

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2022.02.016

基于时序EVI的2000—2019年吉林省耕地生产力时空分析

张超^{1,2} 陈婉铃¹ 马佳妮¹ 鄢文聚² 高璐璐¹ 王欢¹

(1. 中国农业大学土地科学与技术学院, 北京 100083; 2. 自然资源部农用地质量与监控重点实验室, 北京 100035)

摘要: 吉林省是中国重要的粮食主产区和商品粮生产基地,全面、客观地揭示吉林省近20年耕地生产力水平,对挖掘区域增产潜力,推动耕地资源可持续利用,保障区域粮食安全具有重要意义。本文基于Google Earth Engine (GEE)平台提取2000—2019年吉林省MODIS-EVI数据,结合变异系数和Sen-Mann Kendall趋势检验,构建耕地生产力时空分析方法,研究吉林省20年耕地生产力时空变化、稳定性及变化趋势。结果表明:吉林省耕地生产力在20年间整体处于上升趋势,中西部耕地集中连片区生产力的变化趋势好于东部较为破碎耕地片区,西部耕地与东部耕地生产力差距逐渐缩小。吉林省东部山区的耕地生产力高于西部平原区,耕地生产力低值区位于城镇周边和西北部盐碱泡沼分布密集的低洼地带;高值区集中在河流附近耕地连片区域。不同地貌类型成因中,湖成地貌、风成地貌条件下耕地生产力低于流水地貌和火山熔岩地貌。耕地生产力稳定性呈东南高西北低的趋势,其中水田的生产力稳定性优于旱地和水浇地。利用时序遥感数据监测吉林省耕地生产力,可为高标准农田建设、耕地质量提升等工程的开展提供技术支撑。

关键词: 耕地生产力; 增强型植被指数; 时序分析; 谷歌地球引擎; MODIS

中图分类号: F301.21 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2022)02-0158-09 OSID: 

Analysis on Spatial-temporal Changes of Cultivated Land Productivity in Jilin Province from 2000 to 2019 Based on EVI Time Series

ZHANG Chao^{1,2} CHEN Wanling¹ MA Jiani¹ YUN Wenju² GAO Lulu¹ WANG Huan¹

(1. College of Land Science and Technology, China Agricultural University, Beijing 100083, China

2. Key Laboratory for Agricultural Land Quality Monitoring and Control, Ministry of Natural Resources, Beijing 100035, China)

Abstract: The spatiotemporal change characteristics of cultivated land productivity (CLP) are essential to ensure regional food security and promote the sustainable use of cultivated land resources. Jilin Province is an important major grain production area and commodity grain production base in China. If the cultivated land productivity level of Jilin Province over the past 20 years can be both quickly and fully reflected, it would be helpful to discover the potential of increasing production of this area. Based on the hypothesis that the EVImax was a proxy of cultivated land productivity, the moderate resolution imaging spectroradiometer (MODIS) data with 250 m spatial resolution and 16 d temporal resolution in Google Earth Engine (GEE) platform was used to calculate CLP in Jilin Province. The coefficient of variation method was used to study the stability of cultivated land productivity. The level of CLP was explored by using the EVImax mean from 2000 to 2019, and the changing trend and amplitude of CLP was analyzed in study period by using both Theil-Sen median trend analysis and the Mann-Kendall (MK) test. The result of the trend and stability were integrated to acquire the level of CLP. Using time series remote sensing data to monitor regional crop growth and yield levels can objectively assess the productivity of cultivated land, and provide technical support for farmland construction and improvement of cultivated land quality. The results showed that the overall change amplitude was dominated by a slightly increasing trend. In cultivated land concentrated area, the change trend of productivity was better than that of broken cultivated land area in the east. The area with improvement of CLP accounted for 95.66%, mainly distributed in the central and northwestern of Jilin. The area with degradation of CLP accounted for 4.34%, mainly distributed in the southeast of Jilin or the surrounding of cities. The CLP level was

generally high in the southeast and low in the northwest in cultivated land in Jilin, China. The area with the lowest productivity was located in the northwest of Jilin. The low-value areas of CLP were located in low-lying areas around towns and in low-lying areas where saline-alkali marshes were distributed in the northwest. High-value areas of CLP were concentrated in contiguous areas of farmland near rivers. In terms of the genesis of different landform types, volcanic lava landforms had the highest productivity of cultivated land, followed with flowing water landforms, wind-formed landforms and lacustrine landforms. The stability of CLP showed a trend of higher in southeast and lower in northwest. The productivity stability of paddy field was better than that of dryland and irrigated land. Therefore, the results indicated that time series remote sensing data can be used to objectively monitor the CLP. Different strategies of cultivated land protection and productivity promotion should be implemented in Jilin Province, such as stabilizing the eastern grain-producing areas, increasing the central grain production core area, and focusing on the western grain production reserve areas.

Key words: cultivated land productivity; enhanced vegetation index; time series analysis; Google Earth Engine; MODIS

0 引言

耕地生产力是指单位面积耕地生产粮食的能力^[1],包括耕地自然生产力、耕地生产稳定性和耕地变化趋势^[2-3]。科学评价区域耕地生产力,可以为挖掘区域增产潜力,推动耕地资源可持续利用提供参考,对于保障区域粮食安全具有重要的理论价值与现实意义^[4-5]。目前,相关学者结合采样数据和理论模型来核算耕地产能^[6]。有学者通过农业生态区划模型^[7]、作物生长模型^[8]和农业生产潜力模型^[9]等评价耕地生产力。由于参数设定多,模型校验难,难以量化各因子对耕地生产力的贡献。遥感技术覆盖范围大,时间与空间分辨率逐步提高,逐渐应用于耕地精准监测和生产力评价等方面。

由多光谱遥感数据计算的植被指数是反映植被现实状况的指标^[10-12],已有研究表明^[13-15],植被指数反映植被生长状态和生物量。利用长时间序列植被指数,可以表征耕地生产力。在全球和区域范围内常用的植被指数包括归一化差值植被指数(Normalized difference vegetation index, NDVI)和增强型植被指数(Enhanced vegetation index, EVI)^[16-17]。已有研究表明,EVI通过大气效应的削减及对植被冠层背景信号的去耦合,改进了NDVI在植被高覆盖地区易饱和、植被低覆盖区受土壤背景影响较大的不足,能更好地揭示植被的季节性变化特征^[18-19]。目前已被广泛应用于作物分类^[20-21]、植被监测^[22-23]、植被生产力估测^[24-25]和自然灾害监测等研究^[26]。相关学者选取NDVI、EVI、净初级生产力(Net primary productivity, NPP)、总初级生产力(Gross primary productivity, GPP)^[27-29]等指标来评估耕地生产力。部分学者选取一年或若干年的植被指数对耕地生产力状况进行诊断,由于年内和年间作物长势变化较大,短期遥感

