



冀北高原农业种植结构的演变

党文硕, 张玉翠, 成 功, 陈晓璐, 沈彦俊, 马全伟, 张泽伟

Evolution of agricultural planting structure in the Northern Hebei Plateau

DANG Wenshuo, ZHANG Yucui, CHENG Gong, CHEN Xiaolu, SHEN Yanjun, MA Quanwei, and ZHANG Zewei

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12357/cjea.20240035>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

雄安新区上游农业种植结构及需水时空演变

Trend of agricultural plantation and irrigation requirements in the upper reaches of Xiong'an New Area

中国生态农业学报(中英文). 2019, 27(7): 1067–1077

华北平原种植结构变化对农业需水的影响

Impact of planting structure changes on agricultural water requirement in North China Plain

中国生态农业学报(中英文). 2020, 28(1): 8–16

基于NSGA-II算法的白洋淀上游种植结构优化

Optimization of the planting structure in the upstream region of Baiyangdian Lake based on the non-dominated sorting genetic algorithm (NSGA-II)

中国生态农业学报(中英文). 2021, 29(8): 1370–1383

耦合PLUS-InVEST模型的多情景土地利用变化及其对碳储量影响

Multi-scenario land use change and its impact on carbon storage based on coupled Plus-Invest model

中国生态农业学报(中英文). 2023, 31(2): 300–314

太湖地区种植结构及农田氮磷流失负荷变化

Changes in planting structure and nitrogen and phosphorus loss loads of farmland in Taihu Lake region

中国生态农业学报(中英文). 2020, 28(8): 1230–1238

关中平原城市群土地利用变化对碳储量时空格局的影响

Effects of land use change on the temporal and spatial pattern of carbon storage in Guanzhong Plain urban agglomeration

中国生态农业学报(中英文). 2024, 32(4): 592–604



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.12357/cjea.20240035

党文硕, 张玉翠, 成功, 陈晓璐, 沈彦俊, 马全伟, 张泽伟. 冀北高原农业种植结构的演变[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2024, 32(9): 1441-1450

DANG W S, ZHANG Y C, CHENG G, CHEN X L, SHEN Y J, MA Q W, ZHANG Z W. Evolution of agricultural planting structure in the Northern Hebei Plateau[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2024, 32(9): 1441-1450

冀北高原农业种植结构的演变*

党文硕^{1,2}, 张玉翠^{1,2**}, 成功¹, 陈晓璐^{1,2}, 沈彦俊^{1,2}, 马全伟³, 张泽伟⁴

(1. 中国科学院遗传与发育生物学研究所农业资源研究中心/中国科学院农业水资源重点实验室/河北省节水农业重点实验室 石家庄 050022; 2. 中国科学院大学 北京 100049; 3. 张家口市农业技术推广站 张家口 075000; 4. 河北省农业技术推广总站 石家庄 050011)

摘要: 冀北高原是京津冀地区的重要生态屏障和农业产区, 分析该地区作物种植结构的时空格局变化, 明确其种植结构演变规律对破解区域水资源匮乏与农业可持续发展至关重要。本研究基于 MODIS NDVI 数据对冀北高原 2000 年、2010 年、2020 年 3 期主要种植作物麦类(莜麦、春小麦)、胡麻、蔬菜、马铃薯的种植面积进行分类提取, 并分析了该地区农作物种植结构的时空格局变化规律。研究结果表明: 1) 遥感监测与农业统计数据相关性的决定系数为 0.61, 混淆矩阵验证 Kappa 系数为 0.84, 总体分类精度为 87.65%, 分类精度较高。2) 2000—2020 年, 冀北高原总耕地面积有所下降, 其中传统作物(麦类、胡麻)种植面积下降约 50.7%, 经济作物(马铃薯、蔬菜)种植面积增长约 211.4%。3) 2000—2020 年间, 麦类种植面积有所下降, 2020 年约 51% 的麦类集中在康保县北部, 胡麻分布逐渐迁移至尚义县北部, 蔬菜分布区域趋于分散化, 马铃薯种植范围扩大, 集中在尚义县北部、沽源县北部及张北县西北部安固里淖附近。以上研究结果可为冀北高原种植结构调整、水资源合理配置提供科学数据支撑。

关键词: 土地利用变化; 种植结构; 归一化植被指数 (NDVI); 冀北高原

中图分类号: TP79

Evolution of agricultural planting structure in the Northern Hebei Plateau*

DANG Wenshuo^{1,2}, ZHANG Yucui^{1,2**}, CHENG Gong¹, CHEN Xiaolu^{1,2}, SHEN Yanjun^{1,2}, MA Quanwei³, ZHANG Zewei⁴

(1. Center for Agricultural Resources Research, Institute of Genetics and Developmental Biology, Chinese Academy of Sciences / Key Laboratory of Agricultural Water Resources, Chinese Academy of Sciences / Hebei Laboratory of Water-Saving Agriculture, Shijiazhuang 050022, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Zhangjiakou Agricultural Technology Extension Station, Zhangjiakou 075000, China; 4. Hebei Agricultural Technology Extension Station, Shijiazhuang 050011, China)

Abstract: The Northern Hebei Plateau, a pivotal agricultural region in Hebei Province, serves as a crucial ecological buffer for the Beijing-Tianjin-Hebei Region. Analyzing the spatiotemporal patterns of crop planting structures in this area and elucidating the evolution of crop planting structures across the Beijing-Tianjin-Hebei are essential for addressing regional water scarcity, sustaining agricultural development, and preserving ecological equilibrium. Previous studies on the crop planting structure of the Northern Hebei Plateau have primarily relied on statistical findings, lacking comprehensive exploration of spatial distribution changes influenced by

* 河北省重点研发计划项目 (21327004D)、国家自然科学基金项目 (41930865, 42171023) 和河北省自然科学基金创新群体项目 (D2021503001) 资助

** 通信作者: 张玉翠, 主要从事生态水文学与节水机理/技术研究。E-mail: yczhang@sjziam.ac.cn

党文硕, 主要从事农业生态水文研究。E-mail: dangwszky22@163.com

收稿日期: 2024-02-29 接受日期: 2024-04-15

* This study was supported by the Key Research and Development Program of Hebei Province (21327004D), the National Natural Science Foundation of China (41930865, 42171023), and the Project for Innovative Research Group of the Natural Science Foundation of Hebei Province (D2021503001).

