

文章编号: 1000-0585(2002)05-0585-08

3S 一体化技术支持下的西南地区 冬小麦估产 ——以安宁河谷四县为例

江晓波, 李爱农, 周万村

(中国科学院、水利部成都山地灾害与环境研究所, 成都 610041)

摘要: 农作物遥感估产已经是广泛应用的技术, 但由于西南地区复杂的地貌类型以及遥感信息源等因素的限制, 农作物估产方面的研究起步较晚, 因而研究山区的农作物遥感估产对西南地区有重要的理论价值和现实意义。安宁河谷为一南北走向的山间盆地, 是四川省第二大粮食生产基地。本文运用遥感 (Remote Sensing)、地理信息系统 (GIS) 和全球定位系统 (GPS) ——简称 3S, 采取全数字式判读方式提取冬小麦的播种面积, 进行野外点、线采样, 并利用数理统计方法, 建立了该地区的冬小麦估产模型。

关 键 词: 安宁河谷; 遥感; 地理信息系统; 全球定位系统; 冬小麦; 估产; 模型

中图分类号: S127; S165⁺.27 **文献标识码:** A

1 引言

粮食作物的丰欠历来受到社会、政府部门的重视, 在农作物收割之前预测其产量有利于政府提前决策及采取宏观调控措施。因此在农作物播种后到收割前的这段时间, 如何快速、准确地估测农作物的产量一直都是各级政府、科研部门所关注的一项重要工作。

预测农作物的产量始于 20 世纪初, 首先从小麦开始。70 年代起, 美国国家航空航天局 (NASA)、国家海洋大气局 (NOAA)、农业部 (USDA) 联合制定了利用遥感技术开展“大面积作物调查实验”计划 (LACIE), 完成了对世界主要小麦产区的面积、单位面积产量和总产量的估算实验, 其精度在 90% 以上, 并且已经进入了业务化运行阶段。仅在短短的两年内, 就从中获利达 4 亿美元; 美国每年投资 8000 多万美元用于全球农作物产量的估测, 并从中获利多达 18 亿美元; 欧盟也建立欧盟区的农作物估产系统用于实施欧盟区的共同农业政策^[1~5]。我国应用遥感技术进行作物估产始于 1981 年, 研究对象是冬小麦。1983 年, 北京市农林科学院综合所、天津市农科所、河北省气科院及国家气象局等三省市多家单位提出京津冀冬小麦综合估产的技术与方法, 于 1984 年 7 月正式实施, 并且在国家气象局建立了北方 11 省市冬小麦气象遥感估产运行系统, 开展冬小麦的产量估测^[6~10]。国家计委、国家科委非常重视粮食估产研究, 并将水稻、小麦、玉米等农作

收稿日期: 2002-02-06; 修订日期: 2002-07-20

基金项目: 中科院知识创新工程项目 (KZCX1-Y-02-01); 中科院成都山地灾害与环境研究所创新种子基金 (010513) 资助; 中科院“九五”重大和特别支持项目专题 (KZ95T-03-03-05) 部分成果

作者简介: 江晓波 (1973-), 男, 四川茂县人, 博士生。现从事遥感和地理信息系统应用研究。

物的估产列为国家“八五”攻关项目。中国科学院在完成“八五”攻关任务的基础上,于1997年将“中国资源环境遥感信息系统及农情速报”作为院“九五”重大和特别支持的项目。

2 研究区自然、社会经济状况

西南地区自然条件复杂,山地占2/3以上。高程、坡度、坡向决定着土地利用方式,田块小而且分散,农作物种植结构多样;遥感信息源获取的限制因素较多,因而运用遥感和GIS技术进行农作物估产研究起步较晚。