监测难以客观表达耕地生产力的稳定性与长期趋势^[30]。趋势是时间序列数据中包含的重要信息,相关学者采用主成分分析(Principle component analysis, PCA)、线性回归分析(Linear regression, LR)、Pearson 相关系数、Hurst 指数等^[31]提取并分析时间序列趋势。Theil - Sen median 趋势分析和Mann - Kendall 检验计算较为简便,数据无需服从正态分布,不受异常值的影响。两种方法结合,可以反映植被变化趋势,量化变化幅度。此外,对于基于多年时序遥感数据的区域监测和评价,传统的数据处理方法对大范围遥感影像数据的下载、预处理等耗时耗力,难以快速获取长时期连续的高质量遥感数据。谷歌地球引擎(Google Earth Engine, GEE)在云端存储了海量的数据集,用户可利用云计算进行遥感数据分析与处理,显著提高运行效率,节省本地存储空间^[32]。

本文在 GEE 平台的支持下,利用吉林省 2000—2019 年 MODIS - EVI 时序数据及同时期气象数据,辅以土地利用数据和耕地质量评价数据,结合变异系数法、Sen - Mann Kendall 趋势分析检验法等,研究吉林省耕地生产力多年时空变化、耕地生产力稳定性及变化趋势。以期更加全面、客观地揭示吉林省 20 年耕地生产力水平及其变化,以利于采取差异化措施利用和保护耕地。

1 研究区概况与数据源

1.1 研究区概况

吉林省位于中国东北地区(40°52′~46°18′N, 121°38′~131°19′E,图1),属于温带大陆性季风气候,四季分明,雨热同季。年平均降水量在400~900 mm之间,多年平均气温为3~9℃。地势东南高、西北低,研究区的基本地貌以中部大黑山为界,分为东部山地与中西部平原两大地貌单元,依据海拔分为

平原、台地、丘陵、山地等地貌区。从地貌成因来看,吉林省以流水地貌为主,占全省面积 84.02%,湖成地貌和风成地貌多分布于吉林省西北部地区,分别占全省面积的 2.55% 和 5.29%。火山熔岩地貌分布于吉林省东南地带,占全省面积的 8.14%。

吉林省是中国的粮食主产区和商品粮生产基地之一。全省耕地面积 $5.535 \times 10^6 \text{ hm}^2$, 占吉林省面积的 28.98%。70% 耕地主要分布在中、西部平原

地区。耕地类型有旱地、水田、水浇地,以旱地和水田为主。耕作制度为一年一熟制,种植结构稳定,主要农作物有玉米和水稻,其生育期为 5—9 月。粮食平均单产地区间差异较大,在全国处于中等偏下水平。耕地质量利用等别分布在 8~13 等。自然灾害以低温冷害、干旱、洪涝、霜冻为主。近年来,吉林省部分区域土地盐碱化和沙化逐年加重,耕地出现了耕层变薄,土壤有机质含量降低等问题。

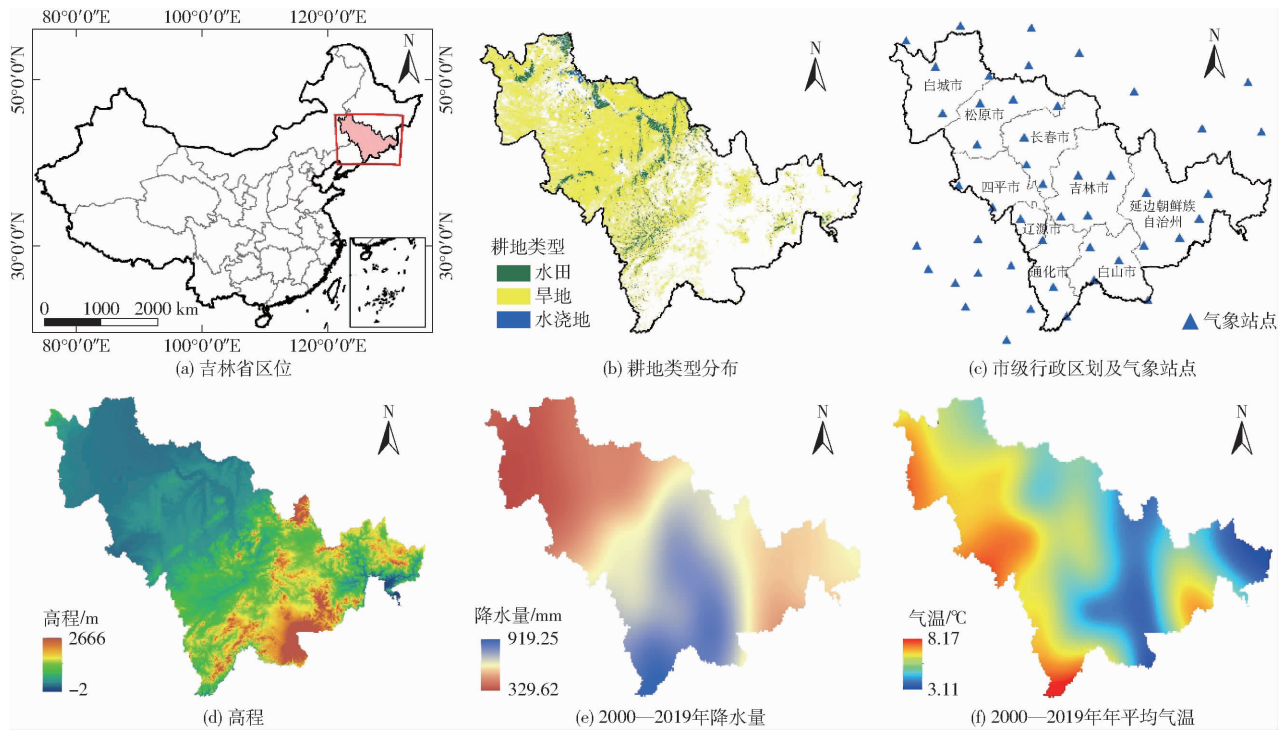


图 1 研究区概况

Fig. 1 Overview of study area

1.2 数据来源与预处理

采用由 250 m 的 MODIS - Terra MOD13Q1 版本 6 的 16 d 表面反射率数据生成的 EVI 数据集。此数据集存储在 GEE 平台中,已经过大气校正,总体图像质量较好。为获得高质量的连续植被指数时序数据,通过 Savitzky - Golay (S - G) 滤波,对数据集进行处理,得到 2000—2019 年 EVI 时间序列数据。

