

杜国明,孙嘉曼,李玉恒. 东北黑土地产能时空演变及其提升对策[J]. 地球科学与环境学报, 2023, 45(2): 338-349.

DU Guo-ming, SUN Jia-man, LI Yu-heng. Spatio-temporal Evolution of Black Cropland Productivity in Northeast China and Its Promotion Countermeasures[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2023, 45(2): 338-349.

DOI: 10. 19814/j. jese. 2022. 04044

·《地球科学与环境学报》更名二十周年纪念专辑·

东北黑土地产能时空演变及其提升对策

杜国明¹, 孙嘉曼¹, 李玉恒^{2,3*}

(1. 东北农业大学 公共管理与法学院, 黑龙江 哈尔滨 150030; 2. 中国科学院地理科学与资源研究所
中国科学院区域可持续发展分析与模拟重点实验室, 北京 100101;
3. 中国科学院大学 资源与环境学院, 北京 100190)

摘 要: 东北黑土地产能变化的时空演化规律研究对于保护东北黑土地、保障国家粮食安全具有重要意义。基于 MODIS-EVI 数据, 利用阈值法以作物最优生长时长(MAD)表征黑土地产能, 揭示 2010~2018 年东北黑土地产能的时空演变及提升潜力。结果表明: ①东北黑土地产能整体由中南向西北递减, 以作物最优生长时长 2~4 级为主, 种植集中区主要分布于松嫩平原东部及三江平原中西部地区; ②东北黑土地产能 2010~2018 年总体表现为先上升后下降的趋势, 70%左右的黑土地产能保持稳定, 产能显著提升的黑土地占 3.99%, 产能显著下降的占 24.88%; ③东北黑土地产能提升潜力整体处于中等水平, 空间上呈现“西高东低”状态, 具有较大提升潜力的耕地较少。基于上述研究结果, 参考黑土地保护的梨树模式、龙江模式, 针对黑土地出现的“变薄、变瘦、变硬”等问题, 提出了东北黑土地产能提升与保护的政策建议。

关键词: 黑土地; 产能; 作物最优生长时长; 时空特征; 提升潜力; 保护; 东北

中图分类号: F301.2; P237 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-6561(2023)02-0338-12

Spatio-temporal Evolution of Black Cropland Productivity in Northeast China and Its Promotion Countermeasures

DU Guo-ming¹, SUN Jia-man¹, LI Yu-heng^{2,3*}

(1. School of Public Administration and Law, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, Heilongjiang, China; 2. Key Laboratory of Regional Sustainable Development Modeling, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 3. College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: Research on the spatio-temporal evolution patterns of black cropland productivity changes in Northeast China is essential to protect black cropland and ensure food security in China. Basing on MODIS-EVI data, the threshold method was used to characterize the productivity changes of black cropland in Northeast China by the most active day (MAD). The spatio-temporal evolution and productivity improvement potential of black cropland in Northeast China were revealed. The results show that ① the overall black cropland productivity decreases from the middle-south to the northwest of Northeast China, with crop MAD major levels being 2

收稿日期: 2022-04-29; 修回日期: 2022-09-24 投稿网址: <http://jese.chd.edu.cn/>

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFD1500101)

作者简介: 杜国明(1978-), 男, 内蒙古宁城人, 教授, 博士研究生导师, 理学博士, 博士后, E-mail: duguoming@neau.edu.cn。

* 通讯作者: 李玉恒(1983-), 男, 河北石家庄人, 中国科学院地理科学与资源研究所副研究员, 理学博士, 博士后,
E-mail: liyuheng@igsrr.ac.cn。

to 4, and the planting concentration areas are mainly distributed in the eastern part of Songnen Plain and the central-western part of Sanjiang Plain; ② the overall black cropland productivity in Northeast China shows a trend of increasing and then decreasing during 2010 to 2018; among them, about 70% of black cropland productivity remains stable with a significant increase of 3.99% and a significant decrease of 24.88%; ③ the overall improvement potential of black cropland productivity in Northeast China is in a medium level, and its spatial distribution is “high in the west and low in the east” with less black cropland having more improvement potential. Basing on the above research results, and regarding the Lishu model and the Longjiang model, the policy suggestions for improving black cropland productivity and protection were proposed to solve the problems of “thinning, leaning, and hardening” of black cropland.

Key words: black cropland; productivity; crop MAD; spatio-temporal characteristic; improvement potential; protection; Northeast China

0 引言

耕地生产能力是人类生存与发展的基础,是国家粮食安全与社会永续发展的根本保证^[1-3]。随着全球化和城镇化快速发展以及气候变化影响,全球粮食安全与耕地生态环境遭受巨大威胁^[4]。作为世界最大的发展中国家,人多地少是中国基本国情。在新冠疫情全球肆虐、局部冲突不断、国际粮食贸易受阻的背景下,如何利用有限的耕地资源来保障粮食安全,是中国保持稳定发展所面临的关键问题^[5-9]。黑土耕地即黑土地,是耕地中的精华^[10],以土地肥沃、生产力高而闻名。中国东北黑土区是世界四大黑土区之一,东北地区粮食总产量及商品粮输出量分别占全国的 1/4 和 1/3 左右^[11],是中国粮食安全的“压舱石”。然而,耕地垦殖后的成土条件变化以及人类的长期高强度利用^[12-13],导致黑土地土壤逐渐“变薄、变瘦、变硬”^[14-17],粮食综合生产能力和农业生态安全面临严峻挑战,严重威胁国家粮食安全的根基。因此,开展东北黑土地产能估算及时空演变研究,对于认知黑土地状况,支撑黑土地保护决策具有重要参考意义。

耕地产能是指在一定地域、一定时期和一定经济、社会、技术条件下所形成的耕地生产能力,分为耕地理论产能、可实现产能和实际产能 3 个层次^[18]。准确评估耕地产能是保障粮食安全,全面了解耕地资源的基础^[19],国内外学术界对其评估方法、评估模型等进行了深入研究^[20-21]。国外学者的研究多侧重于耕地生产潜力的评估与机制分析,尤其在影响作物生长机理和耕地产能模型研究上较为深入^[22-23];而国内学者多采用农业生产潜力调查^[18,24]、土地质量评估^[18]、农用地分等^[25]和改进的

农业生态区划法^[26]等来表征耕地产能。在数据源方面,随着遥感技术的不断发展,中高分辨率遥感影像可对耕地地面信息进行准确客观地反映,因而被广泛应用于耕地产能估算与监测^[27]。其中,使用增强植被指数(EVI)数据对耕地产能进行估算更为精准与广泛^[28-33]。但应注意的是,当前遥感技术应用于耕地产能估算研究多聚焦于地级市或县域等局部地区^[24-26],模型适配范围局限,且缺乏统一标准。同时,近年来东北黑土区气候变化较为显著,种植业结构快速调整,土壤理化性质有所变化^[34-35],势必会对耕地产能产生巨大影响,但该区域长时序耕地产能变化研究却鲜见报道。

基于此,本文从实际产能角度出发,基于作物最优生长时长(Most Active Day, MAD)估算方法,采用 MODIS-EVI 数据,分析 2010~2018 年东北黑土地产能及其时空演变情况,并评估其后续增产潜力;参考黑土地保护的梨树模式、龙江模式,针对黑土地土壤出现的“变薄、变瘦、变硬”等问题,提出了东北黑土地产能提升与保护的政策建议,以期在一定程度上弥补东北黑土地产能全局性研究的不足。

1 研究区概况及数据来源

1.1 研究区概况

由于黑土和黑钙土有机质含量更高、黑土层更厚,并集中分布在东北地区的中心区域,部分学者将这两种土壤称为典型黑土^[10]。本文根据上述两种土壤和东北地区的耕地分布数据,提取典型黑土地分布图;然后,根据黑土地的分布,将黑龙江省大部、吉林省大部、辽宁省北部以及内蒙古自治区东五盟(市)的 146 个县级行政区,划定为东北黑土区(图 1)。该区南北跨约 15 个纬度,东西跨约 20 个经度;

