

基于MODIS数据的2001—2018年 中国耕地复种指数反演研究

李 宇^{1,2,3}, 邱炳文^{1,2,3*}, 何玉花^{1,2,3}, 陈 功^{1,2,3}, 叶智燕^{1,2,3}

(1. 福州大学空间数据挖掘与信息共享教育部重点实验室, 福州 350116;

2. 地理空间信息技术国家地方联合工程研究中心, 福州 350116; 3. 数字中国研究院(福建), 350116)

摘 要:耕地复种指数的持续稳定关乎国家粮食安全战略,实时高效地获取复种指数时空演变的详细过程信息具有重要意义。论文基于2001—2018年500 m分辨率的MODIS09A1影像数据,利用小波谱顶点的快速自动检测方法获取了全国复种指数的时空分布图,并采用Mann-Kendall检验、启发式分割算法等方法开展了全国复种指数变化形式的时空演变规律及驱动机制研究。结果表明:全国耕地复种指数稳中有升,复种指数均值从2001年的1.14上升至2018年的1.30。全国6%的耕地面积复种指数发生显著变化(约13.5万km²),相当于一个安徽省的面积。复种指数增加面积约占变化面积的2/3,复种指数下降面积约占变化面积的1/3。其中,复种指数增加的面积主要来源于黄土高原区、甘新区的休耕转为单季以及黄淮海地区单季转双季,且集中在2004—2013年。2013年至今,全国复种指数仍呈增加趋势,黄淮海地区单季转双季的面积保持持续增加是重要的影响因素。复种指数下降的面积主要来源于2009—2013年长江中下游平原区的双季转单季。保持黄土高原区、甘新区的耕地有效种植面积以及黄淮海地区的双季种植面积,适当抑制长江中下游地区耕地复种指数的下降态势,对于稳定耕地复种指数、确保粮食安全具有重要意义。

关 键 词:耕地复种指数;小波谱顶点;休耕转为单季;MOD09A1;中国

中国的复种面积约占总播种面积的20%以上,当前耕地外延式扩张增加粮食产量的难度日益加大,提高耕地复种指数是粮食产量增加的重要途径^[1-3]。随着遥感技术发展,由于其具有快速、高效和实时等优点,在耕地复种指数研究领域得到了广泛应用^[4-7]。全国范围内复种指数在20世纪末总体呈现增加趋势,耕地复种增加以单季变为双季为主^[8-9]。21世纪以来,Qiu等^[10]对2001—2013年复种指数的研究表明中国复种指数略有下降,在华北地区以单季转为双季种植方式为主,长江中下游地区则以双季转为单季种植方式为主;Yan等^[11]对2000—2015

年全国耕地复种指数的研究表明,全国耕地区域复种指数的均值较为稳定,但全国耕地区域复种指数空间分布上发生了较大变化,且种植强度下降的主要区域位于南方;Li等^[12]的研究表明,在2001—2010年中国耕地抛荒主要集中在山区;区域上北方的黄淮海地区耕地复种指数在2001—2015年呈现升高—降低—升高的变化趋势^[13];南方地区1990—2015年的复种指数呈下降趋势,长江中下游地区种植制度由双季稻改种单季稻是复种指数下降的主要原因^[14];四川盆地2000—2016年在成都及周边城市,耕地复种指数呈增加趋势^[15]。尽管在国家及区

收稿日期:2019-11-08;修订日期:2020-10-08。

基金项目:国家自然科学基金面上项目(41771468,41471362);福建省重点科技项目(2020N5002,2017I0008);福州大学科技计划项目(GD1805)。[Foundation: National Natural Science Foundation of China, No. 41771468 and 41471362; Key Science and Technology Program of Fujian Province, No. 2020N5002 and 2017I0008; Fuzhou University Science and Technology Project No. GD1805.]

第一作者简介:李宇(1992—),男,河南商丘人,硕士生,主要从事农业遥感科学研究。E-mail: 753575991@qq.com

*通信作者简介:邱炳文(1973—),女,湖南浏阳人,研究员,博士,主要从事农业遥感科学研究。E-mail: qiubingwen@fzu.edu.cn

引用格式:李宇,邱炳文,何玉花,等. 基于MODIS数据的2001—2018年中国耕地复种指数反演研究[J]. 地理科学进展, 2020, 39(11): 1874-1883. [Li Yu, Qiu Bingwen, He Yuhua, et al. Cropping intensity based on MODIS data in China during 2001–2018. Progress in Geography, 2020, 39(11): 1874-1883.] DOI: 10.18306/dlkxjz.2020.11.008

域上耕地复种指数的时空格局变化研究众多^[16-17],但尚缺乏全国范围内耕地复种指数逐年变化的时空特征及最近年份变化新态势的研究。因此,本文基于空间分辨率为500 m的MODIS09A1数据建立EVI2指数,利用小波谱顶点提取全国尺度的耕地复种指数,研究2001—2018年全国耕地复种指数整体的时空变化特征,综合复种指数逐年的变化特征对复种指数进行时空演变分析,以期为中国农业政策制定及管理提供科学依据。

1 数据及方法

全球土地利用数据2010年的GlobeLand30-2010产品,空间分辨率为30 m,产品精度高达80%以上,是当前全球最佳的土地覆盖类型产品之一^[18]。由于2002—2010年是中国退耕还林还草的主要实施阶段^[19],选用2010年土地利用数据能一定程度上消除耕地变为林地、草地的影响。因此,本文利用GlobeLand30-2010获取全国耕地分布数据。根据农业气象观测的作物日历信息,农作物EVI2指数的合理峰值应高于0.35^[11],耕地区域内EVI2的最大峰值小于0.35则为休耕。由于数据噪声及植被指数时间序列类内异质性的影响,基于遥感数据准确检测出耕地复种指数具有一定的挑战性。近年来,Qiu等^[10]提出了一种基于EVI2指数时间序列,利用小波谱顶点快速自动检测复种指数的方法,克服了由此引起的不确定性。EVI2时序数据利用8 d 500 m分辨率的MOD09A1提取,对数据进行几何校正、去云和去雪等处理,并利用WS平滑方法对数据去噪。小波谱顶点方法是一种基于小波系数谱特征的方法,在植被覆盖偏好时期内,小波系数局