耕地数据来源于 2019 年度全国耕地质量等级更新评价成果。气象数据来自国家气象科学数据中心 (<http://data.cma.cn/>),包括吉林省及其周边 56 个气象站点记录的日降水量 (0.1 mm) 和日平均气温 (0.1℃) 数据,基于日观测数据,经处理得到吉林省年平均气温和年降水量的空间分布。吉林省粮食总产量、粮食播种面积数据来源于《吉林省国民经济和社会发展统计公报》,通过计算得到 2000—2019 年吉林省各年粮食产量。

2 研究方法

选用最大值合成法 (Maximum value composites,

MVC) 计算得到各年 EVI 最大值 (EVI_{max}), 获得 20 年的 EVI 合成数据集。通过多年 EVI_{max} 时序曲线表征耕地生产力时空分异性。首先,通过线性回归模型拟合耕地 EVI_{max} 与耕地作物单产之间的关系,实现耕地 EVI_{max} 到耕地生产力的转换。利用多年 EVI_{max} 均值评价 2000—2019 年吉林省耕地生产力的时空分布和动态变化特征。采用变异系数法评估耕地生产力稳定性。采用 Sen - Mann Kendall 法分析耕地生产力变化趋势,计算 Sen 趋势值,以 MK 方法判断趋势显著性。最终得到 20 年间吉林省耕地生产力时空分异性、稳定性及生产力变化趋势。其中,对于耕地生产力的时空分异性分析,基于 EVI_{max} 的平均水平,解析多年平均的时空分异格局;对于耕地生产力的稳定性分析,基于年际 EVI_{max} 的波动程度,解析多年变异性的时空分异格局;针对耕地生产力的变化趋势,基于年际 EVI_{max} 的变化斜率,分析多年变化趋势显著性的时空分异格局。从整体水平、波动幅度和变化趋势的显著性 3 方面,表征耕地生产力连续时空内涵。技术路线

图如图 2 所示。

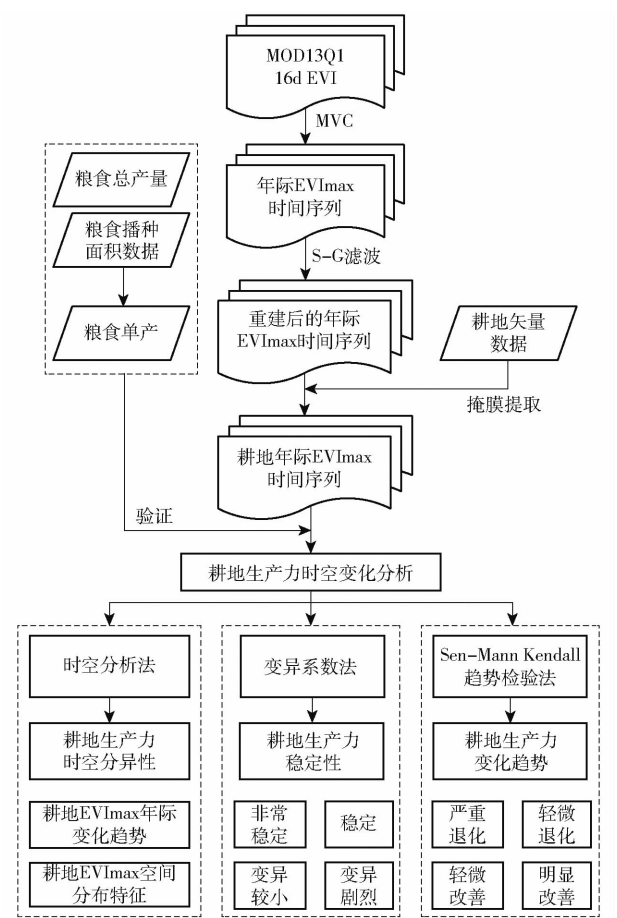


图 2 技术路线图
Fig. 2 Technical roadmap

2.1 耕地生产力稳定性评估

变异系数 C_v 可表示时序数据在一段时间内的波动程度^[33],采用 C_v 分析 20 年间 EVI 的变化,定量表征耕地生产力稳定性。 C_v 值越大,表示时间序列数据波动越大, C_v 值越小,表示时序数据越稳定。

为定量分析吉林省耕地稳定性的空间分布特征,参照已有研究并结合吉林省的实际情况,基于结果对耕地的稳定性进行制图,分为非常稳定、稳定、变异较小、变异剧烈等 4 级。

2.2 耕地生产力趋势分析

为分析 20 年间吉林省耕地 EVI 时间序列的空

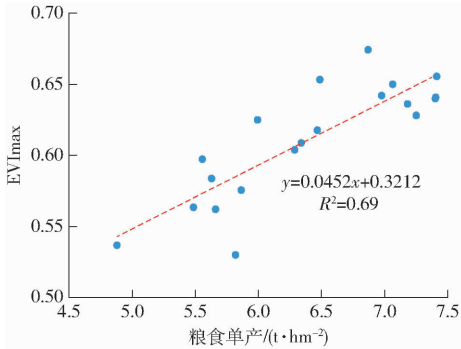


图 3 EVI_{max} 与粮食产量相关性分析

Fig. 3 Correlation analysis between EVI_{max} and grain yield data

间趋势特征,本文耦合 Theil – Sen median 非参数统计方法与 Mann – Kendall 非参数的趋势检验方法^[34–35],先计算耕地生产力线性趋势的斜率,再检验衡量时间序列趋势的显著性,并对时间序列趋势进行分析。其中斜率 β 计算式为

$$\beta = \text{Median} \left(\frac{EVI_i - EVI_j}{i - j} \right) \quad (\forall i < j) \quad (1)$$