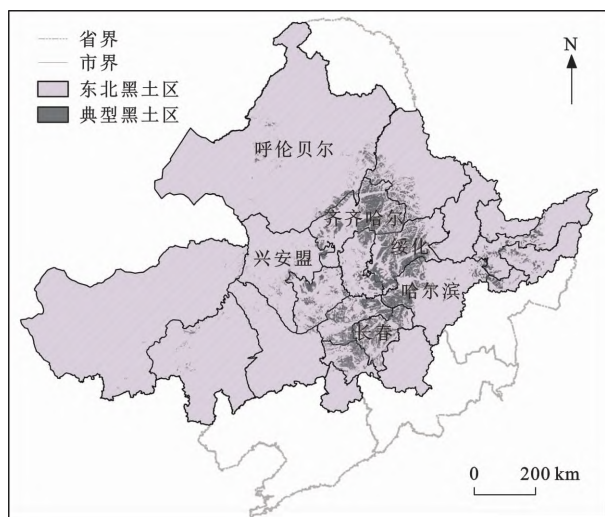


图1 东北黑土区示意图

Fig. 1 Sketch Map of Black Cropland in Northeast China

最冷月、最热月的平均气温分别为 $-32^{\circ}\text{C} \sim -6^{\circ}\text{C}$ 、 $20^{\circ}\text{C} \sim 24^{\circ}\text{C}$ ；年均降水量为 $400 \sim 1\,200\text{ mm}$ ，自东南向西北递减，降雨主要集中在 6 月至 9 月，占全年降水量的 $60\% \sim 70\%$ 。2018 年，该区耕地面积为 $3\,924 \times 10^4\text{ hm}^2$ ，粮食产量为 $16\,249.14 \times 10^4\text{ t}$ ，农业机械总动力为 $13\,515.5 \times 10^4\text{ kW}$ 。主要作物包括玉米、粳稻、大豆等。

1.2 数据来源与预处理

遥感数据来源于美国航空航天局 (NASA) 的 MOD09A1 数据；土地利用数据和土壤数据来源于中国科学院资源环境科学与数据中心数据平台，分别为 $1:100\,000$ 中国多时期土地利用土地覆被遥感监测数据集 (CNLUCC) 和 $1:1\,000\,000$ 中国土壤类型空间分布数据集；粮食产量统计数据来源于各地统计年鉴。数据主要参数见表 1，处理流程见图 2。

1.3 分析方法

1.3.1 作物最优生长时长估算方法

已有研究表明，基于增强植被指数估算的作物最优生长时长能够在一定程度上表征耕地产能^[3]，即耕地实际产能。植被指数数据在采集与处理过程中会受到多重因素的干扰，本研究利用 S-G 滤波方法对增强植被指数数据进行去噪，重建作物增强植被指数生长曲线。同时，鉴于气候因素、种植结构调整可能对作物产能的影响，本研究利用移动窗口法对拟合曲线进行平滑处理，以 5 年为移动窗口将研究期细分为 5 期： T_1 时段为 2010~2014 年； T_2 时段为 2011~2015 年； T_3 时段为 2012~2016 年； T_4 时段为 2013~2017 年； T_5 时段为 2014~2018

表1 数据来源信息

Table 1 Informations of Data Source

数据名称	数据来源	数据年份	空间分辨率/m	时间分辨率/d
MOD09A1 数据	美国航空航天局	2010~2018 年	500	8
土地利用数据	中国科学院资源环境科学与数据中心	2010、2015、2018 年	30	
土壤数据	中国科学院资源环境科学与数据中心	1995 年	1 000	
粮食产量统计数据	统计年鉴	2018 年		

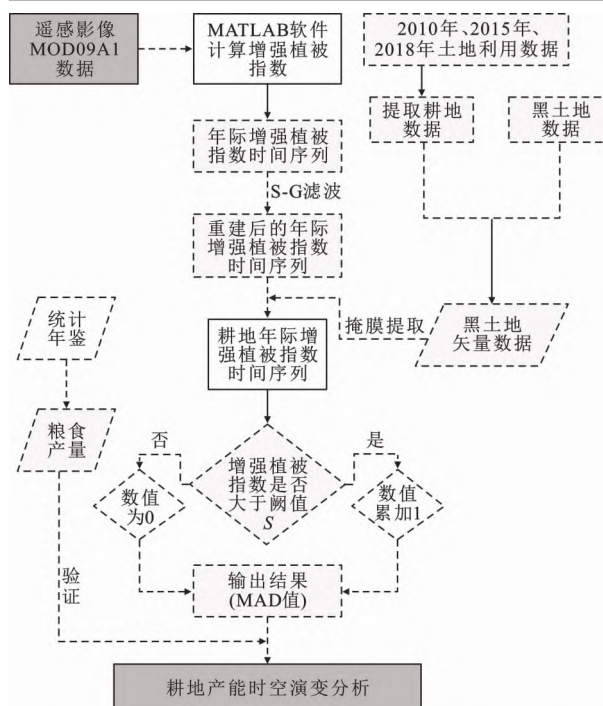


图2 数据处理技术路线

Fig. 2 Data Processing Technology Route

年^[3]。

作物最优生长时长估算方法如下：基于作物增强植被指数生长曲线，采用阈值法提取作物最优生长时长，将所有增强植被指数 ($T_1 \sim T_5$) 由大到小排序，将位于序列 20% 的增强植被指数作为阈值 (S)^[3,36-37]；将所有增强植被指数 ($T_1 \sim T_5$) 与阈值进行比较，若大于阈值，则累加 1；以此类推，直至所有增强植被指数与阈值比较完成，得到各时段内作物最优生长时长 (I_{MAD})。其计算公式为

$$I_{\text{MAD}} = \sum_{d=1}^D 1\{N(g, d) > S\} \quad (1)$$

式中： N 为增强植被指数； g 为研究期个数，即 $T_1 \sim T_5$ ； d 为天数； D 为一年的天数，即 365； S 为阈值^[3]。

1.3.2 黑土地产能估算及划分方法

基于作物最优生长时长,采用简单差值法,分析2010~2018年东北黑土地产能变化。其计算公式为

$$E_{a,r} = I_{MAD,a,r,T_{n+1}} - I_{MAD,a,r,T_n} \quad (2)$$

式中: $E_{a,r}$ 为第 a 行第 r 列像元最优生长时长的差值; I_{MAD,a,r,T_n} 为第 a 行第 r 列像元 T_n 时期的作物最优生长时长; $n=1,2,\dots,4$ ^[3]。

本文采用一元线性回归法对黑土地产能年际变化趋势进行分析,将单个像元多年作物最优生长时长进行拟合,以拟合方程的斜率表征产能的变化趋势。斜率大于0,表示黑土地产能变化趋势为上升;斜率小于0,表示黑土地产能变化趋势为下降;斜率等于0,表示黑土地产能基本不变。以作物最优生长时长序列与时间序列的显著性作为表征产能变化趋势的可置信度(产能存在显著变化,即 $P<0.05$)。基于此,将产能变化趋势分为3类:当斜率大于0且 $P<0.05$ 时,产能显著上升;当 $P>0.05$ 时,产能稳定;当斜率小于0且 $P<0.05$ 时,产能显著下降^[3]。

1.3.3 黑土地产能提升潜力估算方法

东北黑土区的自然条件具有地域性差异,因此,本文基于中国耕作制度区划对东北黑土区进行分区^[38],从而计算黑土地产能提升潜力,以有效避免东北黑土区不同区域因条件差异导致的黑土地产能提升潜力无法比较的问题。黑土地产能可实现潜力等于可实现单产与实际单产的差值^[38]。本文基于东北黑土区耕作制度区划,运用产能提升区与下降区的耕地实际产能最大值、平均值,来计算各分区耕地提升潜力。其计算公式为

$$P_{IM} = \frac{|I_{MAD,max} - I_{MAD,mean}|}{I_{MAD,max}} \times 100\% \quad (3)$$

$$P_{DM} = \frac{|I_{MAD,T_{max}} - I_{MAD,T_5}|}{I_{MAD,T_{max}}} \times 100\% \quad (4)$$

