

鄱阳湖区粮食供给功能的空间格局分析

李鹏^{1,2}, 姜鲁光^{1*}, 封志明¹, 张景华^{1,2}, 闫慧敏¹, 赵慧霞³

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049;
3. 国家气象中心, 北京 100081)

摘要: 在种植制度复杂、地块破碎及多阴雨天气的南方地区,应用卫星遥感植被指数时间序列数据提取复种指数受到中低空间分辨率的限制。使用较高空间分辨率影像是提取该区域复种信息有效的数据源。论文以鄱阳湖区为研究区,通过遥感解译提取水田空间信息;在界定单/双季稻生长期物候的前提下,根据水稻不同生长期内归一化植被指数(*NDVI*)的明显差异,选择合理时间窗口的 *TM* 影像获取水田 *NDVI* 数据,采用非监督分类法提取单/双季稻的空间分布信息;结合湖区乡镇不同熟制水稻单产数据估算出基于栅格的水稻产量。研究表明,4月下旬到6月下旬是判别双季早稻与单季稻空间分布的合理时间窗口;7月上旬到8月上旬及9月中旬到10月上旬是判别单季稻与双季晚稻空间分布的合理时间窗口。2005年,单季稻播种面积为3 081.58 km²,晚稻/早稻播种面积为3 602.97 km²,水稻复种指数为153.9%。单季稻普遍分布在市县建成区周边,双季稻主要分布在河口三角洲等地。全年水稻总产量约1 650 × 10⁴ t,单季稻占30.5%,双季稻占69.5%。赣江下游地区两种熟制水稻产量均较高,而湖汉及湖区外围丘陵地区产量较低。

关键词: 粮食供给; 水稻熟制; 时间窗口; *NDVI*; 鄱阳湖区

中图分类号: F307.11 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3037(2011)02-0190-11

区域粮食生产能力取决于播种面积、单产与复种指数,是增强粮食供给功能与保障国家粮食安全的基础^[1-2]。关于耕地面积、单产与粮食供给能力变化的研究较多^[3-5],而对复种指数研究不够^[6-7]。复种指数反映了农业生产中时间尺度上农业资源集约利用的程度^[8]。1952—1992年,我国复种指数总体提高了20%以上,所生产的粮食有25%受惠于此^[9]。近20 a来,受市场经济与气候变化的影响,一些粮食主产省区复种指数有所下降^[10-12]。类似研究主要依赖于统计数据^[13],从而忽略了统计单元内部的空间差异性,且数据获取费时耗力,存在时效性的局限^[6]。

遥感影像反演的植被指数能够揭示地表植被覆盖及生长状况,已广泛用于陆地植被类型信息提取、农作物分布及长势监测及估产等研究^[14-17]。植被指数时间序列数据能反映作物从播种到成熟等不同生长期的物候规律^[18]。NOAA/AVHRR、SPOT VGT和MODIS等遥感资料已成为大尺度区域复种指数提取的主要数据源。通过去云重构、曲线拟合方

收稿日期: 2010-08-19; 修订日期: 2010-10-20。

基金项目: 国家自然科学基金项目“鄱阳湖区洪水调蓄与粮食供给服务的多情景互竞研究”(40901285);国家重点基础研究发展计划(973计划)“中国主要陆地生态系统服务功能与生态安全”(2009CB421106)。

第一作者简介: 李鹏(1984-),男,江西永新人,博士研究生,中国自然资源学会会员(S300001060M),研究方向为资源开发与区域发展。E-mail: lip.09b@igsnr.ac.cn

***通信作者简介:** 姜鲁光(1978-),男,山东临沂人,博士,副研究员,主要从事水土资源利用与生态系统管理研究。E-mail: jianglg@igsnr.ac.cn

法与变换技术重建作物生长归一化植被指数(*NDVI*)光滑曲线,根据峰值识别不同作物的熟制信息,提取了全国、大区(中国南方 13 省)与省级区域(浙江、湖南)的复种指数^[6,13,15,19-20]。但是,受云、大气等干扰,加之中低空间分辨率容易构成混合像元而使 *NDVI* 不能直接使用,需经过反复拟合变换处理以逼近真实值,数据量大,分析过程繁琐。有学者以特征时相的植被指数作为特征参量,构建分析决策树提取中国北方耕地复种指数^[21]。但是过多引入先验知识,难免造成误差。在种植制度复杂、地块破碎与管理模式变动频繁的南方地区^[22],应用时间序列数据提取复种指数普遍受到中低空间分辨率的限制^[21,23]。鄱阳湖区以农户为管理单元的农业生产模式,使得空间分辨率 500 m 的 MODIS 影像中很多像元是不同作物或者是作物与裸地或其他植被的混合像元^[24],从而增加了复种指数提取的不确定性。

本文提出利用较高空间分辨率影像提取水田及其 *NDVI* 分布信息,根据水稻不同生长期内 *NDVI* 的明显差异,采用非监督分类法提取不同熟制水稻的空间分布与水稻复种信息,结合乡镇水稻单产数据揭示粮食供给空间格局特征。

