

湖南省单、双季稻识别与生育期提取研究

王尧^{1,2}, 卓莉², 易泅泅¹, 叶涛^{1,3*}

(1. 北京师范大学减灾与应急管理研究院, 北京 100875; 2. 中山大学地理科学与规划学院, 广州 510275;

3. 北京师范大学地表过程与资源生态国家重点实验室, 北京 100875)

摘要:本文基于MODIS数据,构建并分析了湖南省典型地物的植被指数及地表水分指数的时序曲线,利用分类回归树区分单、双季稻像元,并使用转折点法和最大变化斜率法提取双季稻的主要生育期。结果表明,湖南省内双季稻主要分布于洞庭湖区、湘江流域株洲以下、衡阳以上河段的干流及各级支流周边的平原区,以及永州、郴州境内阳明山和南岭山脉之间的狭长地带;单季稻主要分布在双季稻种植区外围,湘西州、怀化市等地的山间谷地也有种植。双季稻生育期在空间上保持了较好的相对一致性。洞庭湖以南平原区以及湘南山地丘陵区的各阶段生育期均早于省内其他地区,而洞庭湖区东北部、娄底、邵阳等地则相对滞后。湖南省大部分地区单、双季稻及生育期的分布都较为破碎,且空间镶嵌程度较高。上述结论可为后续开展湖南省水稻自然灾害与气候变化风险研究提供支持。

关键词:水稻;MODIS时序曲线;单、双季稻识别;生育期提取;湖南

1 引言

水稻是中国最重要的粮食作物之一,产量约占全国粮食总产量的一半,种植面积占全国粮食作物种植面积的30%(郑长春, 2008)。国内单、双季稻混种的情况非常普遍,它们在播种地域、生产潜力、生育期以及产量等许多方面有很大的差异(方福平等, 2009)。当前中国单、双季稻区域的划分多为大尺度层面或以行政区划为基本空间单元(段居琦等, 2012a, 2012b)。全国土地利用/覆被数据中的水田像元尽管可表征水稻的种植区域,但无法准确地反映多数地区单、双季稻混作的现象。在像元级别上,水稻空间分布与生育期差异等关键基础信息的缺乏,也极大地制约了水稻生长模拟由气象站点向空间化方向的推广,以及在像元尺度上开展气候变化影响评估工作(Xiao et al, 2002; Wang et al, 2014; Zhang et al, 2014; 李志鹏等, 2014)。

湖南省是中国最典型的单、双季稻混种区之一,水稻占全省粮食总产量的89%。省内种植结构

多为二熟制,混作、轮作制度应用广泛(罗伯良等, 2009)。针对这一现象,已有部分学者开展了单、双季稻的识别工作。如张莉(2012)选取最佳时相内的SPOT4影像进行分类,从分类结果中选择部分像元作为训练样本,进一步对由MODIS遥感影像得到的主成分波段进行监督分类,提取了2008年湖南省晚稻的空间分布。Peng等人(2011)利用移栽期水泡田的光谱特征,建立EVI与LSWI的判断条件,并结合永久性水体、森林、高程和坡度等掩膜监测了湖南省2000-2007年间单、双季稻的空间分布变化。然而,当前在湖南省范围内综合开展单、双季稻生育期提取和生育期空间分布特征的相关研究较少,仅在部分市县围绕提取算法进行了尝试(杨浩等, 2011)。总体来看,在湖南省内综合开展单、双季稻识别与生育期提取的研究尚不多见。

本文利用MODIS多时相数据,构建归一化差值植被指数(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)、增强型植被指数(Enhanced Vegetation Index, EVI)与地表水分指数(Land Surface Water In-

收稿日期:2015-03;修订日期:2015-08。

基金项目:国家自然科学基金项目(41321001, 41371499, 41401097);北京高等学校“青年英才计划”项目(YETP0287)。

作者简介:王尧(1992-),女,吉林省吉林市人,硕士生,主要从事农业灾害与气候变化研究, E-mail: wangyao@mail.bnu.edu.cn。

通讯作者:叶涛(1983-),男,四川郫县人,副教授,主要从事灾害风险与保险研究, E-mail: yetao@bnu.edu.cn。

引用格式:王尧, 卓莉, 易泅泅, 等. 2015. 湖南省单、双季稻识别与生育期提取研究[J]. 地理科学进展, 34(10): 1306-1315. [Wang Y, Zhuo L, Yi M L, et al. 2015. Identification of single/double-season paddy rice and retrieval of growth periods in Hunan Province[J]. Progress in Geography, 34(10): 1306-1315.]. DOI: 10.18306/dlkxjz.2015.10.011

dex, LSWI)的时序曲线,通过分析湖南省典型地物的时序曲线特征,利用分类回归树(Classification and Regression Tree, CART)区分单、双季稻像元,并采用转折点法和最大变化斜率法完成了对双季稻移栽期、抽穗期和成熟期的提取,最终得到了湖南省单、双季稻及生育期的空间分布规律。

2 数据与方法

2.1 研究区域

湖南省位于中国中南部,长江中游,地处 $24^{\circ}39' \sim 30^{\circ}08'N$ 、 $108^{\circ}47' \sim 114^{\circ}15'E$ 。土地总面积21.18万 km^2 (图1)。湖南省东、南、西三面环山,中部、北部低平,形成向北开口的“马蹄形”盆地。境内山地约占总面积的一半,平原、盆地、丘陵、水面约占一半。省内种植作物主要包括单季稻、双季稻与冬小麦。《湖南农村统计年鉴2009》的数据显示,湖南省122个县中,单、双季稻种植面积超过95%的各有14个。因此,湖南省内单、双季稻的种植高度镶嵌、破碎,在该地区开展相关研究具有重要科学意义。

2.2 研究数据

选取2013年湖南省范围内的数据,主要包括:

