

曹 丹,白林燕,冯建中,等. 东北三省水稻种植面积时空变化监测与分析[J]. 江苏农业科学,2018,46(10):260–265,271.
doi:10.15889/j.issn.1002–1302.2018.10.064

东北三省水稻种植面积时空变化监测与分析

曹 丹^{1,2}, 白林燕², 冯建中³, 景海涛¹, 李华林², 张 倩², 张 沛², 孙金珂¹

(1. 河南理工大学, 河南焦作 454003; 2. 中国科学院遥感与数字地球研究所, 北京 100094; 3. 中国农业科学院农业信息研究所, 北京 100081)

摘要:基于 2000—2015 年的中分辨率成像光谱仪 (MODIS) 数据, 利用分区适应性水稻判别条件提取东北三省的水稻种植面积分布, 并利用重心迁移法和变化斜率法分析近 15 年水稻种植面积的年际变化、波动趋势及空间变化特征。结果表明: 对研究区水稻种植面积提取的平均精度可达 90% 以上, 在省级尺度上满足对水稻种植面积监测的需求。近 15 年间东北三省水稻种植面积大幅度增加, 其中黑龙江省增加较快, 而吉林省、辽宁省水稻种植面积只有小幅度变化; 水稻种植面积出现北移为主、逐渐东移的现象; 未来短时间内黑龙江省水稻种植面积变化率保持增加趋势, 而吉林省基本处于平稳状态, 辽宁省水稻面积则有平稳减少趋势, 但减少不明显。

关键词:中分辨率成像光谱仪 (MODIS); 水稻面积; 重心迁移; 变化斜率法; 时空变化; 东北三省; 农业政策

中图分类号: S127 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002–1302(2018)10–0260–06

水稻是我国主要的粮食作物, 在农业生产及保障国家粮食安全方面始终占据着重要地位^[1]。东北三省是我国水稻重要的产区, 近 20 年来, 东北三省水稻种植生产发生了明显的变化, 尤其是黑龙江地区^[2]。因此, 准确把握东北三省水稻种植面积时空变化特征对东北三省乃至全国农业政策制定、粮食安全分析、农产品市场调控等具有重要意义^[3]。

随着卫星技术的发展, 利用遥感技术监测水稻的种植面积、生长状况及产量等已得到较为广泛的应用。Sakamoto 等利用中分辨率成像光谱仪 (MODIS) 数据和水稻种植区各种特征指数固定的数学关系分别对东南亚地区、湄公河流域及中国南部地区进行水稻面积监测^[4–5]。景元书等利用 MODIS 时序指数, 采用线性光谱混合方法分解混合像元, 监测水稻种植面积^[6]。龙毅等分析了近 20 年湖北省水稻产量变化情况及其原因^[7]。唐鹏钦等模拟了东北地区多年水稻种植的空间分布^[8]。刘珍环等利用交叉信息熵原理获得水稻空间分布信息, 并对近 30 年中国水稻种植区域与产量的时空变化进行分析^[9]。中低分辨率 MODIS 数据具有较高的光谱分辨率和时间分辨率, 在大面积的农作物遥感监测中具有重要作用。目前广泛应用的阈值法在水稻面积提取中, 通常将水稻判别条件设定为一个固定值, 忽略了气温、降水、地形等方面的差异, 使水稻监测面积具有较大偏差。统计单元内部的水稻面积空间格局变化具有突出的不确定性特征, 与统计单元数据分析不具有很好的一致性。本研究以东北三省为研究区, 利用 MODIS 数据计算水体指数 LSWI、归一化植被指数 NDVI

和增强型植被指数 EVI, 建立各时序指数之间对应的数学关系, 结合水稻特有的生育期和各统计单元的具体情况, 设定不同省份的水稻判别条件, 提取东北三省 2000—2015 年水稻种植分布情况, 分析水稻种植分布的迁移规律, 并利用最小二乘回归模型预测水稻种植面积变化趋势, 旨在为制定区域农业政策提供依据。

1 研究区概况及数据源

1.1 研究区概况

东北三省包括黑龙江、吉林、辽宁三省, 面积 78.73 万 km², 占全国国土总面积 8.2%, 人口 1.07 亿人, 占全国人口 8.4%^[10]。东北三省从北到南依次为寒温带、中温带湿润半湿润气候、温带大陆性季风气候, 冬季寒冷漫长, 夏季温暖短促, 冬季降雪, 蒸发小, 气候湿润, 是典型的冷湿自然环境^[11]。地形以山地、平原、河流为主, 土壤肥沃, 土层深厚, 水资源丰厚, 是世界上三大黑土带之一。主要农作区 ≥10℃ 积温为 2 200~3 600℃, 多年平均降水量为 400~1 000 mm, 平均气温 5.4℃, 热量条件可满足农作物生长, 本区农作物熟制以 1 年 1 熟为主, 主要种植水稻、玉米、小麦、大豆。独特的地理条件为作物生长提供了重要的自然地理条件, 是我国重要的农产品生产基地。图 1 是研究区域地理位置。

1.2 数据源

采用 2000—2015 年经过辐射值校正空间分辨率为 250 m 的 MOD13Q1 和 500 m 的 MOD09A1 数据作为基础数, 这些数据来源于美国国家航空航天局 (https://lpdaac.usgs.gov/data_access/)。共获取了 2000、2005、2010—2015 年共 8 个年份的各期数据, 并对数据进行投影变化、格式转换、裁剪和镶嵌等预处理, 以研究近 15 年研究区水稻种植面积变化。

土地利用数据采用 2000、2005、2010、2015 年 4 期全国土地利用数据 [来自于中国科学院资源环境科学数据中心 (<http://www.resdc.cn>), 比例尺为 1:10 万], 该数据是目前我国精度较高的土地利用遥感监测数据产品, 已经在国家土地资源调查、水文、生态研究等方面发挥着重要作用。此产品

