

DOI: 10.12357/cjea.20230125

泉涛, 李红军, 沈彦俊, 王卓然, 闵雷雷, 齐永青, 张建永. 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, WANG Z R, MIN L L, QI Y Q, ZHANG J Y. 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

地下水压采下河北平原冬小麦面积及耗水变化^{*}

泉涛^{1,2}, 李红军^{1**}, 沈彦俊^{1,2**}, 王卓然³, 闵雷雷¹, 齐永青¹, 张建永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. 水利部信息中心 北京 100053; 4. 河北省石家庄市栾城区供水服务中心 石家庄 051430)

摘要: 河北省是我国的重要粮食生产基地,资源性缺水与长期高强度的农业生产,导致河北平原水资源危机进一步加剧。面对水资源安全与粮食安全的矛盾,河北省政府自2014年起实施地下水压采政策,在农业生产上开展季节性休耕、实施旱作雨养、推广节水农业等措施。为探明地下水压采政策下河北平原冬小麦种植面积与耗水特征的变化,本研究利用MODIS NDVI数据提取了河北平原2009—2019年冬小麦种植空间分布,结合TSEB(基于双源能量平衡模型)蒸散产品以及农业生产统计数据,对压采政策实施前后进行了比较研究,并调研了相关变化的驱动因素。结果表明:河北平原的冬小麦种植面积在2009—2019年持续增长,压采政策实施后表现为东部增加西部减少的特征,总体上增加10.4万hm²。通过实地调研发现,农业生产经营者追求种植效益以及城市化导致冬小麦面积减少,政府保障粮食安全的鼓励种粮政策以及冬小麦种植全程机械化程度的提高则促使其种植面积增加。与地下水压采政策实施前相比,压采后冬小麦的蒸散量与总耗水量分别增加32.58 mm和10.9亿m³。季节性休耕期间,休耕地不抽取地下水灌溉,相比于麦田,休耕地能够减少73 mm的蒸散耗水。2009—2019年冬小麦平均水分利用效率为1.67 kg·m⁻³。地下水压采政策实施后,2/3地区的冬小麦水分利用效率在逐年提升。农田的破碎化、流转土地经营权不稳定以及农户节水动力和压力不足导致冬小麦节水灌溉普及率不高。面对水粮矛盾,河北平原仍需加强农业节水,真正降低蒸散耗水,才能使其得到缓解。

关键词: 地下水压采; 冬小麦种植面积; 蒸散; 水分利用效率

中图分类号: TP79

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Changes in the area and water consumption of winter wheat under limiting groundwater exploitation in the Hebei Plain^{*}

QUAN Tao^{1,2}, LI Hongjun^{1**}, SHEN Yanjun^{1,2**}, WANG Zhuoran³, MIN Leilei¹, QI Yongqing¹, ZHANG Jianyong⁴

(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. Information Center, Ministry of Water Resources, Beijing 100053, China; 4. Water Supply Service Center in Luancheng District, Shijiazhuang 051430, China)

^{*} 国家自然科学基金项目(41971262)、河北省创新能力提升计划项目(225A4201D)和河北省自然科学基金项目(D2022503010)资助

^{**} 通信作者: 李红军, 主要从事精准农业技术研究与应用, E-mail: lhj@sjziam.ac.cn; 沈彦俊, 主要从事农业水文水资源等方面的研究, E-mail: yjshen@sjziam.ac.cn

泉涛, 主要从事农业遥感研究。E-mail: quantao@sjziam.ac.cn

收稿日期: 2023-03-09 接受日期: 2023-04-04

^{*} The study was supported by the National Natural Science Foundation of China (41971262), the Innovation Capability Improvement Program of Hebei Province (225A4201D), and the Natural Science Foundation of Hebei Province (D2022503010).

^{**} Corresponding authors: LI Hongjun, E-mail: lhj@sjziam.ac.cn; SHEN Yanjun, E-mail: yjshen@sjziam.ac.cn
Received Mar. 9, 2023; accepted Apr. 4, 2023

<http://www.ecoagri.ac.cn>

Abstract: The shortage of water resources and long-term high-intensity agricultural production have further intensified the water crisis in the Hebei Plain, an important grain production region. The local government has implemented a limiting groundwater exploitation policy since 2014 to alleviate the contradiction between water and food security. Measures such as seasonal fallow, rain-fed agriculture, and water-saving agriculture have been implemented in terms of agricultural production. To explore the impact of this policy on agricultural water use, the changes in planting area and water consumption characteristics for winter wheat in the Hebei Plain during the years before and after the implementation of the policy were analyzed. Based on the spectral variation characteristics of winter wheat, distribution maps of winter wheat from 2009 to 2019 were retrieved using MODIS NDVI data. Combined with the TSEB (two-source energy balance model) evapotranspiration dataset and agricultural production statistics, the water consumption characteristics of winter wheat before and after the policy were compared, and the driving factors for these changes were investigated. Our study found that the planting area of winter wheat in the Hebei Plain increased by 183 700 hm² from 2009 to 2019. Five years after the implementation of the policy, the total planting area of winter wheat increased by 104 000 hm², mainly concentrated in the east; while it decreased in the west. In terms of water consumption of winter wheat, the level of evapotranspiration and total water consumption of winter wheat increased by 32.58 mm and 1.09 billion m³ compared with those before the policy. Compared with the winter wheat field, seasonal fallow land reduced evapotranspiration by 73 mm in addition to not pumping groundwater for irrigation. During the study period, the annual average water use efficiency of winter wheat was 1.67 kg·m⁻³. After the implementation of the policy, the water use efficiency of winter wheat in 2/3 regions of the Hebei Plain had been increasing annually. The main reason for the decrease in winter wheat area was the change in planting structure caused by farmers' pursuit of higher agricultural economic benefits and urbanization. The support policy from the government to ensure food security and improve the mechanization degree of winter wheat planting promoted an increase in its planting area. The fragmentation of farmland, the unstable transfer of farmland management rights, and the lack of initiative and pressure to save water led to the low popularity of water-saving irrigation for winter wheat. Facing the contradiction between water shortage and food production, it is still necessary to strengthen water-saving agriculture and significantly reduce the water consumption of evapotranspiration to alleviate the contradiction.

Keywords: Limiting groundwater exploitation; Winter wheat planting area; Evapotranspiration; Water use efficiency

粮食安全和水资源安全是实现国家经济发展和社会稳定的重要基础^[1]。河北省作为全国13个粮食主产省之一,粮食产量连续10年稳定在3500万t以上,为国家粮食安全提供了重要保障^[2]。然而,由于资源性缺水,河北省的水粮矛盾日益尖锐。长期以来,河北平原形成了冬小麦(*Triticum aestivum*)-夏玉米(*Zea mays*)一年两熟的主要粮食生产种植制度,年耗水在700 mm以上,而年降水量只有约500 mm,尤其是在小麦生育期,降水量仅有150 mm左右,远不能满足冬小麦的用水需求^[3-4],因此,抽取地下水补充灌溉成为保障粮食稳产、高产的关键。大范围高强度农业生产引起的地下水超采导致河北平原地下水位逐年下降,形成了世界上最大的复合型地下水漏斗区,引发了一系列生态环境问题^[1,5]。2014年起河北省开始实施地下水超采综合治理,提出以节水为核心的压采措施,力图实现地下水的采补平衡。在农业方面采取的主要措施包括季节性休耕、实施旱作雨养、推广小麦节水品种和配套技术,以及发展高效节水灌溉,旨在适当压减依靠地下水灌溉的冬小麦种植面积,降低农业用水和提高水分利用效率。地下水压采政策实施至今,河北平原地下水位持续下降的态势得到初步遏制,部分地区地下水位止跌回升^[6]。统计显示,在此期间河北平原的冬小麦种植

