鄱阳湖农业区多熟种植时空格局特征遥感分析

闫慧敏[1],黄河清[1],肖向明[2],姜鲁光[1]

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101
2. Institute for the Study of Earth, Oceans and Space, University of New Hampshire, Durham, NH 03824, USA)

摘要:农业土地利用活动是人类作用于地球系统最为直接的扰动因素,其变化会因改变生态系统过程与格局以及生态系统资源有效性而对生态系统功能在局地到全球尺度都产生重要的影响。中国南方普遍实施的多熟种植制度是高强度土地利用的重要特征之一,在中国传统的三熟农业区之一——江西省鄱阳湖区域,以农户为管理单元的农业种植制度由于受到洪水风险、经济效益及农业政策的调节,其时空格局动态也因此更加复杂。以分布在鄱阳湖平原的农田为研究区,结合多时相 MODIS 影像表达的作物生长规律和农业物候观测记录,检测并分析农业多熟种植的时空格局特征。研究结果表明空间分辨率 500m、8d 合成的 MODIS/EVI 时间序列数据能够定量表达出农业种植的多熟制特征,可以应用于区域农业多熟种植制度时空分析,研究区种植制度时空格局的形成是农户对气候、社会经济及粮食安全状况响应及适应的结果。在空间和时间上清晰地认识农业多熟种植的特征,将会对掌握高强度土地利用的过程和特点,模拟与评估土地利用对粮食安全及生态环境安全的影响有重要的意义。

关键词:土地利用;多熟种植;多时相遥感;时空分析;鄱阳湖

文章编号:1000-0933(2008)09-4517-07 **中图分类号**:Q149,S127,S181 **文献标识码**:A

Spatio-temporal distribution of multiple cropping systems in the Poyang Lake region

YAN Hui-Min[1], HUANG He-Qing[1], XIAO Xiang-Ming[2], JIANG Lu-Guang[1]

1 *Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing*, 100101, *China*

2 *Institute for the Study of Earth, Oceans and Space, University of New Hampshire, Durham, NH* 03824, *USA*

***Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(9): 4517 ~ 4523.**

Abstract: Agricultural land use and management is one of the most direct means by which humans impact the earth system, with significant negative environmental effects at local to global scales due to altered ecosystem processes, patterns and resource use. Multiple cropping is of particular interest because agricultural intensification has increased pressure on water resources, ecosystems, and biodiversity due to increased water withdrawals for irrigation and higher energy inputs due to mechanization and the production of chemical fertilizer. The Poyang Lake region is one of the most intensified agricultural regions in southern China, and the spatial and temporal pattern of cropping systems is determined not only by climate and water availability. Population pressure, social and economic conditions and policies, flood risks, and individual farmers'

基金项目:国家自然科学基金资助项目(40601064);国家科技支撑资助项目(2006BAC08B06);中国科学院百人计划资助项目(黄河清);NASA 土地利用和覆被变化资助项目

收稿日期:2008-02-26; **修订日期**:2008-05-27

作者简介:闫慧敏(1974 ~),女,内蒙古锡盟人,博士,主要从事土地利用变化与生态系统生产力研究. E-mail: yanhm@igsnrr.ac.cn

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yanhm@igsnrr.ac.cn

Foundation item: The project was financially supported by National Natural Science Foundation of China (No. 40601064); National Key Project of Scientific and Technical Supporting Programs (No. 2006BAC08B06); Chinese Academy of Sciences "Hundred Talents" Project (Huang HeQing); NASA Landuse and Land Cover Change Program and Interdisciplinary Science Program

Received date: 2008-02-26; **Accepted date**: 2008-05-27

Biography: YAN Hui-Min, Ph. D., mainly engaged in land use change and ecosystem productivity. E-mail: yanhm@igsnrr.ac.cn

management decisions also have profound impacts. Therefore, the spatial pattern and temporal process of multiple cropping is quite complex. In this paper, we combined agro-meteorological observation data and MODIS data with a resolution of 500m at 8-day intervals to explore a novel and robust method to examine spatial and temporal dynamics of multiple cropping and crop calendar using a MODIS/EVI time series curve. The results indicate that a cropping intensity algorithm based on this data is potentially applicable for monitoring agricultural intensification. Spatial and temporal variability of multiple cropping may be the result of farmers' dynamic adaptation to local climate, socio-economic conditions, and food security. An explicit spatial and temporal analysis of the complex dynamics of multiple cropping in the context of coupled human and natural systems is necessary for modeling and evaluating the impacts of human activity on global environmental change and food security.

