

48-55

第18卷第1期
1998年1月生态学报
ACTA ECOLOGICA SINICAVol. 18, No. 1
Jan., 1997农作物遥感估产最佳时相的选择研究^{*}

——以中国主要粮食作物为例

于怀遂

(河南大学地理学系,开封,475001)

S127
T179

摘要 最佳时相遥感图象的选择是农作物遥感估产的关键环节之一,它必须兼顾作物识别和单产模拟对遥感时相选择的要求,综合考虑多方面的影响因素,根据农作物遥感估产中各项工作的具体要求,以提高遥感图象中目标作物信息及其与作物单产关系的显著程度为主要目的,分析了农作物遥感估产最佳时相的选择依据,认为它主要包括作物光谱的种间差异、作物物候历的种间差异、太阳高度角的变化、作物产量形成的关键期、作物面积对收获面积的代表性以及土壤光谱噪声的变化。此外,还分别选择了我国各地水稻、小麦和玉米遥感估产的最佳时相,作出了它们的最佳时相分区图,供全国范围内主要粮食作物遥感估产参考。

关键词: 农作物, 遥感估产, 最佳时相。

SELECTION OF THE OPTIMUM TEMPORAL FOR CROP ESTIMATION USING REMOTE SENSING DATA—— MAIN FOOD CROPS IN CHINA

Qian Huaisui

(Department of Geography, Henan University, Kaifeng, 475001, China)

Abstract One of the key links in crop estimation using remote sensing data is the selection of the optimum temporal images, in which the selection of the optimum temporal for identification of a certain target crop must be combined with that for unit yield simulation of the target crop. Its main aims are both to enlarge the differences of spectral information between the target crop and other objects on remote sensing images and to improve significance of the correlation between unit yield and spectral information of the target crop.

In this study, according to the demands of crop estimation using remote sensing data, the selection bases and methods of the optimum temporal are discussed. The results indicate that the selection bases include the differences of reflectance spectrums between crop species, differences of phenological calendars between crop species, changes of solar altitude, key periods of crop production of the target crop in total growing period, changes of

* 本文是“八·五”科技攻关课题“重点产粮区主要农作物遥感估产”中“全国主要农作物遥感估产区划研究”子专题的部分成果,中国科学院孙九林、张福春、顾连宏、王群力、李泽辉、岳燕珍等同志给予大力帮助,谨此致谢。

收稿日期:1996-01-05,修改稿收到日期:1997-02-20。

the spectral noise from soil and possible reduction of the area of a certain target crop in its total growing period. The optimum temporals for crop estimates of rice, wheat and maize in China using remote sensing data are selected and regionalized besides.

Key words: crop, crop estimates using remote sensing data, optimum temporal.

农作物的生长过程是一种物质积累过程,它包括多个生育期。一幅遥感图象是对某一时刻地物种类及其组合方式的反映,其中目标作物的反射率及其光谱分布是相应作物遥感估产的目标信息,其它地物的反射率及其光谱分布为背景信息,后者对前者有明显的干扰作用。在目标作物主生长期不同时间相的遥感图象中,目标信息及其与作物单产关系的显著性有很大差别,其中目标信息最显著的时相对作物识别和面积估算最有利,为作物识别最佳时期;作物单产与遥感光谱信息关系最显著的时相对单产光谱模型的建立最有利,为单产模拟最佳时相。

航天遥感技术具有周期性重复成像的特点,它可以为农作物监测和估产提供多时相遥感图象。在目标作物主生长发育的同时,其它地物(如其它农作物、森林、草被、土壤等)、大气条件和太阳高度也在不断变化,它们不但使目标作物信息的提取精度和不同时间相遥感信息的可比性明显下降,而且也增加了遥感信息处理和订正的难度。最佳时相的选择不但可以强化目标作物信息及其与作物产量关系的显著性,弱化其它因子的干扰,而且还可以降低遥感信息中的不确定性,减小信息处理和订正的难度,因此它是农作物监测和估产中的关键环节之一。