收稿日期: 2017–08–29

基金项目: 国家重点研发计划 (编号: 2016YFD0300100); 国家自然科学基金 (编号: 41171340、41401116); 中国农业科学院农业信息研究所创新工程 (编号: CAAS–ASTIP–2016–AII)。

作者简介: 曹 丹 (1992—), 女, 河南三门峡人, 硕士研究生, 研究方向为“3S”集成与应用。E-mail: 476034059@qq.com。

通信作者: 冯建中, 博士, 副研究员, 研究方向为“3S”集成理论与应用、气候变化及对区域农业的影响等。E-mail: fengjianzhong@caas.cn。

将土地利用/覆盖类型划分为六大类,分别为耕地、林地、草地、水体、居民地、未利用土地。本研究利用土地二级分类法将水田、旱地、沼泽地和滩地划分出来,并将数据重采样为空间分辨率 250 m × 250 m。统计数据来源于全国及省级统计年鉴数据库,东北地区水稻物候信息来源于农业部种植业管理司。

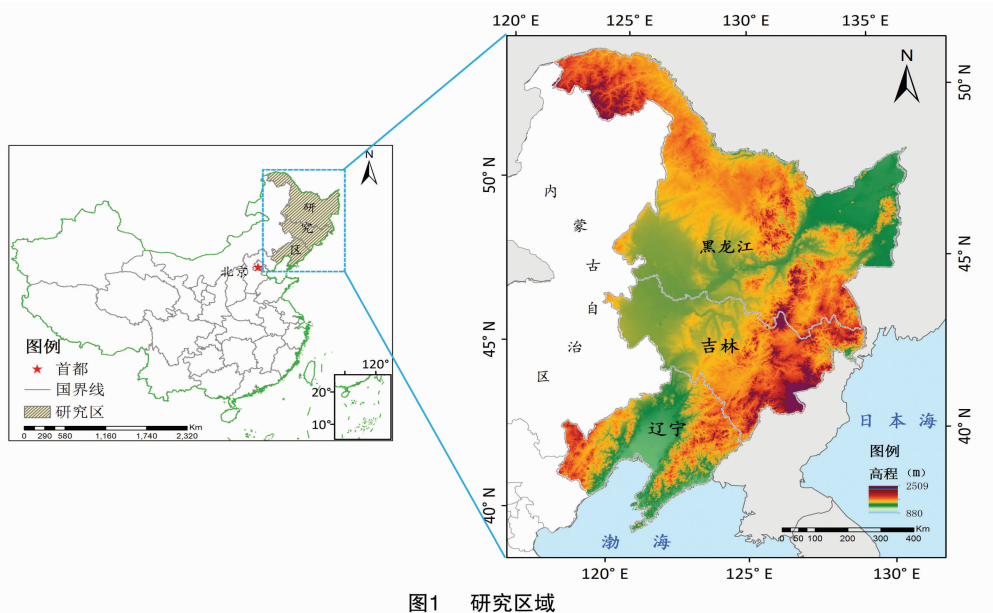


图1 研究区域

2 研究方法

2.1 水稻判别条件提取

水稻在一个生长周期内将经历 5 个主要的生长阶段:秧苗生长期、分蘖期、幼穗发育期、抽穗扬花期、灌浆成熟期^[12]。在水稻生长早期,稻田须要保持一定深度的水层,与同期其他农田(玉米、大豆、花生、棉花等)相比具有较高的地表含水量,有利于 MOD09A1 中的短波红外数据对稻田进行识别^[13-16]。另外,16 d 合成的 MOD13Q1 数据具有较高空间分辨率,可通过比较其他农作物与水稻的生长特征曲线来提高稻田的识别能力。本研究选用 MODIS 数据中能够反映水稻生长特性的归一化植被指数 (NDVI)、水稻增强植被指数 (EVI)、水体指数 (LSWI) 对水稻像元进行识别提取。

首先构建 NDVI 时序曲线,比较各地类与水稻在生长季时期内的差异。在东北三省基于土地利用数据和 Google Earth 高分辨率影像等通过目视解译分别选取水田、旱地、林地、建筑用地和水域样点各 150 个,并逐一核实验证。利用交互式数据语言 (IDL) 程序对各地类样点的归一化植被指数 (NDVI) 序列进行插值和 S-G 滤波处理,重构 NDVI 时间序列曲线 (图 2),判断水稻和其他地类的物候期特征。从时序 NDVI 曲线可以看出,水田与建筑用地、林地、水域可以通过 NDVI 容易区分,全年平均 $NDVI > 0.6$ 是林地,全年平均 $NDVI < 0$ 是水体, $NDVI < 0.2$ 是建设用地,但是水田与旱地作物生长物候特征 NDVI 却无明显差异。

考虑到水稻特殊的生长特性,利用移栽期内的 EVI 和 LSWI 指数可以区分水稻和旱地。根据研究区域物候历特征,水稻移栽期大致在 5 月中旬和下旬,选择儒略日 137、145 d MOD09A1 数据,分别计算水田和旱地水体指数,计算公式为:

$$LSWI = \frac{b_2 - b_6}{b_2 + b_6} \quad (1)$$

式中: b_2 为近红外波段; b_6 为短波红外。EVI 数据通过 MOD13Q1 数据直接获得, Xiao 等在提取水稻面积时发现:移栽期水稻像元符合 $(LSWI + 0.05) \geq EVI$ ^[15]。因此绘制水田、旱地样点 EVI、LSWI 及 $(LSWI + 0.05 - EVI)$ 散点图 (图 2-f), 统计分析表明,在 95% 置信区间内,移栽期在东北三省范围满足如下条件 (式 2) 的像元暂定为水稻像元。但此结果内可能包含永久水体、湿地等其他地类,因而须要进一步筛选排除。利用 ArcGIS 10.0 软件将土地利用数据中的沼泽地、滩地以及水域土地利用/覆盖类型剔除,并结合本区各省的具体情况,选择适合各省的判别条件,将此作为最终提取结果。

$$\begin{cases} 0.2 < NDVI < 0.6 \\ 0.05 < EVI < 0.13 \\ 0.03 < LSWI < 0.43 \end{cases} \text{ 或 } \begin{cases} 0.2 < NDVI < 0.6 \\ 0.05 < EVI < 0.17 \\ 0 < LSWI < 0.43 \\ -0.05 < LSWI + 0.05 - EVI < 0.39 \end{cases} \quad (2)$$