式中: P_{IM} 、 P_{DM} 分别表示评估单元尺度上耕地提升和下降的潜力; $I_{MAD,mean}$ 为研究期内各分区作物最优生长时长平均值,表示研究期内各分区耕地实际产能平均值; $I_{MAD,max}$ 为研究期内各分区作物最优生长时长最大值,表示研究期内各分区耕地实际产能最大值; $I_{MAD,T_{max}}$ 为 T_5 时段各分区作物最优生长时长最大值,表示 T_5 时段各分区耕地实际产能最大值; I_{MAD,T_5} 为 T_5 时段各分区作物最优生长时长,表示 T_5 时段各分区耕地实际产能。

1.3.4 精度验证

由于缺乏采样区的实测数据,本文采用相关分

析法及线性回归法来分析基于增强植被指数的黑土地产能量化模型数据准确性。由于整个研究区内土壤类型不只是黑土和黑钙土,仅黑土地遥感数据与统计年鉴粮食产量数据的可比性不强,所以以2018年东北黑土区黑土地比例较高的部分地级市(盟、州、地区)进行数据精度验证。由图3可知,将作物最优生长时长作为自变量,而将粮食产量作为因变量进行线性回归分析,结果显示两者具有显著的线性相关性(判定系数 $R^2=0.638$)。对模型进行F检验时发现:模型通过检验(F统计量为33.533, $p<0.05$),说明作物最优生长时长会对粮食产量产生影响;作物最优生长时长的回归系数为0.209(t统计量为5.791, $p<0.01$),意味着作物最优生长时长会对粮食产量产生显著的正向影响。Pearson相关分析结果表明,粮食产量和作物最优生长时长之间的相关系数为0.799,并通过0.01水平的显著性检验,说明粮食产量和作物最优生长时长之间有着显著的正相关关系。

2 结果分析

2.1 黑土地产能空间差异性

为清晰展示2010~2018年东北黑土地产能格局特征,应用标准分类法中“分位数”分类,将作物最优生长时长(T_5 时段)划分为5级:1级对应作物最优生长时长为0~40;2级对应40~45;3级对应45~50;4级对应50~55;5级对应55~87。作物最优生长时长及等级分布如图4所示。作物最优生长时长级别以2~4级为主,占总单元数的75.91%,整体由中南向西北递减。4、5级最优生长时长的作物种植范围主要分布在松嫩平原中南部以及三江平原中西部,这些区域地势平坦,土层较厚,水系发达,水资源充沛,其中绥化—哈尔滨—长春—四平沿线的作物最优生长时长级别分异明显;3级最优生长时长的作物呈过渡性分布于4、5级最优生长时长的作物种植范围附近,水土条件也比较适宜农业发展,但地表起伏度明显增加,土层变薄,部分区域气候相对干旱,水资源相对短缺;1、2级最优生长时长的作物主要分布在齐齐哈尔—大庆—松原沿线及其以西的内蒙古自治区,具有数量较少、分布零散的特点,这些区域气候相对干旱,土层较薄,钙积层明显,土壤养分含量偏低,作物生长的限制性因素较多。

2010~2018年,各级最优生长时长的作物面积排名前五的地级市(盟、州、地区)如表2所示。各等级排名前五的地级市(盟、州、地区)单元数占总单元

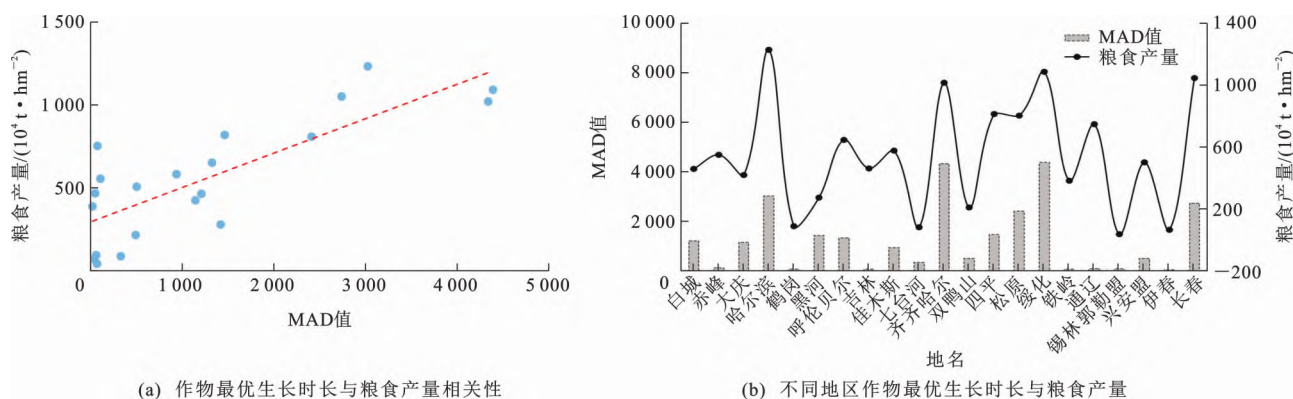
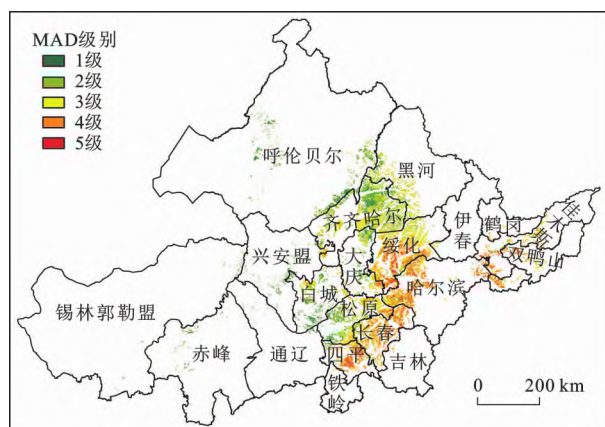


图3 作物最优生长时长与粮食产量相关性对比分析

Fig. 3 Comparative Analyses of Correlation Between MAD and Grain Yield

图4 T_5 时段作物最优生长时长级别分布Fig. 4 Distribution of Crop MAD Grades During T_5

数的比例均大于 60%。3~5 级最优生长时长的作物均分布于黑龙江省和吉林省, 黑龙江省占比较大, 吉林省仅长春、松原、四平排名在列。1 级最优生长时长的作物分布以内蒙古自治区东部地区为主, 占比近 1/3; 2 级最优生长时长的作物在黑龙江省、吉林省、内蒙古自治区均有分布, 并且以黑龙江省为主。各省区 1 级最优生长时长的作物面积由大到小分别为内蒙古自治区、吉林省、黑龙江省; 2 级由大到小分别为黑龙江省、吉林省、内蒙古自治区; 3~5 级由大到小分别为黑龙江省、吉林省。

2.2 黑土地产能时间演化特征

为进一步分析东北黑土地产能变化过程, 采用简单差值法, 将 5 期作物最优生长时长相邻两期两两作差, 得到 4 组差值: 第一组差值 P_1 , 表示 T_2 时段与 T_1 时段之差; 第二组差值 P_2 , 表示 T_3 时段与 T_2 时段之差; 第三组差值 P_3 , 表示 T_4 时段与 T_3 时段之差; 第四组差值 P_4 , 表示 T_5 时段与 T_4 时段之差。如图 5、6 所示, 2010~2018 年东北黑土地产能总体表现为先上升后下降的趋势, 产能变化较大单元主要分布于松嫩平原。差值 P_3 、 P_4 显示减产单

元数近半, 增产单元数不到 1/3, 差值 P_3 、 P_4 与差值 P_1 、 P_2 对比产能变化明显, 呈显著下降趋势。其中, 差值 P_2 与 P_4 显示出的产能变化差异最为明显, 差值 P_2 显示增产单元达 83.14%, 减产单元仅 7.02%, 而差值 P_4 显示增产单元下降至 24.82%, 减产单元高达 47.55%。由此可知, 2010~2018 年各地级市(盟、州、地区)黑土地产能变化有明显差异。