面积仍在增长,其总产量也一直保持稳增状态。地下水压采目标的实现要在一定程度上减少冬小麦播种面积和耗水,而粮食安全的保障又需要稳定其产量。在冬小麦单产水平和水分利用效率没有较大幅度提升的条件下,冬小麦的种植面积及耗水发生了怎样的变化,对该地区水资源安全、水粮目标的协调产生了怎样的影响,这些问题的回顾和分析对于该地区的可持续发展具有重要意义。

冬小麦种植面积的增减直接关系到农业用水量的变化,统计数据仅反映了其面积总量的波动,更需要对冬小麦种植区域的时空变化进行分析。遥感技术的发展可以利用遥感影像快速地获取大范围的作物信息,为作物面积监测提供数据支撑^[7-8]。潘学鹏等^[9]探讨了将复种指数引入分类回归树算法在提取华北平原冬小麦面积的可行性,反演了2000—2013年华北平原冬小麦种植面积。安塞等^[10]利用时间序列谐波分析法建立了归一化植被指数(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)时间序列曲线,基于作物的种植制度和物候信息,利用像元二分模型对混合像元进行分解,提高了华北平原冬小麦面积的反演精度。郎婷婷^[11]基于MODIS(Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer)数据,使用Savitzky-Golay滤波重构了NDVI时间序列曲线,建立分类决

策树, 获得了 2016—2017 年京津冀地区冬小麦的种植面积。雷海梅^[12]利用 Sentinel-2、GF-1 等数据构建随机森林(Random Forest, RF)分类器, 借助谷歌地球引擎提取了黑龙港流域 2017—2019 年冬小麦种植面积信息。范玲玲^[13]基于冬小麦生育期物候曲线变化特征提出了一种自适应时间对齐法, 反演了 1990 年、2000 年、2010 年、2019 年京津冀地区的冬小麦面积。学者们在冬小麦种植区域遥感识别上开展了大量研究, 为河北平原地下水压采前后冬小麦种植区域时空变化的研究提供了技术参考。在目前常用的作物遥感识别方法中, 随机森林算法具有处理多维数据能力强、训练和预测速度快、分类准确性高等优点^[14-15], 在玉米、高粱(*Sorghum bicolor*)、大豆(*Glycine max*)、小麦等不同作物分类中得到应用^[16-17]。

在农田水循环中, 蒸散(evapotranspiration, ET)是真正意义上的水资源消耗, 只有降低蒸散才能实现农业节水, 从根本上解决水资源匮乏的问题^[18-19]。李昊天等^[20]和 Zhang 等^[21]基于长时间序列的田间灌溉试验发现, 河北太行山前平原冬小麦的蒸散呈现增加趋势。但区域尺度上冬小麦的耗水如何, 需要对更大尺度上的蒸散数据进行分析。遥感反演蒸散为实现大尺度农田水分管理提供了技术和数据支撑, 目前已有一些基于成熟算法或模型产生的蒸散产品, 如 MOD16 ET 产品、MTE ET 产品、GLEAM ET 产品、PML_V2 产品、TSEB ET 产品等^[22-24]。其中, TSEB ET 产品利用华北平原地面蒸散观测数据进行了验证, 具有较高的估算精度和时空分辨率, 可用于分析冬小麦耗水的时空变异^[23-24]。

基于河北省地下水压采政策实施后对农业用水的约束, 以及该地区协调水粮矛盾的需求, 本研究以地下水压采政策实施前后共 11 年(2009—2019 年)为研究时段, 对河北平原各年份冬小麦的种植分布进行遥感反演, 结合遥感蒸散和农业生产统计数据, 探明冬小麦真实耗水和水分利用效率的时空演变, 进而分析地下水压采政策对冬小麦用水管理的影响, 通过调研探索引起冬小麦耗水变化的驱动力, 以期对河北平原未来地下水压采下农业用水管理以及粮食安全的保障提供数据支撑。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

本研究以河北平原为研究区, 河北平原(36°07'~39°47'N, 114°30'~118°01'E)地处华北地区

中北部(图 1), 包括石家庄、邯郸、邢台、保定、沧州、廊坊、衡水 7 个地级市, 面积约 626 万 hm^2 。该地区属于温带半湿润半干旱大陆性季风气候, 多年平均降水量为 508 mm, 全年 70%~80% 的降水集中在 6—9 月份。冬小麦-夏玉米一年两熟是该地区最主要的种植制度, 其中, 冬小麦多年平均种植面积为 214.35 万 hm^2 , 总产量保持在 1320 万 t。河北平原地区冬小麦的生育期大致为每年的 10 月 1 日到次年 6 月 10 日, 在此期间, 多年平均降水仅有 139 mm, 因此需要抽取地下水灌溉保障其高产和稳产, 仅有少量地区为地表水灌区。

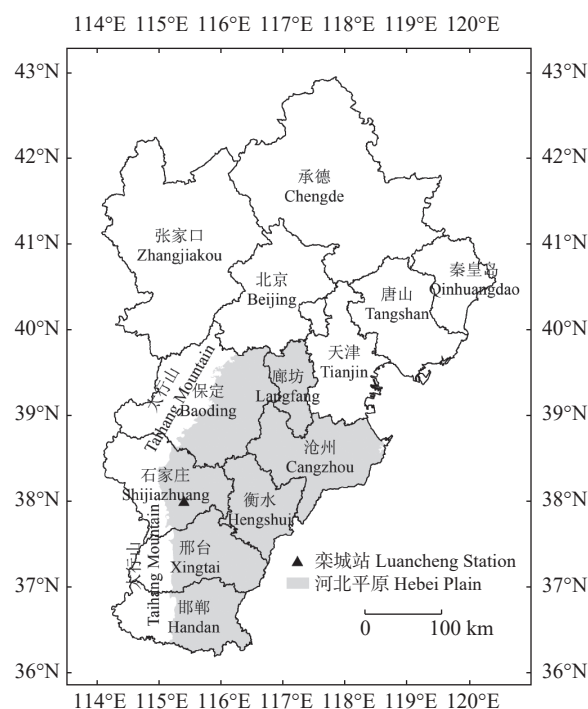


图 1 河北平原位置

Fig. 1 Location of the Hebei Plain

1.2 数据来源

本研究采用的 NDVI 数据来源于美国 NASA 的 MODIS 数据系列 MOD13Q1 植被指数数据集(<https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov>), 时间分辨率 16 d, 空间分辨率 250 m, 下载了 2009—2019 年冬小麦生育期覆盖研究区的所有影像, 利用 MRT(MODIS Reprojection Tool)工具对数据进行拼接、投影等预处理, 获得 198 期 NDVI 数据。土地利用数据选自 1990—2021 年中国年度土地覆盖数据集^[25](<http://doi.org/10.5281/zenodo.4417809>), 空间分辨率 30 m, 用于辅助提取耕地区域的 NDVI。蒸散数据选自 Zhang 等^[23-24]在国家青藏高原科学数据中心发布的基于双源能量平衡模型(TSEB)和数据融合的华北平原时空连续

蒸散发数据集 (<https://data.tpdc.ac.cn/zh-hans/data/4264fa57-3b66-4977-876c-6e49d777fc81/>), 时间分辨率 1 d, 空间分辨率 1 km, 下载后重采样为 250 m 空间分辨率。实测蒸散数据来自中国科学院栾城农业生态系统试验站 (以下简称“栾城站”) (图 1) 同期的涡度相关观测数据^[26] (<http://www.csdata.org/p/409/>)。农业生产统计数据来自 2009—2019 年的《河北省农村统计年鉴》 (<https://data.cnki.net/yearBook>)。