2.2 重心迁移法

重心物理学上是指空间各方向上力矩达到平衡的点,即物体所受重力的合力作用点^[17]。水稻生产重心是指某个时期水稻生产要素指标 (可用面积或产量来度量,本研究选用面积指标) 分布在某个区域上的力矩达到平衡的地理位置^[18-19]。在每个时期,当水稻种植面积发生变化时,都会引起水稻种植重心发生偏移,当水稻重心朝着某个方向移动时,表明在此方向上水稻种植面积增加较快,对水稻生产系统贡献相对较大。水稻种植面积重心计算公式^[20]如下:

$$X = \frac{\sum_{i=1}^n A_{it} X_i}{\sum_{i=1}^n A_{it}}; \quad (3)$$

$$Y = \frac{\sum_{i=1}^n A_{it} Y_i}{\sum_{i=1}^n A_{it}} \quad (4)$$

式中: X 、 Y 表示第 t 年水稻种植重心的位置; X_i 、 Y_i 表示每个稻田像元的经度、纬度坐标; A_{it} 表示第 i 个像元第 t 年的水稻种植面积; n 为像元数。

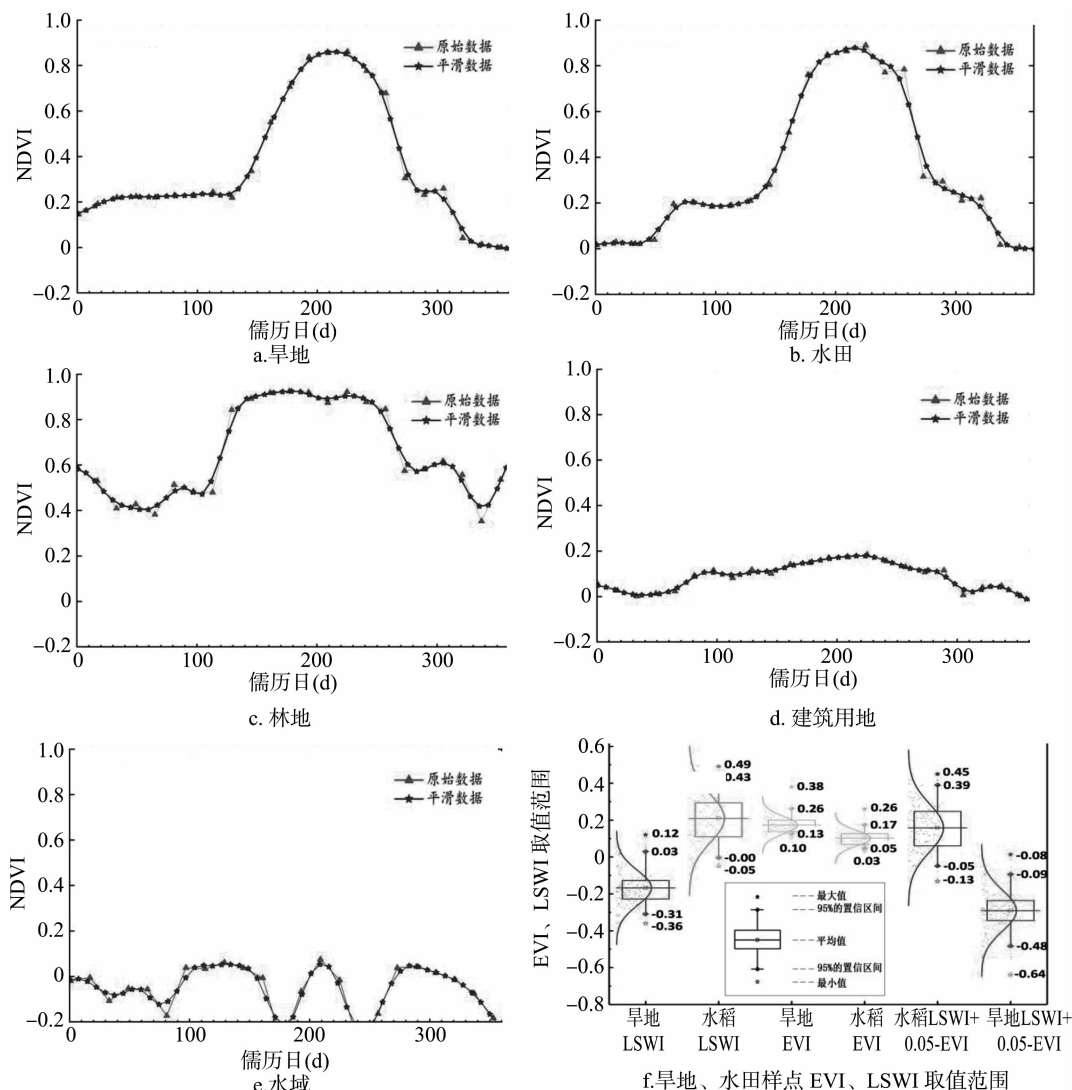


图2 时序 NDVI 曲线及水稻判别条件提取

2.3 变化斜率法

在提取水稻面积的基础上,研究水稻种植面积的时间序列变化趋势,本研究采用变化斜率法^[21-23]对 2000—2015 年水稻种植面积的年际变化进行模拟,计算公式如下

$$k = \frac{n \times \sum_{i=1}^n i \times A_i - (\sum_{i=1}^n i) (\sum_{i=1}^n A_i)}{n \times \sum_{i=1}^n i^2 - (\sum_{i=1}^n i)^2} \quad (5)$$

