

2000—2013 年关中地区耕地复种指数遥感动态监测

申 健¹ 常庆瑞^{1,2} 李粉玲^{1,2} 秦占飞¹ 谢宝妮¹

(1. 西北农林科技大学资源环境学院, 陕西杨凌 712100; 2. 农业部西北植物营养与农业环境重点实验室, 陕西杨凌 712100)

摘要: 为了了解陕西关中地区 2000—2013 年耕地复种的时空变化特征, 以 250 m 16 d 最大值合成的 MODIS NDVI 影像为数据源, 使用 Savitzky - Golay 迭代滤波技术重构了农作物 NDVI 曲线, 应用二次差分法结合作物物候历, 提取了 14 a 的复种指数。结果表明: 关中地区复种指数空间上以西安市区为中心呈辐射状递减, 一年两熟制耕地主要分布于海拔 600 m 以下的渭河阶地, 其他地区主要实行一年一熟制; 2000—2013 年总体呈下降趋势, 从 2000 年的 156.4% 下降到 2013 年的 130%, 在 2005 年前后, 降幅分别为 2% 和 15.7%, 城镇化进程和经济型农业的推进是影响复种指数下降的主要因素; 与统计资料相比, 地市级尺度上平均相对误差为 0.3% ~ 15.1%。像元尺度上验证精度达到 93.7%, 研究结果能够为区域农业决策提供可靠的数据基础。

关键词: 耕地; 复种指数; 遥感监测; 物候; 时序 NDVI; Savitzky - Golay

中图分类号: S127; TP79 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2016)08-0280-08

Dynamic Monitoring of Cropping Index in Guanzhong Area Using Remote Sensing in 2000—2013

Shen Jian¹ Chang Qingrui^{1,2} Li Fenling^{1,2} Qin Zhanfei¹ Xie Baoni¹

(1. Collage of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China

2. Key Laboratory of Plant Nutrition and Agri-Environment in Northwest China, Ministry of Agriculture, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: Multiple cropping is an efficient way to improve the crop yield for Guanzhong area of Chinese Loess Plateau. The spatiotemporal pattern change of multiple cropping in Guanzhong area from 2000 to 2013 was investigated. Cropping index was employed to quantitatively assess the multiple cropping. The twi-difference algorithm was applied to estimate the cropping index based on the crop NDVI time-series reconstructed from 250 m 16 d MODIS NDVI datasets with the iterative Savitzky - Golay method. Results were as follows: the cropping index was shown to be the highest in Xi'an City and it was decreased with the increase of distance from the city; the croplands with double seasons were mainly located in the Weihe River plain with an altitude of less than 600 m; the single-season croplands were primarily distributed over the loess ravine regions of the northern Guanzhong area, Qinling mountain area of the southern Guanzhong area and alluvial plain along the Yellow River (eastern Guanzhong area). The cropping index in 2000—2013 was found to reveal a two-stage downward trend. During 2000—2005, the cropping index was reduced very slowly and the rate of the decline was less than 2%; however, the decrease rate became high during 2006—2013 which reached 15.7% in 2013. The development of urbanization and economical agriculture were demonstrated to significantly influence the decline of cropping index. Through the comparison with the statistics issued by the government, the average relative error of cropping index estimated from MODIS datasets was between 0.3% and 15.1% at the regional

收稿日期: 2016-05-07 修回日期: 2016-06-13

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863 计划)项目(2013AA102401-2)

作者简介: 申健(1985—), 男, 博士生, 主要从事遥感与 GIS 应用研究, E-mail: jshen28@hotmail.com

通信作者: 常庆瑞(1959—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事遥感与 GIS 应用研究, E-mail: changqr@nwsuaf.edu.cn

level, and the result also had an accuracy of 93.7% at the pixel level. The presented results provided useful and reliable information for the decision making on spatially-targeted local agricultural planning.

Key words: cropland; cropping index; remote sensing; phenology; NDVI time-series; Savitzky – Golay

引言

在当今我国城镇化进程不断加快和农村经济结构调整的情景下,一方面大量耕地持续向建设用地转换,另一方面经济作物不断受到重视,种植结构变化加剧,对我国粮食生产安全造成威胁^[1-2]。一直以来耕地复种是我国在有限空间的耕地上利用作物生长规律,以时间换空间增加粮食生产的重要途径之一^[3]。复种指数就是宏观上衡量和评价这一耕地资源利用程度的重要指标^[4]。多数学者使用一个区域内全年播种面积或收获面积占耕地面积的百分比计算该区域的复种指数^[5-6]。然而,在农业决策中,只依靠统计数据中的播种面积和耕地面积计算复种指数,缺少空间维度的信息,数据反映不直观,其精度和可靠性也存在一定的不确定性^[7]。如今,遥感技术的发展已经为大面积、高精度的快速获取农业信息积累了优异的技术和数据条件,通过遥感数据快速获取作物种植信息也成为学者们研究的热点^[8-11]。由于农作物在生长过程中表现出明显的物候特征^[12-14],能够反映农作物生长状态的时序归一化植被指数(Normalized difference vegetation index, NDVI)成为众多学者研究耕地复种情况的切入点^[15-19]。而 MODIS 等提供的高时频卫星数据则为获取作物整个生长周期的 NDVI 序列提供了有力支撑,从而促进了根据时序 NDVI 数据提取耕地复种指数的应用和研究。已有学者在流域^[17]、省级^[20]、大区域^[21]以及全国范围^[15, 18]反演了耕地复种指数,从不同尺度对耕地复种指数的遥感获取做了深入研究。但是,在地貌结构复杂、种植作物类型多样的陕西省,连片而且集中的耕地范围一般较小,针对此类混合地物多的小区域复种指数反演研究尚少。本文以陕西省关中地区耕地为对象,应用 Savitzky – Golay(S – G)迭代滤波方法重建 250 m 分辨率的 MODIS NDVI 16 d 间隔时序影像数据,与当地主要农作物物候历结合,从农作物生长 NDVI 曲线中提取 2000—2013 年耕地复种指数,分析其时空格局变化特征,探讨和验证在该地区使用遥感方法快速准确监测复种指数的可行性,以期对农业规划决策提供技术手段和数据基础。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