(1) MODIS 反射率产品 MOD09A1([\[web.nascom.nasa.gov/\]\(http://web.nascom.nasa.gov/\)\)。该数据的空间分辨率为500 m,时间分辨率为8天,包含7个反射率波段及质量信息等共13个波段。该产品遵循8天最大值合成和蓝光反射率最小原则,最大程度降低了云及其阴影的影响,对大气和气溶胶的散射也进行了系统的校正,且产品经过几何精纠正、辐射校正和去薄云处理。](http://lad-</p></div><div data-bbox=)

(2) 辅助数据:①DEM数据。90 m分辨率的SRTM DEM数据用于湖南省地形分析。②SPOT影像。空间分辨率为10 m,拍摄时间为2013年5月22日,位于常德市鼎城区典型单、双季稻混种区,用于分类样本点的选取。③生育期观测数据。2013年农作物生长发育和农田土壤湿度旬值数据集,由地球系统科学数据共享网提供(<http://www.escience.gov.cn/metdata/page/index.html>)。湖南省内25个农业气象站点中,有15个站点记录了双季稻生育期观测数据(图1),用于生育期提取结果的验证。

2.3 研究方法

2.3.1 遥感指数时序曲线的构建

有效地综合EVI、NDVI与LSWI三种指数,是实现单、双季稻识别与生育期提取的关键(王正兴等,2003; Boschetti et al, 2009; 于文颖等,2011)。本

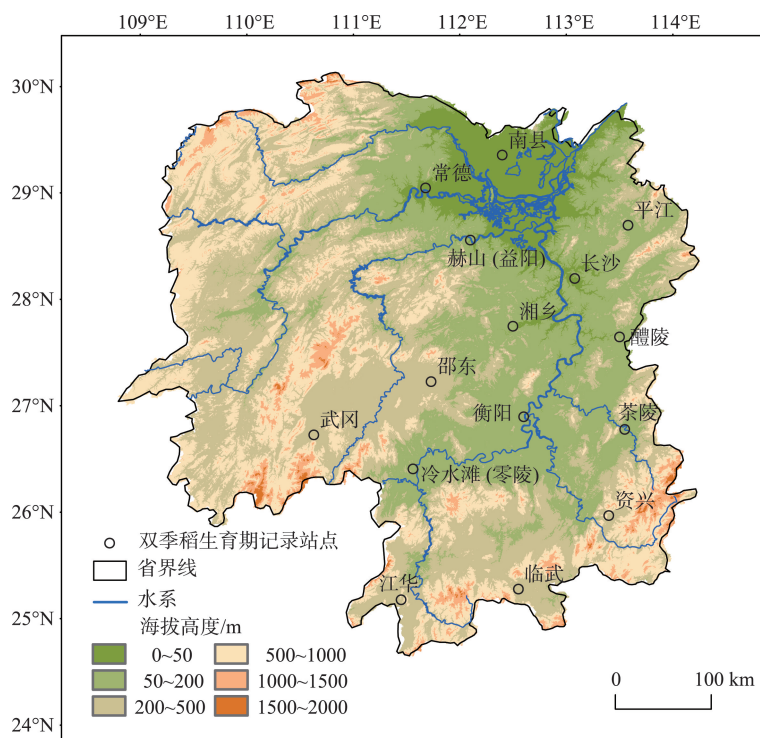


图1 研究区概况及双季稻生育期记录站点分布

Fig.1 Study area and agricultural meteorological stations with double-season paddy rice phenology information

文首先对MODIS数据进行了拼接、重投影、重采样以及数据格式转换。在此基础上通过波段计算得到EVI、NDVI、LSWI全年的时序曲线。

湖南省在水稻生长季(4-10月)的云污染状况较为严重,需要对EVI/NDVI时间序列曲线进行滤波重构(Roy et al, 2002)。常见的滤波重构方法包括阈值去除法(Viovy et al, 1992)、基于滤波的平滑方法(王宏等, 2007; Pan et al, 2012; Leinenkugel et al, 2013)、非线性拟合法(Jönsson et al, 2002; Zhang et al, 2003)等。其中,S-G滤波平滑法属于典型的局部拟合方法(Savitzky et al, 1964),可使重构后的时序数据清晰地描述时间序列的长期变化趋势及局部的突变信息(顾娟等, 2006; 吴文斌等, 2009; Bian et al, 2010),能有效地处理湖南省内单、双季稻种植分散、田块形状多样(陈燕丽等, 2011)、分布破碎(李坤等, 2012)等情况。因此,采用Chen等(2004)的方法,利用不同窗宽和多项式阶数的S-G滤波器先后对插值后的时序曲线进行低频信息趋势的提取和高频信息的重建(Jönsson et al, 2002),最终确定长期整体变化的拟合窗宽为5、阶数为2,短期具体变化的拟合窗宽为3、阶数为4,获得平滑程度较高的EVI和NDVI时序曲线。

2.3.2 典型地物时序曲线特征分析

将湖南省内土地覆被分为双季稻、单季稻、水体、城镇(包括全部城乡居民地)及其他植被/作物(包括除单、双季稻以外的所有植被或作物)。参照SPOT影像和2005年土地覆被数据(<http://www.geo-data.cn/Portal/index.jsp>),分别选取了双季稻样本点334个,单季稻样本点401个,水体样本点110个,城镇样本点104个,其他植被/作物样本点130个,共1079个样本点。在选取样本点时充分考虑了研究

区的地物分布特点,保证所选取的样本具有代表性。在此基础上,将每类地物样本点每个时相的EVI、NDVI及LSWI值求样本均值与标准差,用于分析典型地物的遥感指数时序曲线特征。

图2中给出了研究区内各地类EVI时序曲线的样本均值与标准差。从均值的变化可知(图2a),五种地类的EVI时序曲线差异明显,城镇和水体的EVI时序曲线在全年中均为低值(<0.25)。其他植被/作物呈现出明显的单峰曲线,且在11时相后有明显上升,在16~35时相间均处于高值区域(>0.5)。单、双季稻的EVI时序曲线明显区别于前述地物,且二者之间的差异也十分明显。双季稻的EVI时序曲线有明显的双峰现象,峰值分别出现在21时相和31时相前后,与早、晚稻的生长旺盛期相对应。单季稻的时序曲线则为单峰,但与其他植被相比,生长时期仅在20~35时相之间。因此,根据典型地物的遥感指数时序曲线在不同时相表现出的差异特征,既可对水稻及其他地类进行区分,也可有效地识别单季稻与双季稻。5月下旬、7月中下旬以及9月下旬至10月上旬这3个时期,是对单、双季稻进行区分的重要时段。

