

DOI: 10.5846/stxb201802010284

李卓,刘淑亮,孙然好,刘维忠.黄淮海地区耕地复种指数的时空格局演变分析.生态学报,2018,38(12): - .

Li Z, Liu S L, Sun R H, Liu W Z. Identifying the temporal-spatial pattern evolution of the multiple cropping index in the Huang-Huai-Hai region. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(12): - .

黄淮海地区耕地复种指数的时空格局演变分析

李 卓¹, 刘淑亮², 孙然好^{1,*}, 刘维忠³

1 中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085

2 辽宁工程技术大学测绘与地理科学学院, 阜新 123000

3 黑龙江第二测绘工程院, 哈尔滨 150000

摘要:耕地复种指数是土地利用强度的重要表征,时空动态特征有助于理解人类活动与生态环境的耦合作用。以黄淮海地区 2001—2015 年 MODIS (Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer, 中分辨率成像光谱仪) NDVI (Normalized Difference Vegetation Index, 归一化植被指数) 遥感影像为数据源,使用 Savitzky-Golay 滤波对时间序列曲线平滑重构后,结合研究区物候信息设置含有阈值的二次差分算法提取复种次数,最后在 R 环境下绘制复种指数空间分布图。结果表明:(1)河南省复种指数最高(169.3%),山东省次之,天津市最小;(2)各省市年际变化趋势大体一致,经历了升高-降低-升高的过程;从空间分布特征来看,耕地复种指数具有明显的地域性差异,二熟制主要集中于南部,东部和北部受地形和纬度影响,主要以一熟制为主。研究结果对于黄淮海农耕区的土地利用强度辨识、人类活动方式确定具有参考价值,同时也证明了该方法具有更大尺度推广的潜力。

关键词:Savitzky-Golay 滤波;复种指数;时空格局;黄淮海地区

Identifying the temporal-spatial pattern evolution of the multiple cropping index in the Huang-Huai-Hai region

LI Zhuo¹, LIU Shuliang², SUN Ranhao^{1,*}, LIU Weizhong³

1 State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

2 School of Geomatics, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China

3 Heilongjiang Second Surveying and Mapping Engineering Institute, Harbin 150000, China

Abstract: The multiple cropping index is an important indicator of land utilization intensity, and the temporal-spatial dynamics can also help to understand the coupling effects of human activities and the ecological environment. In this study, MODIS (Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer) NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) remote sensing images in the Huang-Huai-Hai region from 2001 to 2015 were used as the source datasets. After a Savitzky-Golay filter was used to reconstruct the time series curve, the second-order difference method with threshold was used to extract the number of multiple cropping times, combined with the phenology of the study area. Finally, the spatial distribution map of the multiple cropping index was drawn using R language software. The result showed that: (1) the multiple cropping index of Henan Province was the highest (169.3%), followed by that of Shandong, and then Tianjin provinces; (2) during the study period, the inter-annual trends of the multiple cropping index showed a similar rising-decreasing-rising pattern in each province and city. From the spatial distribution characteristics, cultivation showed obvious regional differences. The two crops per year were mainly concentrated in the South. Owing to the terrain and latitude, the East and North showed mainly

基金项目:国家自然科学基金项目(41471150)

收稿日期:2018-02-01; 修订日期:2018-05-07

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: rhsun@cees.ac.cn

one crop per year. The results are valuable to identify land utilization intensity and human activities in the Huang-Huai-Hai cropland region. They also proved that this method could potentially be used at a greater scale.