关中地区位于陕西省中部腹地,地理位置在

106°18′ ~ 110°38′E, 33°35′ ~ 35°52′N, 区域总面积约 55 833.9 km²。北部接壤黄土高原,以高原丘陵沟壑区为主,中部为渭河冲积平原,分布着三级渭河阶地及河漫滩,南靠秦岭,形成南北高、中间低的地势,海拔高度介于 319 ~ 3 748 m。区域气候属暖温带大陆季风型气候,四季分明,年均气温 7.8 ~ 13.5℃,年降水量 500 ~ 800 mm,冬春降水较少,春旱、伏旱频繁。作物有小麦、玉米、油菜、棉花、大豆等,以小麦和玉米为主。到 2013 年末,耕地面积和总播种面积分别为 1.49 × 10⁶ hm² 和 2.19 × 10⁶ hm²,比 2000 年末减少了 1.56 × 10⁵ hm² 和 1.78 × 10⁵ hm²。

1.2 数据来源与预处理

NDVI 来自 USGS 提供的 MODIS/Terra 16 d 最大值合成的植被指数产品 MOD13Q1(下载自:https://lpdaac.usgs.gov/dataset_discovery/modis/modis_products_table/mod13q1),空间分辨率为 250 m,时间跨度为 2000—2013 年,共 319 期。使用 MRT(MODIS reprojection tool)进行镶嵌并转换为 UTM 投影,然后用研究区矢量边界裁剪。2000、2005、2010 年耕地数据来自人机交互解译^[22],并重采样为 250 m。统计数据来自陕西省统计年鉴。

1.3 时序 NDVI 去噪重构

首先,使用 VI_Quality 波段的云标记对原始 NDVI 时序序列做线性内插去除云污染。由于受到土壤背景等多因素的影响,去云后的 NDVI 时序曲线仍然存在很多噪声,不能明显反映作物生长季变化。因此,本文使用 CHEN 等^[23]提出的一种改进型的 S – G 迭代滤波方法对去云后的 MODIS NDVI 时序数据进行平滑重构,在多次调试试验后,以(3,2)分别作为平滑窗口半径和多项式次数。由于 2000 年前 3 期数据缺失,而这段时期耕地植被活动非常弱,不会对本文目的产生影响,为了方便处理,使用最近的 2001 年前 3 期数据作为替代,补全序列。又由于 S – G 滤波器存在着边缘效应,在序列的前端和末端、平滑窗口半径范围内的序列不会被滤波器处理,因此在处理时将前一年末端和后一年前端的 3 期数据与当年 NDVI 时序数据组成新的序列,以确保当年所有时相的 NDVI 参与平滑计算。上述处理在 ENVI 4.8 + IDL 环境下编程实现。

1.4 复种指数提取与计算

耕地的复种指数在时序 NDVI 上表现为曲线的峰值频数。对于离散的 NDVI 序列,二次差分法被

广泛应用于时序 NDVI 峰值的提取^[24-25]。对于 n 个时序 NDVI 影像,每个像元位置构成一个长度为 n 的 NDVI 序列 s 。

(1)由 s 中后一个元素减去前一个元素,得到差值序列 s_1 ($n-1$ 个元素)。

(2) s_1 中元素大于等于 0,则赋值为 1,如果小于 0,则赋值为 -1,得到由 1 和 -1 组成的序列 s_2 。

(3)对 s_2 重复步骤(1),得到由 -2、0 和 2 组成的序列 s_3 ($n-2$ 个元素)。

(4)此时序列 s_3 中元素位置并不代表真实的 NDVI 时相,根据二次差分算法可知, s_3 中元素 i 的位置实际对应原序列 s 中 $i+1$,考虑到年初与年末位置 NDVI 波形状态并不影响复种指数的提取,为方便处理,这里将 s_3 序列首尾用 0 补齐。元素等于 -2 的位置对应的时相为波峰,等于 2 的位置为波谷。

为消除二次差分法的敏感性,结合研究区主要作物物候历(图 1)以及相关文献经验^[26-28],设定以下规则过滤主要作物 NDVI 峰值:作物独立生长期至少 3 个月,即本文使用数据的 6 个时相以上。峰值位置应位于 3 月中旬—5 月上旬,和 6 月下旬—9 月上旬。峰值大于 0.4,且前后波谷低于峰值的 20%。

