

DOI: 10.11766/trxb201910240413

张露洋, 雷国平, 郭一洋, 路中. 三江平原耕地归一化植被指数对气候因子的时滞响应[J]. 土壤学报, 2021, 58 (2): 526–536.

ZHANG Luyang, LEI Guoping, GUO Yiyang, LU Zhong. Delayed Responses of Normalized Difference Vegetation Index of Cultivated Land to Climatic Factors in Sanjiang Plain[J]. Acta Pedologica Sinica, 2021, 58 (2): 526–536.

## 三江平原耕地归一化植被指数对气候因子的时滞响应\*

张露洋, 雷国平<sup>†</sup>, 郭一洋, 路中

(东北大学土地管理研究所, 沈阳 110169)

**摘要:** 三江平原位于我国中温带北段, 近年来气候变暖和耕地利用变化较为显著。基于 2000—2015 年三江平原耕作期 (5—9 月) 耕地利用数据、旬气候数据、旬归一化植被指数 (NDVI) 数据, 利用变异系数、趋势系数以及时滞互相关的方法在分析气候因子时间变化特征和耕地 NDVI 空间变化差异的基础上, 分析区域旬气候因子对耕地旬 NDVI 的时滞影响情况。研究发现: (1) 三江平原耕作期气温年际变化较降水量变化更加稳定, 在月际变化上更显规律性。(2) 耕地 NDVI 年际稳定, 9 月植被覆盖度最大; 16 年的变化在空间差异上呈现以西部区域为代表的低值-不稳定-增加趋势区域以及东部为代表的高值-稳定-减少趋势区域的二元模式。(3) 区域气温对耕地 NDVI 的影响程度大于降水对其的影响, 大多数县域耕地 NDVI 对气温的响应时间大于对降水的响应时间。(4) 气温对区域水田 NDVI 的影响较大; 旱地 NDVI 对区域气候因子的响应时间大于水田的响应时间。研究结果可为指导区域应对气候变化的耕作生产、保障粮食安全等提供依据。

**关键词:** NDVI; 降水量; 气温; 时滞相关; 耕作期; 三江平原

**中图分类号:** TP79 **文献标志码:** A

## Delayed Responses of Normalized Difference Vegetation Index of Cultivated Land to Climatic Factors in Sanjiang Plain

ZHANG Luyang, LEI Guoping<sup>†</sup>, GUO Yiyang, LU Zhong

(Land Management Institute, Northeastern University, Shenyang 110169, China)

**Abstract:** The Sanjiang Plain is located in the northern part of the mid-temperate zone of China. In recent years, climate warming and cultivated land use have been changing significantly. So it is of great significance in protecting food security and stability to analyze responses of cultivated land use to regional climate change. As cultivated land is a kind of artificial vegetation, its NDVI value reflects certain crop information, like growth and yield. Therefore, by analyzing impacts of climate factors on cultivated land NDVI, information relevant to response of regional cultivated land use to climate change can be obtained. **【Objective】** Based on the data of cultivated land use, ten-day climatic data, and ten-day normalized difference vegetation indexes (NDVI) of the Sanjiang Plain during the farming period (May~September) of the years from 2000 to 2015, temporal changes in climatic factors and spatial variation of NDVI of the cultivated land were obtained through analysis and furthermore, information about delayed response of cultivated land NDVI to regional climate change was acquired. **【Method】**

\* 国家自然科学基金项目 (41671520) 资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 41671520)

<sup>†</sup> 通讯作者 Corresponding author, E-mail: guopinglei@126.com

作者简介: 张露洋 (1991—), 女, 辽宁省沈阳市人, 博士研究生, 主要研究方向为土地资源利用与优化配置。E-mail: zhangluyang624@126.com

收稿日期: 2019-10-24; 收到修改稿日期: 2020-01-19; 网络首发日期 (www.cnki.net): 2020-04-23

In this research, methods, like variation coefficient analysis, trend coefficient analysis and time-delay cross correlation analysis were adopted. 【Result】 Results show: (1) The interannual variability of temperature was more stable than that of precipitation during the farming period of the Sanjiang Plain, while the intermonthly variabilities of the two tended to be more regular; (2) The cultivated land NDVI did vary much between years, with the vegetation coverage being the highest in September; spatial variation of the cultivated land NDVI during the 16 years exhibited a trend of being low unstable increasing in value, representative in the western part of the region and being high stable decreasing in value, representative in the eastern part; (3) Maximum unbiased correlation coefficients of the ten-day NDVIs and ten-day mean temperatures of the cultivated land varied mostly in the range between 0.931 and 0.992, and delayed response was observed for 2 ten-day periods. Maximum unbiased correlation coefficients of the ten-day NDVI and ten-day precipitation of the cultivated land varied in the range between 0.778 and 0.927, and delayed response was observed for 1 ten-day period only. The cultivated land NDVI of the Sanjiang Plain, except for Fuyuan County, Raohe County and Tongjiang City, responded more slowly to air temperature than to precipitation. The cultivated land NDVI responded quite slowly to regional climate change in Jiamusi City and Shuangyashan City, while it did rather quickly in Mishan City, Baoqing County, and Hulin City. Moreover, it responded faster to change in air temperature and slower to change in precipitation in Fuyuan County and Muling City; and (4) The maximum unbiased correlation coefficients of dry land ten-day NDVI and ten-day mean temperature were both 0.942, and that of the paddy field's was 0.962. Delayed response of NDVI to mean temperature in dry land was observed for 2.026 ten-day periods, and that in paddy field for 1.633 ten-day period. The mean maximum unbiased correlation coefficient between ten-day NDVI and ten-day precipitation was 0.809 in dry land, and 0.765 in paddy field, and the mean time lag of NDVI to precipitation was 1.323 ten-day period in dry land, and 1.045 ten-day periods in paddy field. 【Conclusion】 Change in regional temperature impacts cultivated land NDVI more than change in precipitation does. The lag of NDVI responding to air temperature of cultivated land is longer than that to precipitation in most counties. Temperature is a major factor affecting regional paddy field NDVI; the lag of dry land NDVI responding to regional climate change is longer than that of paddy field's. The findings in the research may provide a scientific basis for guiding farming production of the region to cope with climate change and ensure food security.

