中国生态农业学报(中英文)
Chinese Journal of Eco-Agriculture
中文核心期刊
中国科技核心期刊
中国精品科技期刊
百种中国杰出学术期刊
中国科学引文数据库源刊

华北平原种植结构变化对农业需水的影响

张雅芳，郭英，沈彦俊，齐永青，罗建美

引用本文:
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.

在线阅读 View online: https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.190490

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于遥感的华北平原农作物时空分布变化特征分析

Using remote sensing to analyze spatiotemporal variations in crop planting in the North China Plain

中国生态农业学报. 2015(9): 1199–1209 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.150506

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 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.190323

华北平原冬小麦面积遥感提取及时空变化研究

Using remote sensing to determine spatio–temporal variations in winter wheat growing area in the North China Plain

中国生态农业学报. 2015(4): 497–505 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.141505

华北平原主要种植模式农业地下水足迹研究——以河北省吴桥县为例

Agricultural groundwater footprint of the major cropping system in the North China Plain: A case study of Wuqiao County, Hebei Province

中国生态农业学报. 2017, 25(3): 328–336 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.160833

华北平原农田温室气体排放与减排综述

Review on greenhouse gas emission and reduction in wheat–maize double cropping system in the North China Plain

中国生态农业学报. 2018, 26(2): 167–174 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.171117

中国生态农业学报(中英文) 2020 年 1 月 第 28 卷 第 1 期
Chinese Journal of Eco-Agriculture, Jan. 2020, 28(1): 8−16

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.190490

张雅芳, 郭英, 沈彦俊, 齐永青, 罗建美. 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, QI Y Q, LUO J M. Impact of planting structure changes on agricultural water requirement in North China Plain[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2020, 28(1): 8−16

华北平原种植结构变化对农业需水的影响*

张雅芳[1,2], 郭 英[2], 沈彦俊[2**], 齐永青[2], 罗建美[2,3,4]

(1. 河北师范大学资源与环境科学学院 石家庄 050024; 2. 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/中国科学院遗传与发育生物学研究所农业资源研究中心 石家庄 050022; 3. 中国科学院大学 北京 100049; 4. 河北地质大学土地资源与城乡规划学院 石家庄 050031)

摘 要: 不同种植结构下的农田需水研究是调整农业种植结构、制定切实可行的区域灌溉方案的重要依据。为了定量估算华北平原种植结构变化对农业需水的影响, 本文基于 MODIS NDVI 数据和 TM/ETM 遥感影像提取了 2002 年和 2012 年华北平原主要作物类型及其种植面积, 同时基于作物系数法计算了华北平原 7 种主要作物需水量, 分析了华北平原种植结构变化对作物需水的影响。结果表明: 2002—2012 年, 主要作物种植面积减少 60.7 万 hm^2。其中, 种植面积明显减少的作物分别为冬小麦-夏玉米(−43.18 万 hm^2)、棉花(−32.43 万 hm^2)、水稻(−9.3 万 hm^2)和春玉米(−4.9 万 hm^2), 种植面积增加的作物主要是林果(+16.61 万 hm^2)和蔬菜(+12.6 万 hm^2)。2002—2012 年, 华北平原主要作物的总需水量从 742.7 亿 m^3 下降至 695.5 亿 m^3, 共下降 6.37%。其中, 需水量减少的作物类型为冬小麦-夏玉米(−35.41 亿 m^3)、棉花(−24.31 亿 m^3)、水稻(−7.48 亿 m^3)和春玉米(−2.1 亿 m^3), 需水量增加的为林果(+11.24 亿 m^3)和蔬菜(+10.71 亿 m^3)。从空间分布来看, 华北平原作物需水量整体呈减少趋势, 仅在河北平原、鲁西北以及滨海平原靠近城市周边的区域呈增加趋势, 其中滨海平原需水增加量最大。华北平原由于作物种植面积减小引起的作物需水减少量达 44.7 亿 m^3; 由作物种植结构调整引起的作物需水减少量为 2.5 亿 m^3。种植规模的减小是华北平原作物需水量减少的主要原因。

关键词: 华北平原; 遥感提取; 种植结构; 种植面积; 作物需水量

中图分类号: TP79 开放科学码(资源服务)标识码(OSID):

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

ZHANG Yafang[1,2], GUO Ying[2], SHEN Yanjun[2**], QI Yongqing[2], LUO Jianmei[2,3,4]

(1. College of Resources and Environmental Sciences, Hebei Normal University, Shijiazhuang 050024, China; 2. Key Laboratory of Agricultural Water Resources, Chinese Academy of Sciences / Hebei Laboratory of Water-Saving Agriculture / Center for Agricultural Resources Research, Institute of Genetics and Developmental Biology, Chinese Academy of Sciences, Shijiazhuang 050022, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 4. College of Land Resources and Rural-Urban Planning, Hebei GEO University, Shijiazhuang 050031, China)

Abstract: Evaluating farmland water requirements under different planting structures is an important basis for adjusting the agricultural planting structure and formulating feasible regional irrigation schemes. In order to quantitatively estimate the im-

* 国家重点研发计划课题(2016YFC0401403)和河北省自然科学基金面上项目(D2019503028)资助
** 通信作者: 沈彦俊, 主要从事生态水文、环境遥感与应用等方面的研究。E-mail: yjshen@sjziam.ac.cn
张雅芳, 主要从事生态水文与 GIS 应用等方面的研究。E-mail: 2605977606@qq.com
收稿日期: 2019-07-03 接受日期: 2019-09-22
* This study was supported by the National Key Research and Development Project of China (2016YFC0401403) and the Natural Science Foundation of Hebei Province (D2019503028).
** Corresponding author, E-mail: yjshen@sjziam.ac.cn
Received Jul. 3, 2019; accepted Sep. 22, 2019