式中 EVI_j ——时间序列 j 中的数值

EVI_i ——时间序列 $i (j < i)$ 中的数值

若 $\beta > 0$,表示 EVI 时间序列呈上升趋势,若 $\beta < 0$,表示 EVI 时间序列呈下降趋势。

对于时间序列趋势检验,统计量 S 定义为

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(EVI_j - EVI_i) \quad (2)$$

其中

$$\text{sgn}(EVI_j - EVI_i) = \begin{cases} 1 & (EVI_j - EVI_i > 0) \\ 0 & (EVI_j - EVI_i = 0) \\ -1 & (EVI_j - EVI_i < 0) \end{cases} \quad (3)$$

S 的方差为

$$\text{var}(S) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{18} \quad (4)$$

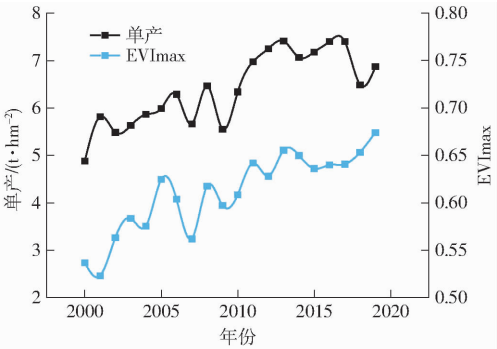
式中 n ——EVI 时间序列中数据的个数
标准化后的检验统计量 Z 计算式为

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{var}(S)}} & (S > 0) \\ 0 & (S = 0) \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{var}(S)}} & (S < 0) \end{cases} \quad (5)$$

在置信水平 $\alpha = 0.05$ 上判断 EVI 时间序列变化趋势的显著性。

3 结果与分析

使用吉林省多年的粮食产量数据与吉林省耕地多年 EVI_{max} 数据开展可行性分析。结果显示(图 3),二者具有显著的线性相关性($R^2 = 0.69$)。2002—2015 年间,两条时序曲线均经历了两次先上升后下



降,最后趋于上升的变化,在 2000—2002 年、2016—2018 年间趋势有较小的差异。总体来说,EVI_{max} 与粮食产量趋势较为一致。表明该区域可用多年 EVI_{max} 来表征耕地生产力。

3.1 吉林省耕地生产力时空变化特征分析

2000—2019 年吉林省耕地 EVI_{max} 趋势分析(图 4a)表明,吉林省耕地 EVI_{max} 年际波动明显,整体呈上升趋势,且以 $6.87 \times 10^{-3}/a$ 的速率增加,整体的增幅为 0.13。多年均值为 0.61,最小值出现在 2001 年(0.52),最大值出现在 2019 年(0.67)。耕地 EVI_{max} 多年均值的变化分为 3 个阶段,2001—2005 年的显著增长期,2005—2015 年的波动上升期,及 2015—2019 年的快速增长期。研究期内有 5 个峰值,分别为 2002 年、2005 年、2008 年、2011 年和 2013 年。2007 年和 2009 年为低谷,这与 2007 年

和 2009 年发生的旱情有关,当年夏季前期异常干旱,而后期又遭受暴雨。使得 EVI 值有所下降,随后在 2011 年又开始回升。吉林省东部地区耕地 EVI 值均高于西部地区,东部地区耕地 EVI_{max} 在 20 年中呈平缓增长的趋势,EVI_{max} 范围在 0.62 ~ 0.68 间。西部地区耕地 EVI_{max} 范围在 0.52 ~ 0.66 间,其中 2000—2004 年、2009—2012 年为两个增长高峰期,2012 年后,西部地区与东部地区 EVI_{max} 差值逐步减小,由 2000 年的 0.10 减小至 2019 年的 0.02。说明提高投入是提高耕地生产力的有力措施。在 2009—2012 年间,吉林省实施了农田水利建设、西部土地整理、高标准农田建设和黑土区治理等工程,使西部多个区片田块实现灌溉,抗洪减灾能力得到增强,吉林省西部耕地生产力稳步提升。

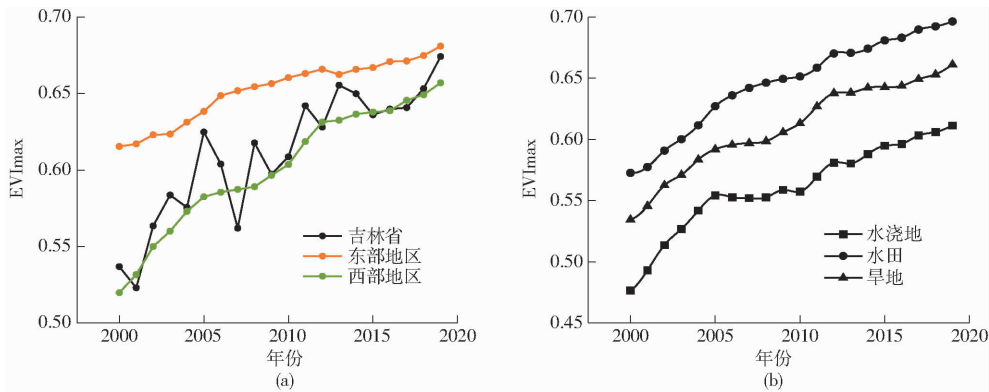


图 4 EVI_{max} 年际变化曲线
Fig. 4 Annual variations of EVI_{max}

2000—2019 年吉林省各类型耕地植被年际变化趋势见图 4b,各类型耕地植被指数的多年趋势均为上升。其中,水田的平均 EVI_{max} 最高(0.65),水田 EVI_{max} 值范围为 0.55 ~ 0.70,其次是旱地(0.61),水浇地的平均 EVI 最低(0.56),水浇地 EVI_{max} 值分布在 0.45 ~ 0.62 之间。经统计,旱地在 2010—2012 年间增长速度最快。水浇地在 2005—2008 年间耕地生产力基本保持不变,此后在 2010—2012 年间增速较快。

为了反映耕地生产力差异,多年 EVI_{max} 均值被划分为五级,1 级(0 ~ 0.40)、2 级(0.40 ~ 0.49)、3 级(0.49 ~ 0.56)、4 级(0.56 ~ 0.62)、5 级(0.62 ~ 0.81)。1 级生产力最低,5 级耕地生产力最高。由图 5 可知,吉林省耕地多年 EVI_{max} 空间分布总体上呈现中部、东部高,西部低,由东至西递减的特征。耕地生产力高值区一般集中在河流附近农田连片区域。东南部和中部耕地生产力明显高于西部。由于中部地区地处松辽平原,地势平坦,且处于东北地区肥沃的黑土带上,优质耕地主要分布在中部过渡带