部最大值被称为特征点,特征点反映了在某一“时间—尺度”上,植被指数时序曲线与基小波最为相似。在较大尺度(与作物生长周期对应的尺度)上,小波系数达到一定的值的特征点,称之为小波谱顶点(简称顶点)。由于小波系数反映了基小波与植被生长曲线在一定“时间—尺度”的相似度,在植被生长盛期时,相似度达到最大,作物在年内一般种植三季以内,因此,设置处的小波系数要大于小波系数谱中最大值的1/3。顶点所在的时间,在一定程度上反映了植被生长最好的时间,顶点的个数与植被生长周期有着较好的对应关系。虽然作物生长过程中自身或其他因素的影响,在生长期EVI2值发生小波动,时序曲线中出现小峰(图1),通过连续小波变换之后,小峰转化为小波谱中所处尺度非常小的特征点,但小峰不具备顶点的特征,较好地消除了曲线小波动带来的干扰,这样就避免了出现错峰、假峰的现象。同时,小波系数谱中不同尺度下的小波系数有着对应的时间观测尺度,其计算公式为:

$$P = \alpha \cdot \Delta t / \nu \quad (1)$$

式中: P 为对应的时间周期, α 为小波的尺度, Δt 为观测数据的时间分辨率, ν 为母小波的中心频率。对于多季轮作来说,双季轮作中的一个生长周期一般为6个月(12/2个月),最长不会超过8个月,三季轮作中的一个生长周期一般为3~4个月(12/3个月)的特点,通过调整小波系数谱的局部最大值的尺度,消除类内异质性的影响,使用一定尺度区间上的顶点个数指示耕地的复种指数。为验证计算的复种指数的准确性,在全国均匀选取2016—2018年多方(研究团队自身及有合作关系的团队、测绘部门等)收集的1829个具有耕地复种

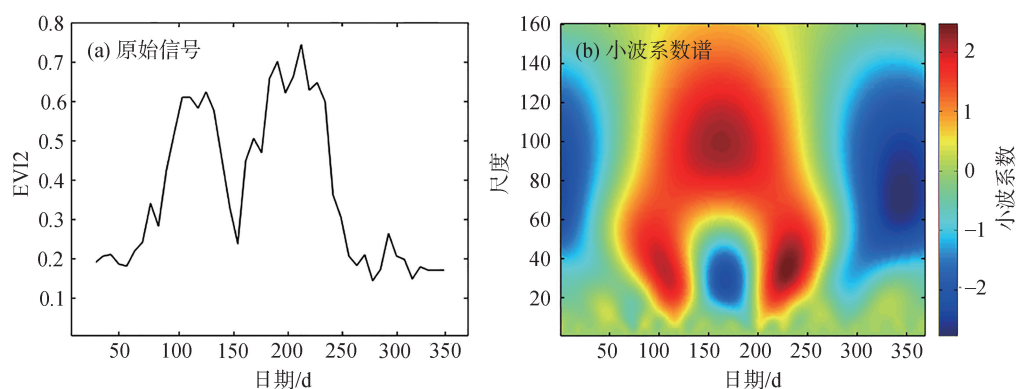


图1 双季耕地区域EVI2时序曲线及对应的小波系数谱

Fig.1 Annual EVI2 profile of double cropping croplands and its corresponding characteristic spectra

信息的点位对计算结果进行验证。

利用建立的2001—2018年全国复种指数数据库,研究耕地复种指数的时空变化趋势。首先,从总体上统计全国及各农业主产区复种指数的年际变化情况。然后,通过Sen氏斜率和Mann-Kendall检验得到中国耕地复种指数的显著变化区域及趋势。启发式分割算法能有效检测到时序的突变点,对于有变化的区域使用启发式分割算法检测变化年份^[20],利用变化年份前后复种指数的众数确定耕地复种指数变化形式。最后,获取研究期间中国耕地复种指数显著变化区域的时空演变特征。

2 结果与分析

2.1 精度验证

基于野外调查点位数据及其他手段获取的耕

地复种信息对耕地复种指数监测结果进行精度验证。本文结合多种途径包括野外调研(图2)、与有关测绘部门合作以及谷歌地球的影像收集的耕地复种指数点位信息,选取2016—2018年收集的耕地点位(图3a)数据,对比小波谱顶点方法识别的耕地复种指数结果。其中,野外调研的耕地点位,一种为先基于先验知识了解各农业主产区作物生长的季节特点,然后实行分期野外调研。比如黄淮海地区是玉米、小麦的主要种植区,2018年分夏季和冬季2期对该地区开展了调研(图3c)。另一种方式通过向当地农民了解耕地农作物种植情况,从而获取更加丰富准确的耕地点位复种指数信息。其次,与地方测绘部门合作以及利用谷歌地球的影像通过目视解译获取耕地复种指数信息,例如华北地区冬小麦和玉米为主的种植区,影像特征较为明显,可以判断耕地的复种指数。