1 研究区概况

鄱阳湖地处东亚季风区,属于亚热带湿润气候。“高水是湖,低水似河”的特点使得洪、枯水期的湖泊面积、容积相差极大^[25],对鄱阳湖区农业生产具有深刻影响。鄱阳湖区(Poyang Lake Region, PLR)包括南昌市区、南昌县、新建县、进贤县、九江市区、永修县、德安县、星子县、湖口县、都昌县、鄱阳县与余干县共 12 个县市,土地总面积约为 20 289.50 km²^[26]。境内地貌形态多样,山、丘、岗、平原、湖泊相间。其中山地零星分布于湖区周围,面积较小;丘陵主要分布在进贤、余干、都昌、鄱阳及德安等地;岗地分布较广,向湖区倾斜;平原由河谷平原与滨湖平原组成,前者有“五河”下游平原,后者包括赣抚平原与信乐平原等。

鄱阳湖区作为长江中下游平原区之一,历来是江西省首要粮食生产基地,在全国亦占有重要地位。南昌、新建、鄱阳、余干及都昌五县均为全国粮食生产先进县,其中部分县被列入《全国新增 1000 亿斤粮食生产能力规划》(2009—2020 年)^[27]粮食生产核心县。水稻作为本区最主要的粮食作物,多年来其播种面积占粮食作物总播种面积的比重达 90%~95%,产量比重更高。根据熟制信息可分单季稻与双季稻,其中双季稻包括双季早稻与双季晚稻(以下简称“早稻”与“晚稻”)。近年来,随着农资价格的上涨,水稻生产比较收益在不断下降,种植密度偏低,“双改单”趋势明显^[27],空间上单/双季稻种植面积变动较大且频繁。

2 数据与方法

2.1 数据

本文所用农业气象数据来自中国气象局国家气象信息中心,主要为江西省境内“农作物生长发育状况资料数据集”(1991—2010 年),该数据根据 1991 年以来农业气象台站上报的农业气象旬、月报资料整理而得。鄱阳湖区内包括湖口、余干及南昌县 3 个标准气象台站,同时也参考了周边的台站数据。这些资料通过调查大田作物获取,逐旬监测记录了水稻从播种到成熟的时间,对反映大面积的水稻物候特征有很好的面上代表性。

土地利用数据根据 2005-09-13 的 Landsat-5 TM 影像解译获得。该影像原始数据经

过辐射校正与几何校正。利用鄱阳湖区 DEM 图与圩堤图进行坐标精确校正后,对湖区土地利用状况进行目视解译,提取水田分布图。

2007—2008 年笔者曾连续两年在赣江下游中支和南支之间的蒋巷镇选取大面积双季稻田进行早稻与晚稻长势观测,时间间隔为每 8 d 一次,观测样田(共 5 块)之间直线距离控制在 2 km 以上。2007-09-28 与 2008-09-27 分别对晚稻进行了两次观测。另外,2010-09-18 至 09-25 笔者再次对鄱阳湖区 12 县区单季稻与晚稻进行定位观测,均表明 9 月中下旬晚稻正处于孕穗至抽穗期,单季稻处于黄熟至成熟收割期。直观上,两种熟制水稻根据田块整体颜色可清晰辨识。晚稻正处生育关键期,叶绿素含量最高,呈青绿色;单季稻正处结实期,叶绿素含量低,呈黄绿或黄色。两种熟制水稻 *NDVI* 存在明显差异,晚稻 *NDVI* 总体高于单季稻 *NDVI*,是可靠的时间窗口。因此,选择 2005-09-29 的 *NDVI* 数据产品进行不同熟制水稻空间分布信息提取。该数据由中国科学院计算机网络信息中心科学数据中心遥感影像数据服务系统根据 Landsat-5 TM 影像经过植被指数加工而成。该数据轨道号为 P121/R40,覆盖了鄱阳湖区 90% 以上地区。

鄱阳湖区各乡镇(场)不同熟制水稻的单产数据由各县统计年鉴收集整理而得。作为传统水稻种植区,在正常年份下,水稻单产波动幅度较小。同时考虑到数据的可获得性,选用 2006 年水稻分熟制单产数据计算粮食总产量。

2.2 研究方法

NDVI 是近红外波段与可见光红波段数值之差和这两个波段数值之和的比值^[28],其计算公式为:

$$NDVI = (\rho_{NIR} - \rho_{Red}) / (\rho_{NIR} + \rho_{Red})$$

其中: ρ_{NIR} 、 ρ_{Red} 分别表示近红外、红波段的反射系数;*NDVI* 值在 -1 到 1 之间,正值表示有植被覆盖,且随覆盖度增大而增大。

NDVI 随着水稻生长表现出低—高一低的变化态势。研究表明^[29]:水稻移栽后 *NDVI* 处于较低值,返青到本田分蘖期 *NDVI* 逐渐上升,在分蘖拔节期植株开始大量分蘖生长,叶面积指数和叶绿素含量增加,并在孕穗期 *NDVI* 达到最高值,抽穗期 *NDVI* 开始缓慢回落,到乳熟与成熟两期内由于叶片叶绿素含量降低,*NDVI* 重新下降到较低点。江西鹰潭早稻某品种分蘖期、拔节期和抽穗期的适宜 *NDVI* 值分别为 0.37~0.55、0.76~0.80 和 0.72~0.75^[30]。