地区,如长春市、四平市和辽源市,耕地生产力水平较高。如区域 a(图 5),此区域土壤有机质含量高,耕地集中连片,适宜耕作。由于城市的影响,长春市和吉林市中心有两个典型的低值区域;中部、东部地区作物生长所需的水热条件和土壤条件均优于西部地区,吉林省年降水量呈现东南部山区多,西部平原少的特点,自东向西有明显的湿润、半湿润和半干旱的地带分异。这种空间分异使得吉林省中西部地区干旱频繁发生,影响了粮食产量,限制了区域耕地生产力水平。区域 b 和区域 c(图 5)所在的白城市和松原市,多为草原、湿地等生态区,部分区域荒漠化较严重,土壤类型多为风沙土、盐碱土和栗钙土,低洼地带分布盐碱泡沼,耕地生产力较低。吉林省西北部的区域 d(图 5)呈现出与周边耕地差异明显的生产力水平,洮儿河带来丰富水资源,土壤中有机质含量高,耕地集中连片,耕地生产力水平高。

进一步分析不同地貌条件成因对耕地生产力的影响,由图 6 可知,湖成地貌下的耕地 EVI_{max} 多年均值为 0.42,风成地貌为 0.48,流水地貌为 0.54,火

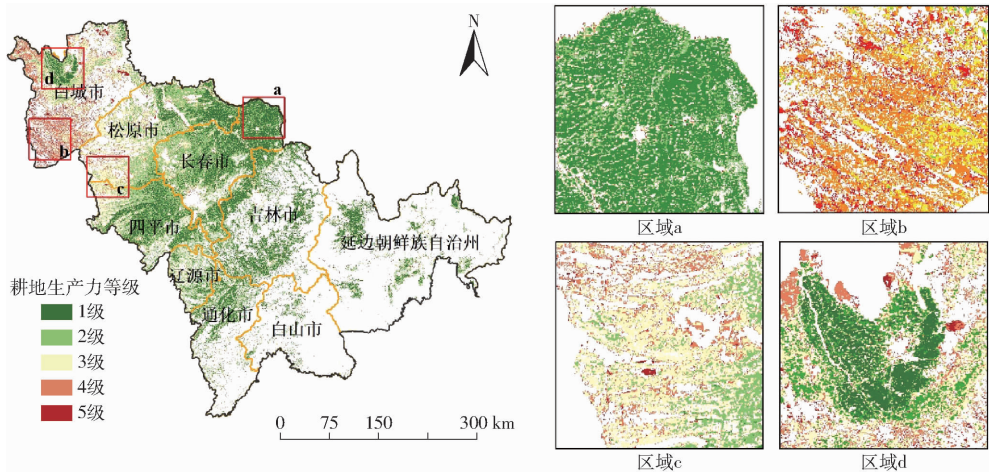


图 5 2000—2019 年吉林省耕地生产力的空间格局

Fig. 5 Spatial distribution maps of cultivated land productivity during 2000 to 2019

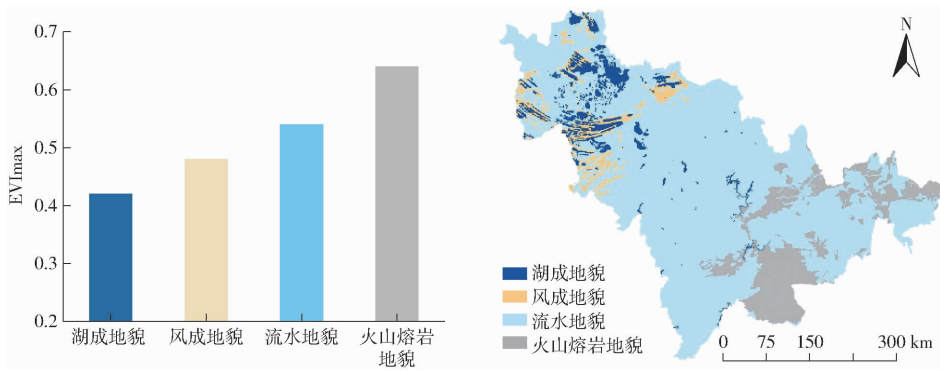


图 6 不同地貌成因 EVI_{max} 统计与分布

Fig. 6 EVI_{max} statistics of different landforms and distribution of different landform types

山熔岩地貌为 0.64。

湖成地貌分布于吉林省西北部的白城市、松原市、长春市西部，常年或季节性积水的浅洼地广泛分布，是苏打盐碱地的重要分布区。北部镇赉、大安、洮南一带为冲积平原，有大量的冲击湖积物。湖成地貌区的耕地分布零散，面积较小，主要分布于沿河阶地和坡度极缓的“岗子”上，因地势低平，泡沼星罗棋布，洪涝较严重，因此耕地生产力较低。吉林省西北部的通榆县、长岭、双辽一带以及扶余市是科尔沁沙地、嫩江沙地的重要分布区，主要是风成地貌条件区，沙丘沙垅与平原低地间相分布，土质疏松，土壤孔隙大，使得土壤保水和保肥的能力弱，土壤有机质含量较低。该区为西南向季风的通道，春秋两季风力强劲，持续时间长，使松散的沙质堆积物受风蚀、风积作用，耕地生产力较低。流水地貌广泛分布于吉林省全境，江河沿岸分布着河漫滩和低阶地，耕地集中连片，水源充足，地面由松散的冲击物质构成，土壤肥沃，耕地生产力较高。火山熔岩地貌主要分布于吉林省东南部，此处耕地破碎，受林地的混合像元影响，造成耕地生产力偏高。

3.2 吉林省耕地生产力稳定性分析

吉林省 20 年间耕地 EVI_{max} 变异性计算结果

显示，吉林省耕地 C_v 分布在 0~0.95 之间。为直观反映耕地的生产力稳定性，根据自然断点法将其分为 4 级：非常稳定 ($C_v \leq 0.06$)、稳定 ($0.06 < C_v \leq 0.10$)、变异较小 ($0.10 < C_v \leq 0.19$)、变异剧烈 ($C_v > 0.19$)。耕地生产力稳定性存在显著的空间差异 (图 7)，总体呈现东南高西北低的趋势。其中，非常稳定区主要分布于长春市、吉林市、延边朝鲜族自治州等吉林省东部地区；稳定区分布于长春市、四平市和松原市南部；变异较小区分布于松原市北部，在白城市和四平市有零星分布；变异剧烈区分布于吉林省西北部白城市和松原市，最高值出现在吉林省西北部的旱地。总的来说，中部及东南部地区的耕地稳定性较高，西北部的耕地稳定性较低。结合自然禀赋分析，水热资源丰富的地区耕地更稳定。这与吉林省降水条件由南至西北、东北逐渐减少，由东向西逐渐干旱的地理地带性因素相契合。

