

基于 Sentinel-2 影像的不同耕作方式下玉米关键生育期长势差异分析

邓泉彪¹ 王红¹ 董士伟^{2,3} 姚兰^{2,4} 蒙雨露² 任艳敏²

(1. 湖北大学地理科学学院, 武汉 430062; 2. 北京市农林科学院信息技术研究中心, 北京 100097;

3. 农业农村部农业遥感机理与定量遥感重点实验室, 北京 100097; 4. 国家农业信息化工程技术研究中心, 北京 100097)

摘要: 玉米长势差异分析是评估不同耕作方式对作物生长影响的重要手段。以莫旗试验区为例, 基于 Sentinel-2 遥感监测参数反演裸土期秸秆覆盖度, 并据此划分免耕、少耕和传统耕作 3 种类型; 在玉米关键生育期(拔节期、抽雄期和乳熟期)反演叶面积指数(LAI)、植被覆盖度(FVC)、地上生物量(AGB)、植株含氮量(PNC)、叶绿素含量(CAB)和冠层含水量(CWC)6 项指标, 采用变异系数法构建玉米综合长势指数(CGI), 进而从空间、均值和平均变化速率方面开展不同耕作方式下玉米长势差异分析。结果表明: 拔节期 CGI 整体偏低(均值 0.101), 抽雄期升至峰值(均值 0.435), 乳熟期略有下降(均值 0.394), 整体变化呈先升后缓降趋势, 且不同地块间表现出明显的空间异质性。不同耕作方式下玉米长势呈现“前期传统耕作占优, 后期免耕占优”的阶段性特征。拔节期至抽雄期传统耕作增幅最大(0.365), 变化速率(0.010)高于免耕(0.009), 主要得益于 LAI 与 CWC 的较高贡献; 抽雄期至乳熟期免耕降幅最小(0.038), 变化速率(0)明显优于少耕(-0.001)和传统耕作(-0.002), 主要归因于 CAB 对衰减的抑制能力, 从而形成“前期传统耕作驱动强、后期免耕稳长能力优”的阶段性差异格局。研究结果可为玉米智慧种植决策与精准田间管理提供关键长势参数和科学依据, 支撑区域尺度保护性耕作实施效果的定量评估。

关键词: 玉米长势; 保护性耕作; 遥感监测; 参数反演; 差异分析; 生育期

中图分类号: S127

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2026)20-0129-12

OSID:



Growth Differences Analysis of Maize at Key Growth Stages under Different Tillage Practices Based on Sentinel-2 Imagery

Deng Quanbiao¹ Wang Hong¹ Dong Shiwei^{2,3} Yao Lan^{2,4} Meng Yulu² Ren Yanmin²

(1. School of Geographic Sciences, Hubei University, Wuhan 430062, China

2. Information Technology Research Center, Beijing Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Beijing 100097, China

3. Key Laboratory of Quantitative Remote Sensing in Agriculture, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing 100097, China

4. National Engineering Research Center for Information Technology in Agriculture, Beijing 100097, China)

Abstract: Analyzing maize growth differences is a critical approach for evaluating the impacts of varied tillage practices on crop development. Taking Moqi experimental zone as study area, the crop residue cover during the bare-soil period was firstly retrieved based on Sentinel-2 remote sensing parameters, and accordingly the fields were classified into three tillage types: no-till, reduced-till, and conventional tillage. During key maize growth stages (jointing, tasseling, and milk stages), six biophysical indicators, i. e., leaf area index (LAI), fractional vegetation cover (FVC), above-ground biomass (AGB), plant nitrogen content (PNC), chlorophyll a/b (CAB), and canopy water content (CWC) were retrieved. A comprehensive growth index (CGI) was constructed by using the coefficient of variation method. Subsequently, spatial patterns, mean values, and average change rates were analyzed to compare maize growth performance across tillage types. Results showed that CGI was relatively low at the jointing stage (mean: 0.101), peaked at the tasseling stage (mean: 0.435), and slightly declined at the milk stage (mean: 0.394), exhibiting a trend of initial increase followed by a gradual decrease, with

收稿日期: 2026-07-01 修回日期: 2026-07-19

基金项目: 国家重点研发计划项目(2024YFD1500802)和北京市农林科学院科研创新平台建设项目(PT2026-26)

作者简介: 邓泉彪(2001—),男,研究实习员,主要从事农业定量遥感研究,E-mail: 2452658030@qq.com

通信作者: 董士伟(1984—),男,正高级工程师,主要从事时空数据研究,E-mail: dshiwei2006@163.com

pronounced spatial heterogeneity among plots. Under different tillage regimes, maize growth exhibited a stage-dependent pattern characterized by “conventional tillage dominance in the early stage and no-till dominance in the later stage.” From jointing to tasseling, conventional tillage showed the greatest increment (0.365) and a higher change rate (0.010) than no-till (0.009), mainly attributed to the higher contributions of LAI and CWC. From tasseling to milk stage, no-till presented the smallest decline (0.038) with a change rate of 0, markedly outperforming reduced-till (−0.001) and conventional tillage (−0.002), which was primarily due to the suppressing effect of CAB on growth deterioration. These findings revealed a distinct phased differentiation pattern: conventional tillage drove stronger early-stage growth, whereas no-till exhibited superior stability in maintaining growth during the later stage. The research result can provide key growth parameters and scientific evidence for smart decision-making in maize cultivation and precision field management, which can support the quantitative assessment of conservation tillage effectiveness at regional scale.

Key words: maize growth; conservation tillage; remote sensing monitoring; parameter retrieval; difference analysis; growth stages

0 引言

东北黑土区是我国粮食安全的“压舱石”^[1],粮食总产量约占全国的1/4,输出商品粮占全国商品粮总量的1/3^[2]。黑土作为最珍贵的土壤资源,富含有机质,为作物生长发育提供了良好的土壤基础,该区域玉米播种面积占粮食作物播种面积的一半以上^[3]。然而,数十年来实施以密集、反复土壤扰动为特征的传统耕作,导致区域黑土肥力下降,进而影响农作物长势,对长期粮食安全构成重大风险^[4]。在黑土地保护与粮食安全双重需求背景下,开展基于遥感的不同耕作方式下玉米长势差异分析,具有重要的现实意义。

研究发现保护性耕作能够通过保持干旱地区的土壤水分促进作物生长^[5-7]。寒冷地区若采用结合秸秆覆盖的少免耕,会降低土壤温度、延缓出苗^[8],进而导致产量下降;而在排水不良的黏土中,则可能加速植株衰老,降低叶绿素含量(Chlorophyll a/b, CAB)^[9]。另有研究结果表明,少耕和免耕均显著提高了玉米开花期及以后穗位叶光系统反应中心的最大光化学效率和实际光化学效率^[10]。因此,不同耕作方式对玉米长势的影响并非单一方向,而是可能呈现明显的生育期阶段性差异。

当前,针对黑土区作物长势的研究仍多依赖于局部田间试验^[11]或作物模型模拟^[12]。这类研究虽能较为深入地揭示了不同耕作方式对作物长势的影响机理,但受试验区域有限、观测周期较短及区域代表性不足等因素制约,难以全面刻画不同耕作方式下作物长势的时空动态特征。遥感技术具有长时序、大范围、动态连续观测的优势,能够有效弥补地面试验在时空尺度上的不足。当前,玉米长势遥感监测研究已从单一植被指数的时序分析发展为多源、多参数协同反演。这些研究能实现从田块到区

域的多尺度连续观测,并尝试融合多源数据、综合多参数提升监测能力,但仍存在诸多不足。例如,MODIS数据空间分辨率较低,难以捕捉田块内部差异^[13];高分一号仅基于NDVI,监测指标单一^[14];无人机与多源遥感虽可同步获取冠层覆盖度、株高、叶面积指数(Leaf area index, LAI)等多指标,但覆盖范围有限、成本较高,难以扩展到区域尺度^[15-17];Sentinel-2相关方法反演了株高与LAI,所建长势指数客观性与普适性尚待检验^[18]。因此,现有手段在兼顾高精度与大范围监测的同时,尚难以全面刻画不同耕作条件下玉米长势的时空动态特征。