式中: k 为变化斜率; n 为时间,年; A_i 为第 i 年 $5 \text{ km} \times 5 \text{ km}$ 栅格数据中每个栅格内水稻面积占比。斜率为正,表明水稻种植面积呈增加趋势;斜率为负,表明水稻种植面积呈降低趋势。

3 结果与分析

3.1 东北三省水稻种植面积分布与精度分析

为研究水稻种植面积在空间位置上的具体变化,利用本研究提取的水稻判别条件,在 GIS 软件支持下,统计各省范围内水稻面积所占像元数,计算各省水稻种植面积。由于本次水稻种植面积提取选用的数据空间分辨率为 250 m ,提取结果中存在大量的混合像元。大范围内像元提取水稻面积而产

生误差具有显著的随机性,因而区域总量统计结果是精度检验—比对评定的重要途径。2000—2015 年统计年鉴数据与 MODIS 时序指数提取水稻面积对比精度验证,结果显示,从三省整体来看,2000—2015 年利用 MODIS 时序指数提取东北三省水稻面积相对精度平均可达 92.92% 以上;从各省来看,黑龙江省、吉林省、辽宁省水稻面积提取相对精度平均可达 91.59% 以上(表 1)。因此,以 2015 年作为基年选取各水稻指数判别条件,15 年间虽然受气温、降水等条件的影响,对水稻面积提取精度亦会产生影响,但各省相对误差仍保持较高的精度水平,因此该途径对于大范围的水稻面积提取可满足要求。图 3 是 2000—2015 年东北三省水稻种植面积空间分布及变化情况,其与土地利用数据水田分布基本一致。可见,东北地区水稻种植集中分布在西北部、中部和南部的平原地区,主要种植区为三江平原、松嫩平原、辽河平原,基本沿松花江、辽河分布。黑龙江省水稻种植主要分布在东北部的鹤岗市、佳木斯市、双鸭山市、鸡西市;吉林省水稻种植集中分布在松嫩平原的东南部;辽宁省水稻种植主要沿辽河和鸭绿江分布,集中在辽河平原的盘锦市、辽阳市、丹东市东南部区域。这些种植区水资源充足,地势较为平坦,适合机械化作业,水

表 1 东北三省水稻面积提取相对精度验证

年份	指标	黑龙江省	吉林省	辽宁省
2000	A(万 hm ²)	172.49	55.94	56.97
	B(万 hm ²)	160.60	48.39	68.59
	C(%)	6.89	13.50	-20.40
2005	A(万 hm ²)	183.85	69.23	61.04
	B(万 hm ²)	185.00	65.40	58.17
	C(%)	-0.63	5.53	4.70
2010	A(万 hm ²)	270.13	74.01	63.83
	B(万 hm ²)	297.50	67.35	67.75
	C(%)	-10.13	9.00	-6.14
2011	A(万 hm ²)	399.57	65.43	68.25
	B(万 hm ²)	344.80	69.12	65.96
	C(%)	14.00	-6.00	3.00
2012	A(万 hm ²)	363.03	66.07	63.94
	B(万 hm ²)	382.00	70.12	66.18
	C(%)	-5.23	-6.13	-3.50
2013	A(万 hm ²)	338.70	63.76	66.67
	B(万 hm ²)	403.10	72.67	64.92
	C(%)	-19.01	-13.97	2.62
2014	A(万 hm ²)	333.07	71.70	65.84
	B(万 hm ²)	399.70	74.71	56.21
	C(%)	-20.00	-4.20	14.63
2015	A(万 hm ²)	308.38	67.29	51.2
	B(万 hm ²)	314.70	70.16	54.49
	C(%)	-2.05	-4.27	-6.43

注:A代表提取面积;B代表年鉴统计值;C代表相对误差值, $C = \frac{A-B}{B} \times 100\%$ 。

$$\frac{A-B}{B} \times 100\%$$

稻分布较为集中,形成了“连片式”的种植模式。2000—2010 年黑龙江省三江平原和松嫩平原西北部水稻种植面积呈显著增加趋势,2010 年该地区较 2000 年发生显著变化,而吉林省和辽宁省水稻种植区域分布情况基本保持不变;2010—2015 年黑龙江地区水稻种植面积继续增加,但增加趋势较 2000—2010 年变缓,而辽宁省和吉林省水稻种植面积与 2010 年以前相比,维持在基本平衡状态。

2000 年以来的 15 年间,东北地区水稻种植面积和空间分布上发生了明显变化,水稻种植区向东、向北扩展。其中,黑龙江地区变化最为显著,黑龙江省水稻种植面积显著增加是东北地区水稻种植空间变化的主要原因。过去 15 年间,黑龙江省水稻种植面积增加 135.89 万 hm²,增加近 44.1%;2005 年以后水稻种植面积增加较快,后期每年虽有增加,但趋于平缓。吉林省和辽宁省水稻种植面积变化较为平稳,吉林省水稻种植面积增加缓慢,空间分布上几乎没有变化;辽宁省水稻种植面积则有小幅度下降,但就其空间分布而言,除了位于鸭绿江沿岸、辽河平原上的盘锦市,还包括营口市西北部等地区。

3.2 水稻空间格局演变特征分析

由图 4 可知,2000—2015 年东北三省水稻种植重心变化较为明显,2000—2013 年位于吉林省内,2014 年开始水稻种植重心迁移至黑龙江省哈尔滨市,整体而言具有明显向北、向东偏移的趋势,偏移距离为 7.08 km。这一结果与刘珍环等研究结论^[9]相吻合。2000 年东北三省水稻种植重心偏南,这主要是因为 2000 年黑龙江省水稻种植区水稻面积较少,而中