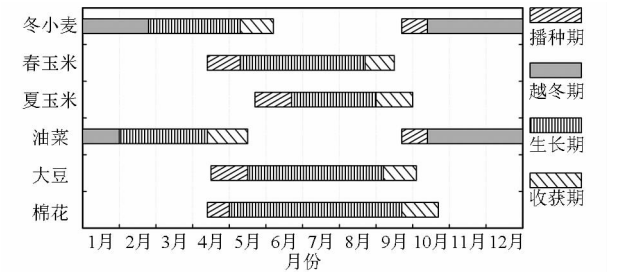


图 1 关中地区主要农作物物候历

Fig.1 Phenological calendar of main crops in Guanzhong area

研究区及各行政单元复种指数为

$$C_i = \sum_i^n \frac{M_i}{n} \times 100\% \tag{1}$$

式中 M_i ——像元 i 的峰值频数

n ——区域内耕地像元总数

复种指数年际变化趋势使用最小二乘法逐像元计算获得。以上计算过程均在 R 3.1.3 环境中实现。

2 结果与分析

2.1 复种指数空间格局特征分析

从 2000—2013 年研究区耕地平均复种指数空间分布可以看出(图 2),关中地区耕地复种情况沿南北方向有明显差异,北部黄土沟壑区和南部秦岭山区为一年一熟,基本分布于海拔高度 600 m 以上

的黄土台塬和山间谷地,耕地呈星状散布,很少有大面积连片,这些地区由于海拔较高,日均温度较低,作物通常需要更长的生长时间,难以实现一年两熟;同时研究区地处秦岭以北,为典型的暖温带大陆季风气候,冬季干燥寒冷,也难以形成两年三熟的情况。一年两熟制的耕地主要分布在中部海拔高度 600 m 以下的渭河平原,有少量分布于 600 ~ 900 m 之间,如凤翔县南部和西安市东南,这些耕地主要处于渭河阶地,土壤肥沃,四周高山高原围绕,夏秋热量集中,南北径流汇至渭河也保证了良好的灌溉条件,使得该区域非常适合一年两熟制度。但在大荔县、西安市近郊区、礼泉县南部和眉县、周至等地,年均复种指数低于 150%,尤其大荔县基本处于 100% 左右的水平,这主要是由于大荔县临近黄河,耕层土壤多自黄土高原冲积而来,浸漫形成,土质较为松散,不适宜小麦等浅根系作物生长,因此该地区主要种植大豆、棉花、玉米等作物,长期执行一年一熟制;西安市区由于土地开发,建设农业观光园区和休闲农庄,耕地退化和休耕情况严重,复种指数普遍不高;礼泉、眉县、周至等县近些年大力发展园林经济,相当数量的耕地已经逐渐转变为各类果园和苗木用地,如礼泉以苹果、梨、桃园为主,林下套种西瓜/秋粮作物,表现出复种指数水平很低而且耕地出现破碎化,眉县、周至的猕猴桃种植发展迅速,从图 2 中可以看出复种指数明显低于临近同质耕地。

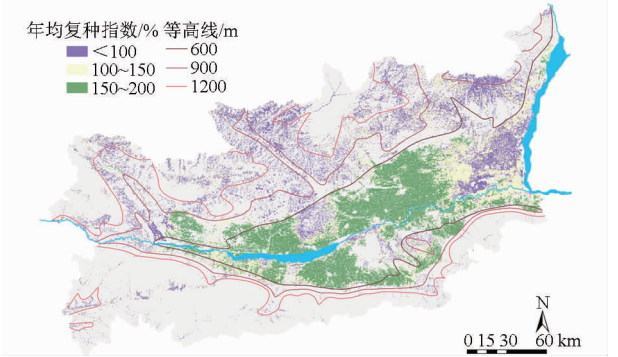


图 2 2000—2013 年关中地区年均耕地复种指数空间分布

Fig.2 Spatial distribution of annual mean cropping index from 2000 to 2013 in Guanzhong area

图 3 展示了关中地区各区县 2000—2013 年间平均复种指数,可以看出复种指数在县域上差异明显,并且以西安市区为中心(西安市区除外)呈辐射状逐渐降低。平均复种指数达到 180% 的区县有临潼、户县、长安、高陵、阎良、富平、三原、泾阳、秦都、渭城、兴平、武功、扶风等,它们都位于渭河 1、2 级阶地,是研究区重要的粮食生产基地,土地面积占研究区总面积的 18.6%,但耕地面积占到研究区耕地总面积的 25% 以上。复种指数水平最低的区县为旬

