

基于作物生长模型和遥感数据同化的区域玉米产量估算

靳华安¹, 王锦地^{1*}, 柏延臣¹, 陈桂芬², 薛华柱¹

(1. 北京师范大学地理学与遥感科学学院, 遥感科学国家重点实验室, 北京 100875;

2. 吉林农业大学信息技术学院, 长春 130118)

摘要: 为了将遥感观测到的玉米生长期作物冠层方向反射波谱的时间序列变化信息用于区域玉米产量估算, 该文将时间序列中分辨率成像光谱仪 (moderate resolution imaging spectroradiometer, MODIS) 数据和高空间分辨率 Landsat TM 遥感观测数据相结合, 以叶面积指数 (LAI) 作为耦合作物生长模型 (crop environment resource synthesis-Maize, CERES-Maize) 和植被冠层反射率模型 (scattering by arbitrarily inclined leaves, SAIL) 的关键参数, 提出了将耦合模型与时间序列遥感观测数据同化进行区域玉米产量估算的方案。该文选择吉林省榆树市为研究区, 采用 MODIS 和 Landsat TM 2 种尺度数据集, 利用 SCE-UA (shuffled complex evolution method developed at the University of Arizona) 算法分别进行玉米产量同化估产研究, 得到玉米单产空间分布的估计结果, 结合遥感估算的种植面积求算榆树市玉米总产量。结果表明, 与玉米统计总产量相比, 2007、2008 和 2009 年遥感数据同化估算的总产量误差分别为 9.15%、14.99% 和 8.97%; 与仅利用 CERES-Maize 模型模拟得到的产量误差相比, 3 a 间遥感估算总产量的误差分别减小了 7.49%、1.21% 和 5.23%, 且采用 MODIS 和 TM 遥感数据估算的玉米产量表现了其空间差异性。利用榆树市 3 a 间玉米产量的明显差异, 分析了时序遥感数据对作物长势和产量变化信息的表达能力, 同年份内时序归一化差值植被指数越大, 对应的玉米产量越高; 年际间遥感观测反射率的差异通过数据同化方法能够反映年际间玉米产量差的变化。该文提出的玉米估产方案为将来进一步结合多源遥感数据、植被冠层反射率模型与作物生长模型进行区域玉米估产研究提供了参考。

关键词: 遥感, 作物, 模型, 产量估算, 数据同化

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2012.06.027

中图分类号: TP79; S127

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2012)-06-0162-12

靳华安, 王锦地, 柏延臣, 等. 基于作物生长模型和遥感数据同化的区域玉米产量估算[J]. 农业工程学报, 2012, 28(6): 162-173.
Jin Hua'an, Wang Jindi, Bo Yanchen, et al. Estimation on regional maize yield based on assimilation of remote sensing data and crop growth model[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(6): 162-173. (in Chinese with English abstract)

0 引言

及时、准确、大范围地对作物长势进行监测和产量预测对于指导农业生产、保障粮食安全、保持农业可持续发展具有重要意义。目前, 作物生长模型, 如 CERES-Maize (crop environment resource synthesis-Maize) 模型, 已经在农作物生长评估、精准农业、农田管理决策、气候变化影响等领域得到了广泛地应用。随着科学技术的发展和农业应用需求的驱动, 遥感数据与作物生长模型结合是当前作物产量估算研究的重要内容和发展趋势之一。遥感数据能够宏观监测作物长势, 作物生长模型通过计算机模拟可动态反映作物生长发育过程, 两者结合具有一定的应用潜力。

遥感信息与作物生长模型集成的方法分为驱动法和

同化法^[1-4], 其中, 同化法受到了更多的关注。在同化过程中可以同化遥感反演值, 也可以直接同化光谱反射率, 而在同化后者时, 植被冠层反射率模型, 如 SAIL 模型 (scattering by arbitrarily inclined leaves), 需要与作物生长模型相耦合。目前, 中分辨率成像光谱仪 (moderate resolution imaging spectroradiometer, MODIS) 数据作为主要的遥感数据源被广泛应用于区域农作物长势监测和产量估算研究^[5-8]。不过在农田地块较小、分布较为零散、破碎化程度较高的区域, 很难保证 MODIS 像是纯像元, 此时需要结合更高空间分辨率的遥感影像进行数据同化研究。以往的同化估产研究往往只针对某一年的遥感数据估算农作物的单位产量, 缺乏分析遥感数据和同化算法在年内作物产量及年际间产量差估测中的作用。

针对上述问题, 本文选择吉林省榆树市玉米种植区作为研究对象, 以 2007、2008 和 2009 年 3 个玉米生长季为研究时段, 提出了基于多时相 MODIS 和 TM 观测数据的区域玉米产量同化估算方案。针对 MODIS 像元和亚像元尺度, 分别进行玉米产量同化估产研究, 得到玉米像元及亚像元的单产估计结果, 结合遥感估算的玉米种植面积, 计算榆树市 2007、2008 和 2009 年玉米总产量。在此基础上分析了时间序列遥感数据对作物长势和产量变化信息的表达能力, 及其在年内产量及年际间产量差

收稿日期: 2011-06-08 修订日期: 2011-12-08

基金项目: 国家“863”计划项目 (2006AA10A309); 国家“973”计划项目课题 (2007CB714407); 国家自然科学基金项目 (40871163); 国家“863”计划项目 (2006AA120108)

作者简介: 靳华安 (1984-), 男, 山东东平人, 博士, 主要从事定量遥感研究。北京 北京师范大学地理学与遥感科学学院, 100875。

Email: jinhuaan@mail.bnu.edu.cn

*通信作者: 王锦地, 女, 北京人, 教授, 主要从事定量遥感研究。北京 北京师范大学地理学与遥感科学学院, 100875。Email: wangjd@bnu.edu.cn

估测过程中的作用。

1 研究区概况

研究区域选主要玉米产区—吉林省中北部的榆树市(图 1)，地理坐标介于北纬 44°30'57"~45°15'02"、东经 126°01'44"~127°05'09"之间，属于温带半湿润地区，气候多受季风影响，年均气温 4.1~5.6℃，年均降雨量 500~900 mm，年均日照 2 200~3 000 h 以上，雨热同季。区域土壤肥沃，农业生产条件较为优越。

榆树市土地利用类型主要分为旱地、水田、河渠及湖泊、有林地、城镇用地及农村居民点。旱地无灌溉设施，所需水分主要源于自然降水。旱地中玉米种植面积最广，其次为大豆，此外还有少许烤烟、蔬菜和果园等。榆树市玉米作物生长季大致从 5 月初到 9 月末，主推玉米品种有郑单 958、先玉 335、32D22、平安 18 等。榆树市土壤类型主要有黑土、黑钙土，草甸土和冲积土。

2007、2008 和 2009 年玉米生长期期间，对典型示范区(图 1)进行了土壤参数、作物品种、田间管理措施等资料收集、野外调查和测量；获取了多种遥感数据，测量了玉米叶面积指数、土壤和作物冠层反射率、叶片组分光谱数据等，并对相关试验地块测算了玉米单产。

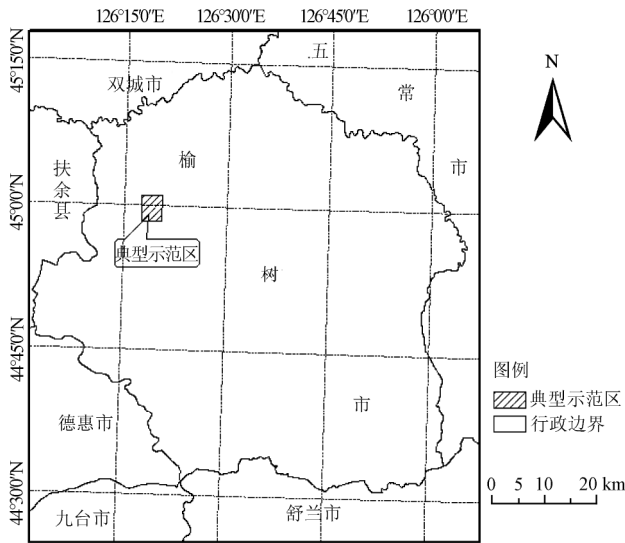


图 1 研究区位置图
Fig.1 Location map of study area

2 数据准备

2.1 土地利用/覆被数据

榆树市土地利用/覆被数据由中科院东北地理与农业生态研究所 2005 年通过对 30 m 分辨率的遥感图像进行人工目视解译得到。榆树市土地利用类型主要包括旱地、水田、河渠及湖泊、有林地、城镇用地及农村居民点(图 2)。通过 GIS 矢量转栅格的方法，将榆树市土地利用矢量图转换为 30 m 分辨率的栅格图，然后通过 GIS 空间分析方法将土地利用栅格图与 500 m 分辨率的 MODIS 影像图进行叠加分析，判断每个 MODIS 像元中旱地作物所占的比例(图 3)。