Key Words: Savitzky-Golay filter; multiple cropping index; spatio-temporal pattern; Huang-Huai-Hai region

我国正处于国民经济发展的战略机遇期,如何在新形势下应对城镇化进程加快和农村经济结构调整所造成的大量耕地持续向建设用地转换的窘境,解决人口增长与耕地资源紧缺的突出矛盾、确保耕作效率是当务之急^[1-2]。面对人多地少的基本国情,掌握作物物候规律,以“时间交换空间”的多熟种植方式是增加粮食产量的有效途径之一^[3]。复种指数作为耕种制度的重要内容,反映了农事活动对农业资源要素的利用方式,同时也是宏观衡量耕地利用程度的关键指标^[4-6]。以往的农业决策多基于统计数据中的耕地面积和播种面积来计算复种指数,这种计算方式时效性差并缺少空间维度信息,同时还掺杂了大量的人为误差^[7]。当今,天地一体化的遥感技术日益成熟,为高效提取大尺度区域作物种植信息提供了优异的条件,尤其是高时频遥感数据的出现提高了植被指数时间序列的连续性和准确性,进一步促进了复种指数遥感监测的发展^[8-9]。Devendr 等^[10]研究发现亚洲地区粮食增产主要由耕地复种方式实现;Verburg 等^[11]分析了 1991 年中国复种指数的区域性差异;丁明军等^[12]利用全国的 SPOT-NDVI 数据得到 1999—2013 年的耕地复种指数的时空变化曲线,并得出中国耕地复种指数从北至南从半湿润区到湿润区逐渐增大的结论。

黄淮海地区作为我国粮食主产区,近 30 年来为我国粮食增产贡献 45%^[13],在《全国新增 1000 亿斤粮食生产能力规划(2009—2020 年)》中,国务院分配 164.5×10^8 kg 的新增粮食产能任务,进一步奠定了黄淮海粮食产区在保障我国粮食安全中的重要地位^[14]。尤其是该区域北部京津冀地区作为我国经济的第三增长极,加之特殊的地形地貌和人文气候条件,传统农耕已逐渐向生鲜食品生产转变,用来满足特大城市群地区人口的生活所需。陈丽等^[15]以黄淮海地区粮食均衡增产为研究目标,发现粮食增产潜力空间表现为南部高于西北部,并强调粮食生产布局合理优化的重要性。闫慧敏等^[16]利用遥感技术结合地面作物物候观测数据分析了黄淮海地区二熟制作物的生长过程、物候特征和作物植历的空间差异;洪舒蔓等^[14]以县级区域为研究单元,讨论了黄淮海地区耕地资源时空变化特征及其对粮食生产格局变化的影响。先前研究缺少基于长时间序列复种指数的提取及其空间格局变化分析,不利于种植结构的调整和种植方式的优化。此外,随着精耕细作的不断推行,尤其是在山地、丘陵等地域,多熟制经济作物逐渐被广泛耕种,以往只考虑一熟制、两熟制显然不够充分。

鉴于此,本文以黄淮海地区为研究区域,使用 2001—2015 年 1 km 分辨率的 MODIS NDVI 16 d 影像,通过 Savitzky-Golay 滤波对时间序列曲线作平滑重构,采用二次差分法结合物候信息提取时间序列曲线峰值个数,进而确定复种次数,最后结合耕种区边界利用 R 语言绘制复种指数空间分布图,旨在为黄淮海地区粮食生产安全政策制定和土地利用规划提供参考依据。

1 数据与方法

1.1 研究区概况及数据来源

为了充分辨识黄淮海地区复种指数的时空差异,同时兼顾研究区的完整性,本研究以行政区界限为基准选取京、津、冀、鲁、豫三省两市为研究对象。该区域东临黄海,西起太行山,南接大别山,北达燕山南麓,土地面积约为 53.66×10^4 km²,其中由黄河以南至淮河北岸的黄淮海平原占研究区总面积的 53%。境内属温带季风气候,全年积温约 4500℃,无霜期最高达到 230 d,年降水在 600—800 mm 之间,土壤以稳产、高产的棕壤和褐土土壤为主,有机质含量在 15—25 g/kg^[17]。良好的气候条件加上优质的土壤资源,使其成为我国传统农业和农耕文明的发源地之一。然而,该区域人口数量巨大,加之“京津冀一体化”、“山东蓝色海洋经济区”等经济开发建设工程的推行,导致耕地面积缩减严重,未来如何在有限的耕地上提高复种指数成为当今关注的