2 研究方法

2.1 基于随机森林分类方法的冬小麦种植区提取

NDVI 能够表征植被的生长状况及其变化, 是遥感进行作物分类的重要参考指标^[27]。河北平原主要的作物种类包括小麦、玉米、棉花 (*Gossypium* spp.)、林果和少量蔬菜等。本研究通过土地利用数据对 NDVI 数据进行掩膜, 获得冬小麦生育期内各类作物的 NDVI 时间序列数据, 对比发现冬小麦生育期内其 NDVI 序列具有明显的“双峰”特征 (图 2), 两次峰值分别出现在冬小麦分蘖期和抽穗期, 与其他作物存在明显区别。基于此特征, 选取冬小麦样本点, 采用随机森林分类方法对冬小麦种植空间分布进行提取。随机森林分类方法是一种非线性和非参数分类器, 对缺失值和异常值具有很高的容忍度, 可以有效地处理多维特征的数据集^[14-15]。本研究以每年冬小麦生育期内的 18 期 NDVI 数据作为分类特征变量, 进行 2009—2019 年各年冬小麦种植空间分布的提取。

2.2 冬小麦水分利用效率的评价

水分利用效率定义为单位水量消耗所生产的经济产品数量, 可用于评价作物生长过程中水分利用效率的高低^[28], 其计算公式为:

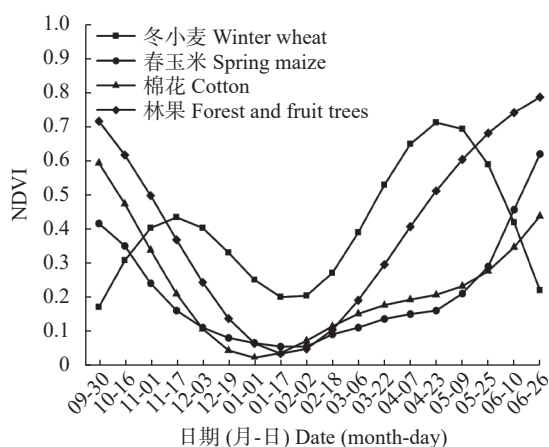


图 2 不同作物在冬小麦生育期内的 NDVI 序列曲线特征
Fig. 2 Change curves of NDVI for the main crops during the growth period of winter wheat

$$WUE = \frac{Y}{ET \times 10^{-3}} \quad (1)$$

式中: WUE 为冬小麦水分利用效率 ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$), Y 为来自统计数据的县域冬小麦单产 ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$), ET 为该县冬小麦生育期的平均总蒸散量 (mm)。

2.3 基于一元线性回归的变化趋势分析

利用一元线性回归方程的斜率 (slope) 来表征冬小麦种植面积、蒸散、水分利用效率等参数的年际变化趋势, $\text{slope} > 0$ 表现为增加趋势, $\text{slope} < 0$ 则为减少趋势, 计算公式为:

$$\text{slope} = \frac{n \times \sum_{i=1}^n (i \times x_i) - \sum_{i=1}^n i \times \sum_{i=1}^n x_i}{n \times \sum_{i=1}^n i^2 - \left(\sum_{i=1}^n i \right)^2} \quad (2)$$

式中: slope 为线性斜率值, n 为年份总数, i 为年序号, x 为相应变量的值。

3 结果与分析

3.1 冬小麦种植区时空变化分析

3.1.1 冬小麦种植区遥感提取精度检验

本研究利用随机森林分类方法获取了河北平原 2009—2019 年各年的冬小麦种植空间分布。以研究区域内 95 个县级行政区划为统计单元, 分别统计各县 (市、区) 在各年份的冬小麦种植面积, 将其与农村统计年鉴中的数据进行比较, 如图 3 所示。在县级尺度上, 本研究提取的冬小麦播种面积与农业统计数据具有显著的相关性 ($R^2=0.86$, $P<0.01$)。以 2009 年、2014 年和 2019 年遥感提取的冬小麦种植空间

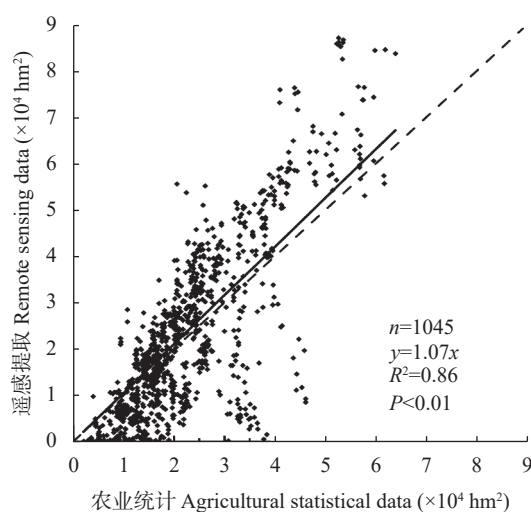


图 3 2009—2019 年遥感监测河北平原冬小麦面积与各县农业统计数据比较

Fig. 3 Comparison of winter wheat planting area from remote sensing and the agricultural statistical data of each county of the Hebei Plain from 2009 to 2019

分布信息为例,利用谷歌地球历史影像和高分辨率遥感影像选取冬小麦农田样本点对其进行精度评价,其总体精度分别为 91.33%、91.33% 和 90.33%, Kappa 系数分别为 0.80、0.80 和 0.78。可见利用随机森林分类方法获得的河北平原冬小麦种植分布数据具有较好的精度。

3.1.2 冬小麦种植区时空变化

冬小麦种植面积的时空变化是其用水格局改变的主要原因。对遥感反演获得的 2009—2019 年河北平原冬小麦种植分布图进行统计,其间整个平原区冬小麦播种面积一直保持增长趋势(图 4),从 2009 年的 206.76 万 hm^2 增长到 2019 年的 225.13 万 hm^2 ,累计增长 18.37 万 hm^2 ,增长速率为 1.70 万 $\text{hm}^2\cdot\text{a}^{-1}$,这与《河北农村统计年鉴》中冬小麦播种面积的变化趋势基本一致。在所有地市中,只有石家庄和保定的冬小麦种植面积表现为减少,其中石家庄为逐年持续减少,其间减少了 7.17 万 hm^2 。保定呈波动式减少,2019 年较 2009 年减少 1.76 万 hm^2 。邯郸、邢

台、沧州、廊坊、衡水的冬小麦播种面积均有不同程度的增加。沧州为持续增加,从 2009 年的 19.49 万 hm^2 增加到 2019 年的 36.43 万 hm^2 。衡水和邢台分别增加 5.14 万 hm^2 和 4.60 万 hm^2 。邯郸、廊坊两地的冬小麦播种面积较为稳定,其间增加的面积不足 0.5 万 hm^2 。

2014 年河北省启动地下水超采综合治理,之后河北平原冬小麦总种植面积仍以 1.80 万 $\text{hm}^2\cdot\text{a}^{-1}$ 的速率增加,各地市则表现为有增有减。石家庄、衡水和邯郸的冬小麦面积表现为明显地逐年减少,2014—2019 年分别减少 3.48 万 hm^2 、1.79 万 hm^2 和 0.64 万 hm^2 。邢台、保定和廊坊的冬小麦面积基本保持稳定且略有增加。沧州冬小麦的种植面积则表现为持续增加,其增速为 2.06 万 $\text{hm}^2\cdot\text{a}^{-1}$ 。

利用遥感提取获得的河北平原冬小麦种植空间分布图,对 2009—2019 年冬小麦种植区进行年份累积,分析各地区的冬小麦累积种植年限,结果如图 5a 所示。河北平原的西部太行山前平原、衡水和沧州市南部是稳定的冬小麦种植区,2009—2019 年间累积种植 10 年以上的冬小麦农田主要分布在这些地区。累积种植年限在 6 年以下的冬小麦种植区主要分布在保定、邢台东部和沧州北部,其中邢台东部多为棉改粮区,沧州新增冬小麦播种面积较多。图 5b 对比了地下水压采前后各县冬小麦平均种植面积的变化,有 50 个县(市、区)冬小麦面积减少,主要集中在石家庄、保定、邯郸地区,共减少 14 万 hm^2 。有 45 个县(市、区)冬小麦面积增加,集中在邢台、衡水、沧州地区,共增加 24.4 万 hm^2 。总体上河北平原在压采政策实施后冬小麦总种植面积净增 10.4 万 hm^2 。