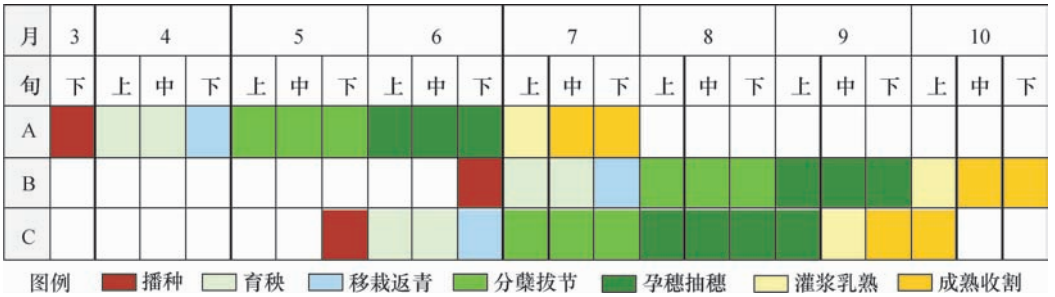
根据单/双季稻在不同生长期内 *NDVI* 差异显著特征,选择合理的时间窗口,可以通过不同地块(栅格)之间的 *NDVI* 差异来界定鄱阳湖区年内水稻不同熟制的空间格局。细言之,首先,在时间上,依据近 20 a 农业气象数据并结合实地定位观测调查,以旬为单位,界定鄱阳湖区单/双季稻生长期安排。其次,在空间上,甄别出鄱阳湖区合理时间窗口的 Landsat TM 影像生成 *NDVI* 分布图。利用湖区 DEM 与圩堤分布图对湖区遥感影像进行几何精校正,然后对湖区土地利用状况进行目视解译,提取水田分布图。再次,利用水田分布对 *NDVI* 数据进行掩膜处理,提取湖区水田的 *NDVI* 分布图。由于湖区年内仅为单季稻与双季稻两类,因此可利用 Erdas Imagine 9.2 中的非监督分类(Unsupervised Classification)方法进行分类,提取湖区不同熟制水稻的空间分布与水稻复种信息。最后,利用鄱阳湖区乡镇边界图层及早稻、单季稻与晚稻单产统计数据,在 ArcGIS 中生成不同熟制的单产栅格图,单个栅格水稻生产总量即为播种面积、复种及单产水平的乘积,进而从栅格尺度上揭示鄱阳湖区单季稻

与双季稻的粮食供给空间格局。

3 结果与分析

3.1 不同熟制水稻的时间安排

水稻的全生育期可划分为营养生长期和生殖生长期。营养生长期由播种育秧期、移栽返青期、分蘖拔节期组成,这一时期水稻植株个体增大,分蘖增加;生殖生长期由孕穗抽穗期、灌浆乳熟期与成熟收割期组成,是稻穗形成与发育的过程。水稻幼穗发育期的天数相对固定,故营养生长期决定了某一品种生育期的长短。据调查,鄱阳湖区双季稻生长期安排因受气候条件的制约相对固定,大致从每年3月下旬到10月下旬,而单季稻生长期安排相对自由,且全生育期略长,一般从5月中上旬到10月上旬即可。近20 a 农业气象数据表明,鄱阳湖区不同熟制水稻种植时间安排上略有差异,但总体情况如图1。



注:A为早稻,B为晚稻,C为单季稻。

图1 鄱阳湖区年内不同熟制水稻物候历示意图

Fig. 1 Diagram showing annual phenological calendar of different rice cropping systems in PLR

早稻3月下旬(或4月上旬)播种,4月下旬移栽,5月分蘖拔节,6月孕穗抽穗,7月上旬乳熟,7月中下旬成熟收割。晚稻6月下旬播种,7月下旬移栽,8月分蘖拔节,9月孕穗抽穗,10月上旬乳熟,10月中下旬成熟收割。单季稻5月中下旬播种,6月中下旬移栽,7月分蘖拔节,8月孕穗抽穗,9月中旬乳熟,9月下旬到10月上旬成熟收割。需强调,以农户为基础的农田管理方式使实际各生长期会有一周左右的波动期。相同熟制水稻也可能因其品种成熟期不同,而使收割时间有若干天的差别。

根据鄱阳湖区水稻种植特征,年内早稻/晚稻与单季稻种植田块在空间上相互独立,即已种植早稻(或晚稻)的水田就不会种植单季稻,早稻与晚稻播种面积大致相当。在时间上,不同熟制的水稻表现出一定的交叉。因此,4月下旬到6月下旬可以作为判别早稻与单季稻空间分布的时间窗口,其中以5月中旬与6月中旬最佳。因为4月下旬早稻已基本移栽,先后经历分蘖、孕穗抽穗等阶段,到6月下旬均处于快速生长的过程,NDVI相对于同期尚没有播种的水田或正处于移栽期的单季稻(NDVI表现为负值或零值)明显偏高。即这一时段内NDVI偏高的区域种植早稻,偏低的则种植单季稻。7月上旬到8月上旬及9月中旬到10月上旬可以作为判别单季稻与晚稻空间分布的合理时间窗口,其中以7月中旬与9月中下旬最佳。在7月上旬到8月上旬,由于单季稻先后经历分蘖拔节期与孕穗前期,植株快速增加,NDVI高;而双季稻田或处在成熟等待收割阶段(早稻)或处