焦点。

复种指数提取使用的遥感影像来源于 NASA(美国国家航空和空间管理局)的 MOD13A2 数据集,该产品是空间分辨率为 1km 的 MODIS(Terra 星)16 d 数据。本研究时间跨度为 2001—2015 年,在 MRT(Modis Reprojection Tool)软件中进行镶嵌、投影等预处理,最后通过研究区掩膜裁剪获得 345 期影像。黄淮海耕种区边界由中国西部环境与生态科学数据中心提供。

1.2 时序曲线的熟制分析

归一化植被指数(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)作为当前主流的植被生长状况反映指标,在尺度、时效以及表征植被的生物物理特征等方面具有明显优势^[18]。计算公式为:

$$NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_R}{\rho_{NIR} + \rho_R} \quad (1)$$

式中, ρ_{NIR} 为近红外波段地表反射率, ρ_R 表示红波段地表反射率。选用的 MODIS NDVI 产品每年有 23 个时像,通过建立 NDVI 值和时间的二维坐标系,可直观反映农作物的生长周期。一年中农作物从播种到收获, NDVI 值随物候特征经历了升高-降低的动态过程,从而形成了单峰或多峰时序曲线,每个波峰点代表了农作物生长周期的最旺盛点。因此,可以认为峰值点是最佳的熟制判断点,进而通过提取 NDVI 时间序列中的峰值频数判定熟制^[19]。

1.3 时序曲线平滑重构

太阳高度角、大气气溶胶以及积雪等外界因素影响近红外波段在地表的反射强度,导致时序曲线斜率迅速下降^[20]。突变形成的锯齿状“伪波峰”会削弱时序曲线的周期性变化趋势,影响复种指数提取的精度,所以对时序曲线进行平滑重构是提取复种指数的关键步骤。

Savitzky-Golay 滤波理论简单,是一种利用局部多项式回归模型平滑时序数据的时域低通滤波方法^[21]。公式如下:

$$Y_j^* = \frac{\sum_{i=-m}^m C_i Y_{j+i}}{N} \quad (2)$$

式中, Y^* 是函数拟合值, Y 为原始数据, $N = 2m + 1$ 为函数滤波窗口的值, C_i 表示第 i 个点的权重。

该方法对时间序列曲线平滑去噪的保真性效果主要受活动窗口大小和多项式阶数的影响,本研究参照申健等^[3]对关中地区复种指数的提取的方法,在 TIMESAT 软件中,多次调试窗口大小和拟合次数,最终确定(4, 2)为最佳拟合参数值。此外,为了削弱 S-G 滤波的边缘效应(越冬作物的冬前峰现象),选取一年的完整数据、该年上一年的下半年和该年下一年的上半年组成一个研究时段,即通过 2001—2003 年、2004—2006 年、2007—2009 年、2010—2012 年、2013—2015 年 5 个时段,分别提取 2002 年、2005 年、2008 年、2011 年、2014 年 5 个年份复种指数。

1.4 二次差分法提取复种指数

对于大区域尺度时间序列 NDVI 峰值的提取,二次差分法应用较为广泛,并且取得了较好的探测效果^[3-4, 22]。二次差分基本原理如下^[23]:首先计算相邻 NDVI 的差值,记为序列 S_1 ,公式如(3);其次根据公式(4),对 S_1 序列判断正负,并重新赋值,记为序列 S_2 ;最后依次求 S_2 序列前后元素差,记为序列 S_3 。

