

文章编号: 1007-4619 (2004)06-0602-09

# 农作物单产预测的运行化方法

孟庆岩, 李强子, 吴炳方  
(中国科学院 遥感应用研究所, 北京 100101)

**摘 要:** 提出了适于运行化农作物单产预测的方法。即以农作物单产区划为基础, 通过搜集不同地区不同作物的单产预测模型, 分析每个模型的空间适用范围, 并从模型参数等角度筛选模型, 然后利用这些模型进行气象站点的作物单产预测, 并以 *NDVI* 分布图作为参考数据将点上的单产数据空间外推到区域尺度。借助耕地分布估计区域水平的农作物单产。最后以 2003 年冬小麦为例, 进行了全国 10 个省的冬小麦平均单产估算, 花费了较少的人力和时间, 符合运行化遥感估产要求。

**关键词:** 农作物单产; 运行化; 农业气象模型

**中图分类号:** TP79      **文献标识码:** A

## 1 引言

农作物单产的运行化预测是农情遥感监测技术中的一个重要组成部分。实时、准确地进行农作物单产预测是农情遥感监测的基本要求。在全国农作物总产量预测中, 单产估计与面积监测缺一不可。中国自 20 世纪 80 年代初开始, 陆续开展了多次、多尺度的农作物遥感监测, 在农作物单产估算方面积累了很多经验<sup>[1-6]</sup>。本文介绍中国农情遥感速报系统采用的农作物单产预测方法。

## 2 单产模型的类型与运行化要求

目前国内外对农作物单产预测的模型很多, 可分为农学模型、农业气象模型、统计模型和遥感模型。

农学模型主要是在作物生长状况与作物产量构成要素之间建立关系, 进而实现预测农作物产量。其中作物产量构成要素因作物类型的不同而不同, 如冬小麦的产量构成要素是有效穗数、每穗粒数和千粒重。从全国性运行化农作物单产估算角度看, 农学模型由于在中国的适用性前例还较少, 仅黄淮海平原的冬小麦有过使用<sup>[7]</sup>。农学参数与影响因子

之间的关系很难标定, 而中国各地农作物种植制度的差异使得各农学参数本身在不同地域之间具有较大的复杂性, 更加剧了标定的难度, 因此农学模型的使用具有较大的难度。

统计模型主要是根据统计数据与作物单产之间建立相关关系, 预测农作物单产, 最典型的统计模型是中国科学家陈锡康先生以投入产出技术为核心的系统综合因素预测法, 通过建立影响作物单产的统计因子, 如灌溉投入、化肥用量、机械动力等与农作物单产之间的系统模型, 预测每年的粮食产量<sup>[8]</sup>。这种方法具有很好的运行性, 基本上在精度和预测时效性上都能保证。

遥感模型是根据生物学原理, 在分析收集农作物光谱特征的基础上, 通过光谱来获取作物的生长信息, 并在作物光谱与产量之间建立关联。目前经常采用的思路有 3 个<sup>[9]</sup>: ①植被指数统计估产模式, 利用作物生长全过程或部分时期的植被指数累加值或某一时期的植被指数与产量建立统计关系; ②植被指数-气象因子综合估产模式, 把遥感信息与气象条件相结合建立统一的估产模型; ③以热红外信息为基础的估产模式, 用卫星的热红外信息估算作物的冠层温度, 并用冠层温度估计作物产量。从全国性运行化农作物单产估算角度看, 遥感模型是最理想的单产估算途径, 但是植被指数与作物单产之间

收稿日期: 2003-09-30; 修订日期: 2004-03-08  
基金项目: 中国科学院 95 重大项目 (KZ951-A1-302-02) 和特别支持项目 (KZ95T-03-02)。  
作者简介: 孟庆岩 (1971—), 博士, 副研究员, 黑龙江省肇东市人。研究方向为农业与生态环境遥感, 已发表科研论文 10 余篇。  
(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

的关系模式还没有标定,而植被指数-气象因子综合估产模式,本身模型标定的工作还没有进行全国性实验,且这种标定难度可能更大于农学模型,因此用植被指数建立的遥感模型还无法完成全国性运行化单产估算的要求,而温度与单产之间的关系模式在全国的标定也有很大困难。

在农作物单产预测研究中,应用最多的还是农业气象模型<sup>[10]</sup>,欧盟与美国的遥感估产系统也采用农业气象模型进行农作物单产估计<sup>[11-13]</sup>。该类模型依据对作物产量有较大影响的气象因子和产量建立的关系模式预测作物产量。目前主要采取的方法是将作物单产分解为趋势产量、气象产量和随机产量 3 部分,其中趋势产量代表了社会平均生产水平,气象产量是由气象因子所反映的产量,随机产量可忽略不计。农业气象模型在中国气象部门广泛使用,具有很好的运行化特征,只要气象数据搜集准确,即可建立农业气象模型,进行作物单产预测,而且从大量的研究文献分析,农业气象模型在全国具有普遍性的适用例子,且精度基本满足农作物单产预测需求。但是,农业气象模型进行全国性农作物产量估算需要处理以下几个问题:(1)空间外推问题。由于农业气象数据是基于气象站采集,农业气象模型大多是以点为基础进行产量估算,因此,必须解决如何根据点估算得到的作物产量外推到省级水平和全国水平的问题。(2)农气模型所依赖的气象因子基本上都是气温、降水、日照等气象因子及其派生数据,由于这些因子本身具有一定的影响范围,使得农气模型本身存在一个使用范围问题,因此对于农气模型的空间适用范围界定问题也必须解决。