在移栽返青阶段(晚稻),这两个阶段水稻绿叶稀疏,*NDVI*低。即这一时段内 *NDVI* 偏高的区域种植单季稻,偏低的则种植早稻或晚稻。9月中旬到10月上旬,单季稻先后经历乳熟、蜡熟到成熟收割阶段,叶片叶绿素逐渐减少,*NDVI* 偏低;而同期晚稻分别处于抽穗与乳熟前期阶段,*NDVI* 较高。即这一时段内 *NDVI* 偏高的区域种植晚稻,偏低的则种植单季稻。

3.2 不同熟制水稻空间格局

通过解译 2005 年鄱阳湖区 TM 遥感影像并从中提取水田分布信息[图 2(a)]发现,湖区水田面积为 6 966.12 km²,约占整个湖区土地面积的 34.3%,其中 P121/R40 影像所覆盖水田面积达 6 684.55 km²,主要分布在河谷平原与滨湖平原,即以赣江河谷平原、赣抚平原、信乐平原相对集中。

2005 年鄱阳湖区不同熟制水稻空间分布[图 2(b)]表明,全年单季稻播种面积为 3 081.58 km²,晚稻/早稻播种面积为 3 602.97 km²,分别占水田面积的 46.1% 与 53.9%,即湖区水稻复种指数为 153.9%。单/双季稻种植在全区都有分布,同时也表现出相对集中的特征。具体而言,双季稻主要分布在赣江河口三角洲、信乐平原等。单季稻分布表现出两种情况:一是在市县建成区周边分布相对集中,其中以南昌市区(包括新建与南昌县)及九江市周边最为典型;二是鄱阳湖湖汉周边区单季稻分布较集中,包括进贤、鄱阳、德安与星子等地,其中以进贤县军山湖与青岚湖最为典型,周边单季稻大片分布。湖汉地区及周边水产养殖生产水平好且收益较高,从而造成了农户种粮积极性偏低。

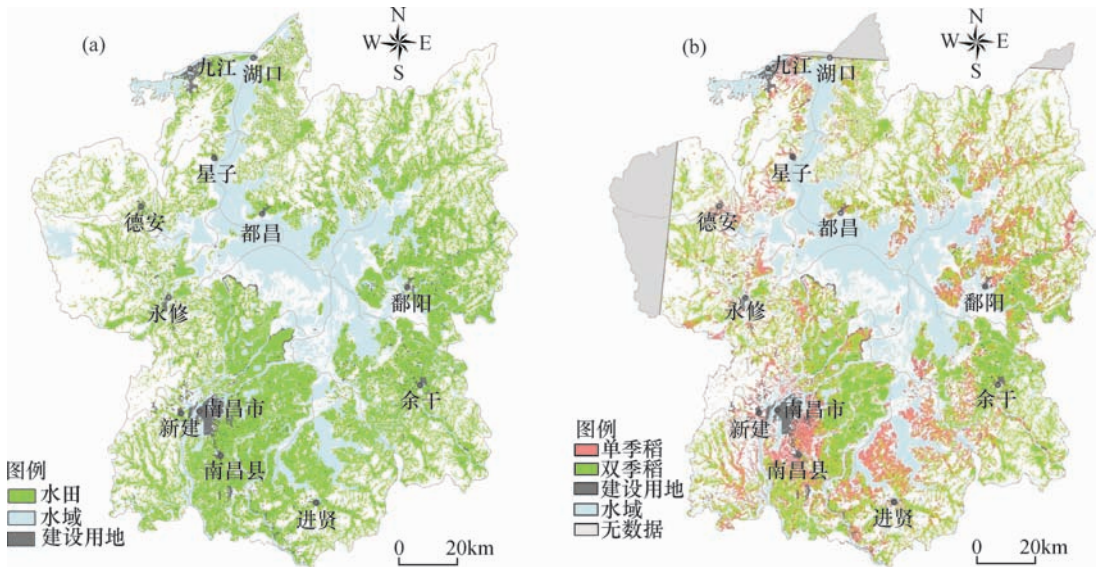


图 2 鄱阳湖区 2005 年水田空间分布(a)和不同熟制水稻空间分布(b)

Fig. 2 Spatial pattern of paddy field (a) and different rice cropping systems (b) in PLR in 2005

相关研究表明湖区农业种植制度与经济发展体现出一定的相关性与规律性^[24],本文也得出类似结果。围绕南昌市,由近及远总体表现为城区—单季稻为主—双季稻为主—单双混合的环状格局。类似现象在湖区其他区域也有体现。总体而言,鄱阳湖区不同熟制水稻格局表现为双季稻在主要河口三角洲集中分布,而单季稻在市县建成区近郊及主要湖汉周

边大片分布。

3.3 不同熟制水稻产量空间格局

根据遥感提取水田面积与复种指数及不同熟制水稻单产统计数据估算得到,2005 年鄱阳湖区水稻产量约为 $1\ 650 \times 10^4$ t,其中单季稻占 30.5%,双季稻占 69.5%。不同熟制在空间上差异较为明显。单季稻产量空间分布图[图 3(a)]表明:鄱阳湖西南部即赣江