pact of planting structure changes on agricultural water requirement in the North China Plain (NCP), this paper extracted the main crop types and their planting areas based on MODIS NDVI data and TM/ETM remote sensing images from 2002 and 2012. The water demand of seven main crops in the NCP was calculated based on the crop coefficient method and the influence of planting structure change on crop water requirements in NCP was analyzed. The results showed that firstly: from 2002 to 2012, the main crop planting area decreased by 60.7×10^4 hectares. Among them, the planting area of the four crops was significantly reduced: winter wheat-summer maize (-4.318×10^5 hm^2), cotton (-3.243×10^5 hm^2), rice (-9.3×10^4 hm^2), and spring corn (-4.9×10^4 hm^2). The crops for which planting area increased were: forest fruit ($+1.661\times10^5$ hm^2) and vegetables ($+1.26\times10^5$ hm^2). Secondly, from 2002 to 2012, the total water demand for major crops in the NCP decreased from 74.27 billion m^3 to 69.55 billion m^3 (a decrease of 6.37%). Among this, the types of crop with reduced water demand were as follows: winter wheat-summer maize (−3.54 billion m^3), cotton (−2.43 billion m^3), rice (−0.75 billion m^3), and spring maize (−0.21 billion m^3). On the other hand, fruit trees and vegetables both caused an increase in water demand 1.12 billion m^3 and 1.07 billion m^3, respectively. Spatially, crop water demand in the NCP showed an overall decreasing trend, with only the Hebei Plain, northwest Shandong Province, and the coastal plain near the urban periphery displaying increasing water demand. The largest increase in water demand occurred in the coastal plain. Finally, the reduction of crop water demand in the NCP caused by reduction of crop planting area amounted to 4.47 billion m^3, while that caused by planting structure adjustments only amounted to 0.25 billion m^3. Hence, the reduction of the planting scale is the main reason for the decrease in crop water demand in the NCP.

Keywords: North China Plain; Remote sensing extraction; Planting structure; Planting area; Crop water requirement

华北平原东临渤海，西抵太行山，北起燕山，南至黄河，地理位置为 112°30′~119°30′E, 34°46′~40°25′N，包括北京、天津、河北平原和黄河以北的豫北、鲁西北平原区，面积约 14.1 万 km^2[1]。华北平原是我国重要的粮食产区，农业用水需求量大而利用效率低[2]。农业用水占总水量的 70%以上，其中有 75%以上来自地下水，该地区地下水超采现象十分严重[3]，水资源短缺已成为威胁该区域农业生产、社会经济发展的最大障碍[4]。自 20 世纪 60 年代以来华北平原经历了从传统的旱作农业向灌溉农业的转变，随着灌溉条件的改善，种植制度从两年 3 熟、三年 4 熟或一年 1 熟为主逐渐形成了以小麦(*Triticum aestivum*)-玉米(*Zea mays*)一年两熟为主的高强度灌溉农业生产模式，低需水量作物大幅减少，蔬菜、水果等高需水量作物大幅增加，种植结构发生了巨大变化[5]。种植结构转变导致的超规模、高强度的生产模式是灌溉农业消耗地下水的根源所在。因此，明确该地区不同类型农田需水量，对开展节水农业、制定切实可行的区域灌溉方案、保护有限的地下水资源具有重要理论与实践意义。

作物需水量作为衡量农作物水分供应状况的一种指标，是研究一个地区的农田水分平衡的重要参数[6]。目前，国内外基于作物需水量估算的研究已取得较多成果。李春强等[7]利用河北省 84 个地面气象站的资料，计算了河北省主要作物冬小麦和玉米 1965—1999 年的需水量，得出冬小麦和玉米的需水量在过去 35 年呈减少趋势。逄晋松等[8]利用华北棉区 47 个气象站点逐日气象数据，通过 SIMETAW 模型分析 1986—2015 年棉花(*Gossypium* spp.)生育期需水量及变化趋势，结果表明，近 30 年来，棉花生育期需水量呈减小趋势，6—8 月棉花需水量最大。Luo 等[9]利用 CROPWAT 模型模拟了黄淮海平原冬小麦、夏玉米、棉花、谷子(*Setaria italica*)和大豆(*Glycine max*)的需水量，得出近 50 年来主要农作物生育期平均年需水量为 114.68 km^3。白志杰等[10]基于统计数据结合作物模型和蒸发皿法估算了小麦、玉米、蔬菜、林果等作物的需水量，分析了雄安新区上游 1986—2015 年农业种植结构及农业需水的时空演变趋势。冯慧敏等[11]分析了华北平原粮食作物需水量对气候变化的响应特征，结果表明粮食作物需水量与年均最高气温之间存在较强相关关系。Abdul Karim 等[12]利用遥感和 FAO56 作物水分模型对位于印度卡纳塔克邦的水稻(*Oryza sativa*)作物需水量以及灌溉需水量进行了估算。Kumar[13]利用 Penman-Monteith 公式以及印度比哈尔邦 Sabour 区和 Patna 区的水稻、玉米、小麦、绿豆(*Vigna radiata*)的作物系数估算了各作物在两区的需水量，并根据作物在生育期的有效降雨量估算了不同作物的灌溉需水量。虽然以往对于作物需水量的研究较多，但是目前针对华北平原种植结构变化对农田需水量影响的研究较少。因此，本文基于 2002 年和 2012 年的 MODIS NDVI 数据和 TM/ETM 遥感影像提取了华北平原冬小麦-夏玉米、春玉米、棉花、林果、蔬菜、水稻 7 种种植模式的土地利用面积分布数据，同

时基于作物系数法并结合农业气象站提供的各地区作物生育阶段数据，固定气象要素不变，定量估算了华北平原种植结构及种植规模变化对作物需水的影响，该研究将为建立水资源可持续利用的作物种植结构调整等提供参考。

1 研究区概况

华北平原地形平坦，土层深厚，海拔多在 100 m 以下(图 1)。华北平原属暖温带季风型气候区，年平均气温 10~15 ℃，多年平均降雨量为 549.6 mm，降水时空分布不均，多集中在 7—9 月，占全年降雨量的 75%[14]，而春季和初夏降水稀少，普遍不能满足农作物生长需要。华北平原以全国 1/6 的耕地产出占全国 1/5 的粮食[15]，在我国的粮食生产中占重要地位。该地区主要粮食作物有小麦、玉米、水稻，经济作物有棉花、蔬菜、林果等。华北平原已形成以种植业为主体的农业产业结构，对保障国家粮食安全具有举足轻重的作用。