3.2 冬小麦耗水时空变化分析

3.2.1 TSEB ET 蒸散产品精度检验

本研究利用 2009—2019 年冬小麦生育期内覆盖河北平原的 TSEB 蒸散产品评估河北平原冬小麦的耗水变化,并结合栾城站的涡度相关实测蒸散数据对其精度进行检验,二者对比结果如图 6 所示。在日尺度上(图 6a),TSEB 蒸散产品与涡度相关观测数据显著相关($R^2=0.86$, $P<0.01$),均方根误差(RMSE)为 0.86 $\text{mm}\cdot\text{d}^{-1}$ 。基于高空间分辨率遥感影像对河北平原土地利用类型的判读表明,农田中非耕地下垫面约占整个像素的 15%,由于涡度相关观测的是纯麦田的蒸散,因此, TSEB 蒸散产品的数值略低于涡度相关观测数据(二者拟合直线的斜率为 0.84)。在月尺度上(图 6b),TSEB 蒸散产品与涡度相关数据的变化保持一致,只在冬小麦蒸散量最高的 5 月略低

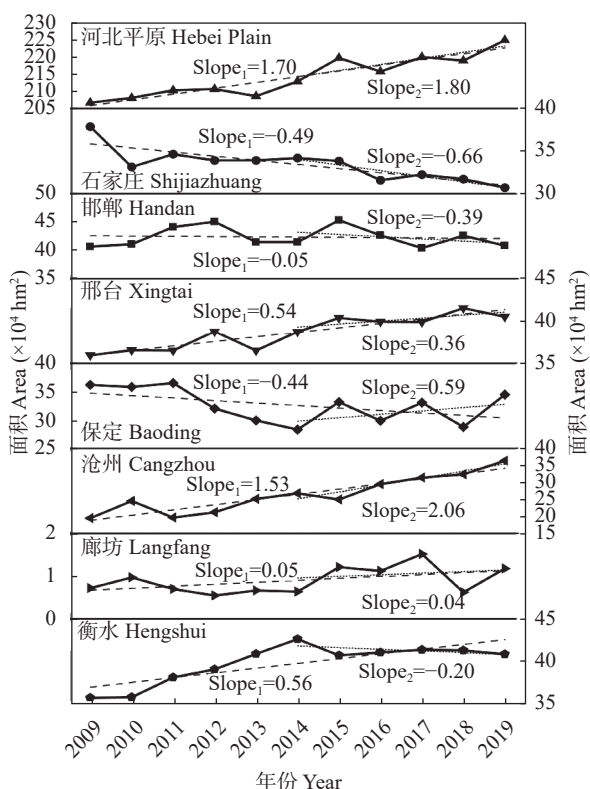


图 4 2009—2019 年河北平原各地区冬小麦面积年际变化

Fig. 4 Variations of winter wheat planting areas in different regions of the Hebei Plain from 2009 to 2019

图中 slope₁ 为 2009—2019 年冬小麦面积变化斜率(万 $\text{hm}^2\cdot\text{a}^{-1}$), slope₂ 为 2014—2019 年冬小麦面积变化斜率(万 $\text{hm}^2\cdot\text{a}^{-1}$)。Slope₁ is the change rate of winter wheat area from 2009 to 2019 ($\times 10^4 \text{ hm}^2\cdot\text{a}^{-1}$), slope₂ is the change rate of winter wheat area from 2014 to 2019 ($\times 10^4 \text{ hm}^2\cdot\text{a}^{-1}$).

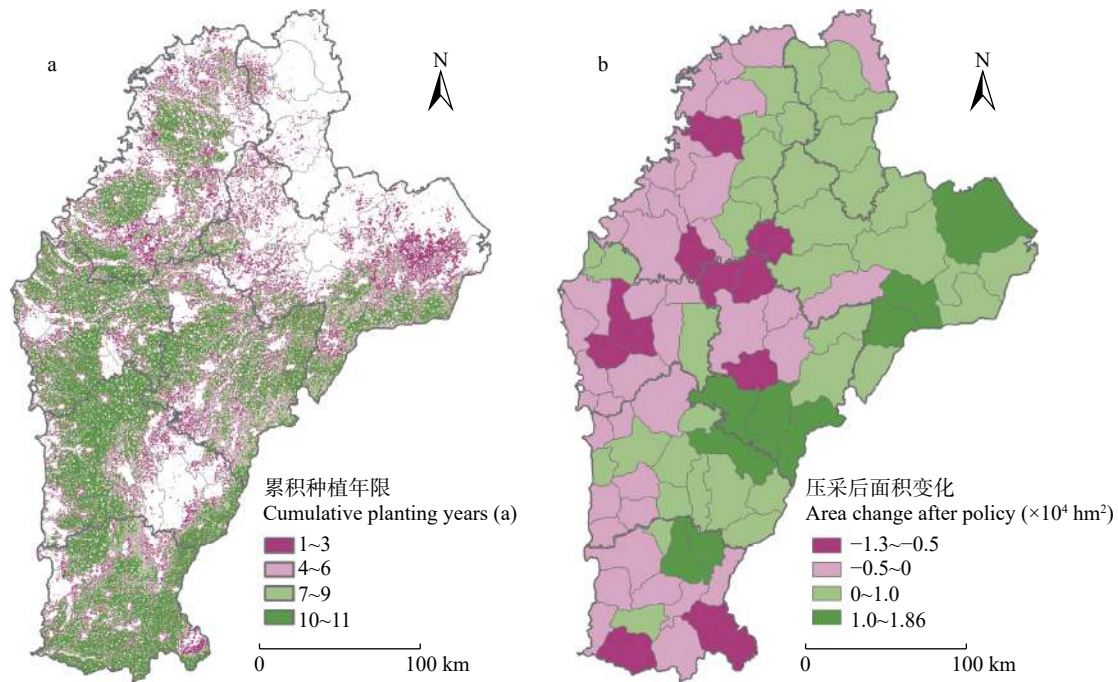


图5 2009—2019年河北平原冬小麦累积种植年限(a)与地下水压采政策实施后冬小麦种植面积变化(b)

Fig. 5 Cumulative planting years from 2009 to 2019 (a) and planting area change after the implementation of the limiting groundwater exploitation policy (b) of winter wheat in the Hebei Plain

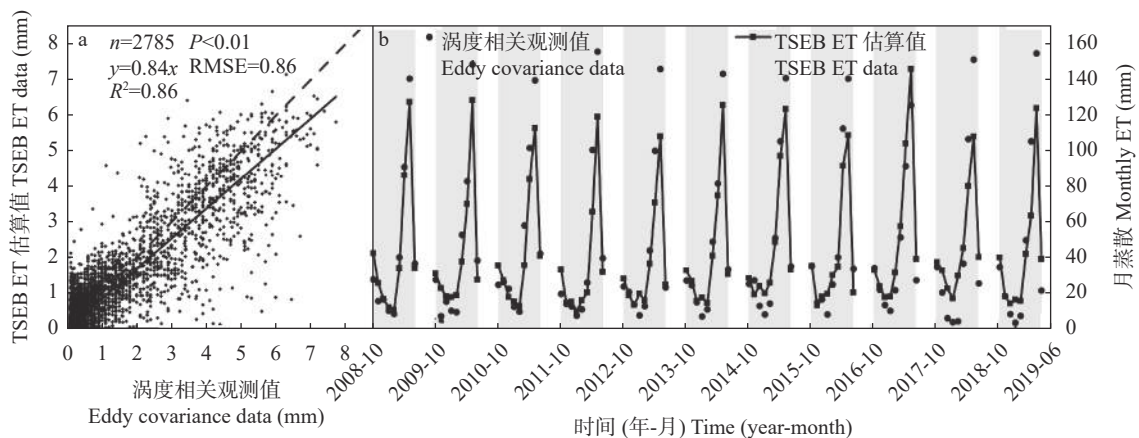


图6 河北平原 TSEB 蒸散产品的冬小麦蒸散值(TSEB ET)与涡度相关测定的冬小麦蒸散值在日尺度(a)和月尺度(b)上的比较

Fig. 6 Comparison of winter wheat evapotranspiration from TSEB dataset (TSEB ET) and that measured by eddy covariance system on daily (a) and monthly (b) scales in the Hebei Plain