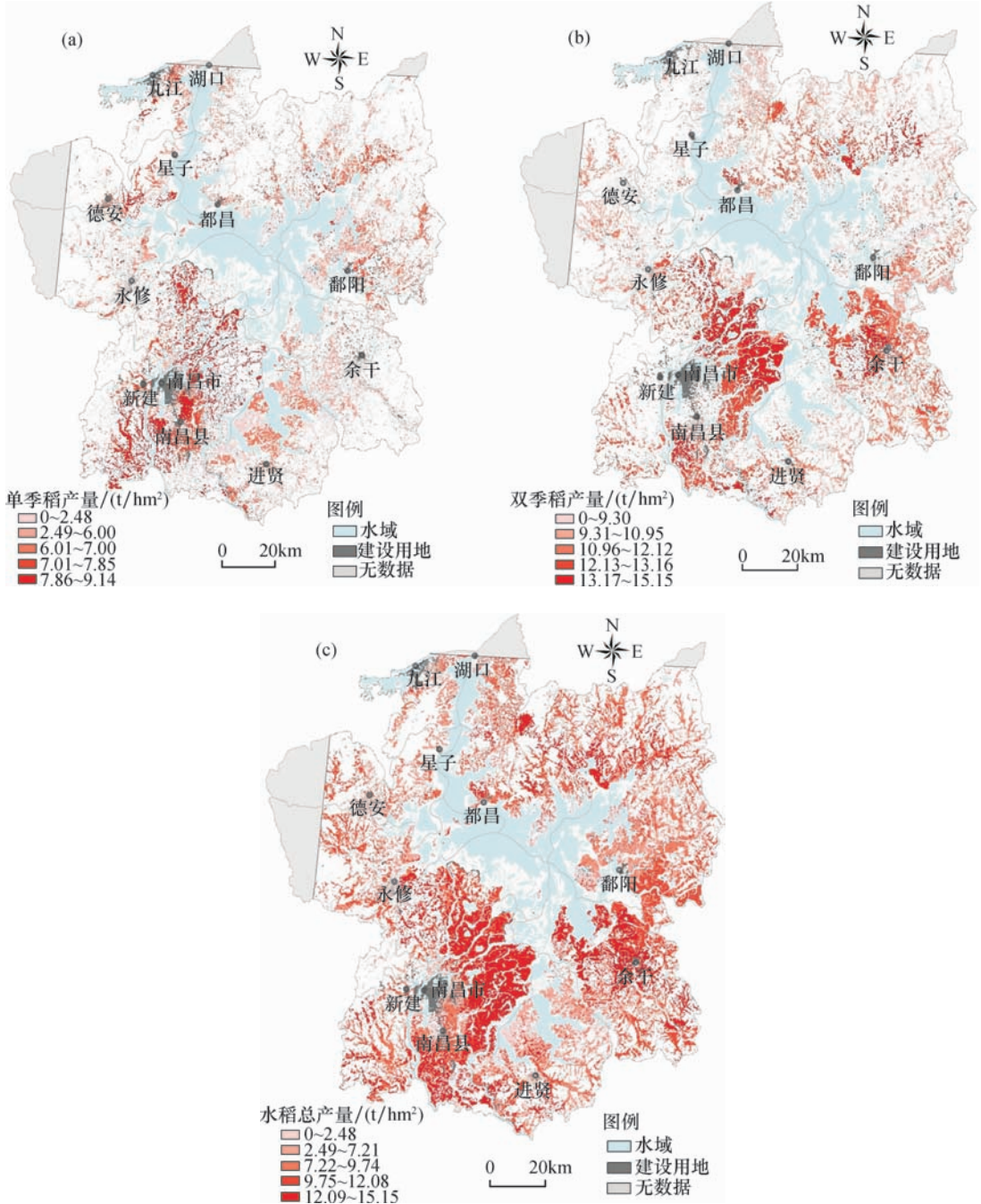


图3 鄱阳湖区2005年不同熟制水稻产量空间分布

Fig. 3 Spatial pattern of yield of different rice cropping systems in PLR in 2005

下游区产量较高,其中南昌县部分地区产量最高;另外在鄱阳湖湖汉周边区域产量也偏高,而由湖汉往外围,产量则逐渐减少。鄱阳湖东侧滨湖地区多为产量较低区,以余干县最为普遍。双季稻产量空间分布图[图3(b)]表明:产量较高地区主要分布在鄱阳湖南部的入湖河口平原,即赣江三角洲与信乐平原;在鄱阳湖外侧丘陵地区产量则相对较低。由单/双季稻分布图叠加形成了鄱阳湖区水稻总产量空间分布图[图3(c)],表明以农户为单元的水稻种植管理模式与经济效益密切相关。以南昌市为例,经济发展水平与复种指数高低表现出负相关性,在南昌市周边全年水稻产量处于较低或最低水平,随着离市中心距离增加,依次表现为中等产量水平到较高或最高产量水平。另外,鄱阳湖区水产养殖发展水平高的地区,双季稻种植面积远小于单季稻种植面积,导致全年水稻产量明显低于周边地区。

4 结论

本文根据农业气象数据,结合实地调查,界定了鄱阳湖区不同熟制水稻生长期的时间安排。在此基础上,根据水稻 *NDVI* 不同生长期内差异较大,择取合理时间窗口的遥感影像提取不同熟制的空间信息;利用各乡镇单产数据分析湖区基于栅格的粮食生产格局。主要结论如下:

(1) 初步界定4月下旬到6月下旬是判别早稻与单季稻空间分布的合理时间窗口,其中以5月中旬与6月中旬最佳;7月上旬到8月上旬及9月中旬到10月上旬是判别单季稻与晚稻空间分布的合理时间窗口,其中以7月中旬与9月中下旬最佳。