我国自然条件复杂,多丘陵山地,南北跨度和东西差异均比较大,使得农作物生长环境复杂多样,造成本身作物单产水平的区域差异。同时中国现有土地使用制度使得农作物种植在轮作、兼作等方面明显不同,更加剧了作物单产水平的区域差异。从运行化的角度看,农作物单产模型需要满足以下几方面要求:(1)通用性。要求模型具有全国性应用实例,能够通过全国性的参数标定;(2)可用性。模型要求的输入数据能够满足,也就是说能够在运行模型时能够得到输入数据;(3)速度快。模型运算过程中尽量避免过多的人工参与,以期能够在较短的时间内完成模型运算。

### 3 运行化农作物单产预测思路

中国农情遥感系统,没有直接针对农作物单产

建立自己的单产预测模型,而是通过文献调查,总结中国农气模型的历史经验及成果分析,直接借用前人建立的预测模型,通过规范化模型使用空间范围,重新标定模型参数,实现了中国农作物单产的区域水平预测。

采用农业气象模型作为运行化的单产预测模型,一个基本考虑是农业气象模型在全国具有较多的应用例子,检验精度和预测时效性基本能够满足农情遥感监测运行的需要。基本思路可总结为模型搜集整理、筛选与膨化、单点模拟与检验、空间外推与区域单产估算 5 个技术过程(图 1)。



图 1 中国农作物单产估算技术路线

Fig.1 Flowchart of crop yield estimation

农作物单产预测,不需要也不可能建立一个普遍适用于全国的农业气象模型,一方面全国各地影响农作物单产的气象因子具有地域性差异,另一方面,我国已经完成了适用于不同地域、不同作物、不同生产条件的各种农业气象模型,而且这些模型根据经验与检测结果,精度可靠,能够满足农情遥感监测需要。因此,模型搜集是整个农作物单产估算技术思路的出发点。通过搜集全国现有的各种农业气象模型,标定其适用的作物类型、空间范围等要素,既可以对我国过去 20 多年的农业气象模型的研究工作进行总结,充分利用前人的成果,同时通过利用现有的农业气象模型结构,节省大量人力、物力、财力和时间。模型搜集过程中,还需要同时完成模型的筛选工作,去掉那些无法满足其农业气象因子要求的模型。比如有的模型需要同时指定准静止锋的位置,这样的模型不适合进行区域性农作物单产

估算。

模型搜集整理后,需要对各个模型进行膨化,模型膨化的目的是确定模型的空间适用范围,或为某个区域找到合适的模型,为了方便模型膨化,或为了简化模型膨化的难度,对全国范围的作物单产进行分级归类,制定作物单产区划。单产区划是农作物生产水平的区域分割,通过将全国分作生产力水平相近、种植制度类似和单产影响因子相同的若干区域,在每个区划单元内部,作物单产水平相近,影响作物单产的农业气象因子和模型结构也基本一致。因此,单产区划的一个重要用途就是将模型由原来的实验区延伸到一个合适的区划单元。

单点模拟与检验,是根据搜集到的模型及其适用范围,根据对应的实测站点农气资料和以县为单位的历史单产数据,在每个区划单元内,选定一些代表性县,在县级水平上进行单产模拟和精度检验。

空间外推与区域单产估算,是根据农作物单产水平的空间变异规律,将单点模拟生成的单产数据外推到整个区划单元。在完成了每个区划单元的单产预测后,通过对耕地像元上的单产值进行统计平均,得到区域内的平均作物单产。

4 农作物单产区划

农作物单产区划包括农作物生产类型区划和农作物气候区划两个阶段。其中,农作物生产类型区划是根据农作物生产的自然条件 and 生产水平出发,划分出具有相对一致性的区域,但是每个区划单元往往范围过大,存在物候历上的差异性,不适合界定一个统一的模型,因此,结合中国农业资源与农业气候区划,将生产类型区划进行进一步细分,最终形成农作物单产区划,在每个区划单元内部,作物种植结构、农时历和单产水平大体一致。

4.1 农作物生产类型区划

在制定全国范围多种农作物遥感估产区划时,考虑到水稻、小麦、玉米和大豆 4 种作物的种植结构和单产水平,分别制定两种区划,即种植结构区划和产量水平区划。区划采用二层结构(表 1,表 2),第一级区划直接采用中国农作物种植制度气候区划的第一级(分区指标主要是温度、降水、太阳辐射、地貌和作物类型),全国分为 11 个区划单元(不包括海洋水产区)<sup>[14]</sup>。

