

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2018.0109

王庆明, 张越, 赵勇, 等. 河北省井灌区灌溉用水与耗能变化规律研究[J]. 南水北调与水利科技, 2018, 16(4): 154-159.
WANG Q M, ZHANG Y, ZHAO Y, et al. Study on the change of irrigation water utilization and energy consumption in well irrigation areas of Hebei Province[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2018, 16(4): 154-159. (in Chinese)

河北省井灌区灌溉用水与耗能变化规律研究

王庆明¹, 张越², 赵勇¹, 姜珊¹, 朱永楠¹, 王丽珍¹, 翟家齐¹

(1. 中国水利水电科学研究院 流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100038;
2. 水利部 水利水电规划设计总院, 北京 100120)

摘要: 开展农业灌溉节水、节能研究既是支撑区域农业可持续发展必然要求, 也是支撑国家节能减排承诺的具体实践。受农业节水、地下水位下降的影响, 河北省井灌区灌溉用水和灌溉耗能之间关系复杂, 分析了1980–2015年河北省井灌区灌溉用水、灌溉耗能、地下水位变化等规律, 得出以下结论: (1) 地下水埋深与提取单方水耗电量呈幂函数关系, 地下水埋深越大, 地下水位下降带来灌溉能耗的增加幅度越来越大; (2) 由于地下水位下降, 每度电可开采水量从1980年的8 m³减少到2015年的0.9 m³, 相比1980年2015年灌溉水量减少了13亿 m³, 但是灌溉能耗增加了131亿 kW·h。 (3) 1997年后由于灌溉水量减少而降低的能耗不足以弥补地下水位下降增加的能耗, 由此导致1998–2015年每公顷灌溉能耗额外损失为20 850 kW·h。本研究对指导河北省农业灌溉水–能关系协调发展提供有益的参考。

关键词: 井灌区; 灌溉节水; 灌溉能耗; 地下水位; 双累积曲线

中图分类号: P641 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1683(2018)04-0154-06

Study on the change of irrigation water utilization and energy consumption in well irrigation areas of Hebei Province

WANG Qingming¹, ZHANG Yue², ZHAO Yong¹, JIAN Shan¹, ZHU Yongnan¹, WANG Lizhen¹, ZHAI Jiaqi¹

(1. State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China; 2. General Institute of Water Resources and Hydropower Planning and Design, Ministry of Water Resources, Beijing 100120, China)

Abstract: To carry out the research of water saving and energy saving for agricultural irrigation is a necessary requirement of supporting the sustainable development of regional agriculture and a concrete practice to support China's promise on energy conservation and emission reduction. In the well irrigation areas of Hebei Province, the relationship between irrigation water and irrigation energy consumption is complex due to the impact of agricultural water saving and the drop of groundwater level. This paper analyzes the changing patterns of the irrigation water, irrigation energy consumption, and groundwater level in the well irrigation areas of Hebei Province from 1980 to 2015, and then draws the following conclusions: (1) The groundwater depth and the power consumption for extracting a cubic meter of water has a power function relation; as the groundwater depth increases, the increase amplitude of irrigation energy consumption caused by drop of groundwater level will gradually expand; (2) Due to the drop of groundwater level, the amount of water that can be extracted per kilowatt hour decreased from 8 m³ in 1980 to 0.9 m³ in 2015. Compared with the situation in 1980, the amount of irrigation water decreased by 1.3 billion m³, but irrigation energy consumption increased by 13.1 billion kW·h in 2015. (3) After 1997, the reduction in energy consumption as a result of ag-

收稿日期: 2018-03-29 修回日期: 2018-05-18 网络出版时间: 2018-06-14
网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20180613.1041.002.html>
基金项目: 国家重点研发计划(2016YFC0401407)

Fund: National Key Research & Development Program of China (2016YFC0401407)

作者简介: 王庆明(1987-), 男, 河北人, 工程师, 博士, 主要从事水文水资源方面研究。E-mail: wangqm@iwahr.com

通讯作者: 赵勇(1977-), 男, 安徽人, 教授级高级工程师, 博士, 主要从事水文水资源方面研究。E-mail: zhaoyong@iwahr.com

gricultural water saving was not enough to make up for the increased energy consumption caused by the drop of groundwater level, resulting in an additional loss of 20 850 kW · h of irrigation energy consumption per hm² per year. This study provides a useful reference for guiding the development of agricultural irrigation water in Hebei province.

Key words: well irrigation area; irrigation water saving; energy consumption of irrigation; groundwater level; double mass curve

井灌是我国北方地区主要的灌溉方式之一^[1],以河北省为例,平原井灌区分布 87 万眼农用机井,控制面积占到灌溉总面积的 84%^[2],大量的农用机井在抽水灌溉的同时,也形成一个吞噬能源的黑洞。据统计,2015 年河北省农业机井灌溉耗电量为 150 亿 kW · h,约等于 600 万家庭一年的用电量,而随着地下水位的下降,地下水灌溉的能耗将进一步增加。因此,在全国节能减排的背景下,有必要农业灌溉能耗进行系统分析,在此基础上才能提出合理灌溉节水、节能措施。目前,农业灌溉耗能的问题还没有得到广泛的重视,相关文献较少,王金平等^[3]认为在不同灌溉定额、不同地下水位下,耗能关系并不确定,当地下水埋深大于 40 m,且喷灌定额小于地面灌溉定额 50% 时,喷灌比漫灌节能。LI 等^[4]认为 1961–2009 年民勤绿洲农业种植过程中,由于地下水位下降导致灌溉能耗增加了 76%。朱永霞^[5]指出地下水灌溉用电量占到衡水市总用电量的 13.9%,其变动会对衡水市电力消费结构产生重要影响。总体来说,目前对农业灌溉能耗的研究还处于起步阶段,对灌溉能耗的影响因素缺乏系统的分析,例如农业节水对灌溉能耗的影响、地下水埋深与提水能耗的定量关系等,对研究农业耗能的指导意义及作用也缺乏深入的探讨。