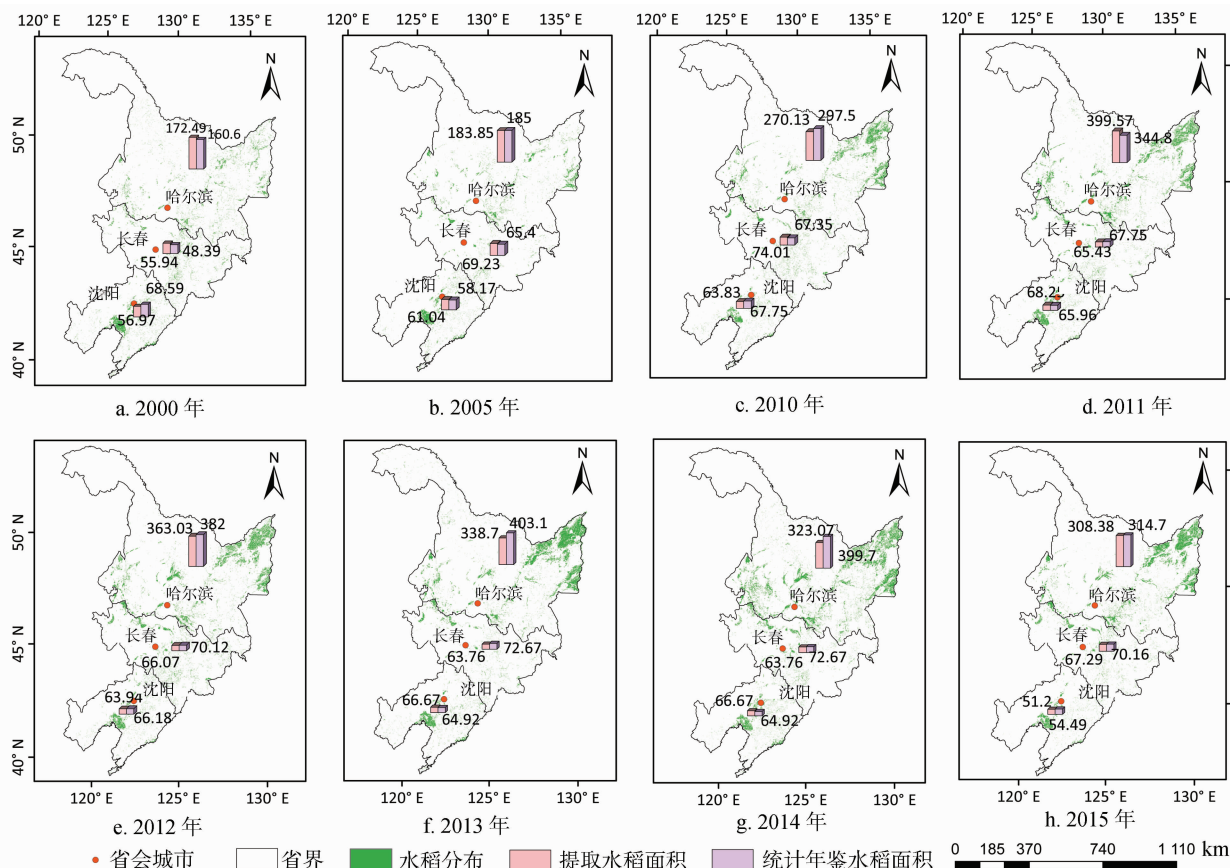


图3 近 15 年东北三省水稻种植面积

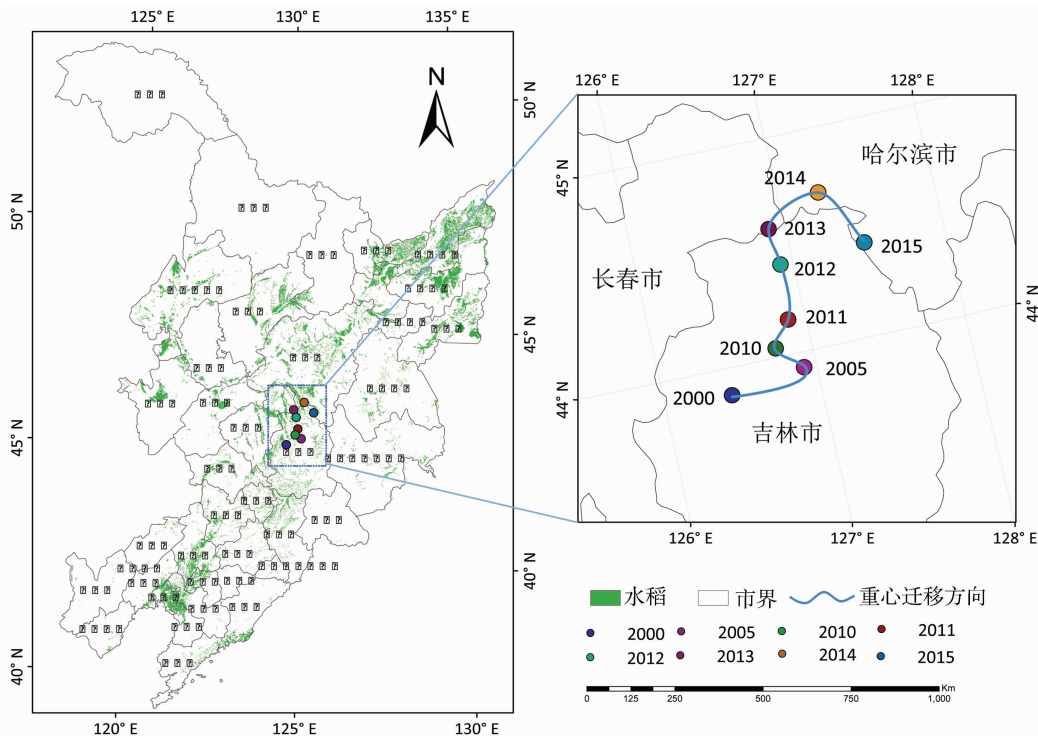


图4 近 15 年东北地区水稻种植重心变化

部的吉林省和南部的辽宁省水稻种植面积相对较大,致使水稻重心纬度稍微偏低;2000 年以后,水稻种植重心明显北移,这是因为东北三省的中北部地区,尤其是黑龙江省的三江平原水稻种植面积明显增加。可见,黑龙江省成为水稻种植核心区,三江平原和松嫩平原地势平坦,作物种植所需光、温、水等条件及地理位置优越,近年来水稻种植大面积增加;吉林省和辽宁省水稻种植区域基本保持稳定,使得东北三省水稻种植重心向东北方向迁移,水稻种植空间格局演变趋势在未来一段时间内将会持续。东北三省水稻种植重心向东北方向移动,这可能是由于受自然和人为因素共同作用的结果^[24]。一方面受全球气温变暖影响,积温相对增加,使得自然条件更加适合水稻生长;另一方面由于水稻种植技术的进步,高产新品种的培育、国家补贴等惠民政策的实施,平原地区大规模农业种植有利于机械化操作等,使得水稻突破在低纬度地区种植的局限,向高纬度地区种植发展。

3.3 水稻面积空间变化相关分析

图 5 为 2000—2015 年 5 km × 5 km 栅格内水稻面积占比及采用变化斜率法计算的水稻面积变化趋势。从回归拟合的变化整体趋势(图 5-b)可见,黑龙江省东北部三江平原、乌苏里江流域及中部的松嫩平原和松花江流域、西南部的嫩江流域以及吉林省的西北部、辽宁省辽河平原以及鸭绿江地区,水稻面积变化斜率大于 0,说明该区域水稻面积的变化呈上升趋势且增加较快,未来短时间内仍可能继续增加并保持该趋势。就局部变化来看,黑龙江省佳木斯市中部、松嫩平原部分地区以及齐齐哈尔市东南部地区水稻面积有减小趋势,但减少趋势小于增加趋势。吉林省中部、辽宁省东北部水稻面积变化斜率小于 0,表明近 15 年来水稻种植面积在该区域呈减少趋势,未来短时间内仍有可能继续减少。黑龙江省水稻面积变化率总和为 88.5,吉林省变化率总和为 1.0,辽宁省变