关于植被遥感最佳时相的选择,邹尚辉^[1]根据植物光谱的种间变化及物候变化和太阳高度角对植物光谱的影响,研究了湖北省及北亚热带植被分类的最佳时相选择问题;黄敬峰和王秀珍^[2]根据多年植物物候观测资料及绿波和褐波的季节推移,确定了新疆植被遥感的最佳时相;汪逢熙和黎泽文等人^[3-5]在棉花遥感识别的试验研究中,根据各棉花主育期中不同农作物的光谱差别,选择了河南省北、中部棉花遥感识别的最佳时相。这些研究基本上都是区域性实验研究,而且仅讨论了植被识别最佳时相的选择问题,未考虑作物单产模拟的要求。在该项研究中,笔者根据农作物遥感估产中各项工作的要求,对最佳时相的选择依据进行了探讨,并选择了我国各地主要粮食作物遥感估产的最佳时相,供全国主要粮食作物遥感估产参考。

1 农作物遥感估产最佳时相的选择依据

与植物遥感分类相比,农作物遥感估产最佳时相的选择必须兼顾作物识别最佳时相和单产模拟最佳时相两方面,其选择依据比较复杂。根据遥感信息提取和处理及作物面积和单产估算的要求,最佳时相的选择依据应包括作物光谱的种间差异、作物物候的种间差异、太阳高度角的变化、作物产量平成的关键期、作物面积对收获面积的代表性及土壤光谱噪声的变化。

1.1 作物光谱的种间差异

在不同作物之间,反射光谱特征(或植被指数)因作物叶子结构、叶绿素含量、含水量和叶子取向等作物群体特征量的不同而有很大差异。如果作物物候期不同,作物覆盖度和叶面积系数必然有很大差别,其光谱特征的种间差异尤其明显。因此,许多学者根据植物光谱的种间差异,确定植物分类(或作物识别)最佳时相。例如,邹尚辉^[1]在选择植物分类最佳时相时,根据植物光谱的季节变化和种间差异,认为春、秋季是植物红外光谱变率最大的时期,只要植物种间的光谱变率稍有差异,它们的光谱反射率就会形成明显的对比,因此春、秋季的植物种间光谱差异最大。对于农作物来说,春、秋季往往为播种期和成熟期,由于各种作物对温度条件的要求不同,其播种期和成熟期也先后不一,在春、秋季遥感图象上,早播作物和晚熟的作物的影像信息比较突出,因此可把这些时相作为识别这些作物的最佳时相。

汪逢熙和黎泽文等人^[3-5]在棉花遥感识别研究中,通过观测和对比分析各棉花主育期不同作物的光谱特征,把棉花光谱与其它作物光谱差别最大的蕾期和吐絮初中期作为棉花识别的最佳时相。此外汪逢熙等人还采用双因子方差分析的方法,精确地确定之。根据他们的结果,这一选择依据和方法是行之有效的。

我国幅员辽阔,自然条件和农业生产因地制宜,农作物组合类型繁多。如果用作物光谱的种间差异来选择全国各地农作物遥感估产的最佳时相,则必须在各种农作物组合类型区(必要时还必须考虑自然植被组合类型)设立观测站,对各种作物各生育期的作物反射光谱作系统的、规范化的观测。目前我国还不具备这种条件,因此这一依据仅能应用于区域性实验研究,对于全国农作物遥感估产来说,必须用其它依据取而代之。

1.2 作物物候历的种间差异

农作物的状态和群体结构是影响作物光谱特征的主要因子。对于禾本科作物来说,从播种到成熟变黄以前,随着作物物候期的更替,红光波段反射率因作物覆盖度和叶面积系数的增大而减小,近红外波段反射率逐渐增加,而且在某一时间断面上,各种作物的状态和结构因物候期的不同而有明显差别。因此,同一种作物在不同物候期的遥感图象上有不同的色调,不同作物在同一张图象上的色调也不相同。由此可见,就作物识别最佳时相的选择而言,作物光谱的种间差异和作物物候历的种间差异在一定程度上是等价的,可以用后者代替前者。

我国的物候观测资料非常丰富,作物物候历的种间差异是选择作物识别最佳时相的常用依据。在选择最佳时相时,首先必须了解各种作物植被指数与物候期的对应关系,然后通过对比同一地点不同作物的物候历,即可确定该地识别各种作物的最佳时相。例如,表1是山东省章丘县主要农作物的物候历,由表可见,在4月下旬至5月中旬,水稻、春玉米和棉花刚刚播种,油菜已近成熟期,农田中只有冬小麦处于旺盛生长期,其光谱信息最显著,因此,可把这一段时间定为冬小麦识别最佳时相。同理,也可用此方法确定其它作物的最佳时相。

表1 山东省章丘县主要农作物的物候历

Table 1 The phenological calendars of main crops in Zhangqiu County of Shandong Province