综上所述,已有大量田间试验探讨了不同耕作方式对玉米长势的影响,并且也有研究借助多源数据,采用多指标与综合评价相结合的方式对玉米长势分析,但现有研究尚未将耕作方式的空间分区与多指标构建的综合长势指标有效融合,导致不同耕作方式下玉米长势阶段性差异仍缺乏统一的区域分析方法。因此,本研究以莫旗试验区为例,基于Sentinel-2影像,重点分析不同耕作方式下玉米关键生育期长势差异,以期为黑土区玉米智慧种植决策与精准田间管理提供关键长势参数和科学依据。

1 研究区概况与数据源

1.1 研究区概况

莫旗试验区位于内蒙古自治区呼伦贝尔市莫力达瓦达斡尔族自治旗西南部,包含阿拉山镇、宝山镇、尼尔基镇和西瓦尔图镇4个乡镇(图1),地处北纬48°19'32"~49°58'24"、东经123°42'5"~124°38'56"之间。莫旗试验区属于温带大陆性季风气候,四季分明,冬季漫长而寒冷,夏季短促且温热,雨热同期。年平均气温约为1.0℃,年温差较大,年降雨量450~550 mm之间,无霜期较短,一般为110~125 d,能够满足一年一熟作物的生长需求。试验区地处大兴

安岭东麓,地势由西北向东南倾斜,地形大部分为低山丘陵。依据《2025 年东北黑土地保护性耕作推进行动实施方案》,截止 2025 年底莫旗实施保护性耕作面积达到 $2.53 \times 10^5 \text{ hm}^2$, 占全旗耕作面积的 80% 以上。试验区位于莫旗玉米主产区,耕地分布集中、种植规模较大,能够较好地代表当地典型黑土区玉米生产条件。

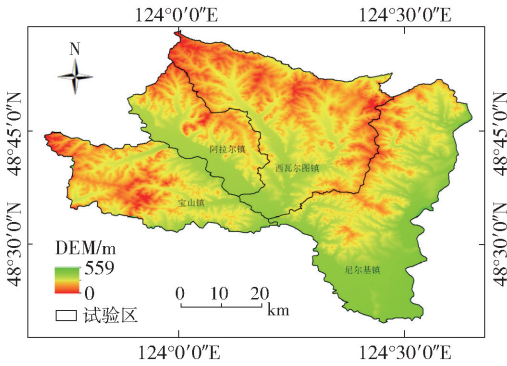


图 1 研究区

Fig. 1 Study area

1.2 数据源及预处理

(1) Sentinel-2 遥感数据

Sentinel-2 卫星是欧空局哥白尼计划的组成部分,搭载多光谱成像仪,覆盖 13 个波段(分辨率 10、20、60 m)。利用 Google Earth Engine (GEE) 获取 2025 年 4 月 20 日(播种前裸土期)、6 月 19 日(拔节期)、7 月 21 日(抽雄期)和 9 月 17 日(乳熟期)的云量较低影像^[19]。利用 Sen2Cor 插件完成大气校正,消除气溶胶和水汽对地表反射率的干扰;通过 SNAP 软件对所有波段进行空间重采样分辨率为 10 m,并使用 ENVI 软件完成波段计算,提取光谱指数。归一化差异耕作指数(NDTI)和归一化秸秆指数(NDRI)是基于 B11、B9 和 B12 波段构建^[20],用于反演地表秸秆覆盖度;土壤调整植被指数(SAVI)、优化土壤调整植被指数(OSAVI)、归一化植被指数(NDVI)和绿光归一化植被指数(GNDVI)是基于 B2、B3、B4、B8 等波段构建^[21],用于反演玉米关键生育期长势监测指标。

(2) 玉米空间分布数据

东北黑土区作物分布数据来源于国家地球系统科学数据中心(<http://www.geodata.cn>)发布的分辨率 10 m 主要作物分布数据集(2017—2019 年)。该数据基于 GEE 和 Sentinel-2 遥感影像,采用分层分区全时序策略,基于随机森林算法和特征优选方法进行分类,总体精度为 81%~87%^[22]。参照上述方法获取莫旗 2025 年玉米种植分布图,统计显示玉米种植面积占耕地面积的 35.68%,与《莫力达瓦达斡尔族自治县 2025 年国民经济和社会发展统计公报》

发布的 36.17% 基本吻合,表明反演数据质量可靠。通过 ArcGIS 软件进行区域掩膜裁剪,获取试验区玉米空间分布(图 2),作为后续分析的基础。

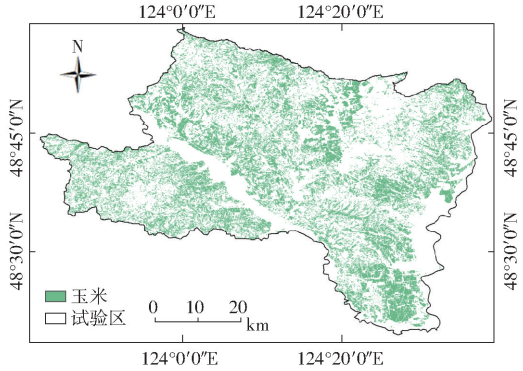


图 2 试验区玉米分布

Fig. 2 Maize distribution in experimental area

2 研究方法

技术路线如图 3 所示,主要包括数据源与数据预处理、耕作方式识别与玉米综合长势指数(Comprehensive growth index, CGI)构建、玉米长势差异分析。首先,获取不同时期 Sentinel-2 影像与玉米分布数据,进行相应的数据预处理,波段计算获取 NDTI 等光谱指数。其次,基于多元线性逐步回归方法进行秸秆覆盖度反演,将耕作方式划分为少耕、免耕与传统耕作;基于植被生物物理参数处理模块和回归模型法进行玉米长势监测指标反演,采用变异系数法构建玉米综合长势指数。最后,从空间、均值、平均变化速率、指标贡献度方面开展不同耕作方式下玉米长势的差异分析。

2.1 耕作方式识别方法

秸秆覆盖度是指农田地表被作物秸秆覆盖的面积占农田总面积的比例,是识别耕作方式(尤其是保护性耕作)的关键指标^[23]。采用多元线性逐步回归方法进行秸秆覆盖度反演^[20];从遥感影像中提取多个光谱参数,通过逐步引入与剔除自变量的方式自动筛选最优变量组合,确定 NDTI 和 NDRI 为自变量,结合地面实测数据,利用最小二乘法同步估计回归系数。参照保护性耕作技术标准^[24],按秸秆覆盖度划分耕作方式:小于 15% 为传统耕作,15%~30% 为少耕,大于或等于 30% 为免耕。

2.2 玉米长势表征方法

2.2.1 玉米长势监测指标体系构建

指标体系构建遵循全面覆盖与指标最小集原则,即在确保监测维度完整性的前提下,尽可能减少指标间信息冗余。综合考虑玉米生长过程,将玉米长势表征归纳为冠层结构与覆盖特征、干物质积累水平、叶片生理活性、植株水分状况和氮素营养状况