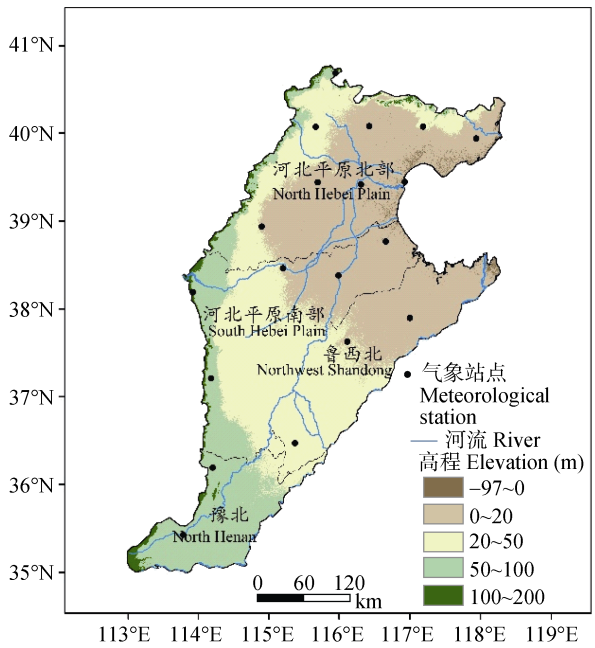


图 1 华北平原地理位置和气象站点分布图

Fig. 1 Location of the North China Plain and distribution of meteorological stations

2 数据来源和处理方法

2.1 数据来源

本文使用的遥感数据为 2002 年和 2012 年的 Terra/MODIS MOD13Ql 产品的 NDVI 数据和 Landsat TM/ETM 的影像数据。其中，NDVI 数据为 16 d 合成，空间分辨率为 250 m。TM/ETM 数据是由 7 个波段反射率合成的遥感影像，空间分辨率为 30 m。对于受到云影响的部分 TM/ETM 影像数据，本研究主要选取了 2002 年和 2012 年的 4 月上旬影像。两组数据均由 NASA(http://reverb.echo.nasa.gov)免费提供。气象数据由中国气象科学数据共享服务网(http://cdc.cma.gov.cn/home.do)提供，为 1998—2017 年华北平原范围内和周边共 57 个气象台站的日值气象资料，包括日最高气温、日最低气温、风速、日照时数、相对湿度和降水量 6 个气象要素；农业气象站观测资料主要包括不同地区各作物播种、收获日期以及不同发育期的起止日期；土地利用分类的验证数据来自京津冀地区各省、市农村统计年鉴中的耕地面积和作物播种面积数据。

2.2 数据处理方法

2.2.1 作物种植面积提取

归一化植被指数(normal difference vegetation index，NDVI)是表征植被生长状况的主要指标之一，是遥感提取植被信息的重要指标，广泛应用于植被分类研究[16-17]。对于冬小麦-夏玉米、春玉米、林果和棉花 5 类作物的提取，本文通过 HANTS (harmonic analysis of time-series, HANTS)滤波[18-19]去除噪声后的 NDVI 数据构建 NDVI 时间序列曲线(图 2)，依据不同植被生长曲线差异进行土地覆被分类样本的选取[20]，利用 CART 算法[21]构建决策树，并进行剪枝，最后应用生成的决策树文件进行分类。对于水稻和蔬菜两类作物的提取，本文基于 Landsat TM/ETM 数据，利用监督分类的方法对其种植面积进行提取。

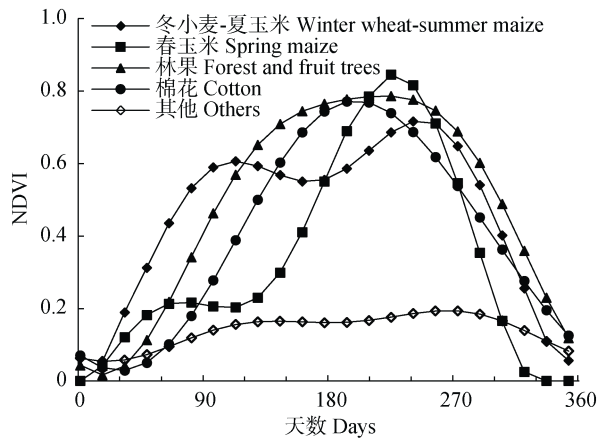


图 2 华北平原主要作物归一化植被指数(NDVI)时间序列曲线

Fig. 2 Time series curves of normal difference vegetation index (NDVI) of the main crops in the North China Plain

2.2.2 作物需水量计算

本文将作物全年需水量计算分为作物生育期需水量和非生育期需水量两部分分别进行估算，并通过 FAO 推荐的作物系数法[22]实现，从而得:

$$ETC=ET0_1\times k_{c1}+ET0_2\times k_{c2} \quad (1)$$

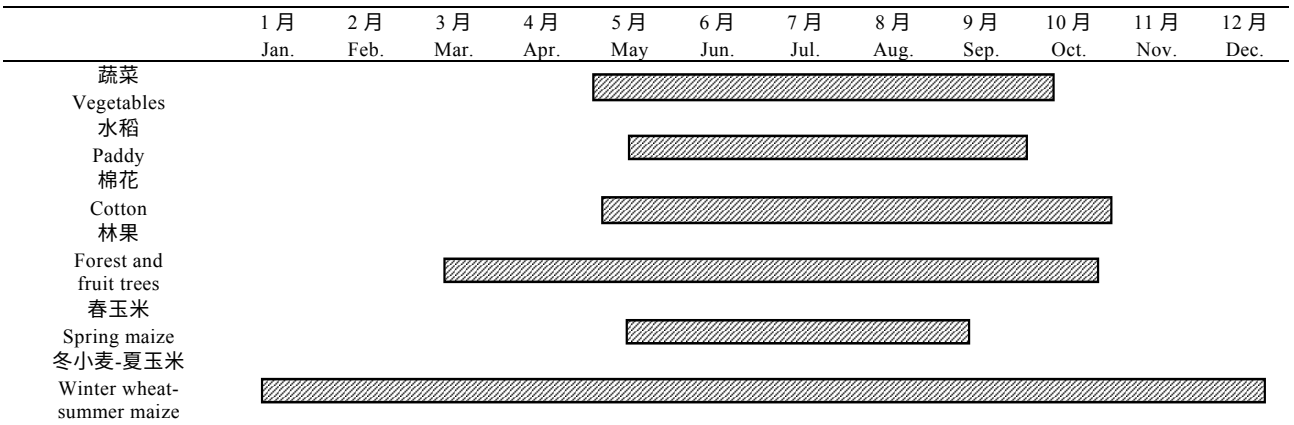
式中: ETC 为作物全年需水量, $ET0_1$ 为作物生育期多年平均参考蒸散, $ET0_2$ 为作物非生育期多年平均参考蒸散, k_{c1} 为作物生育期作物系数, k_{c2} 为作物非生育期作物系数。对于越冬作物冬小麦而言, 根据其生长发育特点, 一般将其生育阶段分为初始生长期、冻融期、越冬期、快速发育期、生育中期和成熟期, 不越冬作物的生育阶段一般分为初始生长期、快速发育期、生育中期、成熟期。本文参考《北方地区主要农作物灌溉用水定额》[6]确定华北平原除蔬菜以外的 6 种作物在不同地区各生育阶段的作物系数及非生育期作物系数。由于蔬菜种类繁多、情况复杂, 对其进行简化处理, 把各类蔬菜合并为同种作物类型, 认为是一种除越冬期外常年都生长较为旺盛的作物[6]。因《北方地区主要农作物灌溉用水定额》中缺少蔬菜的作物系数, 而目前我国关于蔬菜需水量的研究多集中于单个蔬菜类型的研究, 对于蔬菜作为一类型作物的研究较少, 因此本研究中蔬菜的作物系数参考 FAO-Cropwat 中作物系数的数据。作物非生育期的作物系数 k_{c2} 参照作物生长发育初期的作物系数 k_{cini}[22]计算, 华北平原 k_{cini} 参照《北方地区主要农作物灌溉用水定额》确定为 0.345。作物生育期结合农业气象站提供的各作物发育期名称和日期确定, 最终作物生育期的确定如表 1 所示。本文采用 FAO 推荐的 Penman-Monteith 方法[22]计算作物的参考蒸散 ET_0, 计算公式为:

$$ET_0=\frac{0.408\Delta(R_n-G)+\gamma\frac{900}{T+273}\mu_2(e_s-e_a)}{\Delta+\gamma(1+0.34\mu_2)} \quad (2)$$

式中: ET_0 为参考作物蒸散量($mm\cdot d^{-1}$), R_n 为作物表面净辐射($MJ\cdot m^{-2}\cdot d^{-1}$), G 为土壤热通量($MJ\cdot m^{-2}\cdot d^{-1}$), T 为 2 m 高度处日平均气温(℃), μ_2 为 2 m 高度处日平均风速($m\cdot s^{-1}$), e_s 为饱和水汽压(kPa), e_a 为实际水汽压(kPa), Δ 为饱和水汽压曲线斜率(kPa·℃$^{-1}$), γ 为干湿表常数(kPa·℃$^{-1}$)。

表 1　华北平原主要作物生育期

Table 1　Growth periods of main crops in the North China Plain



3　结果与分析

3.1　华北平原主要作物种植结构的时空变化

3.1.1　遥感分类结果验证

本文将华北平原区 2002 年和 2012 年遥感监测与农业统计数据中基于县域的耕地面积及各种作物的种植面积进行相关分析, 从而对本研究的分类结果进行精度评价。如图 3a 所示, 遥感监测与农业统计数据中县域耕地面积的相关系数为 0.78, 由图 3b-3f 可知, 遥感监测的各作物种植面积与农业统计数据的种植面积的相关系数均在 0.76 以上(置信水平均为 95%), 表明该方法在华北平原对作物提取的分类精度较高, 分类结果能够反映作物种植的时空变化。

3.1.2　华北平原主要作物种植面积的时空变化分析

本文根据华北平原的区域水分特征, 将华北平原分为河北平原北部(包含北京市和天津市)、河北平原南部、鲁西北和豫北 4 个区域。小麦、玉米是华北平原主要粮食作物类型, 冬小麦-夏玉米主要分布在豫北和鲁西北的引黄灌溉区和太行山前平原水源条件较好的区域; 春玉米主要分布在地下水资源短缺、灌溉成本较高的河北平原北部的廊坊、沧州北部一带; 棉花集中分布于河北平原南部和鲁西北的主要产棉区, 例如: 邢台、衡水、德州和聊城; 水稻集中分布于天津、河北唐山地区和黄河沿岸; 蔬菜主要分布在较为发达的城市周边, 林果分散分布于几个产果区如石家庄、沧州、滨州和京津周边地区(图 4)。