从标准差来看(图2b),选取的双季稻、水体、城镇样本点的EVI均值曲线标准差较小,代表性较好(刘建光等, 2010)。单季稻和其他植被/作物的EVI变化稳定性差。单季稻在15~25时相之间标准差较大,主要是由于湖南省内单季稻种植时间较为灵活,不同地区的播种时间存在一些差异。其他植被/作物在3月下旬-5月上旬期间稳定性差,主要是因为这类植被种类较多,生育期有较大差异,从而造成标准差较大。但由于该类别每个时相的EVI很少与其他地类均值重叠,故仍可将均值曲线作为该

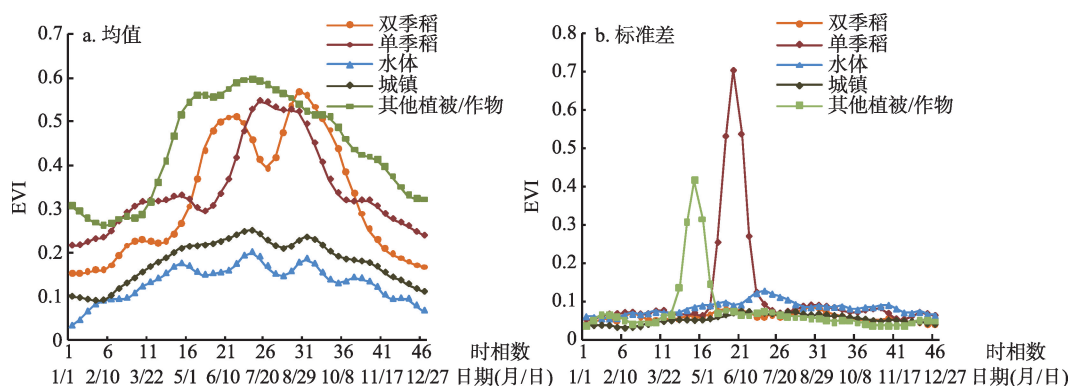


图2 各地类各时相EVI均值与标准差

Fig.2 Mean enhanced vegetation index (EVI) and standard deviation of EVI of each scene and each land-use type

地类典型曲线。

2.3.3 单、双季稻的识别

依据水稻关键生育期的遥感影像特征,例如灌水移栽期和插秧期内 EVI 与 LSWI 的关系,或 EVI、NDVI 等植被指数的时序曲线,均可实现单、双季稻的识别(Sakamoto et al, 2006; 邬明权等, 2010; Peng et al, 2011; 于文颖等, 2011)。在分类方法上,许多研究证实决策树相较于其他分类方法精度更高,且算法简单、效率高(Friedl et al, 1997; Muchoney et al, 2000; 刘勇洪等, 2005; 赵萍等, 2005),这在水稻面积提取的工作中也得到了验证和应用(Rogan et al, 2002; 左玉珊等, 2014)。因此,本文选择使用 CART 决策树对单、双季稻进行区分。将 EVI、NDVI、LSWI 3 个指数的全年所有时相波段作为测试变量,从前述 1079 个样本点中选取 539 个样本点作为目标变量,加入到 CART 决策树分类器中进行分类规则的构建,最终实现单、双季稻与其他地物的区分。

2.3.4 双季稻生育期的提取

利用遥感指数时序曲线提取水稻生育期主要是通过挖掘该曲线上具有特定几何特征的点与植被生长之间的对应关系来实现的(王宏等, 2007; 肖江涛, 2011; 夏传福等, 2013)。通常采用的方法包括阈值法(Fischer, 1994; Sakamoto et al, 2006)、滑动平均法(Reed et al, 1994; Duchemin et al, 1999)、曲线拟合法(鹿琳琳等, 2009; 李正国等, 2011)、最大变化斜率法(Yu et al, 2003)、转折点法(Moulin et al, 1997; Zhang et al, 2003)等。针对双季稻的不同生长阶段,结合其生长状况,应分别采用不同的方法:

(1) 移栽期

水稻在移栽期前会进行灌溉泡田,由于水分的影响,EVI 有所下降,而之后随着水稻开始生长,EVI 值又逐渐上升,且在该期间光谱反映的信息以地表水分为主(Kuenzer et al, 2013)。故选择转折点法识别 EVI 时序曲线上的最小值且 EVI 小于 LSWI 的点作为水稻的移栽期。在具体应用中,将曲线上一阶导数为 0,且由负变正的极小值点与二阶导数为 0,且由负变正的拐点进行比较,提取相对靠后的点对应的时期(Sakamoto et al, 2005; Sun et al, 2009)。

(2) 抽穗期

孕穗期后,水稻由营养生长阶段进入到生殖生长阶段,并在抽穗期前完成最后一叶的生长。通

常认为水稻的 EVI 在抽穗期达到最大值(Shibayama et al, 1989; Huete et al, 2002),同样可采用转折点法取曲线上一阶导数为 0,且由正变负的最小值点作为水稻的抽穗期(Sun et al, 2009; 徐岩岩等, 2012; Zhang et al, 2014)。

(3) 成熟期

抽穗期过后,水稻植株内的养分逐渐转入籽粒中,生物量逐渐下降,叶片逐步衰老、枯死,EVI 持续降低。故成熟期就是水稻叶片由绿转黄的过程,EVI 下降速度达到最大(Sakamoto et al, 2009)。此时可利用最大变化斜率法识别出在早稻抽穗期至晚稻移栽期之间,EVI 达到一阶导数为负且最小的点,作为早、晚稻的成熟期时间(徐岩岩等, 2012)。