(2) 2005年鄱阳湖区单季稻与早稻(或晚稻)的播种面积分别约为46.1%与53.9%,即湖区水稻复种指数为153.9%。鄱阳湖区不同熟制水稻种植格局表现为双季稻在主要河口三角洲集中分布,而单季稻在市县建成区近郊及主要湖汉周边大片分布。

(3) 结合乡镇边界图层及不同熟制水稻单产的统计数据,估算出2005年鄱阳湖区水稻产量为 $1\ 650 \times 10^4$ t,其中单季稻占30.5%,双季稻占69.5%。鄱阳湖西南部即赣江下游区及湖汉周边区域产量较高,其中南昌县部分地区产量最高;双季稻产量较高地区主要分布在鄱阳湖南部的入湖河口平原。

(4) 以农户为单元的水稻种植管理模式与经济效益密切相关。鄱阳湖区水稻复种指数高低受到城市发展与水产养殖等因素的制约。

5 讨论

2004年后,一系列支农惠农政策的出台对提高农民种粮积极性有一定促进作用。然而由于种粮收益偏低及农户追求比较效益最大化,致使鄱阳湖区2005年水稻的复种指数仍然偏低。2009年开始实施的《全国新增1000亿斤粮食生产能力规划》(2009—2020年)也指出包括江西在内的长江流域粮食种植密度偏低、双季稻改单季稻趋势明显^[27]。通过扩大双季稻面积增加复种指数是粮食增产的途径之一。因而,揭示水稻复种及其供给功能的空间格局对于确定未来粮食增产的潜在区域具有重要意义。

已有研究表明,在长江以南地区应用植被指数时间序列数据提取复种信息受到中低空间分辨率的限制^[21,23]。较高空间分辨率卫星影像将是提取该区域复种信息的有效数据源^[31],但是较高空间分辨率影像往往无法保证时间序列数据的获取^[32],同时南方地区由于多阴雨天气而导致有效的TM影像获取受限。鉴于此,根据水稻生长期特征,利用合理时间

窗口的较高空间分辨率影像,是揭示不同熟制水稻空间分布的有效方法。一方面,对影像数据量要求明显降低,任何属于合理时间窗口内的有效影像(一期)即可满足需求,分析过程得到简化,可信度也得到了提高。另一方面,运用 TM 遥感影像使得空间分辨率显著提高,这对于种植制度复杂、地块小而分散的南方地区尤为适用。

准确界定区域内不同熟制水稻生长期是这一方法顺利实施的关键环节。通过遥感解译提取水田分布消除了其他植被的干扰,保证了分类的精度。在南方其他区域应用该方法需充分考虑到不同纬度带水稻种植生长期的差异。在一些丘陵地区,田块破碎而分散,应该考虑使用更高空间分辨率的数据以控制精度。

本文对利用 TM 影像进行水稻熟制信息提取方法做了初步的探讨,但仍有可进一步改进与完善之处。未来应该在不同熟制水稻相应生长期的植被指数阈值设定方面进行深入检测分析,以更加细化可选择的时间窗口。根据水稻在移栽返青阶段田间灌水而使得地表水指数(Land Surface Water Index, LSWI)短期内高于 NDVI 或增强型植被指数(EVI)这一特征^[15,33],引入 LSWI 进行结果相互验证分析,可以提高研究结果的精度。

参考文献(References):

- [1] 封志明,张蓬涛,宋玉. 粮食安全:西北地区退耕对粮食生产的可能影响[J]. 自然资源学报, 2002, 17(3): 299-306. [FENG Zhi-ming, ZHANG Peng-tao, SONG Yu. Food security: The impact of land conversion from farmland to forest or grassland on grain production in Northwest China. *Journal of Natural Resources*, 2002, 17(3): 299-306.]
- [2] 李晶,任志远,周自翔. 区域粮食安全性分析与预测——以陕西省关中地区为例[J]. 资源科学, 2005, 27(4): 89-94. [LI Jing, REN Zhi-yuan, ZHOU Zi-xiang. Present pressure and future trend prediction of regional food security: A case study in Guanzhong District of Shaanxi Province. *Resources Science*, 2005, 27(4): 89-94.]
- [3] 傅泽强,蔡运龙,杨友孝,等. 中国粮食安全与耕地资源变化的相关分析[J]. 自然资源学报, 2001, 16(4): 313-319. [FU Ze-qiang, CAI Yun-long, YANG You-xiao, et al. Research on the relationship of cultivated land change and food security in China. *Journal of Natural Resources*, 2001, 16(4): 313-319.]
- [4] 谢俊奇,蔡玉梅,郑振源,等. 基于改进的农业生态区法的中国耕地粮食生产潜力评价[J]. 中国土地科学, 2004, 18(4): 31-37. [XIE Jun-qi, CAI Yu-mei, ZHENG Zhen-yuan, et al. AEZ-based assessment for food productivity potential of cultivated land in China. *China Land Science*, 2004, 18(4): 31-37.]
- [5] 封志明,杨泽昭,张晶,等. 从栅格到县域:中国粮食生产的资源潜力区域差异分析[J]. 自然资源学报, 2007, 22(5): 747-755. [FENG Zhi-ming, YANG Yan-zhao, ZHANG Jing, et al. A GIS based study on the grain productivity and potential yield increase at multi-levels in China. *Journal of Natural Resources*, 2007, 22(5): 747-755.]
- [6] 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[J]. 地理学报, 2005, 60(4): 559-566. [YAN Hui-min, LIU Ji-yuan, CAO Ming-kui. Remotely sensed multiple cropping index variations in China during 1981-2000. *Acta Geographica Sinica*, 2005, 60(4): 559-566.]
- [7] 沈学年,刘巽浩. 多熟种植[M]. 北京:农业出版社,1983. [SHEN Xue-nian, LIU Xun-hao. More Ripeness Cultivation. Beijing: Agriculture Press, 1983.]
- [8] 卞新民,冯金侠. 多元多熟种植制度复种指数计算方法探讨[J]. 南京农业大学学报, 1999, 22(1): 14-18. [BIAN Xin-min, FENG Jin-xia. Method of calculating cropping system index of diversified multiple cropping systems. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 1999, 22(1): 14-18.]
- [9] 郭柏林. 我国复种指数变化特征、效益和潜力[J]. 经济地理, 1997, 17(3): 8-13. [GUO Bai-lin. The analysis for the change of multiple cropping index in China. *Economic Geography*, 1997, 17(3): 8-13.]
- [10] 朱会义,李秀彬,辛良杰. 现阶段我国耕地利用集约度变化及其政策启示[J]. 自然资源学报, 2007, 22(6): 907-915. [ZHU Hui-yi, LI Xiu-bin, XIN Liang-jie. Intensity change in cultivated land use in China and its policy implications. *Journal of Natural Resources*, 2007, 22(6): 907-915.]
- [11] 高帆. 我国粮食生产的地区变化:1978—2003 年[J]. 管理世界, 2005(9): 70-78. [GAO Fan. Regional changes of China's grain production between 1978 and 2003. *Management World*, 2005(9): 70-78.]