Key Words: land use; multiple cropping; remote sensing; spatio-temporal analysis; poyang Lake

高强度农业土地利用在成功地增加了粮食产量的同时在破坏人类赖以生存的环境和农业可持续发展能力[1~3]。多熟种植是高强度土地利用的主要特征之一,它对粮食安全以及农田生态系统的水、碳、氮等物质循环都有重要的影响。气候、人口、社会经济发展的快速变化和政策的调整使得农业种植制度时空格局不断随之调节而发生变化[4~6],定量评估高强度农业土地利用活动对农田生态系统功能和环境的正负效应是科学家与政府共同关注的问题[7,8]。然而,在大尺度的生态系统模拟研究中,因为缺乏实际的作物种植强度和种植制度的准确时空信息[9~11],从而不能准确估算农田生产力及评估土地利用与管理措施(灌溉、施肥、秸秆处理、翻耕等)对土壤生产力和环境可持续性产生影响[12~14]。

鄱阳湖平原土地肥沃,水热充沛能够满足一年种植3季作物,是中国重要粮食基地之一。作为中国重要的水稻产区,水稻种植面积占江西省农作物总播种面积的一半以上,占粮食作物的86%①。由于鄱阳湖是一个季节性、吞吐型的湖泊,湖区和河流周边地区农业种植容易受到水资源季节波动的影响,加之以农户为单元的种植管理模式使得这里的农业种植制度对农民经济效益和相关农业政策调节更为敏感,导致农业种植制度的时空格局都比较复杂[15,16]。在空间和时间上清晰地描述农业多熟种植制度的时空格局特征是认识其形成和变化机制,模拟与预测粮食产量和农业生态系统水、碳、氮循环,评估不同农业土地利用活动对粮食安全及生态环境安全的影响的关键环节,同时也对降低当地农民面对的洪水风险、提高他们的生活质量有重要的现实意义。

目前已经有很多学者致力于开发制作区域乃至全球范围的空间表述清晰的土地利用强度及变化数据集[17~21],这些研究成果为评估人类活动作用下生态系统变化提供了重要的数据。对于农业系统,多熟种植制度是非常重要也是很难获取的资料,因为耕地会一年多次耕种,热量、水分、社会经济状况、政策以及农民对洪水、干旱等灾害的规避等都会影响当地作物种植与管理方式,而传统的以行政区域为单元的复种指数统计数据不能反映统计单元内部的多熟种植制度时空分异特征。多时相的遥感植被指数时间序列数据近年来在植被物候特征提取、植被分类、土地覆被变化监测等方面发挥着越来越大的作用,应用遥感数据监测并认识农业多熟种植制度也逐渐发展[22,23]。2000年开始向全球免费发布数据的空间分辨率250~500m的MODIS数据已经成为当前植被监测的有利工具,也正在应用于区域到全球范围的植被物候和农业种植制度检测方面[24,25]。本研究主要以江西省鄱阳湖平原的农田为研究对象,应用MODIS遥感时间序列数据辨识该地区的农业多熟种植制度,并与气象和土地利用信息相结合分析探讨农业多熟种植制度的时空格局形成的特征与规律。

1 数据与方法

1.1 研究区概述

鄱阳湖流域地处东亚季风区,属于亚热带温暖湿润气候。鄱阳湖主要接纳赣江、抚河、信江、饶河、修水五

① 中国统计年鉴,2002.

条主要支流来水,由湖口注入长江,是一个季节性、吞吐型的湖泊。鄱阳湖岸线由天然湖岸和人工圩堤两部分组成,北(西)湖区的天然岸线以湖周分布的丘陵岗地为主,主要植被类型是苔草、芦苇等湿生植物;南(东)湖区的人工圩堤为人类围垦湿地形成,岸线总长约 1200km①。鄱阳湖区域的耕地分布格局基本是由地形所确定的,主要分布在高程较低、地形平坦的鄱阳湖湖区外围是鄱阳湖平原,包括鄱阳湖湖滨平原、赣江、抚河、信江、饶河与修水的下游平原及三角洲。鄱阳湖平原河流纵横、湖泊密布,农田星罗棋布于河流之间。这里充沛的水分、适宜的气候条件能够满足一年三熟的高强度土地利用,冬种作物-早稻-晚稻多年来一直是这里的主要种植模式。

1.2　数据

1.2.1　MODIS 时间序列

多时相 MODIS (MODerate-resolution Imaging Spectroradiometer)遥感观测影像是生态环境监测、全球环境与气候变化研究重要的数据。美国 NASA 的 EOS 数据中心自 2000 年开始(http://daac. gsfc. nasa. gov)免费提供全球 MODIS 标准数据产品,本研究使用其中 8d 合成的空间分辨率 500m 的表面反射率数据产品(MOD09A1)。由公式(1)计算得到对作物冠层变化比较敏感的增强植被指数(*EVI*, enhanced vegetation index)[26],每年 46 个时相的 MODIS/*EVI* 影像构成描述植被生长过程的时间序列数据,由此作为提取作物的种植制度信息的基础数据:

$$EVI = G \times (\rho_{\text{nir}} - \rho_{\text{red}}) / (\rho_{\text{nir}} + (C_1 \times \rho_{\text{red}} - C_2 \times \rho_{\text{blue}}) + L) \quad (1)$$