(a) 内蒙古通辽市 2018年 单季



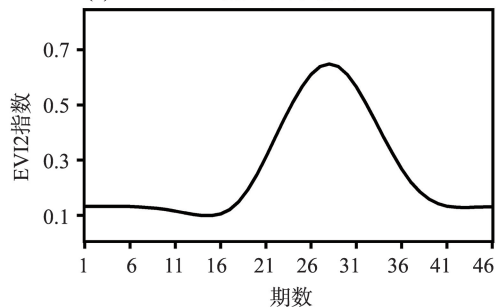
(b) 河南省郑州市 2017年 双季



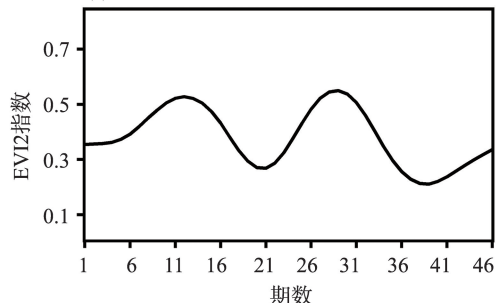
(c) 福建云霄县 2018年 三季



(d) 图a的EVI2指数时序点信号



(e) 图b的EVI2指数时序点信号



(f) 图c的EVI2指数时序点信号

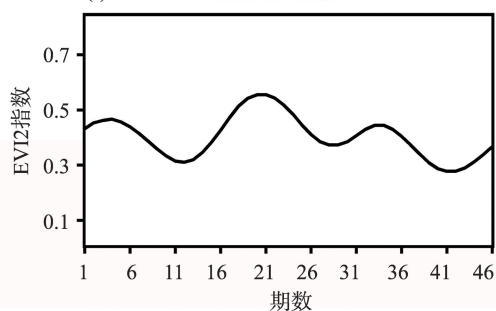
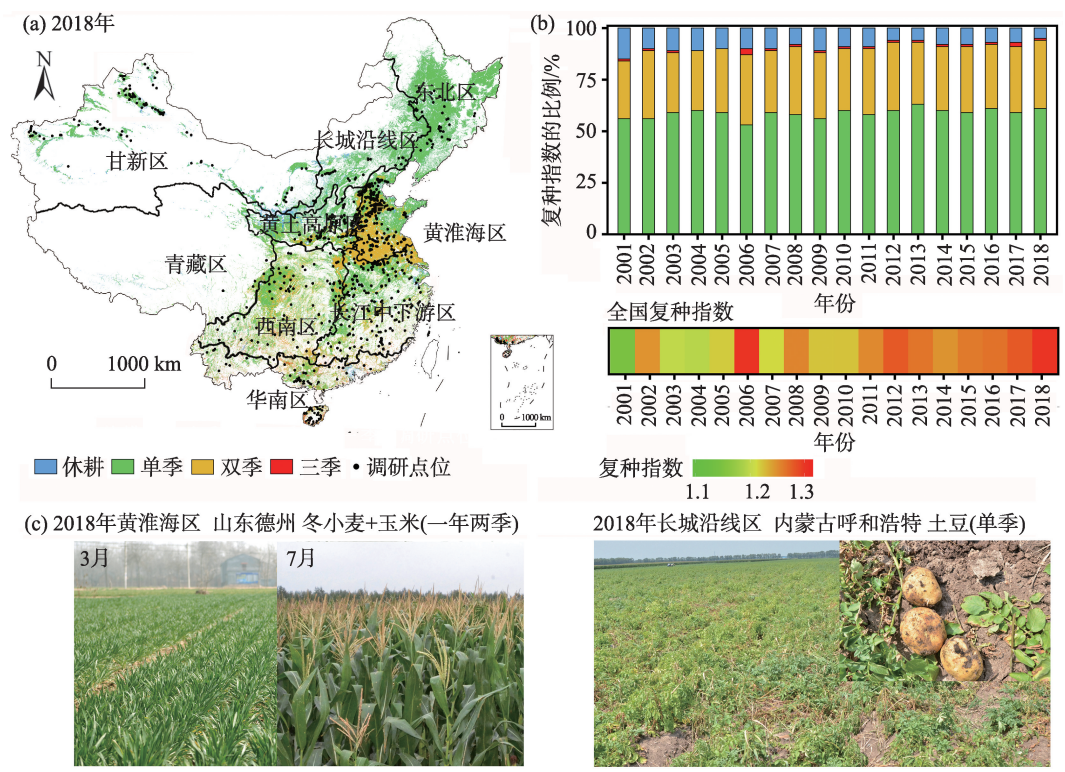


图2 2017—2018年耕地复种指数调研照片(a,b,c)及分别对应点位的EVI2时序信号(d,e,f)

Fig.2 The photos of cropping intensity field survey (a,b,c) and EVI2 index time series point signal (d,e,f) during 2017–2018



注:图中中国全图基于自然资源部标准地图服务网站下载的审图号为GS(2019)1833号的标准地图制作,底图无修改。下同。
图3 (a)全国复种指数及调研点位2018年空间分布、(b)2001—2018年各复种指数逐年的比例及均值变化趋势
与(c)黄淮海区、长城沿线区野外耕地调研照片

Fig.3 (a) Spatial distribution of cropping intensity and ground truth data of China's mainland, 2018; (b) Cropping intensity variations and changes in the proportion of single, double, triple, and fallow croplands in China, 2001–2018; (c) Field survey photographs in the Yellow River-Huai River-Hai River region and Inner Mongolia along the Great Wall

点位覆盖中国9大农业主产区,其中单季有836个点,双季点位有945个,由于三季种植较少,选取了48个调研点位,共1829个点。从精度验证表中可以看出,双季和单季具有较高的识别精度,精度都达到90%左右。总体精度为91.14%,表明具有较好的识别精度(表1)。

表1 2016—2018年耕地复种指数遥感监测结果精度验证
Tab.1 Accuracy assessment of MODIS-estimated cropping intensity results using ground truth data, 2016–2018

	耕地复种指数			生产者精度/%
	单季	双季	三季	
单季	774	62	0	92.58
双季	87	853	5	90.26
三季	3	5	40	83.33
用户精度/%	89.58	92.72	88.89	
总体精度: 91.14%; Kappa系数: 0.8308				