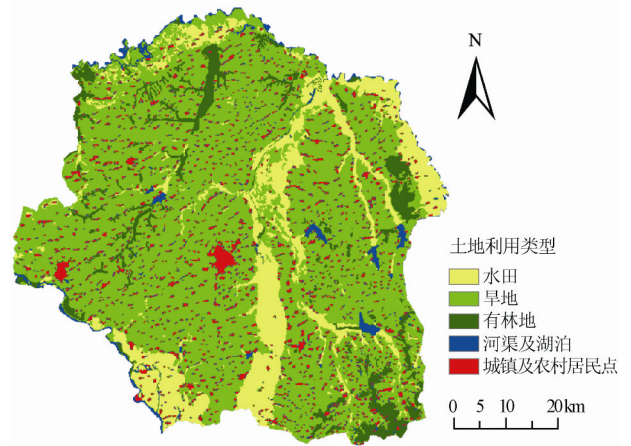


图 2 榆树市土地利用现状图
Fig.2 Land use map of Yushu city

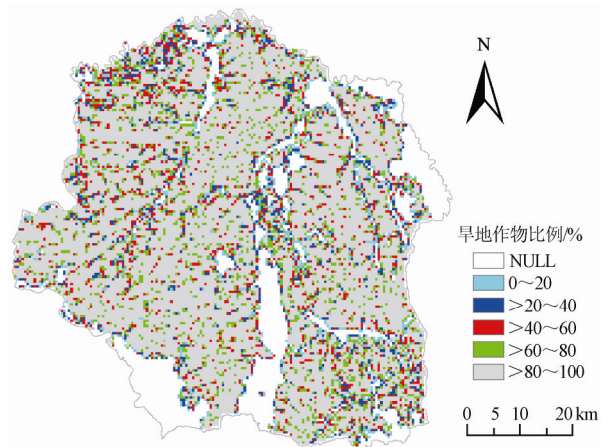


图 3 MODIS 尺度上旱地作物比例图
Fig.3 Ratio map of rain fed crops at MODIS scale

2.2 气象数据

研究所需的气象数据由吉林农业大学提供，气象要素包括日最高气温、日最低气温、降水量和日照时数，其中 2007 年气象数据来自于榆树市气象站，2008 和 2009 年气象数据来自于吉林农业大学在榆树市架设的气象站，不过 2008 年缺测日照时数数据。考虑到相同纬度，邻近地区日照时数相差不多，在此利用扶余县气象站 2008 年日照时数数据代替榆树市日照情况。扶余县日照时数数据由中科院东北地理与农业生态研究所提供。气象站点观测的气象要素主要用作 CERES-Maize 模型的驱动数据。

2.3 多源遥感数据

本文采用了 Landsat TM 和 MODIS 2 种不同来源的遥感数据，均从相应的数据发布网站获得。

从 MODIS 数据下载网站 (<https://wist.echo.nasa.gov/api/>) 获取到 2007、2008 和 2009 年第 5 版本 V005 的陆地表面反射率产品 MOD09A1，空间分辨率为 500 m。生长季内共获取了每年 10 次遥感观测数据，涉及到的年积日(day of year, DOY)分别为 169、177、185、193、201、209、217、225、233、241，这些日期均是 MOD09A1 标识的观测日期。MOD09A1 数据除

包含反射率信息外,还包括观测天顶角、太阳天顶角、相对方位角、实际的年积日及质量控制信息等。此外,下载了 MCD43A4 产品数据,即校正到天顶观测的反射率数据 (nadir BRDF-adjusted reflectance, NBAR),空间分辨率为 500 m。

从 Landsat 数据下载网站 (<http://glovis.usgs.gov/>) 获取到 2007 年 7 月 28 日 (DOY209)、8 月 22 日 (DOY234), 8 月 29 日 (DOY241) 和 9 月 30 日 (DOY273) 4 景 TM5 影像,轨道号分别为 118/029、117/029, 118/029 和 118/029。

采用 MOD09A1 数据构建了时间序列遥感观测数据集,用来进行同化估产,研究所用反射率为 MOD09A1 红光和近红外波段反射率;NBAR 数据已校正到天顶观测,不存在因观测角度差异引起的地表反射率的变化,该数据主要用来判断 MODIS 像元(或亚像元)是否被玉米作物覆盖;2007 年 DOY209、234 和 241 处 TM 数据主要连同 MOD09A1 数据一起构成同化所需的时间序列遥感观测数据集;2007 年 DOY273 处农作物已基本成熟或收割,此时比较容易区分农作物和其他地类,主要用来辅助修正土地利用/覆被数据。利用 MODTRAN 大气校正软件对 2007 年 DOY209、234 和 241 的 TM 影像进行大气校正,得到 TM 地表反射率信息。

2.4 地面实测及统计数据

2007、2008 和 2009 年玉米生长期间,吉林农业大学在典型示范区(图 1)内的相关试验地块采用手工测量的方法得到了地面实测 LAI,并且在玉米收割期实测了玉米产量(表 1)。此外,吉林农业大学还提供了榆树市 2007、2008 和 2009 年主推玉米品种、种植面积及产量等信息(表 2),并收集到有关主推玉米品种的籽粒数信息(表 3)。

表 1 典型示范区内实测玉米 LAI 及单产

Table 1 Measured LAI and yield of maize in typical region

年份	叶面积指数 LAI				实测单产/ (kg·hm ⁻²)
	DOY160	DOY161	DOY166	DOY195	
2007 年	0.088	—	—	3.663	5229.03
2008 年	—	—	0.263	—	9040.42
2009 年	—	0.316	—	—	7897.38

注: DOY160、DOY161、DOY166 和 DOY195 分别表示特定年份的第 160、161、166 和 195 天。

表 2 榆树市玉米种植面积及产量统计

Table 2 Statistical planting area and yield of maize in Yushu city

统计指标	面积/hm ²	产量/t	单产/(kg·hm ⁻²)
2007 年	171733	1085860	6323
2008 年	237304	2026520	8540
2009 年	237001	1915860	8084

表 3 玉米品种籽粒数

Table 3 Kernels number of maize varieties

玉米品种	穗行数/行	行粒数/粒	最大籽粒数/粒
郑单 958	14~16	40	640
先玉 335	14~16	34	544
平安 18	16~18	43	774
32D22	16~20	47	940

地面实测 LAI 和产量信息主要用来验证 CERES-Maize 模型在榆树市的适用性和可靠性;榆树市玉米种植面积主要用来评价遥感提取玉米种植面积的精度;榆树市玉米产量数据用来验证遥感数据同化估产结果;玉米品种籽粒数信息,主要用来确定 CERES-Maize 模型中与籽粒数有关的品种遗传参数。

3 研究方法

2007、2008 和 2009 年玉米生长期间,课题组与吉林农业大学合作,对典型示范区(图 1)进行了土壤参数、作物品种、田间管理措施等资料收集、野外调查和测量;试验期间获取了多种遥感数据(如 MODIS、TM),测量了玉米 LAI、土壤反射率以及玉米冠层反射率、叶片组分光谱数据等。根据实地调查,榆树市在 MODIS 遥感像元的观测尺度上有大面积的玉米种植区,特别适合于长时间序列但低空间分辨率的遥感数据同化研究的需求。榆树市 2007、2008 和 2009 年 3 a 间玉米产量存在明显差异,为本文研究遥感估产能力提供了难得基础数据。

将 TM、MODIS 和土地利用图进行空间配准,对土地利用图与 MODIS 数据进行叠加,判断 MODIS 像元中旱地作物所占的比例。利用 MODIS 数据分别在像元和亚像元尺度提取玉米作物种植面积和空间分布,结合可用的 TM 遥感观测,提取 MODIS 像元和亚像元尺度的玉米冠层反射率信息,构成时间序列遥感观测数据集。

将气象数据、土壤数据、田间观测和玉米品种遗传参数作为模型输入参数,驱动 CERES-Maize 模型,模拟玉米的生长发育进程。为了将遥感观测到的玉米生长期间作物冠层方向反射波谱的时间序列变化信息用于区域玉米产量估算,采用遥感数据和作物生长模型同化的方法,通过叶面积指数(leaf area index, LAI)将作物生长模型 CERES-Maize 与冠层反射率模型 SAIL 相耦合,利用耦合模型模拟得到遥感观测时的冠层反射率。通过对 CERES-Maize 和 SAIL 模型参数的敏感性分析确定待优化参数。针对玉米作物所在的 MODIS 像元和亚像元,利用时间序列遥感观测反射率和 SCE-UA 算法(shuffled complex evolution method developed at the University of Arizona)优化模型的待优化参数,得到参数的最优估计值,进而估算 2007、2008 和 2009 年榆树市玉米产量,结合玉米产量统计数据对同化估产结果进行验证。在此基础上,通过比较年际间及年内产量的时空变化,进一步探讨利用时间序列遥感信息与同化方法估算作物产量的能力,分析时间序列遥感数据在年内产量及年际间产量差估测过程中的作用。

3.1 MODIS 像元和亚像元尺度的玉米信息提取

随着玉米作物的生长, LAI 逐渐增大,且在玉米吐丝期达到最大,随后 LAI 呈逐渐减小的趋势。提取 2007、2008 和 2009 年 DOY169、177、185、193、201、209、217、225、233、241 共 10 次旱地作物覆盖的 NBAR(nadir BRDF-adjusted reflectance)像元及亚像元的红光和近红外波段反射率,计算比值植被指数(ratio vegetation index, RVI)。