** Corresponding author, E-mail: yczhang@sjziam.ac.cn

Received Feb. 29, 2024; accepted Apr. 15, 2024

policy and economic factors, facilitated by remote sensing technology. Leveraging MODIS NDVI remote sensing image data, a 30 m land use dataset, and statistical yearbooks, this study classified and delineated the cultivation areas of major crops such as spring wheat, naked oats, flax, vegetables, and potatoes in 2000, 2010, and 2020. The analysis focused on understanding the spatiotemporal dynamics of crop cultivation patterns in the region. The findings revealed several key insights: 1) Remote sensing monitoring results demonstrated strong correlation with agricultural statistics, R^2 is 0.61 and consistency index is 0.96. The validation using the Kappa coefficient yielded 0.84, with an overall classification accuracy of 87.65%. 2) Between 2000 and 2020, influenced by economic and policy factors, the total arable land area in the Northern Hebei Plateau exhibited a declining trend. While spring wheat and naked oats continued to dominate, traditional crops (spring wheat, naked oats, and flax) areas decreased by 50.7%, whereas economic crops (potatoes and vegetables) area increased by 211.4%. 3) In 2020, nearly 51% of the planting area of spring wheat and naked oats concentrated in the northern part of Kangbao County. The area devoted to flax declined by 57.0%, shifting towards the northern part of Shangyi County, while vegetable cultivation expanded by 19 877 hm², indicating a trend towards decentralization. The potato cultivation area also expanded, particularly in the northern part of Shangyi County, northern part of Guyuan County and northwest Zhangbei County. 4) There were notable differences in agricultural land changes among the four counties. Kangbao County experienced the smallest decrease in spring wheat and naked oats planting area, whereas Shangyi County witnessed a 129.2% increase in flax planting and a sixteen-fold increase in potato cultivation area. Changes in vegetable planting area were relatively minor across the counties. 5) The “Two Zones” of the capital city construction policy, market orientation, and economic incentives for crops emerged as critical factors shaping the agricultural planting structure of the Northern Hebei Plateau. This study provides empirical data supporting adjustments in planting structure and rational allocation of water resources in the region.

Keywords: Land use change; Planting structure; Normalized difference vegetation index (NDVI); Northern Hebei Plateau

冀北高原位于河北省张家口市西北部(113°35′~116°0′E, 40°40′~42°10′N)、蒙古高原南缘,南部与张家口市坝下地区毗邻,又称“冀北坝上高原”,该地区农业用地面积约占张家口市总面积的 40%,是河北省的重要农业区之一,是京津冀地区的重要生态屏障,对维护京津冀生态平衡具有举足轻重的意义^[1]。20 世纪 90 年代以来,冀北高原依靠海拔高、光照足、温差大、病虫害少、能错峰上市的独特优势,蔬菜种植和生产规模不断扩大,并逐渐形成了一条优质蔬菜产业链,与此同时,该地区农业种植结构也从传统的旱作雨养农业逐步向灌溉农业发展。据统计,冀北坝上高原农业年平均用水量占该地区总用水量的 74%~86%,其中 90% 用于农业灌溉^[2]。相关研究表明,受城乡建设提速及蔬菜等高耗水作物种植面积扩大的影响,1996 年开始,冀北高原地下水埋深呈大幅下降趋势,地下水超采问题日益严峻^[3]。20 世纪 80 年代初冀北高原泉眼多达 190 处,至 2013 年仅存泉眼 14 处^[3-4];曾经数十万亩水面、碧波荡漾的安固里淖从 2004 年开始彻底干涸;较安固里淖水面稍小的察汗淖尔如今也只剩“最后一滴眼泪”(https://www.chinanews.com.cn/sh/2020/07-28/9249768.shtml)。水资源紧缺是限制该地区生态农业建设、促进农业现代化发展的一大重要因素^[2]。张家口政府依据《京津冀协同发展规划纲要》,紧紧围绕首都水源涵养功能区和生态环境支撑区“两区”建设,着力推动冀北高原农业结构朝退耕、精菜、壮特、兴草、优牧的生态农业现代化方向发展^[5]。因此,明确冀北高

原农业种植结构的时空变化规律,对调整该地区农业种植结构、减少地下水消耗具有重要意义。

农业种植结构是指农业生产中,不同作物在空间和时间上的分布和组合方式^[6]。受当地政策、区域环境等多种因素影响,利用传统实地调查获取研究区作物种植面积和结构的方法具有更新速度慢,耗费人力、物力高等缺点,因此其应用存在较大的局限性。目前,农业监测调查领域对遥感技术的应用越来越广泛,该方法可以更加便捷高效地调查和获取区域尺度农作物种植结构^[7]。早在 20 世纪 60 年代,美国国家航空航天局(NASA)利用高空飞机搭载的多光谱相机对美国中西部农作物空间分布进行了监测,这是遥应用于农业领域的开创性工作^[8]。20 世纪 80 年代,遥感技术在农作物种植面积监测方面的应用开始在中国兴起,该方法最早用于冬小麦(*Triticum aestivum*)估产研究,此后,中国陆续开展了一系列重大农作物遥感监测项目^[9],如利用多光谱卫星图像进行农作物种植分布监测^[10]、农作物病虫害预测监测^[11]、农田旱情监测^[12]、综合作物形态和生理信息评估作物长势及产量监测^[13]等。

农作物遥感识别提取主要分为 3 类方法:单一影像识别法、遥感影像与统计数据结合识别法、基于时间序列影像识别法。其中,基于时间序列影像识别法能够利用作物间物候变化规律差异识别各类型作物,并进行提取,该方法具有准确性高、机制明确、效率高等优点,是目前较为主流的技术方法^[14-15]。以往诸多研究在华北及东北地区利用 MODIS 归一

化植被指数 (normalized difference vegetation index, NDVI) 时间序列影像进行主要作物的识别提取, 以此获取作物种植结构的详细信息, 其分类精度均较高^[16-19]。利用 MODIS 影像对西北和南方地区进行作物分类的研究也较多。申健等^[20]探讨了中分辨率遥感数据在西北地区进行作物种植信息提取的可行性; 阎建忠等^[21]基于谷歌地球引擎 (GEE 平台), 对青海省东部小麦、玉米 (*Zea mays*)、青稞 (*Hordeum vulgare* var. *coeleste*)、油菜 (*Brassica napus*) 进行了分类; 柳文杰等^[22]、邬明权等^[23]采用 MODIS 时序遥感数据, 结合水稻生长物候信息, 提取了较高精度的区域水稻 (*Oryza sativa*) 种植面积。

虽然以往对于遥感提取农业种植结构的研究较多, 但针对农牧交错带脆弱生态环境的研究较少, 且对冀北高原农业种植结构的研究多基于统计数据^[1,24], 缺少政策、经济等影响下对农作物种植结构空间分布变化的清晰认识, 尤其是其变化过程中农业对地下水超采等生态环境问题的影响未能充分体现, 难以为种植结构的合理调整提供科学依据。20世纪末, 冀北高原开始大规模种植蔬菜, 并导致地下水位大幅下降, 2019年印发实施的《张家口首都水源涵养功能区和生态环境支撑区建设规划 (2019—2035年)》提出调整农业种植结构, 实现可持续发展。因此, 本研究基于2000年、2010年、2020年 MODIS MOD09Q1 遥感影像数据和资源环境科学数据平台 (<https://www.resdc.cn/Default.aspx>) 中国多时期土地利用遥感监测数据集 (CNLUCC), 提取了冀北高原麦类 [莜麦 (*Avena chinensis*)、春小麦]、胡麻 (*Ses-*

amum indicum)、蔬菜 [大白菜 (*Brassica rapa pekinensis*)、白萝卜 (*Raphanus sativus*)]、马铃薯 (*Solanum tuberosum*) 4种主要种植作物类型分布数据, 分析了该地区农作物种植结构的时空变化规律, 以为冀北高原农作物种植结构调整、坝上生态农业建设提供参考。