化率为 -1.3。说明黑龙江省水稻种植面积整体呈增加趋势,这与东北三省历年来水稻种植重心向北、向东移的趋势吻合;吉林省虽然大部分区域水稻种植面积都处于减少趋势,但总体较为稳定,水稻种植面积变动较小;辽宁省水稻种植面积仅辽河平原有所增加趋势,但增幅较小,变化率总和为负值。

4 结论与讨论

本研究以较高空间分辨率的 MODIS 时间序列数据为基础,构建各地类样本点的 NDVI 时间序列曲线,利用水稻生长特性,基于分区适应性合理设置 LSWI 和 EVI 阈值,判断水稻与其他地类的区别,从而提取 2000—2015 年东北三省水稻种植分布。经统计年鉴数据验证其精度较高,平均可达 90% 以上,可以满足东北地区大范围对水稻种植面积监测的要求。利用重心迁移法和变化斜率法分析近 15 年本区水稻种植面积的年际变化、波动趋势及空间变化特征。研究表明,近 15 年三江平原、松嫩平原、辽河平原以及沿松花江等河流两岸有大面积水稻种植。但水稻种植分布整体上有较大变化,水稻种植重心向东北方向偏移,且向北偏移趋势愈来愈明显;种植面积也大幅度增加,其中黑龙江省水稻种植面积增幅较大,三江平原水稻种植面积逐年增加。在未来一段时间内,黑龙江省水稻种植面积将继续保持增加趋势,而吉林省保持稳定状态,辽宁省有小幅减少态势。鉴于在提取水稻面积时,由于水田和旱地间过渡及田埂的不规则,且东北三省很多地区农业种植为 1 年旱地作物种植、2 年水稻间作种植方式,以及受遥感影像数据空间分辨率的限制,影像产生大量混合像元,影响了水稻面积的提取精度。由于东北各省在气温、降水、地形等各方面存在差异,水稻物候期也各有不同,因此水稻的生长移栽期存在地域差异,水稻面积提取时使用固定的移栽期,虽然提取结果产生的误差在可接受的范围内,但是仍然给提取