RVI 的计算公式如式 (1) 所示

$$RVI = NIR / R \quad (1)$$

式中： NIR 代表遥感近红外波段反射率， R 代表红光波段反射率。

考虑到某些日期受天气等因素影响，难免存在质量不好的像元，导致时间序列 RVI 存在波动现象，利用 S-G 滤波 (Savitzky-Golay) [9] 对 RVI 进行平滑，得到 RVI 时间序列变化廓线。对玉米作物覆盖的像元 (或亚像元) 而言，时间序列 RVI 应该遵循玉米 LAI 的变化规律。榆树市旱地作物中玉米占相当大的比例，其吐丝期一般在 7 月下旬左右，因此，玉米作物覆盖的像元 (或亚像元) RVI 应该也在 7 月下旬左右达到最大。如果旱地纯像元 (或亚像元) RVI 遵从这一规律，则视为玉米覆盖的像元 (或亚像元)。经统计，2007、2008 和 2009 年玉米覆盖的 MODIS 像元数分别为 7359、9756、9295 个；含有玉米信息的 MODIS 混合像元数分别为 2271、1135 和 2402 个 (表 4)。利用 MODIS 数据估算的 2007、2008 和 2009 年玉米种植面积和统计面积之间的相对误差分别为 2.99%、9.56% 和 7.88%，其误差在 10% 以内，说明了利用本文建议的方法估算玉米种植面积是可行的。

表 4 MODIS 数据估算的榆树市玉米种植面积

Table 4 Estimation of maize planting area using MODIS data in Yushu city

年份	含玉米信息的 MODIS 像元		含玉米信息的 MODIS 亚像元		估算总面积 /hm ²	统计面积 /hm ²	相对误差 /%
	像元个数	面积/hm ²	混合像元个数	面积/hm ²			
2007 年	7359	153285.485	2271	23586.667	176872.152	171733	2.99
2008 年	9756	202824.305	1135	11788.847	214613.152	237304	9.56
2009 年	9295	193304.750	2402	25014.111	218318.861	237001	7.88

3.2 模型与优化算法

3.2.1 CERES-Maize 模型

CERES-Maize 模型 [10] 源自农业技术推广决策支持系统，是经过大量试验资料验证过的、动态的、机理性强的玉米作物生长模型，可以模拟土壤水分平衡、氮素平衡、物候发育和作物生长过程等。驱动 CERES-Maize 模型需要气象数据、土壤数据、作物管理数据和品种遗传参数。

模型中气象数据包括日太阳辐射、日最高气温、日最低气温和日降水量，其中温度和降水数据来自于气象站点，太阳辐射由日照时数通过埃斯屈朗公式 [11] 转换得到；土壤性质数据包括田间持水量、土壤容重、有机碳含量、土壤粒径百分比等描述土壤水文和化学的参数，均从《吉林土壤》 [12] 获得；作物管理参数包括种植日期、种植密度、行间距、施肥日期和施肥量等，根据榆树地区玉米种植情况设定；作物品种遗传参数有 6 个 (表 5)，通过模型校准方法确定。

表 5 CERES-Maize 模型中作物品种遗传参数信息

Table 5 Information about genetic parameters of maize varieties in CERES-Maize model

参数	物理意义	取值范围	单位
$P1$	幼苗期生长特性参数，指完成非感光幼苗期 (出苗至幼苗末期) 大于 8℃ 热量时间	100~400	℃·d
$P2$	光周期敏感参数，指光敏感期大于临界日长 (12.5 h) 1 h 的光周期导致发育 (抽雄) 延迟的程度	0.0~0.8	—
$P5$	灌浆期特性参数，指吐丝至生理成熟期大于 8℃ 的热量时间	600~1000	℃·d
$G2$	单株最大籽粒数	560~850	粒
$G3$	潜在灌浆速率参数，指最适灌浆条件下线性灌浆阶段的籽粒灌浆速率	5~12	mg/(粒·d) ⁻¹
$PHINT$	出叶间隔特性参数	30~80	℃·d

将 CERES-Maize 模型应用到区域尺度，需要对其进行区域校准，即对特定地区确定代表性品种的过程。目前大多数研究主要基于大量的地面观测数据，利用试错法 [13-14] 校准作物生长模型。在区域尺度且地面观测数据较少的情况下，不适于应用试错法。考虑到一定地理范围内，受温度和日照条件影响，同种作物的种植习惯及生长发育过程均固定在一定时间段内。比如榆树市玉米种植日期一般在 4 月中下旬至 5 月中上旬左右、7 月下旬左右开始吐丝、8 月中上旬左右进行灌浆、9 月中旬后收割，这就是一般年份的玉米生育时期。在 CERES-Maize 模型中，品种遗传参数幼苗期生长特性参数 ($P1$)、光周期敏感参数 ($P2$)、灌浆期特性参数 ($P5$) 和出叶间隔特性参数 ($PHINT$) 决定了玉米的生育时期，单株最大籽粒数 ($G2$) 和潜在灌浆速率参数 ($G3$) 仅影响作物产量。以 2007 年为基准年，将种植日期、幼苗期生长特性参数 ($P1$)、光周期敏感参数 ($P2$)、灌浆期特性参数 ($P5$) 和出叶间隔特性参数 ($PHINT$) 分别在各自取值区间内均匀采样 10000 次，然后将不同的参数采样组合代入 CERES-Maize 模型进行模拟，判断落入到玉米合理生育时期的采样组合，经过反复试验，确定出满足榆树市玉米生育时期的遗传参数取值范围。将主推玉米品种最大籽粒数的平均值作为 CERES-Maize 模型中单株最大籽粒数 ($G2$) 的取值，结合 2007 年地面实测产量数据，在幼苗期生长特性参数 ($P1$)、光周期敏感参数 ($P2$)、灌浆期特性参数 ($P5$) 和 $PHINT$ 取区间中值、单株最大籽粒数 ($G2$) 固定的情况下，模拟玉米产量，然后和地面实测产量相比较，当模拟和实测产量基本吻合时，潜在灌浆速率参数 ($G3$) 的取值作为该参数的校准值。

利用校准的 CERES-Maize 模型分别预测 2007、2008 和 2009 年玉米 LAI 和产量，比较模拟输出结果与玉米观测数据，评价模型和品种遗传参数取值的可靠程度和适用性，其中幼苗期生长特性参数 ($P1$)、光周期敏感参数 ($P2$)、灌浆期特性参数 ($P5$) 和出叶间隔特性参数

(PHINT) 取区间中值。从表 6 可以看出, 在玉米生长初期模型模拟的 LAI 要高于实测 LAI; 玉米生长中期 (如 2007 年 DOY195 处) 模型模拟的 LAI 与实测 LAI 比较吻合。经计算, 2007 年模型产量模拟值与实测值之间的相对误差为 2.13%, 模拟值与统计值之间的相对误差为 19.06%; 2008 年产量模拟值与实测值之间的相对误差为 12.48%, 模拟值与统计值之间的相对误差为 7.35%; 2009

年产量模拟值与实测值之间的相对误差为 4.66%, 模拟值与统计值之间的相对误差为 6.86%。由此可见, 2007、2008 和 2009 年利用 CERES-Maize 模型模拟的产量均存在不同程度的低估现象。总体而言, 不管从 CERES-Maize 模型的单点验证, 还是区域验证来看, CERES-Maize 模型模拟产量的相对误差在 20% 以内, 证明了 CERES-Maize 模型在本地区的适用性和可靠性。

表 6 玉米生长 LAI 和产量模型预测值、实测值与统计值之间的比较

Table 6 Comparison among model predictions, field measurements and statistical data of corn growth LAI and yield

年份	LAI								产量/(kg·hm ²)		
	DOY160		DOY195		DOY166		DOY161		模型模拟值	地面实测值	统计值
	模型模拟值	地面实测值	模型模拟值	地面实测值	模型模拟值	地面实测值	模型模拟值	地面实测值			
2007	0.204	0.088	3.382	3.663	—	—	—	—	5117.60	5229.03	6323.00
2008	—	—	—	—	0.714	0.263	—	—	7912.50	9040.42	8540.00
2009	—	—	—	—	—	—	0.702	0.316	7529.70	7897.38	8084.00

注: DOY160、DOY161、DOY166、DOY195 分别表示特定年份的第 160、161、166、195 天。

3.2.2 植被冠层反射模型 SAIL

SAIL 模型^[15]较好地反映了水平均匀植被叶面积指数和叶倾角分布对冠层方向反射变化的影响。模型输入参数包括太阳和观测几何信息、叶片组分光谱 (叶片反射率和透射率)、土壤反射率、散射比, 叶面积指数 LAI 以及叶倾角分布类型等信息; 模型输出参数是植被冠层反射率。

叶片组分光谱主要根据地面测量以及中国典型地物波谱数据库^[16]中玉米组分波谱数据进行设定; 土壤反射率主要根据地面测量以及有关东北地区不同土壤类型反射率的研究成果^[17-18]进行设定; 散射比在晴空条件下变化不大, 将其固定在先验估计值上; 经实地调查发现, 榆树市玉米叶倾角分布类型主要为竖直型; LAI 是连接 SAIL 模型与 CERES-Maize 模型的重要变量, 将作物生长模型模拟的 LAI 作为 SAIL 模型的输入参数之一, 连同其他参数一起可模拟 MOD09A1 实际观测日期处的玉米冠层反射率。