1 数据来源与研究方法

1.1 研究区概况

冀北高原主要包括河北省张家口市康保县、张北县、沽源县及尚义县北部, 因本研究所用统计年鉴数据为县尺度数据, 为保证研究数据的一致性, 本文将尚义县南部纳入研究区, 总面积约13 819 km², 平均高程海拔约1426 m, 地势南北高、中间低, 呈典型波状高原起伏 (图1)。研究区内河流较为短小, 且以内流河水系为主, 河流断流、湖泊干涸多发。气候以大陆性季风气候为主, 季节分明, 昼夜温差大, 年平均气温-0.3~3.5℃, 年平均降水量350~450 mm, 主要集中在7、8月, 年平均蒸发量达1850 mm。据2020年《河北农村统计年鉴》与社会调查显示, 冀北高原主要以麦类、胡麻等传统作物和蔬菜、马铃薯等非传统经济作物为主。

1.2 数据来源及研究方法

1.2.1 数据来源

本研究所采用的 NDVI 数据来源于美国 NASA 发布的 MODIS 数据系列 MOD09Q1 地表反射率数据集 (<https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/>), 选取2000年、2010年和2020年与冀北高原作物生育期

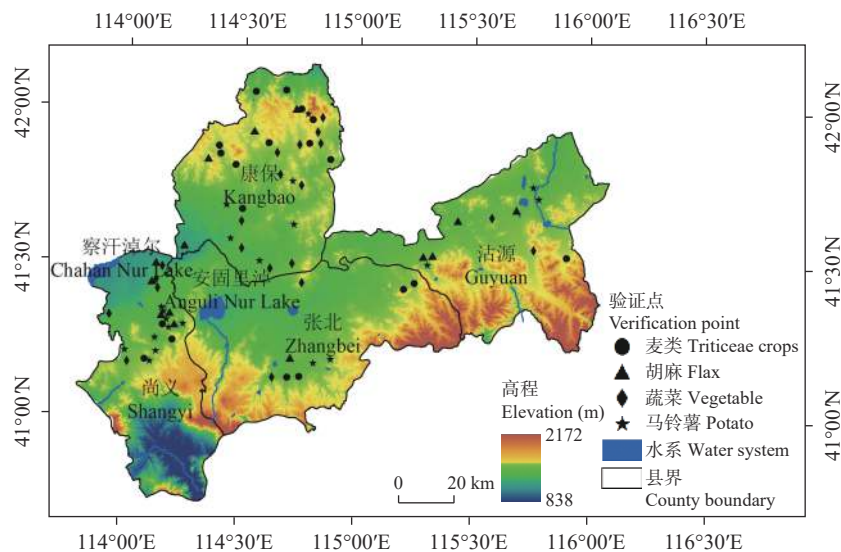


图1 研究区(冀北高原)概况及验证点分布图

Fig. 1 Overview of the study area (Northern Hebei Plateau) and distribution of verification points

所对应 4—10 月遥感影像(行列号为 h26、v04, 时空分辨率为 8 d、250 m), 利用 ENVI 5.6 软件对其进行大气校正、影像裁剪、重采样等数据预处理后计算 NDVI。土地利用数据采用分辨率为 30 m 的资源环境科学数据平台中国多时期土地利用遥感监测数据集 (<https://www.resdc.cn/DOI/DOI.aspx?DOIID=54>), 对遥感影像进行掩膜, 提取耕地分布, 用于后续作物分类。作物种植面积统计数据选自《河北经济年鉴》《张家口经济年鉴》《河北农村统计年鉴》等资料, 并于 2022 年 7 月进行实地采样与社会调研, 采集样点 81 个, 以此为后续分类结果精度检验提供数据支撑。

1.2.2 研究方法

NDVI 是一种反映植被覆盖度和生长状况的遥感指数, 具有简单易用、灵敏度高、检测范围广、可有效消除太阳高度角等因素影响等优点, 该指数可以量化植被茂密程度, 反映植被生长态势, 被广泛应用于植被分类研究^[25-26], 其计算公式为:

$$NDVI = (NIR - R) / (NIR + R) \quad (1)$$

式中: NIR 为近红外波段, R 为红光波段。

HANTS (harmonic analysis of time series) 是一种用于分析和处理时间序列数据的滤波和插值技术, 能够有效保留周期性波动并去除随机噪声。HANTS 改进了傅里叶方法, 通过将时间序列数据分解为不同频率的正弦和余弦波形, 并通过合成这些波形来实现平滑效果^[27-28]。具体公式如下:

$$y(t) = \frac{A_0}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} \left[A_k \times \cos\left(\frac{2\pi kt}{T}\right) + B_k \times \sin\left(\frac{2\pi kt}{T}\right) \right] \quad (2)$$

式中: A_0 为常数项, 表示平均值或整体趋势; A_k 和 B_k 为选择的频率分量, 用于数据重建; T 为时间序列的周期; k 为谐波个数; t 为时间序列个数。

CART (classification and regression trees, 分类与回归树) 算法是一种用于构建决策树的机器学习算法, 可以用于分类和回归任务, 最初由 Leo Breiman 等于 1984 年提出, 已成为机器学习中最常用的决策树算法之一^[29], 其在遥感提取作物分类应用方面具有

计算效率高、多类别分类等优点。

耕地影像提取后, 通过对 8 d 一景的 MODIS NDVI 时间序列值进行连接融合, 并利用 HANTS 滤波平滑剔除异常值, 获得相应像元的时间序列曲线。据田间调查、农业气象站统计数据 and 物候资料显示, 冀北高原麦类(莜麦、春小麦)、胡麻、蔬菜、马铃薯 4 种作物类型种植制度以及物候特征差异较大(表 1), 各生育期 NDVI 值差异明显。基于此, 判断不同作物不同生育期的 NDVI, 绘制时间序列曲线图(图 2), 利用年积日(DOY)表示日期, 利用 CART 算法及最大似然算法提取 4 种作物在种植区域的空间分布及种植面积, 并将提取结果绘制为农业土地利用图^[30-31]。