邑、宜君、印台、王益、澄城和大荔,除大荔县外,都分布于渭北台塬。

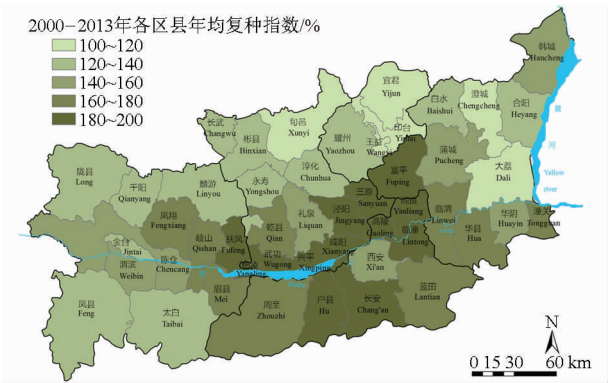


图 3 2000—2013 年关中地区各区县年均耕地复种指数
Fig. 3 Annual mean cropping index from 2000 to 2013
at county level of Guanzhong area

2.2 复种指数动态变化分析

从时间进程上看,关中地区复种指数总体呈持续下降趋势(图 4)。可分为 2 个阶段:缓慢下降阶段:2000—2005 年,复种指数略有降低,从 2000 年的 156.4% 下降到 2005 年的 154.2%,降幅不到 2%,复种指数发生变化的耕地面积占 2005 年总耕地的 34.2%,其中复种指数降低面积占 2005 年耕地总面积比例达到 20.5%,主要位于渭南市中部大荔、华县、蒲城、临渭区以及合阳等地,此外,在咸阳市西北至长武一线也有较明显的分布;眉县、富平等地复种指数则略有提升。快速下降阶段:2005 年后,复种指数呈现迅速降低的趋势,一度降到 140% 以下。2011 年略有回升,但到 2013 年已经降低为 130%,相比 2005 年降幅达到 15.7%,复种指数发生变化的面积占 2013 年总耕地的 39.8%,其中复种指数降低部分面积达到 28.5%,并且分布范围较广,各区县均有不同程度的下降,下降最突出的是眉县和周至;复种指数上升的分布范围较小,主要位于临渭区北部和大荔、蒲城交界处,大荔县东南也有小

范围耕地复种指数集中上升。

从 14 a 来复种指数年际变化趋势来看(图 5),各区县的动态变化并没有呈现出明显的格局特征。相对而言,位于北部黄土台塬的区县比南部秦岭山区的变化剧烈,但整体都呈下降趋势,没有一个区县出现复种指数上升的情况。复种指数下降趋势较为显著的有陇县、千阳、耀州、白水和阎良等区县,年均降幅达到 4% 以上。其中陇县、千阳、耀州和白水位于黄土高原沟壑区,近年来在发展苹果产业政策的推动下,苹果、樱桃等经济乔木栽种范围逐年增加,挤压了粮油作物的种植空间。耀州区随着铜川新区的建设和城镇化发展,造成较多的耕地转化和休耕情况,被征耕地闲置是影响其复种指数下降的主要原因。凤县、太白、岐山、宜君、淳化、韩城、澄城、蒲城、武功、兴平和长安等区县复种指数下降缓慢,且显著性水平很低,这其中有些是由于耕地数量极少如凤县、太白等,有些则是国家级粮食生产基地县如武功、兴平、岐山等,而宜君、澄城、韩城等离中心城市较远,城镇化发展缓慢,这些因素使耕种情况较为稳定,变化不大。

2.3 精度分析与验证

2.3.1 野外调查与随机验证

针对研究区不同的种植制度,地貌类型,海拔等条件,于 2011 年在长武县十里铺村、印台区印台村、大荔县严通村、扶风县巨良农场和杨凌区石家村分别设置了 3 km × 3 km 的样区(图 6),通过实地走访调查获取了 5 个样区的复种指数。表 1 给出了复种指数实地调查与遥感提取结果对比。长武样区的调查结果与本文结果误差最大,遥感提取复种指数高于调查结果 14.7%,相对误差达到 12.3%,同为黄土高原沟壑区的印台样区遥感提取结果仅高于调查结果 6.5%。这可能是由于长武样区距县城较近,并且居民地和耕地同处于塬面上,居民地周边非作

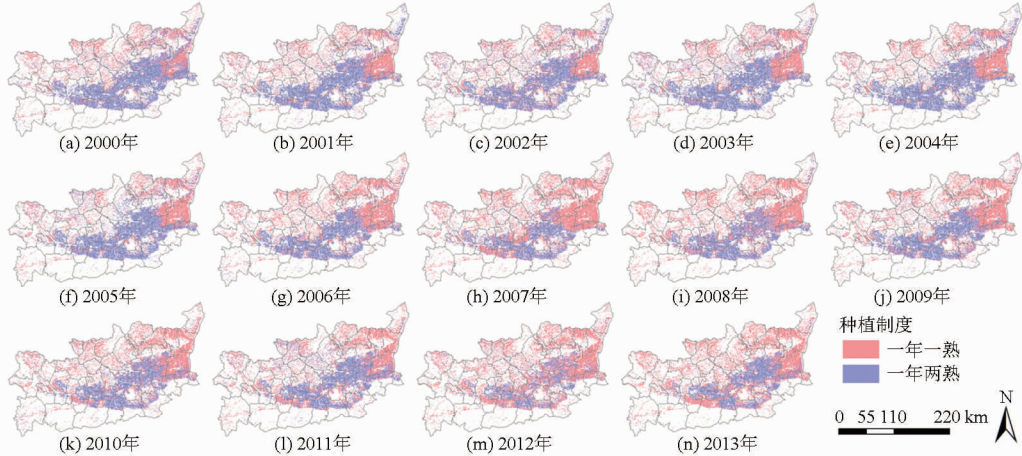


图 4 2000—2013 年关中地区种植制度空间分布
Fig. 4 Spatial distributions of cropping pattern from 2000 to 2013 in Guanzhong area