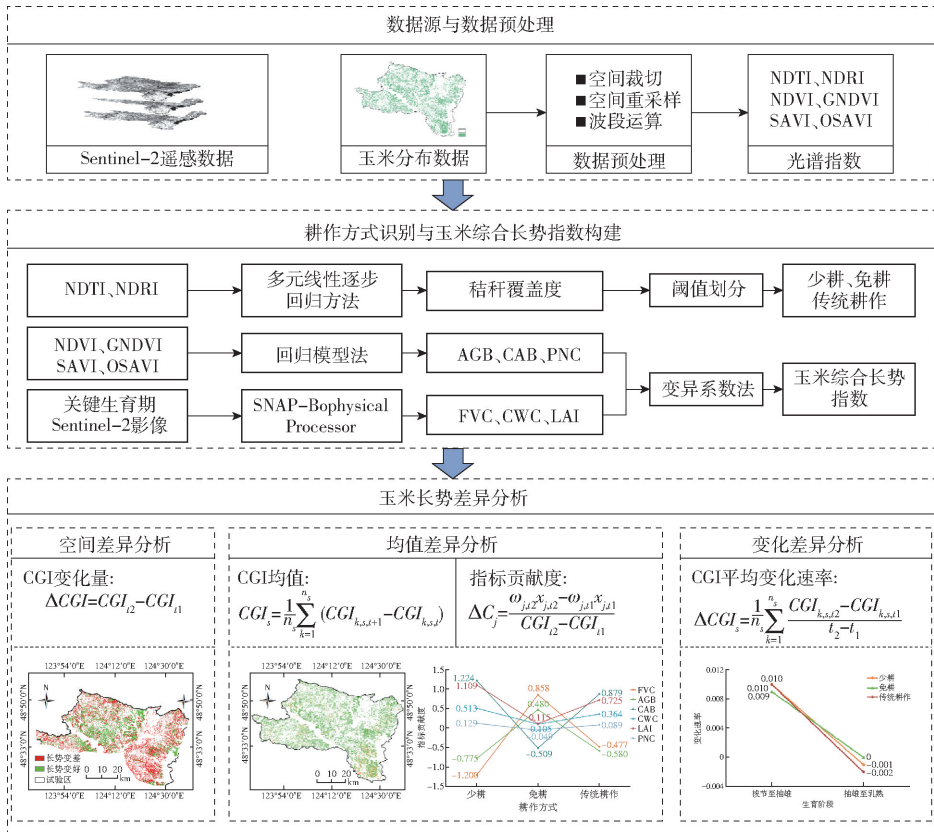


图3 技术路线

Fig. 3 Technology roadmap

5个方面。冠层结构与覆盖特征反映玉米群体的光能截获能力和地表覆盖程度,可由叶面积指数、植被覆盖度(Fractional vegetation cover, FVC)、冠层高度等指标表征;干物质积累水平体现光合产物的累积总量,可由地上生物量(Above ground biomass, AGB)、植株干重等指标衡量;叶片生理活性反映光合作用的潜在能力,可由叶绿素含量、叶片氮含量等指标体现;植株水分状况反映玉米体内水分丰缺程度,可由冠层含水量(Canopy water content, CWC)、等效水厚度、叶片相对含水量等指标评估;氮素营养状况反映植株氮素供应水平,可由植株含氮量(Plant nitrogen content, PNC)、叶片氮浓度、氮营养指数等指标监测。首先从各维度分别选取备选指标,形成初步监测指标集。为避免指标间高度相关导致的特征冗余,采用相关性分析进行筛选。2个变量之间相关系数绝对值大于0.8时,表明二者存在严重的多重共线性,需从中剔除冗余变量^[25]。当2个或多个备选指标间相关系数超过阈值且分属不同维度时,优先保留所在维度备选指标数量较少的指标,并剔除另一维度中与之高度相关的指标。通过上述方法,最终入选的指标既能覆盖全部预设维度,又具有较低的组间相关性^[26]。

基于研究区玉米的实际生长特征及遥感数据的可获取性,选取叶面积指数、植被覆盖度、地上生物

量、叶绿素含量、冠层含水量和植株含氮量共6个指标,构建玉米长势监测指标体系。相关性检验结果表明,上述指标两两之间相关系数均低于0.8,满足指标独立性筛选要求,可作为构建综合长势指数的监测指标。

2.2.2 玉米长势监测指标反演方法

基于SNAP软件中植被生物物理参数处理模块(Biophysical processor)反演叶面积指数、植被覆盖度和冠层含水量,结合PROSPECT+SAIL耦合辐射传输模型与人工神经网络,将观测光谱与模型输出匹配,实现冠层参数的高精度预测^[27]。地上生物量与叶绿素含量的反演参照东北典型黑土区基于PROSAIL辐射传输模型的研究成果^[21]。通过设定模型参数取值范围模拟玉米冠层光谱反射特征,结合支持向量机代理模型与Sobol敏感性分析,筛选出对生理生化参数响应最显著的特征植被指数作为自变量;将田间实测数据与对应生育期的冠层光谱指数进行回归拟合,根据数据分布特征选用线性或二次回归模型,并采用最小二乘法确定回归系数。植株含氮量反演参照东北典型黑土区春玉米临界氮稀释曲线研究成果^[28]。基于田间氮梯度试验获取的植株氮浓度与地上生物量数据,通过分析限氮组与非限氮组的统计关系,建立描述植株氮浓度随生物量增加而下降的幂函数稀释曲线模型(临界氮稀

释曲线),指数与系数通过非线性最小二乘法拟合确定。植株含氮量 $N_t = NNI \times N_c$ 通过计算获取,其中 NNI 为氮营养指数, N_c 为临界氮浓度。

2.2.3 玉米综合长势指数构建

综合长势指数 CGI 构建旨在将多个维度长势监测指标整合为单一的综合评价指标,以实现对于玉米长势状态的定量化表征。CGI 构建流程主要包括监测指标标准化处理、变异系数法确定指标权重以及加权求和 3 个步骤。

由于各监测指标量纲不同,需进行标准化处理以消除量纲影响,计算式为

$$X'_{ij} = \frac{X_{ij} - \min(X_j)}{\max(X_j) - \min(X_j)} \tag{1}$$

式中 X_{ij} ——第 j 个指标在第 i 个样本原始值
 $\min(X_j)$ ——第 j 个指标在样本中最小值
 $\max(X_j)$ ——第 j 个指标在样本中最大值
 X'_{ij} ——标准化后指标值,取 $[0,1]$

各监测指标均值 u_j 和标准差 σ_j 计算式为

$$u_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X'_{ij} \tag{2}$$

$$\sigma_j = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X'_{ij} - u_j)^2}{n - 1}} \tag{3}$$

式中 n ——样本数量

变异系数计算式为

$$CV_j = \frac{\sigma_j}{u_j} \tag{4}$$

式中 CV_j ——第 j 个指标变异系数

指标权重计算式为

$$W_j = \frac{CV_j}{\sum_{j=1}^n CV_j} \tag{5}$$

式中 W_j ——第 j 个指标权重

在此基础上加权求和构建玉米综合长势指数 (CGI),计算式为

$$CGI = \sum_{j=1}^n (W_j X'_{ij}) \tag{6}$$

CGI 取 0~1,值越大说明玉米长势越好。

2.3 玉米长势差异量化方法

2.3.1 关键生育期 CGI 阶段性差异量化方法

基于 CGI 均值与指标贡献度 2 个量化指标分析不同耕作方式下玉米关键生育期长势的阶段差异。其中,CGI 均值通过计算相邻生育期 CGI 差值的区域平均值,以刻画长势变化幅度;指标贡献度则揭示影响 CGI 变化的内部指标构成。

获取免耕、少耕和传统耕作空间分区后,分别计

算各分区内拔节期与抽雄期、抽雄期与乳熟期 2 个相邻生育期 CGI 差值栅格,并在各耕作方式分区内求取区域平均值,以表征相应耕作方式下玉米长势在该阶段的变化幅度,计算式为

$$CGI_s = \frac{1}{n_s} \sum_{k=1}^{n_s} (CGI_{k,s,t+1} - CGI_{k,s,t}) \tag{7}$$

式中 CGI_s ——第 s 类耕作方式从 t 生育期到 $t+1$ 生育期 CGI 平均变化量

$CGI_{k,s,t+1}$ ——第 s 类耕作方式内第 k 个像元在 $t+1$ 生育期 CGI 值

$CGI_{k,s,t}$ ——第 s 类耕作方式内第 k 个像元在 t 生育期 CGI 值

n_s ——第 s 类耕作方式对应像元数

CGI_s 为正值,表示该阶段玉米综合长势增强,且数值越大增幅越显著;若为负值,则反映长势衰减,且绝对值越大衰减越剧烈。通过比较不同耕作方式下 CGI 平均变化量,可进一步辨识各耕作方式在玉米生长前期的促生能力与后期的稳长能力差异。

基于各长势监测指标在 2 个生育期的标准化值及其对应权重,量化单个指标变化对综合长势指数变化的相对作用,进而表征不同指标在玉米长势阶段变化中贡献度,计算式为

$$\Delta C_j = \frac{\omega_{j,t_2} x_{j,t_2} - \omega_{j,t_1} x_{j,t_1}}{CGI_{t_2} - CGI_{t_1}} \tag{8}$$