式中,G =2.5, C_1 =6, C_2 = 7.5, L =1, ρ_{nir},ρ_{red}和 ρ_{blue}分别是近红外、红和蓝波段的反射系数。

1.2.2　作物物候观测数据及验证数据点选取

国家气象局农业气象监测站逐旬观测并记录了全国 420 个站点主要农作物生长发育期,本研究使用该数据集中位于江西省的 14 个农业气象观测站的 2002 年农作物关键生长发育期数据。农业气象监测观测记录中的每一季作物种植时间、收获时间、关键作物发育期可以用来与 *EVI* 作物生长曲线进行对比,以判断基于 *EVI* 时序曲线是否能够准确描述农业熟制和作物历(作物的播种和收获时间)。但是由于站点观测所记录的信息并非确切的某一点的作物生长发育状况,而是包括了站点周围所有种植的作物的信息。况且,遥感数据的空间分辨率是 500m,很多像元是混和像元,植被指数包含了 500m × 500m 网格内不同作物、甚至不同植被类型和地表覆被的信息,不同的物候期植被(作物)的混和像元会引起信息的偏差。因此,验证点的选取需要遵从以下两条原则:(1)要明确所选取像元点每季作物准确的作物类型,(2)所选取的像元点应该是纯像元。根据上述原则,结合高空间分辨率的 TM 影像与实地考察,在 14 个站点中选取了余干和清江两个站作为验证样点,余干和清江两个站点都位于鄱阳湖区周边的平原,水稻和油菜是主要的作物,且有实行一年三熟的耕地,大豆和棉花在站点观测范围内仅有少量的种植。

1.3　多熟种植遥感识别方法

作物从播种到收割 *EVI* 经历一个升高-峰值点-降低的动态过程,实行两熟制的区域会在一年之内完成两个这样的循环,同样,三熟制将完成 3 个生长周期,据此规律利用检测峰值数目的方法来确定熟制[22]。植被指数时间序列曲线通常会由于受到云、大气扰动等的干扰使其有锯齿状波动,而事实上作物的生长是连续渐变过程,除收获或灾害外的任何突变都是由于云、大气扰动、汽溶胶、水蒸气、土壤背景等导致的噪音的影响引起的,不能直接用于时间序列分析。去除这些噪音构建平滑的时间剖面线是进行物候监测的必要步骤。采用结合曲线拟合和傅立叶变换技术的 HANTS(harmonic analysis of time series)方法去除上述噪音重新构建光滑的作物生长曲线[27]。

多时相植被指数时间序列曲线的特征及检测农业熟制信息的方法已有详细的叙述[22,23],本文在此基础上对算法进行了进一步的改进。在此前由 AVHRR 数据进行农业多熟种植检测的研究中[22],需要有先验的

① 姜鲁光,鄱阳湖退田还湖地区洪水风险与土地利用变化研究,中国科学院研究生院博士论文,2006.

耕地分布数据和同期的气候数据，耕地和气候数据的获取会因为数据收集、整理等过程滞后于遥感数据，导致结果的时效性降低。针对以上不足，在算法中融入作物物候观测信息，不再利用耕地分布和气候数据，主要的检测步骤如下：(1)识别 *EVI* 时序曲线具有多个波峰的像元及波峰的数目；(2)在具有多个波峰的像元中根据 HANTS 的谐波特征值分析自然植被与多熟制耕地的区别，识别出实行多熟制的农田；(3)根据站点物候观测数据的统计特征确定熟制的判别规则，确定熟制；判别规则中的特征值包括峰值出现的最早可能时间、峰值出现的最晚可能时间、峰值的 *EVI* 最低值、两季作物 *EVI* 峰值的最小时间间隔、*EVI* 最大值和最小值的差值等。

2 结果与分析

2.1 作物生长的物候学特征及种植制度遥感表达

根据由 NLCD2000 数据集制作的 500m 耕地分布数据，分别在余干站和清江站周围耕地面积占 80% 以上的像元中提取了一年两熟和一年三熟的作物 *EVI* 时间序列，然后将余干站油菜-晚稻的两季的关键物候期和清江站油菜-早稻-晚稻三季作物的关键物候期与 *EVI* 时序曲线叠加(图 1)。在余干，站点观测记录的油菜抽薹、开花和成熟时间分别与 *EVI* 时序曲线中第 1 个生长周期的 *EVI* 开始增加、*EVI* 达最大和 *EVI* 降低至最低时间相吻合；晚稻的返青和成熟期则分别位于生长曲线中第 2 个生长周期的 *EVI* 开始增加和 *EVI* 降至最低点的前一时刻；抽穗时 *EVI* 达到最高值，因为从这时开始作物开始由营养生长阶段转入生殖生长阶段，叶片开始枯萎死亡(图 1)。清江站油菜-早稻-晚稻三季作物的关键物候期大体上与 *EVI* 曲线表达的 3 个作物生长周期吻合，早稻和晚稻的返青期和成熟期分别处于第 2 个生长周期和第 3 个生长周期的绿度增加开始和绿度降至最低点的前一时刻；抽穗时绿度最高。但由于 3 季作物种植强度高、时间紧凑，清江点的种植制度要比二熟的余干复杂，3 个生长季中的每两季作物之间(油菜-早稻、早稻-晚稻)作物的物候期会出现一个重叠时段。如早稻的出苗期要比油菜成熟期早 20d，晚稻的出苗期也比早稻成熟早 20d。在以双季稻为主的鄱阳湖三熟农业区，移栽是最普遍的水稻种植方式，即在专门的育苗床培育水稻秧苗，在播种 15 到 40d 的时间段内将秧苗移栽到稻田，早稻通常在 4 月下旬油菜收割后移栽，7 月中旬收割，其后晚稻立即移栽，因此观测记录的水稻的出苗时间要早于前一季作物收获时间。这种高强度的农田利用模式在中国南方是非常典型而且普遍存在的，被称之为“双抢”或“抢种抢收”。总体而言，500m 的时间序列数据能够表达出多熟作物的轮作特征及关键的作物历和物候期，可以应用于区域农业种植制度遥感识别。