- [12] 辛良杰, 李秀彬. 近年来我国南方双季稻区复种的变化及其政策启示[J]. 自然资源学报, 2009, 24(1): 58-65. [XIN Liang-jie, LI Xiu-bin. Changes of multiple cropping in double cropping rice area of southern China and its policy implications. *Journal of Natural Resources*, 2009, 24(1): 58-65.]
- [13] 范锦龙. 复种指数遥感监测方法研究[D]. 北京: 中国科学院遥感应用研究所, 2003. [FAN Jin-long. Study on Monitoring Methods for Multiple Cropping Index. Beijing: *Institute of Remote Sensing Applications*, CAS, 2003.]
- [14] Defries R S, Townshend J. NDVI-derived land cover classifications at a global scale[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1994, 15(17): 3567-3586.
- [15] Xiao X, Boles S, Liu J, et al. Mapping paddy rice agriculture in southern China using multi-temporal MODIS images[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2005, 95(4): 480-492.
- [16] Lee R, Yu F, Price K P, et al. Evaluating vegetation phenological patterns in Inner Mongolia using NDVI time-series analysis[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2002, 23(12): 2505-2512.
- [17] Doraiswamy P C, Hatfield J L, Jackson T J, et al. Crop condition and yield simulations using Landsat and MODIS[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2004, 92(4): 548-559.
- [18] Xin J, Yu Z, van Leeuwen L, et al. Mapping crop key phenological stages in the North China Plain using NOAA time series images[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2002, 4(2): 109-117.
- [19] 彭代亮, 黄敬峰, 金辉民. 基于 MODIS-NDVI 的浙江省耕地复种指数监测[J]. 中国农业科学, 2006, 39(7): 1352-1357. [PENG Dai-liang, HUANG Jing-feng, JIN Hui-min. The monitoring for sequential cropping index of arable land in Zhejiang Province using MODIS-NDVI. *Scientia Agricultura Sinica*, 2006, 39(7): 1352-1357.]
- [20] Peng D, Huete A R, Huang J, et al. Detection and estimation of mixed paddy rice cropping patterns with MODIS data [J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2011, 13(1): 13-23.
- [21] 左丽君, 董婷婷, 汪潇, 等. 基于 MODIS/EVI 的中国北方耕地复种指数提取[J]. 农业工程学报, 2009, 25(8): 141-146. [ZUO Li-jun, DONG Ting-ting, WANG Xiao, et al. Multiple cropping index of northern China based on MODIS/EVI. *Transactions of the CSAE*, 2009, 25(8): 141-146.]
- [22] 闫慧敏, 曹明奎, 刘纪远, 等. 基于多时相遥感信息的中国农业种植制度空间格局研究[J]. 农业工程学报, 2005, 21(4): 85-90. [YAN Hui-min, CAO Ming-kui, LIU Ji-yuan, et al. Characterizing spatial patterns of multiple cropping system in China from multi-temporal remote sensing images. *Transactions of the CSAE*, 2005, 21(4): 85-90.]
- [23] 朱孝林, 李强, 沈妙根, 等. 基于多时相 NDVI 数据的复种指数提取方法研究[J]. 自然资源学报, 2008, 23(3): 534-544. [ZHU Xiao-lin, LI Qiang, SHEN Miao-gen, et al. A methodology for multiple cropping index extraction based on NDVI time-series. *Journal of Natural Resources*, 2008, 23(3): 534-544.]
- [24] 闫慧敏, 黄河清, 肖向明, 等. 鄱阳湖农业区多熟种植时空格局特征遥感分析[J]. 生态学报, 2008, 28(9): 4517-4523. [YAN Hui-min, HUANG He-qing, XIAO Xiang-ming, et al. Spatio-temporal distribution of multiple cropping systems in the Poyang Lake region. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(9): 4517-4523.]
- [25] 姜鲁光, 封志明, 于秀波, 等. 退田还湖后鄱阳湖区洪水调蓄功能的多情景模拟[J]. 资源科学, 2010, 32(5): 817-823. [JIANG Lu-guang, FENG Zhi-ming, YU Xiu-bo, et al. Scenario analysis on the flood regulation service of the Poyang Lake Region. *Resources Science*, 2010, 32(5): 817-823.]
- [26] 张本, 陆光中, 朱宏富. 鄱阳湖研究[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1988: 573. [ZHANG Ben, LU Guang-zhong, ZHU Hong-fu. Studies on Poyang Lake. Shanghai: Shanghai Scientific and Technical Publishers, 1988: 573.]
- [27] 中国政府网. 全国新增1000亿斤粮食生产能力规划(2009—2020)[EB/OL]. http://www.gov.cn/gzdt/2009-11/03/content_1455493.htm, 2009-11-03. [Government of China. National Plan for Expansion of Grain Production Capacity by 50 Billion Kilograms During 2009-2020. http://www.gov.cn/gzdt/2009-11/03/content_1455493.htm, 2009-11-03.]
- [28] Myneni R B, Hall F G, Sellers P J, et al. The interpretation of spectral vegetation indexes[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1995, 33(2): 481-486.
- [29] 郑小波, 陈娟, 康为民, 等. 利用 MODIS 监测高原水稻生育期和长势的方法[J]. 中国农业气象, 2007, 25(4): 453-456. [ZHENG Xiao-bo, CHEN Juan, KANG Wei-min, et al. Methods of monitoring rice growing periods and growth status by using MODIS in Yungui Plateau. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2007, 25(4): 453-456.]
- [30] 薛利红, 覃夏, 李刚华, 等. 江西鹰潭早稻关键生育期的 NDVI 诊断指标[J]. 农业工程学报, 2009, 25(2): 223-