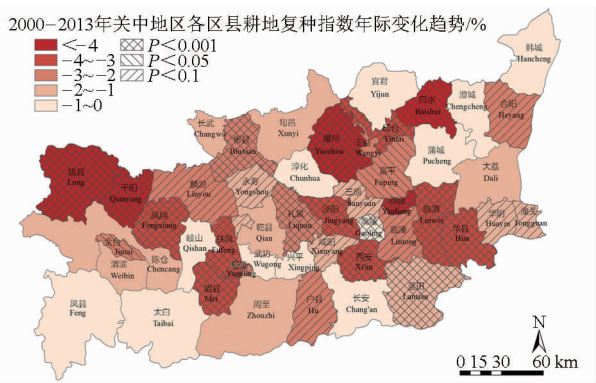


图 5 2000—2013 年关中地区各区县耕地复种指数年际变化趋势

Fig. 5 Annual changing trend of cropping index from 2000 to 2013 at county level of Guanzhong area

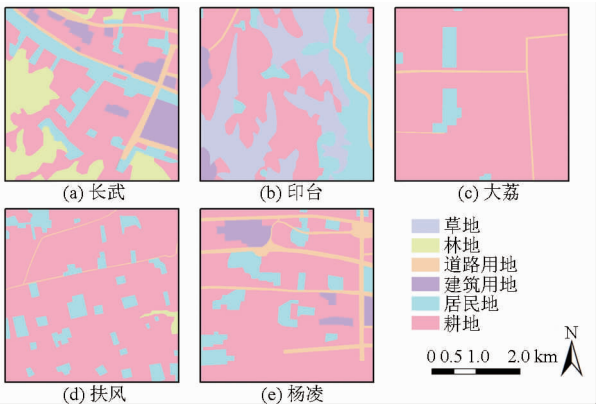


图 6 野外调查样区耕地示意图

Fig. 6 Diagrams of field sampling plots

表 1 实地调查与遥感提取复种指数对比

Tab. 1 Comparison of cropping indices between field survey and remote sensing retrieval

样区	实地调查/%	遥感提取/%	绝对误差/%	相对误差/%
长武	120	134.7	14.7	12.3
印台	100	106.5	6.5	6.5
大荔	103.5	107.7	4.2	4.1
扶风	200	197.7	-2.3	-1.2
杨凌	145.8	136.2	-9.6	-6.6

物植被对 NDVI 像元组份造成较大影响,而印台样区主要城镇位于川间,塬面仅有少量农村居民点分布,耕地像元同质性比长武样区相对较高。大荔样区地势平坦,耕地连片,多为规模化种植,由于毗邻黄河滩地,土壤质地较为松散,不太适宜种植小麦等浅根系作物,因此基本都是一年一熟制,本文提取复种指数为 107.7%,仅高于调查结果 4.1%。扶风和杨凌 2 个样区距离较近,同处于渭河阶地,熟制为一年两熟,但杨凌样区城镇化程度较高,建筑和道路用地快速扩张,也影响了农民种植积极性,使得近些年同一地块的复种指数波动较大,2011 年遥感提取结果仅为 136.2%,较调查结果低 6.6%,

而扶风样区调查结果 200%,全部为一年两熟制,高于遥感提取结果 1.2%。由此可见,在不同地貌类型等因素影响下,遥感提取复种指数结果精度有一定差异,耕地连片地区高于破碎化地区,但总体误差较小。

另外,设置随机样点进一步从像元尺度验证遥感提取结果。在研究区耕地范围以 5 km 为间距,随机布设了 100 个采样点。在 NDVI 序列遥感图像上获取其所在像元的原始 NDVI 曲线,参考专家知识和采样点所在区域的种植习惯,获得样点上 2000—2013 年的复种指数样本数据,共 1 400 个。表 2 为遥感提取复种指数与随机抽样调查结果的误差矩阵,总体精度达到 93.7%。随机抽样的结果说明遥感提取的复种指数结果具有可信度。

表 2 随机点验证误差矩阵

Tab. 2 Error matrix of random samples for verification

遥感提取	随机抽样				用户精度/%
	一年一熟	一年两熟	休耕	总计	
一年一熟	588	41	8	637	92.31
一年两熟	37	686	0	723	94.88
休耕	2	0	38	40	95.00
总计	627	727	46	1 400	
生产者精度/%	93.78	94.36	82.61		