**Key words:** Normalized Difference Vegetation Index; Precipitation; Air temperature; Time-delay correlation; Farming period; Sanjiang Plain

在全球气候变暖和极端气候事件频繁发生的背景下，土地利用覆盖变化与气候的关系及其对区域气候变化的响应研究引起国内外众多学者的关注<sup>[1-2]</sup>。针对我国人地矛盾突出的基本国情和切实保护耕地的基本国策，分析耕地利用对区域气候变化的响应，进而实现耕地的气候适应性种植，对于保护国家粮食安全和稳定具有十分重要的意义。归一化植被指数（NDVI，Normalized Difference Vegetation Index）是评价与分析植被生长与覆盖状况以及生态环境的主要指标之一<sup>[3]</sup>。耕地作为一种人工植被，其NDVI值在某种程度上能较好地反映作物的长势和产量等信息<sup>[4-5]</sup>。因此可以通过分析气候因子对耕地NDVI的影响进而获取区域耕地利用对气候变化的响应信息。目前耕地利用对气候变化的响应研究大多集中在气候对耕地土壤的影响<sup>[6]</sup>、

耕地格局变化的贡献归因<sup>[7]</sup>、气候变化背景下各尺度耕地生产潜力变化<sup>[8]</sup>以及针对未来气候变化的耕地动态模拟研究<sup>[9]</sup>。而针对耕地NDVI对气候因子的响应研究则较少。同时不同地区耕地NDVI与水热因子之间的相关性差异显著，不同耕地利用类型的NDVI对气候因子的响应时间和响应特征也不尽相同。耕地NDVI对区域水热因子的响应特征以及不同县域和耕地利用类型的NDVI对区域水热因子的响应差异仍不清晰，亟待进行相关研究以科学合理地指导实际生产。由于农作物的生长需要一定的气候、土壤等条件，所以耕地对气候变化的响应往往具有一定的滞后效应。众多学者通过分析长时间序列气候因子（气温、降水量）对NDVI的时滞相关性，来分析水热条件对植被的影响和滞后效应，研究结果具有可信性及科学意义<sup>[10-11]</sup>。本文利用此

方法, 分析 2000—2015 年耕作期内 (5—9 月) 旬降水和旬均温对耕地旬 NDVI 的时滞相关性, 进而分析气候因子与旱地和水田的相关性及影响的时滞性, 为指导合理有效生产提供依据。

三江平原位于我国东北部、中温带北段, 近年来气候变暖较为显著。2000 年以来, 随着区域增温趋势的累积效应, 在耕地种植面积不断增加的基础上耕地的种植结构也持续调整, 进而促进了区域粮食产量的提升<sup>[12-13]</sup>。区域气候变化对耕地利用影响的研究得到了众多学者的关注<sup>[14-15]</sup>。作为国家商品粮基地和重要的粳稻主产区, 三江平原耕地合理开发利用问题的研究不仅对区域可持续发展具有重要的指导

作用, 同时对保障国家粮食安全与稳定意义重大。因此, 选取研究区气候变化较为明显的时段, 即 2000—2015 年; 分析气候因子 (气温、降水量) 对区域耕地 NDVI 的影响以及耕地 NDVI 对气候因子的响应时滞, 可为区域耕地资源的气候适应性种植、提升粮食产能、保障国家粮食安全等方面提供依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

三江平原地处黑龙江省的东北部, 包括 23 个县 (市、区) (图 1)。位于中温带湿润、半湿润大陆性

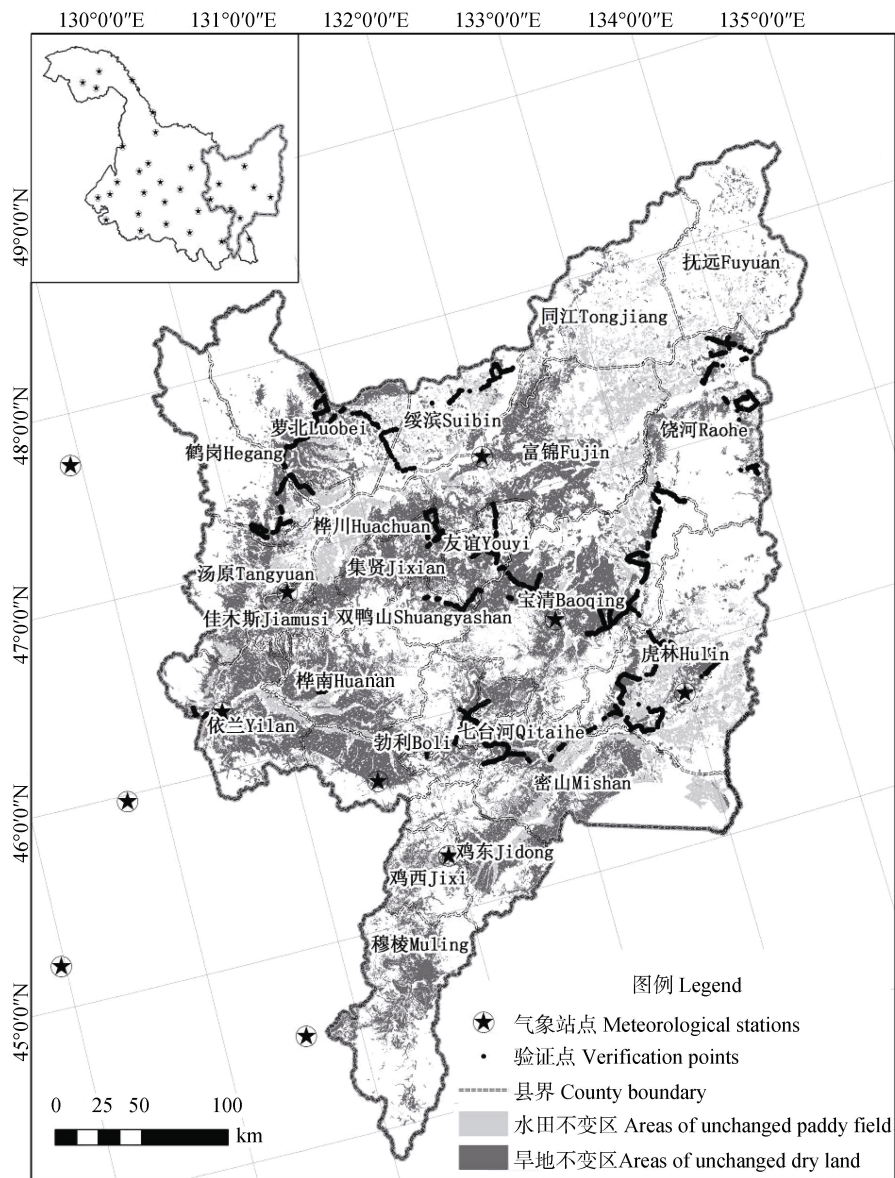


图 1 研究区基本信息  
Fig. 1 Basic information of the study area

季风气候区。多年均温为 1~4℃, 平均降水量为 450~650 mm。春季风大干燥, 夏季高温雨丰, 秋季多风、昼夜温差显著, 冬季寒冷干燥。土壤有机质和养分含量较高, 适宜农业耕作, 是我国重要的粮食生产区。由于本文研究的是气候因子对耕地 NDVI 的时滞影响, 因此研究时间点界定为 2000—2015 年的耕作期(5—9 月)。为消除土地利用变化对 NDVI 的影响, 本文的研究区域界定为耕地不变区, 包括旱地和水田。