式中 ΔC_j ——第 j 个指标在 t_1 至 t_2 时期 CGI 变化贡献度

x_{j,t_1} ——第 j 个指标在时间 t_1 经过数据标准化值

x_{j,t_2} ——第 j 个指标在时间 t_2 经过数据标准化值

ω_{j,t_1} ——第 j 个指标在时间 t_1 通过变异系数法计算得到的权重

ω_{j,t_2} ——第 j 个指标在时间 t_2 通过变异系数法计算得到的权重

CGI_{t_2} ——时间 t_2 综合长势指数

CGI_{t_1} ——时间 t_1 综合长势指数

当 $\Delta C_j > 0$ 时,表示该指标对 CGI 增长的促进作用越强;当 $\Delta C_j < 0$ 时,表示该指标对 CGI 变化起抑制或衰减作用,绝对值越大则负向作用越强。通过比较不同耕作方式下各指标贡献度,可进一步识别玉米长势阶段差异主要贡献指标及其相对作用大小。

2.3.2 关键生育期 CGI 变化差异量化方法

采用 CGI 平均变化速率与指标贡献度 2 个量化指标,分析不同耕作方式下玉米关键生育期长势阶段的变化差异。其中,CGI 平均变化速率通过计算

相邻两时期 CGI 变化速率的均值,用以表征长势阶段变化的快慢;指标贡献度则通过分析自身的变化幅度,进一步解释造成 CGI 平均变化速率差异的内在原因。

根据各耕作方式在不同生育期的 CGI,分别计算拔节期至抽雄期、抽雄期至乳熟期 2 个阶段的 CGI 变化速率,以表征对应阶段内玉米长势增强或衰减的动态特征,计算式为

$$\Delta CGI_s = \frac{1}{n_s} \sum_{k=1}^{n_s} \frac{CGI_{k,s,t2} - CGI_{k,s,t1}}{t_2 - t_1} \quad (9)$$

式中 ΔCGI_s ——第 s 类耕作方式下玉米在 t_1 至 t_2 生育阶段 CGI 平均变化速率

$CGI_{k,s,t1}$ ——第 s 类耕作方式内第 k 个像元在时间 t_1 CGI 区域平均值

$CGI_{k,s,t2}$ ——第 s 类耕作方式内第 k 个像元在时间 t_2 CGI 区域平均值

$t_2 - t_1$ ——2 个生育期之间时间间隔

ΔCGI_s 为正值时,说明该阶段玉米综合长势呈增强趋势,其值越大说明玉米长势提升越快;若为负值,则说明长势衰减,且绝对值越大衰减越快。通过比较不同耕作方式下 CGI 阶段变化速率,可进一步辨识各耕作方式在玉米生长前期的促生能力与后期的稳长能力差异。

通过计算各长势监测指标在免耕、少耕与传统耕作 3 种方式下指标贡献度,比较同一指标贡献度随耕作方式变化的波动幅度。若某一指标贡献度在 3 种方式间变化幅度较大,说明该指标对不同耕作方式响应敏感,是造成 CGI 平均变化速率差异的主要内部原因;反之,变化幅度较小的指标则作用相对稳定。

3 结果与分析

3.1 耕作方式识别与划分

基于 Sentinel-2 多光谱影像,采用多元线性逐步回归方法,以 NDTI 和 NDRI 为自变量反演获取秸秆覆盖度空间分布,并依据耕作方式标准划分为少耕、免耕和传统耕作(图 4)。受东北黑土区保护性耕作政策影响,试验区大部分玉米种植范围的秸秆覆盖度大于 30%,免耕占主导地位,覆盖面积广且分布连续;少耕区域较为零散,主要集中于东南部及边缘地块;传统耕作区域面积最小。

3.2 玉米长势监测指标及 CGI 特征分析

3.2.1 监测指标空间分布特征

基于 Sentinel-2 影像,采用 PROSAIL-ANN 方法反演得到 LAI、FVC 和 CWC,利用回归建模法反演得到 AGB、CAB 和 PNC,利用玉米空间分布数据

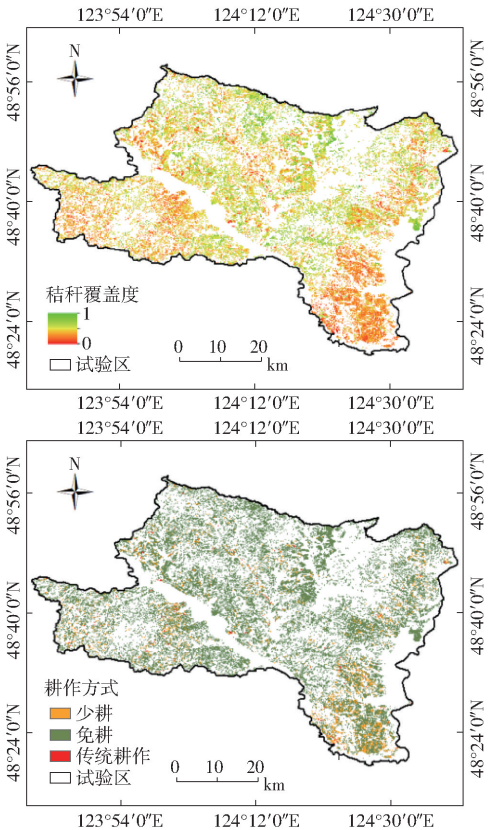


图 4 秸秆覆盖度和耕作方式空间分布
Fig. 4 Spatial distributions of straw coverage and tillage practices

掩膜提取后,获得玉米关键生育期 6 项长势监测指标的空间分布数据(图 5)。在不同生育期内,各监测指标均呈现明显的空间动态演变特征。拔节期 AGB、CAB、FVC 与 LAI 主要呈中高值连片分布,PNC 高值覆盖范围最广,而 CWC 则整体以低值区为主。进入抽雄期后,各指标数值呈现整体跃升趋势,其中 CWC 空间格局显著逆转,由前期低值主导转变为大范围高值连片分布,同时 AGB、CAB、PNC、FVC 和 LAI 高值区亦持续向外扩展,尤其是试验区东部和南部的高值集聚特征最为突出。至乳熟期,各指标高值范围较抽雄期普遍缩小,但 AGB、PNC 与 FVC 在空间上仍保持着较高的数值且连片聚集,其中 PNC 高值分布优势相对强于 AGB 和 FVC,而 CAB、LAI 与 CWC 高值区则进一步缩小。总体而言,各监测指标在空间格局上呈现随玉米生长发育先扩张后收窄的演变特征。

3.2.2 CGI 构建与空间分布特征

关键生育期玉米长势监测指标的均值、标准差、变异系数及权重统计结果见表 1。由表 1 可知,各生育期监测指标的权重分配呈现明显的阶段性变化。拔节期以 CWC 权重最高,FVC 和 LAI 次之;抽雄期 CWC 与 LAI 权重相近,二者共同起主导作用;乳熟期权重位列前 3 的指标为 LAI、CWC 和 FVC。