$$S_{1i} = NDVI_i - NDVI_{i-1} \quad (3)$$

$$S_{2i} = \begin{cases} -1, S_{1i} < 0 \\ 1, S_{1i} > 0 \end{cases} \quad (4)$$

$$S_{3i} = S_{2i+1} - S_{2i} \quad (5)$$

式中, i 代表序列中第 i 个元素。作物时序曲线上的波峰出现在序列 S_3 中元素为 -2 且前后元素皆为 0 的位置。

尽管时序曲线经过了 S-G 滤波的平滑重构,但仍有部分离散峰值点被提取出来,产生误差。主要原因有两个:一是由于非耕种区 NDVI 值较低,平滑后时序曲线特征不明显,微小的波动都形成了“伪波峰”,造成了错误提取;二是非生长期的杂草以及其他植被的生长,会出现双峰现象,影响提取精度。因此,还需要添加相应的约束条件对探测到的波峰进行取舍。通过分析黄淮海地区作物时序曲线和作物物候特征,本研究设定“横纵二维约束”:(1)波峰的峰值要大于 0.5;(2)两相邻的波峰之间至少包括 4 个时相。

获取耕地像元峰值频数后,使用公式(6)计算各行政单位复种指数。

$$C = \sum_i^n \frac{M_i}{N} \times 100\% \quad (6)$$

式中, M_i 表示从单个的 NDVI 时间序列曲线中提取的峰值频数, N 表示研究区或者行政区划内的像元总个数, C 表示耕地复种指数。

2 结果与分析

2.1 NDVI 时序曲线平滑处理效果

作物在不同的生长阶段(播种、出苗、拔节、抽穗、成熟),NDVI 时序曲线随之出现相应的波动,这种锯齿状的波动不利于熟制的判断和提取,利用 Savitzky-Golay 滤波对 2001—2015 年 MODIS NDVI 时间序列曲线做平滑去噪重构。对比原始曲线,如图 1 所示,无论是一年一熟制,还是两熟制,平滑处理在剔除干扰值的同时,保持了原始曲线的基本特征,并突出刻画了波峰与波谷相交替的状态,良好的表达了农作物生长的节律性,更适合于熟制提取。

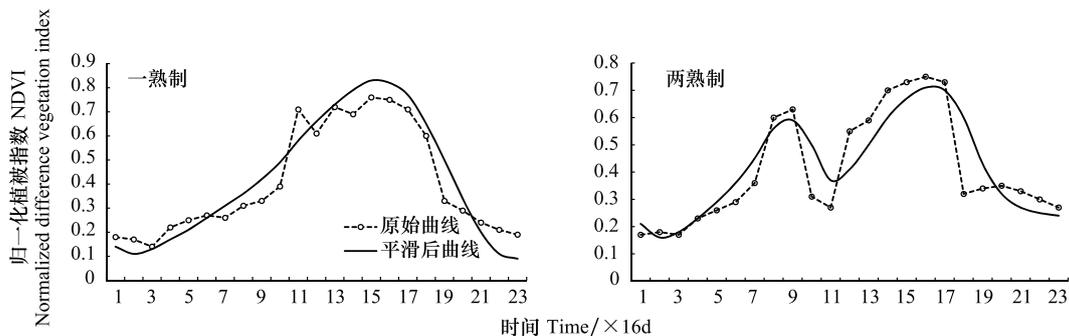


图 1 一年一熟和一年两熟 NDVI 时序曲线平滑前后效果对比

Fig.1 Comparison between before and after smoothing time-series NDVI date of one crop per annual and two crops per annual

2.2 黄淮海地区复种指数及时空演变特征

复种指数的分布格局是受自然因素影响,经过长期耕种逐渐形成的。由于人为操控因素的主导作用,短时间内复种指数格局不会发生较大改变,本研究在 R 环境下以 3 年数据为一期,分别绘制 2002 年、2005 年、2008 年、2011 年、2014 年共计 5 个年份复种指数空间分布图(图 2)。从总体分布特征来看,一熟制和两熟制提取结果基本符合我国复种指数随纬度增加而减小的大趋势,三熟制由于受到人类需求影响,作物的选择和利用方式差异性较大,分布特征不明显。不同熟制空间分布特征主要有:一年一熟制主要分布于河南省西部、山东省中东部和河北省大部分地区;一年两熟制则集中于河北省南部、鲁西南以及河南省东部,这里属于华北平原农耕区的中心地带,受水分、热量和经济等条件的影响,已形成历史悠久的冬小麦-夏玉米的耕作制度;一年三熟制分布格局不集中,以河北省西北为主要代表。