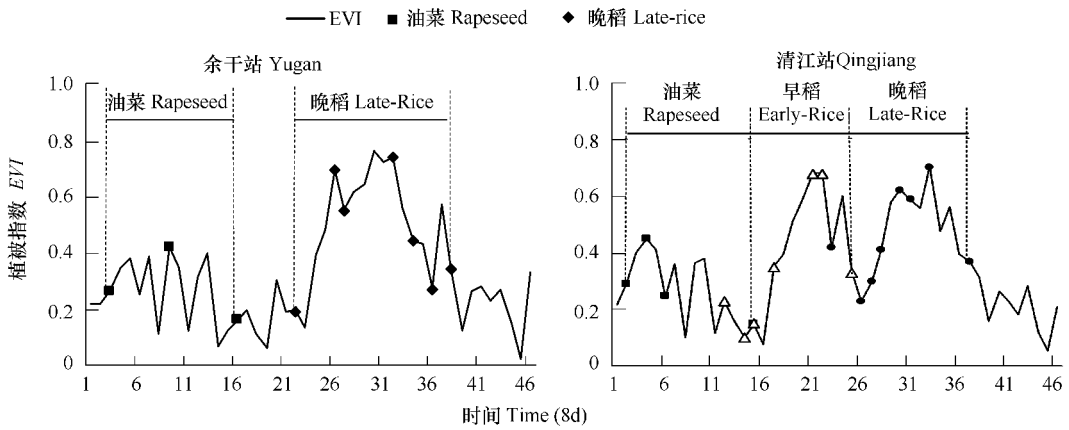

图 1 农业气象站作物生长发育状况观测数据与 MODIS/*EVI* 时序曲线

Fig. 1 Key crop phenological stages and MODIS/*EVI* time series curve at Yugan and Qingjiang stations

2.2 作物种植制度与气候条件的时间动态关系

研究区内距离清江和余干站点最近的国家基本气象站南昌站点(28°36′N，115°55′E)2002 年的观测记录说明该地区在 2002 年 3 月末降水强度和频率开始进入高峰时段，6 月初降雨频次开始减少，但在 7 月下旬出现强降雨过程(图 2)。余干站点作物生长时序曲线和同期降水对比显示，在“冬种作物 + 晚稻”二熟制种植

模式情况下,第 1 季作物(冬季作物,一般种植油菜)在汛期来临之前已经收获,第 2 季作物起始期与第 1 季作物结束期相隔时间较长,种植(移栽)晚稻在 7 月中旬湖泊水位开始趋于稳定时开始,即已避开雨季。在实行“冬种作物 + 早稻 + 晚稻”三熟制种植模式的清江站,从作物 *EVI* 时序曲线与降水的对应关系来看(图 3A),尽管高强度的种植难以完全避开洪水季节,但是在早稻、晚稻移栽时间上尽可能地避免了强降水和降水频率高的时段,最大程度地降低洪涝灾害的影响。根据实地调查走访,这种模式一般位于洪水风险小的地势较高的高岸田。从作物生长曲线与温度的时间序列图(图 3B)可见,第 1 季作物生长初期日均温低于 10℃,温度的限制是主要的考虑因素,因此选择生长温度较低的冬季作物,第 2 季和第 3 季作物则不再受温度的约束。此外,由于南部的生长季长于北部,温度对作物种植历的影响还体现在作物的播种时间和收获时间的空间差异上,第 1 季作物收获时间南部区域迟于北方,北部的湖口站点记录的油菜成熟时间(5 月 10 日)与南部的南康站(4 月 8 日)相差有 1 个月的时间。