2.2 2001—2018年全国复种指数时空演变分析

2.2.1 全国复种指数空间分布分析

全国耕地复种指数有单季、双季和三季,且从北向南呈现增加趋势。9大农业主产区中北方的东北区、内蒙古及长城沿线区、黄土高原区以及甘新区耕地种植方式多以单季为主。北方的农业主产区多受气候条件制约,东北区冬季严寒漫长,内蒙古及长城沿线区、黄土高原区和甘新区较为干旱等不利因素,限制了耕地复种指数提高。南方的华南区、长江中下游区、西南区雨量较为充沛,耕地复种植模式为双季单季混合种植,处于亚热带的华南区有少量三季分布。较为湿润的黄淮海平原区以双季种植为主,青藏区空气干燥稀薄气候属高寒类型,耕地分布较少,只有其东南部有少量的单季与双季分布。北方地区由于气候干燥和风沙原因,休耕在该地区分布较多。依据小波谱顶点方法估算的2018年中国复种指数显示,约61%的耕地是单季

种植方式(面积约为136.4万 km^2),约33%的耕地为双季种植方式,以三季为种植方式的耕地面积最小(约3万 km^2),仅占耕地面积的1.5%,且80%分布在华南区。休耕面积约11万 km^2 ,主要分布在黄土高原区、甘新区和内蒙古沿线区(图3a)。

2.2.2 全国耕地复种指数动态演变特征分析

研究期间全国耕地复种指数均值显示,总体上具有稳中有升的趋势(图3b)。全国耕地复种指数均值从2001年的1.14增长到2018年的1.30,种植强度介于1.1~1.3之间,总体平均值为1.24。近年来尤其是2013年以后,全国耕地复种指数持续增加。2001—2018年期间全国耕地种植方式的占比变化表明,休耕面积呈现较为明显的下降趋势,单季与双季的面积总体具有一定幅度的增加,三季种植面积总体占比较少,但总体有上升趋势。由于遥感影像的数据质量问题,导致引入异常值,从而使得数据出现异常。例如,2006年耕地复种指数均值1.30明显高于2005年与2007年的1.21,但对于复种指数的总体变化趋势影响较小。

2.3 2001—2018年全国主要农业主产区复种指数时空演变分析

2.3.1 农作物主产区复种指数总体动态演变特征

中国9个农业主产区中,北方地区的东北区、内蒙古及长城沿线区、甘新区和黄土高原区复种指数的区域均值多集中在0.5~1.1之间,南方地区的西南区、长江中下游区、华南区复种多集中在1.3~1.7之间。黄淮海区耕地种植方式以双季为主,复种指数均值多集中在1.5~1.7之间。研究期间9大农业区甘新区、内蒙古及长城沿线和黄土高原区耕地复种指数总体呈增加趋势。其中,趋势最为明显的是黄土高原区,其西部大面积休耕改为种植一季作物,是该区域耕地复种指数增加的主要原因(图4b、4d)。而长江中下游区复种指数整体呈下降趋势,主要原因在于其东北部和东南部的双季转为单季种植方式造成(图4c、4e)。

2.3.2 各农作物主产区复种指数显著变化区域空间演变特征

基于全国2001—2018年耕地复种指数,利用Mann-Kendall($P<0.05$)检验,得到全国耕地复种指数显著变化空间分布图,该方法能很好地识别复种指数的变化特征,揭示复种指数的变化规律(图5、图6a)。研究结果显示:全国约6%的耕地面积(约14万 km^2)发生了显著变化。其中,复种指数增加面

积约占68%,下降面积约占32%,复种指数增加的面积约是下降面积的2倍。

为探究复种指数变化区域的时序特征,使用启发式分割算法检测变化年份,根据变化时间前后复种指数的众数确定耕地复种的变化形式。其中,复种指数增加的主要变化形式为休耕转为单季和单季转为双季2种,复种指数减少的主要变化形式为双季转为单季。休耕转为单季,单季转为双季及双季转为单季分别占全国复种指数显著变化面积的39.5%、22.1%和19.4%(图6b)。在9大农业主产区中复种指数显著变化区域,除长江中下游区以外其他农业主产区复种指数增加面积均多于减少面积。黄土高原区、甘新区、黄淮海区及西南区是复种指数增加面积的主要部分,约占总体复种指数增加面积的78%。其中,休耕转单季的区域主要分布在黄土高原区的西部、北部地区和甘新区的西北部地区。单季种植方式转化为双季多分布在黄淮海与西南区,尤其是黄淮海区的山东与河北交接处(图4a、6a)。双季种植方式转单季主要分布在长江中下游区(图4c、6a),复种下降面积约占总体下降面积的46%。

研究期间,全国耕地复种指数在空间上逐年的变化面积以休耕转为单季、单季转为双季、双季转为单季这3种变化形式为主。其中,休耕转为单季在显著变化区域占比最高,这3种形式变化面积最大的年份依次为2011、2014和2013年。在2011年复种指数显著变化面积最多,同时是这3种主要形式变化面积较多的一年(图7a)。

休耕转为单季形式在2004—2012年逐年变化面积总体上呈现增加趋势,是研究期间主要变化形式,年变化面积介于3000~7000 km^2 之间,黄土高原区和甘新区两者每年占比在80%左右。其中,2004—2007年黄土高原区与甘新区占比相当,而2008—2012年黄土高原区休耕转为单季逐年变化面积持续增加,占比达50%左右,成为休耕转为单季形式最主要区域(图7b)。

单季转双季形式主要发生在2005—2015年,每年的变化面积多介于2000~3000 km^2 之间,10 a间变化面积较为平稳,黄淮区是该变化形式主要区域,占比在50%~60%之间,且变化面积越多的年份黄淮海区占比越高,其次为西南区和长江中下游区(图7c)。双季变单季形式的变化主要集中在2009—2013年,五年间每年的变化面积多介于