安宁河谷位于四川省凉山彝族自治州,是指包括西昌市与冕宁、德昌、米易3县在内,沿安宁河一带习惯上称为坝子的部分(见图1)。地势北高南低,海拔在1200~1600m左右,面积达1800km²,为四川省第二大平坝地区,同时也是川西的农业中心,农作物的种植结构、耕作方式在西南地区有一定的代表性。该地区具有“四季如春,干湿分明”的气候特色。年均温13~20℃,最热月均温20~26℃,最冷月均温5~11℃,年降水量一般在1000mm左右,其中5~10月为雨季,11~4月为干季。总的来说,安宁河谷日照充足,热量丰富,无霜期长,降水充沛,冬温高,冻害不大,有利于农业生产,其不足是冬春干旱,秋季多雨,局部地区有冻害、冰雹、旱风等^[11]。

安宁河谷是四川省第二大农业基地,采取一年两季的耕作方式,播种一季冬小麦(或油菜)和一季中稻(或夏玉米),冬小麦是除了水稻外的第二大类粮食作物。近年来,由于受市场变化的影响,油菜的播种面积不断上升,且主要分布于平坝水田中,而冬小麦则主要种植在山区旱地中。冬小麦的播种时间为一年的10月下旬至11月上旬,收割时间是翌年的4月底至5月初。1997年安宁河谷四县市冬小麦播种面积为21780hm²,产量为89743041kg;1998年四县市冬小麦播种面积为22261hm²,产量为93747690kg^①。

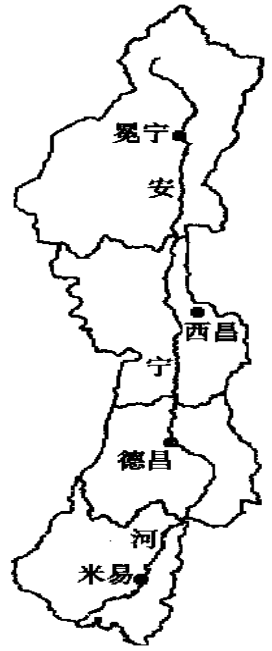


图1 安宁河谷四县市略图

Fig. 1 The four counties in Anning River Basin

3 基于遥感和GIS支持下的安宁河谷冬小麦估产模型的建立

3.1 基于遥感、GIS和GPS支持下的冬小麦估产流程图

3S一体化技术是学科发展交汇的结果,是遥感、GIS和GPS的有机结合,是各自优势的充分发挥。3S一体化是对信息的获取、处理、定位、分析和表达的过程,体现了信息流的连续性。遥感技术提供了时空序列上的、多精度的“海量”信息源,GIS技术为包括遥感信息在内的信息处理、分析、表达、利用提供了平台,GPS技术提供了精确的空间定位,为遥感和GIS提供了良好的精度控制基础,同时也是数据采集的重要方式^[12,13]。