农作物生产类型区划的第二级区划采用农作物

量与农作物物候历作为主导因子,反映中国粮食生产水平的地域分布特征。生产类型区划的第二级采用农作物产量和物候条件作为主导因子进行二级区划,从而使得每个区划单元的农作物产量相对一致。对每个一级区划单元内的县级行政单元,利用最近几年的作物平均产量进行多指标聚类分析,将 11 个一级区划分成 39 个二级区划单元(表 2)<sup>[15]</sup>。

表 1 农作物生产类型区划指标体系

Table 1 Factors considered in productivity zoning

区级	区划指标
一级区划	温度、降水、太阳辐射、农区土壤、农区地貌
二级区划	小麦单产、水稻单产、玉米单产、大豆单产、物候

4.2 农作物单产区划

生产类型区划在使用中存在一些问题。最典型的是,一个区划单元中包括的县跨越许多省份,对于这些较大的区划单元,要为其赋予一个统一的农业气象单产模型,比较困难。因为较大的区划单元内部各地区的作物物候历会出现差异。因此,将农作物生产类型区划和中国农业气候区划进行综合<sup>[14]</sup>,最终得到一个在农业气象、农作物单产水平和种植结构都相对均一的农作物单产区划。

中国农业气候区划共包括 3 级区划,第一级区划是大范围的农业气候区,分 3 部分,即东部季风气候大区、西北干旱农业气候大区和青藏高寒农业气候大区。第二级区划共包括 15 个农业气候带,主要反映中国水稻、小麦、玉米、大豆 4 种农作物生产水平的空间分布规律。通过划分具有显著地带性的农业热量带,反映合理安排种植制度、农业发展布局和经济商品生产的主要气候条件。其中东部季风农业气候大区有 10 个农业气候带,分别为北温带、中温带、南温带、北亚热带、中亚热带、南亚热带、藏南亚热带、北热带、中热带和南热带;西北干旱农业气候大区有两个农业气候带,分别为干旱中温带和干旱南温带;青藏高寒农业气候大区有 3 个农业气候带,分别为高原寒带、高原亚寒带和高原温带。主要考虑有温度、降水、太阳辐射、农区土壤、农区地貌。第三级区划主要反映非地带性的农业气候类型区,为农业布局具体化提供气候依据,由 55 个农业气候区组成。

通过空间叠加农作物生产类型区划及中国农业气候区划,并利用 GIS 对分区边界的空间一致性进



图 2 农作物单产区划

Fig.2 Zones used for crop yield estimation

表 2 农作物单产区划二级区划单元列表

Table 2 Crop productivity zones							
一级区划		二级区划		一级区划		二级区划	
青藏高原喜凉作物区(Ⅰ)	四作物低产区(Ⅰ1)	西南东部高原山地湿润水旱兼作区(Ⅶ)	中稻中麦中玉中豆区(Ⅶ1)	内蒙古东南部黄土高原西部半干旱喜凉作物区(Ⅱ)	中麦无稻无玉无豆区(Ⅱ1)	长江中下游平原丘陵湿润水田为主区(Ⅷ)	高稻中麦高玉高豆区(Ⅶ4)
	高麦低豆无稻无玉区(Ⅰ2)		中稻低麦低玉低豆区(Ⅶ2)		中稻中麦高玉低豆区(Ⅱ2)		低稻中麦中玉高豆区(Ⅷ2)
	低稻中麦中玉中豆区(Ⅰ3)		低稻中麦中玉中豆区(Ⅶ3)		低稻低麦中玉低豆区(Ⅱ3)		高稻中麦中玉高豆区(Ⅷ3)
内蒙古陕晋高原山地易旱喜温作物区(Ⅲ)	中麦无稻无玉无豆区(Ⅱ1)	四川盆地平原丘陵山地湿润水旱兼作区(Ⅸ)	高稻中麦低玉高豆区(Ⅷ3)	东北平原丘陵半湿润湿润喜凉作物区(Ⅳ)	中稻中麦高玉中豆区(Ⅲ1)	东南丘陵山地湿润双季单季水稻兼作区(Ⅹ)	中稻低麦低玉中豆区(Ⅷ4)
	低稻中麦高玉中豆区(Ⅲ1)		高稻中麦中玉高豆区(Ⅸ1)		中稻中麦中玉中豆区(Ⅲ2)		高稻高麦高玉高豆区(Ⅸ2)
	低稻低麦中玉低豆区(Ⅲ2)		高稻中麦中玉高豆区(Ⅸ2)		中稻低麦中玉低豆区(Ⅲ3)		高稻中麦中玉中豆区(Ⅹ1)
	中稻低麦中玉低豆区(Ⅲ3)		高稻中麦中玉高豆区(Ⅹ1)		高稻中麦中玉低豆区(Ⅹ2)		中稻低麦低玉低豆区(Ⅹ3)
新疆河西走廊及河套干旱灌溉区(Ⅴ)	高稻中麦高玉中豆区(Ⅲ4)	华南丘陵平原湿润双季稻热作区(Ⅺ)	高稻中麦中玉高豆区(Ⅹ2)	黄淮海平原丘陵半湿润旱作物为主区(Ⅵ)	中麦无稻无玉无豆区(Ⅳ1)		中稻中麦中玉中豆区(Ⅺ1)
	四作物低产区(Ⅳ1)		低稻高麦高玉中豆区(Ⅴ1)		中稻低麦中玉低豆区(Ⅺ2)		
	高稻无麦高玉中豆区(Ⅳ2)		低稻高麦高玉高豆区(Ⅴ2)		高稻中麦低玉中豆区(Ⅺ3)		
	高稻中麦高玉中豆区(Ⅳ3)		高稻高麦高玉中豆区(Ⅴ3)		中稻中麦低玉低豆区(Ⅺ4)		
黄淮海平原丘陵半湿润旱作物为主区(Ⅵ)	中稻中麦中玉中豆区(Ⅳ4)				低稻中麦中玉低豆区(Ⅳ4)		
	低稻高麦高玉中豆区(Ⅴ1)				低稻高麦高玉高豆区(Ⅵ1)		
	低稻高麦高玉高豆区(Ⅴ2)				高稻高麦高玉中豆区(Ⅵ2)		
	高稻高麦高玉中豆区(Ⅴ3)				低稻中麦中玉中豆区(Ⅵ3)		
	低稻中麦中玉低豆区(Ⅴ4)						