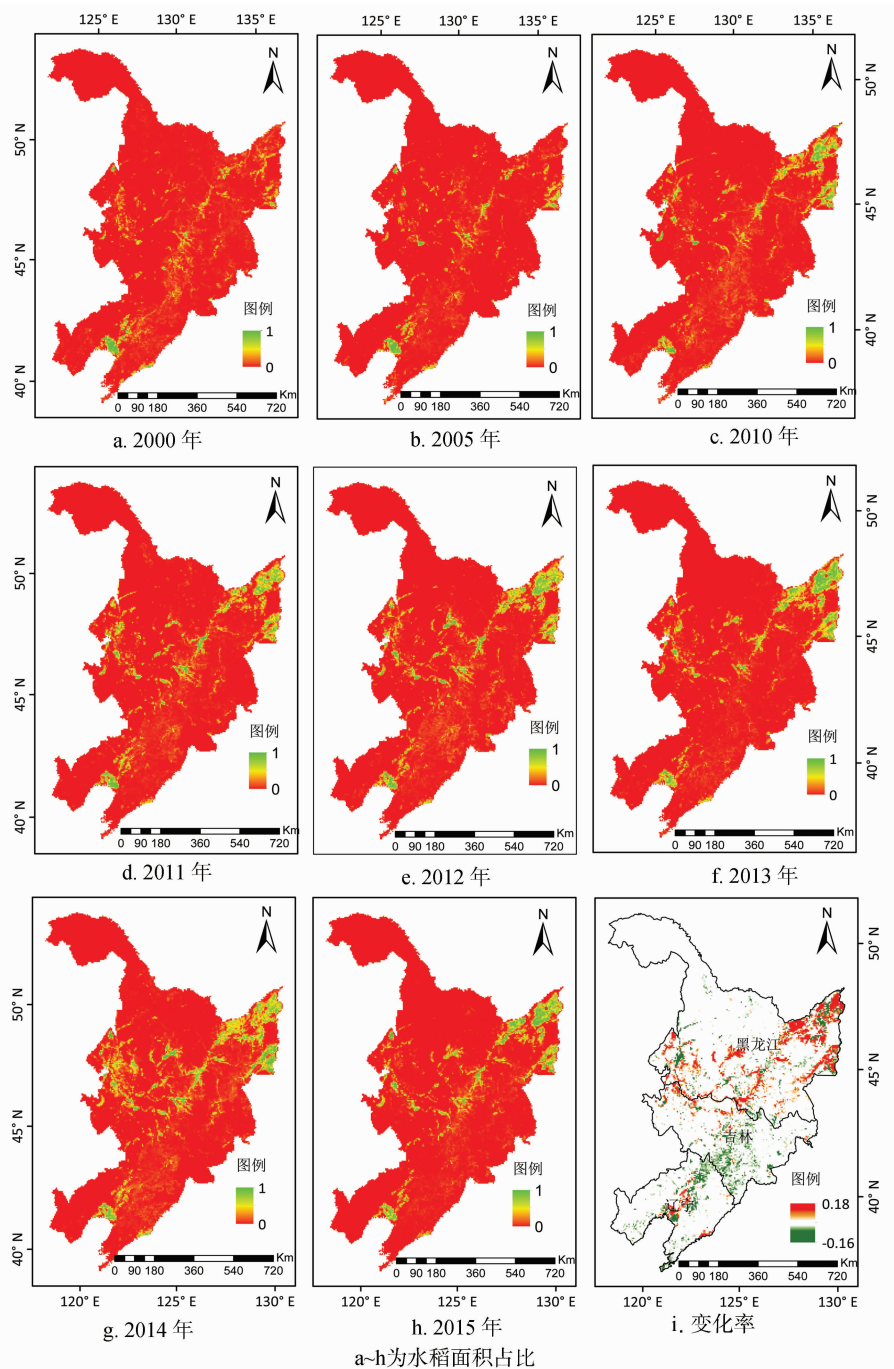


图5 近 15 年水稻面积占比与变化率

结果带来系统误差;同时,土地利用数据和水稻面积提取的 MODIS 基础数据在空间分辨率上不匹配,经重采样过程而来提取误差是显然的。此外,在水稻种植面积提取中,本研究主要基于统计数据进行验证,而没有进行实地考察或利用高分辨率遥感影像进行大量系统验证。这些缺陷都须要在后续研究中逐一解决或改善。

参考文献:

- [1] 杜欣宜. 东北三省水稻生产概况变动比较分析[J]. 农民致富之友, 2016(7): 76-77.
- [2] 程勇翔, 王秀珍, 郭建平, 等. 中国水稻生产的时空动态分析[J].

中国农业科学, 2012, 45(17): 3473-3485.

- [3] 杨 鹏, 唐华俊, 刘 佳. 作物遥感估产中自动分类方法研究进展与展望[J]. 中国农业资源与区划, 2000, 21(2): 57-60.
- [4] Sakamoto T, Nguyen N, Vohn H. 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, 2006, 100(1): 1-16.
- [5] Xiao X M, Boles S, Frohling 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.
- [6] 景元书, 李 根, 黄文江. 基于相似性分析及线性光谱混合模型

(下转第 271 页)