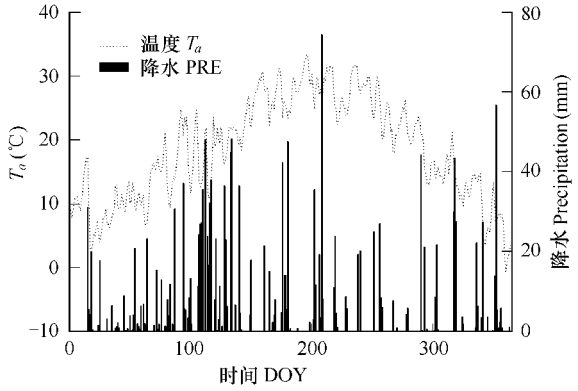

图 2　南昌气象站点 2002 年温度、降水

Fig. 2　Temperature and precipitation in Nanchang meteorological station in 2002

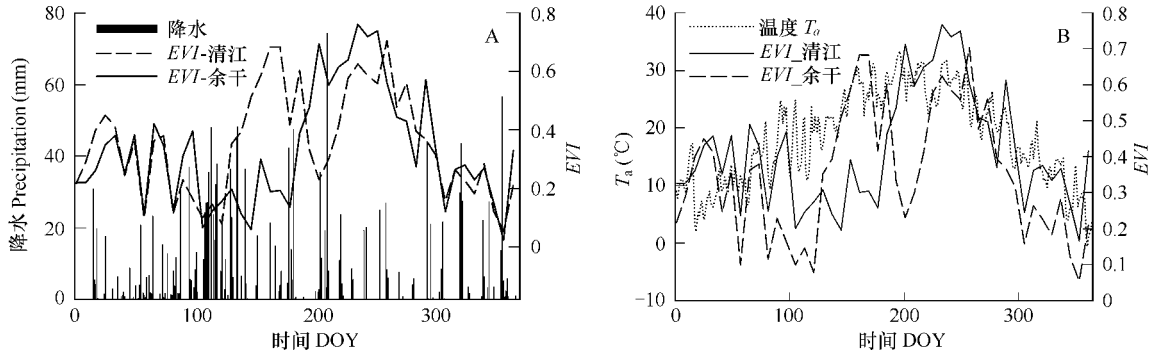

图 3　多熟种植制度与降水(A)、温度(B)时序特征的对应关系

Fig. 3　Temporal relationship of multiple cropping progress with precipitation (A) and temperature (B) time series

2.3　多熟种植空间格局特征

鄱阳湖农业区多熟种植农田主要分布在湖区的东南和西南两侧,并在湖区西南部沿赣江向南延伸(图 5),多熟种植以二熟制为主,三熟制呈零星分布且多位于南昌以南地区。对比分析由空间分辨率 30m 的 TM 遥感影像提取的 500m × 500m 栅格中耕地分布面积比例数据与本文所获得的多熟种植分布数据结果,二熟和三熟的像元分布格局基本与 500m × 500m 栅格中耕地比例大于 80% 的耕地分布相吻合,可见多熟种植的空间分布总体与耕地的布局和质量相关。在多熟制的像元中,有 60% 其耕地比例大于 70%,有 50% 耕地比例高于 80%,有近 40% 位于耕地所占面积比例大于 90% 的像元,也就是说大面积连片且地势平坦的耕地是多熟种植的主要分布区。前一节作物生长与气候的时间序列对比分析结果证明该区域种植制度的形成是适应降水的季节性变化规律及其导致的洪涝灾害的结果,遥感检测得到的熟制分布格局也说明洪水灾害的风险影响着农户对种植制度的选择,进而影响了多熟制的空间格局,图 4 显示在湖区周边大部分耕地是以能够避开洪水季节的油菜-晚稻二熟制为主,而三熟制主要位于距离湖区较远处,在南昌以南地区的耕地分布较多,北部距离湖区较近的区域仅是零星分布在地势稍高的耕地。除以上所述耕地地形条件以及洪水风险影响着多熟种植的空间布局外,图 4 还显示种植制度与经济发展也体现一定的规律性,围绕南昌市,由内而外基本呈现城区——一熟农业区—二熟农业区—三熟农业区的环状格局,这样的空间特征可能是城市经济发展导致的农业

收入比较效益低下影响农业土地利用强度和种植制度的结果。

3 结论与讨论

本研究结合农业气象站点地面作物物候观测数据和空间分辨率500m、8d合成的MODIS数据,分析中国三熟制的重点农作区(鄱阳湖农业区)种植制度的时空格局动态特征,结果表明空间分辨率500m、8d合成的MODIS/*EVI*时间序列数据能够表达出多熟作物的轮作特征及关键的作物历和物候期,因此可以应用于区域农业种植制度遥感识别。在该区域,多熟制以冬季作物-晚稻的两熟制和冬季作物-早稻-晚稻的三熟制为主,其中二熟制广泛分布,而三熟制呈零散状分布,其时空格局是当地农户对气候资源、地形条件、洪涝灾害风险以及粮食安全与社会经济发展状况的响应和适应性结果。