## 1.2 数据来源

(1) 土地利用数据: 本文利用 Landsat TM 影像进行土地利用信息的目视解译进而获取耕地不变区(不变旱地区和不变水田区)。利用 3 020 个 2015 年耕地随机验证点, 计算得出耕地解译正确率为 88.90%, 满足相关研究精度需求(图 1)。

(2) NDVI 旬数据: NDVI 数据来源于中国科学院计算机网络信息中心国际科学数据镜像网站(<http://www.gscloud.cn>)的“MODND1T 中国 NDVI 旬合成产品(500 m)”。中国 NDVI 十天合成产品(500 m)是根据 TERRA 由 MODND1D 计算得到, 计算方法为选取月内每十天中的最大值。

(3) 气候旬数据: 基于国家气象信息中心——中国气象数据网(<http://data.cma.cn/site/index.html>)

的“中国地面气候资料日值数据集(V3.0)”中黑龙江省 32 个基础气象站点数据(图 1), 利用 ANUSPLIN 软件的薄盘样条法(TPS, Thin Plate Spline)进行空间插值并按照研究区边界进行裁剪, 形成 2000—2015 年三江平原耕作期气温和降水量的日值数据, 并将气温数据进行旬均值计算、降水数据进行旬和值计算, 最后形成研究区分辨率为 500 m 的气候栅格数据集。

## 2 结果与讨论

### 2.1 气候因子变化特征

根据 2000—2015 年三江平原耕作期气候因子变化情况(图 2)可知, 三江平原耕作期气温年际变化较降水量更加稳定, 峰值集中在 20.30℃~24.44℃, 谷值集中在 10.75℃~14.63℃。降水量年际变化的峰值波动较大, 最大峰值达 218.3 mm, 最小峰值达 141.2 mm; 最大谷值达 81.72 mm, 最小谷值达 11.47 mm。气温在耕作期月际变化上的表现较有规律性, 5—9 月的月均温呈“抛物线”状。而耕作期降水量月际变化的规律性较弱, 峰值月份有所差异, 年内波动较大。

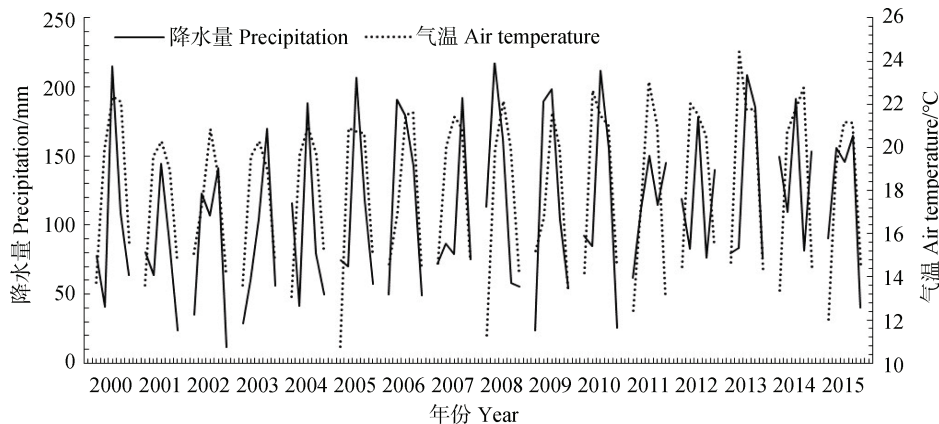


图 2 气候因子变化特征

Fig. 2 Characteristics of changes in climate factor

### 2.2 NDVI 变化特征

耕作期耕地 NDVI 年际差异不大(图 3)。除 2000 年外, 年内峰值集中在 0.83~0.87 之间; 除 2000 年和 2015 年外, 耕地 NDVI 峰值均出现在 9 月, 说明针对研究区耕地而言, 9 月植被覆盖度最大, 作物长势较好。

从耕作期耕地 NDVI 多年均值来看(图 4), 三江平原北部和西部较低, 东部区域相对较高。利用变异系数<sup>[16]</sup>表征耕地 NDVI 多年变化稳定性的空间差异, 发现东部较为稳定西部较为波动。利用趋势系数<sup>[17]</sup>计算耕地 NDVI 年际变化趋势的空间差异, 发现西部和南部部分区域变化趋势系数较高, 长期

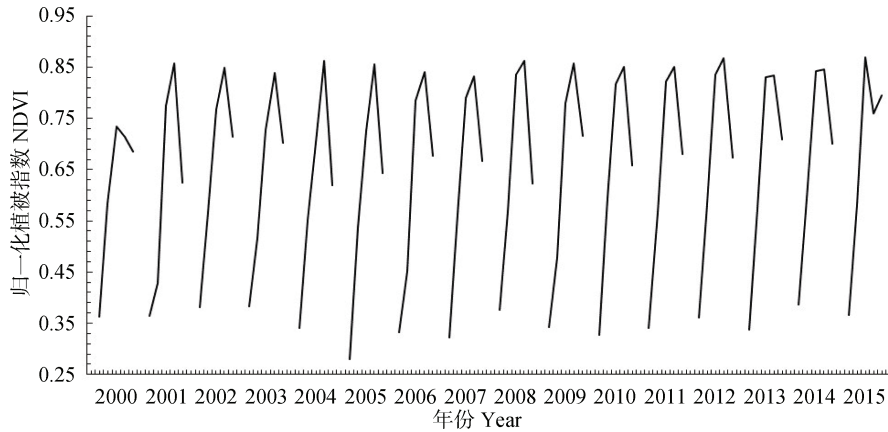


图3 NDVI 变化特征

Fig. 3 Characteristics of changes in NDVI

来看有增长趋势；而东部部分地区呈现减少趋势。

总体来看，研究区耕作期耕地 NDVI 变化的空间差异主要表现为两种典型模式。其一是以绥滨县南部、萝北县、鹤岗市市辖区、汤原县、佳木斯市辖区、集贤县、双鸭山市市辖区、友谊县中部、宝清县西南部、桦南县西南部、依兰县、密山市西部以及鸡东县等为代表的西部区域“低值-不稳定-增