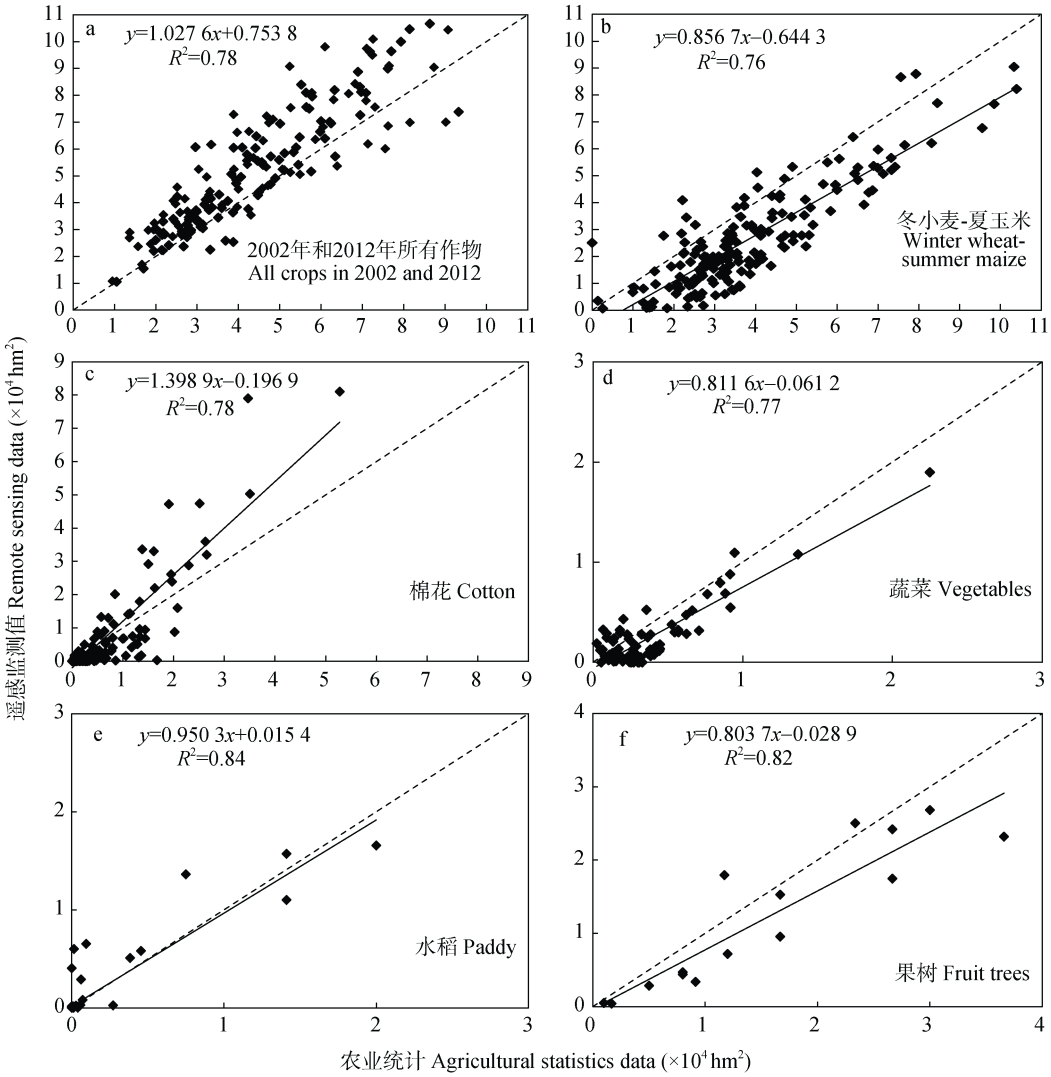


图 3 2002 年和 2012 年河北地区遥感监测主要农作物种植面积与各县农业统计数据的对比

Fig. 3 Comparison of the planting area of main crops monitored by remote sensing and the agricultural statistical data of each county in Hebei in 2002 and 2012

2002 年冬小麦-夏玉米、春玉米、棉花、林果、蔬菜、水稻 7 种主要作物的种植面积占华北平原总面积的 70.29%，到 2012 年下降至 65.96%。根据以上分类结果提取 2002 年和 2012 年的土地利用转移矩阵(表 2)。可知，从 2002 年到 2012 年主要作物的种植面积共减少 60.7 万 hm^2。其中，主要粮食作物类型(小麦、玉米、水稻)的种植面积均有所减少，共减少 57.4 万 hm^2；主要经济作物类型中林果、蔬菜的种植面积分别增加 16.6 万 hm^2 和 12.6 万 hm^2；棉花的种植面积减少 32.4 万 hm^2，减少率为 28.3%。5 种种植面积明显减少的作物分别为冬小麦-夏玉米(−43.18 万 hm^2)、棉花(−32.43 万 hm^2)、水稻(−9.3 万 hm^2)和春玉米(−4.9 万 hm^2)，种植面积增加的作物主要是林果(+16.61 万 hm^2)和蔬菜(+12.6 万 hm^2)。

河北平原北部冬小麦种植面积减少 41.3 万 hm^2，单季玉米种植面积有所增加。一方面是因为该地区冬小麦主要靠提取地下水灌溉，地下水紧缺，灌溉成本较高，而玉米由于生长季短，且与降雨同期，灌溉次数少，对劳动力的时间和精力投入要求较低，使玉米种植面积增加；另一方面，该地区天津-廊坊一带乡镇企业发达，许多农民由单一的从事传统农业生产转化为到本地乡镇企业工作并用闲余时间从事较为简捷的农业活动，使得农民工作收入高于农业生产收入，导致农民放弃种植冬小麦，选择种植单季玉米，使该地区出现许多冬小麦“撂荒”区[23]。河北平原南部冬小麦和棉花的种植面积有所减少，但减少量不大。蔬菜总面积有少许增加，增加量为 5.9 万 hm^2，增加明显的区域主要分布在定州、清苑、饶阳等区县，主要是因为保定市是河北省乃至全国重要的蔬菜生产供应基地，“十二五”期间是保定市

蔬菜发展最快的阶段, 尤其是设施蔬菜高速增长已成为当地农民增收致富的支柱产业[24]。林果种植面积增加明显的区域主要分布在晋州、深州、饶阳、泊头和沧县等林果种植集中的周边地区, 主要原因是林果的经济效益日益增长, 且这些地区林果种植历史悠久, 慢慢呈现出规模化趋势, 种植技术较为成熟且易推广。豫北地区主要以种植粮食作物为主, 野外调查发现, 由于洪泛区荒地改造和荒地开垦, 除焦作以外的其他区域冬小麦种植面积呈明显增加趋势。鲁西北地区的水资源相对河北平原来说较为丰富, 鲁西北地区各县紧邻黄河, 有充足的水资源进行农田灌溉, 在乐陵—临邑—陵县一带冬小麦种植面积呈现增加趋势, 但是由于复杂的种植技术以及低廉的收购价格, 聊城和德州地区水稻和棉花的种植面积有所减少。

3.2　华北平原主要作物需水量的时空变化

与 2002 年相比, 2012 年华北平原作物需水量的时空变化呈现出与作物种植结构时空变化相对应的特征。2002 年, 华北平原主要作物全年总需水量为 743 亿 m^3, 2012 年下降到 696 亿 m^3, 下降 6.37%(表 3)。作物年需水强度由大到小依次是蔬菜(810~920 mm)>水稻(780~880 mm)>冬小麦-夏玉米(730~860 mm)>林果(630~740 mm)>棉花(680~770 mm)>春玉米(470~620 mm); 2002 年到 2012 年, 需水量减少的作物类型为冬小麦-夏玉米(–35.41 亿 m^3)、棉花(–24.31 亿 m^3)、水稻(–7.48 亿 m^3)和春玉米(–2.1 亿 m^3), 需水量增加的作物类型为林果(+11.24 亿 m^3)和蔬菜(+10.71 亿 m^3)。从作物需水量的空间变化特征来看, 华北平原需水量总体呈现下降趋势, 仅在部分河北平原大中城市(例如石家庄、保定、衡水)周边、部分豫北平原黄河沿岸地区、鲁西北乐陵—临邑—陵县一带以及部分滨海平原地区需水量呈增加趋势, 其中滨海平原地区需水增加量最大。河北平原北部作物需水量减少 33.4 亿 m^3, 河北平原南部作物需水量减少 12.23 亿 m^3, 鲁西北作物需水量减少 3.51 亿 m^3, 豫北作物需水量为增加趋势, 增加量为 1.81 亿 m^3(图 5)。