行修正,生成农作物单产区划,共包括 132 个农作区和一个非作物区,共 133 个区划单元(图 2)。图中蓝色为二级区划边界,不同填充颜色表示不同的三级区划范围。与农作物生产类型区划相比,农作物单产区划更趋细致,区划因子更多,区划更为客观,更有利于农业估产模型的建立。

5 模型搜集整理与膨化

模型搜集主要通过查阅国内出版的大量农业气象模型的应用实例,搜集模型结构、模型参数、模型应用地区、模型精度以及模型的检验方法等。模型搜集时查阅了自 1980 年以来国内农业和气象两个学科的相关刊物 40 多种,如气象学报、气象、应用气象学报、中国农业气象等国家级学报,同时到专业图书馆查询了省级气象或农业气象杂志,如山西气象科技、辽宁气象、山东气象、河南气象、湖南气象、广东气象、新疆气象等省级杂志,省级杂志中有大量的区域级农业气象模型。总共搜集到了近 500 个应用实例,涉及冬小麦、春小麦、早稻、中稻、晚稻、玉米、大豆等 4 个类别 7 种作物。其中,冬小麦 185 个、玉米 65 个,早稻 50 个,中稻 53 个,晚稻 34 个,大豆 56

个,春小麦 11 个<sup>[10]</sup>。  
模型搜集之后的整理工作,主要是建立相关的模型筛选标准。筛选过程中,建立如下筛选标准。(1)模型结构明确;(2)有明显的气象因子;(3)气象因子易得性能够满足运行需要;(4)模型应用的空间范围具有相似的自然地理特征,其中,模型结构明确是最主要的。气象因子的易得性是硬指标,如果气象因子获得性差,如南方准静止锋位置、梅雨日期、环流因子和海温等,虽然在国内外有许多应用范例,但这些因子无法满足中国农情遥感速报系统的运行需要,因此予以剔除。

依据标准对所搜集到的农业气象应用实例进行筛选后,共选出可用农气模型 245 个,这些模型的空间分布情况用图 3 来说明。其中,不同作物类型的模型筛选情况可概述如下:

小麦模型 114 个,分布范围如图 3(a)所示。其中,冬小麦模型 102 个,包括县级水平模型 80 个(紫色),地市级尺度水平的农气模型 10 个(红色),自然地域水平上的农业气象模型 5 个(绿),省级模型 9 个(黄色)。春小麦县级模型 11 个(蓝色),春小麦省级模型 1 个(黄色)。