采取一元线性回归法对黑土地产能整体变化趋势进行分析。经统计, 黑土地产能拟合方程斜率为正的单元占 71.31%, 斜率为负的单元占 28.69%。结合显著性检验分析, 产能显著下降的单元占 24.88%, 产能显著提升的单元仅占 3.99% (图 7)。其中, 黑土地产能显著提升单元主要分布在齐齐哈尔—绥化—长春等松嫩平原中南部区域, 产能显著下降单元集中于松嫩平原南部及大、小兴安岭山麓区域。总之, 2010~2018 年近 1/4 的黑土地产能处于显著下降状态, 70% 左右的耕地产能保持稳定。

由图 8、表 3 可知, 2010~2018 年, 位于松嫩平原右半环的齐齐哈尔—绥化—哈尔滨—长春是黑土地产能提升的主要区域, 呈“半圆状”向东、西、北方向递减。产能提升排名前五的地级市(盟、州、地区)均位于松嫩平原, 且其单元数占总提升单元数的 66.15%。其中, 齐齐哈尔(4.54%) 位于首位, 占总提升单元数的 23.17%。

黑土地产能下降单元呈齐齐哈尔—长春双中心联通, 并向两侧递减的态势。位于大兴安岭两侧的呼伦贝尔—齐齐哈尔与松嫩平原南部的长春—松原—哈尔滨是黑土地产能下降的主要区域。产能下降排名前五的地级市(盟、州、地区)除呼伦贝尔外, 均位于松嫩平原。结合显著性检验结果可知, 产能显著下降排名前五的地级市(盟、州、地区)单元数占

表 2 各级最优生长时长的作物面积排名前五地级市(盟、州、地区)统计结果

Table 2 Statistical Results of the Top Five Prefecture-level Cities in Crop MAD Ranking at All Levels

排名	各地区 MAD 为 1 级的 作物面积占比		各地区 MAD 为 2 级的 作物面积占比		各地区 MAD 为 3 级的 作物面积占比		各地区 MAD 为 4 级的 作物面积占比		各地区 MAD 为 5 级的 作物面积占比	
	地区名称	面积占比/%	地区名称	面积占比/%	地区名称	面积占比/%	地区名称	面积占比/%	地区名称	面积占比/%
1	呼伦贝尔	19.68	齐齐哈尔	38.96	绥化	21.29	绥化	23.49	绥化	28.12
2	齐齐哈尔	18.63	黑河	13.20	齐齐哈尔	20.35	哈尔滨	23.38	哈尔滨	19.98
3	白城	15.42	松原	11.99	松原	12.08	长春	20.08	四平	16.50
4	松原	10.34	绥化	9.15	长春	8.11	四平	9.54	长春	13.46
5	兴安盟	9.12	呼伦贝尔	6.82	黑河	7.76	松原	5.64	佳木斯	6.61

注:地区名称指地级市(盟、州、地区)名称;1 级最优生长时长的作物面积排名前五的地区合计占比 73.20%;2 级合计占比 80.12%;3 级合计占比 69.58%;4 级合计占比 82.12%;5 级合计占比 84.67%。

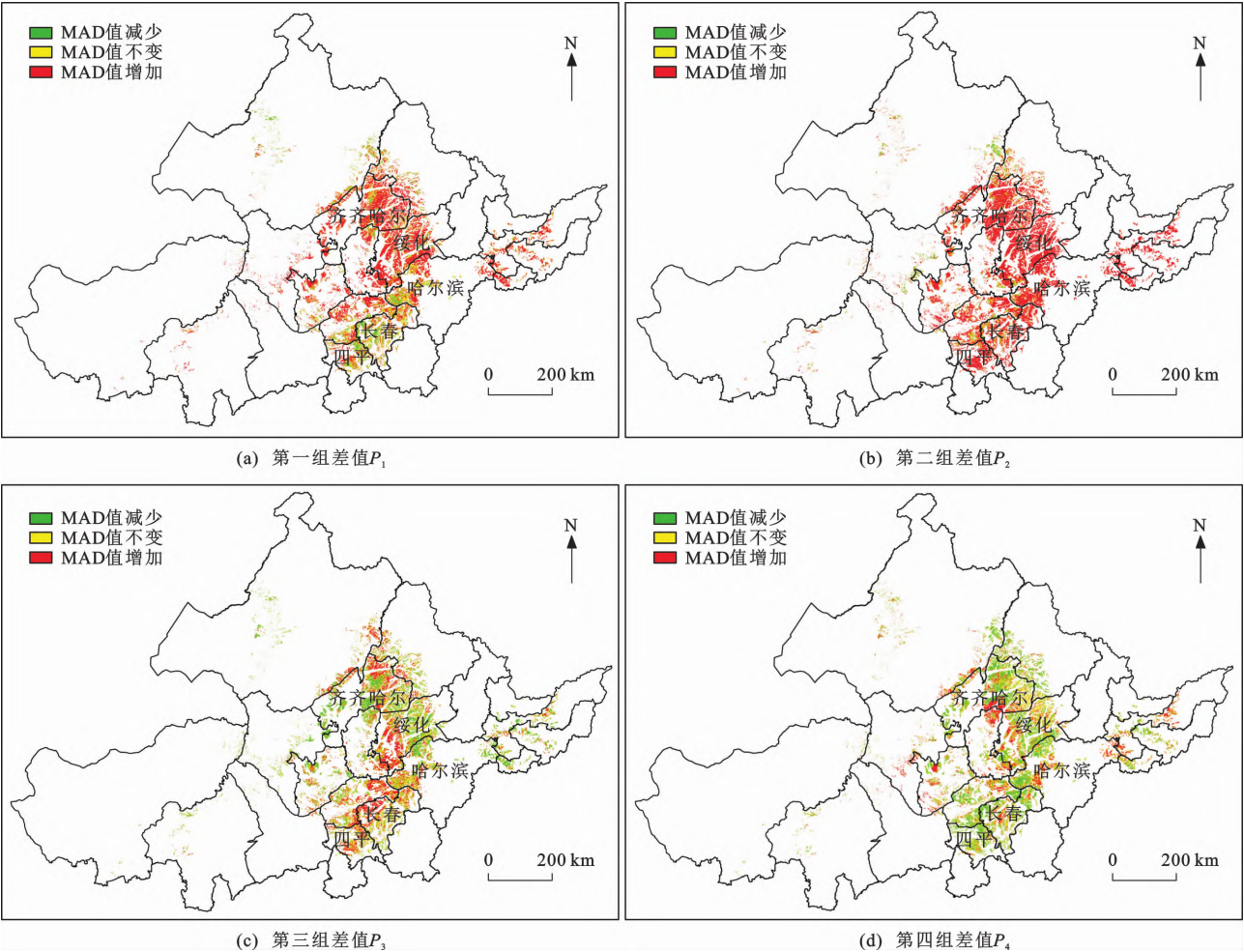


图 5 作物最优生长时长变化空间分布

Fig. 5 Spatial Distributions of Crop MAD Changes

总下降单元数的62.16%。其中,齐齐哈尔(0.96%)位于首位,占总下降单元数的17.55%。

由此可见,2010~2018 年东北黑土地产能变化不平衡,主要表现为:①不同省域黑土地产能变化具有显著差异性特征;②同一省份不同地级市(盟、州、地区)产能变化差异较大。黑土地产能变化主要集中于齐齐哈尔—绥化—哈尔滨—长春—线,作物最