3.3　种植结构变化对作物需水量的影响

整体上, 河北平原北部作物需水量减少最大, 作物年需水量从 2002 年的 212 亿 m^3 减少至 2012 年的 178 亿 m^3。冬小麦-夏玉米的需水量减少 32.96 亿 m^3, 该地区冬小麦-夏玉米的年需水量减少对华北平原冬小麦-夏玉米需水减少总量的贡献最大达 64.44%, 对该地区主要作物需水减少总量贡献达 98.45%。冬小麦-夏玉米种植面积的大幅缩减是该地区作物需水量减少的主要原因。同时, 该地区果蔬需水量呈增加趋势, 分别占华北平原果蔬需水增加总量的 71.75%和 55.39%, 这主要与城市对于果蔬需求量的日益增长使得果蔬种植面积不断增长有关。河北平原南部作物需水总量略有下降, 林果以及冬小麦-夏玉米的年需水量变化趋势与河北平原北部地区一致, 该地区蔬菜需水量增加 81.00%, 蔬菜需水量的增加主要与河北保定、石家庄一带蔬菜种植基地的规模不断扩大、蔬菜种植面积不断增加有关。同时, 河北平原南部滨海一带作物需水量增加较大, 主要由于沧州市将一些低洼盐碱地经土地整治开发为耕地, 耕地面积的增加以及灌溉条件的改进[25-26]最终使得该地区作物需水量呈增加趋势。鲁西北地区作物需水量有少许下降, 其中棉田需水量减少最大。与 2002 年相比, 2012 年鲁西北地区棉田需水减少量占华北平原棉田需水减少总量的 73.54%, 主要因为虽然在鲁西北有非常悠久的棉花种植历史, 但较低的经济效益及对劳动力成本的高要求使得当地农民放弃种植棉花, 改种一年两熟的冬小麦-夏玉米。豫北地区作物需水量有少许增加, 主要由豫北整治后的黄泛区冬小麦种植面积增加导致, 但在该地区由于水稻种植方式复杂, 耗费人力成本较高但收益却较低, 所以该地区水稻种植面积大幅下降, 需水量减少 76%。

种植结构变化对华北平原作物需水量的影响主要体现在以下两个方面: 一是耕地面积保持不变, 仅作物种植类型调整, 作物需水强度变化引起的作物需水量的变化; 二是由耕地类型与非耕地类型相互转化, 作物的种植强度变化引起的作物需水量的变化。从 2002 年到 2012 年华北平原耕地面积保持不变的区域占华北平原主要作物种植面积的百分比由 79.7%增加到 84.9%, 在耕地面积保持不变的区域有 5.8%的水稻、冬小麦-夏玉米、棉花的种植区转变为蔬菜、林果和春玉米种植区, 水稻、冬小麦-夏玉米等高需水作物种植面积的减少使该区域作物需水量从 2002 年的 594.4 亿 m^3 减少到 2012 年的 591.9 亿 m^3; 其次, 由耕地类型转化为其他用地类型的面积共 199.7 万 hm^2, 需水量共减少 149.2 亿 m^3。由其他用地类型转换为耕地类型的面积共 139 万 hm^2, 需水量共增加 104.5 亿 m^3。因此, 在华北平原由作物种植结构调整引起的作物需水量减少了 2.5 亿 m^3, 由耕地类型与非耕地类型相互转换引起的作物需水量减少了 44.7 亿 m^3。

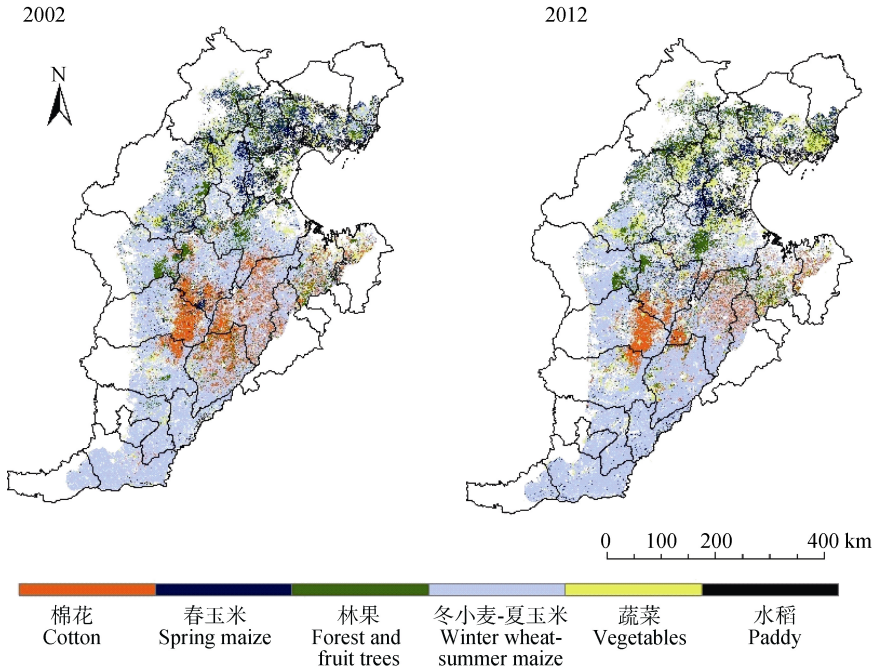


图 4 2002 年和 2012 年华北平原主要农作物空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of main crops in the North China Plain in 2002 and 2012

表 2 2002 年和 2012 年华北平原主要作物种植面积转移矩阵

Table 2 Transferring matrix of main crops planting areas in the North China Plain in 2002 and 2012 $\times 10^4$ hm^2

		2002							总计 Total	增加 Increase
		棉花 Cotton	春玉米 Spring maize	林果 Forest and fruit trees	冬小麦-夏玉米 Winter wheat-summer maize	蔬菜 Vegetables	水稻 Paddy	其他 Others		
2012	棉花 Cotton	37.40	2.09	3.90	23.41	1.41	1.02	12.77	82.01	44.62
	春玉米 Spring maize	2.99	26.24	9.41	32.37	4.82	4.68	17.54	98.05	71.81
	林果 Forest and fruit trees	7.77	15.73	30.60	29.94	7.16	1.15	18.95	111.31	80.71
	冬小麦-夏玉米 Winter wheat-summer maize	43.10	18.28	16.88	396.17	6.51	3.64	66.18	550.76	154.58
	蔬菜 Vegetables	2.49	8.72	6.51	15.92	9.87	2.31	15.28	61.11	51.23
	水稻 Paddy	0.54	2.60	1.75	2.06	0.63	5.90	8.17	21.65	15.75
	其他 Others	20.16	29.34	25.65	94.09	18.09	12.33	277.86	477.51	199.66
	总计 Total	114.44	103.00	94.70	593.97	48.49	31.03	416.76		
	减少 Reduce	77.04	76.76	64.10	197.79	38.62	25.13	138.91		