玉米模型 25 个,分布范围如图 3(b)所示,包括

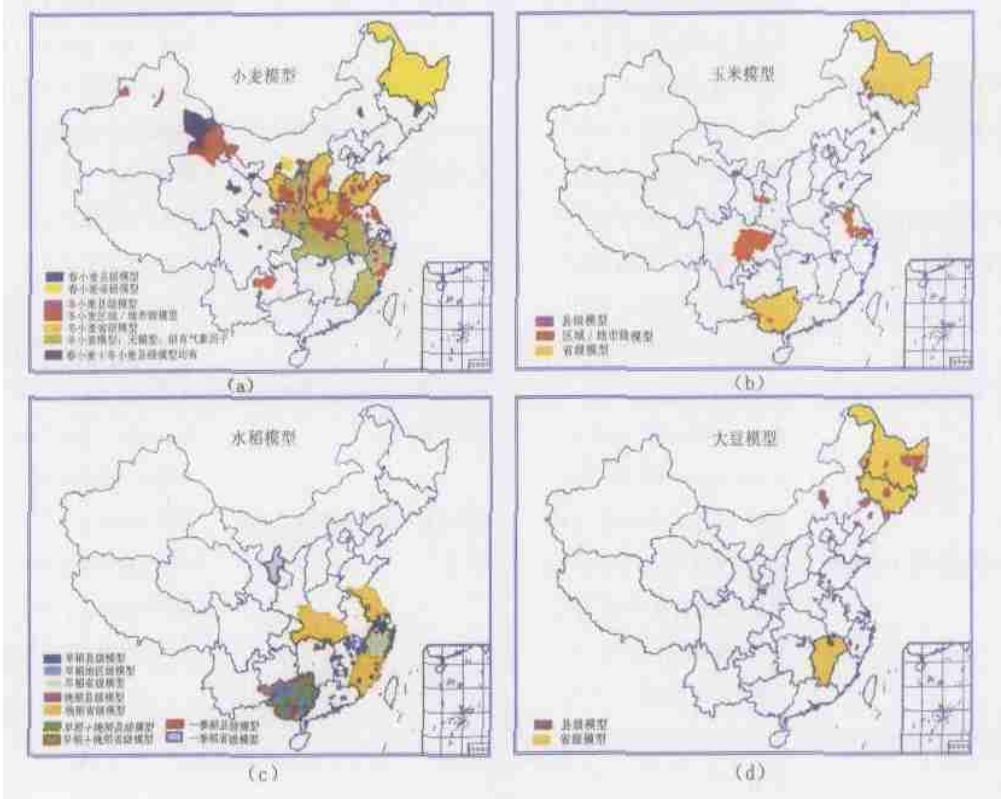


图 3 中国农业气象模型空间分布(不包括自然地理区域上的农气模型)

县级水平模型 19 个(紫色),地市级模型及区域水平模型 4 个(红色),省级模型 2 个(黄色)。

水稻模型 70 个,分布范围如图 3(c)所示。其中早稻模型 36 个,包括县级模型 24 个(蓝色),地市级模型 10 个(浅蓝色),省级模型 2 个(绿色)。一季稻模型共 2 个,县级模型 1 个(红色),省级模型 1 个(天蓝色)。晚稻模型共 32 个,包括县级模型 28 个(紫色),省级模型 4 个(黄色)。

大豆模型 36 个,分布范围如图 3(d)所示,包括县级水平模型 33 个(紫色),省级水平模型 3 个(黄色)。

筛选出来的模型,按照模型原文献所规定的参数表(如 3 月平均气温、4 月份总降水量等),建立模型库。

模型的膨化是确定模型应用范围,并以农作物单产区划为基础,以模型最初适用的区域,确定每个模型适用的区划单元。对于那些在其范围内有多个模型的区划单元,根据其原著文献的精度评价及检验情况,将其模型进行等级确定,标定最适模型、辅助模型,供模拟时选用。对于那些在其范围内没有适合模型的区划单元,根据二级区划单元范围内的模型情况,选择精度较高的,或近邻的模型,赋予该区划单元。如果二级区划单元内仍然没有模型,则根据常规农业气象因子及其派生因子(如温度与积温),建立相关模型。

6 农作物单产预测

农作物单产预测过程中,除非直接使用遥感模型,直接从空间上进行模拟,否则都存在一个局部模拟和空间外推的问题。使用农业气象模型的空间外推存在两种思路。其一是采用空间插值方法先将气象因子外推到空间上,然后以空间上的一定范围作为模拟空间,建立农业气象因子和作物单产之间的模拟关系。在此,一定的空间范围既可以是行政单元,也可以固定的空间网格单元。Saarikko 等人将气象因子插值到空间上,然后以 10km×10km 的格网建立 CERES-Wheat 模型,实现了农作物单产的区域估计<sup>[16]</sup>,这种方法比较适用于以作物模拟模型为基础的模型。另一种可供选择的思路是进行单点模拟,即在具体的某个空间位置上进行农作物单产水平模拟,然后再采用空间插值方法,将单点模拟结果外推到区域水平上。中国农情遥感速报系统即采用第二种思路。这主要是因为,采用第一种思路进行

单产模拟时,作物单产数据的空间插值比较困难,因此,先进行单点模拟,然后再进行空间外推,所谓的单点即单产数据所代表的区域,中国农情遥感速报系统中是县级行政单元。

单点模拟即选择一些数据齐全的县级行政单元进行农业气象模型参数标定与产量预测。这些选择的县级行政单元可称为代表性模拟点或代表性县。通过这些代表性模拟县的作物单产模拟,确定代表性点的作物单产水平,然后用空间外推方法推知到整个区域水平。