经统计分析 (图 8)，超过 40% 的水田分布于非常稳定区，45% 水田分布于稳定区；有 30% 的旱地分布于非常稳定区，50% 的旱地分布于稳定区。超过 60% 的水浇地分布于稳定区，超过 20% 的水浇地位于变异区。经分析可知，水田的耕地稳定性高于

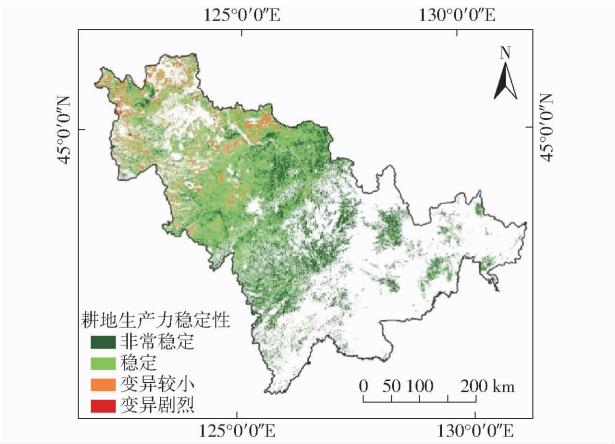


图 7 吉林省耕地生产力稳定性空间分布

Fig. 7 Spatial distribution of cultivated land productivity stability in Jilin Province

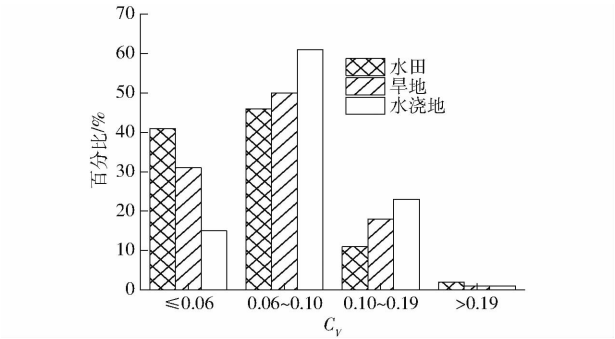


图 8 吉林省不同耕地类型稳定性统计

Fig. 8 Stability of different cultivated land types in Jilin Province

旱地和水浇地。由于区域灌溉水源的不稳定,水浇地的波动性大于水田和旱地。

3.3 吉林省耕地生产力变化趋势分析

首先计算 20 年间 EVImax 的 Sen 趋势度 (P 值),并进行 $M-K$ 检验 (S 值),根据显著性检验结果,将吉林省耕地生产力变化趋势分为 4 级(表 1)。

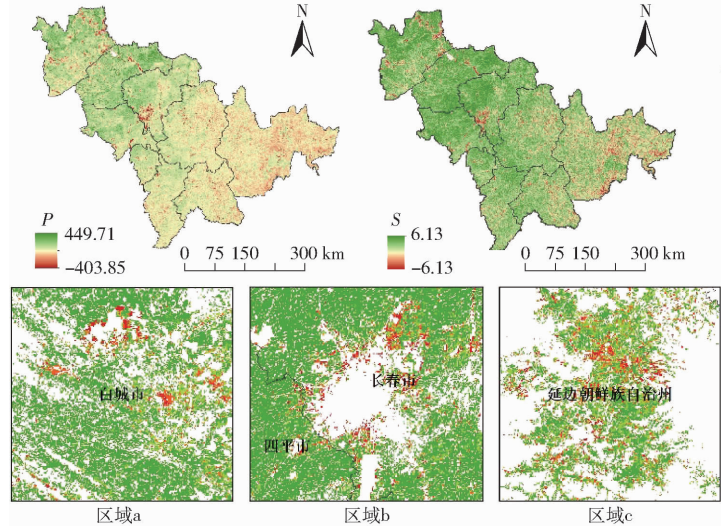


图 9 吉林省耕地生产力变化趋势分析结果

Fig. 9 Analysis results of change trend of CLP in Jilin Province

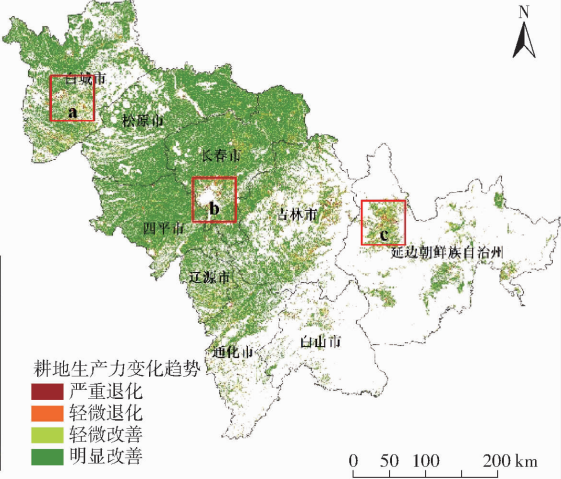
结果表明,吉林省耕地生产力整体表现为改善。由图 9 可知,呈明显改善趋势的区域占整个区域的 85.95%,主要分布在四平市、白城市西部、长春市北部、松原市西北部,主要为水田和旱地。轻微改善区域遍布吉林省,主要分布在白城市南部通榆县,长春市中部德惠市,长春市东北部榆树市,吉林省东部蛟河市,辽源市东丰县,通化市西北部梅河口市,延安市西部敦化市。在耕地集中连片区,生产力的变化趋势较好。4.34% 的区域有退化趋势,轻微退化区域多分布在轻微改善区域的周边,主要集中于白城市南部的通榆县,长春市城区周围,吉林省东部蛟河市,延安市西北部敦化市。严重退化区占比为 1.20%,位于各城区边缘及河岸和湖岸周边。其中有 3 个典型区域(图 9),分别为白城市中部及南部、长春市南部、延边朝鲜族自治州西北部地区。东部地区的耕地较为破碎,整体变化趋势不如中部集中连片区。