加趋势”发展模式；即该区域耕作期耕地 NDVI 多年均值较低，年际间呈现不稳定的态势，但长期呈现出增加的趋势。其二是以抚远县、同江市东部、饶河县、富锦市东部、宝清县东部、虎林市、密山市东部为代表的东部区域“高值-稳定-减少趋势”发展模式；即该区域耕作期耕地 NDVI 的多年均值较高，同时年际间呈现稳定的态势，长期呈现出减少的趋势。

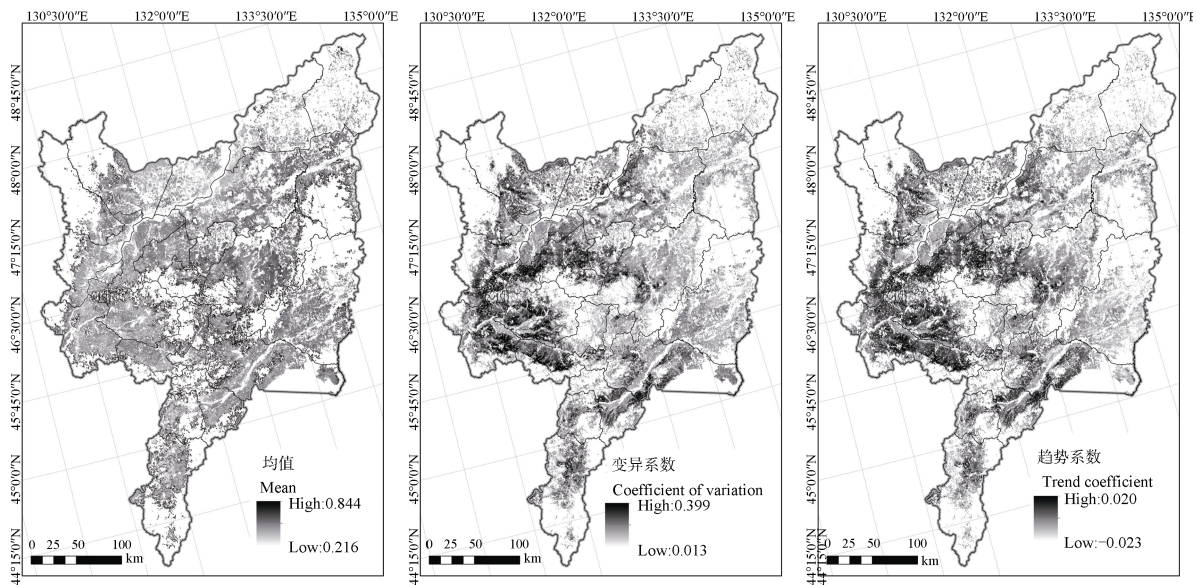


图4 NDVI 相关指标空间差异

Fig. 4 Spatial variation of NDVI related indices

### 2.3 耕地 NDVI 的气候因子时滞响应

**2.3.1 县域差异** 时滞互相关法作为滞后效应研究较常用的方法，被众多学者广泛应用<sup>[18]</sup>。运用 ArcGIS10.6 软件的栅格计算器 (Raster Calculator) 功能计算了耕地在各时滞情况下旬 NDVI 和旬均温

的相关性，获取了最大无偏相关系数和对应的时滞旬数 (图 5)，来分析耕地 NDVI 对区域气温变化的响应程度和响应时间差异。旬均温与旬 NDVI 的相关系数总体上较大，大多集中在 0.931~0.992 之间，区域耕地 NDVI 受气温的影响较大。仅穆棱市、鸡

西市市辖区、富锦市西北部、饶河县南部以及由七台河市市辖区、宝清县、双鸭山市市辖区、桦南县以及勃利县形成的环状边缘区域呈现较低的态势，区域高程和坡度相对较大、地形相对不平缓，可能是造成气温对耕地 NDVI 影响程度存在差异的原因之一。时滞旬数以 2 旬为主，西部集贤县、汤原县、佳木斯市市辖区、依兰县以及勃利县等部分区域响应时间较长时滞 3 旬，东部富锦市、宝清市、虎林市以及密山市部分区域响应时间较短时滞 1 旬。

具体分析各县域旬均温与旬 NDVI 的最大无偏相关系数和时滞旬数发现（表 1），县域最大无偏相关系数均值均大于 0.91。友谊县最高为 0.97，区域耕地 NDVI 受气温变化的影响程度较大；穆棱市最低为 0.91，区域耕地 NDVI 受气温变化的影响程度较小。佳木斯市市辖区、集贤县、汤原县时滞旬数大于 2.30 旬，区域耕地 NDVI 对气温变化的响应较慢；虎林市时滞旬数小于 1.5 旬，区域耕地 NDVI

对气温变化的响应较快。

通过计算耕地在各时滞情况下旬 NDVI 和旬降水的相关性，获取了最大无偏相关系数和对应的时滞旬数（图 6），来分析耕地 NDVI 对区域降水量变化的响应程度和响应时间差异。旬降水与旬 NDVI 的最大无偏相关系数大多集中在 0.778~0.927 之间；研究区东部抚远县、同江市、饶河县、虎林市、密山市、宝清县以及富锦市部分区域较低，区域降水对耕地 NDVI 的影响较小。时滞旬数以 1 旬为主，宝清县、桦川县、虎林市以及密山市等部分区域未出现时滞现象；而西南部部分区域时滞达 2 旬，以抚远县、饶河县以及同江市为代表的东北角区域响应时间较长，时滞达 3 旬。

各县最大无偏相关系数均值均大于 0.71（表 1）。七台河市市辖区、萝北县、双鸭山市市辖区以及鸡西市市辖区最高为 0.83，区域耕地 NDVI 受降水量变化的影响较大；饶河县和抚远县最低为 0.71，区