2.3.2 统计资料验证

从 2001—2014 年陕西统计年鉴中收集了各地市的上一年总播种面积和年末耕地面积,以二者比值作为该年耕地复种指数,与遥感提取结果进行对比(表 3)。结果表明,2 种方法计算结果中平均相对误差最高的是 2012 年,为 15.1%,线性回归斜率为 0.43,最低为 2005 年的 0.3%,线性回归斜率为 0.88。其中,相对误差较大的有 2006 年的铜川市、2012 年和 2013 年的西安市,超过了 20%。14 a 中,相对误差大于 15% 的年份,铜川市最多,有 5 a,其他依次为西安市、渭南市和咸阳市,分别为 4、3、1 a。宝鸡市最大误差为 14.8%,出现在 2012 年。除此以外,其他年份和地区的遥感提取结果误差相对较小,没有明显异常。14 a 来与统计资料最为接近的是咸阳市,除了 2000、2001、2012 年略高,其他年份的相对误差都在 10% 以内。整体来看,遥感提取结果在地市级行政单元尺度上表现出较高的耦合性,除了个别年份外,总体上误差保持在可接受范围内。

在县域行政单元上,只收集到部分年份和区县的播种和耕地数据,在剔除部分异常值后,将所收集数据计算所得复种指数与对应年份和区县的遥感提取结果作线性回归,结果见图 7。其线性回归斜率为 0.822, R^2 为 0.76,并通过了 0.01 水平的显著性

检验。由图 7 可知,遥感提取的复种指数普遍高于统计数据,主要原因可能是由于遥感提取方法将符合设定规则的所有作物都计算在内,而多数县域数据来源于统计资料,仅包含粮食作物的播种面积,另一方面部分地市级统计资料的数据可靠性也有一定的不确定性^[7,29]。

表 3 关中地区复种指数的各地市统计资料与遥感提取结果比较

年份	西安		铜川		宝鸡		咸阳		渭南	
	统计	监测	统计	监测	统计	监测	统计	监测	统计	监测
2000	172.9	183.5	126.4	116.3	144.9	146.1	141.9	156.2	131.2	153.6
2001	172.3	182.6	129.2	118.4	140.8	146.0	139.8	161.1	121.3	140.0
2002	177.0	174.5	124.8	119.7	151.2	145.7	148.6	151.8	127.7	145.9
2003	178.1	185.6	125.0	123.3	149.5	151.2	150.1	161.1	130.1	136.5
2004	186.2	184.3	134.1	115.5	149.9	149.8	150.7	160.2	131.1	139.3
2005	189.7	183.9	140.8	130.9	152.6	147.6	152.2	166.9	136.0	139.0
2006	191.5	175.1	139.9	102.7	154.1	142.5	158.1	146.9	136.7	123.9
2007	195.9	162.5	115.7	108.4	138.4	127.7	151.7	137.5	125.9	114.0
2008	193.5	168.5	124.7	104.8	141.8	127.0	152.0	144.0	135.8	123.3
2009	195.6	168.4	127.0	106.6	143.6	139.4	150.7	153.6	145.0	123.0
2010	196.1	164.2	132.3	107.1	145.0	130.1	153.7	146.8	145.6	126.0
2011	186.7	163.4	125.3	117.3	137.5	130.3	144.2	154.5	138.4	136.7
2012	189.7	141.0	122.1	106.4	140.0	119.3	144.9	128.7	134.9	119.9
2013	191.0	147.7	122.7	102.1	139.7	119.4	146.3	135.6	134.1	127.4

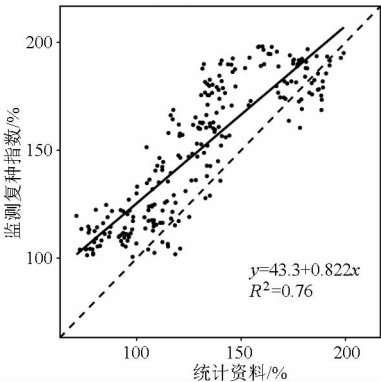


图 7 部分区县统计资料与遥感提取复种指数比较
Fig.7 Comparison of cropping index from retrieving of remote sensing and statistics

3 结论

(1)空间上研究区复种指数呈现明显的辐射状格局,以西安市区为中心向四周递减,一年两熟制主要分布于低海拔的渭河阶地,渭北黄土台塬和南部秦岭山地因海拔较高、耕地坡度大、灌溉条件差等原

因为一年一熟,黄河沿岸的冲积平原由于土壤质地等结构性因素不适宜小麦等夏粮作物生长,也以一年一熟制为主。
(2)2000—2013 年,关中地区耕地复种指数总体呈现下降趋势,从 2000 年的 156.4% 降低到 2013 年的 130%。其中 2005 年以前,下降速度缓慢,2005 年以来,减少速度较快。不同县域单元上,复种指数变化差异明显,以粮食生产为主的区县复种指数变化较小,以果业生产为主的区县复种指数下降较快。离中心城市距离较近,城镇化发展较快的区域下降明显。

(3)本文所用数据和方法具有较高的可用性和可重复性。经过实地调查、随机采样和不同行政单元尺度统计数据 3 种方法检查验证,中分辨率遥感数据在中等尺度(几万 ~ 几十万 km²) 区域范围、地形地貌较为复杂的情况下,仍然能够得到较高的精度。像元尺度精度达到 93.7%,地市级相对误差小于 15.1%,可以为农业决策提供可靠的数据基础。