表 1 吉林省耕地生产力变化趋势显著性统计结果

Tab. 1 Significant statistical results of change trend of CLP in Jilin Province

EVImax 变化趋势	程度	像素数	百分比/%
$\beta < 0, Z > 1.96$	严重退化	13 112	1.20
$\beta < 0, Z \leq 1.96$	轻微退化	34 273	3.14
$\beta \geq 0, Z \leq 1.96$	轻微改善	106 041	9.71
$\beta > 0, Z > 1.96$	明显改善	938 780	85.95

研究结果表明,吉林省应实施有差异的耕地保护与生产力提升策略。稳定东部产粮区,提高中部粮食生产核心区,重点提升西部粮食生产后备区。对于吉林省西部耕地区,应加强农业气象灾害监测预报;合理开发耕地后备资源,改造中低产田;加强西部湿地生态保护,维护生物多样性。对于吉林省



中部、东部耕地区,应巩固提高高产田,加强黑土区保护和治理;加强生态环境动态监测以及农业面源污染防治,减少化肥农药施用;加强高标准农田建设。

4 结论

(1)构建了基于多年时序植被指数的耕地年际生产力时空分析框架,通过长时序 MODIS - EVI_{max} 数据表征耕地生产力,得到 20 年间吉林省耕地生产力时空分异性、耕地生产力稳定性及变化趋势。结果表明该研究框架在获取耕地生产力等级空间分布的同时,可获得耕地生产力时序演变过程,避免短期遥感数据评价结果不确定性。

(2)2000—2019 年间,吉林省耕地生产力在年际变化上整体为上升趋势,95.66% 的耕地为改善趋势,EVI_{max} 以 $6.87 \times 10^{-3}/a$ 的速率增加,整体的增幅为 0.13。吉林省西部与东部耕地生产力差距逐渐减小,由 2000 年的 0.10 减至 2019 年的 0.02。吉林省耕地生产力空间分异性强,呈现中部和东部高,西部低,由东至西递减的特征。在耕地集中连片区,生产力变化趋势优于东部较为破碎耕地片区。从不同地貌类型成因来看,耕地生产力从大到小依次是火山熔岩地貌、流水地貌、风成地貌和湖成地貌。

(3)耕地二级类型的耕地生产力的时空分异性与耕地生产力稳定性有显著差异,水田的耕地生产力和稳定性均最高,其次是旱地、水浇地。

参 考 文 献

- [1] 林培. 土地资源学[M]. 2 版. 北京:中国农业大学出版社, 1996.
- [2] 李新旺. 中小尺度耕地生产力稳定性评价体系研究[D]. 保定:河北农业大学, 2011.
LI Xinwang. Evaluation system of cultivated land productivity stability in agricultural ecosystem for the meso-small scale—a study case Xiong County of Hebei[D]. Baoding: Hebei Agricultural University, 2011. (in Chinese)
- [3] 王树涛. 区域耕地生产力稳定性评价体系研究[D]. 保定:河北农业大学, 2008.
WANG Shutao. Study on evaluation system of regional cultivated lands productivity stability—a case in Hebei Province[D]. Baoding: Hebei Agricultural University, 2008. (in Chinese)
- [4] ZHAO C, ZHOU Y, LI X, et al. Assessment of cultivated land productivity and its spatial differentiation in Dongting Lake Region: a case study of Yuanjiang City, Hunan Province[J]. Sustainability, 2018, 10(10): 3616.
- [5] 赵瑞,吴克宁,杨淇钧,等. 基于土壤功能与胁迫的耕地土壤健康评价方法[J]. 农业机械学报,2021,52(6):333–343.
ZHAO Rui, WU Kening, YANG Qijun, et al. Farmland soil health evaluation method based on soil function and soil threat[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(6): 333–343. (in Chinese)
- [6] 孔祥斌,李翠珍,赵晶,等. 乡镇尺度耕地生产能力实现程度分析与实证[J]. 农业工程学报, 2010,26(12):345–351.
KONG Xiangbin, LI Cuizhen, ZHAO Jing, et al. Method and empirical research on the realization degree of arable land production capacity at town level[J]. Transactions of the CSAE, 2010,26(12):345–351. (in Chinese)
- [7] 潘佩佩. 太湖流域土地利用变化对耕地生产力和粮食生产的影响研究[D]. 北京:中国科学院大学, 2013.
PAN Peipei. The impact of land use change in Taihu Lake Basin and productivity of arable land for food production[D]. Beijing: Chinese Academy of Sciences University, 2013. (in Chinese)
- [8] 褚琳. 基于遥感和作物生长模型的黄河三角洲冬小麦生产力研究[D]. 北京:中国科学院大学, 2016.
CHU Lin. Research on the productivity of winter wheat based on remote sensing and crop growth model in the Yellow River Delta [D]. Beijing: Chinese Academy of Sciences University, 2016. (in Chinese)
- [9] 万炜,邓静,王佳莹,等. 基于潜力衰减模型的东北—华北平原旱作区耕地生产力评价[J]. 农业工程学报, 2020, 36(5):270–280.
WAN Wei, DENG Jing, WANG Jiaying, et al. Evaluation of cultivated land productivity based on potential attenuation model in the dryland farming regions of Northeast and North China Plain[J]. Transactions of the CSAE, 2020,36(5):270–280. (in Chinese)
- [10] FENSHOLT R, PROUD S R. Evaluation of earth observation based global long term vegetation trends — comparing GIMMS and MODIS global NDVI time series[J]. Remote Sensing of Environment, 2012, 119: 131–147.
- [11] VIJITH H, DODGE-WAN D. Spatial and temporal characteristics of rainfall over a forested river basin in NW Borneo[J]. Meteorology and Atmospheric Physics, 2020, 132(12): 683–702.
- [12] HUETE A, DIDAN K, MIURA T, et al. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices[J]. Remote Sensing of Environment, 2002, 83(1–2): 195–213.
- [13] LV Y, ZHANG C, YUN W, et al. The delineation and grading of actual crop production units in modern smallholder areas using RS data and Mask R - CNN[J]. Remote Sensing, 2020, 12(7): 1074.
- [14] XU W, JIN J, JIN X, et al. Analysis of changes and potential characteristics of cultivated land productivity based on MODIS EVI: a case study of Jiangsu Province, China[J]. Remote Sensing, 2019, 11(17): 2041.
- [15] FAN Y, JIN X, XIANG X, et al. Evaluating and predicting the effectiveness of farmland consolidation on improving agricultural productivity in China[J]. PLoS ONE, 2018, 13(6): e0198171.
- [16] ECKERT S, HÜSLER F, LINIGER H, et al. Trend analysis of MODIS NDVI time series for detecting land degradation and regeneration in Mongolia[J]. Journal of Arid Environments, 2015, 113:16–28.
- [17] ERICA G, ANDREW H, RICK L. Using NDVI and EVI to map spatiotemporal variation in the biomass and quality of forage for migratory elk in the Greater Yellowstone ecosystem[J]. Remote Sensing, 2016, 8(5): 404.