6.1 单点模拟

在区划单元内选择 2—3 个代表性模拟点进行单点模拟。代表性模拟点不能随便选取,要求:(1)单产水平适中,能够代表局部水平。过高或过低单产水平的县级行政单元不能选作代表性点,否则容易过高或过低地估计区域单产水平。(2)与气象站点相接近。如果根据单产水平选中的代表性模拟点没有气象站点,则需要利用空间插值方法从相邻的气象站点数据得到。(3)每个区划单元内的代表性站点,数量不能低于两个。(4)在空间上不能呈聚集状态,而应近似均匀地分散在整个单产区划单元内。(5)各相邻单产区划单元的代表性站点之间在空间上不能相邻太近,也应呈近似均匀分散分布状态,以保证代表性模拟点的空间代表性。

各代表性站点的单产模拟通过系统自动完成,系统从模型集中调出空间上和作物类型相匹配的模型结构和产量数据,通过时间序列统计分析标定模型参数,然后对作物单产进行预测,并要求通过  $T$  检验和  $F$  检验,以保证模型的估计精度。

6.2 空间外推

根据中国农情遥感速报系统的单产估算思路,农作物单产的空间外推采用插值技术。插值时,使用所有区划单元的模拟点预测值,而且假定各代表性模拟点的单产估计值位于县级行政单元的重心位置,以作物生长期内  $NDVI$  的累积值作为参考因子,采用 co-kriging 方法进行空间插值,生成覆盖整个作物分布范围的农作物单产水平栅格数据层。

根据统计单元空间范围内的单产栅格数据层的像元值,计算平均单产,统计时仅统计耕地像元的单产值。并且针对不同的作物类型和不同的地区,设计统计的条件,如水稻单产仅统计水田像元的单产值,玉米仅统计旱地像元的单产值、冬小麦统计耕地

像元的单产值等。统计时,需要对单产数据进行判别,去除明显错误的值。统计单元可以是县、区划单元或省,或者是面积区划单元。为了方便总产量的估算,一般根据面积区划单元统计。耕地像元根据 1:10 万比例尺土地资源矢量数据栅格化后得到。

7 2003 年冬小麦单产预测

中国冬小麦种植区主要分布在黄淮海平原、长江中下游地区、川渝黔滇、陕南、甘南等地区,共涉及到 95 个三级区划单元,1400 多个县。

2003 年冬小麦单产估计于 5 月份月上旬开始,处理模型 102 个,其中,部分省份没有模型,但却有明

确的农业气象因子,因此同样可以选用。膨化过程中优先选取县级模型与地市级模型。共选取了 180 个代表性县,实现了全国从南到北从东到西所有冬小麦覆盖范围的模拟,以保证模拟精度,采用的气象数据基本上从 2002 年 11 月开始到 2002 年 5 月底结束,时间跨度达 7 个月,气象要素涉及气温、降水、日照、>0℃ 积温及其复合因子。空间外推时,首先根据所选的模型单产外推到冬小麦种植区,然后根据实际需要,仅对全国冬小麦的 10 个主产省份的冬小麦分县单产情况进行预测,最后用各个县级行政单元的平均单产及种植面积计算省级行政单元的总产,并最终计算出省级行政单元的平均单产。图 4 给出了冬小麦模型、代表性站点分布、县级单产水平