- [4] 温庆可, 张增祥, 刘 斌, 等. 草地覆盖度测算方法研究进展[J]. 草业科学, 2009, 26(12): 30–36.
- [5] 阿 多, 赵文吉, 宫兆宁, 等. 1981—2013 华北平原气候时空变化及其对植被覆盖度的影响[J]. 生态学报, 2017, 37(2): 576–592.
- [6] 李晓兵, 史培军. 中国典型植被类型 NDVI 动态变化与气温、降水变化的敏感性分析[J]. 植物生态学报, 2000, 24(3): 379.
- [7] 井光花, 程积民, 苏纪帅, 等. 黄土区长期封育草地优势物种生态位宽度与生态位重叠对不同干扰的响应特征[J]. 草业学报, 2015, 24(9): 43–52.
- [8] 周 萍, 刘国彬, 薛 蕙. 草地生态系统土壤呼吸及其影响因素研究进展[J]. 草业学报, 2009, 18(2): 184–193.
- [9] 穆少杰, 李建龙, 陈奕兆, 等. 2001—2010 年内蒙古植被覆盖度时空变化特征[J]. 地理学报, 2012, 67(9): 1255–1268.
- [10] 戴尔阜, 黄 宇, 吴 卓, 等. 内蒙古草地生态系统碳源/汇时空格局及其与气候因子的关系[J]. 地理学报, 2016, 71(1): 21–34.
- [11] 隋 悦, 鹿琳琳, 张 熙, 等. 2000—2013 年新疆植被覆盖变化多尺度遥感分析[J]. 气象与环境科学, 2016(3): 1–8.
- [12] 刘少华, 严登华, 史晓亮, 等. 中国植被 NDVI 与气候因子的年际变化及相关性研究[J]. 干旱区地理, 2014, 37(3): 480–489.
- [13] 施雅夫, 沈永平, 李栋梁, 等. 中国西北气候由暖干向暖湿转型的特征和趋势探讨[J]. 第四纪研究, 2003, 23(2): 152–164.
- [14] 王艳姣, 闫 峰. 1960—2010 年中国降水区域分异及年代际变化特征[J]. 地理科学进展, 2014, 33(10): 1354–1363.
- [15] 于淑秋, 林学椿, 徐祥德. 我国西北地区近 50 年降水和温度的变化[J]. 气候与环境研究, 2003, 8(1): 9–18.
- [16] 刘宪锋, 任志远. 西北地区植被覆盖变化及其与气候因子的关系[J]. 中国农业科学, 2012, 45(10): 1954–1963.
- [17] 李生辰, 徐 亮, 郭英香, 等. 近 34 年青藏高原年气温变化[J]. (上接第 265 页)
- 的双季稻面积估算[J]. 农业工程学报, 2013, 29(2): 177–183.
- [7] 龙 毅, 李晶晶, 龚长东, 等. 近 20 年湖北省水稻产量变动及其原因分析[J]. 安徽农业科学, 2012(7): 3953–3955, 3960.
- [8] 唐鹏钦, 杨 鹏, 陈仲新, 等. 利用交叉信息熵模拟东北地区水稻种植面积空间分布[J]. 农业工程学报, 2013, 29(17): 96–104.
- [9] 刘珍环, 李正国, 唐鹏钦, 等. 近 30 年中国水稻种植区域与产量时空变化分析[J]. 地理学报, 2013, 68(5): 680–693.
- [10] 朱文亚. “东北地区的地理位置与自然环境”教学设计[J]. 地理教育, 2015(增刊1): 70–71.
- [11] 申双和, 杨沈斌, 李秉柏, 等. 基于 ENVISAT ASAR 数据的水稻估产方案[J]. 中国科学(地球科学), 2009(6): 763–773.
- [12] 丁 颖. 中国水稻栽培学[M]. 北京: 农业出版社, 1961.
- [13] 杜朝正. 基于 GIS 的中国水稻产量时空格局变化研究[D]. 济南: 山东师范大学, 2010.
- [14] 王秀珍, 王人潮, 黄敬峰. 微分光谱遥感及其在水稻农学参数测定上的应用研究[J]. 农业工程学报, 2002, 18(1): 9–13.
- [15] Xiao X M, Boles S, Liu J Y, 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] 张路科, 杨会霞, 葛京凤, 等. 中国主要城市地价重心迁移及驱动因素研究[J]. 地理与地理信息科学, 2014, 30(6): 70–74.
- [17] 邓 文, 谭杰扬, 刘 英, 等. 湖南双季稻生产重心移动轨迹及发展对策[J]. 湖南农业科学, 2016(11): 87–90.
- [18] 杨万江, 陈文佳. 中国水稻生产空间布局变迁及影响因素分析[J]. 经济地理, 2011, 31(12): 2086–2093.
- [19] 郭柏林. 我国粮食分布重心轨迹特征及动力[J]. 上海农业学报, 1992(1): 68–74.
- [20] 马 骏, 李昌晓, 魏 虹, 等. 三峡库区生态脆弱性评价[J]. 生态学报, 2015, 35(21): 7117–7129.
- [21] 宋 怡, 马明国. 基于 SPOT VEGETATION 数据的中国西北植被覆盖变化分析[J]. 中国沙漠, 2007, 27(1): 89–93, 173.
- [22] 叶宝莹, 祝 艳, 季 玮, 等. 基于遥感和 GIS 的三江平原农业景观空间格局与土地利用变化研究[J]. 国土资源遥感, 2007, 19(3): 78–81.
- [23] 潘文博. 东北地区水稻生产潜力及发展战略研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2009.
- [24] 孙岩松. 我国东北水稻种植快速发展的原因分析和思考[J]. 中国稻米, 2008(5): 9–11.
- 中国沙漠, 2006, 26(1): 27–34.
- [18] 张永民, 王云霞, 席桂萍. 科尔沁沙地及其周围地区降水与气温变化的多时间尺度分析[J]. 内蒙古农业大学学报(自然科学版), 2006, 27(2): 30–33.
- [19] 郭 锐, 朱燕君, 王介民, 等. 近 22 年来西北不同类型植被 NDVI 变化与气候因子的关系[J]. 植物生态学报, 2008, 32(2): 319–327.
- [20] 任朝霞, 杨达源. 近 50 年西北干旱区气候变化趋势研究[J]. 第四纪研究, 2006, 26(2): 299–300.
- [21] 黄小燕, 李耀辉, 冯建英, 等. 中国西北地区降水量及极端干旱气候变化特征[J]. 生态学报, 2015, 35(5): 1359–1370.
- [22] 杨 绚, 李栋梁. 中国干旱气候分区及其降水量变化特征[J]. 干旱气象, 2008, 26(2): 17–24.
- [23] 张仁平, 冯琦胜, 郭 靖, 等. 2000—2012 年中国北方草地 NDVI 和气候因子时空变化[J]. 中国沙漠, 2015, 35(5): 1403–1412.
- [24] 樊江文, 钟华平, 陈立波, 等. 我国北方干旱和半干旱区草地退化的若干科学问题[J]. 中国草地学报, 2007, 29(5): 95–101.
- [25] 蒋德明, 刘志民, 寇振武, 等. 科尔沁沙地生态环境及其可持续管理——科尔沁沙地生态考察报告[J]. 生态学杂志, 2004, 23(5): 179–185.
- [26] 汪诗平. 青海省“三江源”地区植被退化原因及其保护策略[J]. 草业学报, 2003, 12(6): 1–9.
- [27] 魏兴琥, 雷 俐, 邹学勇, 等. 京津风沙源浑善达克沙地治理区退耕还林地的植被变化[J]. 中国沙漠, 2013, 33(2): 604–612.
- [28] 王 朗, 傅伯杰, 吕一河, 等. 生态恢复背景下陕北地区植被覆盖的时空变化[J]. 应用生态学报, 2010, 21(8): 2109–2116.
- [29] 李旺君, 吕昌河. 生态建设对陕北植被变化的影响分析[J]. 干旱区地理, 2014, 37(2): 318–324.
- [30] 孙艳玲, 郭 鹏, 延晓冬, 等. 内蒙古植被覆盖变化及其与气候、人类活动的关系[J]. 自然资源学报, 2010, 25(3): 407–414.