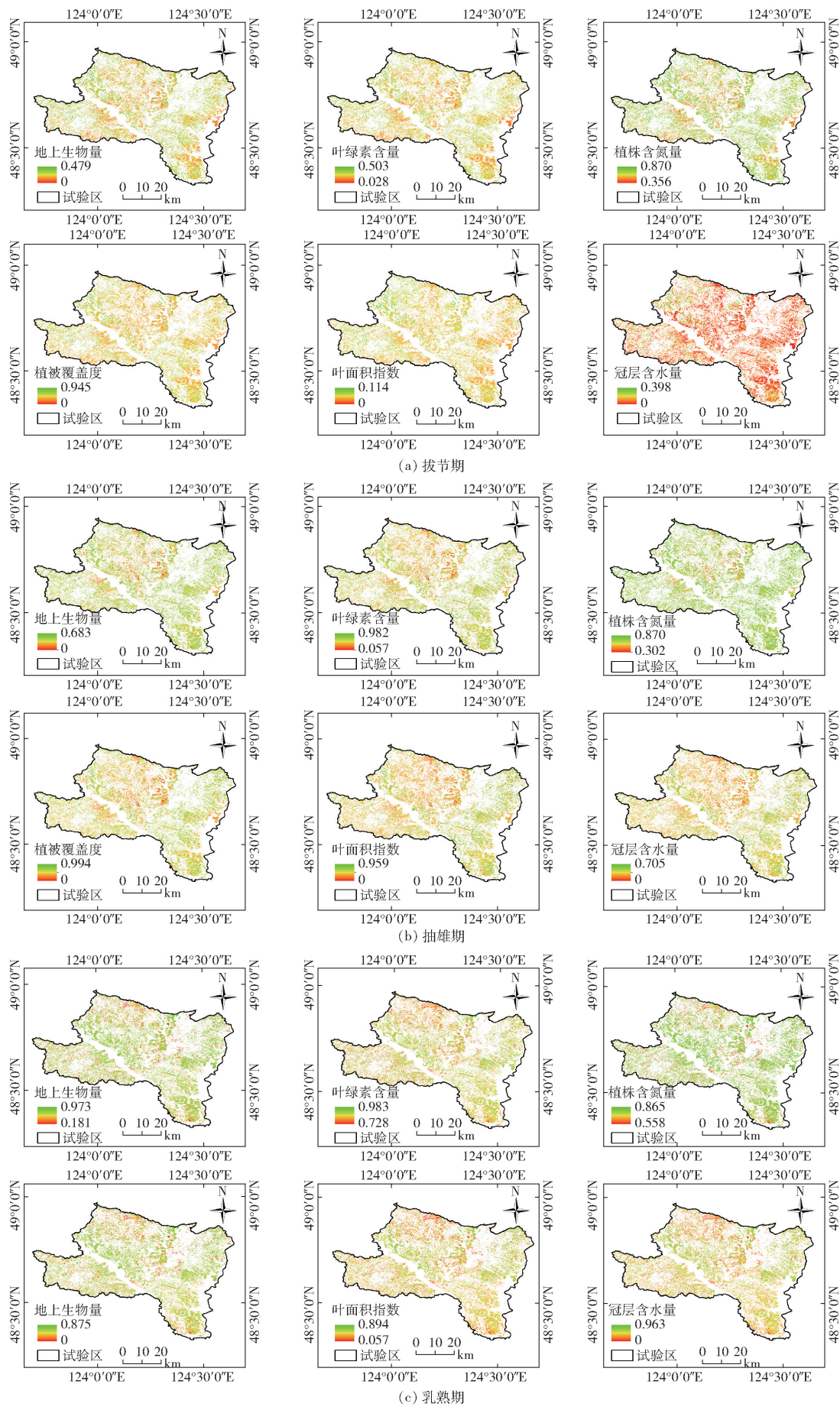


图 5 关键生育期玉米监测指标空间分布

Fig. 5 Spatial distributions of maize monitoring indicators during key growth stages

表 1 关键生育期监测指标统计信息

Tab.1 Statistical information of monitoring indicators during key growth stages

生育期	指数	均值	标准差	变异系数	权重
拔节期	FVC	0.155	0.063	0.408	0.158
	LAI	0.057	0.022	0.396	0.153
	AGB	0.306	0.079	0.258	0.100
	CAB	0.234	0.035	0.148	0.057
	PNC	0.775	0.062	0.081	0.031
	CWC	0.013	0.017	1.291	0.500
抽雄期	FVC	0.735	0.110	0.149	0.134
	LAI	0.389	0.138	0.355	0.320
	AGB	0.567	0.065	0.116	0.104
	CAB	0.826	0.068	0.082	0.074
	PNC	0.840	0.026	0.031	0.028
	CWC	0.200	0.075	0.378	0.340
乳熟期	FVC	0.606	0.191	0.315	0.220
	LAI	0.279	0.126	0.453	0.316
	AGB	0.773	0.122	0.159	0.111
	CAB	0.916	0.025	0.028	0.019
	PNC	0.833	0.027	0.033	0.023
	CWC	0.160	0.071	0.445	0.311

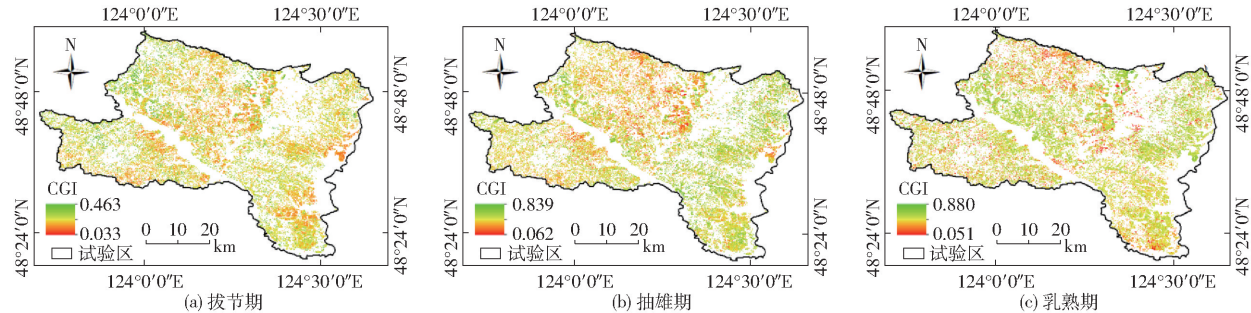


图 6 玉米关键生育期 CGI

Fig. 6 CGI of maize at key growth stages

据,利用栅格计算器依次计算拔节期至抽雄期与抽雄期至乳熟期的 CGI 变化量;随后,通过重分类将 CGI 变化量划分为“长势变好”(变化量大于 0)和“长势变差”(变化量小于 0)2 类,以揭示玉米长势的时空变化特征(图 7)。结果显示,在拔节期至抽雄期阶段,试验区内玉米长势整体呈变好态势,空间分布广泛且均匀,表明该阶段为玉米营养生长的高峰期。相比之下,在抽雄期至乳熟期阶段,试验区内红色区域明显占优,反映长势变差成为主导趋势;绿色区域虽总体减少,但仍呈现一定的局部集中分布,说明部分地块玉米在生育后期仍保持较好的生理活力。这一空间分布特征表明,随着植株进入生殖生长阶段及植株衰老,玉米的综合长势出现生理性回落。总体来看,研究区玉米的生长动力主要集中在抽雄前营养生长阶段,而后期则逐渐进入长势减弱的生殖生长阶段。

从权重动态变化来看,随着生育期推进,CWC 权重由 0.500 逐步下降至 0.311,表明冠层水分对 CGI 的贡献逐渐减弱,而 LAI、FVC 等冠层结构指标的重要性则逐步增强。

基于 6 项长势监测指标,采用变异系数法计算各指标的权重,经标准化处理后再加权求和,构建玉米综合长势指数(CGI),空间分布如图 6 所示。拔节期 CGI 平均值约 0.101,整体长势偏低,高值区集中于局部地块,表明部分区域生长条件较好。抽雄期 CGI 平均值升至 0.435,高值区显著扩大,低值区也改善明显,反映玉米整体长势良好。乳熟期 CGI 平均值略降至 0.394,但最大值约 0.880,表明部分优势地块玉米生长依然极佳。对比 3 个时期可知,玉米长势在抽雄期达到高峰,乳熟期略有下降,但整体保持良好;不同地块间存在明显空间异质性,体现了生长的阶段性特征。

3.3 玉米关键生育期长势差异分析

3.3.1 CGI 空间差异分析

通过提取拔节期、抽雄期和乳熟期 CGI 空间数

3.3.2 CGI 均值差异分析

基于拔节期、抽雄期和乳熟期 CGI 栅格数据,逐像元计算拔节期至抽雄期与乳熟期至抽雄期的差值,获取 2 个相邻生育阶段的 CGI 变化量空间分布。结合免耕、少耕和传统耕作分区,分别对各分区内 CGI 差值栅格进行区域统计,计算每种耕作方式下 2 个阶段 CGI 差值的区域平均值。拔节期至抽雄期 3 种耕作方式 CGI 差值均为正值,其中传统耕作增幅最大(0.365),少耕次之(0.359),免耕最小(0.331),表明传统耕作更有利于前期玉米长势的快速提升;抽雄期至乳熟期 CGI 差值均由正转负,呈现衰减态势,但衰减幅度差异明显,免耕降幅最小(0.038),少耕居中(0.068),传统耕作降幅最大(0.071),反映免耕在生长后期具有更强的玉米长势维持能力。因此,不同耕作方式下玉米长势呈现“前期传统耕作占优、后期免耕占优”的阶段性差异特征。