基于遥感、GIS和GPS支持下的冬小麦估产可以分为背景数据库的建立和野外实测两个部分。背景数据库的建立包括社会经济因子库、遥感影像库、生物学因子库以及自然

① 数据源自四川省农牧厅

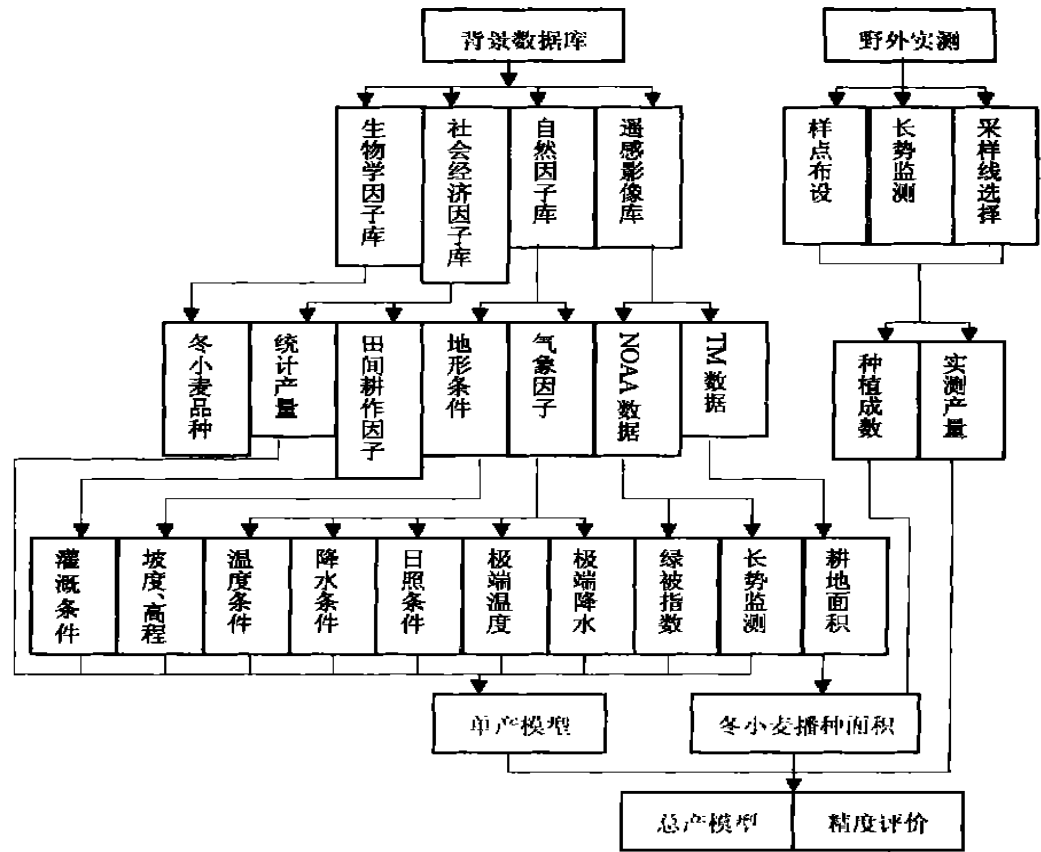


图 2 基于遥感、GIS 和 GPS 支持下的冬小麦估产流程图

Fig. 2 The streamline of winter wheat yield-estimation by Remote Sensing, GIS and GPS

因子库等，建库目的是为获取区域的自然、社会经济、生物学以及影像数据，为获取冬小麦的播种面积、建模所需的因子并构建冬小麦的估产模型提供数据支持；野外实测的目的则主要是为了获取冬小麦播种面积所占总耕地的比例（种植成数）、实测产量并监测冬小麦的长势，从而准确地获取冬小麦的播种面积，并用于检验估产模型的精度（图 2）。

3.2 冬小麦播种面积提取

3.2.1 卫星影像时相、波段的选择 选择 2000 年 3 月 Landsat TM 2、3、4 波段的安宁河谷的标准假彩色卫星合成影像作为冬小麦播种面积提取的基本信息源。

3.2.2 建立解译标志 在冬小麦生长期间的 TM 卫星影像上，除了冬小麦呈现为红色，油菜、蔬菜及林地也呈现红色。根据遥感卫星标准假彩色影像的色相、色调、纹理和结构等差异建立判图的遥感解译标志。

3.2.3 室内解译成图和耕地数据库的建立 选择全数字人机交互判读方式。判读时综合考虑卫星影像上耕地在颜色、色调、纹理和分布位置等方面的特点，对其加以识别，在此基础上建立估产的耕地数据库。

3.2.4 野外采样 冬小麦的种植成数，是指耕地中冬小麦的播种面积占整个耕地面积的

比例。因为在冬小麦生长发育期间，耕地中还大面积地种植油菜、蔬菜等作物（见图 3），同时还有部分冬炕田、休耕地，而且冬小麦的播种面积受市场变化的影响，其年际波动较大；所以获取冬小麦的种植成数，目的是为了准确地计算冬小麦的播种面积。由于在卫星影像上较难区别冬小麦和油菜、蔬菜等其它农作物，所以需要野外采样修正室内取得的冬小麦种植成数，从而获取冬小麦的实际播种面积。