优生长时长级别以 3、4 级为主,且黑土地产能在空间上表现为提升-下降单元交错分布。

综上所述,2010~2018 年东北黑土地产能总体表现为先上升后下降的趋势,区域之间黑土地产能提升与下降趋势呈现出显著差异性。

2.3 黑土地产能提升潜力

经计算,2010~2018 年东北黑土地产能单位面

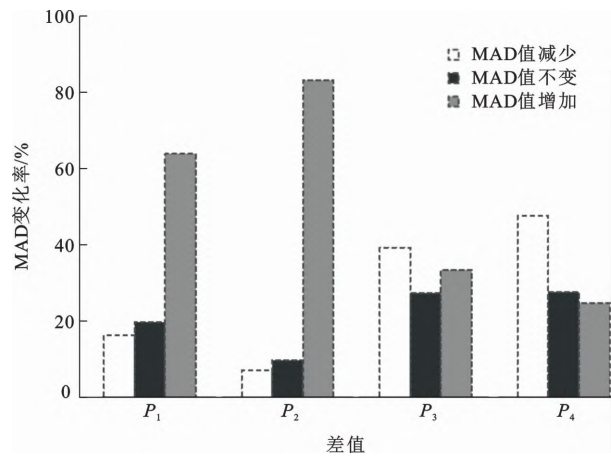


图 6 作物最优生长时长变化
Fig. 6 Diagram of Crop MAD Changes

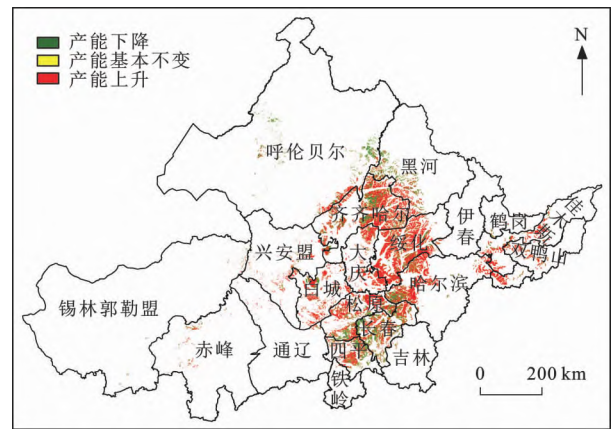


图 7 黑土地产能整体变化趋势
Fig. 7 Overall Change Trend of Black Cropland Productivity

积提升潜力(以下简称“单位面积提升潜力”)介于 20%~60%的耕地占绝大部分,产能提升潜力整体处于中等水平,具有较大提升潜力的耕地较少(表 4)。由图 9 可知,黑土地产能提升潜力呈现“西高东低”的空间特征,具有明显的分级特征。由表 5 可知:在黑土地 2010~2018 年产能提升单元中,未来提升潜力介于 20%~40%的耕地占比最高,为 48.09%;提升潜力高于 80%的耕地仅占 1.38%。在 2010~2018 年产能下降单元中,未来提升潜力介于 40%~60%的耕地占比最高,为 55.62%;产能提升潜力高于 80%的耕地仅占 1.03%。

图 9 展示了产能提升潜力单元空间分布。从图 9 可以看出,东北黑土区不同地区之间黑土地产能提升潜力差异较大,地级市(盟、州、地区)间具有较为明显的级差。产能提升潜力排名前五地级市(盟、州、地区)中有 4 个分布于内蒙古自治区,排名前三地级市(盟、州、地区)提升潜力均高于 60%(表 5)。

表 3 各地级市(盟、州、地区)黑土地产能变化统计结果

Table 3 Statistical Results of Black Cropland Productivity Changes in Each Prefecture-level City

地级市(盟、州、地区)名称	产能上升面积占比/%	产能下降面积占比/%	地级市(盟、州、地区)名称	产能上升面积占比/%	产能下降面积占比/%
齐齐哈尔	4.54	0.96	佳木斯	0.45	0.09
长春	3.99	0.47	双鸭山	0.36	0.08
呼伦贝尔	2.72	0.18	赤峰	0.29	0.04
松原	2.41	0.35	锡林郭勒盟	0.21	0.02
黑河	2.41	0.25	七台河	0.13	0.03
哈尔滨	2.07	0.40	鹤岗	0.13	0.01
绥化	2.04	0.57	吉林	0.07	0.02
四平	1.90	0.24	通辽	0.07	0.02
白城	0.87	0.15	伊春	0.03	0.01
兴安盟	0.60	0.11	铁岭	0.02	0.01
大庆	0.55	0.16			

注:各地级市(盟、州、地区)黑土地产能上升面积占比总计为 25.87%,下降面积占比总计为 4.15%。

表 4 黑土地产能提升潜力统计结果

Table 4 Statistical Results of Black Cropland Productivity Improvement Potential

参数	产能提升潜力范围				
	≤20%	20%~40%	40%~60%	60%~80%	>80%
产能提升单元耕地占比/%	0.15	48.09	47.60	2.78	1.38
产能下降单元耕地占比/%	0.14	37.69	55.62	5.52	1.03

表 5 排名前五地级市(盟、州、地区)产能提升潜力结果

Table 5 Results of Productivity Improvement Potential in the Top Five Prefecture-level Cities

耕地类型	地级市(盟、州、地区)名称	未来产能提升潜力/%	排名
产能下降耕地	通辽	69.21	1
	锡林郭勒盟	67.91	2
	赤峰	66.42	3
	兴安盟	55.56	4
	大庆	53.06	5
产能上升耕地	锡林郭勒盟	63.20	1
	通辽	62.97	2
	赤峰	60.03	3
	兴安盟	54.43	4
	大庆	49.98	5

各地级市(盟、州、地区)中,2010~2018 年产能提升单元未来提升潜力最高的为通辽(69.21%),最低的为吉林(31.37%);2010~2018 年产能下降单元未

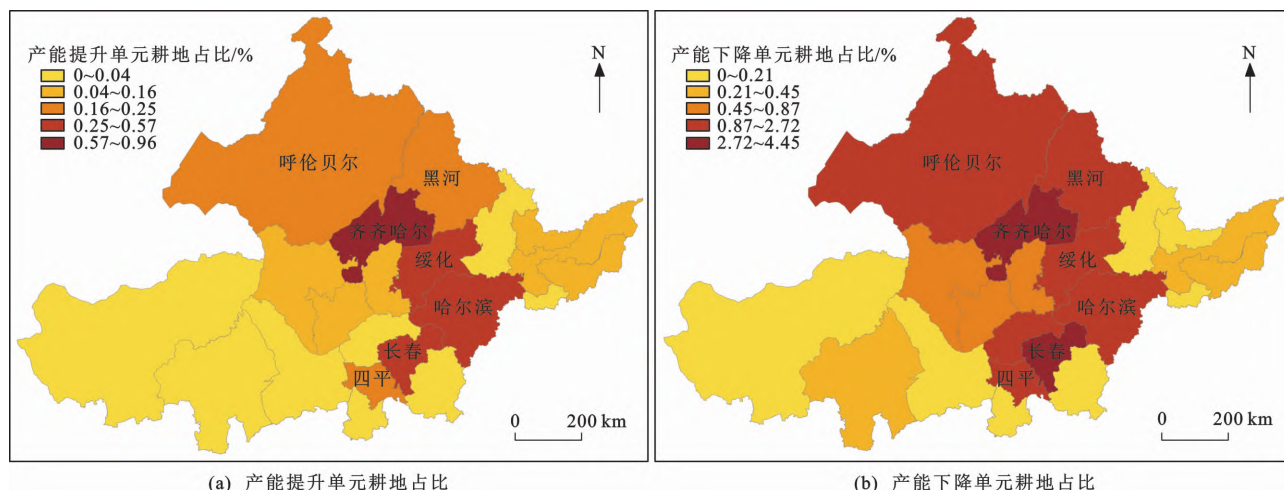


图8 各地级市(盟、州、地区)黑土地产能变化情况分布

Fig. 8 Distributions of Black Cropland Productivity Changes in Each Prefecture-level City