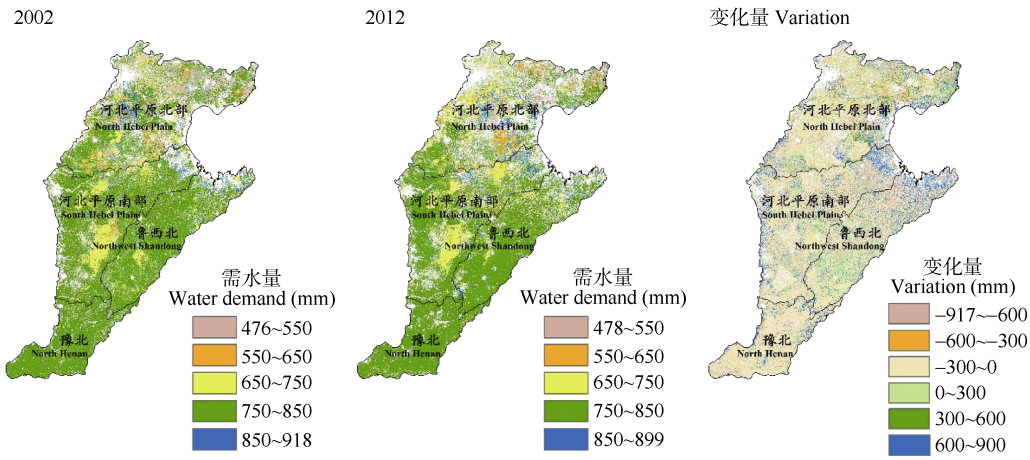


图 5 华北平原 2002 年和 2012 年主要作物需水量及其变化量的空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of evapotranspiration of main crops and its change in the North China Plain in 2002 and 2012

表 3　华北平原 2002 年和 2012 年主要作物需水量的变化

Table 3　Changes in crop water requirement of main crops in the North China Plain in 2002 and 2012

年份 Year	项目 Item	棉花 Cotton	春玉米 Spring maize	水稻 Paddy	林果 Forest and fruit trees	蔬菜 Vegetables	冬小麦-夏玉米 Winter wheat-summer maize	总和 Total
2002	需水量 Water demand ($\times10^8$ m^3)	85.83	56.88	25.30	64.16	41.40	469.89	743.46
	百分比 Proportion (%)	12	8	3	8	6	63	100
2012	需水量 Water demand ($\times10^8$ m^3)	61.52	54.78	17.82	75.40	52.11	434.48	696.10
	百分比 Proportion (%)	9	8	3	11	7	62	100

4　结论

种植结构变化对作物需水量影响的研究具有重要意义, 是调整农业土地利用方式, 实现区域节水的重要基础。本文结合华北平原主要作物的物候特征及 NDVI 时间序列曲线提取了不同作物的生育期特征, 并通过HANTS滤波和CART算法决策树分类方法实现了华北平原 2002 年和 2012 年主要作物种植面积的提取, 作物种植面积提取结果在县域水平上精度较高, 基于遥感数据提取的作物种植面积与基于统计数据的作物种植面积相关系数均在 0.76 以上(置信水平为 95%), 能反映华北平原 2002—2012 年种植结构的时空变化特征。同时, 结合作物系数法固定气象要素不变计算了华北平原仅在种植结构调整背景下的作物需水量及时空变化特征, 需水量计算结果与刘钰等[27]作物需水量计算结果中的冬小麦(400~500 mm)、夏玉米(230~400 mm)、春玉米(430~500 mm)、棉花(500~800 mm)、水稻(700~950 mm)的多年平均需水量及罗建美[5]计算的作物多年平均需水量中蔬菜(807 mm)、果树(702 mm)较为吻合。最后分析了华北平原种植结构变化对农业需水的影响。本研究主要结论如下:

1)2002—2012 年华北平原主要作物种植面积减少 4.3%。粮食作物(小麦、玉米和水稻)种植面积显著减少, 经济作物(林果和蔬菜)种植面积显著增加。

2)结合作物系数法, 计算了区域上华北平原的作物需水量。作物年需水强度由大到小依次是蔬菜(810~920 mm)>水稻(780~880 mm)>冬小麦-夏玉米(730~860 mm)>林果(630~740 mm)>棉花(680~770 mm)>春玉米(470~620 mm)。2002—2012 年华北平原绝大多数区域作物需水量呈减少趋势, 仅在部分河北平原大中城市周边、鲁西北、豫北的引黄灌溉区以及滨海平原的部分区域呈增加趋势, 其中滨海平原及豫北的引黄灌溉区作物需水量增加最为明显。

3)本文将区域作物种植结构与作物需水量相结合, 分析了华北平原地区在不同种植结构下的作物需水量变化情况。结果表明, 华北平原 2002—2012 年由种植结构变化引起的主要作物需水总量下降 6.37%, 其中作物种植强度变化对华北平原作物需水减少总量贡献率为 95%, 作物需水强度变化对华北平原作物需水减少总量贡献率为 5%。因此, 为了实现华北平原农业水资源的用水效率, 一方面需要控制作物的总种植面积, 另一方面需要缩减高需水作物的种植比例。

参考文献 References

[1] 王仕琴. 地下水模型MODFLOW与GIS的整合研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2006
WANG S Q. Study of the coupling of groundwater modeling software and GIS for North China Plain[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2006

[2] 莫兴国, 夏军, 胡实, 等. 气候变化对华北农业水资源影响的研究进展[J]. 自然杂志, 2016, 38(3): 189–192
MO X G, XIA J, HU S, et al. Influences of climate changes on agricultural water resources in North China Plain[J]. Chinese Journal of Nature, 2016, 38(3): 189–192

[3] ZHANG Y C, LEI H M, ZHAO W G, et al. Comparison of the water budget for the typical cropland and pear orchard ecosystems in the North China Plain[J]. Agricultural Water Management, 2018, 198: 53–64

[4] 刘昌明, 何希吾. 中国 21 世纪水问题方略[M]. 北京: 科学出版社, 1998
LIU C M, HE X W. China's 21st Century Water Issues Strategy[M]. Beijing: Science press, 1998

[5] 罗建美. 地下水超采区种植业耗水格局及其适水种植模式的水分效应评估[D]. 石家庄: 中国科学院遗传与发育生物学研究所农业资源研究中心, 2019
LUO J M. Evaluating the characteristics of water use and water conservation effects due to cropping system optimization in the groundwater depleted region[D]. Shijiazhuang: Center for Agricultural Resources Research, Institute of Genetics and Developmental Biology, Chinese Academy of Sciences, 2019