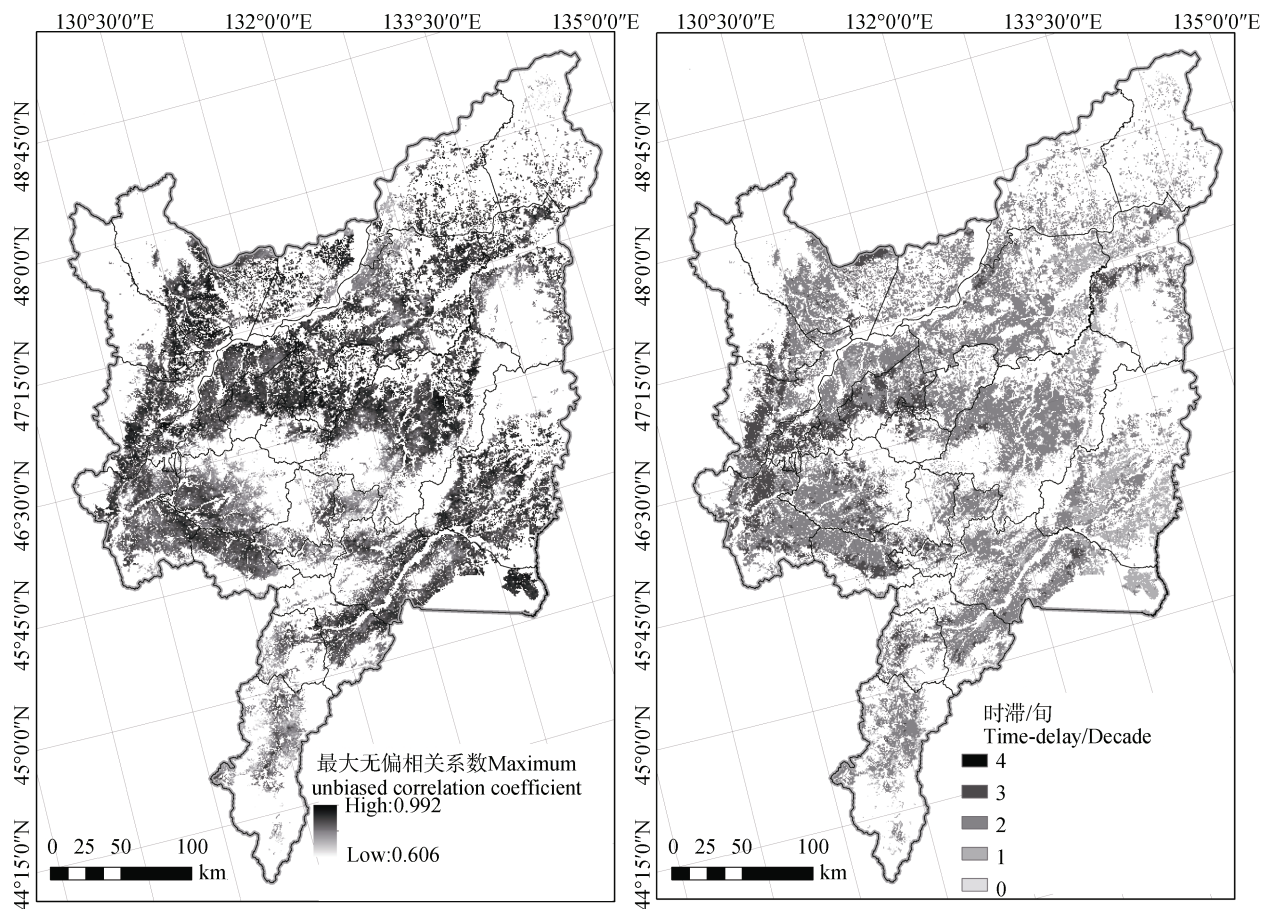


图 5 旬均温对旬 NDVI 的最大无偏相关系数（左）及相应时滞（右）分布

Fig. 5 Distribution of the maximum unbiased correlation coefficients between ten-day mean air temperature and ten-day NDVI (Left) and their respective time-lags (Right)

表 1 县域耕地 NDVI 与气候因子最大无偏相关系数和时滞

Table 1 Maximum unbiased correlation coefficient and time-lag of NDVI and change in climate factors in farmland relative to county

行政区 Administrative area	气温 Air temperature		降水量 Precipitation	
	最大无偏相关系数	时滞/旬	最大无偏相关系数	时滞/旬
	Maximum unbiased correlation coefficient	Time-delay/ ten days	Maximum unbiased correlation coefficient	Time-delay/ ten days
宝清 Baoqing	0.95	1.80	0.80	0.98
勃利 Boli	0.94	2.07	0.82	1.31
抚远 Fuyuan	0.95	1.50	0.71	2.90
富锦 Fujin	0.95	1.83	0.79	1.11
鹤岗 Hegang	0.95	2.10	0.83	1.22
虎林 Hulin	0.96	1.44	0.76	0.80
桦川 Huachuan	0.95	2.12	0.81	1.11
桦南 Huanan	0.93	2.05	0.82	1.22
鸡东 Jidong	0.94	1.85	0.79	1.24
鸡西 Jixi	0.93	1.97	0.83	1.47
集贤 Jixian	0.96	2.36	0.82	1.14
佳木斯 Jiamusi	0.94	2.71	0.81	1.60
萝北 Luobei	0.96	2.07	0.83	1.07
密山 Mishan	0.95	1.75	0.78	1.02
穆稜 Muling	0.91	1.69	0.82	1.66
七台河 Qitaihe	0.92	1.91	0.83	1.20
饶河 Raohe	0.95	1.84	0.71	2.10
双鸭山 Shuangyashan	0.94	2.19	0.83	1.47
绥滨 Suibin	0.96	2.02	0.81	1.10
汤原 Tangyuan	0.95	2.32	0.81	1.28
同江 Tongjiang	0.95	1.85	0.74	2.37
依兰 Yilan	0.94	2.27	0.82	1.38
友谊 Youyi	0.97	1.84	0.81	1.00

域耕地 NDVI 受降水量变化的影响较小。抚远县、同江市以及饶河县时滞旬数大于 2 旬，区域耕地 NDVI 对降水变化的响应较慢；宝清县和虎林市时滞旬数小于 1 旬，区域耕地 NDVI 对降水变化的响应较快。

综合分析区域耕地旬 NDVI 与旬气候因子的最大无偏相关系数和时滞旬数发现，区域旬均温与旬 NDVI 的相关系数整体大于旬降水与旬 NDVI 的相关系数，说明区域气温对耕地 NDVI 的影响程度大