3.2.3 参数敏感性分析

由于 CERES-Maize 模型和 SAIL 模型的结合点是 LAI, 敏感性分析的主要目的是试图找出影响玉米 LAI 随时间变化的关键参数, 以及影响作物冠层反射率的相关参数, 将这些参数作为同化过程中模型的重新初始化变量。

在局部敏感性和全局敏感性分析^[19]的基础上, 本文提出了一种新的敏感性分析方法, 将其命名为直方图比较法。其原理如下: 假设模型 A 中共有 n 个输入参数, $\{i | i \in (a, b, c, \dots, n)\}$, 参数在其各自取值区间内均匀采样 m 次。将每个参数的采样粒子进行随机组合可形成 $m \times n$ 的矩阵, 如式 (2) 所示, 其中每一列代表各参数的所有采样粒子, 每一行代表参数之间的组合。将每一行分别代入模型 A 可模拟得到 m 个结果 OUTPUT, 获取 OUTPUT 直方图, 这是所有可能的参数组合模拟得到的直方图, 在此称为“标准”直方图; 将参数 i 的所有采样

粒子均设定在区间中值 \bar{i} 处, 而其他参数仍保持原状态, 如式 (3) 所示, 再将每一行输入模型 A 模拟得到新的 OUTPUT 结果, 获取 OUTPUT 直方图, 在此称为“固定”直方图; 对比分析“标准”和“固定”2 种直方图, 如果两者变化较大, 说明参数 i 的固定引起了直方图变化, 即参数 i 的固定对模拟结果有较大影响, 表明参数 i 敏感; 如果两者相差不大, 说明参数 i 固定或者不固定对模拟结果没有影响, 即参数 i 不敏感。文中采样次数 $m=10\ 000$ 。

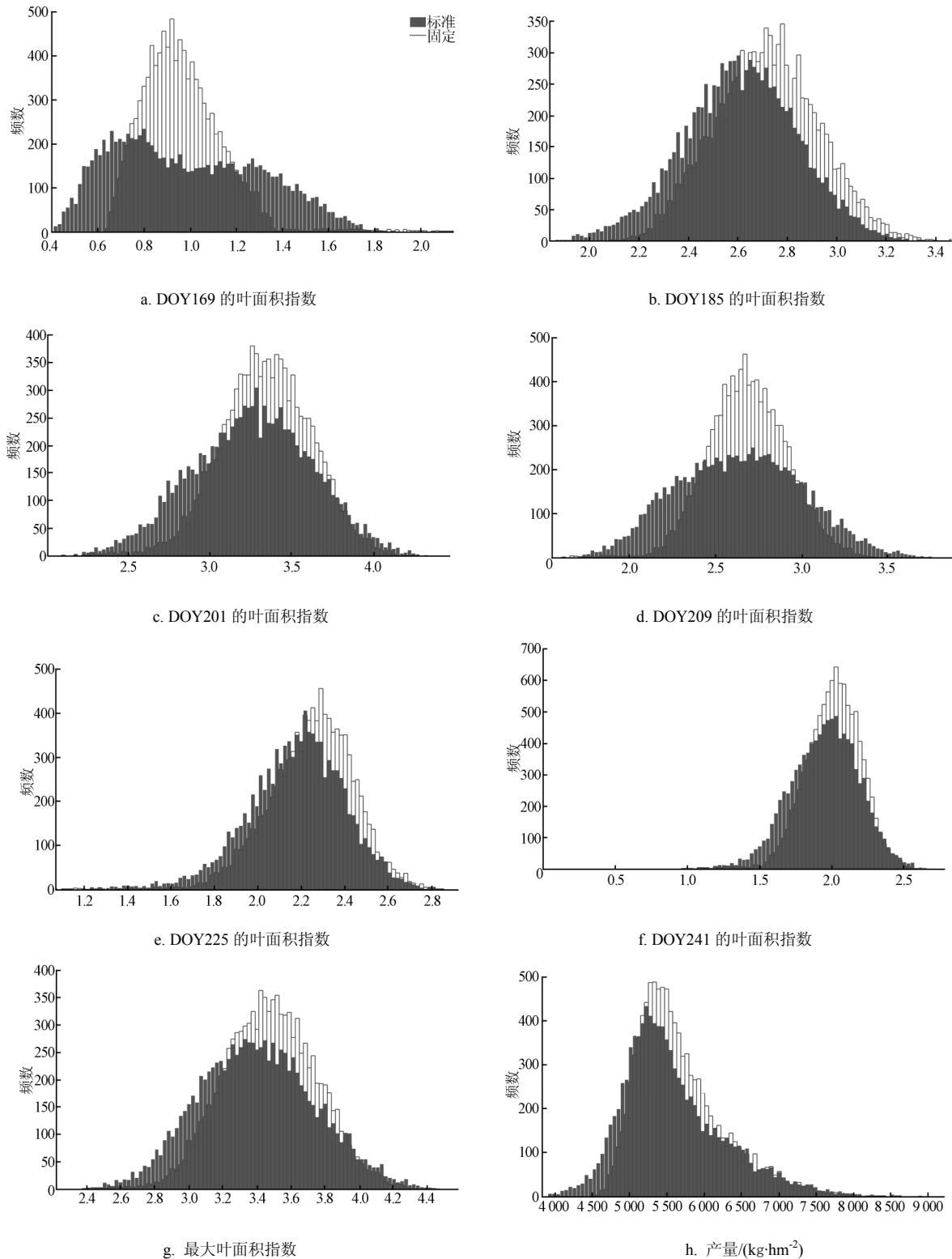
$$\begin{bmatrix} a_1 & b_1 & \dots & i_1 & \dots & n_1 \\ a_2 & b_2 & \dots & i_2 & \dots & n_2 \\ a_3 & b_3 & \dots & i_3 & \dots & n_3 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_m & b_m & \dots & i_m & \dots & n_m \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} a_1 & b_1 & \dots & \bar{i} & \dots & n_1 \\ a_2 & b_2 & \dots & \bar{i} & \dots & n_2 \\ a_3 & b_3 & \dots & \bar{i} & \dots & n_3 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_m & b_m & \dots & \bar{i} & \dots & n_m \end{bmatrix} \quad (3)$$

利用直方图比较法分别对 CERES-Maize 模型和 SAIL 模型进行参数敏感性分析, 得到 CERES-Maize 模型的敏感性参数为种植日期、种植密度和光周期敏感参数 (P2), SAIL 模型的敏感性参数为 LAI、叶片红光和近红外波段反射率。图 4 列出了 CERES-Maize 模型中玉米生长前期 (DOY169、DOY185)、中期 (DOY201、DOY209) 和后期 (DOY225、DOY241) 的 LAI、玉米生长季内最大 LAI 和产量对种植日期的敏感性。在遥感数据同化过程中, LAI 由 CERES-Maize 模型模拟得到, 因此本

文的待优化参数为种植日期、种植密度、光周期敏感参

数 (P2)、叶片红光和近红外波段反射率。



注：DOY169、DOY185、DOY201、DOY209、DOY225 和 DOY241 分别表示特定年份的第 169、185、201、209、225 和 241 天；其中玉米生长前期为 DOY169 和 DOY185；中期为 DOY201 和 DOY209；后期为 DOY225 和 DOY241。

图 4 CERES-Maize 模型中玉米生长的 LAI 和产量对种植日期的敏感性

Fig.4 Sensitivity of maize growth LAI and yield in CERESZ-Maize model to planting date

3.3 SCE-UA 优化算法

SCE-UA 算法^[20]是在控制随机搜索方法和遗传算法基础上发展起来的，此外还引入了复杂形分割与混合的思想，通过采用竞争演化和复合型混合的概念，继承了

全局搜索和复合型演化的特性。SCE-UA 算法灵活、应用面广泛，不拘泥于具体问题，对非线性优化问题能够获得准确的优化结果。

代价函数的表达式如下

$$J(x) = (x - x_b)^T B^{-1} (x - x_b) + \sum_{i=1}^n (y_i - H(LAI_i))^T R_i^{-1} (y_i - H(LAI_i)) \quad (4)$$

式中, $J(x)$ 为要求解的代价函数, 向量 x 代表待优化参数的取值; 向量 x_b 代表待优化参数的数学期望值; B 为向量 x 的误差协方差矩阵; i 为遥感观测的次数; n 为经质量控制后的总遥感观测次数; 向量 y_i 为第 i 次遥感观测红光和近红外反射率数据, 无量纲; R_i 为向量 y_i 的误差协方差矩阵; LAI_i 为 CERES-Maize 模型模拟的第 i 次遥感观测时刻的 LAI , m^2/m^2 ; $H(\cdot)$ 为 SAIL 模型; 上标 T 表示矩阵的转置。