月 Month	3	4			5			6			7			8			9			10		
旬 Dekad	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
水稻 Rice					播种 Sowing			移栽 Transp.			分蘖 Tillering			抽穗 Heading			成熟 Maturing					
冬小麦 Winter wheat	拔节 Jointing				抽穗 Heading		乳熟 Maturing		收获 Harvesting								播种 Sowing					
春玉米 Spring corn					播种 Sowing		三叶 Trifo.		拔节 Jointing			抽穗 Heading			蜡熟 Wax Maturing							
夏玉米 Summer corn								播种 Sowing			拔节 Jointing		抽穗 Heading		乳熟 Maturing		收获 Harvesting					
棉花 Cotton					播种 Sowing		出苗 Emerging		现蕾 Squaring			花铃 Boll-growing			裂铃 Boll-riending							
油菜 Rape	开花 Flowering							收获 Harvesting								播种 Sowing						

1.3 太阳高度角的变化

太阳高度角具有明显的年变化和日变化,并因纬度而异,它通过多种途径间接地影响地物光谱差异及植被指数对生物学变量的敏感度。第一,太阳高度在一定程度上决定了地物得到的太阳辐射量、光线入射角和大气削弱作用的强度,对地物反射光强度、反射率和反射光谱有明显的影响;第二,太阳高度决定了光线在作物群落中的穿行路径,植被指数及其对表征作物群体的参数(如作物覆盖度、高度和叶面积系数等)的敏感度因太阳高度的不同而有明显差异;第三,植物阴影和地形阴影是影响地物反射率和反射光谱的重要因素,它们主要取决于太阳高度,太阳高度越低,阴影效应越明显,这往往在遥感图上造成“同物异色”的

现象。

由于太阳高度对植被反射率的影响非常复杂,所以二者之间有明显的非线性关系。根据对森林和草原的观测^[5],当太阳高度角小于 10° 时,反射率随太阳高度角的增加而增加;当太阳高度角大于 10° 时,反射率随太阳高度角的上升而减小。

晴天大气对太阳辐射的选择性散射使植被的可见光反射率明显减小,而且大气散射作用随太阳高度的不同而有明显差异,因此太阳高度对植被反射光谱也有明显影响。根据 Gilaert 和 Melia 的研究⁶,植被反射率随太阳高度的降低而逐渐增大的特点在红外波段(如 TM_1 、 TM_2 和 TM_3)较明显;在可见光波段(如 TM_4 、 TM_5 和 TM_6)。大气散射对这一规律有明显的干扰,当散射辐射与总辐射的比值小于 0.2 时,可见光反射率随散射辐射比重的增加而迅速上升,当该比值大于 0.2 时,可见光反射率对散射辐射比重很不敏感。因此,当太阳高度较高时,散射辐射的比重较小(在晴天条件下),植被反射光谱对太阳高度较敏感。

植被指数与太阳高度角有明显的非线性关系,但它因作物叶面积系数的不同而有显著差异。据 Pinter 的研究⁷,植被指数 $NDVI$ 随太阳高度角的减小而增大,对于裸露土壤和干草地来说,这一关系的非线性不太明显;在作物生长初期,二者的关系类似于裸土和干草地,但植被指数的增加速度明显加快;在作物生长盛期, $NDVI$ 与太阳高度的关系有非常明显的非线性,当太阳高度角为 35° 时, $NDVI$ 最大,并由此向太阳高度升高和降低的方向减小。根据作物和裸土植被指数与太阳高度的关系,可确定二者植被指数之差随太阳高度的变化规律。由文献^[7]所提供的资料,当太阳高度角为 $50^{\circ} \sim 55^{\circ}$ 时,作物与裸土植被指数之差最大,太阳高度的升高和降低均可使其减小。

此外,Middleton 和 Goward 等人还通过案例实验研究⁸,探讨在不同叶面积系数条件下,植被指数对太阳高度的敏感度。根据他们的结果,当叶面积系数很低或很高时,植被指数对太阳高度很不敏感;当叶面积系数为 0.5~2.0 时,植被指数对太阳高度非常敏感。另外,Goward 等人还特别强调,当太阳高度角很低时(小于 30°),一些表征植物群体结构的参数与植被指数的关系表现为非常明显的非线性,用此关系估算这些参数的误差非常显著,对这些时相的遥感信息必须慎重对待。