于观测值(均方根误差 RMSE 为 $14.48 \text{ mm} \cdot \text{month}^{-1}$)。TSEB 蒸散产品在河北平原对冬小麦蒸散的估算具有较好的精度,故可用于对其耗水的评估。

3.2.2 冬小麦耗水的时空变化

河北平原地下水压采要求节水优先,把水资源消耗的强度控制在合理水平,对于农业就是要控制其真实耗水,即蒸散。以河北平原每年的冬小麦种植区为掩膜,对相应的冬小麦整个生育期蒸散信息进行提取,获得逐年冬小麦生育期蒸散分布数据。以 2014 年作为河北实施地下水压采政策的起始年,

对 2009—2014 年与 2015—2019 年期间冬小麦生育期平均蒸散进行比较(图 7)。生育期蒸散量较高的冬小麦分布在多年种植区,与图 5a 基本一致,说明这些地区水肥条件较好,适合冬小麦的生长。对比压采前后冬小麦生育期的蒸散,压采后冬小麦生育期的耗水量整体有所增加。压采前高于 400 mm 蒸散的麦田面积较少(约 22 万 hm^2),且主要分布在石家庄和邯郸地区。压采后 5 年麦田的平均蒸散普遍高于 400 mm ,面积约 136 万 hm^2 。沧州北部、衡水东部以及邢台东部冬小麦的蒸散量较低,但在压采后

的几年内其蒸散量也有所增加。2014 年地下水压采政策实施后,河北平原降水普遍低于多年平均值,属于偏枯年份,年平均降水较压采前相比低 24 mm,降

水的减少导致小麦需水增加,促使灌溉增加,因此河北平原冬小麦蒸散整体上都有所增加,由此可见,冬小麦的高耗水没有得到控制。

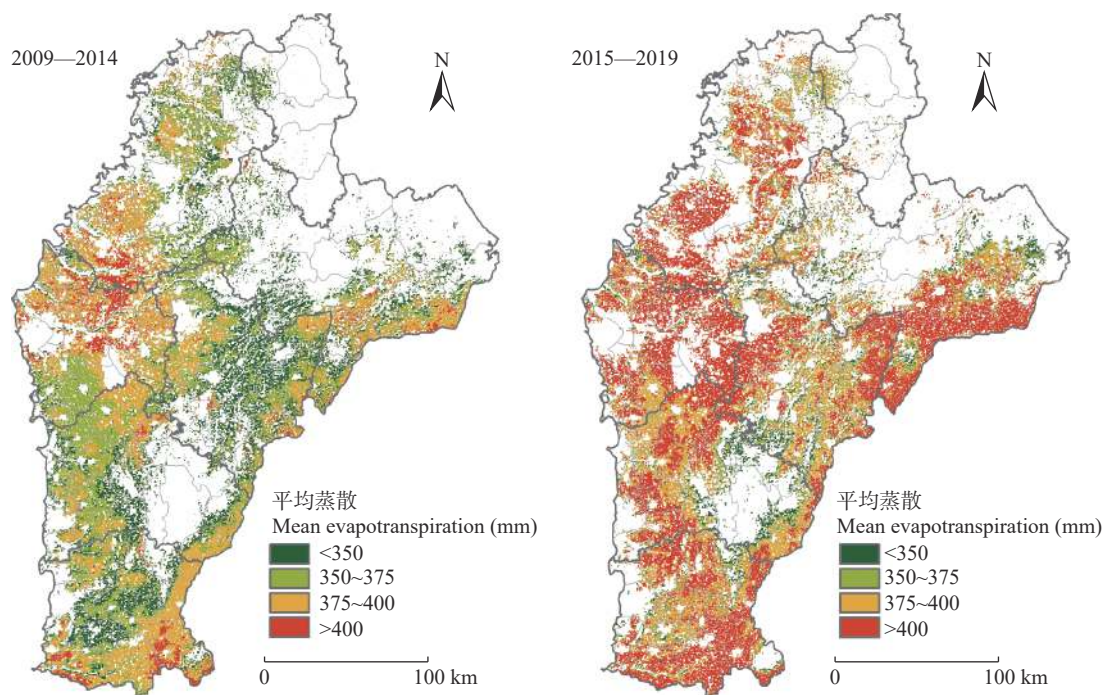


图 7 地下水压采政策实施前(2009—2014 年)、后(2015—2019 年)河北平原冬小麦种植区多年平均蒸散比较

Fig. 7 Comparison of mean annual evapotranspiration of winter wheat before (2009–2014) and after (2015–2019) the implementation of the limiting groundwater exploitation policy in the Hebei Plain

对河北平原各年份冬小麦生育期平均蒸散与总耗水量(平均蒸散×种植面积)进行统计,其年际间耗水的变化如图 8 所示。2009—2019 年河北平原冬小麦生育期平均蒸散和总耗水量存在显著的年际波动,且二者的变化较为一致。2009—2019 年河北平原冬小麦生育期多年平均蒸散为 381.10 mm,平均耗水为

81.82 亿 m^3 。压采前 2009—2014 年冬小麦生育期平均蒸散为 366.29 mm,压采后 5 年平均蒸散为 398.87 mm,增长 32.58 mm。由于冬小麦生育期平均蒸散和种植面积在压采政策实施后均有增长,其生育期总耗水量增加了约 10.9 亿 m^3 。

从本研究时段内等间隔选取 2009 年、2014 年和 2019 年对各地市冬小麦耗水占总耗水量的比例进行统计分析,结果如图 9 所示。11 年间河北平原冬小麦耗水分布格局发生了较大改变。2009 年石家庄、保定和邯郸的冬小麦生育期耗水均占到冬小麦总耗水的 20% 左右,到 2019 年其占比分别减少 5.9%、2.9% 和 1.1%。沧州和衡水所占的份额分别增加 7.5% 和 1.9%。邢台和廊坊的冬小麦耗水比例基本维持不变。与同期河北平原冬小麦种植面积的空间变化相比,其耗水伴随着种植面积在地域上都存在东部增加西部减少的变化格局。

3.2.3 季节性休耕减蒸节水效果分析

季节性休耕是河北省地下水压采政策的一项重要措施,旨在压减冬小麦种植面积,减少地下水抽取。通过年际间冬小麦种植区提取结果的对比,本研究监测到河北平原 2017—2019 年休耕面积分别为