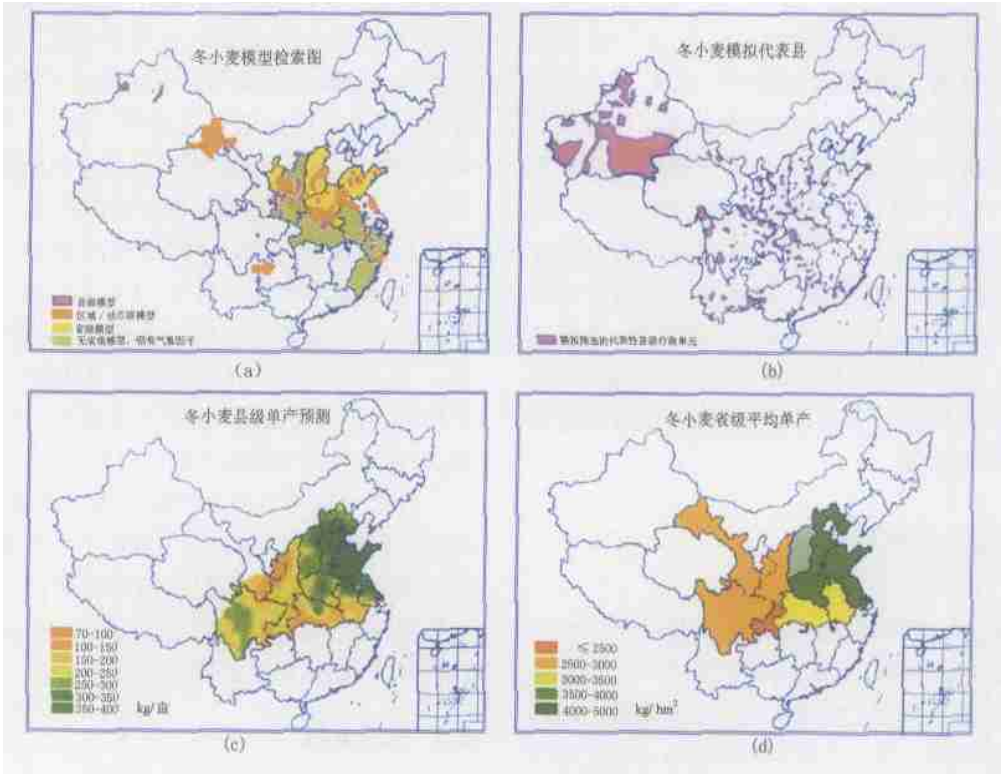


图 4 2003 年冬小麦单产预测  
((a)模型检索;(b)模拟县分布图;(c)县级水平的单产估计;(d)省级平均单产)  
Fig.4 Estimation results of winter yield in 2003  
((a) models indexed;(b) counties simulated;(c) county yield estimated;(d) provincial average yield)

和省级单产水平。

预测过程分两次进行,第一次在 5 月底进行,此时,南方地区因气象因子均已齐备,可以准确预测单产,北方地区因部分气象因子还未搜集齐全,因此只能利用 5 月底以前的气象因子进行单产预测。第二次在 6 月底进行,全国从南到北各种农业气象因子均已搜集完整,可以进行更准确的单产预测。

每次预测历时 7 天,参加人员 12 人,基本上满足运行化需要。

根据模型预测结果,2003 年中国冬小麦 10 个主产省区的区域平均单产水平预测结果如表 3 所示。

8 结 论

本文在分析各种农作物单产估算模型优缺点的基础上,提出直接借用现有的农业气象单产模型

表 3 2003 年中国冬小麦 10 省区单产预测

Table 3 Winter wheat yield estimation and comparison to statistical data

kg/hm<sup>2</sup>

省份	预测单产	省份	预测单产
河北	4599.29	湖北	3128.14
山西	3550.10	重庆	2087.55
江苏	4503.81	四川	2763.26
安徽	3484.21	陕西	2741.51
山东	4534.86	甘肃	2975.27
河南	4766.51		

进行全国运行化农作物单产预测的思路。即通过搜集形成中国农作物单产预测的农业气象模型集,对其进行规范化与膨化处理,重新确定模型参数,进行农作物单产预测。经过 1999—2003 年的运行得以不断完善,实践证明是行之有效的。

农作物单产区划把全国分成作物单产水平相近、生产条件相似的 11 个一级区划单元,39 个二级区划单元和 133 个三级区划单元,从而针对不同的区划单元,分别进行模型筛选、膨化和单产预测。这种方法不仅提高了农作物单产预测的精度,而且为重新使用以往的农业气象模型提供了一条可行的方式。

通过大量搜集 1980 年以来国内农业和气象两个学科的相关刊物 40 多种,总共搜集到了 1000 多个应用实例,涉及小麦、水稻、玉米、大豆等 4 个类别,经整理后得到小麦模型 114 个,玉米模型 25 个,水稻模型 70 个,大豆模型 36 个,膨化后形成全国农作物单产预测模型库。

在农作物单产估算基础数据集不完整的情况下,首先选择代表性县级行政单元进行单产模拟,然后在估算过程中采用空间插值的外推方法,得到其他县的作物单产。同时,借助农作物种植面积监测数据,得到区域水平(省级行政单元或市级行政单元)的总产,并反推出省级行政单元的作物单产。这种方法不但较好地解决了农作物单产估计中的数据遗漏现象,而且解决了农业气象模型单点模拟到区域单产估算的鸿沟。

参考文献 (References)

[ 1 ] Xiao Q G, Zhou C S, Chen W Y *et al*. Experiment on Winter Wheat Yield Estimation Using Meteorological Satellite[J]. *Remote Sensing of Environ.*, 1986, **1**(4): 260—269. [ 肖乾广, 周嗣松, 陈维英等. 用气象卫星数据对冬小麦进行估产的实验, 环境遥感, 1986, **1**(4): 260—269. ]

[ 2 ] Xu X R. Documents of Environment Monitoring and Crop Yield Estimation Using Remote Sensing[C]. Beijing: the Press of Peking University, 1991. [ 徐希孺, 环境监测与作物估产的遥感研究论文集[C]. 北京: 北京大学出版社, 1991. ]

[ 3 ] Li Y Z. Winter Wheat Status Monitoring and Production Estimation Using Meteorological Satellite [C]. Beijing: Meteorological Press, 1993. [ 李郁竹. 冬小麦气象卫星遥感动态监测与估产[C]. 北京: 气象出版社, 1993. ]

[ 4 ] Sun J L. Pandect of Crop Monitoring and Yield Estimation Using Remote Sensing [M]. Beijing: Chinese Science and Technique Press, 1996. [ 孙九林. 中国农作物遥感动态监测与估产总论[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 1996. ]