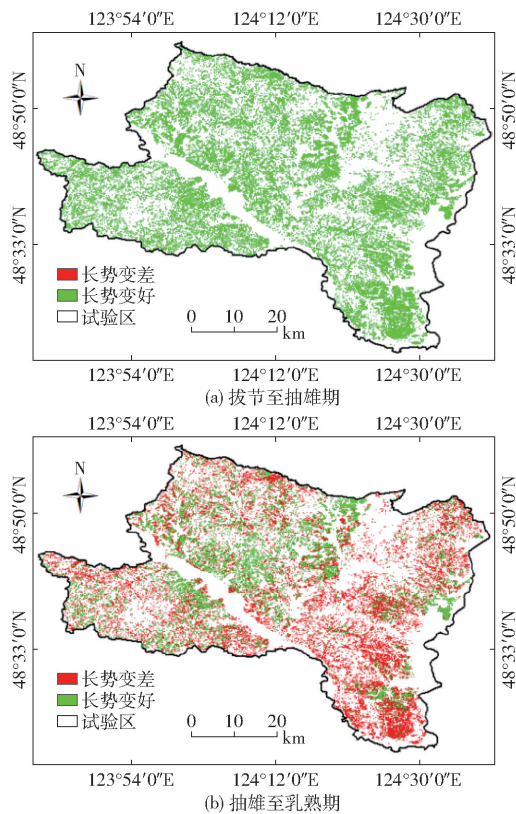


图 7 玉米不同生育阶段 CGI 空间差值

Fig. 7 Spatial differences of CGI for maize at different growth stages

采用指标贡献度分析方法逐像元计算关键生育期各监测指标对 CGI 变化的贡献度,并按耕作分区统计平均贡献度(图 8)。在拔节期至抽雄期的生长增强阶段,3 种耕作方式下各指标贡献度以正值为主,表明 CGI 增长受多指标协同驱动。其中,LAI 始终为贡献度最大,是 CGI 增长的首要因子;FVC 和

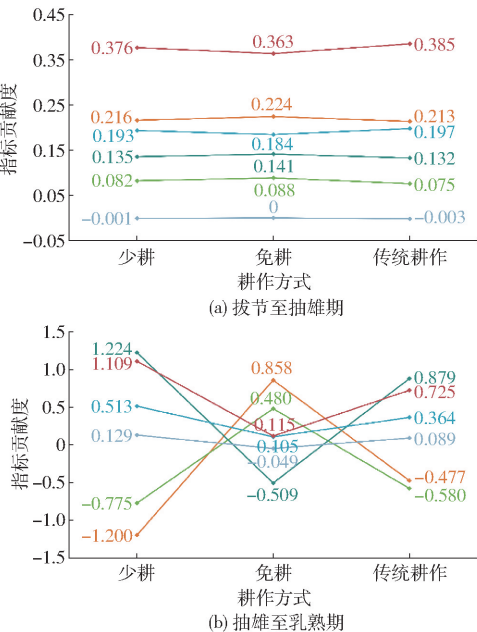


图 8 不同耕作方式下指标贡献度

Fig. 8 Indicator contribution under different tillage practices

CWC 次之,对冠层快速建成具有重要促进作用; CAB 和 AGB 贡献度较小但仍为正值;PNC 贡献度接近零,影响微弱。按耕作方式进行分析,传统耕作在 LAI 和 CWC 上贡献度最高,在叶面积扩展和冠层水分改善上优势突出;免耕则在 FVC、AGB 和 CAB 上贡献度最高,在植被覆盖、生物量积累和叶绿素提升方面更具优势;少耕介于两者之间,表现均衡。进入抽雄期至乳熟期的生长衰减阶段,各指标贡献方向发生明显分化。3 种耕作方式下,CWC 和 LAI 均为正值,对后期 CGI 衰减有一致的促进作用;PNC 贡献度很小。FVC、AGB 和 CAB 的贡献度方向因耕作方式而异:少耕和传统耕作方式下,FVC 和 AGB 抑制衰减,CAB 促进衰减;免耕则相反,FVC 和 AGB 转为促进衰减,CAB 抑制衰减。这一结构性变化从内部构成角度解释了免耕后期衰减幅度最小、传统耕作最大的成因。

3.3.3 CGI 变化差异分析

基于不同生育阶段 CGI 变化空间分布与耕作方式分区,分别计算不同耕作方式下玉米 CGI 的平均变化速率,进行 CGI 变化差异分析。拔节期至抽雄期变化速率为正值,抽雄期至乳熟期转为负值,表明玉米综合长势在生育期内呈先增强后衰减的变化过程。在拔节期至抽雄期的增长阶段,传统耕作与少耕平均变化速率均为 0.010,高于免耕的 0.009;进入抽雄期至乳熟期的衰减阶段,免耕平均变化速率为 0,衰减幅度最小,少耕和传统耕作则分别为 -0.001 和 -0.002。因此,传统耕作在营养生长阶段对玉米长势的提升能力更为突出,而免耕在生殖生长阶段表现出更强的玉米长势维持能力。

结合图 8 中 6 项指标贡献度方向与幅度的阶段性变化趋势,可解释不同耕作方式下 CGI 平均变化速率的差异成因。拔节期至抽雄期,LAI 在 3 种耕作方式中均为 CGI 增长的首要贡献指标,贡献度在传统耕作和少耕中更高,同时这 2 类耕作方式下 CWC 正向贡献度也高于免耕,而免耕在 FVC、AGB 和 CAB 上贡献度优势相对有限,难以弥补 LAI 与 CWC 正向贡献度的差距,决定了传统耕作与少耕前期玉米长势提升速率高于免耕。进入抽雄期至乳熟期,6 项指标贡献度方向发生了明显分化,在 3 种耕作方式下,CWC 和 LAI 均表现出正向贡献度,持续促进 CGI 衰减,但在免耕中促进作用弱于少耕和传统耕作;AGB 和 FVC 在免耕下由前期正向促进增长转为促进衰减,而在少耕和传统耕作中则呈负值,起到抑制衰减的作用;CAB 在免耕中转为负值,成为主要抑制衰减的指标,而在少耕和传统耕作中仍为正值,继续推动衰减。因此,传统耕作与少耕后期

CGI 衰减加速,主要受 CAB 与 LAI 持续正向贡献度的影响,而免耕凭借 CAB 对衰减的抑制能力,有效减缓了后期 CGI 下降幅度,从而表现出最低的衰减速率。研究结果进一步印证了不同耕作方式下玉米长势“前期传统耕作驱动强、后期免耕稳长能力优”的阶段性差异格局。

4 讨论

4.1 国内外相关研究对比

针对东北黑土区玉米长势监测及不同耕作方式对玉米生长影响的研究,可归纳为 2 条主要技术路径:①依托田间定位试验,从土壤理化性质、水热条件、出苗质量、干物质积累及产量形成等角度,揭示保护性耕作对玉米生长的影响机理。②利用无人机或卫星遥感平台,利用冠层结构参数、植被指数、叶面积指数、生物量等指标,开展玉米长势动态监测与综合评估。总体来看,前者在玉米生长机理验证方面更具优势,后者在区域扩展性和快速监测能力上更为突出。