3 结果与分析

3.1 单、双季稻的识别结果与精度分析

CART 决策树的分类结果显示(图 3),湖南省内双季稻主要分布于洞庭湖区、湘江流域株洲以下、衡阳以上河段的干流及各级支流周边的平原区,以及永州、郴州境内阳明山和南岭山脉之间的狭长地带;单季稻主要分布在双季稻种植区外围,包括洞庭湖区北部地区、湘江中游衡阳到株洲段、邵阳盆地西部、郴州市临武和宜章等县,在湘西州、怀化市等地的山间谷地也有种植。单、双季稻

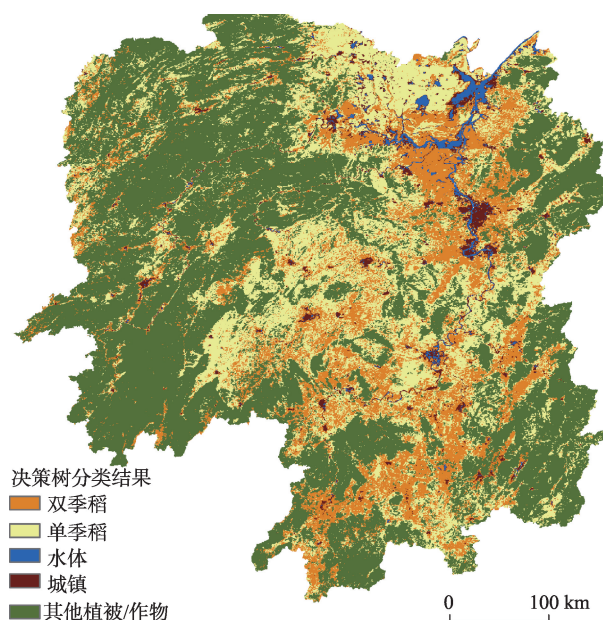


图3 湖南省单、双季稻提取结果

Fig.3 Classification results of single-season paddy rice and double-season paddy rice of Hunan Province

空间分布的镶嵌程度较高,尤其以湘中南丘陵山区最为明显。

将样本点中余下的540个作为验证样本,利用交叉验证对分类结果进行精度评价。在此基础上,再将每个地类的样本点等分成10份,轮流将其中的5份作为训练样本,5份作为验证样本,进行5次CART决策树分类,最终求取6个混淆矩阵的平均结果(表1)。交叉验证的结果表明,总体分类精度可达90.65%,Kappa系数为0.87,双季稻和单季稻的平均用户精度和制图精度均达到了90%以上。

为进一步验证提取结果的可靠性,将本文得到的单、双季稻空间分布与现有研究结果进行了比对。从水稻像元的分布来看,本文的提取结果与2005年1:25万土地覆被图中水田的空间分布格局及纹理基本相同。在单季稻与双季稻的空间分布方面,提取结果与段居琦等(2012a, 2012b)针对中国单、双季稻种植区气候适宜性进行的研究结果也呈现出一致的空间分布规律。张莉(2012)的研究结果显示,2008年湖南省晚稻分布较为集中的地区在常德市、益阳市、岳阳市和长沙市等地,西部和西北部地区晚稻分布较为稀疏。Peng等(2011)的研究表明,2007年湖南省双季稻主要分布于洞庭湖区、湘江流域衡阳到株洲河段周边的平原区以及邵阳盆地以西和以南的部分地区;单季稻主要分布于双季稻洞庭湖区种植区外围及湘江中游衡阳地区。从对比可以看出,本文的提取结果与前述研究结论有高度的一致性。

3.2 双季稻生育期提取结果与精度评价

将各生育期提取算法在MATLAB平台中实现,获得全省双季稻像元的生育期空间分布信息(图4)。从图4可以看出,双季稻各生长阶段的发育时间在空间上保持了较好的相对一致性。洞庭湖以南平原区(包括沅江、汨罗、汉寿、益阳、湘阴、望

城、长沙等市县),以及位于湘南山地丘陵区的新田、嘉禾、桂阳等县的双季稻生育期在各个生长阶段均早于省内其他地区;而洞庭湖区东北部、娄底、邵阳等地的双季稻生育期则相对普遍滞后。除海拔较低地区的双季稻分布较为集中连片之外,湖南省大部分地区双季稻生育期的空间分布较为破碎,尤其是湘中南的山地丘陵区,如衡阳、永州、郴州境内的双季稻种植区。

依据湖南省农业气象站观测数据对双季稻生育期的提取进行精度评价。以省内15个农业气象站为中心,生成半径为5 km的缓冲区,统计出每个缓冲区范围内所有双季稻像元对应的生育期日期。以站点观测日期为参照,对各缓冲区内所有像元的提取日期进行标准化,得到提取日期相对于站点观测日期的提前/滞后天数离差值,最终汇总得到离差天数统计情况(表2)。从整体上看,本文提取的双季稻生育期较为集中。95%的置信区间内的生育期离差基本控制在±25天以内,离差的中位数除早稻移栽期的结果稍不理想外基本控制在±5天以内。早稻的抽穗期和晚稻的抽穗期、成熟期提取结果最为理想,主要是因为早稻移栽前的时序曲线的走势和变化,会受到冬半年具体作物类型的影响。由于湖南省内不同区域作物轮作的特点不同,因此存在一定的不确定性,提取结果也会存在一定的误差。

通过分析提取结果可知,制约湖南省双季稻生育期的主要因素是海拔,即随着海拔升高,温度逐渐降低,满足水稻积温条件的时间推迟。海拔较低的洞庭湖区双季稻生育期较全省普遍发育时间早1~2旬;而在湘南山地丘陵区的海拔较高区域(如永州的道县、宁远县),生育期则相对全省普遍发育时间晚1~2旬。由于丘陵山区的地形特征与局部水热条件以及土壤情况、管理等多方面因素的共同作