图 3 安宁河谷地区冬小麦野外采样照片

Fig. 3 The field sampling photos of the winter wheat in Anning River Basin

采样工作原理是以县为单位，按耕地面积和结构以及冬小麦的历史产量对整个西南地区进行区划。在二级区划的基础上选择能够满足采样精度要求数量的采样线和采样点作为样本，运用 GIS 和 GPS 一体化技术进行野外采样，然后在室内利用概率论和统计学的方法计算冬小麦的种植成数（见表 1）。

表 1 2000 年安宁河谷四县市作物野外采样成数

Tab 1 The crop percentage of Anning River Basin's four counties by field sampling in 2000			
县、市	冬小麦	油菜	其它
冕宁	22. 70%	26. 15%	51. 15%
西昌	37. 33%	15. 68%	46. 99%
德昌	21. 20%	30. 15%	48. 65%
米易	19. 70%	25. 42%	54. 88%

3.2.5 冬小麦播种面积获取 冬小麦的播种面积等于从遥感影像上解译出的耕地面积乘以冬小麦的种植成数。

3.3 冬小麦长势监测

准确地预测冬小麦的产量，对其长势的监测是必不可少的手段。以冬小麦生长期间每旬的 NOAA 卫星影像作为冬小麦长势监测的基本信息源。

3.4 冬小麦估产区划

西南地区的自然条件（地形、地貌、气候、土壤等）和社会经济条件（耕作方式、灌溉、施肥量等）相差很大，因而在不同的区域主导冬小麦产量的因素是不同的。区划的目的在于针对不同的区域选择相应的因子建立模型，从而提高冬小麦估产的精度。区划的过程实际上是“产量同类区”的获取。以县为单位将西南地区划分为两级估产区。一级区划以大的地貌单元为划分指标，二级区划以气候、土壤、产量水平等为划分指标。

3.5 单产模型建立

3.5.1 因子分析 影响冬小麦产量的因素很多，如气象、地形、地貌、土壤、水文、生

物及耕作方式等, 具体可分为 6 方面的因子: ①气象因子: 温度、降水、日照、极端温度、极端降水等。②生物因子: 主要指冬小麦品种的选择。③田间耕作方面的因子: 灌溉条件、施肥量、耕作方式、栽培技术等。④土壤生产潜力因子。⑤地形、地貌因子: 如高程、坡度、坡向等。⑥遥感因子: 卫星影像的不同波段之间组合所获取的植被指数等。

严格而言, 遥感因子不是冬小麦产量的影响因子, 而是其他因子对冬小麦产量的影响在遥感影像上的综合反映。植被指数的获取需要考虑其他同期作物对植被指数的影响, 所以采取定位定点、多样点采样以及植被指数的加权平均获取遥感因子。根据西南地区的区域特征, 选择气象因子、植被指数以及对西南地区土地利用方式有决定意义的高程和坡度因子进行建模, 在一定程度上提高了模型的可信度。

3.5.2 模型建立 冬小麦的产量与因子之间的关系可以用下面的公式来表示:

$$Y=f\left(G,T,P,H,I,S,E \cdots\right)$$

式中: Y - 冬小麦产量, G - 冬小麦生长期间的植被指数, T - 冬小麦生长期间的温度, P - 冬小麦生长期间的降水量, H - 冬小麦生长期间的日照时数, I - 区域冬小麦的灌溉和施肥量系数, S - 地区坡度系数, E - 高程系数。

综合分析冬小麦生长期的因子变化对产量的影响, 植被指数选择冬小麦灌浆至成熟期^[14], 气象因子选择抽穗至灌浆期进行建模。

$$Y=\alpha \cdot G \cdot\left[b\left(1-\frac{\left|T_i-T\right|}{T}\right)+c\left(1-\frac{\left|P_i-P\right|}{P}\right)+d\left(1-\frac{\left|H_i-H\right|}{H}\right)+e\right] \cdot I \cdot S \cdot E+f$$