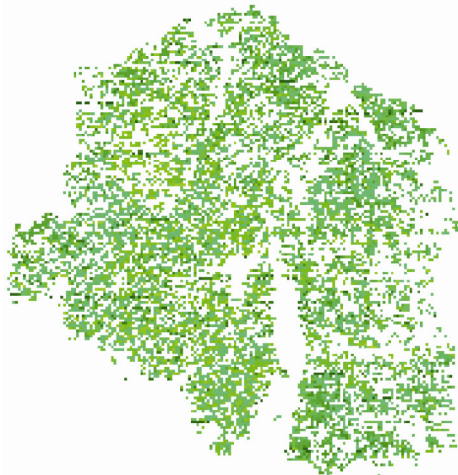
待优化参数包括种植日期、种植密度、光周期敏感参数 ($P2$)、叶片红光和近红外波段反射率。其中, 种植日期和种植密度的标准差根据当地玉米种植情况及实地调查情况确定; 光周期敏感参数 ($P2$) 的标准差根据 1.4.1 节 CERES-Maize 模型区域校准及模拟情况给定; 叶片红光和近红外波段反射率的标准差主要参考实地测量及中国典型地物波谱数据库^[16]中玉米组分波谱设定; 遥感观测反射率的误差主要根据文献[21-22]设定; B 和 R_i 均设为对角阵。

选用 SCE-UA 优化算法求解式 (4), 优化成功后与最小代价函数值对应的种植日期、种植密度、光周期敏感参数 ($P2$)、叶片红光和近红外波段反射率等 5 个参数取值称为“最优值”。将种植日期、种植密度和光周期敏感参数 ($P2$) 的“最优值”, 连同其他输入参数一起输入到 CERES-Maize 模型, 模拟得到数据同化后的产量结果。

4 结果与分析

4.1 榆树市玉米产量估算结果

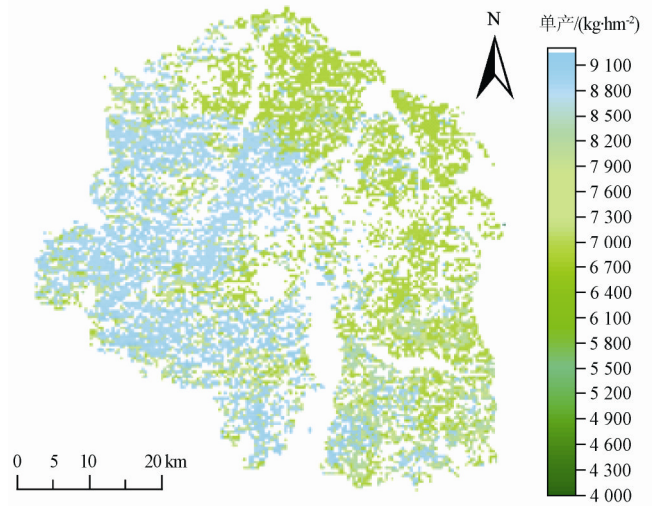
基于耦合的作物生长模型 CERES-Maize 和冠层反射率模型 SAIL, 采用玉米生长期 10 次 MODIS 观测数据和数据同化方法, 得到玉米单产估算结果。图 5 表示榆树市 2007、2008 和 2009 年利用遥感数据同化方法得到的玉米单产空间分布图。图 6 表示榆树市 2007、2008 和 2009 年 MODIS 玉米像元和亚像元尺度上得到的玉米单产分布直方图。从图 6 可看出, 榆树市 2007 年遥感同化估算单产在 $4\ 066.30 \sim 6\ 820.60\ kg/hm^2$ 之间; 2008 年遥感同化估算单产在 $7\ 406.40 \sim 8\ 613.9\ kg/hm^2$ 之间; 2009 年遥感同化估算单产在 $6\ 830.00 \sim 9\ 268.00\ kg/hm^2$ 之间。



a. 2007 年玉米单产分布图



b. 2008 年玉米单产分布图

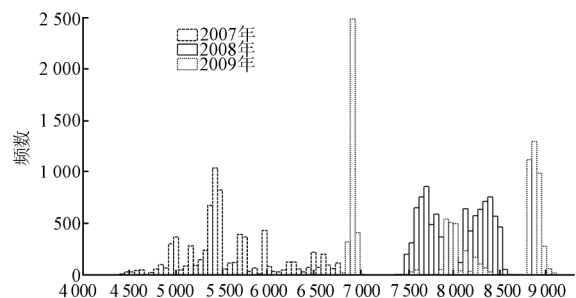


c. 2009 年玉米单产分布图

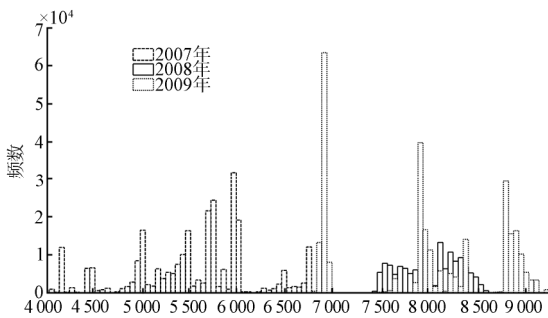
图 5 榆树市玉米单产同化结果分布图

Fig.5 Distribution maps of maize yield estimated with data assimilation method in Yushu city

榆树市玉米总产量估算通过玉米单产与种植面积实现: 遥感估算单产与对应像元或亚像元面积相乘, 求取像元或亚像元尺度的玉米产量, 再对其进行累积, 得到遥感估算的玉米总产量; CERES-Maize 模型估算的玉米总产量为模型模拟单产值与遥感估算面积的乘积。由此可见, 玉米单产和种植面积估算精度均会影响玉米总产量的估算精度。在种植面积一定的情况下, 玉米总产量的估算精度只与玉米单产有关。



a. MODIS 像元尺度的玉米产量/($kg \cdot hm^{-2}$)



b. MODIS 亚像元尺度的玉米产量/(kg·hm⁻²)
图 6 榆树市玉米单产同化结果直方图

Fig.6 Histograms of maize yield estimated with data assimilation method in Yushu city

表 7 列出了榆树市 2007、2008 和 2009 年遥感估算的玉米总产量及平均单产、仅利用 CERES-Maize 模型估算的总产量及单产，并与榆树市统计产量数据（表 2）进行了比较。表 8 为榆树市玉米产量的遥感估算值与统计值之间的相对误差。从表 7 和表 8 可看出，模型估算值和遥感估算值与统计值之间的相对误差均在 20%以内；通过数据同化重新校正模型关键参数，改善榆树区域玉米产量模拟能力的效果是显著的。不论总产量还是平均单产，利用遥感数据同化方法得到的产量估算精度均高于模型估算精度。

表 7 榆树市玉米产量估算结果

Table 7 Estimation results of maize yield in Yushu city

分析指标	2007 年		2008 年		2009 年	
	总产量/10t	平均单产/kg·hm ⁻²	总产量/10t	平均单产/(kg·hm ⁻²)	总产量/10t	平均单产/(kg·hm ⁻²)
统计值	108586	6322.96	202652	8539.76	191586	8083.76
遥感估算值	98646.88	5577.3	172278.58	8027.4	174406.24	7988.6
模型估算值	90516.09	5117.6	169812.66	7912.5	164387.55	7529.7

表 8 榆树市玉米产量估算相对误差

Table 8 Relative errors of estimation for maize-yield in Yushu city

分析指标	2007 年相对误差/%		2008 年相对误差/%		2009 年相对误差/%	
	总产量	平均单产	总产量	平均单产	总产量	平均单产
遥感估算值	9.15	11.79	14.99	6.00	8.97	1.18
模型估算值	16.64	19.06	16.20	7.35	14.20	6.85

注：相对误差=(估算值-统计值)/统计值×100%。

4.2 遥感观测与数据同化算法对玉米产量的估算能力分析

对遥感数据和同化方法在作物估产中的作用，是受到长期关注的问题。为此，基于以上的研究结果，通过对对比年内及年际间不同玉米产量同化结果对应的遥感观测数据的空间变化信息，尝试分析采用时间序列遥感观测与数据同化算法对玉米产量的估算能力。

4.2.1 时序遥感数据和同化算法在年内产量估算中的作用

归一化差值植被指数（normalized difference vegetation index, *NDVI*）是目前作物长势监测中应用最为广泛的植被指数之一。为此，本文将玉米生育期间遥感获取的时间序列 *NDVI* 数据与单产的变化相对应，通过

气象、土壤、田间管理因素以及玉米品种遗传参数的变化会导致玉米单产发生相应变化。CERES-Maize 模型在一定程度上可以定量模拟这些因素对单产的影响。如果模型所需参数能正确输入，相应参数经过正确校准，CERES-Maize 模型的模拟结果应该接近真实产量水平。不过，由于可获取的地面实测资料有限，CERES-Maize 模型的输入参数在榆树市不同地点都是相同的，无法体现参数的空间化，导致了模拟的单产结果不能体现区域尺度上玉米产量的差异性，这也正是将 CERES-Maize 模型扩展应用于榆树区域时玉米单产模拟精度比较低的主要原因。通过 LAI，将 CERES-Maize 和 SAIL 模型相耦合，借助 SCE-UA 优化算法，CERES-Maize+SAIL 耦合模型实现了与时间序列遥感观测反射率（如 MOD09A1、TM）的同化。耦合模型中控制 LAI 变化曲线的敏感参数（如种植日期、种植密度、光同期敏感参数（*P2*））及影响玉米冠层反射率的敏感参数（如叶片红光和近红外反射率）被逐像元优化，利用优化后的模型参数驱动 CERES-Maize 模型，再次用于榆树市玉米单产模拟，能够反映玉米产量的空间异质性（图 5）。将时序遥感观测信息加入到耦合模型中，通过调整模型的运行轨迹，使其更接近遥感观测的“客观”状态，模型模拟的 LAI 能够反映玉米生长的“真实”情况，使得模拟的玉米产量更接近“真实值”。