从行政区上讲,河北省南北纬度跨度较大,北部积温、降水等农作物生长的自然条件受到一定程度的限制,只能满足一季作物的生长;两熟制从南至北形成了一条逐渐变窄的“绿带”;河北省是京津冀重要的生鲜食品供应基地,三熟制分布在河北省西北和北京、天津城市周边这里主要以生长周期较短的经济作物为主,尤其是城市周边地区耕地已经由标准的北方玉米、小麦等简单的作物类型日益多样化,耕地种植大量的草皮和

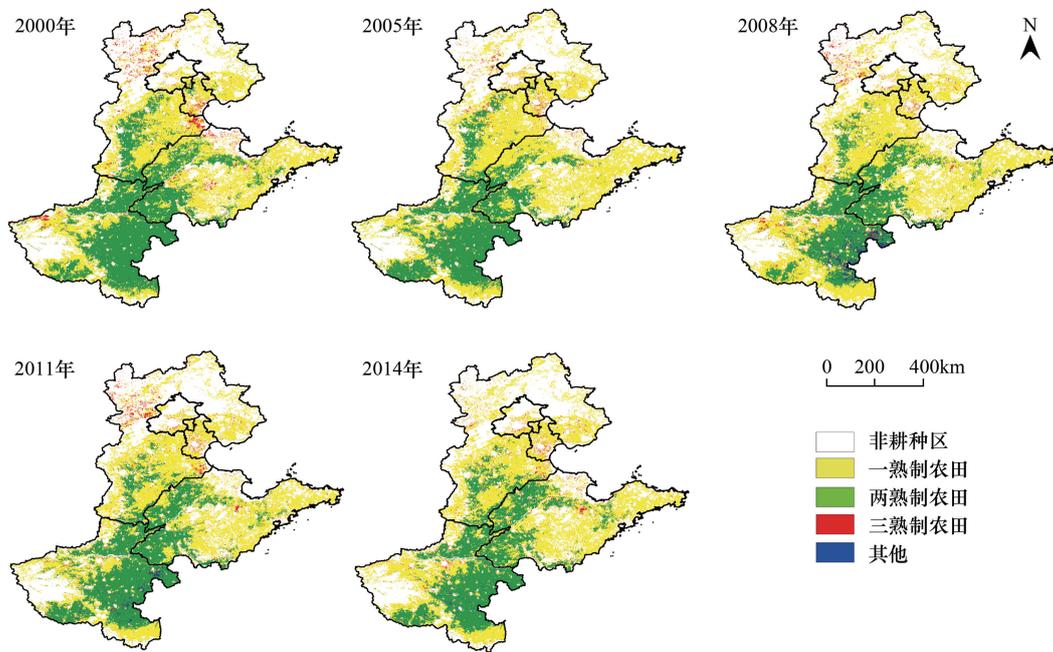


图2 黄淮海地区复种指数空间分布图

Fig.2 Spatial distribution maps of multiple cropping index in Huang-Huai-Hai regions

花卉等“装饰性的农业”开始起步,并逐渐成熟^[24]。山东省中东丘陵地带,素有“水果之乡”等称誉,以种植一年一熟的水果为主;西南部土壤肥沃,农业生产人口比重较大,是一年两熟耕种区。河南省东部大部分地区是国家高标准农田,种植条件与山东西部相似,属于一年两熟制。北京、天津经济发达,耕地资源有限,主要以一年一熟的水稻和经济作物为主。

黄淮海地区复种指数存在显著的时空差异(图3)。复种指数均值从大到小依次是河南省(165.2%)、山东省(140.5%)、河北省(128.8%)、北京市(104.5%)、天津市(103.4%)。各省市复种指数年际变化趋势表现较为一致:2002—2005年升高、2005—2011年降低、2011—2014年升高。自然条件和农村经济结构是影响复种指数的主要因素,短时间内,自然条件通常不会发生剧烈变化。查阅资料验证,黄淮海地区在研究时段未出现大规模自然灾害,因此,复种指数的年际变化可能取决于耕地的收益状况和轮作。2004年国家对于从事粮食