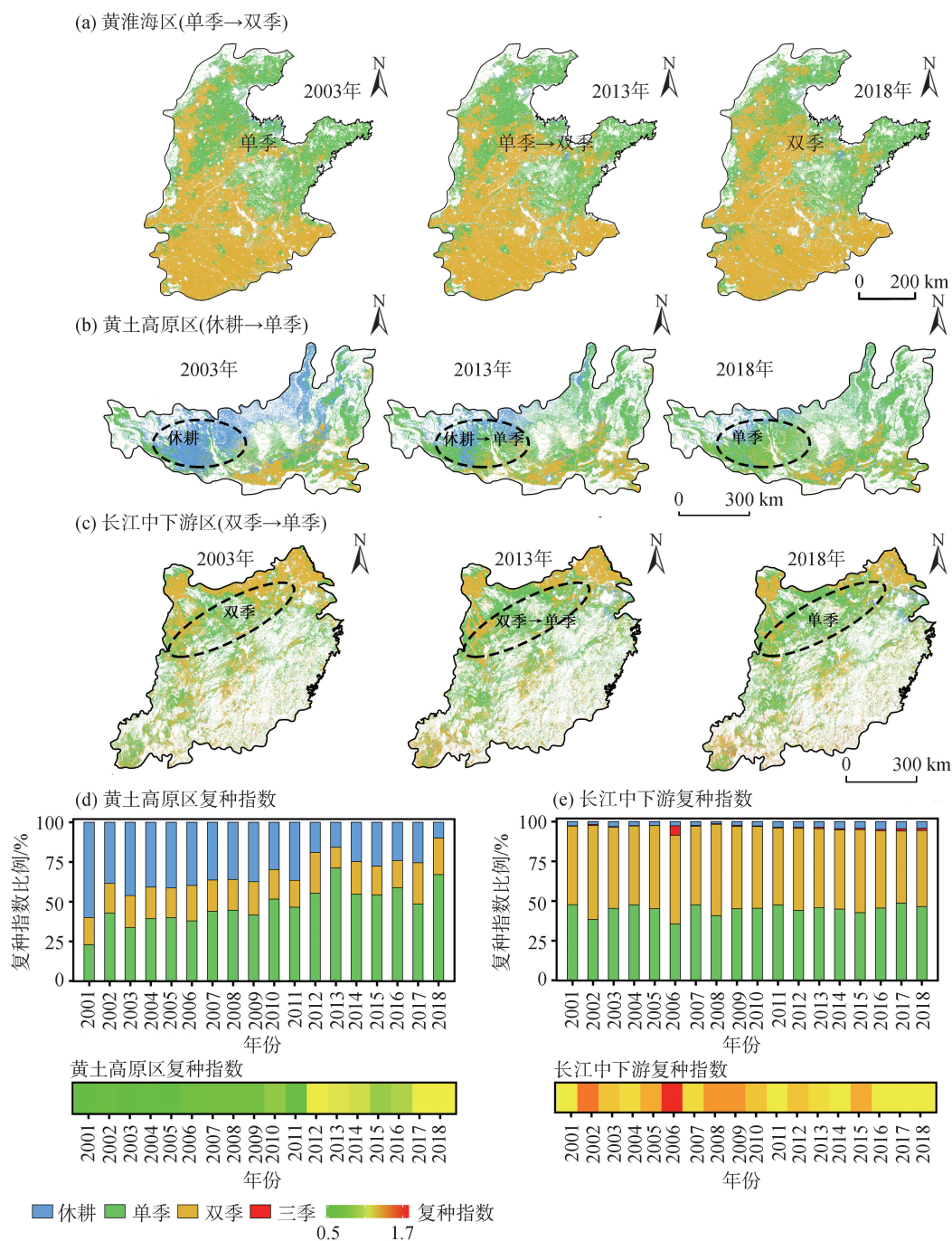


图4 (a)黄淮海区、(b)黄土高原区、(c)长江中下游区复种指数空间分布及2001—2018年(d)黄土高原区和(e)长江中下游区各复种指数逐年的比例及均值变化趋势

Fig.4 Spatial distribution of cropping intensity in the Yellow River-Huai River-Hai River region (a), the Loess Plateau region (b), and the middle and lower reaches of the Yangtze River region (c); Cropping intensity variations and changes in the proportion of single, double, triple, and fallow croplands in the Loess Plateau region (d); and the middle and lower reaches of the Yangtze River region (e), 2001–2018

2000~3000 km²之间,长江中下游区是主要的变化区域,其次为黄淮海区和西南区(图7d)。Yan等^[11]的研究表明,在2001—2015年单季转双季主要发生在

黄淮区,双季转单季主要发生在南方地区,与本文的结论较为一致。

整体上,2013年休耕转为单季的面积开始急剧

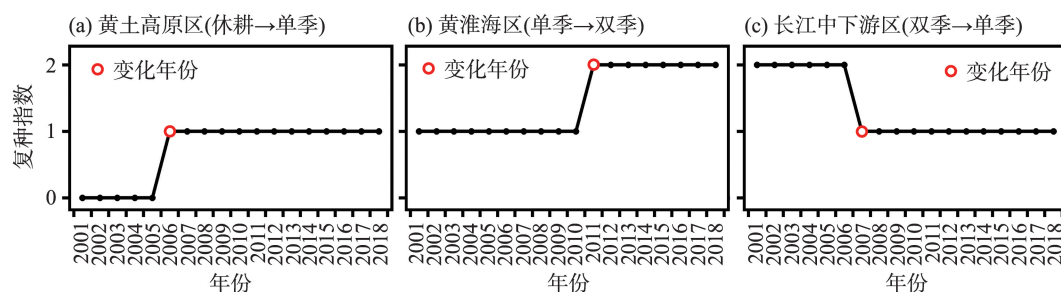


图5 2001—2018年复种指数Mann-Kendall检测显著性区域时序信号折线图

Fig.5 Multiple cropping index Mann-Kendall detection significant regional time series signal line chart, 2001–2018