参 考 文 献

1 WANG L, LI C, YING Q, et al. China's urban expansion from 1990 to 2010 determined with satellite remote sensing[J]. Chinese Science Bulletin, 2012, 57(22): 2802–2812.
2 LICHTENBERG E, DING C. Assessing farmland protection policy in China[J]. Land Use Policy, 2008, 25(1): 59–68.
3 刘巽浩. 论我国耕地种植指数(复种)的潜力[J]. 作物杂志, 1997(3): 1–3.
LIU Xunhao. A study on the potential of the multiple cropping index in China[J]. Crops, 1997(3): 1–3. (in Chinese)
4 张伟,李爱农,雷光斌. 复种指数遥感监测研究进展[J]. 遥感技术与应用, 2015, 30(2): 199–208.
ZHANG Wei, LI Ainong, LEI Guangbin. Recent progresses in monitoring multiple cropping index by using remote sensing

- technologies[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2015, 30(2): 199–208. (in Chinese)
- 5 XIE H, LIU G. Spatiotemporal differences and influencing factors of multiple cropping index in China during 1998—2012[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2015, 25(11): 1283–1297.
- 6 金株兰,侯立春,徐磊. 长江中下游地区耕地复种指数变化与国家粮食安全[J]. *中国农学通报*, 2011, 27(17): 208–212. JIN Shulan, HOU Lichun, XU Lei. The relationship of multiple cropping index of arableland change and national food security in the middle and lower reaches of Yangtze River[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2011, 27(17): 208–212. (in Chinese)
- 7 汪涌,王滨,马仓,等. 基于耕地面积订正的中国复种指数研究[J]. *中国土地科学*, 2008, 22(12): 46–52. WANG Yong, WANG Bin, MA Cang, et al. Study on the multiple cropping index based on revised cultivated land area in China[J]. *China Land Science*, 2008, 22(12): 46–52. (in Chinese)
- 8 ZHENG B, MYINT S W, THENKABAIL P S, et al. A support vector machine to identify irrigated crop types using time-series Landsat NDVI data[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2015, 34: 103–112.
- 9 SHAO Y, LUNETTA R S, WHEELER B, et al. An evaluation of time-series smoothing algorithms for land-cover classifications using MODIS–NDVI multi-temporal data[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2016, 174: 258–265.
- 10 LI Q, WANG C, ZHANG B, et al. Object-based crop classification with Landsat-MODIS enhanced time-series data[J]. *Remote Sensing*, 2015, 7(12): 16091–16107.
- 11 HAO P, WANG L, NIU Z. Comparison of hybrid classifiers for crop classification using normalized difference vegetation index time series: a case study for major crops in north Xinjiang, China[J]. *PLOS ONE*, 2015, 10(9): e137748.
- 12 BROWN M E, DE BEURS K M, MARSHALL M. Global phenological response to climate change in crop areas using satellite remote sensing of vegetation, humidity and temperature over 26 years[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2012, 126: 174–183.
- 13 SON N T, CHEN C F, CHEN C R, et al. A phenology-based classification of time-series MODIS data for rice crop monitoring in Mekong delta, Vietnam[J]. *Remote Sensing*, 2014, 6(1): 135–156.
- 14 苏伟,姜方方,朱德海,等. 基于决策树和混合像元分解的玉米种植面积提取方法[J]. *农业机械学报*, 2015, 46(9): 289–295, 301. SU Wei, JIANG Fangfang, ZHU Dehai, et al. Extraction of maize planting area based on decision tree and mixed-pixel unmixing methods[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46(9): 289–295, 301. (in Chinese)
- 15 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 Huimin, LIU Jiyan, CAO Mingkui. Remotely sensed multiple cropping index variations in China during 1981—2000[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2005, 60(4): 559–566. (in Chinese)
- 16 左丽君,张增祥,董婷婷,等. MODIS/NDVI 和 MODIS/EVI 在耕地信息提取中的应用及对比分析[J]. *农业工程学报*, 2008, 24(3): 167–172. ZUO Lijun, ZHANG Zengxiang, DONG Tingting, et al. Application of MODIS/NDVI and MODIS/EVI to extracting the information of cultivated land and comparison analysis[J]. *Transactions of the CSAE*, 2008, 24(3): 167–172. (in Chinese)
- 17 徐昔保,杨桂山. 太湖流域 1995—2010 年耕地复种指数时空变化遥感分析[J]. *农业工程学报*, 2013, 29(3): 148–155. XU Xibao, YANG Guishan. Spatial and temporal changes of multiple cropping index in 1995—2010 in Taihu Lake basin, China[J]. *Transactions of the CSAE*, 2013, 29(3): 148–155. (in Chinese)
- 18 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[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2015, 70(7): 1080–1090. (in Chinese)
- 19 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.
- 20 何月,张小伟,李仁忠,等. 浙江省作物多熟种植制度遥感反演及其时空格局[J]. *生态学杂志*, 2011, 30(12): 2827–2835. HE Yue, ZHANG Xiaowei, LI Renzhong, et al. Remote sensing retrieving of multiple cropping systems and their spatiotemporal patterns in Zhejiang province[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2011, 30(12): 2827–2835. (in Chinese)
- 21 潘学鹏,李改欣,刘峰贵,等. 华北平原冬小麦面积遥感提取及时空变化研究[J]. *中国生态农业学报*, 2015, 23(4): 497–505. PAN Xuepeng, LI Gaixin, LIU Fenggui, et al. Using remote sensing to determine spatio-temporal variations in winter wheat growing area in the North China Plain[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2015, 23(4): 497–505. (in Chinese)
- 22 XIE B, JIA X, QIN Z, et al. Vegetation dynamics and climate change on the loess plateau, China: 1982—2011[J]. *Regional Environmental Change*, 2015. DOI: 10.1007/s10113–015–0881–3.
- 23 CHEN J, JONSSON P, TAMURA M, et al. A simple method for reconstructing a high-quality NDVI time-series data set based on the Savitzky–Golay filter[J]. *Remote Sensing of the Environment*, 2004, 91(3–4): 332–344.
- 24 范锦龙,吴炳方. 复种指数遥感监测方法[J]. *遥感学报*, 2004, 8(6): 628–636. FAN Jinlong, WU Bingfang. A methodology for retrieving cropping index from NDVI profile[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2004, 8(6): 628–636. (in Chinese)
- 25 BOSCHETTI M, STROPPIANA D, BRIVIO P A, et al. Multi-year monitoring of rice crop phenology through time series analysis of MODIS images[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2009, 30(18): 4643–4662.