于降水对其的影响。同时除了抚远县、饶河县以及同江市外耕地旬 NDVI 对旬均温的时滞旬数均大于其对旬降水的时滞旬数，说明除了上述三个县域外区域耕地 NDVI 对气温的响应时间均大于对降水的响应时间。值得注意的是，佳木斯市市辖区以及双鸭山市市辖区耕地 NDVI 无论是对气温或降水的时滞旬数均高于三江平原其他区域，说明该区域耕地 NDVI 对区域气候因子变化的响应较慢。而密山市、宝清县以及虎林市的表征完全相反，说明该区域耕

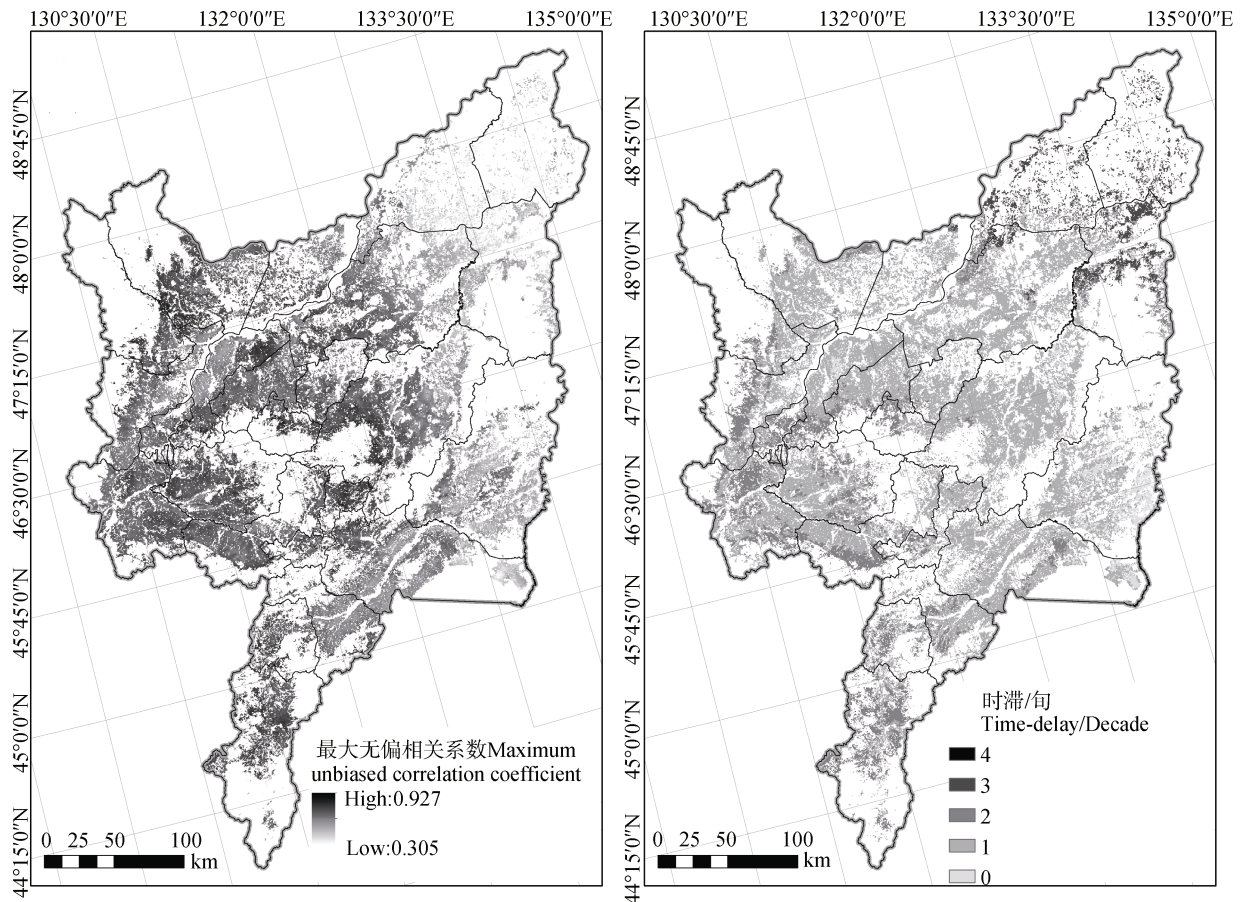


图 6 旬降水量对旬 NDVI 的最大无偏相关系数 (左) 及相应时滞 (右) 分布

Fig. 6 Distribution of the maximum unbiased correlation coefficients between ten-day precipitation and ten-day NDVI (Left) and their respective time-lags (Right)

地 NDVI 对区域气候因子变化的响应较快。抚远县和穆棱市耕地 NDVI 对气温的时滞旬数较低而对降水的时滞旬数较高, 说明区域对气温变化的响应较快而对降水变化的响应较慢。在指导耕作时, 应积极考虑相关因素, 因地制宜地进行调整, 保障区域粮食生产与安全。

2.3.2 耕地利用类型差异 分析气候因子对不同

耕地类型 (旱地和水田) NDVI 的最大无偏相关系数和时滞旬数 (表 2)。发现气温对水田 NDVI 的影响大于其对旱地 NDVI 的影响; 旬均温与旱地旬 NDVI 的最大无偏相关系数均值为 0.942, 水田则为 0.962。同时旱地 NDVI 对气温变化的响应时间要较水田 NDVI 长; 旱地旬 NDVI 对旬均温的时滞旬数均值为 2.026 旬, 水田则为 1.633 旬。

表 2 气温和降水与不同耕地类型的相关系数及时滞

Table 2 Correlation coefficients of NDVI with air temperature and precipitation and time-lags relative to type of cultivated land

类型 Type	旬均温 Mean air temperature in ten days						旬降水量 Precipitation in ten days					
	最大无偏相关系数			时滞/旬			最大无偏相关系数			时滞/旬		
	Maximum unbiased correlation coefficient			Time-delay/ten days			Maximum unbiased correlation coefficient			Time-delay/ten days		
	R <sub>min</sub>	R <sub>mean</sub>	R <sub>max</sub>	T <sub>min</sub>	T <sub>mean</sub>	T <sub>max</sub>	R <sub>min</sub>	R <sub>mean</sub>	R <sub>max</sub>	T <sub>min</sub>	T <sub>mean</sub>	T <sub>max</sub>
旱地 Dry land	0.606	0.942	0.992	0	2.026	4	0.305	0.809	0.927	0	1.323	4
水田 Paddy field	0.799	0.962	0.991	0	1.633	3	0.489	0.765	0.903	0	1.045	4