1.2.3 精度验证方法

目前对于遥感分类精度验证的方法主要包括数值比较和混淆矩阵分析。本研究采用遥感监测与农业统计数据线性回归对分类结果进行评估, 评价指标包括一致性指数(d , $d > 0.8$)和决定系数(R^2 , $R^2 > 0.5$)^[32]。整体影像分类完成后, 利用 ENVI 5.6 软件混淆矩阵精度计算工具计算 Kappa 系数及总体分类精度。

2 结果与分析

2.1 分类精度评价

2.1.1 基于统计年鉴验证

本研究采用遥感监测与农业统计数据线性回归分析方法对分类结果进行评估, 以研究区域内 4 个县级行政区划为统计单元, 结合年鉴统计数据及其他学者已发布数据中麦类、胡麻、蔬菜、马铃薯种植面积与对应年份及县区遥感分类结果进行比较^[33]。如图 3 所示, 遥感监测与县尺度农业统计数据线性回归的 R^2 为 0.61, d 为 0.96, 与 1:1 线较为接近, 表明在冀北高原该方法对作物提取的分类精度较高, 分类结果能够较好地反映作物种植格局。

2.1.2 混淆矩阵验证

为进一步验证分类结果空间分布的准确性, 在

表 1 冀北高原主要农作物物候特征

Table 1 Phenological characteristics of main crops in the Northern Hebei Plateau

作物 Crop	发育阶段(月-日) Development stage (month-day)			
	初始生长期 Initial growth period	快速发育期 Rapid growth period	生育中期 Mid-fertility period	成熟期 Harvesting period
麦类 Triticeae crops	05-01—05-20	05-21—06-25	06-26—07-11	07-12—08-15
胡麻 Flax	06-12—07-21	07-22—08-06	08-07—09-01	09-02—09-18
蔬菜 Vegetable	04-30—06-29	06-30—07-31	08-01—08-30	08-31—09-07
马铃薯 Potato	05-01—06-08	06-09—07-16	07-17—08-20	08-21—09-21

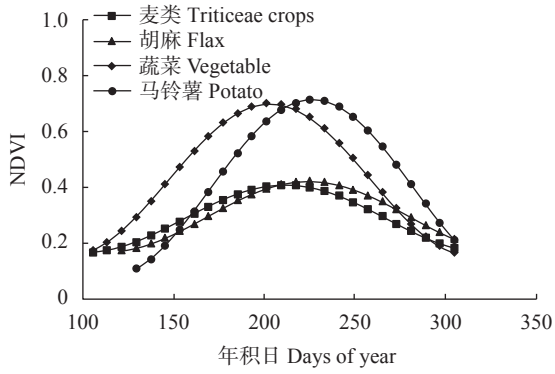


图 2 冀北高原不同作物 NDVI 时间序列曲线

Fig. 2 Normalized difference vegetation index (NDVI) time series curves of different crops in the Northern Hebei Plateau

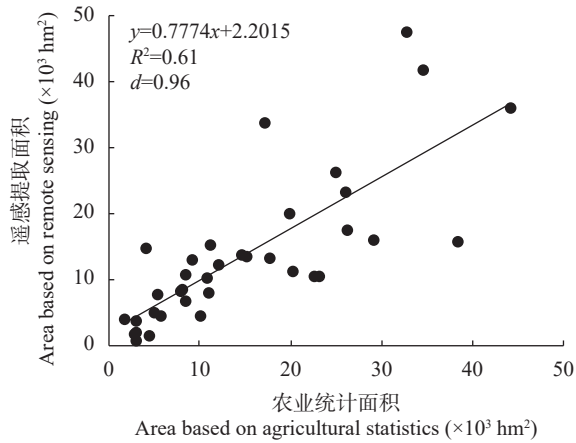


图 3 2000 年、2010 年和 2020 年冀北高原遥感监测与县级农业统计数据作物种植面积比较

Fig. 3 Comparison of crop planting areas based on remote sensing monitoring and county-level agricultural statistics values in 2000, 2010 and 2020 in the Northern Hebei Plateau

线性回归分析的基础上,采用混合矩阵方法验证。通过在冀北高原 4 县内进行实地考察与社会调研,采集与 2020 年种植作物相同的点为验证点,共 81 个,其中麦类采样点 21 个,蔬菜采样点 21 个,胡

麻采样点 18 个,马铃薯采样点 21 个,以上采样点用于验证 2020 年农业土地利用类型分类精度,并结合 Google Earth 进行混淆矩阵验证(图 4)^[15,27]。基于混淆矩阵验证的 Kappa 系数为 0.84,总体分类精度为 87.65%。所以,综合以上两种验证方法,该分类结果具有较高的准确性,可用于冀北高原作物空间分布特征分析。

2.2 冀北高原作物种植结构时空变化分析

2000—2020 年冀北高原不同作物种植结构空间分布格局变化较为明显,分布情况如图 5 所示。麦类在 2000 年广泛分布于整个冀北高原,随后种植区域逐渐向北集中。至 2020 年,整个区域约 51% 的麦类主要集中种植于康保县北部,在研究区范围内形成“北麦”局面。胡麻受国家“退耕”政策及自身经济效益较低的影响,2000—2020 年间种植面积整体减少了 57.0%,种植区域由尚义县南部、张北县西北部逐渐迁移至尚义县北部。蔬菜种植受市场及交通影响

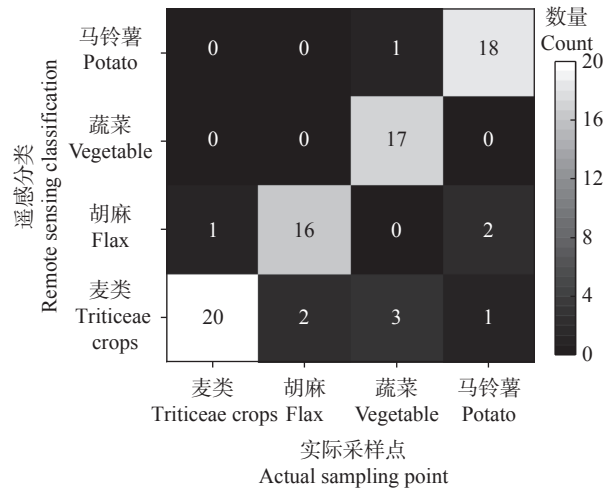


图 4 2020 年冀北高原农业土地利用类型分类精度混淆矩阵热图

Fig. 4 Confusion matrix heat map of agricultural land use type classification accuracy in 2020 in the Northern Hebei Plateau