[6] 段爱旺, 孙景生, 刘钰. 北方地区主要农作物灌溉用水定额[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2004
DUAN A W, SUN J S, LIU Y. Irrigation Water Quota for Major Crops in the Northern Region[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2004

[7] 李春强, 李保国, 洪克勤. 河北省近 35 年农作物需水量变

化趋势分析[J]. 中国生态农业学报, 2009, 17(2): 359–363
LI C Q, LI B G, HONG K Q. Trend of crop water requirement in recent 35 years in Hebei Province[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2009, 17(2): 359–363

[8] 逯晋松, 杨雨豪, 张力, 等. 华北棉区棉花需水量时空变化研究[J]. 中国农业大学学报, 2018, 23(10): 29–40
TI J S, YANG Y H, ZHANG L, et al. Temporal and spatial variation of water requirement of cotton in cotton-growing area of North China Region[J]. Journal of China Agricultural University, 2018, 23(10): 29–40

[9] LUO X P, XIA J, YANG H. Modeling water requirements of major crops and their responses to climate change in the North China Plain[J]. Environmental Earth Sciences, 2015, 74(4): 3531–3541

[10] 白志杰, 任丹丹, 杨艳敏, 等. 雄安新区上游农业种植结构及需水时空演变[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2019, 27(7): 1067–1077
BAI Z J, REN D D, YANG Y M, et al. Trend of agricultural plantation and irrigation requirements in the upper reaches of Xiong'an New Area[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2019, 27(7): 1067–1077

[11] 冯慧敏, 张光辉, 王电龙, 等. 华北平原粮食作物需水量对气候变化的响应特征[J]. 中国水土保持科学, 2015, 13(3): 130–136
FENG H M, ZHANG G H, WANG D L, et al. Response characteristics of grain crop water requirement to climate change in North China Plain[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2015, 13(3): 130–136

[12] ABDUL KARIM S N A, AHMED S A, NISCHITHA V, et al. FAO 56 model and remote sensing for the estimation of crop-water requirement in main branch canal of the Bhadra Command area, Karnataka State[J]. Journal of the Indian Society of Remote Sensing, 2013, 41(4): 883–894

[13] KUMAR S. Reference evapotranspiration (ET0) and irrigation water requirement of differents crops in Bihar[J]. Journal of Agrometeorology, 2017, 19(3): 238–241

[14] 张光辉, 费宇红, 刘春华, 等. 华北平原灌溉用水强度与地下水承载力适应性状况[J]. 农业工程学报, 2013, 29(1): 1–10
ZHANG G H, FEI Y H, LIU C H, et al. Adaptation between irrigation intensity and groundwater carrying capacity in North China Plain[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(1): 1–10

[15] YUAN Z J, SHEN Y J. Estimation of agricultural water consumption from meteorological and yield data: A case study of Hebei, North China[J]. PLoS One, 2013, 8(3): e58685 DOI:10.1371/journal.pone.0058685

[16] 李薇, 谈明洪. 太行山区不同坡度 NDVI 变化趋势差异分析[J]. 中国生态农业学报, 2017, 25(4): 509–519
LI W, TAN M H. NDVI variation tendency under different slopes in Taihang Mountain[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2017, 25(4): 509–519

[17] 刘宁. 基于水足迹的京津冀水资源合理配置研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2016
LIU N. Research on water resources optimal allocation in Beijing-Tianjin-Hebei Region based on water footprint[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2016

[18] JAKUBAUSKAS M E, LEGATES D R, KASTENS J H. Crop identification using harmonic analysis of time-series AVHRR NDVI data[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2002, 37(1/2/3): 127–139

[19] 于信芳, 庄大方. 基于 MODIS NDVI 数据的东北森林物候期监测[J]. 资源科学, 2006, 28(4): 111–117
YU X F, ZHUANG D F. Monitoring forest phenophases of Northeast China based on MODIS NDVI data[J]. Resources Science, 2006, 28(4): 111–117

[20] 安塞. 京津冀地区土地利用/覆被与地表蒸散发动态变化及关系研究[D]. 石家庄: 河北科技大学, 2018
AN S. Research on dynamic change and relationship between land use/cover and evapotranspiration in Beijing-Tianjin-Hebei Region[D]. Shijiazhuang: Hebei University of Science and Technology, 2018

[21] 赵萍, 傅云飞, 郑刘根, 等. 基于分类回归树分析的遥感影像土地利用/覆被分类研究[J]. 遥感学报, 2005, 9(6): 708–716
ZHAO P, FU Y F, ZHENG L G, et al. Cart-based land use/cover classification of remote sensing images[J]. Journal of Remote Sensing, 2005, 9(6): 708–716

[22] ALLEN R G, PEREIRA L S, RAES D, et al. Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop requirements[Z]. Irrigation and Drainage Paper No. 56, FAO, Rome: Italy, 1998

[23] 吴喜芳, 沈彦俊, 张丛, 等. 基于植被遥感信息的作物蒸散量估算模型——以华北平原冬小麦为例[J]. 中国生态农业学报, 2014, 22(8): 920–927
WU X F, SHEN Y J, ZHANG C, et al. Modeling crop evapotranspiration using remotely sensed vegetation data: A case study of winter wheat in the North China Plain[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2014, 22(8): 920–927

[24] 张紫薇, 史新鹏, 田龙, 等. 保定市蔬菜产业发展情况的调查与思考[J]. 经济研究导刊, 2016(18): 37
ZHANG Z W, SHI X P, TIAN L, et al. Investigation and thoughts on the development of vegetable industry in Baoding City[J]. Economic Research Guide, 2016(18): 37

[25] 李淑丽. 沧州市旱作与节水农业技术[J]. 现代农村科技, 2012, (8): 68–70
LI S L. Dry farming and water-saving agricultural technology in Cangzhou City[J]. Modern Rural Science and Technology, 2012, (8): 68–70

[26] 付贵. 沧州市水资源现状与可持续开发利用对策浅析[J]. 水利科技与经济, 2011, 17(9): 27–29
FU G. Analysis on present situation of water resources and countermeasures for sustainable development and utilization in Cangzhou City[J]. Water Conservancy Science and Technology and Economy, 2011, 17(9): 27–29

[27] 刘钰, 汪林, 倪广恒, 等. 中国主要作物灌溉需水量空间分布特征[J]. 农业工程学报, 2009, 25(12): 6–12
LIU Y, WANG L, NI G H, et al. Spatial distribution characteristics of irrigation water requirement for main crops in China[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(12): 6–12