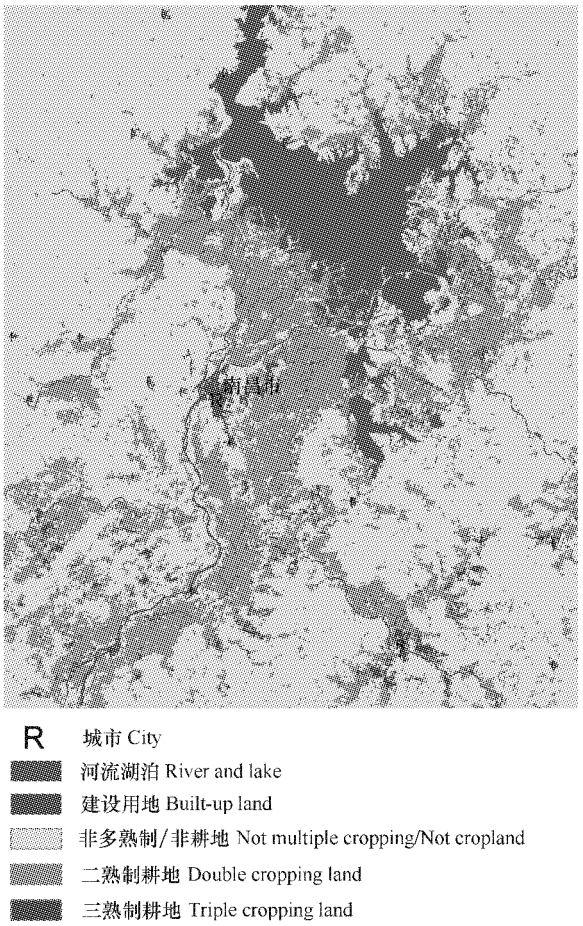

图4 鄱阳湖周边农业多熟制的空间布局

Fig. 4 Spatial pattern of multiple cropping around Poyang Lake

鄱阳湖农业区历史上是洪涝灾害频发、损失严重的区域,种植结构单一,没有根据本地的气象、生态条件和高程水位安排农业结构,因而难以错开洪水期,导致洪水来时大部分田地作物绝收被认为是1998年出现的重大洪涝灾害原因之一。根据遥感检测及地面观测和调查结果,目前该地区根据气象和生态条件调整作物种植历、轮作方式以及作物类型,基本形成最大程度利用自然资源、避免灾害威胁的种植制度,如在鄱阳湖周边地区,多熟种植和作物类型的选择以避开洪水期的油菜-晚稻为主,油菜-早稻-晚稻三熟制主要分布在距湖区较远、地势较高的耕地。但是与此同时,社会经济状况影响农民的种植行为,农民会根据务农与进城务工、粮食作物与经济作物的比较效益调整种植结构,导致城市周边地区较远离城市的地区的耕地多熟种植面积小。

本文以鄱阳湖农业区这个农业种植制度较为复杂的区域对应用MODIS数据辨识熟制时空格局进行了探讨,证明基于多时相遥感数据的研究结果能够定量表达农业熟制时空格局,为认识高强度农业土地利用作用下农业种植制度的特征与形成机制、建立农田生产力预测预警系统以及区域碳氮水循环模拟提供空间表述清晰的数据,但以农户为管理单元的农业生产模式使得空间分辨率500m的MODIS影像中很多像元会是不同作物或者是作物与裸地或者其他植被的混和像元,如冬季作物的种植面积比例要比夏季作物种植面积小,*EVI*时间序列曲线也体现出冬季作物的植被指数值较夏季作物低,因此在应用研究中需要考虑到其中的不确定性。此外,要充分认识农业种植制度的时空动态特征形成的规律与原因,需要结合由实地调查或统计数据获得的社会经济资料等进行深入的分析。尤其对于鄱阳湖区这样包括大量围垦区的地区,退田还湖政策也对近些年农业种植制度有影响,还需要对退田还湖政策的执行和落实情况进行详细的分析。MODIS遥感资料自2000年至今已经有8a的数据积累,遥感反演得到的多年的种植制度时空动态信息将会对高强度农业土地利用对生态系统碳氮水循环及其服务功能的影响有更加清晰的认识;将其与同时期的气候及社会经济资料进行系统的综合分析也将会对农业种植制度时空动态格局的形成机制有更为深刻的理解。

References:

[1] Feddema J J, Oleson K W, Bonan G B, *et al*. The importance of land-cover change in simulating future climates. Science, 2005, 310: 1674-1678.