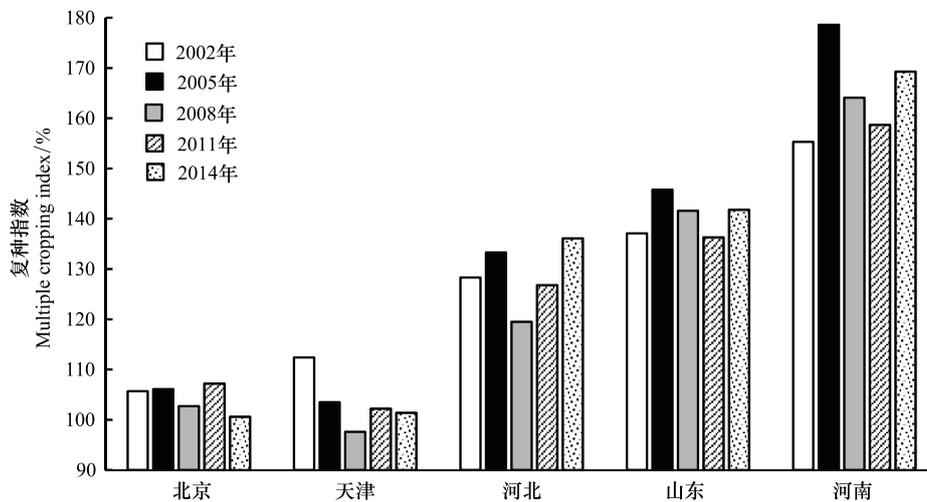


图3 黄淮海地区不同省市复种指数年际变化趋势

Fig.3 The inter-annual change of multiple cropping index in province or city

生产的农民实行粮食直补政策,提高了农民种粮的积极性,复种指数得到增加。但 2005 年后,粮食价格持续走低,农民更倾向于经济价值更高的一季作物,导致复种指数降低。2011 年后,国家宏观调控粮食生产使复种指数得到提升。

2.3 与其他遥感监测结果比较

由于参考数据有限,本文搜集整理了 2008 年之前的相关研究成果与本文进行对比(表 1)。从整体来看,相对误差位于-9.3%—2.5%区间内,表现出较高的耦合性。其中,最大值出现在河南省(2008 年,-9.3%),最小出现在北京市(2002 年,-0.5%)。梁守真等^[25]在研究 2000—2009 年环渤海地区复种指数时,与本文使用了相同的数据源、不同的处理方法(SPLINE 差值、领域比较法),对比结果,最大相对误差仅 6.6%,是对本文采用 Savitzky-Golay 滤波、二次差分技术反演黄淮海地区复种指数可行性的验证。另外,对比数据可以看出,本文提取的复种指数略低于前人的研究结果,是由于判断熟制进行波峰筛选设置的阈值过于严格引起的,但误差均在可接受范围内。

表 1 与其他遥感监测研究结果对比

Table 1 Difference comparison of remote sensing monitoring results

年份 Year	北京			天津			河北			山东			河南		
	文献 References	监测 Results	相对误差 Relative error/%												
2002	106.2 ^a	105.7	-0.5	117.1 ^a	112.4	-4.2	135.0 ^a	128.3	-5.3	143.5 ^a	137.1	-4.7	164.7 ^b	155.3	-6.1%
2005	108.2 ^a	106.1	-1.9	110.3 ^a	103.5	-6.6	135.7 ^a	133.3	-1.8	150.7 ^a	145.8	-3.4	183.0 ^c	178.6	-2.5%
2008	101.7 ^a	102.7	1.0	102.5 ^a	97.6	-5.0	125.4 ^a	119.5	-4.9	138.0 ^a	141.6	2.5	179.4 ^d	163.1	-9.3%
2011	—	107.2	—	—	102.2	—	—	126.8	—	—	136.3	—	—	158.7	—
2014	—	100.6	—	—	101.4	—	—	136.1	—	—	141.8	—	—	169.3	—
均值 Average	—	104.5	—	—	103.4	—	—	128.8	—	—	140.5	—	—	165.2	—