227. [XUE Li-hong, QIN Xia, LI Gang-hua, *et al.* Diagnostic indexes of NDVI at key growth stages for early rice at Yingtan, Jiangxi Province. *Transactions of the CSAE*, 2009, 25(2): 223-227.]
- [31] 唐鹏钦,姚艳敏,吴文斌,等. 基于遥感技术的耕地复种指数研究进展[J]. 中国农业资源与区划, 2010, 31(2): 21-27. [TANG Peng-qin, YAO Yan-min, WU Wen-bin, *et al.* Progress in multiple crop index based on remote-sensing technologies. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2010, 31(2): 21-27.]
- [32] 李正国,杨鹏,周清波,等. 基于时序植被指数的华北地区作物物候期/种植制度的时空格局特征[J]. 生态学报, 2009, 29(11): 6216-6226. [LI Zheng-guo, YANG Peng, ZHOU Qing-bo, *et al.* Research on spatiotemporal pattern of crop phenological characteristics and cropping system in North China based on NDVI time series data. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(11): 6216-6226.]
- [33] Xiao X, Boles S, Froking S, *et al.* Mapping paddy rice agriculture in South and Southeast Asia using multi-temporal MODIS images[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2006, 100(1): 95-113.

Spatial Pattern of Food Provision Service in Poyang Lake Region, China

LI Peng^{1,2}, JIANG Lu-guang¹, FENG Zhi-ming¹, ZHANG Jing-hua^{1,2},
YAN Hui-min¹, ZHAO Hui-xia³

(1. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China;

2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. National Meteorological Center, Beijing 100081, China)

Abstract: Generally, in southern China with complex growing system, fragmented and dispersed paddy field, and long-term overcast and rainy weather, the performance of using vegetation index (VI) time-series datasets derived from remote sensing imageries to extract multiple-cropping index was seriously constrained by the lower spatial resolution. Currently, the application of higher spatial resolution images can be the exclusive and effective way to extract the spatial pattern of different rice cropping systems annually in these regions. In this paper, firstly, the spatial distribution of paddy field in Poyang Lake Region (PLR) was obtained through one TM imagery interpretation. Secondly, the annual phenological calendar of various systems of paddy rice was defined with the agro-meteorological data. According to the significant characteristics that Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) fluctuates sharply along with the growth process of paddy rice, map of NDVI for paddy field was derived from another TM image within the applicable time window. Then, different cropping systems of paddy rice were classified by means of Unsupervised Classification in Erdas Imagine 9.2. Finally, yield of each raster (100 m) was calculated with unit yield from local statistical department. The results showed that, late April to late June can be the time window to differentiate early rice and single-season rice, while early July till early August and middle September to early October could be the time window for the differentiation between single-season rice and late rice. Specifically, the planting areas of single-season and early/late rice are 3081.58 km² and 3602.97 km² in 2005, respectively, indicating that the multiple-cropping index is 153.9%. Single-season rice is generally distributed around the periphery of the built-up area, while double-season rice expanded along the delta. The total yield of paddy rice reached to nearly 16.5 million tons with a proportion of single-season to double-season approximating to 3 : 7. The two seasons rice both had a higher yield in the lower reaches and delta area of the Ganjiang River.

Key words: food provision service; rice cropping system; time window; NDVI; Poyang Lake region