE=0.29$ m)。胡鹏程^[22]将部分株高与无人机平台获取的作物表型航拍图像进行融合提出自校准法, 高精度地估算了高粱株高 ($R^2=0.63$, $RMSE=0.09$ m)。本文基于

无人机高清数码影像生成 DSM, 经过对 DSM 和实测株高 (H) 之间的回归分析, 发现二者存在显著的线性回归关系 ($R^2=0.88$, RMSE=8.49 cm), 线性回归预测模型 R^2 略高于颜安等^[13]利用无人机影像所建株高模型的 R^2 ($R^2=0.84$), 表明基于 DSM 预测的棉花株高具有较高的精度。同时, 通过与基于棉花 DSM - 裸地高程差值的模型以及 Lite RTK 高程 - 裸地高程差值的模型对比, 发现利用棉花 DSM 值与实测株高构建的模型具有更高的可靠性。

农学意义上棉花的株高是指子叶节至棉花顶端的高度^[23], 而本研究中的株高是从地面开始测量, 其值略高于农学意义上的株高。另外, 本研究仅针对试验区域花铃期的棉花进行了无人机航拍, 后续研究中我们将对棉花各个生育期进行连续航拍与建模分析, 以构建更具有代表性的棉花株高检测模型, 实现在棉花生长周期中快速、无损伤、大批量地获取田间棉花的株高, 为当地棉田株高的实时快速检测提供技术支撑。

参考文献:

- [1] 张泓, 吐尔逊江·买买提, 张少民, 等. 近 30 年全国棉花生产区域时空变化及区域优势分析[J]. 新疆农业科学, 2023, 60(4): 1028-1040.
- [2] 李建成, 伍维模, 赵长巍, 等. 氮肥减量配施壳寡糖对棉花根系生长及根际土壤酶活性的影响[J]. 寒旱农业科学, 2024, 3(8): 752-758.
- [3] 王乐, 吴杨焕, 李杰, 等. 棉花株高变化动态分析及模型研究[J]. 新疆农业科学, 2017, 54(3): 393-402.
- [4] 范振岐. 南疆阿拉尔垦区密植棉花株高模拟研究[J]. 棉花学报, 2024, 36(4): 320-327.
- [5] ZHANG H, WANG L, TIAN T, et al. A review of unmanned aerial vehicle low-altitude remote sensing (UAV-LARS) use in agricultural monitoring in China[J]. Remote Sensing, 2021, 13(6): 1221.
- [6] 刘建春, 陈思, 文波龙, 等. 基于无人机多光谱遥感的水稻株高估测方法[J]. 遥感信息, 2023, 38(3): 61-68.
- [7] TEN HARKEL J, BARTHOLOMEUS H, KOOISTRA L. Biomass and crop height estimation of different crops using UAV-based lidar[J]. Remote Sensing, 2020, 12(1): 17.
- [8] 付虹雨, 崔国贤, 李绪孟, 等. 基于无人机遥感图像的苧麻产量估测研究[J]. 作物学报, 2020, 46(9): 1448-1455.
- [9] BENDIG J, YU K, AASEN H, et al. Combining UAV-based plant height from crop surface models, visible, and near infrared vegetation indices for biomass monitoring in barley[J]. International Journal of Applied Earth Observations and Geoinformation, 2015, 39: 79-87.
- [10] 周梦维, 柳钦火, 刘强, 等. 基于机载小光斑全波形 LIDAR 的作物高度反演[J]. 农业工程学报, 2010(8): 183-188.
- [11] 牛庆林, 冯海宽, 杨贵军, 等. 基于无人机数码影像的玉米育种材料株高和 LAI 监测[J]. 农业工程学报, 2018, 34(5): 73-82.
- [12] 杨琦, 叶豪, 黄凯, 等. 利用无人机影像构建作物表面模型估测甘蔗 LAI[J]. 农业工程学报, 2017, 33(8): 104-111.
- [13] 颜安, 郭涛, 陈全家, 等. 基于无人机影像的棉花株高预测[J]. 新疆农业科学, 2020, 57(8): 1493-1502.
- [14] 石文强, 张伟, 亓立强, 等. 基于无人机遥感的大豆株高计算方法研究[J]. 农机化研究, 2024, 46(2): 145-150.
- [15] 代云豪, 管瑶, 张钦凯, 等. 阿拉尔垦区土壤盐渍化遥感监测及时空特征分析[J]. 干旱区地理, 2022, 45(4): 1176-1185.
- [16] 牛建龙, 王家强, 周烜, 等. 南疆阿拉尔地区近 53 年日照时数变化特征分析[J]. 塔里木大学学报, 2017, 29(1): 126-132.
- [17] 周晓将. 便携式 LiteRTK 在露天矿生产管控中的应用[J]. 现代矿业, 2023, 39(6): 63-65.
- [18] 刘舒, 朱航. 基于超高空间分辨率无人机影像的面向对象土地利用分类方法[J]. 农业工程学报, 2020, 36(2): 87-94.
- [19] 石伟博, 廖小罕, 王绍强, 等. CNN 影像输入尺寸和分辨率对川西针叶林植被分类精度的影响[J]. 遥感学报, 2023, 27(11): 2640-2652.
- [20] 王小燕, 逢蕾, 路建龙, 等. 不同覆盖措施对旱区春小麦产量及碳效率的影响[J]. 寒旱农业科学, 2024, 3(6): 515-521.
- [21] 赵胜利, MUJAHID H, 王国宾, 等. 基于无人机遥感的作物长势监测研究进展[J]. 江苏农业科学, 2024, 52(8): 8-15.
- [22] 胡鹏程. 基于无人机近感的高通量田间作物几何表型研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2018.
- [23] 宋晨, 刘莎莎, 王简, 等. 外源褪黑素对盐胁迫下棉花生长发育、抗氧化酶活性及渗透调节物质含量的影响[J]. 棉花学报, 2024, 36(6): 486-498.