降水对旱地 NDVI 的影响大于其对水田 NDVI 的影响; 旬降水与旱地旬 NDVI 的最大无偏相关系数均值为 0.809, 水田则为 0.765。但是旱地 NDVI 对降水变化的响应时间较水田 NDVI 的长; 旱地旬 NDVI 对旬降水的时滞旬数均值为 1.323 旬, 水田则为 1.045 旬。

综合气温和降水量对不同耕地利用类型 NDVI 的影响发现, 气温对区域水田 NDVI 的影响较大; 而受灌溉条件的影响, 降水量对区域旱地 NDVI 的影响较大。旱地 NDVI 对区域气候因子的响应时间大于水田的响应时间。

三江平原气候变化显著, 对区域土地利用影响深远<sup>[19]</sup>。土地利用变化进一步影响地表温度<sup>[20]</sup>、生态系统<sup>[21]</sup>进而对区域气候产生影响。三江平原植被 NDVI 与气温和降水量主要呈正相关关系, 同时降水是三江平原植被生长的主导气候因子<sup>[22]</sup>。本文进一步分析耕地 NDVI 对气候因子的响应关系发现, 区域气温对耕地 NDVI 的影响程度大于降水对其的影响, 这可能是由于三江平原高纬度的地理位置以及农作物生长需要累积必要的积温条件导致的。气温和降水量对三江平原农作物蒸散发量产生一定影响; 气温对作物需水量影响显著, 降水对其的影响不显著<sup>[23]</sup>。这也间接说明区域气温对农作物生长的影响程度大于降水量对其的影响。同时三江平原水文干旱往往滞后于气候干旱<sup>[24]</sup>。本文研究也表明, 区域耕地 NDVI 对气候因子变化的响应往往产生一定的滞后性, 对气温的滞后时间更长。因此, 根据不同县域耕地 NDVI 以及不同耕地利用类型 NDVI 对区域气温和降水的时滞响应差异可以适当调整实际农业耕种与机械投入的侧重点, 根据气象预测及时调整并进行针对性的机械灌溉以保障耕地长势与产量的稳定与安全。

研究结果可为指导区域耕作生产、气候适应性种植、保障粮食稳定等提供依据。但影响耕地利用的因素较多, 气候资源、水资源、土壤资源、地形因素以及社会经济因素等会对耕地利用系统产生综合性、系统性的影响。本文从气候因子与耕地 NDVI 的时滞关系出发进而探寻区域气候变化对耕地利用的可能影响。今后将在厘清复杂耦合关系, 明晰耕地利用系统的变化规律上展开进一步研究。同时 NDVI 受区域气候因子变化、人类活动变化以及土

地利用变化等多种因素影响, 未来研究将在量化分析气候因子变化对其的影响上进一步开展。

### 3 结 论

三江平原耕作期气温年际变化较降水量变化更加稳定。气温在月际变化上的表现较为规律, 而降水量月际变化的规律性较弱、年内波动较大。研究区耕地 9 月植被覆盖度最大, 耕地长势较好。耕作期耕地 NDVI 年际差异较小, 多年变化的空间差异主要分为以西部区域为代表的“低值-不稳定-增加趋势”区域以及东部为代表的“高值-稳定-减少趋势”区域。区域气温对耕地 NDVI 的影响程度大于降水对其的影响。除抚远县、饶河县以及同江市外区域耕地 NDVI 对气温的响应时间大于对降水的响应时间。佳木斯市市辖区以及双鸭山市市辖区耕地 NDVI 对区域气候因子变化的响应较慢; 而密山市、宝清县以及虎林市耕地 NDVI 对区域气候因子变化的响应较快; 抚远县和穆棱市耕地 NDVI 对气温变化的响应较快而对降水变化的响应较慢。气温对区域水田 NDVI 的影响较大, 旱地 NDVI 对区域气候因子的响应时间大于水田 NDVI 的响应时间。

### 参考文献 (References)

- [ 1 ] Zhao Y X, Xiao D P, Bai H Z, et al. Research progress on the response and adaptation of crop phenology to climate change in China[J]. *Progress in Geography*, 2019, 38 ( 2 ): 224—235. [赵彦茜, 肖登攀, 柏会子, 等. 中国作物物候对气候变化的响应与适应研究进展[J]. *地理科学进展*, 2019, 38 ( 2 ): 224—235.]
- [ 2 ] Bussi G, Janes V, Whitehead P G, et al. Dynamic response of land use and river nutrient concentration to long-term climatic changes[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 590/591: 818—831.
- [ 3 ] Li X X, Zhu F W, Xu T Y, et al. Short term response of soil properties and rice growth to land consolidation in South of Jiangsu Province[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2019, 56 ( 3 ): 571—581. [李肖肖, 朱凤武, 许桃元, 等. 苏南农田土壤性状和水稻长势对土地整治的短期响应[J]. *土壤学报*, 2019, 56 ( 3 ): 571—581.]
- [ 4 ] Guan Y J, Zou Z L, Zhang X P, et al. Research on the inversion model of cultivated land quality based on normalized difference vegetation index[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2018, 49 ( 4 ): 779—787. [官炎俊, 邹自力, 张晓平, 等. 基于归一化植被指数的耕