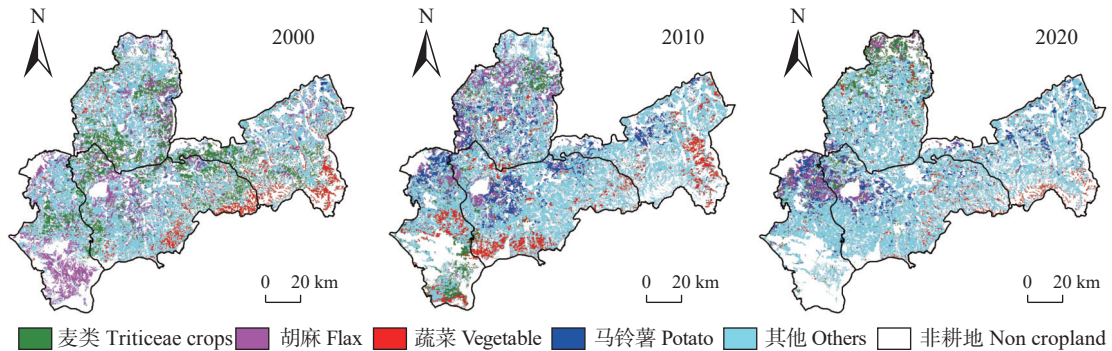


图 5 2000 年、2010 年和 2020 年冀北高原耕地及主要作物空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of cropland and main crops in the Northern Hebei Plateau in 2000, 2010 and 2020

较大,加之各县区政府蔬菜种植产业的政策支持,20年间蔬菜分布区域逐渐分散化,种植面积增加19 890 hm²。马铃薯种植范围也呈扩大趋势,尤其是2010年4县区均大面积种植马铃薯,占全区主要作物总种植面积的30.2%,至2020年马铃薯总种植面积达59 552 hm²,主要分布在尚义县北部、沽源县北部及张北县西北部安固里淖附近。

2000—2020年冀北高原耕地总面积总体呈下降趋势,面积变化速率约为-5628 hm²·(10a)⁻¹,但仍占冀北高原全区总面积的60%左右(图5)。本文对2000—2010年和2010—2020年冀北高原主要作物种植面积及其变化(表2)进行分析:受“退耕、精蔬”,建设绿色生态现代化农业政策的影响,2000—2020年传统作物种植面积呈下降趋势(麦类、胡麻),下降幅度为50.7%,经济作物(马铃薯、蔬菜)种植面积稳定增长,增长幅度达211.4%,作物种植面积增减趋势与统计年鉴一致。2000—2010年马铃薯种植总面积增加68 926 hm²,受2019年首都“两区”建设退耕政策的影响,2020年总种植面积下降至59 552 hm²。冀北坝上高原作为河北省重要的蔬菜产区,2000—2010年总种植面积增加约55 977 hm²,增幅达227.4%;近年来,冀北高原受地下水压采、压减水浇地蔬菜政策的影响,蔬菜种植面积减少^[34-35],至2020年缩减至44 498 hm²。2000—2020年麦类和胡麻种植面积总体呈下降趋势,下降幅度分别为46.9%和57.0%,但冀北高原农作物种植结构还是以麦类种植为主,2020年麦类种植比例约为34%,占主导地位。

2.3 冀北高原县域作物种植时空变化分析

为明确冀北高原4县县域农业用地变化差异,对4县麦类、胡麻、蔬菜及马铃薯种植面积进行汇总分析,并统计各类主要农作物的面积占比(图6)。2000年康保、沽源、张北3县麦类种植面积在4种作物类型所占比例均在半数以上,受国家政策及经济效益的影响,2000—2020年4县区区内麦类种植面积总体均存在不同幅度的下降,其中张北县缩减面积最大,种植面积由2000年的41 699 hm²下降至

2020年的17 674 hm²,减少了24 025 hm²,下降幅度为57.6%。而康保县麦类种植面积变化较小,到2020年仍保留36 125 hm²,占冀北高原全区麦类总种植面积的50.6%。尚义县麦类种植向北迁移,南部丘陵区多种植优质牧草及豆类杂粮。2000—2020年,尽管整个区域胡麻种植总面积下降,2020年沽源县和尚义县胡麻种植面积相对于2010年有所提高,其中尚义县增幅达129.2%,种植面积恢复至13 852 hm²。

2000—2020年,蔬菜种植越来越趋于分散化,4县间种植面积差距缩小,与2000年相比,2020年沽源和尚义县蔬菜种植面积分别提高186.3%和584.8%,康保县蔬菜总种植面积变化较小,张北县南部蔬菜种植范围缩小,以油菜为主的草本油料作物广泛种植^[36]。康保、沽源、张北和尚义4县蔬菜种植面积占比均有所提高,比例分别从2000年的6.4%、8.0%、16.3%、5.4%提高到2020年的13.0%、30.0%、21.2%和23.4%。2000—2020年,冀北坝上高原4县马铃薯种植面积均有不同程度增加,其中张北县增加面积(18 064 hm²)占马铃薯种植面积增加总量的35.6%;尚义县增幅最大,较2000年增加16倍;至2020年,沽源、张北、尚义3县马铃薯种植面积比例均在35%左右,居主要地位。

3 讨论与结论

3.1 讨论

MODIS遥感影像在农作物提取上具有高空间分辨率、大范围覆盖、高频率观测、多光谱波段等优点,是农作物监测、评估和管理的重要工具^[37]。明确冀北高原农作物种植结构,是调整农业土地利用方式、合理规划利用水资源发展节水农业、推进坝上地区生态农业持续高质量发展、聚焦首都“两区”建设的重要基础。2000—2020年间,冀北高原主要作物种植结构变化较大,马铃薯、蔬菜种植面积增加,胡麻、麦类种植面积减少,与黄绍琳等^[1]的研究结果较为符合。同时,王妍等^[34]的研究结果表明,1986—2010年间,坝上高寒区粮食作物的主体地位没有改变,播种面积所占比例有所下降,蔬菜生产发展迅速,

表 2 2000—2020年冀北高原主要作物种植面积及其变化

Table 2 Areas and their changes of main crops in the Northern Hebei Plateau from 2000 to 2020 $\times 10^3$ hm²

项目 Item	年份 Year	麦类 Triticaceae crops	胡麻 Flax	蔬菜 Vegetable	马铃薯 Potato
种植面积 Planting area	2000	134.536	81.014	24.621	8.788
	2010	44.736	54.077	80.598	77.714
	2020	71.414	34.873	44.498	59.552
面积变化 Area change	2000—2010	-89.800	-26.937	55.977	68.926
	2010—2020	26.678	-19.204	-36.100	-18.162