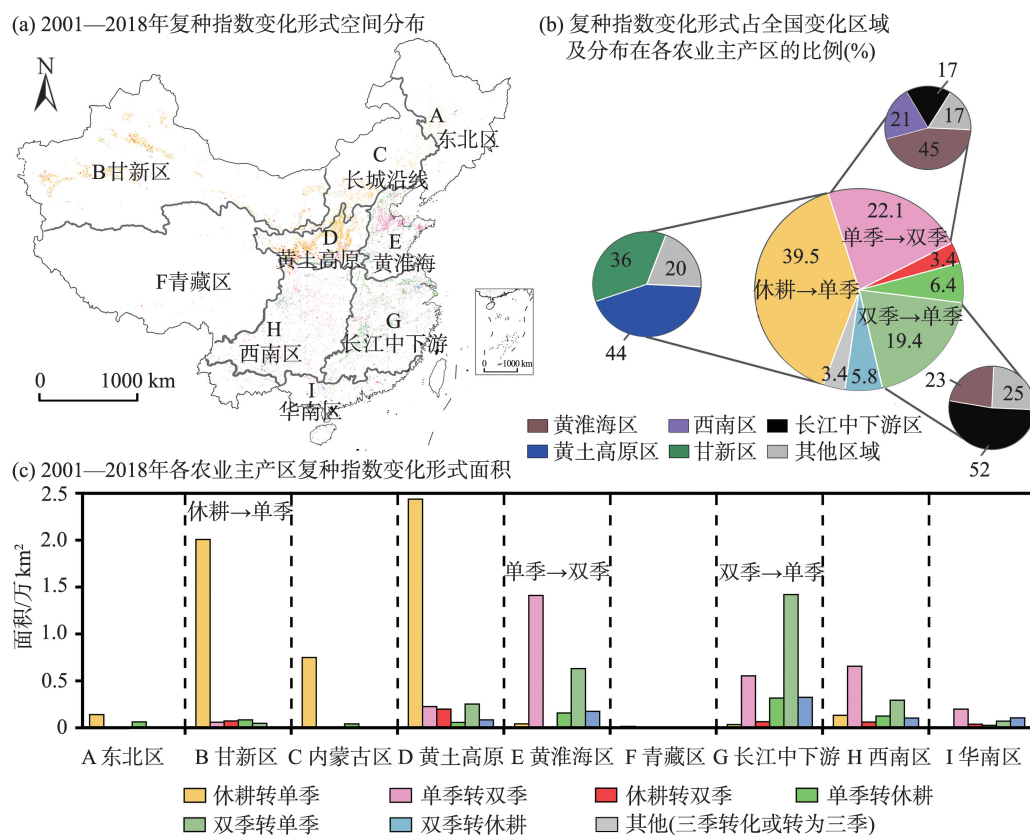


图6 2001—2018年农业主产区(a) 复种指数变化形式空间分布、(b) 复种指数各变化形式比例和在各农业主产区的分布比例及(c) 复种指数变化形式统计

Fig.6 (a) Spatiotemporal distribution of the significant trends of cropping intensity; (b) Proportion of significant trends of cropping intensity and their distributions; (c) Statistics of significant trends of cropping intensity, in the main agricultural production regions of China, 2001–2018

下降,主要原因在于黄土高原区该变化形式的面积开始减少,但单季转双季的面积有所增多,双季转单季面积持续下降,所以2013后全国复种指数整体仍呈上升趋势。2013—2018年耕地复种指数显著变化区域主要以增加为主,且主要分布在黄土高原区及黄淮区,其间黄淮海区的双季转单季持续减少,单季转双季形式的面积仍持续增加,是近几年

复种稳定增加的关键因素。

甘新区、黄土高原区及内蒙古长城沿线区是休耕转为单季的主要区域。甘新区主要集中在生产建设兵团开垦区域,随着兵团水利建设灌溉面积增加,农业机械化水平提高^[21],水土条件差、生态条件较为恶劣区域的休耕地转为种植一季作物是该地区复种指数提高的主要原因。黄土高原区与