[2] Foley J A, DeFries R, Gregory P A, *et al*. Global consequences of land use. Science, 2005, 309: 570－574.
[3] Eickhout B, Bouwman A F, van Zeijts H. The role of nitrogen in world food production and environmental sustainability. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2006, 116: 4－14.
[4] Guo B L. The Analysis for the Change of Multiple Cropping Index in China. Economic Geography, 1997,17(3): 8－13.
[5] Duan H P. Analysis of cropping system evolution during 1949－1998. Tillage and Cultivation, 2001(3):1－4
[6] Tao F L, Yokozawa M, Xu Y L, *et al*. Climate changes and trends in phenology and yields of field crops in China, 1981－2000. Agricultural and Forest Meteorology, 2006, 138(1-4): 82－92.
[7] Matson P A, Parton W J, Power A G, *et al*. Agricultural intensification and ecosystem properties. Science, 1997, 277: 504－509.
[8] Lal R. Anthropogenic influences on world soils and implications to global food security. Advances in Agronomy, 2007, 93: 69－93.
[9] Brovkin V, Sitch S, von Bloh W, *et al*. Role of land cover changes for atmospheric CO_2 increase and climate change during the last 150 years. Global Change Biology, 2004, 10: 1－14.
[10] Levy P E, Friend A D, White A, *et al*. The influence of land use change on global-scale fluxes of carbon from terrestrial ecosystems. Climatic Change, 2004, 67: 185－209.
[11] Bondeau A, Smith P C, Sonke Z, *et al*. Modelling the role of agriculture for the 20th century global terrestrial carbon balance. Global Change Biology, 2007, 13(3): 679－706.
[12] Boucher O, Myhre G, Myhre A. Direct human influence of irrigation on atmospheric water vapour and climate. Climate Dynamics, 2004, 22: 597－603.
[13] Lal R. World crop residues production and implications of its use as a biofuel. Environment International, 2005, 31: 575－584.
[14] Ogle S M, Paustian K, Breidt F J. Agricultural management impacts on soil organic carbon storage under moist and dry climatic conditions of temperate and tropical regions. Biogeochemistry, 2005, 72: 87－121.
[15] Frolking S, Qiu J J, *et al*. Combining remote sensing and ground census data to develop new maps of the distribution of rice agriculture in China. Global Biogeochemical Cycles, 2002, 16: doi: 10.1029/2001GB001425.
[16] Qiu J J, Tang H J, Frolking S, *et al*. Mapping single-, double-, and triple-crop agriculture in China at 0.5o × 0.5o by combining county-scale census data with a remote sensing-derived land cover map. Geocarto International, 2003, 18(2): 3－13.
[17] Ramankutty N, Foley J A. Characterizing patterns of global land use: An analysis of global croplands data. Global Biogeochemical Cycles, 1998, 12(4): 667－685.
[18] Ramankutty N, Foley J A, Norman J, *et al*. The global distribution of cultivable lands: current patterns and sensitivity to possible climate change. Global Ecology and Biogeography, 2002, 11(5): 377－392.
[19] Hurtt G C, Frolking S, Fearon M G, *et al*. The underpinnings of land-use history: three centuries of global gridded land-use transitions, wood-harvest activity, and resulting secondary lands. Global Change Biology, 2006, 12(7): 1208－1229.
[20] Liu J Y, Liu M L, Zhuang D, *et al*. Spatial and temporal patterns of China's cropland during 1990－2000: An analysis based on Landsat TM data. Remote Sensing of Environment, 2005, 98(4): 442－456.
[21] Xiao X M, Boles S, Liu J Y, *et al*. Mapping paddy rice agriculture in southern China using multi-temporal MODIS images. Remote Sensing of Environment, 2005, 95(4): 480－492.
[22] Yan H M, Cao M K, Liu J Y, *et al*. Detecting Spatial Patterns of Crop Rotation System from Multi-temporal Remote Sensing Images, Transactions of the Chinese society of agricultural engineering, 2005, 21 (4): 85－90.
[23] Yan H M, Liu J Y, Cao M K. Remotely Sensed Multiple Cropping Index Variations in China During 1981－2000, Acta Geographic Sinica, 2005, 60 (4): 559－566.
[24] Zhang X Y, Friedl M A, Schaaf C B. Global vegetation phenology from Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS): Evaluation of global patterns and comparison with in situ measurements. Journal of Geophysical Research-Biogeosciences, 2006, 111, G04017, doi: 10.1029/2006JG000217.
[25] Sakamoto T, Nguyen N V, Kotera A, *et al*. 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. Remote Sensing of Environment, 2006, 100(1): 1－16.
[26] Huete A, Didan K, Miura T, *et al*. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. Remote Sensing of Environment, 2002, 83(1-2): 195－213.
[27] Roerink G J, Menenti M. Reconstructing Cloudfree NDVI Composites Using Fourier Analysis of Time Series. International Journal of Remote Sensing, 2000, 21(9):1911－1917.

参考文献:

[4] 郭柏林. 我国复种指数变化特征、效益和潜力. 经济地理,1997,17(3):8～13.
[5] 段红平. 湖南省耕作制度50年(1949～1998年)演变分析. 耕作与栽培,2001,(3):1～4.
[22] 闫慧敏,曹明奎,刘纪远,等. 基于多时相遥感信息的中国作物种植制度空间格局研究. 农业工程学报,2005,21(4):85～90.
[23] 闫慧敏,刘纪远,曹明奎. 近20年中国耕地复种指数的时空变化. 地理学报,2005,60(4):559～566.