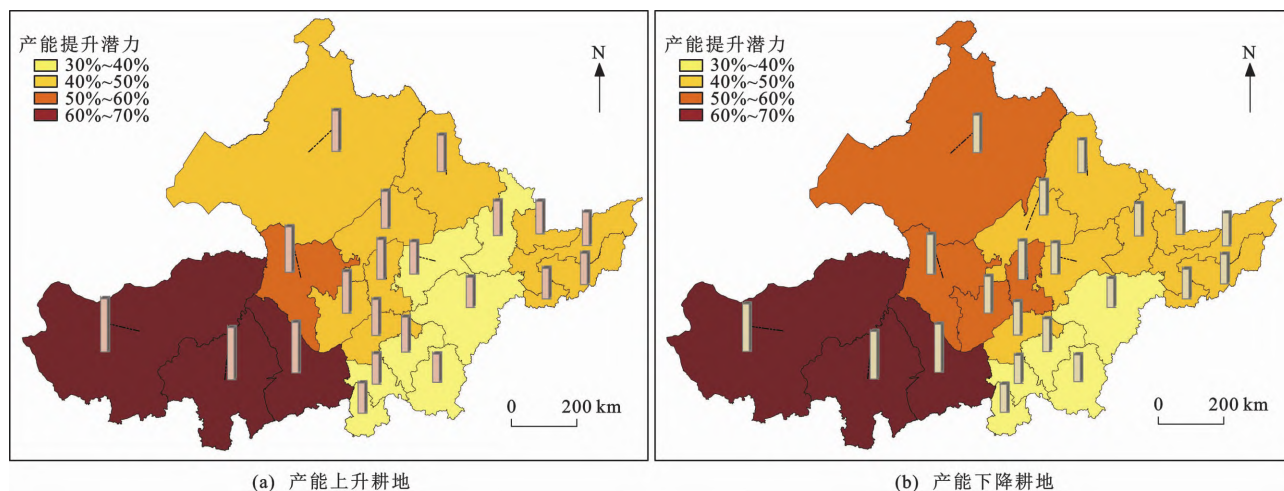


图9 各地级市(盟、州、地区)黑土地产能提升潜力分布

Fig. 9 Distributions of Black Cropland Productivity Improvement Potential in Each Prefecture-level City

来提升潜力最高的为锡林郭勒盟(63.20%),最低的为吉林(33.98%)。从地级市(盟、州、地区)黑土地产能提升潜力来看,潜力值自西向东逐渐递减,分布于东北平原的黑土地产能提升潜力相对稳定,主要集中在20%~60%,而分布于东北平原以外地区的黑土地产能提升潜力差异较大。各省区产能提升和下降单元的提升潜力从大到小分别为内蒙古自治区、黑龙江省、吉林省、辽宁省。整体而言,当前黑土地利用中限制性因素越明显的区域,产能提升潜力越大。如何阻控或削减限制性因素的影响是提升黑土地产能的重要途径。

3 讨论

相关研究表明,基于增强植被指数估算的作物最优生长时长不仅能够一定程度上表征耕地产能,而且适用于东北地区黑土地产能估算^[33]。为了

证明方法适用性和结果可靠性,本文运用相关分析法与线性回归法发现,黑土地产能与作物最优生长时长之间具有显著的线性正相关关系。参考姚东恒等对东北黑土地产能的研究结果^[38],类似年份东北典型黑土地质量等级近1/4处于下降状态,研究结果与本文研究结果相近。

黑土地产能的形成是以土壤要素为核心^[39],气候、水文、地貌、生物等立地条件,沟渠、防护林等农业基础设施,生产投入以及种植业结构演化等多重要素共同作用的结果。多要素协同作用,既塑造着黑土地产能的时空格局,也引起黑土地耕层变薄、地下水位下降、土壤有机质含量降低、土壤结构变硬等问题^[40-45],部分区域耕地利用潜力无法充分释放甚至有所降低。2010~2018年东北黑土地产能绝大部分保持稳定状态,而近1/4黑土地产能处于显著下降状态,说明部分区域黑土地质量下降所伴随的

产能下降是不可避免的,必须采取针对性保育措施。同时也要注意,2015 年农业部《关于“镰刀弯”地区玉米结构调整的指导意见》出台后,东北黑土区的西部、北部地区积极响应,将大面积玉米调整为大豆,也在客观上导致部分区域耕地实际产能有所降低^[46]。

由于黑土地各要素、利用方式以及利用强度等方面的差异,使黑土地产能时空变化具有显著的区域差异特征。东北黑土地产能提升与保护工作,应针对黑土地出现的“变薄、变瘦、变硬”等具体问题,实行区域化举措,达到有效阻控黑土地土壤质量下降、削减限制因素、培肥地力、改善水热等保障条件、提升抵御自然灾害能力的目的。①在中厚黑土地分布区域,以秸秆翻混还田、粉耙还田和松混还田为核心,组合“米-豆”轮作和“米-米-豆”轮作技术,建立黑土层保育模式,提升土壤有机质含量、改善土壤结构。②在浅薄黑土地分布区域,对因风蚀和水蚀造成的黑土层浅薄耕地,在黑土地保育的基础之上增施有机肥,采用秸秆与有机肥深翻、深混等方式进行肥沃耕层构建,实施黑土培育模式,增加黑土层厚度、改善土壤结构。③在水土流失区域,针对坡耕地侵蚀、水土和养分流失等问题,采用工程措施为主、植物措施为辅,植物措施为主、工程措施为辅,植物措施,复垦等 4 种模式,减少土壤侵蚀,增加耕层土壤有机质含量,建立水土保持模式,改善土壤生态;对具有风沙、干旱特征的土壤类型,采用“松免结合”、“米-豆”轮作等方式,建立以组合耕法和组合式秸秆还田方式为特征的保护性耕作模式,防治水土流失。④在障碍土壤分布区域,对犁地层严重的土壤或地块,土壤粘重地块、白浆土等,实行障碍性土层改良培肥模式,采用秸秆、有机肥、土壤调理剂一次性深翻,达到障碍性土层改良的效果。⑤在盐碱地分布区域,以耕层改土治碱为基础、以灌排洗盐为支撑。以碱为主的盐碱地改良要以生物措施和化学改良为主,例如盐碱水田“以稻治碱”模式、盐碱旱地“喷淋洗盐+抗盐作物”模式;以盐为主的盐碱地改良要以水利改良为主,降低耕层盐分,同时配合增施有机肥、合理耕作、使用抗盐作物品种等措施,建立盐碱地生态治理模式。与此同时,各地区需要加强农田基础设施建设,整治出与现代农业发展相适应的田块规模,全面提升农田抵御干旱、洪涝、大风等自然灾害的能力,优化种植业结构及耕地轮作模式,全面提升黑土地粮食产能^[46]。

4 结 语

(1)2010~2018 年东北黑土区,耕地产能格局特征整体由中南向西北递减,作物最优生长时长级别以 2~4 级为主,呈条带状分布在松嫩平原中南部;年际变化上总体表现为先上升后下降的趋势,产能变化较大区域主要集中分布于松嫩平原,产能提升-下降单元交错分布。

(2)2010~2018 年东北黑土地 70%左右的产能保持稳定,近 1/4 处于显著下降状态,显著提升的仅占 3.99%。局部区域黑土地产能下降主要是黑土地质量下降及种植业结构调整的结果。

(3)东北黑土地产能提升潜力整体处于中等水平,空间上呈现“西高东低”状态,具有较大提升潜力的耕地较少。不同地区之间耕地产能提升潜力差异较大,地级市(盟、州、地区)间具有较为明显的级差。由地级市(盟、州、地区)耕地提升潜力来看,潜力值自西向东逐渐递减,分布于东北平原的耕地提升潜力相对稳定,主要集中在 20%~60%,而分布于东北平原以外地区的耕地提升潜力差异较大。阻控或削减农业生产的限制性因素是黑土地产能提升的重要途径。

祝贺《地球科学与环境学报》更名二十周年!期待贵刊在地球科学与环境领域发挥更大的引领作用,为地球科学与环境领域的发展及学术成果传播做出更大贡献!