从数据获取手段、长势监测指标体系及分析方法等方面,对国内外相关研究进行系统对比。①数据获取手段差异。田间试验能获得高精度农艺参数,但限于点位尺度,难以刻画区域空间异质性;无人机遥感虽空间分辨率高,但航拍范围有限,无法实现大范围全生育期连续监测;中高分辨率的遥感卫星能够实现大范围、高精度、周期性玉米长势监测和评估。②长势监测指标体系构建。过度依赖产量、干物质等结果性指标难以反映生育期动态^[29];单一指标如 LAI、NDVI 或冠层覆盖度虽可表征叶面积或光学特征^[14],但缺乏对叶绿素、生物量、水分及冠层结构等多维信息的综合反映;多指标组合研究在表征株高、叶绿素、叶面积和生物量方面有所提升^[16],但未考虑冠层覆盖情况以及氮素营养状况。③分析方法差异。田间试验采用无赋权和方差分析等方法,主要适用于处理田间比较和因果路径分析,但在分析玉米长势差异时,无法揭示不同生育期或空间位置的动态变化^[30];单指标遥感通过线性回归或 PROSAIL 模型等分析方法^[31],主要适用于局地生长定量估算,但难以捕捉多指标组合下空间差异;无人机高分辨率监测结合深度学习和多元回归等方法,主要适用于局地多指标状态评估,但在区域范围和生育期动态监测上存在局限^[15];多指标遥感利用加权回归或机器学习方法进行等级划分^[17-18],主要适用于生长等级评价,但无法直接反映关键生育期的空间差异。因此,本研究基于 Sentinel-2 遥感数据,综合考虑冠层结构与覆盖特征、干物质积累水

平、叶片生理活性、植株水分状况和氮素营养状况,构建了玉米长势指标体系,采用关键生育期的变异系数赋权方法及指标贡献度分析,实现了玉米长势空间差异、均值差异和变化差异的动态解析,为玉米精准管理提供技术支撑。

4.2 不确定分析

(1) 监测指标反演结果不确定性。基于 PROSAIL 模型与回归建模法反演的 6 项长势监测指标,能够有效刻画不同耕作方式下玉米的长势差异。然而,PROSAIL 模型在拔节期受复杂的冠层结构和土壤背景的影响,LAI 与 FVC 反演值偏低^[32];AGB、CAB 和 PNC 回归模型缺乏实测数据的独立验证,可能存在区域偏差^[33]。未来可结合地面实测数据进行参数校准或多源遥感协同反演,以提高指标精度与可靠性。

(2) 监测指标权重敏感性分析。基于变异系数法确定的各监测指标权重呈现明显差异,尤其是 CWC 权重较高。为评估权重分配对 CGI 结果的影响,设置等权重方案和剔除最大权重(CWC)的敏感性分析方案。分别计算各生育时期 CGI,并与基于变异系数法构建的原始 CGI 进行 Pearson 相关性分析和 Kappa 一致性检验。由表 2 可知,在 3 个关键生育时期,等权重方案和剔除 CWC 方案计算的 CGI 与原始 CGI 的 Pearson 相关系数均高于 0.90,Kappa 系数均高于 0.75,表明不同赋权方案下 CGI 空间分布格局高度一致,计算结果具有良好的一致性,CGI 对权重选择不敏感,未对“前期传统耕作占优、后期免耕占优”核心结论的稳健性造成影响。此外,由表 1 可知,拔节期 CWC 的变异系数达 1.291,显著高于其他指标,变异系数法据此赋予其较高的权重(0.500);拔节期作为玉米对水分胁迫最为敏感的关键时期,权重分配与拔节期生理需水规律相吻合,未来可通过提高 CWC 估算精度或采用主客观相结合的综合赋权方法进一步完善^[34]。

表 2 不同赋权方案下 CGI 敏感性分析结果

Tab.2 Sensitivity analysis results of CGI under different weighting schemes

生育期	检验指标	原始方案与等权重方案	原始方案与剔除 CWC 方案
拔节期	Pearson	0.975	0.962
	Kappa	0.775	0.764
抽雄期	Pearson	0.994	0.997
	Kappa	0.885	0.907
乳熟期	Pearson	0.996	0.984
	Kappa	0.971	0.955

(3) 样本数量不均衡分布的影响。受研究区耕

作格局的影响,免耕、少耕和传统耕作 3 种耕作方式的像元样本数量分别为 10 127 611、1 294 754 和 77 068,存在显著差异,客观反映了该区域保护性耕作大面积覆盖的空间格局。样本数量的不均衡分布可能对均值估计的准确性产生 2 方面潜在影响:一是免耕作为大样本组,均值估计标准误差较小、统计稳定性较高,而传统耕作作为小样本组,均值易受局部异常值扰动,可能影响该方式下长势均值估计的可靠性;二是小样本组的空间异质性代表性相对不足,可能增加组间差异比较的不确定性。但各耕作方式样本数量均已达到大样本统计推断的基本阈值(本研究最小样本量为 77 068),均值估计具有渐进无偏性。此外,本研究核心结论主要基于同一耕作方式内部的时间序列结果对比,样本不均衡对研究结论的影响有限^[35]。尽管存在上述局限,本研究结果仍能反映不同耕作方式下玉米长势的阶段性分异规律。未来可在黑土区其他县域开展适用性验证,以进一步检验方法体系的普适性。

5 结论

(1)选取叶面积指数、植被覆盖度、地上生物量、叶绿素含量、冠层含水量和植株含氮量 6 个指

标,构建玉米长势监测指标体系,并采用变异系数法按关键生育期进行赋权,进而构建玉米综合长势指数(CGI)。拔节期 CGI 整体偏低(均值 0.101),抽雄期升至峰值(均值 0.435),乳熟期略有下降(均值 0.394),整体呈先升后缓降态势,且不同地块间存在明显的空间异质性。

(2)拔节期至抽雄期玉米长势整体向好且分布均匀,为生长高峰期;抽雄期至乳熟期以变差为主,但部分地块仍具活力。拔节期至抽雄期传统耕作增幅最大(0.365),变化速率(0.010)显著高于免耕(0.009),得益于 LAI 与 CWC 的高贡献;抽雄期至乳熟期免耕降幅最小(0.038),变化速率(0)明显优于少耕(-0.001)和传统耕作(-0.002),主要归因于 CAB 转向抑制衰减能力,从而形成“前期传统耕作驱动强、后期免耕稳长能力优”的阶段性差异格局。

(3)提出的长势差异性分析方法能够准确揭示玉米阶段性长势差异,并定量分析各监测指标在关键生育期的作用,从而为区域长势动态监测和田间管理提供有效参考。但存在指标反演、权重设置及样本数量等方面的不确定性,未来可通过地面校准与多源遥感协同反演、优化赋权和跨区域验证等途径加以改进。

参 考 文 献

[1] 韩晓增,邹文秀. 东北黑土地保护利用研究足迹与科技开发展望[J]. 土壤学报, 2021, 58(6): 1341-1358.
Han Xiaozeng, Zou Wenxiu. Research perspectives and footprint of utilization and protection of black soil in Northeast China[J]. Acta Pedologica Sinica, 2021, 58(6): 1341-1358. (in Chinese)

[2] 李保国,刘忠,黄峰,等. 巩固黑土地粮仓保障国家粮食安全[J]. 中国科学院院刊, 2021, 36(10): 1184-1193.
Li Baoguo, Liu Zhong, Huang Feng, et al. Ensuring national food security by strengthening high-productivity black soil granary in Northeast China[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2021, 36(10): 1184-1193. (in Chinese)

[3] 国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2022.

[4] Yang X M, Zhang X P, Deng W, et al. Black soil degradation by rainfall erosion in Jilin, China[J]. Land Degradation & Development, 2003, 14(4): 409-420.

[5] Wang X B, Cai D X, Hoogmoed W B, et al. Developments in conservation tillage in rainfed regions of North China[J]. Soil and Tillage Research, 2006, 93(2): 239-250.

[6] Li R, Hou X Q, Jia Z K, et al. Effects on soil temperature, moisture, and maize yield of cultivation with ridge and furrow mulching in the rainfed area of the Loess Plateau, China[J]. Agricultural Water Management, 2013, 116: 101-109.

[7] Sihu A, Sekhon N K, Thind S S, et al. Soil temperature, growth and yield of maize (*Zea mays* L.) as affected by wheat straw mulch[J]. Archives of Agronomy and Soil Science, 2007, 53(1): 95-102.

[8] Chen Y, Liu S, Li H, et al. Effects of conservation tillage on corn and soybean yield in the humid continental climate region of Northeast China[J]. Soil and Tillage Research, 2011, 115-116: 56-61.

[9] Ren B, Dong S, Liu P, et al. Ridge tillage improves plant growth and grain yield of waterlogged summer maize[J]. Agricultural Water Management, 2016, 177: 392-399.

[10] Lü Y J, Zhang X L, Gong L, et al. Long-term reduced and no tillage increase maize (*Zea mays* L.) grain yield and yield stability in Northeast China[J]. European Journal of Agronomy, 2024, 158: 127217.