比较同一年份内玉米产量同化结果中最大和最小单产值对应像元 *NDVI* 时间序列变化廓线，结合同化估产流程及产量同化结果，分析时序遥感数据和同化算法为玉米产量估算提供的信息。

2007 年玉米最大单产值为 6 820.6 kg/hm²，最小单产值为 4 066.3 kg/hm²；2008 年玉米最大单产值为 8 613.9 kg/hm²，最小单产值为 7 406.4 kg/hm²；2009 年玉米最大单产值为 9 268.0 kg/hm²，最小单产值为 6 830.0 kg/hm²，分别对应各自年份内 MODIS 像元或亚像元玉米产量直方图（图 6）的最右侧和最左侧。分别找出 2007、2008 和 2009 年玉米最大和最小单产值对应的 MODIS 像元或亚像元，提取对应像元或亚像元的时间序列 NBAR 反射率数据，计算 *NDVI*。考虑到因数据质量不

好导致时间序列 *NDVI* 值存在波动现象,在此,利用 S-G 滤波对 *NDVI* 进行平滑,得到 *NDVI* 时间序列变化廓线(图 7)。同年份内最大单产值和最小值对应像元的 *NDVI* 时间序列变化廓线不一致,对同年份内玉米产量同化结果中最大和最小单产值对应像元 *NDVI* 进行差值处理,2007 年不同时刻 *NDVI* 差值介于 0.025~0.080,2008 年 *NDVI* 差值介于 -0.110~0.149,2009 年 *NDVI* 差值介于 0.026~0.231。从时间序列变化趋势来看,具有最大单产值的像元 *NDVI* 要大于最小单产值对应像元的 *NDVI*,2007、2008 和 2009 年玉米最大和最小单产值间的差值分别为 2754.3、1207.5、2438.0 kg/hm²,说明了作物长势较好情况下最终会得到高产量,而作物长势差导致产量偏低。

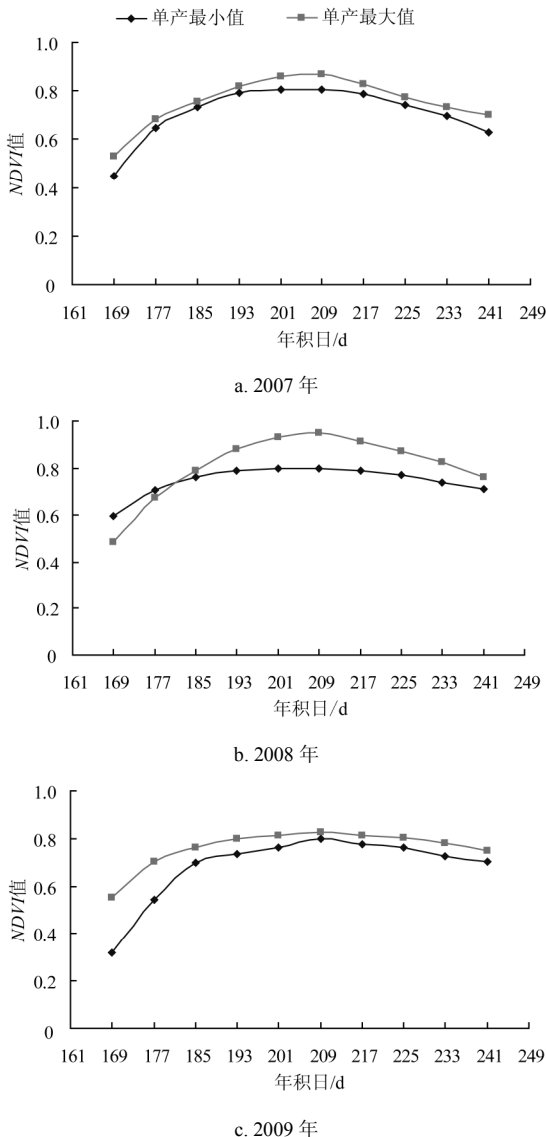


图 7 玉米最大和最小单产值对应像元 *NDVI* 时序变化廓线
Fig.7 *NDVI* temporal profiles corresponding to maximum and minimum maize yield

由于 *LAI* 是表征作物长势和预测作物产量的重要指标之一,因此遥感同化估产是通过不断引入的遥感观测信息估计玉米作物长势,来间接估算玉米产量的,以此将遥感观测提供的信息转变成了对产量估计的信息。不同玉米像元时序遥感观测光谱反射率(或 *NDVI*)存在差

异,表明玉米作物长势存在一定差别。将这种差别信息引入到遥感数据同化过程中,不仅可以反映玉米长势差异,还能够反映玉米单产的空间变化,表现了遥感同化方法对获取作物产量变化信息的能力。而若采用 3.2.1 节所述的仅用 CERES-Maize 模型模拟的估产方法,受限于给定的模型输入参数和时空分布观测信息量的缺乏,只能模拟研究区单一的产量值,不能体现区域尺度上玉米产量的差异性。

4.2.2 时序遥感数据和同化算法在年际间产量差估算中的作用

以 2007 年为基准年,分别利用 2008 和 2009 年 *NDVI* 值与 2007 年同期 *NDVI* 值进行对比,通过年际间差值反映玉米长势差异。对比年际间仅运行 CERES-Maize 模型模拟和遥感数据同化后的 *LAI*,结合同化估产流程及年际间玉米产量差,分析时序遥感数据和同化算法在年际间产量差估算中的作用。

选取 2007、2008 和 2009 年同为玉米作物的像元作为研究对象,利用 NBAR 反射率数据计算 *NDVI*,并经 S-G 滤波平滑处理,得到 *NDVI* 时间序列变化廓线。分别计算 2008 和 2009 年与基准年对应像元的 *NDVI* 差值,统计其均值和标准差,如图 8 所示。

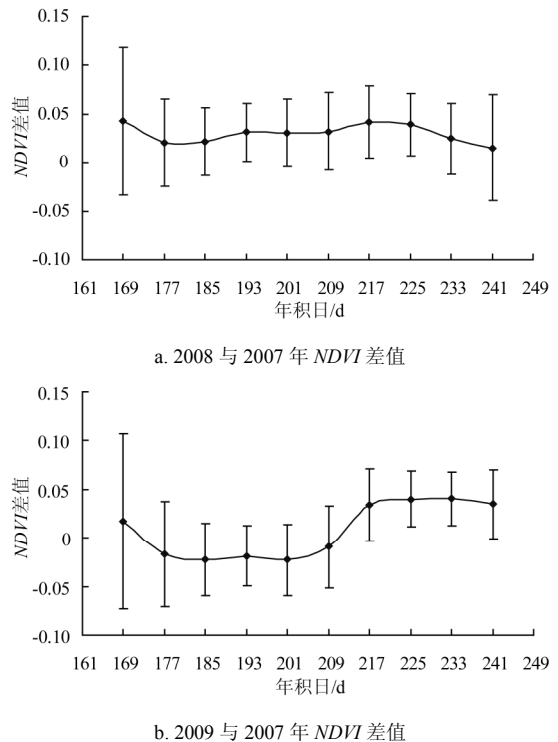


图 8 年际间 *NDVI* 差值时间序列变化廓线
Fig.8 Temporal profiles of inter-annual *NDVI* differences

从图 8a 可见,不同时刻处 *NDVI* 差值的均值大于 0,表明 2008 年玉米整体长势情况好于 2007 年,原因是吉林省 2008 年属于平水年份^[23],适宜的农业气象条件有利于农作物生长^[24],2007 年作物生长季内降水偏少,干旱影响了农作物生长^[25]。从图 8b 可见,时间序列 *NDVI* 差值的均值呈现出先减小后增大的现象,表明在玉米生长前期,2009 年玉米整体长势稍差一些,而到了生长后期,

玉米作物长势又好于 2007 年，原因是 2009 年 6~7 月吉林省各地出现持续低温多雨寡照天气过程^[25]，导致玉米生长所需的热量不足，抑制了玉米作物生长。与 2007 年的干旱相比，2009 年低温对玉米长势的影响更大一些。从 7 月下旬开始，吉林省各地气温逐渐回升^[26]，温度升高弥补了前期热量不足对玉米生长的影响，玉米长势逐渐好转。不同时刻处 *NDVI* 差值的标准差较大，表明不同时刻、不同像元的年际间 *NDVI* 差异比较明显，意味着年际间玉米长势存在明显差异。