表1 交叉验证平均精度评价
Tab.1 Average accuracy from cross-validation

类型	双季稻	单季稻	水体	城镇	其他植被/作物	合计	用户精度/%
双季稻	156.34	12.50	0.50	2.67	0.33	172.34	90.72
单季稻	8.33	184.83	0.00	1.50	0.50	195.16	94.71
水体	0.50	0.00	41.83	5.17	0.00	47.50	88.07
城镇	0.00	0.50	12.67	42.33	0.00	55.50	76.28
其他植被/作物	1.83	3.17	0.00	0.33	64.17	69.50	92.33
合计	167.00	201.00	55.00	52.00	65.00	540.00	
制图精度/%	93.61	91.96	76.06	81.41	98.72		
总体精度=90.65%			Kappa系数=0.87				

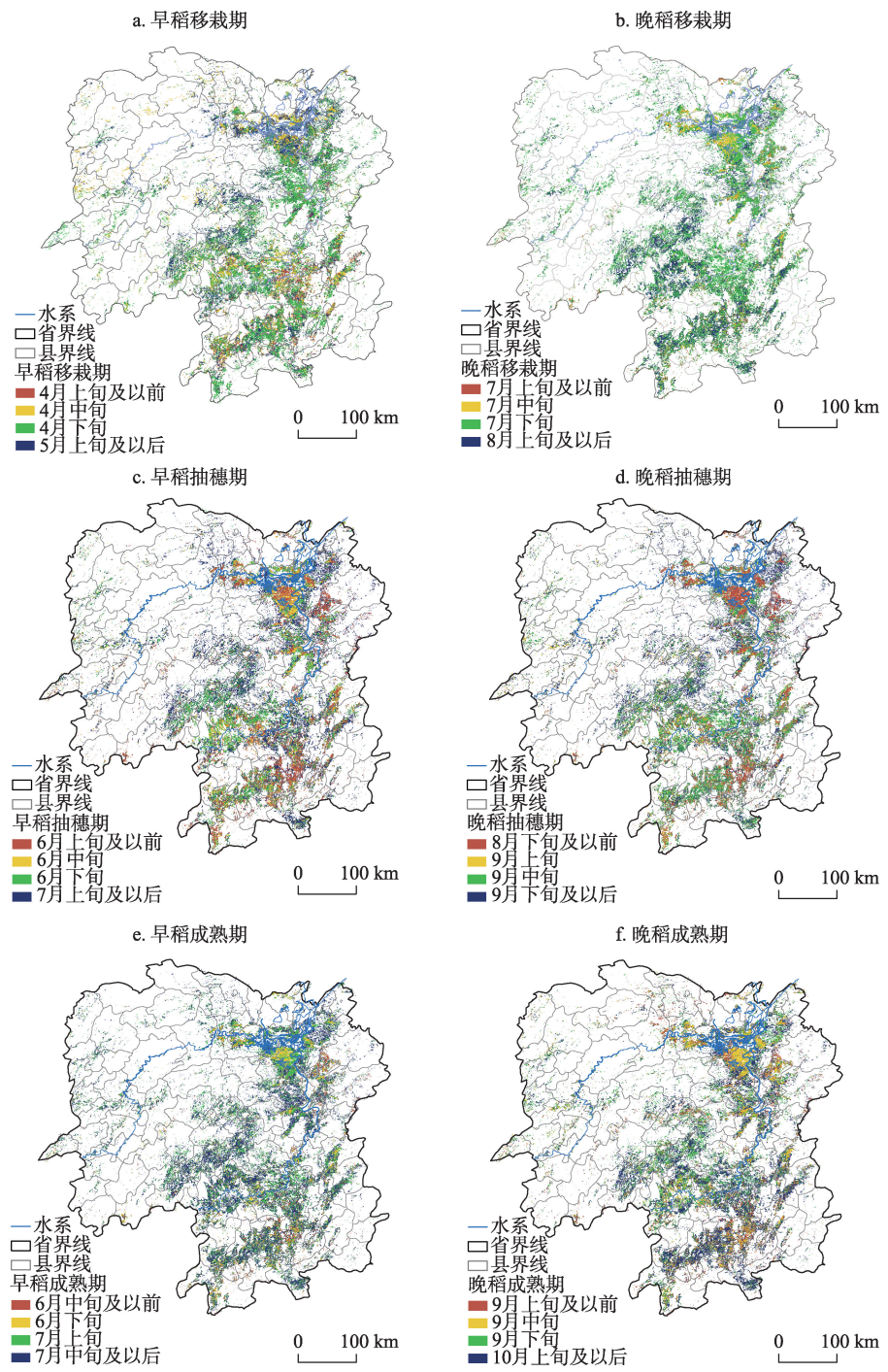


图4 湖南省双季稻生育期空间分布

Fig.4 Spatial distribution of growth periods of double-season rice in Hunan Province

表2 标准化后的生育期离差天数统计量/天

Tab.2 Standardized deviation statistics of growth-period/d

生育期	95%置信区间	均值	中位数	标准差
早稻移栽期	[-24.00, 15.00]	-11.37	-16.00	11.99
早稻抽穗期	[-33.00, 24.00]	0.58	5.00	17.64
早稻成熟期	[-34.00, 11.00]	-7.06	-5.00	13.44
晚稻移栽期	[-15.00, 21.00]	2.79	3.00	10.07
晚稻抽穗期	[-26.00, 23.00]	0.78	3.00	15.69
晚稻成熟期	[-24.00, 22.00]	0.04	3.00	12.78