[11] Zhang S X, Chien X W, Jia S X, et al. The potential mechanism of long-term conservation tillage effects on maize yield in the black soil of Northeast China[J]. Soil and Tillage Research, 2015, 154: 84-90.

[12] Mkoga Z J, Tumbo S D, Kihupi N I, et al. Extrapolating effects of conservation tillage on yield, soil moisture and dry spell mitigation using simulation modelling[J]. Physics and Chemistry of the Earth, 2010, 35(13-14): 686-698.

[13] 黄青,唐华俊,周清波,等. 东北地区主要作物种植结构遥感提取及长势监测[J]. 农业工程学报, 2010, 26(9): 218-223.
Huang Qing, Tang Huajun, Zhou Qingbo, et al. Remote-sensing based monitoring of planting structure and growth condition of major crops in Northeast China[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(9): 218-223. (in Chinese)

[14] 刘雪霄. 基于高分遥感影像的玉米产量预测研究[D]. 长春: 吉林农业大学, 2023.
Liu Xuexiao. Prediction of maize yield based on high-resolution remote sensing images[D]. Changchun: Jilin Agricultural University, 2023. (in Chinese)

[15] 刘佳琪. 基于无人机 RGB 图像的玉米长势监测研究[D]. 长春: 吉林农业大学, 2024.
Liu Jiaqi. Research on maize growth monitoring based on UAV RGB images[D]. Changchun: Jilin Agricultural University,

2024. (in Chinese)
- [16] 王大成. 基于无人机遥感影像的玉米长势指标监测及产量研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2024.
Wang Dacheng. Study of maize growth index monitoring and yield study based on UAV remote sensing images[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2024. (in Chinese)
- [17] Liu H, Sun J, Wan W, et al. Impact of conservation tillage on maize growth dynamics in black soils of Northeast China through multi-platform remote sensing[J]. Field Crops Research, 2026, 341: 110423.
- [18] 尹迎. 基于红边指数的玉米长势关键指标遥感监测研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2025.
Yin Ying. Remote sensing monitoring of key maize growth indicators based on red-edge vegetation indices[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2025. (in Chinese)
- [19] 杨凤玉. 莫旗气象要素与玉米生育期的相关分析[J]. 科技创新与应用, 2016(32): 282.
Yang Fengyu. Correlation analysis between meteorological factors and maize growth stages in Molidawa Banner[J]. Technology Innovation and Application, 2016(32): 282. (in Chinese)
- [20] 张益玮. 基于 SAR 与光学遥感影像的玉米秸秆覆盖度反演研究[D]. 鞍山: 辽宁科技大学, 2023.
Zhang Yiwei. Improving the crop residue cover estimation with combined use of optical and SAR remote sensing images[D]. Anshan: University of Science and Technology Liaoning, 2023. (in Chinese)
- [21] 赵欣伟. 基于 PROSAIL 模型的玉米营养元素遥感诊断方法研究[D]. 长春: 吉林大学, 2025.
Zhao Xinwei. Remote sensing diagnosis of maize nutrient elements based on the PROSAIL model[D]. Changchun: Jilin University, 2025. (in Chinese)
- [22] You N, Dong J, Huang J, et al. The 10-m crop type maps in Northeast China during 2017—2019[J]. Scientific Data, 2021, 8(1): 41.
- [23] 赵丽华, 张超, 王贝贝, 等. 基于 UAV 图像和 SAM 弱监督学习的黑土区保护性耕作玉米秸秆识别方法[J]. 农业机械学报, 2026, 57(3): 87–96.
Zhao Lihua, Zhang Chao, Wang Beibei, et al. Maize straw identification method for conservation tillage in black soil area based on UAV imagery and SAM weak supervision learning[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2026, 57(3): 87–96. (in Chinese)
- [24] Liang Z, Du J, Yu W, et al. Evaluating maize residue cover using machine learning and remote sensing in the meadow soil region of Northeast China[J]. Remote Sensing, 2024, 16(21): 3953.
- [25] 程介虹, 陈争光, 衣淑娟. 最小相关系数的多元校正波长选择算法[J]. 光谱学与光谱分析, 2022, 42(3): 719–725.
Cheng Jiehong, Chen Zhengguang, Yi Shujuan. Wavelength selection algorithm based on minimum correlation coefficient for multivariate calibration[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2022, 42(3): 719–725. (in Chinese)
- [26] 蒙继华. 农作物长势遥感监测指标研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院(遥感应用研究所), 2006.
Meng Jihua. Research to crop growth monitoring indicators with remote sensing[D]. Beijing: Graduate School of Chinese Academy of Sciences (Institute of Remote Sensing Applications), 2006. (in Chinese)
- [27] 蔡建楠, 刘锦帮, 肖凡, 等. 基于 Sentinel-2 卫星数据的中山市植被叶面积指数反演及空间分析[J]. 环境监控与预警, 2019, 11(5): 80–83.
Cai Jiannan, Liu Jinbang, Xiao Fan, et al. Inversion and spatial analysis of vegetation leaf area index in Zhongshan City based on Sentinel-2 data[J]. Environmental Monitoring and Forewarning, 2019, 11(5): 80–83. (in Chinese)
- [28] 王宁德. 基于多源遥感的梨树县春玉米氮素诊断研究[D]. 焦作: 河南理工大学, 2024.
Wang Ningde. Nitrogen diagnosis of spring maize in Lishu County based on multi-source remote sensing[D]. Jiaozuo: Henan Polytechnic University, 2024. (in Chinese)
- [29] 李瑞平, 谢瑞芝, 罗洋, 等. 典型黑土区不同保护性耕作方式对玉米生长发育及产量形成的影响[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2023, 32(1): 71–82.
Li Ruiping, Xie Ruizhi, Luo Yang, et al. Effects of conservation tillage methods on maize growth and yields in a typical black soil region[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2023, 32(1): 71–82. (in Chinese)
- [30] Qian Y, Zhang Z, Jiang F, et al. Impacts of tillage treatments on soil physical properties and maize growth at two sites under different climatic conditions in black soil region of Northeast China[J]. Soil and Tillage Research, 2025, 248: 106471.
- [31] 苏伟, 朱德海, 苏鸣宇, 等. 基于时序 LAI 的地块尺度玉米长势监测方法[J]. 资源科学, 2019, 41(3): 601–611.
Su Wei, Zhu Dehai, Su Mingyu, et al. Field-scale corn growth monitoring using time series LAI[J]. Resources Science, 2019, 41(3): 601–611. (in Chinese)
- [32] 苏伟, 郭皓, 赵冬玲, 等. 基于优化 PROSAIL 叶倾角分布函数的玉米 LAI 反演方法[J]. 农业机械学报, 2016, 47(3): 234–241.
Su Wei, Guo Hao, Zhao Dongling, et al. Leaf area index retrieval for maize canopy using optimized leaf angle distribution function of PROSAIL model[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(3): 234–241. (in Chinese)
- [33] 周敏姑, 闫云才, 高文, 等. 基于多光谱遥感和 CNN 的玉米地上生物量估算模型[J]. 农业机械学报, 2024, 55(9): 238–248.
Zhou Mingu, Yan Yuncai, Gao Wen, et al. Estimation model of maize aboveground biomass based on multispectral remote sensing and CNN[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(9): 238–248. (in Chinese)
- [34] 郑兴明, 丁艳玲, 赵凯, 等. 基于 Landsat 8 OLI 数据的玉米冠层含水量反演研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2014, 34(12): 3385–3390.
Zheng Xingming, Ding Yanling, Zhao Kai, et al. Estimation of vegetation water content from Landsat 8 OLI data[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2014, 34(12): 3385–3390. (in Chinese)
- [35] 左溪冰, 刘智, 金飞, 等. 面向高光谱影像小样本分类的全局-局部特征自适应融合方法[J]. 地球信息科学学报, 2023, 25(8): 1699–1716.
Zuo Xibing, Liu Zhi, Jin Fei, et al. Global-local feature adaptive fusion method for small sample classification of hyperspectral images[J]. Journal of Geo-Information Science, 2023, 25(8): 1699–1716. (in Chinese)