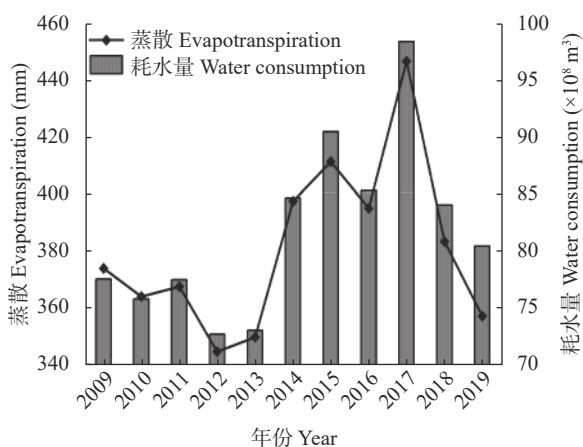


图 8 2009—2019 年河北平原冬小麦生育期平均蒸散和总耗水量年际变化

Fig. 8 Changes of evapotranspiration and total water consumption of winter wheat in Hebei Plain from 2009 to 2019

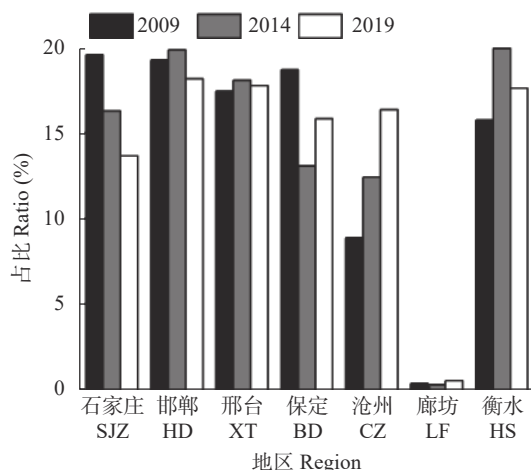


图9 2009年、2014年和2019年河北平原各地区冬小麦耗水占总耗水量比例

Fig. 9 Ratio of water consumption of winter wheat for each region to that of the Hebei Plain in 2009, 2014 and 2019

SJZ: Shijiazhuang; HD: Handan; XT: Xingtai; BD: Baoding; CZ: Cangzhou; LF: Langfang; HS: Hengshui.

16.37 万 hm^2 、17.68 万 hm^2 和 16.16 万 hm^2 , 略高于政府要求的休耕任务。在这些休耕地上, 政府支持种植二月兰 (*Orychophragmus violaceus*)、紫云英 (*As-tragalus sinicus*)、油菜 (*Brassica napus*) 等绿肥或油料作物, 但要求不得抽取地下水浇灌, 在下茬作物种植前将其翻耕入田作为绿肥。调研中发现, 大部分农户对休耕地基本不管理, 任其长满杂草, 最后将其作为绿肥。基于对休耕地的遥感识别, 本研究对比了研究时段内不同时期 80 个休耕地与冬小麦农田样点 NDVI 的数值, 见图 10。休耕地上绿肥或杂草在 NDVI 上与冬小麦具有显著的同步, 且数值相当于同期冬小麦 NDVI 的 0.66, 较高的植被量意味着更多

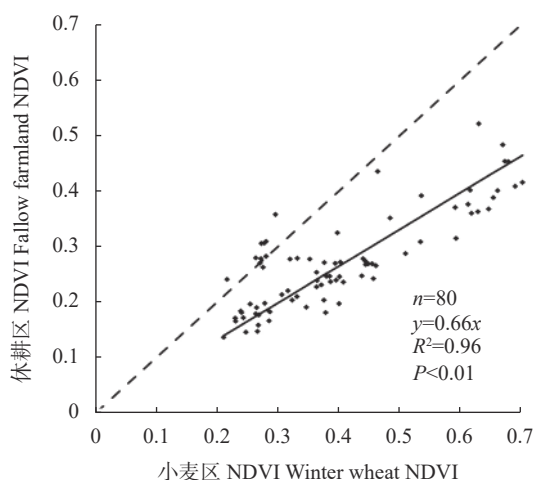


图10 小麦区和休耕区 NDVI 对比

Fig. 10 Comparison of NDVI from winter wheat and fallow farmland

的蒸散量。从遥感蒸散数据中提取获得这些休耕地在冬小麦生育期内总的蒸散量为 326 mm, 相对于压采后 5 年的冬小麦平均蒸散 (398.87 mm), 休耕地在耗水上减少了约 73 mm, 这与谷祥辉^[29]的研究结果较接近。此外由于休耕期间不进行灌溉, 因此除减少蒸散耗水外, 还具有 2700 $\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ 的地下水压采潜力^[29-30]。

3.3 冬小麦水分利用效率的时空变化

农业作为用水大户, 发展节水以提高其用水效率, 对于推进地下水超采综合治理具有重要意义。基于县域的冬小麦产量统计数据, 结合同期遥感蒸散, 对 2009—2019 年各县的冬小麦水分利用效率进行估算, 以评估其用水效率的变化。图 11a 中, 2009—2019 年河北平原冬小麦多年平均水分利用效率为 1.67 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$, 在空间上呈明显的条带状分布, 地区间差异显著, 自西南向东北逐渐递减。冬小麦水分利用效率高于 1.8 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 的县共有 22 个, 主要分布在西部的太行山前平原高产区。低于 1.4 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 的县共有 8 个, 集中分布在沧州东部, 与该地区冬小麦产量偏低有关。在 2014 年地下水压采政策实施后的 5 年中, 各县冬小麦水分利用效率的变化趋势如图 11b 所示。河北平原约 2/3 县的冬小麦水分利用效率在逐年提升, 其余 1/3 地区存在降低的变化。河北平原在发展节水农业, 提升冬小麦水分利用效率方面仍具有很大的空间。

4 讨论

4.1 冬小麦种植面积变化驱动分析

河北省是粮食主产省, 冬小麦产量占全国小麦总产量的 10% 以上, 其种植面积的波动关系到国家粮食安全的保障。河北平原冬小麦总种植面积保持连续增长的趋势, 但在空间上存在“东增西减”的变化, 了解其驱动因素对于保障粮食产量和协调水粮矛盾具有一定的指导意义。通过实地探访、问卷调查, 结合文献查阅, 对影响河北平原冬小麦种植面积的因素进行了调研, 发现引起面积增减的原因因地而异。

冬小麦面积减少的县市主要分布在河北平原西部和南部, 其减少原因主要包括: 1) 追求效益, 农民自发或政府引导调整农业产业结构, 将冬小麦改种为经济作物。传统粮食作物经济效益偏低, 种粮收入不高^[31], 更多的农户、合作社倾向于种植收益更高的经济作物。同时政府也在加强引导, 发展经济作物种植, 推动产业富民。一些地方出现生姜、药材、