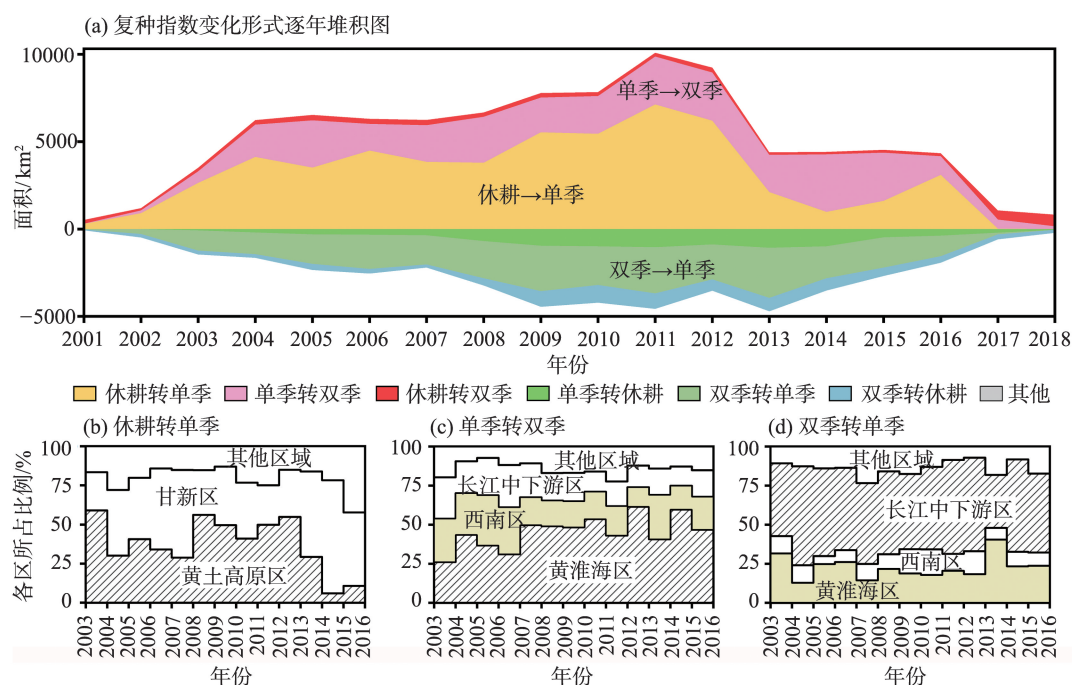


图7 (a) 复种指数各变化模式逐年变化面积及每年(b)休耕转为单季、(c)单季转双季和(d)双季转单季在不同农业主产区的分布比例

Fig.7 (a) Temporal change of significant trends of cropping intensity; Proportion of cultivated land converted (b) from fallow to single cropping, (c) from single cropping to double cropping, and (d) from double cropping to single cropping in different main agricultural production regions

内蒙古长城沿线区由于三北工程等生态项目的实施,当地环境得到很大改善^[22],该地区弃耕的耕地重新种植为一季农作物。黄淮海地区耕地复种指数单季转双季与当地玉米的种植面积不断扩张有关^[8]。长江中下游地区双季减少为单季约占复种显著减少面积的40%,主要由于双季稻改种为单季稻造成的^[14]。

3 结论

本文基于MODIS09A1数据,利用小波谱顶点计算2001—2018年全国耕地复种指数,分析全国耕地复种指数的时空演变特征。结果表明,全国耕地复种指数稳中有升,但全国复种指数的空间分布发生了较大变化。2004—2013年是全国复种变化的主要时期,黄土高原区、甘新区耕地复种指数持续增加,而长江中下游平原区复种指数呈下降趋势。21世纪以来,尤其是脱贫攻坚背景下,乡村产业振兴、农村土地经营权流转以及耕地保护制度等政策,使得耕地种植方式发生改变,从而对耕地复种

指数产生了巨大影响。本文研究仅局限于21世纪初,而与20世纪末全国耕地复种指数的变化情况缺乏对比,国家实施的农业政策对全国复种指数的影响有待进一步研究。长时序复种指数时空演变过程特征可为农业部门合理调控粮食价格、调整休耕、开垦方案等提供数据支撑和理论依据,针对不同区域实施不同的政策,有助于制定遏制长江中下游地区双季稻种植面积减少趋势的对策,稳定双季稻种植面积;推广黄土高原区、甘新区的耕地保护及管理经验;进一步提高黄淮海地区耕地复种指数,保障国家的粮食安全。

参考文献(References)

- [1] Liu L, Xu X, Zhuang D, et al. Changes in the potential multiple cropping system in response to climate change in China from 1960–2010 [J]. PLoS One, 2013, 8(12): 135–141.
- [2] Liu L, Xiao X, Qin Y, et al. Mapping cropping intensity in China using time series Landsat and Sentinel-2 images and Google Earth Engine [J]. Remote Sensing of Environment, 2020, 239(5): 111–124.