用,使得水稻的种植时间存在很大的差异,甚至同一区域的时间跨度能够达到2~3旬。这一水稻种植特征也进一步印证了水稻生育期提取空间化和精细化研究的必要性。

4 结论与讨论

本文针对单、双季稻镶嵌程度较高且破碎的湖南省,通过分析典型地物的EVI、NDVI、LSWI全年时序曲线特征,利用CART决策树实现了单、双季稻像元的识别,在此基础上提取了双季稻生育期,并分别对两部分进行了结果与精度分析。结果表明,湖南省内双季稻主要分布在洞庭湖区,湘江流域株洲以下至衡阳以上河段的干流及各级支流周边的平原区,以及永州、郴州境内阳明山和南岭山脉之间的狭长地带;单季稻主要分布在双季稻种植区外围,湘西州、怀化市等地的山间谷地也有种植。双季稻生育期在空间上保持了较好的相对一致性。洞庭湖以南平原区以及湘南山地丘陵区的生育期在各阶段均早于省内其他地区,而洞庭湖区东北部、娄底、邵阳等地则相对滞后。湖南省内单、双季稻的分布及生育期情况在空间上主要受海拔因素的影响,除洞庭湖区以外的地区均表现出了镶嵌度及破碎度较高的特征。本文的单、双季稻识别结果与前人研究保持较高的空间一致性;在生育期提取方面,则成功实现了在大范围内像元级别上的生育期提取及其空间差异的探讨。

本文所得到的湖南省双季稻生育期提取结果尽管在像元之间取得了较高的一致性,但所提取的平均生育期与站点观测值之间仍存在一些差距。因此,在利用时序曲线几何形态特征对湖南省的单、双季稻进行识别及生育期提取方面,可进一步从以下两方面进行探索。首先,针对该区域地物类别高度破碎的特征,可考虑引入混合像元分解等方法解决部分水稻像元时序曲线特征不明显的情况。其次,由于省内作物类别多样且混作、轮作结构复杂,使单、双季稻的识别及之后的生育期提取增加了一定的难度。例如冬半年的作物品种及其生长发育对晚稻成熟期及早稻移栽期的提取精度有较大的影响。因此应通过实地调研,建立不同作物时序曲线形态特征与混作、轮作结构的对应关系,以提高单、双季稻生育期的提取精度。

参考文献(References)

- 陈燕丽, 莫伟华, 莫建飞, 等. 2011. 基于面向对象分类的南方水稻种植面积提取方法[J]. 遥感技术与应用, 26(2): 163-168. [Chen Y L, Mo W H, Mo J F, et al. 2011. Object-oriented classification for the extraction of rice planting area in south[J]. Remote Sensing Technology and Application, 26(2): 163-168.]
- 段居琦, 周广胜. 2012a. 我国单季稻种植区的气候适宜性[J]. 应用生态学报, 23(2): 426-432. [Duan J Q, Zhou G S. 2012a. Climatic suitability of single cropping rice planting region in China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 23(2): 426-432.]
- 段居琦, 周广胜. 2012b. 中国双季稻种植区的气候适宜性研究[J]. 中国农业科学, 45(2): 218-227. [Duan J Q, Zhou G S. 2012b. Climatic suitability of double rice planting regions in China[J]. Scientia Agricultura Sinica, 45(2): 218-227.]
- 方福平, 程式华. 2009. 论中国水稻生产能力[J]. 中国水稻科学, 23(6): 559-566. [Fang F P, Cheng S H. 2009. Rice production capacity in China[J]. Chinese Journal of Rice Science, 23(6): 559-566.]
- 顾娟, 李新, 黄春林. 2006. NDVI时间序列数据集重建方法述评[J]. 遥感技术与应用, 21(4): 391-395. [Gu J, Li X, Huang C L. 2006. Research on the reconstructing of time-series NDVI data[J]. Remote Sensing Technology and Application, 21(4): 391-395.]
- 李坤, 邵芸, 张风丽. 2012. 基于RadarSat-2全极化数据的水稻识别[J]. 遥感技术与应用, 27(1): 86-93. [Li K, Shao Y, Zhang F L. 2012. Extraction of rice based on Quad-polarization RadarSat-2 data[J]. Remote Sensing Technology and Application, 27(1): 86-93.]
- 李正国, 唐华俊, 杨鹏, 等. 2011. 基于时序植被指数的东北地区耕地生长季特征识别与应用研究[J]. 北京大学学报: 自然科学版, 47(5): 882-892. [Li Z G, Tang H J, Yang P, et al. 2011. Identification and application of seasonality parameters of crop growing season in Northeast China based on NDVI time series data[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 47(5): 882-892.]
- 李志鹏, 刘珍环, 李正国, 等. 2014. 水稻空间分布遥感提取研究进展与展望[J]. 中国农业资源与区划, 35(6): 9-18. [Li Z P, Liu Z H, Li Z G, et al. 2014. Progress and prospect of application of remote sensing to rice spatial distribution[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 35(6): 9-18.]
- 刘建光, 李红, 孙丹峰, 等. 2010. MODIS土地利用/覆被多时