一般来说,植物叶面积系数与植被指数的关系非常显著,它对植物群体结构特征的敏感度随太阳高度而变化。据研究^[9],植被指数 $NDVI$ 与叶面积系数的关系对植物丛半径的敏感度随太阳高度角的减小而降低,而且当太阳高度角为 90° 时,它对植物高度不敏感;当太阳高度角为 30° 时,阴影的影响较明显,该关系对植物高度也不敏感;当太阳高度角为 60° 时,它对植物高度较敏感。

总之,就农作物遥感估产最佳时相的选择而言,合适太阳高度的确定需要大量实验研究的支持,在目前现有的条件下,很难具体确定之。根据以上分析,最佳时相的太阳高度角应尽量接近 $50^{\circ} \sim 55^{\circ}$,如果太阳高度过高,一则由于到达作物冠层的太阳辐射过强,作物层对辐射的选择性吸收和反射减弱,无选择反射和散射加强,强烈的反射眩光使地物颜色的彩度下降,地物反射光谱的差别减小;二则因为大气散射辐射的比重较小,在晴天条件下,大气散射粒子密度和太阳高度对可见光反射率和植被指数的干扰较明显;三则也由于植被指数不能客观地反映作物高度。因此,不宜把太阳高度过高的时相作为最佳时相,我国南方地区应特别注意这一点。如果太阳高度过低(小于 30°),一则由于地物反射辐射弱,阴影效应明显,地物之间的亮度对比不明显,不利于目标作物识别;二则因为用植被指数估算作物群体特征量的误差较大;三则也由于植被指数不能真实地反映作物覆盖度的大小。因此,也不宜把太阳高度过低的遥感时相作为最佳时相,我国北方地区和山区应充分重视这一点,对于秋播作物更应如此。此外,最佳时相应尽量避开植被指数对太阳高度敏感的作物生育期,即叶面积系数为 0.5~2.0 的时期。

1.4 作物产量形成的关键期

作物产量是在全生长期各时段环境条件影响下而形成的最终结果,它对不同时段的环境条件有不同的敏感度,而且不同时段的环境要素变率也有明显差别,因此不同时段的环境条件对作物产量有不同的影响,其中影响最大的时段就是相应作物的关键期。就某种作物而言,关键期可能不止一个,其中环境要素(如水分和温度等)临界期往往都是比较重要的关键期。例如,大多数农作物的水分临界期都位于花芽分化

的旺盛生长期,其中小麦位于孕穗到抽穗期,水稻位于孕穗到开花期,玉米位于“大喇叭口”期到乳熟期,这些时期都是生殖生长过程的主要时期,对经济学产量有决定性作用,作物生长发育对环境条件十分敏感,特别是比较严重的自然灾害,往往可以使产量大幅度下降,所以它们都是相应作物的关键期。

根据各种作物植被指数的季节变化特点,在生殖生长过程中的关键期,植被指数一般都达全生长期最高值,而且取稳定趋势,即无明显的上升或下降趋势,趋势水平的高低直接反映了作物群体状态的优劣,间接反映了可能达到的产量水平,这些关键期往往是单产模拟者特别关心的时期,例如,本项目组1992年春季曾在山东省禹城县进行冬小麦遥感估产试验研究,选取其中15个样方的光谱观测资料,应用15种函数形式,分别计算小麦单产与各个生育期比值植被指数(RVI)的相关系数(R),计算结果(图1)表明,小麦单产与1/RVI的关系最密切,各种函数形式的相关系数均以拔节后期到抽穗期最高。因此,单产模拟最佳时相的选择应重视这类关键期。

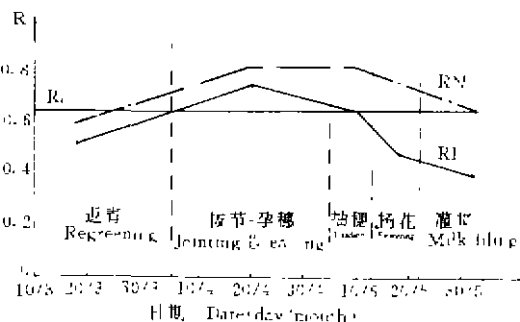


图1 小麦产量与各个生育期比值植被指数(RVI)及其倒数(RN)的相关系数

Fig. 1 The correlation coefficients between wheat yield and RVI (RL) and 1/RVI (RN) in each growth phase