式中: Y - 冬小麦估测产量, G - 灌浆至成熟期间的植被指数值累加, T - 抽穗至灌浆期间多年平均积温, T_i - 当年抽穗至灌浆期间积温, P - 抽穗至灌浆期间多年平均降水量, P_i - 当年抽穗至灌浆期间降水量, H - 多年平均抽穗至灌浆期间日照时数, H_i - 当年抽穗至灌浆期间日照时数, I - 冬小麦的灌溉和施肥量系数, S - 坡度系数, E - 高程系数, a, b, c, d, e, f - 常数。

分析安宁河谷冬小麦产量的统计资料^① (1983~1998 年), 其产量有逐年提高的趋势; 在增加的趋势中还有部分随机的波动。这部分波动, 在很大程度上可以认为是气象条件影响的^[3]。本研究首先建立这部分随机波动 (ΔY) 与气象条件之间的关系。其公式如下:

$$\Delta Y=b\left(1-\frac{\left|T_i-T\right|}{T}\right)+c\left(1-\frac{\left|P_i-P\right|}{P}\right)+d\left(1-\frac{\left|H_i-H\right|}{H}\right)+e$$

因此, 冬小麦的遥感估产模型也可表示为:

$$Y=\alpha \cdot G \cdot \Delta Y \cdot I \cdot S \cdot E+f$$

气象条件影响的随机波动表达为冬小麦当年的实际产量与其滑动平均值之差。将安宁河谷四县、市的冬小麦的历年的产量按权重计算每年产量的平均值, 再采取 5 年一组的滑动平均方法, 得出冬小麦的滑动平均产量。即

$$\begin{aligned} \Delta Y &= y_i-\bar{y}_i \\ \bar{y}_i &=\sum_{n=1}^4 w_i y_n \\ \bar{y}_i &=\left(y_{i-2}+y_{i-1}+y_i+y_{i+1}+y_{i+2}\right) / 5 \end{aligned}$$

① 数据源自四川省农牧厅

式中： ΔY —气象条件变化所决定的产量， y_i —四县市某年冬小麦产量的平均值， w_i —权重（权重为安宁河谷四县市中某县、市某年的冬小麦面积占当年四县市冬小麦总面积的比）， y_n —该县市冬小麦的单产， \bar{y}_i —四县市某年冬小麦的滑动平均值。

西南地区地形、地貌以山地为主，高程相差较大。西南地区的冬小麦除部分位于平坝水田中，还有很大一部分位于山坡旱地中。冬小麦的播种位置和产量受坡度和高程影响很大，不同高程、坡度下的冬小麦的产量有较大的差异。因此，在构建西南地区的冬小麦估产模型时，引入坡度系数（ S ）和高程系数（ E ）两个因子是很必要的^[15]。引入 S 和 E 是为了全面反映西南地区的区域特色，虽然对于某一具体的区域而言，这二者是相对稳定的常量，但对于不同的地区，这二者则是变量。因此，这一模型具有一定的普遍意义，可以反映西南地区冬小麦分布和产量的区域特点。

安宁河谷四县市耕地的坡度大多在 25° 以下（见表2），高程大多在1600m以下（表3）。坡度系数定义为某一坡度值之下的冬小麦面积与冬小麦总面积之比。根据动力、重力学原理和坡度对耕地种植状况的影响，从背景数据库的DEM中，将安宁河谷四县的坡度以 7° 为界，把冬小麦的种植范围按坡度分为 $\geq 7^{\circ}$ 和 $< 7^{\circ}$ 两个级别，因此安宁河谷四县的坡度系数为 $< 7^{\circ}$ 的冬小麦面积与冬小麦总面积之比。

高程系数定义为某一特定高程以下的冬小麦面积与冬小麦的总面积之比。利用安宁河谷的DEM数据，并综合分析各高程对冬小麦产量的影响，将安宁河谷地区的高程以1600m为界分为 $\geq 1600\text{m}$ 和 $< 1600\text{m}$ 两个级别^[16]，因此高程系数为 $< 1600\text{m}$ 的冬小麦面积和冬小麦总面积之比。

表 3 安宁河谷四县市不同高程的耕地比率

Tab 3 The percentage of the agrarian area with different elevations in Anning River Basin