分别提取 2007、2008 和 2009 年遥感观测日期处仅运行 CERES-Maize 模型模拟的 *LAI* 以及遥感数据同化反演的 *LAI*，计算 *LAI* 均值和标准差，如图 9 所示。遥感数据可宏观监测玉米作物长势，利用时间序列遥感观测反射率，通过数据同化方法，优化了 CERES-Maize 模型中影响玉米 *LAI* 的关键参数，使得模型模拟的 *LAI* 更符合“真实”的玉米长势状况，而仅运行 CERES-Maize 模型由于没有考虑敏感性参数（如种植日期、种植密度、光周期敏感参数）的变化对 *LAI* 产生的影响，导致模型模拟的 *LAI* 会偏离玉米生长的“真实”状态。年际间时序遥感观测反射率的不一致导致不同年份间同化反演的 *LAI* 存在差异，反映了年际间玉米作物长势的变化。

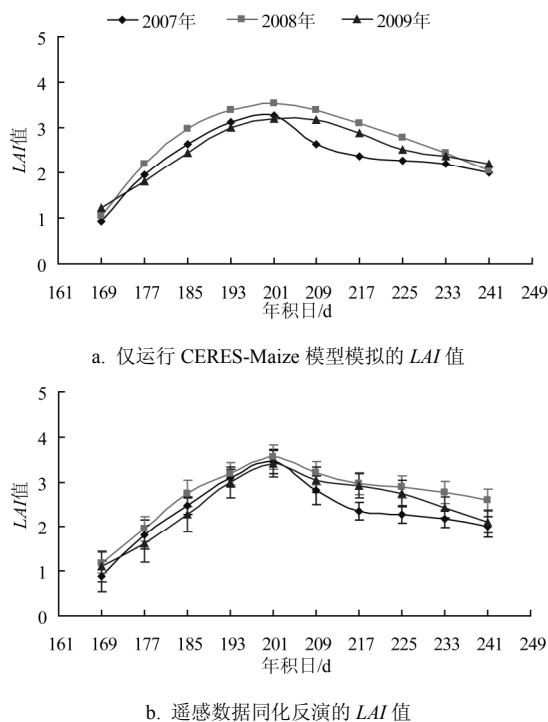


图 9 年际间玉米 *LAI* 时间序列变化廓线

Fig.9 Temporal profiles of inter-annual maize *LAI*

统计年际间对应像元的产量差信息，其中，2008 与 2007 年对应像元玉米产量差的均值为 $2\,429.78\text{ kg/hm}^2$ ，标准差为 606.16 kg/hm^2 ，仅运行 CERES-Maize 模型得到的产量差为 2794.90 kg/hm^2 ；2009 与 2007 年对应像元玉米产量差的均值为 2354.32 kg/hm^2 ，标准差为 937.91 kg/hm^2 ，仅运行作物生长模型得到的产量差为 2412.10 kg/hm^2 。仅运行 CERES-Maize 模型模拟的玉米单产精度比较低（表 8），导致了年际间玉米产量差也存在

较大的不确定性。与仅运行 CERES-Maize 模型相比，不同像元（或亚像元）遥感数据同化反演的 *LAI* 有所差异，在图 9b 中主要表现为年际间时间序列 *LAI* 具有不同的标准差。遥感数据同化方法通过时间序列遥感观测信息的加入，重新优化了模型参数，调整了 CERES-Maize 模型的运行轨迹，使得不同像元（或亚像元）反演的 *LAI* 更加符合实际的玉米生长状况，间接导致了同化后的玉米产量向“真实值”靠拢（如表 8）。年际间时序遥感观测信息存在差异（如图 8），表明年际间玉米作物长势存在差别。将遥感观测到的年际间差异信息引入到遥感数据同化过程中，通过影响 CERES-Maize 模型模拟的 *LAI*，间接地引起了模型模拟的年际间玉米产量差的变化。年际间 *NDVI* 差值的时间序列变化比较明显（如图 8），意味着年际间玉米长势有较大的差别，经过数据同化后，导致了年际间玉米产量差的遥感估算值也具有较大的标准差，其中，2008 和 2007 年之间玉米产量差的标准差为 606.16 kg/hm^2 ，2009 和 2007 年间的标准差为 937.91 kg/hm^2 。已有的结果可以表现引入时间序列遥感观测和数据同化方法对改进玉米产量估算的能力。

5 讨论

作物生长模型与遥感数据同化进行估产被认为是区域作物产量估算的重要发展方向之一。本文提出的玉米估产方案为将来进一步结合多源遥感数据、植被冠层反射率模型与作物生长模型进行区域玉米估产研究提供了重要技术参考。值得一提的是，在遥感数据同化估产过程中，时序遥感观测信息是通过优化模型敏感性参数起作用的，这些参数对玉米作物长势影响很大，即多时相遥感数据反映了影响玉米长势的因素对产量的影响，而玉米产量受农业气象、品种、土壤和田间管理等多因素制约，是这些因素相互影响共同作用的结果。除敏感性参数外，CERES-Maize 模型其他参数值固定的好坏对估产结果也会产生影响，尤其玉米品种遗传参数，其中描述产量性状的单株最大籽粒数 (*G2*) 和潜在灌水速率参数 (*G3*) 可直接影响玉米产量。然而，受可用数据的限制，本文仅以 2007 年为基准年对 CERES-Maize 模型进行了区域校准，从校准过程来看，幼苗期生长特性 (*P1*)、光周期敏感参数 (*P2*)、灌浆期特性参数 (*P5*)、单株最大籽粒数 (*G2*) 和出叶间隔特性参数 (*PHINT*) 的确定具有较好的区域代表性，而潜在灌水速率参数 (*G3*) 则根据单点实测产量数据进行确定，可能不具有很好的区域代表性。今后为进一步扩大估产区域，同时也为分析多年间产量的时空变化及其成因，必须增加地面实测样方，获取更多的数据和资料。

6 结论

本文提出了基于多时相遥感观测地表反射率数据的区域玉米产量同化估算方案，分别在 MODIS 和 TM 尺度估算了玉米产量，有效改进了农田地块破碎化区域的玉米产量估算。利用吉林省榆树市 2007、2008 和 2009 年的数据对该方案进行了验证，初步分析了遥感数据在年

内产量及年际间产量差估测中的作用。研究结论如下:

1) 通过计算旱地“纯像元”和“亚像元”的 NBAR (nadir BRDF-adjusted reflectance) 时序 RVI (ratio vegetation index) 廓线, 根据玉米的物候历, 分析 RVI 廓线特征, 确定了提取玉米作物种植面积的依据, 最终通过 MODIS 数据估算了榆树市 2007、2008 和 2009 年玉米种植面积及其空间分布。与统计数据相比, 2007、2008 和 2009 年遥感估算的玉米种植面积误差分别为 2.99%、9.56% 和 7.88%。

2) 选择 2007 年为基准年, 根据玉米作物的物候历, 对 CERES-Maize 模型进行区域校准。利用校准后的 CERES-Maize 模型分别预测了 2007、2008 和 2009 年玉米单产。与地面实测单产相比, 2007、2008 和 2009 年模型模拟的玉米单产误差分别为 2.13%、12.48% 和 4.66%; 与统计单产相比, 2007、2008 和 2009 年模型模拟的玉米单产误差分别 19.06%、7.35% 和 6.86%。

3) 利用直方图比较法对 CERES-Maize 模型 (crop environment resource synthesis-Maize) 和 SAIL 模型 (scattering by arbitrarily inclined leaves) 进行参数敏感性分析, 确定了种植日期、种植密度、光周期敏感参数 (P_2)、叶片红光和近红外波段反射率等 5 个参数作为遥感数据同化过程中的待优化参数。

4) 与玉米统计产量相比, 榆树市 2007、2008 和 2009 年遥感数据同化估算的玉米总产量误差分别为 9.15%、14.99% 和 8.97%, 平均单产误差分别为 11.79%、6.00% 和 1.18%; 与仅利用 CERES-Maize 模型模拟得到的产量误差相比, 2007、2008 和 2009 年遥感估算总产量的误差分别减小了 7.49%、1.21% 和 5.23%, 平均单产误差分别减小了 7.27%、1.35% 和 5.67%, 表明经遥感数据同化后的产量优于仅运行 CERES-Maize 模型模拟的结果。

5) 时间序列遥感观测数据通过数据同化方法调整 CERES-Maize 模型中影响玉米叶面积指数的敏感参数, 通过不断引入的遥感观测信息估计玉米作物长势, 进而间接估算玉米产量, 以此将遥感观测信息转变为对产量估计的信息, 表现了遥感同化方法获取作物产量变化信息的能力。同年份内遥感估算的玉米最大单产值对应像元的时序归一化差值植被指数曲线要高于最小单产值对应像元的 $NDVI$, 表明玉米长势好得到了高产量, 而玉米长势差导致了产量偏低; 年际间遥感观测反射率的变化信息通过数据同化方法能够反映年际间玉米产量差的变化。

[参 考 文 献]

- [1] 李存军, 王纪华, 王娟, 等. 遥感数据和作物模型集成方法与应用前景[J]. 农业工程学报, 2008, 24(11): 295—301. Li Cunjun, Wang Jihua, Wang Xian, et al. Methods for integration of remote sensing data and crop model and their prospects in agricultural application[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2008, 24(11): 295—301. (in Chinese with English abstract)
- [2] 赵艳霞, 周秀骥, 梁顺林. 遥感信息与作物生长模式的结合方法和应用: 研究进展[J]. 自然灾害学报, 2005, 14(1): 103—109.