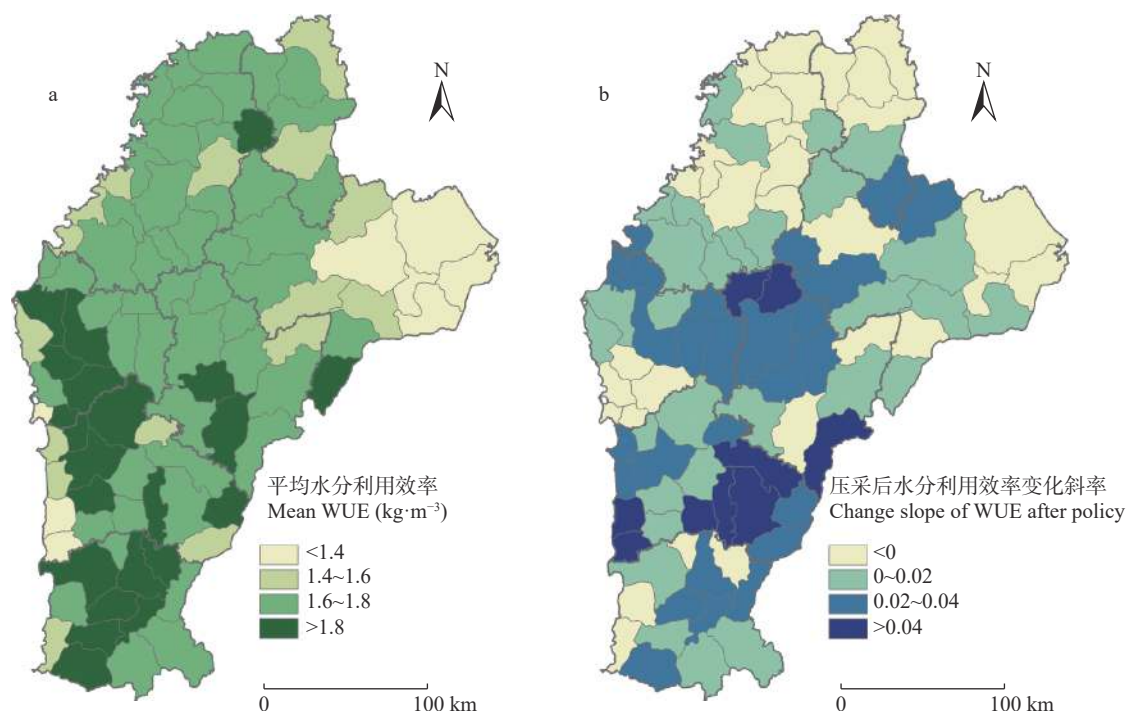


图 11 2009—2019 年河北平原冬小麦水分利用效率 (a) 及压采后水分利用效率变化斜率 (b)

Fig. 11 Mean water use efficiency (WUE) of winter wheat from 2009 to 2019 (a) and the change slope of WUE of winter wheat for each county after the implementation of the limiting groundwater exploitation policy (b) in the Hebei Plain

蔬菜、水果生产基地,如邯郸大名县常年种植花生 (*Arachis hypogaea*) 约 3.33 万 hm^2 ,廊坊霸州市大面积种植观赏树,邢台柏乡县葡萄 (*Vitis vinifera*) 种植面积达 2400 hm^2 等。2) 城市化发展进程的加快占用部分耕地^[9],以及耕地非粮化也是造成冬小麦种植面积减少的一个重要原因。3) 地下水压采实施中部分地区推行季节性休耕,自 2017 年起每年休耕的面积约为 13.33 万 hm^2 ,其中衡水安平县每年的休耕任务达 9000 hm^2 ^[30],这在一定程度上导致了冬小麦种植面积的减少。

冬小麦面积增加的县市多分布在河北平原的东部,调研发现:1) 冬小麦生产全程机械化程度的提高,以及农村劳动力的短缺与老龄化,提升了冬小麦种植的可选择性。目前除灌溉环节外,冬小麦的种植全程实现了机械化。农村劳动力的兼业化、老龄化以及劳动力成本的增加导致农业生产者放弃一些劳动力密集型作物,改种劳动力投入更少的冬小麦,如邢台南宫市部分产棉区改种冬小麦。2) 小麦品种及配套技术的改进提升了农民的种粮积极性。如“渤海粮仓”科技示范工程实施后对大面积中低产田和盐碱荒地的改造,增加了河北东部冬小麦的种植面积^[32]。3) 国家对粮食安全的保障不断加强,各地为确保完成粮食生产任务将种粮责任分解到村、到地块,并制定一系列政策鼓励农民种粮。近年来粮食

安全党政同责制度的落实,更加保障了冬小麦种植面积的稳定和增长。

4.2 农户节水行为影响因素分析

本研究分析中发现河北平原冬小麦耗水在地下水压采政策实施后并未降低,反而有所增加,除气象因素的影响外,农户的用水行为也是一个重要原因。地下水超采综合治理中提出要推广抗旱节水品种和配套节水栽培技术。发展节水农业,政府发挥着引导和推广的作用,农户的主动参与更为重要。本研究就农业生产经营者的节水意向开展了调研,发现影响冬小麦节水灌溉推广的主要原因包括:1) 土地破碎化及经营权不稳定制约了现代高效灌溉技术的推广。土地的规模化流转虽然在推进,但绝大部分农田仍归农户经营。小块的土地、差异化的种植和农户有限的投资能力限制了现代节水灌溉设备的应用。即使是合作社,也会考虑节水设备投资在土地经营时限内的回报率。2) 农户节水动力和压力不足,自发性不高。相对于灌溉对冬小麦的增产,灌溉费用往往被农户忽略。一些规模化经营土地的合作社、大户采用了喷灌、滴灌等灌溉设施,其出发点是解决劳动力不足或劳动力费用高的问题,因此现代灌溉设备只是改变了灌溉方式,并未实现真正的节水,这在其蒸散耗水上得到反映。同时,调研中还发现了大户喷灌比农户小畦灌至少多浇一水的现象。政

府推广节水不应只停留在设施上的补贴与扶持, 更应关注节水灌溉制度的推广与督导。

5 结论

本研究利用 MODIS NDVI 数据提取了河北平原 2009—2019 年冬小麦种植空间分布, 结合 TSEB 蒸散产品以及农业生产统计数据, 分析了河北平原地下水压采政策实施前后冬小麦种植面积、耗水特征以及水分利用效率的时空变化, 并对产生这些变化的影响因素进行了调研。研究发现: 1) 2009—2019 年河北平原冬小麦种植面积一直保持增长趋势, 其间增加了 18.37 万 hm^2 , 在空间分布上表现为东部增加西部减少的特征。追求种植效益以及城市化是其面积减少的主要原因, 保障粮食安全以及种植全程机械化程度的提高则增加了冬小麦的种植面积。2) 地下水压采政策实施后, 冬小麦生育期的耗水量没有降低, 反而整体都有所增加。其间河北平原冬小麦多年平均水分利用效率为 $1.67 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, 在空间上自西南向东北逐渐递减, 地下水压采政策实施后, 2/3 地区的冬小麦水分利用效率在逐年提升。地块的破碎化、流转土地经营权不稳定以及农户节水动力和压力不足导致冬小麦生产水分利用效率的偏低。3) 相比于麦田, 季节性休耕地能够减少 73 mm 的蒸散。河北平原面对水资源危机以及粮食安全保障的矛盾, 加强农业节水, 真正降低蒸散耗水, 进一步提升水分利用效率, 才能使其得到缓解。