参考文献:

References:

- [1] 陈秧分,王介勇,张凤荣,等. 全球化与粮食安全新格局[J]. 自然资源学报,2021,36(6):1362-1380.
CHEN Yang-fen, WANG Jie-yong, ZHANG Feng-rong, et al. New Patterns of Globalization and Food Security [J]. Journal of Natural Resources, 2021, 36(6): 1362-1380.
- [2] 牛善栋,方 斌. 中国耕地保护制度 70 年:历史嬗变、现实探源及路径优化[J]. 中国土地科学,2019,33(10):1-12.
NIU Shan-dong, FANG Bin. Cultivated Land Protection System in China from 1949 to 2019: Historical Evolution, Realistic Origin Exploration and Path Optimization[J]. China Land Science, 2019, 33(10): 1-12.
- [3] 吴心怡,金晓斌,韩 博,等. 2001~2017 年四川省耕地产能变化与潜力特征分析[J]. 农业工程学报,2021,37(3):238-249.
WU Xin-yi, JIN Xiao-bin, HAN Bo, et al. Characteris-

- tics of Cultivated Land Productivity Change and Potential During 2001—2017 in Sichuan Province, China [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021, 37(3): 238-249.
- [4] 漆信贤, 张志宏, 黄贤金. 面向新时代的耕地保护矛盾与创新应对[J]. 中国土地科学, 2018, 32(8): 9-15.
QI Xin-xian, ZHANG Zhi-hong, HUANG Xian-jin. The Contradiction of Cultivated Land Protection in the New Era and Its Innovative Countermeasures[J]. China Land Science, 2018, 32(8): 9-15.
- [5] WANG L Y, ANNA H, ZHANG L Y, et al. Spatial and Temporal Changes of Arable Land Driven by Urbanization and Ecological Restoration in China [J]. Chinese Geographical Science, 2019, 29(5): 809-819.
- [6] CHEN A, HE H, WANG J, et al. A Study on the Arable Land Demand for Food Security in China [J]. Sustainability, 2019, 11(17): 4769.
- [7] WANG C, SIRIWARDANA M, MENG S. Effects of the Chinese Arable Land Fallow System and Land-use Change on Agricultural Production and on the Economy [J]. Economic Modelling, 2019, 79: 186-197.
- [8] 刘正佳, 钟会民, 李裕瑞, 等. 近20年中国粮食生产变化特征及其对区域粮食供需格局的影响[J]. 自然资源学报, 2021, 36(6): 1413-1425.
LIU Zheng-jia, ZHONG Hui-min, LI Yu-rui, et al. Change in Grain Production in China and Its Impacts on Spatial Supply and Demand Distributions in Recent Two Decades [J]. Journal of Natural Resources, 2021, 36(6): 1413-1425.
- [9] 刘立涛, 刘晓洁, 伦飞, 等. 全球气候变化下的中国粮食安全问题研究[J]. 自然资源学报, 2018, 33(6): 927-939.
LIU Li-tao, LIU Xiao-jie, LUN Fei, et al. Research on China's Food Security Under Global Climate Change Background [J]. Journal of Natural Resources, 2018, 33(6): 927-939.
- [10] 刘宝元, 张甘霖, 谢云, 等. 东北黑土区和东北典型黑土区的范围与划界[J]. 科学通报, 2021, 66(1): 96-106.
LIU Bao-yuan, ZHANG Gan-lin, XIE Yun, et al. Delineating the Black Soil Region and Typical Black Soil Region of Northeastern China [J]. Chinese Science Bulletin, 2021, 66(1): 96-106.
- [11] 刘洪彬, 李顺婷, 吴梦瑶, 等. 耕地数量、质量、生态“三位一体”视角下我国东北黑土地保护现状及其实现路径选择研究[J]. 土壤通报, 2021, 52(3): 544-552.
LIU Hong-bin, LI Shun-ting, WU Meng-yao, et al. Current Situation and Perspectives of Black Soil Protection from the Integrated Angle of Quantity, Quality, and Ecology in Northeast China [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2021, 52(3): 544-552.
- [12] 路中, 雷国平, 王居午, 等. 30年来东北典型黑土区水土流失敏感性时空分异特征研究[J]. 自然灾害学报, 2019, 28(4): 186-195.
LU Zhong, LEI Guo-ping, WANG Ju-wu, et al. Spatial-temporal Variation Characteristics of Soil and Water Loss Sensitivity in Typical Black Soil Regions in Northeast China in the Past 30 Years [J]. Journal of Natural Disasters, 2019, 28(4): 186-195.
- [13] 武红亮, 王士超, 槐圣昌, 等. 近30年来典型黑土肥力和生产力演变特征[J]. 植物营养与肥料学报, 2018, 24(6): 1456-1464.
WU Hong-liang, WANG Shi-chao, HUAI Sheng-chang, et al. Evolutionary Characteristics of Fertility and Productivity of Typical Black Soil in Recent 30 Years [J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2018, 24(6): 1456-1464.
- [14] 韩晓增, 李娜. 中国东北黑土地研究进展与展望[J]. 地理科学, 2018, 38(7): 1032-1041.
HAN Xiao-zeng, LI Na. Research Progress of Black Soil in Northeast China [J]. Scientia Geographica Sinica, 2018, 38(7): 1032-1041.
- [15] 康日峰, 任意, 吴会军, 等. 26年来东北黑土区土壤养分演变特征[J]. 中国农业科学, 2016, 49(11): 2113-2125.
KANG Ri-feng, REN Yi, WU Hui-jun, et al. Changes in the Nutrients and Fertility of Black Soil over 26 Years in Northeast China [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2016, 49(11): 2113-2125.
- [16] 张立江, 汪景宽, 裴久渤, 等. 东北典型黑土区耕地地力评价与障碍因素诊断[J]. 中国农业资源与区划, 2017, 38(1): 110-117.
ZHANG Li-jiang, WANG Jing-kuan, PEI Jiu-bo, et al. Evaluation of Cultivated Land Fertility and Its Obstacle Factors Diagnosis in the Typical Black Soil Area of Northeast China [J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2017, 38(1): 110-117.
- [17] HALLAMA M, PEKRUN C, LAMBERS H, et al. Hidden Miners: The Roles of Cover Crops and Soil Microorganisms in Phosphorus Cycling Through Agroecosystems [J]. Plant and Soil, 2019, 434(1/2): 7-45.
- [18] 伍育鹏, 郅文聚, 邹如. 基于耕地质量评价的耕地产能核算方法及分布[J]. 农业工程学报, 2008, 24(增1): 85-89.
WU Yu-peng, YUN Wen-jun, ZOU Ru. Productivity