- [18] 尤慧, 苏荣瑞, 肖玮钰, 等. 基于 MODIS EVI 时序数据的江汉平原油菜种植分布信息提取[J]. 国土资源遥感, 2018, 30(1): 173–179.
YOU Hui, SU Rongrui, XIAO Weiyu, et al. Extraction of rape planting distribution information in Jiangnan Plain based on MODIS EVI time series data[J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2018, 30(1): 173–179. (in Chinese)
- [19] HUETE A R. Vegetation indices, remote sensing and forest monitoring[J]. Geography Compass, 2012, 6(9): 513–532.
- [20] 郝鹏宇, 唐华俊, 陈仲新, 等. 基于历史增强型植被指数时序的农作物类型早期识别[J]. 农业工程学报, 2018, 34(13): 179–186.
HAO Pengyu, TANG Huajun, CHEN Zhongxin, et al. Early season crop type recognition based on historical EVI time series[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(13): 179–186. (in Chinese)
- [21] 潘耀忠, 李乐, 张锦水, 等. 基于典型物候特征的 MODIS–EVI 时间序列数据农作物种植面积提取方法——小区域冬小麦实验研究[J]. 遥感学报, 2011, 15(3): 578–594.
PAN Yaozhong, LI Le, ZHANG Jinshui, et al. Crop area estimation based on MODIS–EVI time series according to distinct characteristics of key phenology phases: a case study of winter wheat area estimation in small-scale area[J]. Journal of Remote Sensing, 2011, 15(3): 578–594. (in Chinese)
- [22] YAO R, WANG L, HUANG X, et al. Increased spatial heterogeneity in vegetation greenness due to vegetation greening in mainland China[J]. Ecological Indicators, 2019, 99(4): 240–250.
- [23] 王培俊, 刘旗, 孙煌, 等. 南方红壤水土流失区生态系统服务价值时空变化研究[J]. 农业机械学报, 2021, 52(5): 219–228.
WANG Peijun, LIU Qi, SUN Huang, et al. Temporal and spatial variation of ecosystem service values in red soil erosion areas in South China[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(5): 219–228. (in Chinese)
- [24] WANG L, WEI G, MIAO Z, et al. Dynamic monitoring of vegetation NPP in Wuhan based on MODIS[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2013, 38(5): 548–552.
- [25] MA X, HUETE A, YU Q, et al. Parameterization of an ecosystem light-use-efficiency model for predicting savanna GPP using MODIS EVI[J]. Remote Sensing of Environment, 2014, 154: 253–271.
- [26] 王亚林, 丁忆, 胡艳, 等. 中国灌木生态系统的干旱化趋势及其对植被生长的影响[J]. 生态学报, 2019, 39(6): 2054–2062.
WANG Yalin, DING Yi, HU Yan, et al. The study of shrubland drought dynamics in China and its impacts on vegetation growth[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(6): 2054–2062. (in Chinese)
- [27] XU W, JIN J, JIN X, et al. Analysis of changes and potential characteristics of cultivated land productivity based on MODIS EVI: a case study of Jiangsu Province, China[J]. Remote Sensing, 2019, 11(17): 2041.
- [28] 王赫彬, 王文娟, 商令杰. 2000—2015 年山东省耕地产能的时空格局[J]. 中国农业大学学报, 2020, 25(3): 128–138.
WANG Hebin, WANG Wenjuan, SHANG Lingjie. Spatial and temporal pattern of cultivated land productivity in Shandong Province from 2000 to 2015[J]. Journal of China Agricultural University, 2020, 25(3): 128–138. (in Chinese)
- [29] 尹小君, 祝宏辉, GAO Jerry, 等. 基于 Landsat 和 MODIS 数据融合的农牧区 NPP 模拟[J]. 农业机械学报, 2020, 51(8): 163–170.
YIN Xiaojun, ZHU Honghui, GAO Jerry, et al. NPP simulation of agricultural and pastoral areas based on Landsat and MODIS data fusion[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(8): 163–170. (in Chinese)
- [30] 马佳妮, 张超, 吕雅慧, 等. 基于长时间序列遥感数据反演 NPP 的耕地质量评价[J]. 农业机械学报, 2019, 50(1): 202–208.
MA Jiani, ZHANG Chao, LÜ Yahui, et al. Cultivated land quality evaluation based on inversion of NPP based on long-term sequence remote sensing data[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(1): 202–208. (in Chinese)
- [31] 蔡博峰, 于嵘. 基于遥感的植被长时序趋势特征研究进展及评价[J]. 遥感学报, 2009, 13(6): 1170–1186.
CAI Bofeng, YU Rong. Advance and evaluation in the long time series vegetation trends research based on remote sensing[J]. Journal of Remote Sensing, 2009, 13(6): 1170–1186. (in Chinese)
- [32] YU T, DOUGLAS S, CHEN H, et al. Mapping vegetation and land use types in Fanjingshan National Nature Reserve using Google Earth Engine[J]. Remote Sensing, 2018, 10(6): 927.
- [33] 贺振, 贺俊平. 近 32 年黄河流域植被覆盖时空演化遥感监测[J]. 农业机械学报, 2017, 48(2): 179–185.
HE Zhen, HE Junping. Remote sensing on spatio-temporal evolution of vegetation cover in the Yellow River Basin during 1982—2013[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(2): 179–185. (in Chinese)
- [34] MA J, ZHANG C, YUN W, et al. The temporal analysis of regional cultivated land productivity with GPP based on 2000—2018 MODIS data[J]. Sustainability, 2020, 12(1): 411.
- [35] 刘洋, 李诚志, 刘志辉, 等. 1982—2013 年基于 GIMMS–NDVI 的新疆植被覆盖时空变化[J]. 生态学报, 2016, 36(19): 6198–6208.
LIU Yang, LI Chengzhi, LIU Zhihui, et al. Assessment of spatio-temporal variations in vegetation cover in Xinjiang from 1982 to 2013 based on GIMMS–NDVI[J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(19): 6198–6208. (in Chinese)