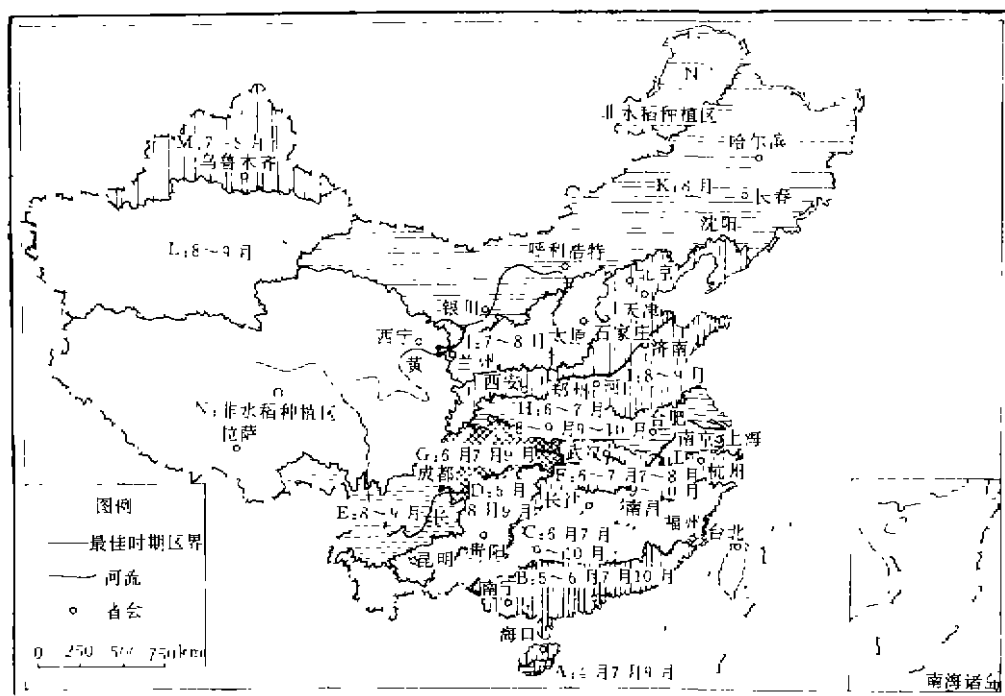


图2 中国水稻遥感估产最佳时相分区图

Fig. 2 Regionalization chart of optimum temporal for rice yield estimation in China using remote sensing data

1.5 土壤光谱噪声的变化和作物面积的代表性

土壤光谱信息是作物光谱信息的重要干扰源,其干扰强度在作物覆盖度较小的时段内较强,而且因作物覆盖度而变化。据研究^[1-3],各种土壤都有一定的绿度值,只有当植物覆盖度大于25%~30%时,才能用绿度识别植物;当植物覆盖度小于60%时,植被指数 $NDVI$ 的信噪比很小,土壤的影响非常明显。根据本项目组1992年在山东省禹城县观测和计算的 TM 第4和第3通道比值植被指数,选取了3个单产水平明显不同的典型样方,分别计算高、中、低产田小麦比值植被指数与裸地土壤植被指数的差值。计算结果(表2)表明,在拔节到抽穗期,小麦与土壤植被指数之差最大,麦田植被指数的信噪比较高,土壤光谱噪声很弱;在拔节期以前,由于小麦覆盖度很低,土壤光谱噪声较强,麦田与裸土植被指数之差很小,特别是中、低产田。因此,不宜把作物遥感估产的最佳时相选在作物封行之前。

表2 麦田与裸土植被指数的差值

Table 2 The differences of RVI between wheat fields and bare soil

生育期 Growth phase	返青 Regreening	5/4	拔节—孕穗 Jointing & Earing	5/5	抽穗 Heading	13/5	扬花 Flowering	23/5	灌浆 Milk-filling
日期(日月) Date(day/month)	26/3	12/4	17/4	24/4	29/4	8/5	13/5	19/5	23/5
高产田 High-yield plot	7.2	13.6	13.0	12.4	13.5	14.4	13.6	10.8	9.2
中产田 Medial-yield plot	3.2	14.2	12.8	14.2	12.8	13.4	12.6	5.2	8.0
低产田 Low-yield Plot	0.8	1.0	1.7	0.8	1.3	1.6	1.6	0.6	0.1