参考文献 References

- [1] 康绍忠. 水安全与粮食安全[J]. 中国生态农业学报, 2014, 22(8): 880–885
KANG S Z. Towards water and food security in China[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2014, 22(8): 880–885
- [2] 杨天一, 王军, 张红梅, 等. 基于单作物系数法的华北平原典型农业生态系统蒸散规律研究[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2022, 30(3): 356–366
YANG T Y, WANG J, ZHANG H M, et al. Evapotranspiration of typical agroecosystems in the North China Plain based on single crop coefficient method[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2022, 30(3): 356–366
- [3] ZHANG X Y, PEI D, CHEN S Y, et al. Performance of double-cropped winter wheat-summer maize under minimum irrigation in the North China Plain[J]. Agronomy Journal, 2006, 98(6): 1620–1626
- [4] SUN H Y, SHEN Y J, YU Q, et al. Effect of precipitation change on water balance and WUE of the winter wheat-summer maize rotation in the North China Plain[J]. Agricultural Water Management, 2010, 97(8): 1139–1145
- [5] 赵其国, 沈仁芳, 滕应, 等. 我国地下水漏斗区耕地轮作休耕制度试点成效及对策建议[J]. 土壤, 2018, 50(1): 1–6
- ZHAO Q G, SHEN R F, TENG Y, et al. Pilot progress and countermeasures on farmland rotation and fallow system in the groundwater funnel area of China[J]. Soils, 2018, 50(1): 1–6
- [6] ZHANG C, DUAN Q Y, YEH P J F, et al. The effectiveness of the south-to-north water diversion middle route project on water delivery and groundwater recovery in North China Plain[J]. Water Resources Research, 2020, 56(10): e2019WR026759
- [7] 贾坤, 李强子. 农作物遥感分类特征变量选择研究现状与展望[J]. 资源科学, 2013, 35(12): 2507–2516
JIA K, LI Q Z. Review of features selection in crop classification using remote sensing data[J]. Resources Science, 2013, 35(12): 2507–2516
- [8] WANG X L, HOU M, SHI S H, et al. Winter wheat extraction using time-series Sentinel-2 data based on enhanced TWDTW in Henan Province, China[J]. Sustainability, 2023, 15(2): 1490
- [9] 潘学鹏, 李改欣, 刘峰贵, 等. 华北平原冬小麦面积遥感提取及时空变化研究[J]. 中国生态农业学报, 2015, 23(4): 497–505
PAN X P, LI G X, LIU F G, et al. Using remote sensing to determine spatio-temporal variations in winter wheat growing area in the North China Plain[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2015, 23(4): 497–505
- [10] 安塞, 沈彦俊, 赵彦茜, 等. 基于NDVI时间序列数据的冬小麦种植面积提取[J]. 江苏农业科学, 2019, 47(15): 236–240
AN S, SHEN Y J, ZHAO Y X, et al. Extraction of winter wheat planting area based on NDVI time series data[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2019, 47(15): 236–240
- [11] 郎婷婷. 京津冀地区冬小麦种植面积提取及生产潜力分析[D]. 唐山: 华北理工大学, 2019
LANG T T. Extraction of winter wheat planting area and analysis of production potential in Beijing-Tianjin-Hebei Region[D]. Tangshan: North China University of Science and Technology, 2019
- [12] 雷海梅. 基于多源遥感数据的黑龙港流域主要农作物分类研究[D]. 邯郸: 河北工程大学, 2021
LEI H M. Classification of main crops in Heilonggang Basin based on multi-source remote sensing data[D]. Handan: Hebei University of Engineering, 2021
- [13] 范玲玲. 中国小麦空间格局演变及区域水资源利用效应研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2021
FAN L L. Study on the evolution of wheat spatial pattern and the effect of regional water resources utilization in China[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2021
- [14] THONFELD F, STEINBACH S, MURO J, et al. Long-term land use/land cover change assessment of the Kilombero catchment in Tanzania using random forest classification and robust change vector analysis[J]. Remote Sensing, 2020, 12(7): 1057
- [15] TALUKDAR S, SINGHA P, MAHATO S, et al. Land-use land-cover classification by machine learning classifiers for satellite observations—A review[J]. Remote Sensing, 2020, 12(7): 1135
- [16] ZHAN Y L, MUHAMMAD S, HAO P Y, et al. The effect of EVI time series density on crop classification accuracy[J]. Optik, 2018, 157: 1065–1072
- [17] MA Z, LIU Z, ZHAO Y Y, et al. An unsupervised crop

- classification method based on principal components isometric binning[J]. *International Journal of Geo-Information*, 2020, 9(11): 648
- [18] 王浩, 杨贵羽, 贾仰文, 等. 以黄河流域土壤水资源为例说明以“ET管理”为核心的现代水资源管理的必要性和可行性[J]. *中国科学(E辑: 技术科学)*, 2009, 39(10): 1691–1701
WANG H, YANG G Y, JIA Y W, et al. Taking soil water resources in the Yellow River Basin as an example, the necessity and feasibility of modern water resources management with “ET management” as the core are illustrated[J]. *Scientia Sinica (Technologica)*, 2009, 39(10): 1691–1701
- [19] 张洪波, 兰甜, 王斌, 等. 基于ET控制的平原区县域水资源管理研究[J]. *水利学报*, 2016, 47(2): 127–138
ZHANG H B, LAN T, WANG B, et al. Regional water resources allocation oriented to ET control in plain area[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2016, 47(2): 127–138
- [20] 李昊天, 李璐, 闫宗正, 等. 太行山前平原40年冬小麦作物系数变化及影响因素研究[J]. *中国生态农业学报(中英文)*, 2022, 30(5): 747–760
LI H T, LI L, YAN Z Z, et al. Changes in and influencing factors of crop coefficient of winter wheat during the past 40 years on the Taihang Piedmont Plain[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2022, 30(5): 747–760
- [21] ZHANG X Y, CHEN S Y, SUN H Y, et al. Changes in evapotranspiration over irrigated winter wheat and maize in North China Plain over three decades[J]. *Agricultural Water Management*, 2011, 98(6): 1097–1104
- [22] 张继. 中国西南喀斯特地区遥感蒸散发变化研究[D]. 贵阳: 贵州师范大学, 2020
ZHANG J. Study on remote sensing evapotranspiration change in Karst Area of Southwest China[D]. Guiyang: Guizhou Normal University, 2020
- [23] ZHANG C J, LONG D, ZHANG Y C, et al. A decadal (2008–2017) daily evapotranspiration data set of 1km spatial resolution and spatial completeness across the North China Plain using TSEB and data fusion[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2021, 262: 112519
- [24] ZHANG C J, LONG D, YAN L, et al. Spatiotemporally continuous evapotranspiration data set across the North China Plain during 2008–2019 using TSEB and data fusion[J]. *PANGAEA*, <https://doi.org/10.1594/PANGAEA.926333>
- [25] YANG J, HUANG X. The 30 m annual land cover dataset and its dynamics in China from 1990 to 2019[J]. *Earth System Science Data*, 2021, 13(8): 3907–3925
- [26] 张玉翠, 姜寒冰, 张传伟, 等. 2007—2013年华北平原典型灌溉农田生态系统日通量数据集——以栾城站为例[J]. *中国科学数据*, 2020, 5(2): 40–50
ZHANG Y C, JIANG H B, ZHANG C W, et al. Daily fluxes dataset of the typical irrigated agro-ecosystem in the North China Plain: a case study of Luancheng Station (2007–2013)[J]. *China Scientific Data*, 2020, 5(2): 40–50
- [27] 张雅芳, 郭英, 沈彦俊, 等. 华北平原种植结构变化对农业需水的影响[J]. *中国生态农业学报(中英文)*, 2020, 28(1): 8–16
ZHANG Y F, GUO Y, SHEN Y J, et al. Impact of planting structure changes on agricultural water requirement in North China Plain[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2020, 28(1): 8–16
- [28] ZHANG H Y, LIU M R, FENG Z H, et al. Estimations of water use efficiency in winter wheat based on multi-angle remote sensing[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2021, 12: 614417
- [29] 谷祥辉. 基于多时相遥感数据的冬小麦休耕节水效应研究[D]. 青岛: 山东科技大学, 2020
GU X H. Study on water-saving effect of winter wheat fallow based on multi-temporal remote sensing data[D]. Qingdao: Shandong University of Science and Technology, 2020
- [30] 贾丽娟, 焦为杰, 王先明, 等. 基于遥感监测河北省地下水超采区冬小麦休耕效果研究[J]. *现代农业科技*, 2022(3): 196–200
JIA L J, JIAO W J, WANG X M, et al. Effect of winter wheat fallow in groundwater overexploitation area of Hebei Province based on remote sensing monitoring[J]. *Modern Agricultural Science and Technology*, 2022(3): 196–200
- [31] 杨玮宏, 廖媛红. 我国小麦生产成本收益分析[J]. *中国农业资源与区划*, 2020, 41(8): 121–126
YANG W H, LIAO Y H. Cost-benefit analysis of wheat production in China[J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2020, 41(8): 121–126
- [32] 白静静, 李嫣资, 王健, 等. 合作社在农业新技术转移中的作用[J]. *北方园艺*, 2017(19): 184–188
BAI J J, LI Y Z, WANG J, et al. Role of cooperatives in the transfer of new agricultural technology[J]. *Northern Horticulture*, 2017(19): 184–188