相对误差计算公式:(监测值-文献值)/监测值。a 代表数据来自梁守真^[25],b 代表数据来自朱孝林^[23],c 代表数据来自左丽君^[26],d 代表数据来自唐鹏钦^[27]

3 结论与讨论

本研究以黄淮海地区为例,基于 2005—2015 年 MODIS NDVI 时序数据,采用 Savitzky-Golay 滤波和二次差分技术提取耕地复种指数及其空间分布特征,以期为辨识人类活动方式和土地利用强度提供参考,同时也可以为黄淮海地区农业种植结构调整和种植方式优化提供决策依据。研究结果主要有:

(1) 黄淮海地区三省两市,河南省复种指数最高,在 2014 年达到了 169.3%,山东省次之,天津市最小。各省市在研究时段内,复种指数年际变化趋势大体一致,经历了升高-降低-升高的过程。自然条件和农村经济结构是影响复种指数的主要因素,短时间内,自然条件通常不会发生剧烈变化。因此,复种指数的年际变化主要取决于耕地的收益状况和轮作。从空间分布特征来看,黄淮海地区耕地熟制具有明显的地域性差异,二熟制主要集中于南部,东部和北部受地形和纬度影响主要以一熟制为主。

(2) 与前人监测结果比较,最大相对误差(-9.3%)验证了本研究设置含有阈值的二次差分算法在提取黄淮海地区复种指数的可行性。同时,根据三熟制的零星散布格局可以看出,将三熟制纳入研究内容,并未影响到黄淮海地区南部传统农耕区的熟制识别,佐证了研究成果的可靠性。

中国农业耕作具有典型的小农特点,农作物复杂多样且在地表不规则分布,不同作物之间或作物与裸地组成的混合像是影响复种指数提取精度的主要限制因素。针对这些问题,未来利用多平台、多分辨率遥感数据以及地面观测数据,确定不同区域的最优提取算法及其本地化参数,是实现复种指数的高精度监测的有效途径之一。此外,复种指数受经济形势和农民意愿等因素影响较大,因此,政策和管理措施的量化指标也有助于判断复耕指数的阈值和范围,可以作为下一步深入研究的辅助数据。

参考文献 (References):