CMYK \\hb\e\fang\9.23\ld\生态学报第9期出片\09d.PS 2008/09/23 14:55:30 Time: 2008/09/23 16:28:

收入比较效益低下影响农业土地利用强度和种植制度的结果。

3 结论与讨论

本研究结合农业气象站点地面作物物候观测数据和空间分辨率500m、8d合成的MODIS数据，分析中国三熟制的重点农作区(鄱阳湖农业区)种植制度的时空格局动态特征，结果表明空间分辨率500m、8d合成的MODIS/*EVI*时间序列数据能够表达出多熟作物的轮作特征及关键的作物历和物候期，因此可以应用于区域农业种植制度遥感识别。在该区域，多熟制以冬季作物-晚稻的两熟制和冬季作物-早稻-晚稻的三熟制为主，其中二熟制广泛分布，而三熟制呈零散状分布，其时空格局是当地农户对气候资源、地形条件、洪涝灾害风险以及粮食安全与社会经济发展状况的响应和适应性结果。

鄱阳湖农业区历史上是洪涝灾害频发、损失严重的区域，种植结构单一，没有根据本地的气象、生态条件和高程水位安排农业结构，因而难以错开洪水期，导致洪水来时大部分田地作物绝收被认为是1998年出现的重大洪涝灾害原因之一。根据遥感检测及地面观测和调查结果，目前该地区根据气象和生态条件调整作物种植历、轮作方式以及作物类型，基本形成最大程度利用自然资源、避免灾害威胁的种植制度，如在鄱阳湖周边地区，多熟种植和作物类型的选择以避开洪水期的油菜-晚稻为主，油菜-早稻-晚稻三熟制主要分布在距湖区较远、地势较高的耕地。但是与此同时，社会经济状况影响农民的种植行为，农民会根据务农与进城务工、粮食作物与经济作物的比较效益调整种植结构，导致城市周边地区较远离城市的地区的耕地多熟种植面积小。

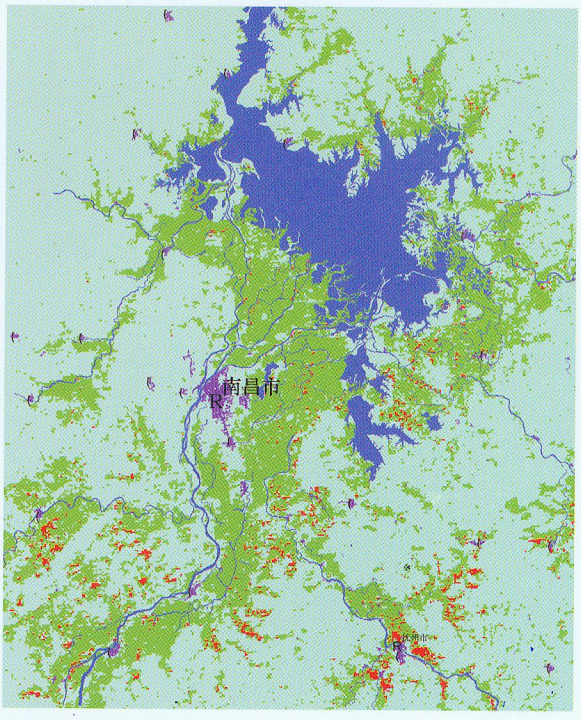

图4 鄱阳湖周边农业多熟制的空间布局

Fig. 4 Spatial pattern of multiple cropping around Poyang Lake

本文以鄱阳湖农业区这个农业种植制度较为复杂的区域对应用MODIS数据辨识熟制时空格局进行了探讨，证明基于多时相遥感数据的研究结果能够定量表达农业熟制时空格局，为认识高强度农业土地利用作用下农业种植制度的特征与形成机制、建立农田生产力预测预警系统以及区域碳氮水循环模拟提供空间表述清晰的数据，但以农户为管理单元的农业生产模式使得空间分辨率500m的MODIS影像中很多像元会是不同作物或者是作物与裸地或者其他植被的混和像元，如冬季作物的种植面积比例要比夏季作物种植面积小，*EVI*时间序列曲线也体现出冬季作物的植被指数值较夏季作物低，因此在应用研究中需要考虑到其中的不确定性。此外，要充分认识农业种植制度的时空动态特征形成的规律与原因，需要结合由实地调查或统计数据获得的社会经济资料等进行深入的分析。尤其对于鄱阳湖区这样包括大量围垦区的地区，退田还湖政策也对近些年农业种植制度有影响，还需要对退田还湖政策的执行和落实情况进行详细的分析。MODIS遥感资料自2000年至今已经有8a的数据积累，遥感反演得到的多年的种植制度时空动态信息将会对高强度农业土地利用对生态系统碳氮水循环及其服务功能的影响有更加清晰的认识；将其与同时期的气候及社会经济资料进行系统的综合分析也将会对农业种植制度时空动态格局的形成机制有更为深刻的理解。

References:

[1] Feddema J J, Oleson K W, Bonan G B, *et al*. The importance of land-cover change in simulating future climates. Science, 2005, 310: 1674-1678.