- Calculation Methods and Distribution Regulation Based on Cultivated Land Quality Appraisal[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2008, 24(S1): 85-89.
- [19] SMYTH S J, PHILLIPS P W B, KERR W A. Food Security and the Evaluation of Risk[J]. Global Food Security, 2015, 4: 16-23.
- [20] 李晓亮, 吴克宁, 褚献献, 等. 耕地产能评价研究进展与展望[J]. 中国土地科学, 2019, 33(7): 91-100.
LI Xiao-liang, WU Ke-ning, CHU Xian-xian, et al. Research Progress and Prospects for Cultivated Land Productivity Evaluation [J]. China Land Science, 2019, 33(7): 91-100.
- [21] 封志明, 杨艳昭, 张 晶, 等. 从栅格到县域: 中国粮食生产的资源潜力区域差异分析[J]. 自然资源学报, 2007, 22(5): 747-755, 854.
FENG Zhi-ming, YANG Yan-zhao, ZHANG Jing, et al. A GIS Based Study on the Grain Productivity and Potential Yield Increase at Multi-levels in China [J]. Journal of Natural Resources, 2007, 22(5): 747-755, 854.
- [22] HOOBLER B M, VANCE G F, HAMERLINCK J D, et al. Applications of Land Evaluation and Site Assessment(LESA) and a Geographic Information System(GIS) in East Park County, Wyoming[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2003, 58(2): 105-112.
- [23] DUNG E J, SUGUMARAN R. Development of an Agricultural Land Evaluation and Site Assessment (LESA) Decision Support Tool Using Remote Sensing and Geographic Information System[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2005, 60(5): 228-235.
- [24] 吴绍洪, 靳 京, 戴尔阜. 基于 PS123 作物生长模型的黑龙江海伦市玉米生产潜力计算[J]. 农业工程学报, 2005, 21(8): 93-97.
WU Shao-hong, JIN Jing, DAI Er-fu. PS123 Crop Growth Model Based Method to Calculate Potential Maize Productivity in Hailun, Heilongjiang [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2005, 21(8): 93-97.
- [25] 王令超, 王国强, 杨建波, 等. 农用地分等中作物生产潜力空间插值方法研究[J]. 农业工程学报, 2006, 22(2): 89-93.
WANG Ling-chao, WANG Guo-qiang, YANG Jian-bo, et al. Spatial Interpolation Method of Crop Productive Potentiality for the Classification of Agricultural Land [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2006, 22(2): 89-93.
- [26] 陈 丽, 郝晋珉, 艾 东, 等. 基于改进农业生态区划法的耕地综合量能指数模型构建[J]. 农业工程学报, 2014, 30(20): 268-276.
CHEN Li, HAO Jin-min, AI Dong, et al. Comprehensive Index Model Building of Cultivated Land Yield and Productivity Based on Improved Agro-ecological Zoning Method[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30(20): 268-276.
- [27] 陈东湘, 周生路, 吴绍华. 基于遥感评价城市扩张对耕地质量等级结构及产能的影响[J]. 农业工程学报, 2017, 33(13): 264-269.
CHEN Dong-xiang, ZHOU Sheng-lu, WU Shao-hua. Impacts of Urban Sprawl on Agricultural Land Quality Grade Structure and Potential Production Based on Remote Sensing[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(13): 264-269.
- [28] 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.
- [29] GARROUTTE E L, HANSEN A J, LAWRENCE R 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.
- [30] HUETE A R. Vegetation Indices, Remote Sensing and Forest Monitoring [J]. Geography Compass, 2012, 6(9): 513-532.
- [31] 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.
- [32] SHI H, LI L H, EAMUS D, et al. Assessing the Ability of MODIS EVI to Estimate Terrestrial Ecosystem Gross Primary Production of Multiple Land Cover Types[J]. Ecological Indicators, 2017, 72: 153-164.
- [33] 张 超, 陈婉铃, 马佳妮, 等. 基于时序 EVI 的 2000~2019 年吉林省耕地生产力时空分析[J]. 农业机械学报, 2022, 53(2): 158-166.
ZHANG Chao, CHEN Wan-ling, MA Jia-ni, et al. Analysis on Spatial-temporal Changes of Cultivated Land Productivity in Jilin Province from 2000 to 2019 Based on EVI Time Series [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53

- (2):158-166.
- [34] 李祎君,吕厚荃. 气候变化背景下农业气象灾害对东北地区春玉米产量影响[J]. 作物学报, 2022, 48(6): 1537-1545.
LI Yi-jun, LYU Hou-quan. Effect of Agricultural Meteorological Disasters on the Production Corn in the Northeast China[J]. Acta Agronomica Sinica, 2022, 48(6): 1537-1545.
- [35] 魏 丹,匡恩俊,迟凤琴,等. 东北黑土资源现状与保护策略[J]. 黑龙江农业科学, 2016(1): 158-161.
WEI Dan, KUANG En-jun, CHI Feng-qin, et al. Status and Protection Strategy of Black Soil Resources in Northeast of China[J]. Heilongjiang Agricultural Sciences, 2016(1): 158-161.
- [36] 宋 戈,邹朝晖,王 越. 东北粮食主产区县域耕地产能核算及其影响因子分析[J]. 农业工程学报, 2014, 30(24): 308-317.
SONG Ge, ZOU Zhao-hui, WANG Yue. Calculation of County Cultivated Land Productivity and Its Analysis of Influential Factors of Grain Main Production Area in Northeast China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30(24): 308-317.
- [37] ZSCHEISCHLER J, FATICHI S, WOLF S, et al. Short-term Favorable Weather Conditions Are an Important Control of Interannual Variability in Carbon and Water Fluxes[J]. Journal of Geophysical Research: Biogeosciences, 2016, 121(8): 2186-2198.
- [38] 姚东恒,裴久渤,汪景宽. 东北典型黑土区耕地质量时空变化研究[J]. 中国生态农业学报, 2020, 28(1): 104-114.
YAO Dong-heng, PEI Jiu-bo, WANG Jing-kuan. Temporal-spatial Changes in Cultivated Land Quality in a Black Soil Region of Northeast China[J]. Chinese Journal of Eco-agriculture, 2020, 28(1): 104-114.
- [39] 王晓峰,曹建农,卫新东,等. 基于农用地分等成果的耕地产能核算研究:以陕西省扶风县为例[J]. 陕西师范大学学报(自然科学版), 2010, 38(6): 89-93.
WANG Xiao-feng, CAO Jian-nong, WEI Xin-dong, et al. Study on Cultivated Land Productivity Calculation Based on Agricultural Land Classification: A Case Study of Fufeng County, Shaanxi Province[J]. Journal of Shaanxi Normal University (Natural Science Edition), 2010, 38(6): 89-93.
- [40] 苏 浩,吴次芳. 东北黑土区耕地系统变化机理[J]. 农业工程学报, 2021, 37(6): 243-251.
SU Hao, WU Ci-fang. Mechanism of Cultivated Land System Change in Black Soil Areas of Northeast China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021, 37(6): 243-251.
- [41] 汪景宽,徐香茹,裴久渤,等. 东北黑土地地区耕地质量现状与面临的机遇和挑战[J]. 土壤通报, 2021, 52(3): 695-701.
WANG Jing-kuan, XU Xiang-ru, PEI Jiu-bo, et al. Current Situations of Black Soil Quality and Facing Opportunities and Challenges in Northeast China[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2021, 52(3): 695-701.
- [42] 梁爱珍,张 延,陈学文,等. 东北黑土区保护性耕作的发展现状与成效研究[J]. 地理科学, 2022, 42(8): 1325-1335.
LIANG Ai-zhen, ZHANG Yan, CHEN Xue-wen, et al. Development and Effects of Conservation Tillage in the Black Soil Region of Northeast China[J]. Scientia Geographica Sinica, 2022, 42(8): 1325-1335.
- [43] 廖晓勇,姚启星,万小铭,等. 黑土粮仓全域定制模式的理论基础与技术路径[J]. 地理学报, 2022, 77(7): 1634-1649.
LIAO Xiao-yong, YAO Qi-xing, WAN Xiao-ming, et al. Theoretical Basis and Technical Path of the Regional All-for-one Customization Model of Black Soil Granary[J]. Acta Geographica Sinica, 2022, 77(7): 1634-1649.
- [44] 邓祥征,梁 立,廖晓勇,等. 国际粮食贸易影响下东北黑土地生产压力变化与保护策略[J]. 自然资源学报, 2022, 37(9): 2209-2217.
DENG Xiang-zheng, LIANG Li, LIAO Xiao-yong, et al. Research on Changes in Grain Production Pressure and Protection Strategies in the Black Soil Region of Northeast China Under the Influence of International Grain Trade[J]. Journal of Natural Resources, 2022, 37(9): 2209-2217.
- [45] 杜国明,盖兆雪,王洪彦. 中国耕地细碎化的理论解析与研究框架[J]. 地球科学与环境学报, 2021, 43(6): 997-1008.
DU Guo-ming, GAI Zhao-xue, WANG Hong-yan. Theoretical Explanation and Research Framework of Cultivated-land Fragmentation in China[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2021, 43(6): 997-1008.
- [46] 杜国明,张 瑞,于凤荣. 基于地学信息图谱的东北黑土区种植模式分析[J]. 应用生态学报, 2022, 33(3): 694-702.
DU Guo-ming, ZHANG Rui, YU Feng-rong. Analysis of Cropping Pattern in Black Soil Region of Northeast China Based on Geo-information Tupu[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2022, 33(3): 694-702.