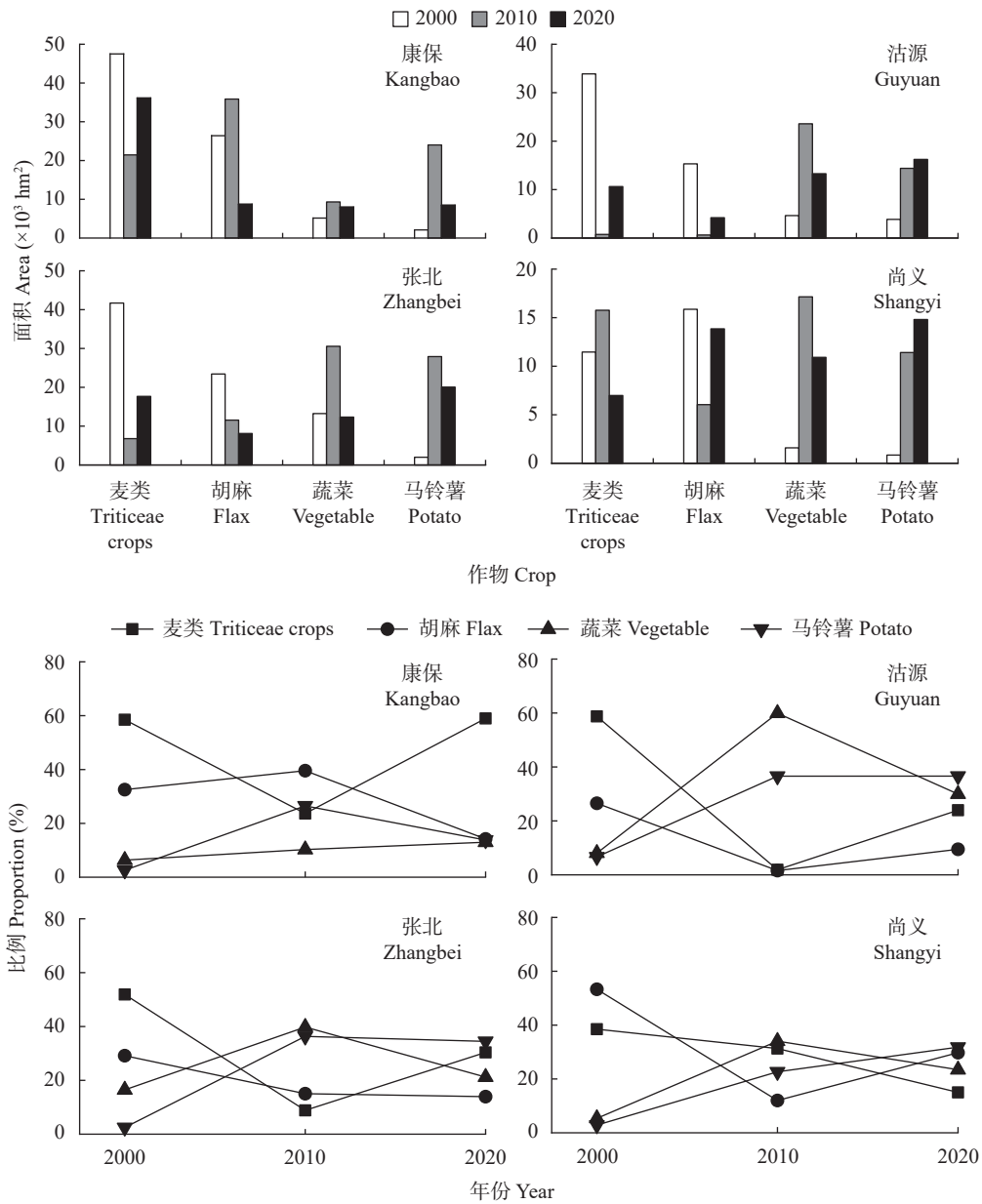


图 6 2000 年、2010 年和 2020 年冀北高原 4 县作物种植面积及其占主要农作物总种植面积的比例
 Fig. 6 Planted areas and proportions of main crops in four counties of the Northern Hebei Plateau in 2000, 2010 and 2020

与本文 2000—2010 年间作物种植面积变化趋势大体一致。

本文研究结果表明, 麦类受退耕政策及经济效益低的影响^[38], 2000—2010 年种植面积呈下降趋势, 2010—2020 年康保、沽源、张北 3 县麦类种植面积扩大, 与 2014 年张家口市农业科学院在康保县开始试验、示范、推广‘坝苡 18 号’裸燕麦新品种密切相关^[39]。相关研究表明, 到 2020 年‘坝苡 18 号’裸燕麦推广面积达 66 700 hm², 其中康保县逾 20 000 hm²^[39]。2000—2010 年间由于种植效益低下, 且国内胡麻市场多依赖于进口, 胡麻种植面积呈下降趋势。2010—2020 年, 随着人民生活水平提高及消费观念

转变, 加之对胡麻效用宣传力度加大, 胡麻消费市场扩大、消费需求扩张, 沽源、尚义胡麻种植面积占 2 县主要农作物总种植面积的比例增幅较大^[40]。至 2022 年, 冀北高原 4 县成为张家口市胡麻最主要的种植区域 (<http://www.zjknews.com/news/shehui/zjk-shehui/202206/22/374290.html>)。《张家口市国民经济和社会发展规划第十三个五年规划纲要》指出, 张家口市要发挥京津冀地区重要特色农产品供应基地的作用 (<https://www.zjk.gov.cn/content/gmjfzgh/149821.html>)^[41]。在该政策的指导下, 冀北高原 2000—2010 年蔬菜和马铃薯种植面积分别增加至 80 598 hm² 和 77 714 hm², 种植比例增加。2010—2020 年, 由于蔬

菜、马铃薯均属于高耗水作物,受地下水压采政策影响种植面积有所下降。

受生态建设政策影响,自 2017 年起尚义县结合其北部波状高原、南部山地丘陵的地势特点,因地制宜进行种植结构优化,形成了南部退耕还林,耕地以杂粮种植为主,北部广泛种植胡麻、马铃薯及中药材的新格局(http://tuopin.ce.cn/news/202107/14/t20210714_36717595.shtml)^[38,42]。

3.2 结论

本文选取 2000 年、2010 年、2020 年 MODIS 遥感影像数据 MOD09Q1 产品及资源环境科学数据平台中国多时期土地利用遥感监测数据集为数据源,对冀北高原区麦类(莜麦、春小麦)、胡麻、蔬菜、马铃薯进行分类提取,并分析研究区主要作物的空间分布特征与变化情况。结果显示:

1) 本研究利用线性回归分析与混淆矩阵结合验证其分类精度。遥感监测与县尺度农业统计数据线性回归决定系数为 0.61,一致性指数为 0.96。经实地调查并结合 Google Earth 进行混淆矩阵验证,Kappa 系数为 0.84,总体分类精度为 87.65%。两种验证方法综合结果表明本研究中的分类结果具有较高的准确性。

2) 2000—2020 年冀北高原总耕地面积呈下降趋势,传统作物种植面积有所下降(麦类、胡麻),下降幅度为 50.7%,经济作物(马铃薯、蔬菜)种植面积有所增长,增长幅度达 211.4%。受市场导向及首都水源涵养功能区和生态环境支撑区“两区”建设政策影响,以 2010 年为分界点,蔬菜、马铃薯种植面积先增后减,麦类种植面积先减后增,胡麻由于经济效益低下,总种植面积持续下降。