- Zhao Yanxia, Zhou Xiuji, Liang Shunlin. Methods and application of coupling remote sensing data and crop growth models: Advance in research[J]. Journal of Natural Disasters, 2005, 14(1): 103—109. (in Chinese with English abstract)
- [3] Dorigo W A, Zurita-Milla R, de Wit A J W, et al. A review on reflective remote sensing and data assimilation techniques for enhanced agroecosystem modeling[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2007, 9(2): 165—193.
- [4] 邢雅娟, 刘东升, 王鹏新. 遥感信息与作物生长模型的耦合应用研究进展[J]. 地球科学进展, 2009, 24(4): 444—451. Xing Yajuan, Liu Dongsheng, Wang Pengxin. Advances of the coupling application of remote sensing information and crop growth model[J]. Advances in Earth Science, 2009, 24(4): 444—451. (in Chinese with English abstract)
- [5] Fang H, Liang S, Hoogenboom G, et al. Corn-yield estimation through assimilation of remotely sensed data into the CSM-CERES-Maize model[J]. International Journal of Remote Sensing, 2008, 29(10): 3011—3032.
- [6] Ma Yuping, Wang Shili, Zhang Li, et al. Monitoring winter wheat growth in North China by combining a crop model and remote sensing data[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2008, 10(4): 426—437.
- [7] Vazifedoust M, van Dam J C, Bastiaanssen W G M, et al. Assimilation of satellite data into agrohydrological models to improve crop yield forecasts[J]. International Journal of Remote Sensing, 2009, 30(10): 2523—2545.
- [8] Doraiswamy P C, Hatfield J L, Jackson T J, et al. Crop condition and yield simulations using Landsat and MODIS[J]. Remote Sensing of Environment, 2004, 92(4): 548—559.
- [9] Savitzky A, Golay M J E. Smoothing and differentiation of data by simplified least squares procedures[J]. Analytical Chemistry, 1964, 36(8): 1627—1639.
- [10] Jones J W, Hoogenboom G, Porter C H, et al. The DSSAT cropping system model[J]. European Journal of Agronomy, 2003, 18(3): 235—265.
- [11] 范柯伦 H, 沃尔夫 J. 农业生产模型: 气候、土壤和作物 [M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1990: 65.
- [12] 吉林省土壤肥料总站. 吉林土壤[M]. 北京: 中国农业出版社, 1998: 58—62.
- [13] 戴明宏, 陶洪斌, 廖树华, 等. 基于 CERES-Maize 模型的华北平原玉米生产潜力的估算与分析[J]. 农业工程学报, 2008, 24(4): 30—36. Dai Minghong, Tao Hongbin, Liao Shuhua, et al. Estimation and analysis of maize potential productivity based on CERES-Maize model in the North China Plain[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2008, 24(4): 30—36. (in Chinese with English abstract)
- [14] 金之庆, 葛道阔, 石春林, 等. 东北平原适应全球气候变化的若干粮食生产对策的模拟研究[J]. 作物学报, 2002, 28(1): 24—31. Jin Zhiqing, Ge Daokuo, Shi Chunlin, et al. Several strategies of food crop production in the Northeast China Plain for adaptation to global climate change: A modeling study[J]. Acta Agronomica Sinica, 2002, 28(1): 24—31. (in Chinese with English abstract)
- [15] Verhoef W. Light scattering by leaf layers with application to canopy reflectance modeling: The SAIL model[J]. Remote Sensing of Environment, 1984, 16: 125—141.

- [16] 王锦地, 张立新, 柳钦火, 等. 中国典型地物波谱数据库[M]. 北京: 科学出版社, 2009: 82—85.
- [17] 刘焕军, 张柏, 刘殿伟, 等. 松嫩平原典型土壤高光谱定量遥感研究[J]. 遥感学报, 2008, 12(4): 647—654.
Liu Huanjun, Zhang Bai, Liu Dianwei, et al. Study on quantitatively remote sensing of typical soils in Songnen Plain, Northeast China[J]. Journal of Remote Sensing, 2008, 12(4): 647—654. (in Chinese with English abstract)
- [18] 刘焕军, 张柏, 张渊智, 等. 基于反射光谱特性的土壤分类研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2008, 28(3): 624—628.
Liu Huanjun, Zhang Bai, Zhang Yuanzhi, et al. Soil taxonomy on the basis of reflectance spectral characteristics[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2008, 28(3): 624—628. (in Chinese with English abstract)
- [19] 徐崇刚, 胡远满, 常禹, 等. 生态模型的灵敏度分析[J]. 应用生态学报, 2004, 15(6): 1056—1062.
Xu Chonggang, Hu Yuanman, Chang Yu, et al. Sensitivity analysis in ecological modeling[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2004, 15(6): 1056—1062.
- [20] Duan Q, Sorooshian S, Gupta V K. Effective and efficient global optimization for conceptual rainfall-runoff models[J]. Water Resources Research, 1992, 28(4): 1015—1031.
- [21] 王东伟, 王锦地, 梁顺林. 作物生长模型同化 MODIS 反射率方法提取作物叶面积指数[J]. 中国科学: 地球科学, 2010, 40(1): 73—83.
Wang Dongwei, Wang Jindi, Liang Shunlin, et al. Retrieving Crop leaf area index by assimilation of MODIS data into a crop growth model[J]. Science China: Earth Sciences, 2010, 40(1): 73—83.
- [22] 王东伟. 遥感数据与作物生长模型同化方法及其应用研究[D]. 北京: 北京师范大学地理学与遥感科学学院, 2008.
- [23] 王云岫. 2008年中国吉林省发展报告[M]. 吉林: 吉林人民出版社, 2009: 15.
- [24] 马树庆, 王琪, 袁福香. 2008年吉林省农业气象条件及其对粮食生产影响概述[J]. 吉林气象, 2008, 4(1): 19—21, 44.
Ma Shuqing, Wang Qi, Yuan Fuxiang. A general overview of agro-meteorological conditions in 2008 and their impact on food crop production in Jilin province[J]. Jilin Meteorology, 2008, 4(1): 19—21, 44. (in Chinese with English abstract)
- [25] 马树庆, 王琪, 袁福香, 等. 2007年吉林省农业气象条件及其影响概述[J]. 吉林气象, 2007, 4(1): 22—24, 33.
Ma Shuqing, Wang Qi, Yuan Fuxiang, et al. A general overview of agro-meteorological conditions in 2007 and their impact in Jilin province[J]. Jilin Meteorology, 2007, 4(1): 22—24, 33. (in Chinese with English abstract)
- [26] 马树庆, 王琪. 2009年吉林省农业气象灾害及其对粮食生产的影响[J]. 吉林农业科学, 2010, 35(1): 49—52, 56.
Ma Shuqing, Wang Qi. Agro-meteorological disasters in 2009 and their impact on food crop production in Jilin province[J]. Journal of Jilin Agricultural Sciences, 2010, 35(1): 49—52, 56. (in Chinese with English abstract)

Estimation on regional maize yield based on assimilation of remote sensing data and crop growth model

Jin Hua'an¹, Wang Jindi^{1*}, Bo Yanchen¹, Chen Guifen², Xue Huazhu¹

(1. State Key Laboratory of Remote Sensing Science, School of Geography, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;

2. College of Computer Science and Technology, Jilin Agricultural University, Changchun, 130118, China)

Abstract: In order to apply time-series variation information of reflectance spectrum at direction of crop canopy which was observed by remote sensing in crop growing stages to estimate the regional corn yield, a practical scheme to assimilate time-series remote sensing data and the CERES-Maize (crop environment resource synthesis-Maize) growth model coupled with the canopy reflectance model SAIL(scattering by arbitrarily inclined leaves) through leaf area index for regional maize yield estimation was addressed based on the time-series MODIS (moderate resolution imaging spectroradiometer) and high spatial resolution TM observation data. The proposed scheme was applied to Yushu city located in Northeast China. The spatial distribution of maize per unit yield was determined by applying the SCE-UA (shuffled complex evolution method developed at the University of Arizona) optimization algorithm to the maize yield estimation, and the gross maize yield in Yushu city was estimated through per unit yield multiplied by maize planting area which was extracted using remote sensing data. The results indicated that comparing to the statistical data of maize yield, the estimation errors of the total maize yield estimation by using remote sensing data assimilation were 9.15%, 14.99% and 8.97% in 2007, 2008 and 2009 respectively. Comparing to those only running the CERES-Maize model, the errors of the total maize yield estimation by using remote sensing data assimilation decreased by 7.49%, 1.21% and 5.23% in 2007, 2008 and 2009 respectively. The maize yield estimated by MODIS and TM data revealed its spatial heterogeneity. The expression capability of maize growth condition and yield variation was analyzed using time-series remote sensing data in this paper. The greater time-series *NDVI* in the same year was, the higher the maize yield was. The inter-annual variations of remote sensing observations mirrored the inter-annual variations of maize yield gap by using the data assimilation method. This scheme for estimating corn yield can provide a reference for regional corn yield research based on further combining multi-source remote sensing data, reflectance spectrum of crop canopy with crop growth model.

Key words: remote sensing, crops, models, yield estimation, data assimilation