26 WU W, YANG P, TANG H, et al. Characterizing spatial patterns of phenology in cropland of China based on remotely sensed data[J]. *Agricultural Sciences in China*, 2010, 9(1): 101 – 112.

27 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 Xiaolin, LI Qiang, SHEN Miaogen, et al. A methodology for multiple cropping index extraction based on NDVI time-series [J]. *Journal of Natural Resources*, 2008, 23(3): 534 – 544. (in Chinese)

28 张喜旺,秦耀辰,秦奋. 综合季相节律和特征光谱的冬小麦种植面积遥感估算[J]. *农业工程学报*, 2013, 29(8): 154 – 163.
ZHANG Xiwang, QIN Yaochen, QIN Fen. Remote sensing estimation of planting area for winter wheat by integrating seasonal rhythms and spectral characteristics[J]. *Transactions of the CSAE*, 2013, 29(8): 154 – 163. (in Chinese)

29 张荣群,王盛安,高万林,等. 基于时序植被指数的县域作物遥感分类方法研究[J]. *农业机械学报*, 2015, 46(增刊): 246 – 252.
ZHANG Rongqun, WANG Sheng'an, GAO Wanlin, et al. Remote-sensing classification method of county-level agricultural crops using time-series NDVI[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46(Supp.): 246 – 252. (in Chinese)

(上接第 279 页)

14 陈玲,郝文乾,高德亮. 光学影像纹理信息在林业领域的最新应用进展[J]. *北京林业大学学报*, 2015, 37(3): 1 – 12.
CHEN Ling, HAO Wenqian, GAO Deliang. The latest applications of optical image texture in forestry [J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2015, 37(3): 1 – 12. (in Chinese)

15 许章华,刘健,余坤勇. 纹理特征对松林郁闭度的判别能力研究[J]. *江西农业大学学报*, 2015, 37(6): 1016 – 1026.
XU Zhanghua, LIU Jian, YU Kunyong. Discriminant abilities of textual features onpine forest canopy density [J]. *Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis*, 2015, 37(6): 1016 – 1026. (in Chinese)

16 烟贯发,张雪萍,王书玉,等. 基于改进的 PSO 优化 LSSVM 参数的松花江哈尔滨段悬浮物的遥感反演[J]. *环境科学学报*, 2014, 34(8): 2148 – 2156.
YAN Guanfa, ZHANG Xueping, WANG Shuyu, et al. Remote-sensing retrieval of suspended solids based on improved PSO-LSSVM at the Harbin section of the Songhua River [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2014, 34(8): 2148 – 2156. (in Chinese)

17 FERNANDEZ-MARTINEZ J L, GARCIA-GONZALO E. Stochastic stability analysis of the linear continuous and discrete PSO models[J]. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 2011, 15(3): 405 – 423.

18 FIROUZI B B, SADEGHI M S, NIKNAM T. A new hybrid algorithm based on PSO, SA, and K-means for cluster analysis[J]. *International Journal of Innovative Computing Information and Control*, 2010, 6(7): 3177 – 3192.

19 仝慧杰,冯仲科,罗旭,等. 森林生物量与遥感信息的相关性[J]. *北京林业大学学报*, 2007, 29(2): 156 – 159.
TONG Huijie, FENG Zhongke, LUO Xu, et al. Correlations between forest biomass and remote sensing informaton [J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2007, 29(2): 156 – 159. (in Chinese)

20 王月婷,张晓丽,杨慧乔,等. 基于 Landsat 8 卫星光谱与纹理信息的森林蓄积量估算[J]. *浙江农林大学学报*, 2015, 32(3): 384 – 391.
WANG Yueting, ZHANG Xiaoli, YANG Huiqiao, et al. Forest volume estimation based on spectral and textural information from the Landsat 8 satellite [J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2015, 32(3): 384 – 391. (in Chinese)