3) 2000—2020 年冀北高原麦类分布区域逐渐缩小,由全区广泛分布逐渐向康保县北部迁移;胡麻由尚义县南部、张北县西北部逐渐迁移至尚义县北部;蔬菜分布区域受交通及市场影响,越来越趋于分散化分布;马铃薯种植范围扩大,集中在沽源县北部、尚义县北部及张北县西北部安固里淖附近。

综上所述,张家口首都水源涵养功能区和生态环境支撑区建设政策、市场导向以及作物经济效益是影响冀北高原农业种植结构的重要因素,利用 MODIS 遥感影像数据辅以资源环境科学数据平台中国多时期土地利用遥感监测数据集掩膜影像提取耕地,结合作物生长发育物候期特征构建决策树,提取农业土地利用类型具有较高的准确性,可以为进一步合理配置冀北高原水资源、种植结构调整、构建

现代化生态农业提供数据支持。

参考文献 References

- [1] 黄绍琳,鲁春霞,刘一江. 张家口市高耗水农作物种植结构及需水量时空格局变化[J]. 草业科学, 2020, 37(7): 1293–1301
HUANG S L, LU C X, LIU Y J. Spatio-temporal patterns of crop planting structure and water requirement in the Zhangjiakou Region, Northern China[J]. Pratacultural Science, 2020, 37(7): 1293–1301
- [2] 樊林果. 张家口坝上地区农业节约用水措施解析[J]. 农村实用技术, 2020(10): 183–184
FAN L G. Analysis of agricultural water saving measures in Bashang Area of Zhangjiakou[J]. Rural Practical Technology, 2020(10): 183–184
- [3] 赵玉峰,罗专溪,于亚军,等. 京津冀西北典型区域地下水位时空演变及驱动因素[J]. 自然资源学报, 2020, 35(6): 1301–1313
ZHAO Y F, LUO Z X, YU Y J, et al. Spatio-temporal changes of groundwater level and its driving factors in a typical region of Beijing-Tianjin-Hebei Region, China[J]. Journal of Natural Resources, 2020, 35(6): 1301–1313
- [4] 裴宏伟,王飞泉,张红娟,等. 中国北方农牧交错带水资源问题荟萃分析[J]. 河北建筑工程学院学报, 2020, 38(4): 83–90
PEI H W, WANG F X, ZHANG H J, et al. Review on water resources evolution of farming-pastoral ecotone in North China[J]. Journal of Hebei Institute of Architecture and Civil Engineering, 2020, 38(4): 83–90
- [5] 马艳春. 坝上地区农业现代化的发展路径——以河北省张家口坝上地区为例[J]. 农村·农业·农民, 2022(9): 25–26
MA Y C. Development path of agricultural modernization in Bashang Area — A case study of Bashang Area in Zhangjiakou, Hebei Province[J]. Rural Areas, Agriculture & Farmers, 2022(9): 25–26
- [6] 冯颖,刘凡. “双碳”目标约束下农作物种植结构对农业绿色全要素生产率的影响研究:以陕西省为例[J]. 地球环境学报, 2023, 14(6): 725–739
FENG Y, LIU F. Study on the impact of crop planting structure on agricultural green total factor productivity under the constraint of “dual carbon” goals: Taking Shaanxi Province as an example[J]. Journal of Earth Environment, 2023, 14(6): 725–739
- [7] HUANG Y B, CHEN Z X, YU T, et al. Agricultural remote sensing big data: Management and applications[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2018, 17(9): 1915–1931
- [8] DORAISWAMY P. Crop condition and yield simulations using Landsat and MODIS[J]. Remote Sensing of Environment, 2004, 92(4): 548–559
- [9] 胡琼,吴文斌,宋茜,等. 农作物种植结构遥感提取研究进展[J]. 中国农业科学, 2015, 48(10): 1900–1914
HU Q, WU W B, SONG Q, et al. Recent progresses in research of crop patterns mapping by using remote sensing[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2015, 48(10): 1900–1914
- [10] 乔树亭,叶回春,刘荣豪,等. 2020–2022 年三江平原主要农作物种植分布遥感监测数据集[J]. 中国科学数据, 2023, 8(4): 336–346