- 地质量反演模型研究[J]. 土壤通报, 2018, 49(4): 779—787.]
- [ 5 ] Fernandes J L, Ebecken N F F, Esquerdo J C D M. Sugarcane yield prediction in Brazil using NDVI time series and neural networks ensemble[J]. International Journal of Remote Sensing, 2017, 38(16): 4631—4644.
- [ 6 ] Zhou B Q, Qiu L X, Zhang L M, et al. Study on driving factors of soil acidification based on grey correlation-structure equation model[J]. Acta Pedologica Sinica, 2018, 55(5): 1233—1242. [周碧青, 邱龙霞, 张黎明, 等. 基于灰色关联-结构方程模型的土壤酸化驱动因子研究[J]. 土壤学报, 2018, 55(5): 1233—1242.]
- [ 7 ] Cao Q W, Wu J S, Tong D, et al. Drivers of regional agricultural land changes based on spatial autocorrelation in the Pearl River Delta, China[J]. Resources Science, 2016, 38(4): 714—727. [曹祺文, 吴健生, 仝德, 等. 基于空间自相关的区域农地变化驱动力研究——以珠三角地区为例[J]. 资源科学, 2016, 38(4): 714—727.]
- [ 8 ] Du G M, Ma J P, Zhang L Y, et al. Spatiotemporal characteristics of grain potential productivity change under the background of climate change over the past 50 years in the Sanjiang plain[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2018, 25(2): 361—366. [杜国明, 马敬盼, 张露洋, 等. 近 50 年气候驱动下三江平原粮食生产潜力时空演变分析[J]. 水土保持研究, 2018, 25(2): 361—366.]
- [ 9 ] Alexandru A. Consideration of land-use and land-cover changes in the projection of climate extremes over North America by the end of the twenty-first century[J]. Climate Dynamics, 2018, 50(5/6): 1949—1973.
- [ 10 ] Pang J, Du Z Q, Zhang X Y. Time-lagged response of vegetation to hydro-thermal factors in Xinjiang region[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2015, 36(7): 82—88. [庞静, 杜自强, 张霄羽. 新疆地区植被对水热条件的时滞响应[J]. 中国农业资源与区划, 2015, 36(7): 82—88.]
- [ 11 ] Wu L L, Ren Z Y, Zhang C. Response of NDVI to temperature and precipitation changes and its lag time in North Shaanxi[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2014, 35(1): 103—108. [吴丽丽, 任志远, 张翀. 陕北地区植被指数对水热条件变化的响应及其时滞分析[J]. 中国农业气象, 2014, 35(1): 103—108.]
- [ 12 ] Song G, Yang X X, Gao J. Study on the distribution patterns and characteristics of paddy cropland in the typical area of Sanjiang plain[J]. China Land Sciences, 2017, 31(8): 61—68. [宋戈, 杨雪昕, 高佳. 三江平原典型地区水田分布格局变化特征[J]. 中国土地科学, 2017, 31(8): 61—68.]
- [ 13 ] Du G M, Pan T, Yin Z R, et al. Cultivated landscape pattern change due to the rice paddy expansion in Northeast China: A case study in Fujin[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2015, 26(1): 207—214. [杜国明, 潘涛, 尹哲睿, 等. 水田化进程中的富锦市耕地景观格局演化规律[J]. 应用生态学报, 2015, 26(1): 207—214.]
- [ 14 ] Zhou H, Lei G P, Yang X X, et al. Simulation for balanced effect of soil and water resources on cultivated land in Naoli River Basin, Northeast China under the RCPs climate scene[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2018, 29(4): 1302—1312. [周浩, 雷国平, 杨雪昕, 等. RCPs 气候情景下挠力河流域耕地水土资源平衡效应模拟[J]. 应用生态学报, 2018, 29(4): 1302—1312.]
- [ 15 ] Su X D, Luan Z Q, Zhang X P. Variations of temperature and precipitation in Sanjiang Plain: A case study of Jiansanjiang reclamation areas[J]. Geographical Research, 2012, 31(7): 1248—1256. [苏晓丹, 栾兆擎, 张雪萍. 三江平原气温降水变化分析——以建三江垦区为例[J]. 地理研究, 2012, 31(7): 1248—1256.]
- [ 16 ] Chen D K, Ma C, Wang X B, et al. Variation of NDVI and its response to climate change in Hoh Xil during the period of 1982—2015[J]. Arid Zone Research, 2018, 35(6): 1410—1417. [陈登魁, 马超, 王夏冰, 等. 1982—2015 年可可西里 NDVI 变化特征及其气候响应[J]. 干旱区研究, 2018, 35(6): 1410—1417.]
- [ 17 ] Chen T, Bao A M, He D M. Analyzing dynamic vegetation change and its driving factors in Panzihua City using MODIS NDVI data[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2018, 27(8): 1847—1857. [陈桃, 包安明, 何大明. 基于 MODIS NDVI 的攀枝花市植被覆盖变化及其驱动力[J]. 长江流域资源与环境, 2018, 27(8): 1847—1857.]
- [ 18 ] Tian Y C, Liang M Z. The NDVI characteristics of vegetation and its ten-day response to temperature and precipitation in Beibu Gulf Coastal Region[J]. Journal of Natural Resources, 2016, 31(3): 488—502. [田义超, 梁铭忠. 北部湾沿海地区植被覆盖对气温和降水的旬响应特征[J]. 自然资源学报, 2016, 31(3): 488—502.]
- [ 19 ] Liu J P, Gao J, Dong C Y. Regional differentiation and factors influencing changes in swamps in the Sanjiang Plain from 1954 to 2015[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(13): 4821—4831. [刘吉平, 高佳, 董春月. 1954—2015 年三江平原沼泽湿地变化的区域分异及影响因素[J]. 生态学报, 2019, 39(13): 4821—4831.]
- [ 20 ] Du G M, Liu W Q, Yu J X, et al. Influence of paddy field and dry field distribution on local surface temperature by remote sensing inversion in Sanjiang Plain[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(5): 259—267, 320. [杜国明, 刘文琦, 于佳兴, 等. 三江平原水旱田分布对遥感反演局地地表温度的影响[J]. 农业工程学报, 2019, 35(5): 259—267, 320.]

- [ 21 ] Liu X H, Zhang Y, Dong G H, et al. Difference in carbon budget from marshlands to transformed paddy fields in the Sanjiang Plain, Northeast China[J]. *Ecological Engineering*, 2019, 137: 60—64.
- [ 22 ] Zhang J Q, Zhang B, Ma B, et al. Spatial-temporal variation of NDVI in Sanjiang Plain and its response to climate change[J]. *Journal of Desert Research*, 2019, 39 ( 3 ): 206—213. [张佳琦, 张勃, 马彬, 等. 三江平原 NDVI 时空变化及其对气候变化的响应[J]. *中国沙漠*, 2019, 39 ( 3 ): 206—213.]
- [ 23 ] Ren X L, Li H L, Zhang Y H, et al. Water requirement characteristics and influencing factors of main crops in the Sanjiang Plain from 2000 to 2015[J]. *Arid Land Geography*, 2019, 42 ( 4 ): 854—866. [任修琳, 李宏亮, 张玉虎, 等. 2000—2015 年三江平原主要作物需水量特征及影响因素分析[J]. *干旱区地理*, 2019, 42( 4 ): 854—866.]
- [ 24 ] Zheng Y X, Wu Y F, Pan X N, et al. Evolution characteristics of meteorological and hydrological drought in Sanjiang Plain[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2019, 26 ( 4 ): 177—184, 189. [郑越馨, 吴燕锋, 潘小宁, 等. 三江平原气象水文干旱演变特征[J]. *水土保持研究*, 2019, 26( 4 ): 177—184, 189.]

( 责任编辑: 檀满枝 )