- [1] Jiang L, Deng X Z, Seto K C. The impact of urban expansion on agricultural land use intensity in China. *Land Use Policy*, 2013, 35: 33-39.
- [2] 王宏广. 中国耕作制度 70 年. 北京: 中国农业出版社, 2005: 101-112.
- [3] 申健, 常庆瑞, 李粉玲, 秦占飞, 谢宝妮. 2000—2013 年关中地区耕地复种指数遥感动态监测. *农业机械学报*, 2016, 47(8): 280-287.
- [4] 张伟, 李爱农, 雷光斌. 复种指数遥感监测研究进展. *遥感技术与应用*, 2015, 30(2): 199-208.
- [5] Kühling I, Broll G, Trautz D. Spatio-temporal analysis of agricultural land-use intensity across the Western Siberian grain belt. *Science of the Total Environment*, 2016, 544: 271-280.
- [6] 戈大专, 龙花楼, 屠爽爽, 张英男. 黄淮海地区土地利用转型与粮食产量耦合关系研究. *农业资源与环境学报*, 2017, 34(04): 319-327.
- [7] 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.
- [8] 边金虎, 李爱农, 宋孟强, 马利群, 蒋锦刚. MODIS 植被指数时间序列 Savitzky-Golay 滤波算法重构. *遥感学报*, 2010, 14(4): 725-741.
- [9] 关兴良, 方创琳, 鲁莎莎. 中国耕地变化的空间格局与重心曲线动态分析. *自然资源学报*, 2010, 25(12): 1997-2006.
- [10] Devendra C, Thomas D. Smallholder farming systems in Asia. *Agricultural Systems*, 2002, 71(1/2): 17-25.
- [11] Verburg P H, Chen Y Q, Veldkamp T A. Spatial explorations of land use change and grain production in China. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2000, 82(1/3): 333-354.
- [12] 丁明军, 陈倩, 辛良杰, 李兰晖, 李秀彬. 1999—2013 年中国耕地复种指数的时空演变格局. *地理学报*, 2015, 70(7): 1080-1090.
- [13] 刘玉, 高秉博, 潘瑜春, 任旭红. 基于 LMDI 模型的黄淮海地区县域粮食生产影响因素分解. *农业工程学报*, 2013, 29(21): 1-10.
- [14] 洪舒蔓, 郝晋珉, 周宁, 陈丽, 吕振宇. 黄淮海平原耕地变化及对粮食生产格局变化的影响. *农业工程学报*, 2014, 30(21): 268-277.
- [15] 陈丽, 郝晋珉, 艾东, 朱传民, 李牧, 袁凌波. 黄淮海平原粮食均衡增产潜力及空间分异. *农业工程学报*, 2015, 31(2): 288-297.
- [16] 闫慧敏, 肖向明, 黄河清. 黄淮海多熟种植农业区作物历遥感检测与时空特征. *生态学报*, 2010, 30(9): 2416-2423.
- [17] 杨瑞珍, 肖碧林, 陈印军, 卢布. 黄淮海平原农业气候资源高效利用背景及主要农作技术. *干旱区资源与环境*, 2010, 24(9): 88-93.
- [18] 李卓, 孙然好, 张继超, 张翀. 京津冀城市群地区植被覆盖动态变化时空分析. *生态学报*, 2017, 37(22): 7418-7426.
- [19] Hill M J, Donald G E. Estimating spatio-temporal patterns of Agricultural productivity in fragmented landscapes using AVHRR NDVI time series. *Remote Sensing of Environment*, 2003, 84(3): 367-384.
- [20] 孙华生, 徐爱功, 林卉, 张连蓬. 基于不同算法的时间序列植被指数去噪效果分析. *江苏农业科学*, 2012, 40(5): 375-379.
- [21] Chen J, Jönsson P, Tamura M, Gu Z H, Matsushita B, Eklundh L. A simple method for reconstructing a high-quality NDVI time-series data set based on the Savitzky-Golay filter. *Remote sensing of Environment*, 2004, 91(3/4): 332-344.
- [22] Boschetti M, Stroppiana D, Brivio P A, Bocchi S. Multi-year monitoring of rice crop phenology through time series analysis of MODIS images. *International Journal of Remote Sensing*, 2009, 30(18): 4643-4662.
- [23] 朱孝林, 李强, 沈妙根, 陈晋, 吴锦. 基于多时相 NDVI 数据的复种指数提取方法研究. *自然资源学报*, 2008, 23(3): 534-544.
- [24] Helming K, Pérez-Soba M, Tabbush P. Sustainability Impact Assessment of Land Use Changes. Berlin, Heidelberg: Springer, 2008.
- [25] 梁守真, 马万栋, 施平, 陈劲松. 基于 MODIS NDVI 数据的复种指数监测——以环渤海地区为例. *中国生态农业学报*, 2012, 20(12): 1657-1663.
- [26] 左丽君, 董婷婷, 汪潇, 赵小丽, 易玲. 基于 MODIS/EVI 的中国北方地区耕地复种指数提取. *农业工程学报*, 2009, 25(8): 141-146.
- [27] 唐鹏钦, 吴文斌, 姚艳敏, 杨鹏. 基于小波变换的华北平原耕地复种指数提取. *农业工程学报*, 2011, 27(7): 220-225.