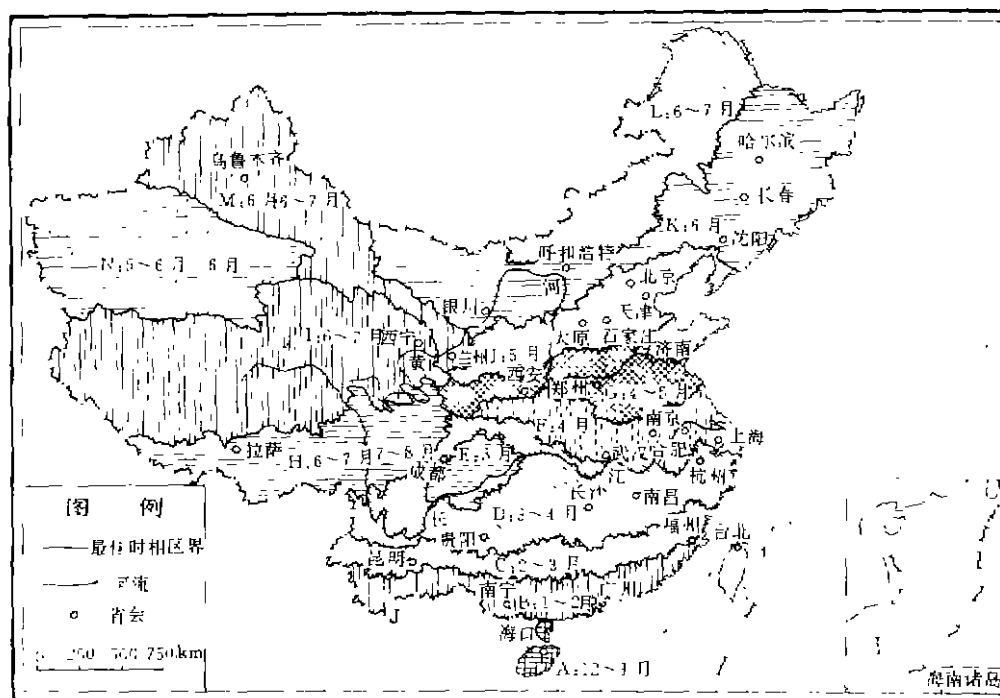


图3 中国小麦遥感估产最佳时相分区图

Fig. 3 Regionalization chart of optimum temporal for wheat yield estimation in China using remote sensing data

一般来说,作物苗期的作物面积并不等于收获面积,在作物长势较差的地区,死苗毁种现象较普遍,因此在选择这类地区作物遥感最佳时相时,必须考虑各时段作物面积对收获面积的代表性,把最佳时相定于目标作物生长期中其它作物播种期之后。例如,冬小麦的最佳时相应定于春播之后,春播作物的最佳时相应定于夏播之后。

2 中国主要粮食作物遥感估产的最佳时相

在本项研究中,搜集了全国100个县(市)的农业物候资料(不包括台湾省),重点考虑作物物候历的种间差异,作物产量形成的关键期,参考太阳高度和土壤光谱噪声的变化以及作物面积的代表性,以现有试验研究所得到的主要农作物植被指数(或反射率)的季节变化曲线为参考标准,确定了全国各地水稻、小麦和玉米遥感估产的最佳时相。在此基础上,还根据各种作物最佳时相的分布特点和大地形的走向,把每一种作物分布区划分为若干个最佳时相区(图2~图4)。