- [3] Zhou D, An P, Pan Z, et al. Arable land use intensity change in China from 1985 to 2005: Evidence from integrated cropping systems and agro economic analysis [J]. *Journal of Agricultural Science*, 2012, 150(2): 179-190.
- [4] Biradar C M, Xiao X. Quantifying the area and spatial distribution of double-and triple-cropping croplands in India with multi-temporal MODIS imagery in 2005 [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2011, 32(2): 367-386.
- [5] Gray J, Friedl M, Frohling S, et al. Mapping Asian cropping intensity with MODIS [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2014, 7(8): 3373-3379.
- [6] Jain M, Mondal P, DeFries R S, et al. Mapping cropping intensity of smallholder farms: A comparison of methods using multiple sensors [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2013, 134(16): 210-223.
- [7] Griffiths P, Nendel C, Hostert P. Intra-annual reflectance composites from Sentinel-2 and Landsat for national-scale crop and land cover mapping [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2019, 220(9): 135-151.
- [8] Qiu B W, Huang Y Z, Chen C C, et al. Mapping spatiotemporal dynamics of maize in China from 2005 to 2017 through designing leaf moisture based indicator from normalized multi-band drought index [J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2018, 153(4): 82-93.
- [9] 左丽君, 张增祥, 董婷婷, 等. 耕地复种指数研究的国内外进展 [J]. *自然资源学报*, 2009, 24(3): 553-560. [Zuo Lijun, Zhang Zengxiang, Dong Tingting, et al. Progress in the research of cultivated land multiple cropping index at home and abroad. *Journal of Natural Resources*, 2009, 24(3): 553-560.]
- [10] Qiu B, Lu D, Tang Z, et al. Mapping cropping intensity trends in China during 1982–2013 [J]. *Applied Geography*, 2017, 79(12): 212-222.
- [11] Yan H, Liu F, Qin Y, et al. Tracking the spatio-temporal change of cropping intensity in China during 2000–2015 [J]. *Environmental Research Letters*, 2018, 14(3): 035008. doi: 10.1088/1748-9326/aaf9c7.
- [12] Li S, Li X, Sun L, et al. An estimation of the extent of cropland abandonment in mountainous regions of China [J]. *Land Degradation & Development*, 2018, 29(5): 1327-1342.
- [13] 李卓, 刘淑亮, 孙然好, 等. 黄淮海地区耕地复种指数的时空格局演变 [J]. *生态学报*, 2018, 38(12): 4454-4460. [Li Zhuo, Liu Shuliang, Sun Ranhao, et al. Identifying the temporal-spatial pattern evolution of the multiple cropping index in the Huang-Huai-Hai region. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(12): 4454-4460.]
- [14] 蒋敏, 李秀彬, 辛良杰, 等. 南方水稻复种指数变化对国家粮食产能的影响及其政策启示 [J]. *地理学报*, 2019, 74(1): 34-45. [Jiang Min, Li Xiubin, Xin Liangjie, et al. The impact of paddy rice multiple cropping index changes in Southern China on national grain production capacity and its policy implications. *Acta Geographica Sinica*, 2019, 74(1): 32-43.]
- [15] 田罗, 周文佐, 何万华, 等. 2000—2016年四川省耕地种植指数时空变化及其自然潜力分析 [J]. *中国生态农业学报*, 2018, 26(8): 1206-1216. [Tian Luo, Zhou Wenzuo, He Wanhua, et al. Temporal and spatial changes and natural potential of cultivated land planting index in Sichuan Province from 2000 to 2016. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2018, 26(8): 1206-1216.]
- [16] 丁明军, 陈倩, 辛良杰, 等. 1999—2013年中国耕地复种指数的时空演变格局 [J]. *地理学报*, 2015, 70(7): 1080-1090. [Ding Mingjun, Chen Qian, Xin Liangjie, et al. Spatial and temporal variations of multiple cropping index in China based on SPOT-NDVI during 1999–2013. *Acta Geographica Sinica*, 2015, 70(7): 1080-1090.]
- [17] 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 Dailiang, Huang Jingfeng, Jin Huimin. Monitoring of multiple cropping index of cultivated land in Zhejiang Province based on MODIS-NDVI. *Scientia Agricultura Sinica*, 2006, 39(7): 1352-1357.]
- [18] Wang Y, Zhang J, Liu D, et al. Accuracy assessment of GlobeLand30 2010 land cover over China based on geographically and categorically stratified validation sample data [J]. *Remote Sensing*, 2018, 10(8): 1213. doi: 10.3390/rs10081213.
- [19] 李世东. 中国退耕还林发展阶段研究 [J]. *世界林业研究*, 2003, 16(1): 36-41. [Li Shidong. Study on the development stages of converting cropland for forest and grassland. *World Forestry Research*, 2003, 16(1): 36-41.]
- [20] 封国林, 龚志强, 董文杰, 等. 基于启发式分割算法的气候突变检测研究 [J]. *物理学报*, 2005, 54(11): 5494-5499. [Feng Guolin, Gong Zhiqiang, Dong Wenjie, et al. Abrupt climate change detection based on heuristic segmentation algorithm. *Acta Physica Sinica*, 2005, 54(11): 5494-5499.]
- [21] 陈学庚, 赵岩. 新疆兵团农业机械化现状与发展趋势 [J]. *华东交通大学学报*, 2015, 32(2): 1-7. [Chen Xuegeng, Zhao Yan. Status and development trend of agricultural mechanization in Xinjiang production and construction corps. *Journal of East China Jiaotong University*, 2015, 32(2): 1-7.]
- [22] Qiu B, Chen G, Tang Z, et al. Assessing the Three-North

Shelter Forest Program in China by a novel framework
for characterizing vegetation changes [J]. ISPRS Journal

of Photogrammetry and Remote Sensing, 2017, 133: 75-
88.

Cropping intensity based on MODIS data in China during 2001–2018

LI Yu^{1,2,3}, QIU Bingwen^{1,2,3*}, HE Yuhua^{1,2,3}, CHEN Gong^{1,2,3}, YE Zhiyan^{1,2,3}

(1. Key Laboratory of Spatial Data Mining & Information Sharing of Ministry of Education, Fuzhou University,
Fuzhou 350116, China; 2. National Engineering Research Centre of Geospatial Information Technology,
Fuzhou 350116, China; 3. The Academy of Digital China (Fujian), Fuzhou 350116, China)

Abstract: Stability of cropping intensity of the cultivated land is related to the national food security of China, and it is of great significant to obtain detailed process information of the spatiotemporal change of cropping intensity in a timely and efficient manner. Based on the MODIS09A1 data of 500 m resolution in 2001–2018, this study mapped the spatiotemporal distribution of the national cropping intensity by using the fast automatic detection method of continuous wavelet transform, and examined the spatiotemporal change of cropping intensity and driving mechanisms by Mann-Kendall nonparametric test and heuristic segmentation method. The results show that the cropland multiple cropping index in China had risen steadily, and the average value of multiple cropping index had increased from 1.14 in 2001 to 1.30 in 2018. In 6% of the country's cultivated land area (about 135000 km², equivalent to the area of Anhui Province), multiple cropping index changed significantly. The areas with multiple cropping index increase account for about 2/3 of the total area of multiple cropping index change, and the areas with decreased multiple cropping index account for about 1/3 of the total area of multiple cropping index change. The key regions with positive change are the Loess Plateau and the Gansu-Xinjiang region (from fallow to single cropping), and the Yellow River-Huai River-Hai River region (from single cropping to double cropping), and the changes mainly took place in 2004–2013. Since 2013, the national multiple cropping index has continued to increase. An important contributing factor is the continued increase in area of double cropping (converted from single cropping), which was mainly in the Yellow River-Huai River-Hai River region. Negative change mainly took place in the middle and lower reaches of the Yangtze River Basin where double cropping was partially replaced by single cropping in 2009–2013. Maintaining effective planting area of the cultivated land in the Loess Plateau and the Gansu-Xinjiang region and double cropping planting area of the cultivated land in the Yellow River-Huai River-Hai River region, and preventing the decline of multiple cropping of the middle and lower reaches of the Yangtze River Basin are of great significance for stabilizing the multiple cropping index and ensuring food security in China.

Keywords: multiple cropping index; wavelet features-based method; fallow to single cropping; MOD09A1; China