- 相多光谱决策树分类[J]. 农业工程学报, 26(10): 312-318. [Liu J G, Li H, Sun D F, et al. 2010. Land use/cover decision tree classification fusing multi-temporal and multi-spectral of MODIS[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 26(10): 312-318.]
- 刘勇洪, 牛铮, 王长耀. 2005. 基于MODIS数据的决策树分类方法研究与应用[J]. 遥感学报, 9(4): 405-412. [Liu Y H, Niu Z, Wang C Y. 2005. Research and application of the decision tree classification using MODIS data[J]. Journal of Remote Sensing, 9(4): 405-412.]
- 鹿琳琳, 郭华东. 2009. 基于SPOT/VEGETATION时间序列的冬小麦物候提取方法[J]. 农业工程学报, 25(6): 174-179. [Lu L L, Guo H D. 2009. Extraction method of winter wheat phenology from time series of SPOT/VEGETATION data[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 25(6): 174-179.]
- 罗伯良, 黄晚华, 帅细强, 等. 2009. 湖南水稻生产旱灾风险区划研究[J]. 安徽农业科学, 37(33): 16429-16431, 16489. [Luo B L, Huang W H, Shuai X Q, et al. 2009. Study on the risk regionalization of drought disaster for rice production in Hunan Province[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 37(33): 16429-16431, 16489.]
- 王宏, 李晓兵, 李霞, 等. 2007. 基于NOAA NDVI和MSAVI研究中国北方植被生长季变化[J]. 生态学报, 27(2): 504-515. [Wang H, Li X B, Li X, et al. 2007. The variability of vegetation growing season in the Northern China based on NOAA NDVI and MSAVI from 1982 to 1999 [J]. Acta Ecologica Sinica, 27(2): 504-515.]
- 王正兴, 刘闯, Huete A. 2003. 植被指数研究进展: 从AVHRR-NDVI到MODIS-EVI[J]. 生态学报, 23(5): 979-987. [Wang Z X, Liu C, Huete A. 2003. From AVHRR-NDVI to MODIS-EVI: advances in vegetation index research[J]. Acta Ecologica Sinica, 23(5): 979-987.]
- 邬明权, 王长耀, 牛铮. 2010. 利用多源时序遥感数据提取大范围水稻种植面积[J]. 农业工程学报, 26(7): 240-244. [Wu M Q, Wang C Y, Niu Z. 2010. Mapping paddy fields in large areas, based on time series multi-sensors data[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 26(7): 240-244.]
- 吴文斌, 杨鹏, 唐华俊, 等. 2009. 两种NDVI时间序列数据拟合方法比较[J]. 农业工程学报, 25(11): 183-188. [Wu W B, Yang P, Tang H J, et al. 2009. Comparison of two fitting methods of NDVI time series datasets[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 25(11): 183-188.]
- 夏传福, 李静, 柳钦火. 2013. 植被物候遥感监测研究进展[J]. 遥感学报, 17(1): 1-16. [Xia C F, Li J, Liu Q H. 2013. Review of advances in vegetation phenology monitoring by remote sensing[J]. Journal of Remote Sensing, 17(1): 1-16.]
- 肖江涛. 2011. 基于MODIS植被指数的水稻物候提取与地面验证[D]. 四川: 电子科技大学. [Xiao J T. 2011. Jiyu MODIS zhibeizhishu de shuidao wuhou tiqu yu dimian yan-zheng[D]. Sichuan, China: University of Electronic Science and Technology of China.]
- 徐岩岩, 张佳华, Yang L M. 2012. 基于MODIS-EVI数据和Symlet11小波识别东北地区水稻主要物候期[J]. 生态学报, 32(7): 2091-2098. [Xu Y Y, Zhang J H, Yang L M. 2012. Detecting major phenological stages of rice using MODIS-EVI data and Symlet11 wavelet in Northeast China[J]. Acta Ecologica Sinica, 32(7): 2091-2098.]
- 杨浩, 黄文江, 王纪华, 等. 2011. 基于HJ-1A/1B CCD时间序列影像的水稻生育期监测[J]. 农业工程学报, 27(4): 219-224. [Yang H, Huang W J, Wang J H, et al. 2011. Monitoring rice growth stages based on time series HJ-1A/1B CCD images[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 27(4): 219-224.]
- 于颖, 冯锐, 纪瑞鹏, 等. 2011. 基于MODIS数据的水稻种植面积提取研究进展[J]. 气象与环境学报, 27(2): 56-61. [Yu W Y, Feng R, Ji R P, et al. 2011. Advances in rice planting area extraction technology based on MODIS data [J]. Journal of Meteorology and Environment, 27(2): 56-61.]
- 张莉. 2012. 基于EOS/MODIS数据的晚稻面积提取技术研究: 以湖南省为例[D]. 北京: 中国农业科学院. [Zhang L. 2012. Study on extracting planning areas of paddy rice by using EOS/MODIS data: a case study for Hunan Province[D]. Beijing, China: Chinese Academy of Agricultural Sciences.]
- 赵萍, 傅云飞, 郑刘根, 等. 2005. 基于分类回归树分析的遥感影像土地利用/覆被分类研究[J]. 遥感学报, 9(6): 708-716. [Zhao P, Fu Y F, Zheng L G, et al. 2005. Cart-based land use/cover classification of remote sensing images[J]. Journal of Remote Sensing, 9(6): 708-716.]
- 郑长春. 2008. 水稻种植面积遥感信息提取研究[D]. 新疆: 新疆农业大学. [Zheng C C. 2008. Study on remote sensing information extraction of paddy rice planting area[D]. Xinjiang, China: Xinjiang Agriculture University.]
- 左玉珊, 王卫, 郝彦莉, 等. 2014. 基于MODIS影像的土地覆被分类研究: 以京津冀地区为例[J]. 地理科学进展, 33(11): 1556-1565. [Zuo Y S, Wang W, Hao Y L, et al. 2014. Land cover classification based on MODIS images:

- taking the Beijing-Tianjin-Hebei region as an example[J]. *Progress in Geography*, 33(11): 1556-1565.]
- Bian J H, Li A N, Song M Q, et al. 2010. Reconstruction of NDVI time-series datasets of MODIS based on Savitzky-Golay filter[J]. *Journal of Remote Sensing*, 14(4): 725-741.
- Boschetti M, Stroppiana D, Brivio P A, et al. 2009. Multi-year monitoring of rice crop phenology through time series analysis of MODIS images[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 30(18): 4643-4662.
- Chen J, Jönsson P, Tamura M, et al. 2004. A simple method for reconstructing a high-quality NDVI time-series data set based on the Savitzky-Golay filter[J]. *Remote Sensing of Environment*, 91(3-4): 332-344.
- Duchemin B, Goubier J, Courrier G. 1999. Monitoring phenological key stages and cycle duration of temperate deciduous forest ecosystems with NOAA/AVHRR data[J]. *Remote Sensing of Environment*, 67(1): 68-82.
- Fischer A. 1994. A model for the seasonal variations of vegetation indices in coarse resolution data and its inversion to extract crop parameters[J]. *Remote Sensing of Environment*, 48(2): 220-230.
- Friedl M A, Brodley C E. 1997. Decision tree classification of land cover from remotely sensed data[J]. *Remote Sensing of Environment*, 61(3): 399-409.
- Huete A, Didan K, Miura T, et al. 2002. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices[J]. *Remote Sensing of Environment*, 83(1-2): 195-213.
- Jönsson P, Eklundh L. 2002. Seasonality extraction by function fitting to time-series of satellite sensor data[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 40(8): 1824-1832.
- Kuenzer C, Knauer K. 2013. Remote sensing of rice crop areas [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 34(6): 2101-2139.
- Leinenkugel P, Kuenzer C, Oppelt N, et al. 2013. Characterisation of land surface phenology and land cover based on moderate resolution satellite data in cloud prone areas: a novel product for the Mekong Basin[J]. *Remote Sensing of Environment*, 136: 180-198.
- Moulin S, Kergoat L, Viovy N, et al. 1997. Global-scale assessment of vegetation phenology using NOAA/AVHRR satellite measurements[J]. *Journal of Climate*, 10(6): 1154-1170.
- Muchoney D, Borak J, Chi H, et al. 2000. Application of the MODIS global supervised classification model to vegetation and land cover mapping of Central America[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 21(6-7): 1115-1138.
- Pan Y Z, Li L, Zhang J S, et al. 2012. Winter wheat area estimation from MODIS-EVI time series data using the Crop Proportion Phenology Index[J]. *Remote Sensing of Environment*, 119: 232-242.
- Peng D L, Huete A R, Huang J F, et al. 2011. Detection and estimation of mixed paddy rice cropping patterns with MODIS data[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 13(1): 13-23.
- Reed B C, Brown J F, VanderZee D, et al. 1994. Measuring phenological variability from satellite imagery[J]. *Journal of Vegetation Science*, 5(5): 703-714.
- Rogan J, Franklin J, Roberts D A. 2002. A comparison of methods for monitoring multitemporal vegetation change using Thematic Mapper imagery[J]. *Remote Sensing of Environment*, 80(1): 143-156.
- Roy D P, Borak J S, Devadiga S, et al. 2002. The MODIS Land product quality assessment approach[J]. *Remote Sensing of Environment*, 83(1-2): 62-76.
- Sakamoto T, Van Cao P, Kotera A, et al. 2009. Detection of yearly change in farming systems in the Vietnamese Mekong Delta from MODIS time-series imagery[J]. *Japan Agricultural Research Quarterly*, 43(3): 173-185.
- Sakamoto T, Van Nguyen N, Ohno H, et al. 2006. Spatio-temporal distribution of rice phenology and cropping systems in the Mekong Delta with special reference to the seasonal water flow of the Mekong and Bassac rivers[J]. *Remote Sensing of Environment*, 100(1): 1-16.
- Sakamoto T, Yokozawa M, Toritani H, et al. 2005. A crop phenology detection method using time-series MODIS data [J]. *Remote Sensing of Environment*, 96(3-4): 366-374.
- Savitzky A, Golay M J E. 1964. Smoothing and differentiation of data by simplified least squares procedures[J]. *Analytical Chemistry*, 36(8): 1627-1639.
- Shibayama M, Akiyama T. 1989. Seasonal visible, near-infrared and mid-infrared spectra of rice canopies in relation to LAI and above-ground dry phytomass [J]. *Remote Sensing of Environment*, 27(2): 119-127.
- Sun H S, Huang J F, Peng D L. 2009. Detecting major growth stages of paddy rice using MODIS data[J]. *Journal of Remote Sensing*, 13(6): 1122-1137.
- Viovy N, Arino O, Belward A S. 1992. The Best Index Slope Extraction (BISE): a method for reducing noise in NDVI time-series[J]. *International Journal of Remote Sensing*,

- 13(8): 1585-1590.
- Wang P, Zhang Z, Song X, et al. 2014. Temperature variations and rice yields in China: historical contributions and future trends[J]. *Climatic Change*, 124(4): 777-789.
- Xiao X, Boles S, Frolking S, et al. 2002. Observation of flooding and rice transplanting of paddy rice fields at the site to landscape scales in China using VEGETATION sensor data [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 23(15): 3009-3022.
- Yu F F, Price K P, Ellis J, et al. 2003. Response of seasonal vegetation development to climatic variations in eastern central Asia[J]. *Remote Sensing of Environment*, 87(1): 42-54.
- Zhang X Y, Friedl M A, Schaaf C B, et al. 2003. Monitoring vegetation phenology using MODIS[J]. *Remote Sensing of Environment*, 84(3): 471-475.
- Zhang Z, Song X, Chen Y, et al. 2014. Dynamic variability of the heading- flowering stages of single rice in China based on field observations and NDVI estimations[J]. *International Journal of Biometeorology*, 59(5): 643-655.

Identification of single/double-season paddy rice and retrieval of growth periods in Hunan Province

WANG Yao^{1,2}, ZHUO Li², YI Miluo¹, YE Tao^{1,3*}

- (1. Academy of Disaster Reduction and Emergency Management, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2. School of Geography and Planning, Sun Yat-Sen University, Guangzhou 510275, China; 3. Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resources Ecology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: This study analyzed the time series curves of enhanced vegetation index (EVI), normalized difference vegetation index (NDVI), and land surface water index (LSWI) of paddy rice areas in Hunan Province based on MODIS data. Single and double-season paddy rice was distinguished with the classification and regression tree (CART) decision tree method. The inflection method and the dynamic threshold method were applied to retrieve the growth periods of double-season paddy rice. The result shows that double-season paddy rice of Hunan Province was mainly distributed in the Dongting Lake area, the plain area surrounding the main stream and tributaries of the section between Hengyang and Zhuzhou of the Xiangjiang River, and the panhandle between the Yangming Mountains and the Nanling Mountains in Yongzhou and Chenzhou. Single-season paddy rice was mainly distributed on the periphery of the zones planted with double-season paddy rice and the valleys in Xiangxi and Huaihua. The growth periods of double-season paddy rice planted in the southern part of the Dongting Lake area and the hilly areas in southern Hunan are earlier than other regions. The distribution of single/double-season paddy rice and their growth periods in the most part of Hunan Province were spatially un-contiguous and this pattern is relatively consistent across space. These findings can provide support for future study of the relationship between natural disasters that affect paddy rice and the risk of climate change in Hunan Province.

Key words: paddy rice; MODIS time series curves; single/double-season rice identification; growth period extraction; Hunan Province