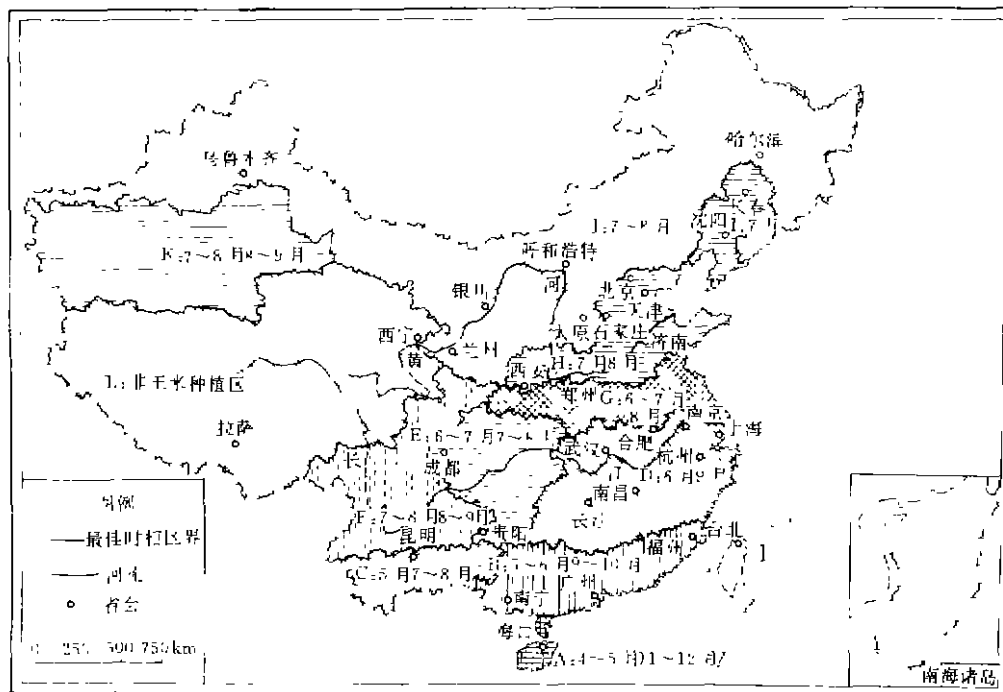


图4 中国玉米遥感估产最佳时相分区图

Fig. 4 Regionalizing chart of optimum temporal for maize yield estimation in China using remote sensing data

3 结束语

最佳时相遥感图象的选择是农作物遥感估产的关键环节之一,它必须兼顾作物识别最佳时相和单产模拟最佳时相的选择,其选择依据主要包括作物光谱的种间差异、作物物候历的种间差异、太阳高度的变化、作物产量形成的关键期、作物面积对收获面积的代表性及土壤光谱噪声的变化。

我国幅员辽阔,自然条件、土地利用结构和作物组合类型复杂多样,农作物遥感估产最佳时相的选择需要多方面实验研究的支持,如不同作物组合类型区的作物光谱关系,不同土壤类型区的土壤光谱噪声强度、不同太阳高度条件下的作物光谱差异及作物产量对不同生育期作物状态变化和环境条件变化的敏感度等。因此,本文仅是该领域的初步研究成果,其中的许多问题有待于进一步研究。

参 考 文 献

- 1 邹尚辉. 植被资源调查中最佳时相遥感图象的选择研究. 植物学报, 1985, **27**(5): 525~531
- 2 黄敬峰, 王秀珍. 新疆植被遥感最佳时相选择研究. 遥感技术与应用, 1993, **8**(4): 7~10
- 3 汪逢熙等. 棉花遥感识别的最佳时相及地面模式. 环境监测与作物估产的遥感研究论文集. 北京: 北京大学出版社, 1991. 86~91
- 4 黎泽文等. 棉花种植面积监测方法的研究. 环境监测与作物估产的遥感研究论文集. 北京: 北京大学出版社, 1991. 92~98
- 5 北京农业大学农业气象专业. 农业气象学. 北京: 科学出版社, 1984. 18
- 6 Gilbert M. A. and Melia J. Solar Angle and Sky Light Effect on Ground Reflectance Measurements in a Citrus Canopy. *Remote Sens. Environ.*, 1993, **45**(3): 281~293
- 7 Pinier P. J. Jr. Solar Angle Independence in the Relationship between Absorbed PAR and Remotely Sensed Data for Alfalfa. *Remote Sens. Environ.*, 1993, **46**(1): 19~33
- 8 Middleton E. M. Solar Zenith Angle Effects on Vegetation Indices in Tallgrass Prairie. *Remote Sens. Environ.*, 1991, **38**(1): 46~62
- 9 Goward S. N. *et al.* Vegetation Canopy PAR Absorptance and the Normalized Difference Vegetation Index: An Assessment Using the SAIL Model. *Remote Sens. Environ.*, 1992, **39**(2): 119~140
- 10 Begue A. Leaf Area Index, Interpreted Photosynthetically Active Radiation, and Spectral Vegetation Indices: A Sensitivity analysis for Regular-Clumped Canopies. *Remote Sens. Environ.*, 1993, **46**(1): 45~59
- 11 徐彬彬. 我国土壤光谱线之研究. 环境遥感, 1991, **6**(1): 61~71
- 12 Qi J. *et al.* A Modified Soil Adjusted Vegetation Index. *Remote Sens. Environ.*, 1994, **48**(2): 119~126