- QIAO S T, YE H C, LIU R H, et al. A dataset of remote sensing monitoring of planting distribution for major crops in Sanjiang Plain from 2020 to 2022[J]. *China Scientific Data*, 2023, 8(4): 336–346
- [11] 司政邦, 乔欢欢, 依斯麻, 等. 遥感技术在农作物病虫害监测中的应用浅析[J]. *西藏农业科技*, 2023, 45(4): 35–39
- SI Z B, QIAO H H, YI S M, et al. Application of remote sensing technology in crop diseases and pest monitoring[J]. *Tibet Journal of Agricultural Sciences*, 2023, 45(4): 35–39
- [12] CHANG S, WU B F, YAN N N, et al. Suitability assessment of satellite-derived drought indices for Mongolian grassland[J]. *Remote Sensing*, 2017, 9(7): 650
- [13] WU B F, GOMMES R, ZHANG M, et al. Global crop monitoring: A satellite-based hierarchical approach[J]. *Remote Sensing*, 2015, 7(4): 3907–3933
- [14] MATHUR A, FOODY G M. Crop classification by support vector machine with intelligently selected training data for an operational application[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2008, 29(8): 2227–2240
- [15] ZENG L L, WARDLOW B D, XIANG D X, et al. A review of vegetation phenological metrics extraction using time-series, multispectral satellite data[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2020, 237: 111511
- [16] ZHANG Y C, QI Y Q, SHEN Y J, et al. Mapping the agricultural land use of the North China Plain in 2002 and 2012[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2019, 29(6): 909–921
- [17] 王红营, 潘学鹏, 罗建美, 等. 基于遥感的华北平原农作物时空分布变化特征分析[J]. *中国生态农业学报*, 2015, 23(9): 1199–1209
- WANG H Y, PAN X P, LUO J M, et al. Using remote sensing to analyze spatiotemporal variations in crop planting in the North China Plain[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2015, 23(9): 1199–1209
- [18] 黄青, 唐华俊, 周清波, 等. 东北地区主要作物种植结构遥感提取及长势监测[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(9): 218–223, 386
- HUANG Q, TANG H J, ZHOU Q B, et al. Remote-sensing based monitoring of planting structure and growth condition of major crops in Northeast China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2010, 26(9): 218–223, 386
- [19] 平跃鹏, 臧淑英. 基于 MODIS 时间序列及物候特征的农作物分类[J]. *自然资源学报*, 2016, 31(3): 503–513
- PING Y P, ZANG S Y. Crop identification based on MODIS NDVI time-series data and phenological characteristics[J]. *Journal of Natural Resources*, 2016, 31(3): 503–513
- [20] 申健, 常庆瑞, 李粉玲, 等. 基于时序 NDVI 的关中地区冬小麦种植信息遥感提取[J]. *农业机械学报*, 2017, 48(3): 215–220, 260
- SHEN J, CHANG Q R, LI F L, et al. Extraction of winter wheat information based on time-series NDVI in Guanzhong Area[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2017, 48(3): 215–220, 260
- [21] 阎建忠, 张敏, 张思颖. 基于 GEE 和 MODIS NDVI 时序的青藏高原农作物信息提取[J]. *西南大学学报(自然科学版)*, 2023, 45(4): 55–64
- YAN J Z, ZHANG M, ZHANG S Y. Information extraction of main crops in eastern Qinghai Province based on GEE platform and MODIS NDVI time series[J]. *Journal of Southwest University (Natural Science Edition)*, 2023, 45(4): 55–64
- [22] 柳文杰, 曾永年, 张猛. 融合时间序列环境卫星数据与物候特征的水稻种植区提取[J]. *遥感学报*, 2018, 22(3): 381–391
- LIU W J, ZENG Y N, ZHANG M. Mapping rice paddy distribution by using time series HJ blend data and phenological parameters[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2018, 22(3): 381–391
- [23] 邹明权, 王长耀, 牛铮. 利用多源时序遥感数据提取大范围水稻种植面积[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(7): 240–244
- WU M Q, WANG C Y, NIU Z. Mapping paddy fields in large areas, based on time series multi-sensors data[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2010, 26(7): 240–244
- [24] 胡景辉, 孙丽敏, 雷雅坤, 等. 1986–2010 年河北坝上高寒区种植结构演化分析[J]. *河北农业科学*, 2014, 18(2): 77–80
- HU J H, SUN L M, LEI Y K, et al. Evolutionary analysis on planting structure in Bashang cold area of Hebei Province from 1986 to 2010[J]. *Journal of Hebei Agricultural Sciences*, 2014, 18(2): 77–80
- [25] MENG X Y, GAO X, LI S Y, et al. Spatial and temporal characteristics of vegetation NDVI changes and the driving forces in Mongolia during 1982–2015[J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(4): 603
- [26] PIAO S L, NAN H J, HUNTINGFORD C, et al. Evidence for a weakening relationship between interannual temperature variability and northern vegetation activity[J]. *Nature Communications*, 2014, 5: 5018
- [27] JAKUBAUSKAS M E. Harmonic analysis of time series AVHRR NDVI data[J]. *Photogrammetric Engineering*, 2001, 4: 461–470
- [28] LI S, XU L, JING Y H, et al. High-quality vegetation index product generation: A review of NDVI time series reconstruction techniques[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2021, 105: 102640
- [29] OBIANG N G, VILLERD J, COUSIN I, et al. Using a multivariate regression tree to analyze trade-offs between ecosystem services: Application to the main cropping area in France[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 764: 142815
- [30] 陈晓璐. 察汗淖尔湖泊面积变化及影响因素分析[D]. 西宁: 青海师范大学, 2021: 18–21
- CHEN X L. Change of Chahannur Lake area and its causal factors[D]. Xining: Qinghai Normal University, 2021: 18–21
- [31] 桑利民, 张玲, 郭元章, 等. 承德坝上地区油用亚麻品种筛选试验[J]. *河北农业科学*, 2015, 19(6): 84–86
- SANG L M, ZHANG L, GUO Y Z, et al. The test of oil seed flax varieties selection in Chengde Bashang Plateau[J]. *Journal of Hebei Agricultural Sciences*, 2015, 19(6): 84–86
- [32] 成功. 不同放牧模式对美国大平原地区牧草生长和肉牛生产的影响模拟与优化管理[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2021: 30–34
- CHENG G. Simulation and optimization of different grazing management on forage growth and beef cattle production in the

- Great Plains of the United States[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2021: 30–34
- [33] 崔永州. 张家口坝上地区气候变化对农业土地利用的影响——以沽源县为例[D]. 北京: 首都师范大学, 2012: 25–34
- CUI Y Z. Influence of climatic change on the agricultural land use at Bashang of Zhangjiakou—A case study of Guyuan County[D]. Beijing: Capital Normal University, 2012: 25–34
- [34] 王妍, 刘莹, 乔立娟, 等. 河北坝上地区有机蔬菜产业发展现状、问题及建议[J]. 中国蔬菜, 2022(5): 5–10
- WANG Y, LIU Y, QIAO L J, et al. Present situation, problems and suggestions of organic vegetable industry in Bashang Area of Hebei Province[J]. China Vegetables, 2022(5): 5–10
- [35] 泉涛, 李红军, 沈彦俊, 等. 地下水压采下河北平原冬小麦面积及耗水变化[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2023, 31(9): 1460–1470
- QUAN T, LI H J, SHEN Y J, et al. Changes in the area and water consumption of winter wheat under limiting groundwater exploitation in the Hebei Plain[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2023, 31(9): 1460–1470
- [36] 刘晓亚, 张立峰, 张继宗, 等. 甘蓝型油菜对华北坝上冷凉环境的适应性[J]. 作物杂志, 2019(5): 97–103
- LIU X Y, ZHANG L F, ZHANG J Z, et al. Adaptability of *Brassica napus* to cold environment in Bashang of North China[J]. Crops, 2019(5): 97–103
- [37] TANG L, HE M Z, LI X R. Verification of fractional vegetation coverage and NDVI of desert vegetation via UAVRS technology[J]. Remote Sensing, 2020, 12(11): 1742
- [38] LIU M Z, MIN L L, ZHAO J J, et al. The impact of land use change on water-related ecosystem services in the Bashang Area of Hebei Province, China[J]. Sustainability, 2021, 13(2): 716
- [39] 郝化雨, 杨满霞, 王星宇, 等. 裸燕麦品种坝苻 18 号在康保县的高产示范推广探讨[J]. 现代农业科技, 2022(22): 37–41
- HAO H Y, YANG M X, WANG X Y, et al. Discussion on high-yield demonstration and popularization of naked oat variety Bashi No. 18 in Kangbao County[J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2022(22): 37–41
- [40] 李爱荣. 油用胡麻产业技术需求调研报告[J]. 现代农村科技, 2009(20): 57–58
- LI A R. Investigation report on technical demand of oil flax industry[J]. Modern Rural Science and Technology, 2009(20): 57–58
- [41] 刘一江, 鲁春霞, 黄绍琳. 张家口市蔬菜产业发展的虚拟水消耗及其流动[J]. 草业科学, 2020, 37(7): 1397–1404
- LIU Y J, LU C X, HUANG S L. Virtual water consumption and flow in the development of the vegetable industry in Zhangjiakou City[J]. Pratacultural Science, 2020, 37(7): 1397–1404
- [42] 赵海璇. 尚义县土地利用变化及结构调整[D]. 北京: 首都师范大学, 2011: 15–20
- ZHAO H X. Land-use change and adjustment of structure in Shangyi County[D]. Beijing: Capital Normal University, 2011: 15–20