	< 1300m	1300~ 1400m	1400~ 1500m	1500~ 1600m	> 1600m
冕宁	1. 1%	0. 5%	0. 8%	1. 6%	12. 2%
西昌	2. 3%	0. 7%	1. 9%	5. 1%	13. 6%
德昌	3. 1%	3. 3%	4. 2%	4. 2%	9. 7%
米易	10. 3%	5. 2%	5. 1%	5. 0%	10. 2%

将安宁河谷各县、市冬小麦产量的加权平均值、气象数据、植被指数数据、冬小麦的灌溉和施肥量系数、坡度系数以及高程系数代入公式中，求解：

$$Y = -0.27G \cdot \left[-202.89 \left(1 - \frac{|T_i - T|}{T} \right) + 99.85 \left(1 - \frac{|P_i - P|}{P} \right) - 805.35 \left(1 - \frac{|H_i - H|}{H} \right) + 885.8 \right] \cdot I \cdot S \cdot E + 4020.2$$

3. 6 精度评价

3. 6. 1 误差分析 在冬小麦估产过程中，其误差主要来源于以下几个方面：①种植成数

表 2 安宁河谷四县市不同坡度的耕地比率

Tab. 2 The percentage of the agrarian area with different slopes in Anning River Basin

	< 7°	7- 15°	15- 25°	> 25°
冕宁	7. 1%	3. 7%	8. 4%	5. 6%
西昌	8. 2%	3. 7%	8. 2%	6. 6%
德昌	5. 7%	2. 8%	6. 9%	6. 0%
米易	7. 9%	3. 4%	8. 9%	7. 0%

的获取中产生的误差。种植成数的获取方法以概率论和统计学为基础, 是沿公路主干道连续采样所得, 在其采样的长度及代表性方面还有待进一步探讨。②在单产模型的构建中所产生的误差。包括公式的代表性, 所选变量的代表性, 产量统计资料的可信度等。③遥感影像的获取、纠正和判读分类过程中产生的误差。

3.6.2 精度评价 精度是指遥感估测的冬小麦产量与“真值”的符合程度, 它是反映估产效率高低的指标。在冬小麦遥感估产研究中, 对冬小麦平均单产(真值)的预测是很关键的, 它是获得冬小麦总产量和提供检验估产精度的主要依据。从数理统计学的角度而言, 除非对总体的全部单元进行全面观察, 否则根据样本单元观察值所制定的估计值与被估参数之间便可能存在误差^[10]。运用安宁河谷四县、市的气象和冬小麦产量统计资料以及野外采样点的实测产量数据进行精度检验, 模型精度达 92%。

4 结束语

西南地区农作物估产以往仅局限于气象估产模型, 其实时性较差, 且作物的播种面积完全依靠统计资料, 受人为因素干扰较大, 所以误差较大。本研究应用先进的遥感方法, 并配合以 GIS 和 GPS 一体化技术支持, 获取冬小麦的播种面积、植被指数, 地形(坡度)、高程、气象数据, 建立了一个能全面反映西南区域特征的具有代表性的冬小麦遥感估产模型, 并获得较高的精度。

参考文献:

- [1] 陈述彭. 遥感在农业科学技术中的应用. 见: 陈述彭. 地学的探索(第三卷). 遥感应用. 北京: 科学技术出版社, 1990. 20~ 32.
- [2] Mac Donald R B, Hall F G. Global crop forecasting. *Science*, 1980, 208: 670~ 679.
- [3] Csornai G, *et al.* Operational crop monitoring by remote sensing in Hungary. *Operational Remote Sensing for Sustainable Development*, Nieuwenhis, Vaughan & Molenaar, 1999.
- [4] Wu Bingfang. Crop monitoring of China with AVHRR. Presented at Science Symposium on Space Technology for Improving Quality of Life in Developing Countries: A Perspective for the Next Millennium. Delhi, India, 1999. 15~ 17.
- [5] Gommès Rene. Crop-yield weather modeling: lecture notes and exercises. FAO Publications, 1999.
- [6] Sun J L. Dynamic monitoring and yield estimation of crops by mainly using the remote sensing technique in China. *Photogram. Eng. Rem. S.*, 2000, 66(5): 645~ 650.
- [7] 孙九林主编. 中国农作物遥感动态监测与估产总论. 中国科学技术出版社, 1996. 18~ 30, 92~ 95.
- [8] 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试验. *环境遥感*, 1986, 1(4): 260~ 269.
- [9] 肖乾广. 用 NOAA 气象卫星的定量资料计算冬小麦种植面积的两方法. *环境遥感*, 1989, 4(3): 191~ 126.
- [10] 熊利亚主编. 中国农作物遥感动态监测与估产集成系统. 北京: 中国科学技术出版社, 1996.
- [11] 中国科学院西南地区综合考察队川滇接壤地区农业分队. 安宁河谷农业气候特征及分区. 1966. 4.
- [12] 杨开忠, 沈体雁. 试论地理信息科学. *地理研究*, 1999, 18(3): 260~ 265.
- [13] Bouman Bam. Crop modeling and remote sensing for yield prediction. *NETH J Agr Sci.*, 1995, 43(2): 143~ 161.
- [14] 王乃斌主编. 中国小麦遥感动态监测与估产. 中国科学技术出版社, 1996. 83~ 85, 277~ 299.
- [15] 刘卫国, 吕鸣伦. 地理信息系统和遥感技术支持下的山地环境梯度分析方法研究. *地理研究*, 1997, 16(3): 63~ 69.
- [16] 周万村. 三峡库区土地自然坡度和高程对经济发展的影响. *长江流域与资源环境*, 2001, 10(1): 15~ 21.

A study on winter wheat yield estimation in Southwest China by Remote Sensing, GIS and GPS: based on four counties of the Anning River Basin

JIANG Xiao-bo, LI A-nong, ZHOU Wan-cun

(Institute of Mountain Hazards and Environment, CAS, Chengdu 610041, China)

Abstract: Southwest China is a mountainous region. Elevation and landform (e. g. slope) are two key factors to limit the land use mode, furthermore, to influence food variety and yield. Food Yield Estimation (FYE) by Remote Sensing is an advanced and mature technology. Because of the complicated landform and fragmentary surface of Southwest China and the limitation of Remote Sensing source, the study of FYE lags behind other regions. It is of great significance to the establishment of the FYE model in mountainous areas of Southwest China both in theoretical value and practical aspect.

Anning river basin is a NW-trended intermontane basin, and the second largest food production base in Sichuan province. The authors make use of the combination of Remote Sensing, GIS and GPS to place point and line field samples, get the sowed area of winter wheat and establish the winter wheat yield-estimation model.

The establishment of the yield of the winter wheat is decided by factors of two aspects. One is the sowed area; the other is the per unit area yield model of the winter wheat. The acquisition of sowed area of the winter wheat is depended on the agrarian area interpreted by remote sensing and the percentage of the winter wheat. The establishment of the unit yield model is depended on the choice of the formula and the parameters used to make up the formula. There are several kinds of factors to influence the growth condition and decide the unit yield of the winter wheat, such as climate (include temperature, precipitation, moisture, sun shine etc.), biological factor, planting method, soil potentiality, landform and so on. In these factors, the elevation and the gradient are two factors that can reflect the natural features of the winter wheat in Southwest China. The winter wheat's planting position and yield are influenced by elevation and slope. In fact, the remote sensing factor is not really a factor to decide the yield, but only the compositive reflection of other factors on the sensor. Zone division is another key factor to decide the choice of the parameters of the formula and influence the precision of the model, because different zones have different major factors to influence the yield. The selection of the formula is depended on the mathematic method, the knowledge of the region's natural and economic conditions and the accumulation of experience. The precision of the model is decided by the representative of the formula and the parameters.

Key words: Anning river basin; Remote Sensing; Geographic Information System; Global Position System; winter wheat; yield-estimation; model