[ 5 ] Huang J F, Xie G H. Winter Wheat Monitoring Using Meteorological Satellite Remote Sensing [M]. Beijing: Meteorological Press, 1996. [ 黄敬峰, 谢国辉. 冬小麦气象卫星综合遥感[M]北京: 气象出版社, 1996. ]

[ 6 ] Wang R C, Huang J F. Rice Yield Estimation Using Remote Sensing [M]. Beijing: Chinese Agricultural Press, 2002. [ 王人潮, 黄敬峰. 水稻遥感估产[M]. 北京: 中国农业出版社, 2002. ]

[ 7 ] Zhou X H, Xie K Q, Xu X R, *et al*. The Structure Analysis of Winter Wheat Yield and the Principal of Remote Sensing Estimation of Winter Wheat Yield [J]. *Remote Sensing of Environ.*, 1989, **4**(2): 116—127. [ 朱晓红, 谢昆青, 徐希孺等. 冬小麦产量构成分析与遥感估产[J]. 环境遥感, 1989, **4**(2): 116—127. ]

[ 8 ] Chen X K, Yang C H. Characteristic of Agricultural Complex Giant System and National Grain Output Prediction Theories and Applications of System Engineering [J]. *Systems Engineering-theory & Practice* 2002, (6): 108—112. [ 陈锡康, 杨翠红. 农业复杂巨系统的特点与全国粮食产量预测研究, 系统工程理论与实践, 2002, (6): 108—112. ]

[ 9 ] Li X J. Crop Yield Estimation Methods [J]. *Journal of Xinjiang Meteorologic*, 1997, **20**(4): 50—53. [ 李新建. 作物产量气象预报服务方法[J]. 新疆气象, 1997, **20**(4): 50—53. ]

[ 10 ] Meng Q Y, Wang X L. Literature Collection of Crop Yield Modeling, Institute of Remote Sensing Applications [R]. Chinese Academy of Sciences, 1999. [ 孟庆岩, 王秀丽. 农作物单产模型文献集[R]. 中科院遥感应用研究所, 1999. ]

[ 11 ] MacDonald R B, Hall F G. Global Crop Forecasting [J]. *Science*, 1980, **208**: 670—679.

[ 12 ] Supit I, Hooijer A A, Van Diepen C A. System Description of the WOFOST 6.0 Crop Simulation Model implemented in CGMS [R]. JRC, European Commission, EUR 15956, 1994.

[ 13 ] Rijks D, Terres J M, Vossen P. Agrometeorological Applications for Regional Crop Monitoring and Production Assessment [R]. JRC, European Commission, EUR 17735EN, 1998.

[ 14 ] Li S Q. A General Introduction to the Complete Set of Research Achievements “A Study of National Agroclimatic Resources and Agroclimatic Regionalization in China” [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 1994, **4**(2): 116—122. [ 李世奎. 《全国农业气候资源和农业气候区划研究》系列成果综述[J]. 干旱区资源与环境, 1994, **4**(2): 116—122. ]

[ 15 ] Zhou Y. Crop Yield Estimating Zoning Using Remote Sensing [R].



Institute of Remote Sensing, Chinese Academy of Sciences, 1998.  
[周艺·农作物遥感估产区划.[R]. 中国科学院遥感应用研究所,1998.]

[16] Saarikko R A· Applying a Site Based Crop Model to Estimate Regional Yields under Current and Changed Climates [J]· *Ecological Modelling*, 2000, **131**:191—206.

Operational Method for Crop Yield Prediction

MENG Qing-yan, LI Qiang-zi, WU Bing-fang  
( Institute of Remote Sensing Applications, CAS, Beijing 100101, China)

**Abstract:** In this paper, the authors develop an operational method to predict crop yield in China.

Crop yield stratification is fundament, in which each stratum has own yield model for different crops. The level of crop yield (winter wheat, corn, rice, et al.) as well as physical factors of temperature, precipitation, soil type and sun radiation are considered. There are about 11 strata in China at the first level based on physical factors, 39 strata at the second level based on crop yield and 133 strata at the third level based on agro-meteorology stratification.

Literature study goes review has been made through the journals and books since 1980s for collecting agro-meteorological models and relevant application area. There are 114 models for wheat, 25 models for maize, 70 models for rice and 36 models for soybean. For every model, the suitable area has been defined by considering the original application area and crop yield stratification, and the parameters are generated by regression method of historical crop yield data and meteorological data.

The crop yield prediction is stratum by stratum. To one stratum, there are many meteorological stations and counties. It is impossible to do the model calibration for each station or each county due to the lack of data. It may have the yield data for each county, but it is difficult to have the meteorological data at the same period for this county. Only those counties with both yield and meteorological data are selected to calibrate the yield model. The yield predictions are done for those counties.

Spatial interpolation is used to extrapolate the yield at a station to whole county or whole stratum. Each pixel has its own yield data. The non-arable land is masked with landuse map and the average yield at a county or a stratum is calculated.

At the end of this paper, a case study is presented to predict the yield of winter wheat in 2003.

**Key words:** crop yield prediction; operational; agro-meteorological model