河北平原是黄淮海大平原的重要组成部分,面积约 7.4 万 km²,占河北省面积的 40%,其中耕地面积约 4.6 万 km²。年平均降水量在 350~770 mm,多年平均降水量 514 mm,年际变化大,降水主要集中在 6 月–8 月^[6,7]。小麦–玉米复种是区域粮食生产的主要模式,该模式多年平均蒸腾蒸发量为 870 mm,每年亏缺约 350 mm 水量,需要靠开采地下水供给^[8]。长期的地下水超采导致河北省地下水位连续下降^[9],平原区农田地下水位由 2~15 m (1970 年)下降到 30~60 m (2010 年),地下水位下降导致地下水开采的耗电量越来越大,一方面节水措施使粮食生产的水分利用效率越来越高,另一方面粮食生产的能源利用效率却越来越低,水能关系发生了显著的变化。本文以河北省井灌区为例,分析 1980–2015 年灌溉用水和灌溉耗能的变化规律,研究农业节水、地下水位下降对农业灌溉用水、耗能

的影响,结果可为进一步揭示农业生产过程中的水–能–粮食纽带关系提供科学的支撑。

1 研究方法

1.1 数据来源

本文收集整理了 1980–2015 年河北省平原区降水、农业灌溉面积、农业灌溉水量、农业灌溉耗电量等数据,数据收集范围为井灌区较集中的地市,包括保定、石家庄、衡水、邢台和邯郸 5 个地市,其中降水数据来源于中国气象科学数据共享服务网(<http://data.cma.cn/>),农业灌溉面积和粮食产量来源于《河北经济年鉴》;农业灌溉水量来源于《河北省水资源公报》;1998–2015 年农业灌溉耗电量来源于电力部门提供的灌溉机井变压器电量统计数据,1980–1997 年农业灌溉耗电量数据通过农村总用电量数据乘以灌溉耗电量折算系数得出,折算系数来源于相关文献^[10]。

1.2 数据分析方法

(1) Pettitt 突变检验。

Pettitt 法是检验时间序列突变点的常用方法,可以避免异常值的干扰以及数据分布特征的影响^[11,12],其计算方法如下。

对于具有 N 个样本的时间序列,构造统计量

$$U_{i,N} = U_{i-1,N} + \sum_{j=1}^N \text{sgn}(x_i - x_j) \quad (1)$$

式中: j 和 $t = 2, \dots, N$ 。令 $x_i - x_j = \theta$, 则 $\text{sgn}\theta$ 值由下式确定。

$$\text{sgn}\theta = \begin{cases} +1, & \theta > 0 \\ 0, & \theta = 0 \\ -1, & \theta < 0 \end{cases} \quad (2)$$

可知, $U_{i,N}$ 为序列第 i 个数值大于或小于第 j 个数值的累积数。

原假设认为时间序列的突变不显著,而备择假设认为时间序列的变化趋势显著,其统计量

$$K_N = \text{Max}_i |U_{i,N}| \quad (3)$$

统计量的显著性检验

$$p \approx 2\exp(-6(K_N)^2/(N^3 + N^2)) \quad (4)$$

(2) 双累积曲线法。

在相同时段内只要给定的数据成正比,那么一

个变量的累积值与另一个变量的累积值在直角坐标上可以表示为一条直线,其斜率为两要素对应点的比例常数,如果双累积曲线斜率发生突变则意味着两个变量之间的比例常数发生了改变,斜率发生突变点所对应的年份就是两个变量累积关系出现突变的时间^[13-15]。穆兴民^[16]认为对随机变化数据进行累加处理,可以起到对随机过程滤波的效果,消弱白噪声,显现被分析要素的趋势性。

2 结果与分析

2.1 井灌区面积与灌溉水量变化

20 世纪 80 年代以来,河北省井灌区灌溉面积平均以每年约 4 万 hm^2 速度增长,尤其是在 2000 年以前,灌溉面积增长迅速,2000 年之后灌溉面积趋于平稳,基本维持在 445 万 hm^2 左右。与此同时,河北省农业灌溉水量并没有增加,反而以每年 7 700 万 m^3 的速度递减,灌溉水量从最高峰的 180 亿 m^3 减少到当前的 135 亿 m^3 左右。从图 2 可知,1980-2015 年河北省平原区降水并没有发生趋势性变化,可以认为农业灌溉水量的减少主要归因于农业节水措施的效果,而河北省开始关注农业节水也是在 20 世纪 80 年代后期^[17-18],从图 1 中也可以看出 1987-1990 年河北省农业灌溉水量达到顶峰,随后开始逐步下降,与河北省开展节水的时期相吻合,间接证明了农业节水是灌溉水量减少的主要原因。从每公顷灌溉水量上看,平均以年 60 m^3 的速率下降,但 2005 年以前下降趋势明显,之后每公顷灌溉水量维

持在 3 000 m^3 左右,说明前一个阶段农业措施从无到有发挥作用明显,后一阶段节水措施趋于成熟,现有技术水平下单位面积节水潜力已经很小。

2.2 灌溉耗电量与地下水位变化

灌溉用电量来源于井灌区所在地市电力部门掌握的农田变压器计量数据。如图 3 所示,灌溉用电量由 1980 年的 19 亿 $\text{kW} \cdot \text{h}$ 增长到 2015 年的 150 亿 $\text{kW} \cdot \text{h}$,平均年增加 3.7 亿 $\text{kW} \cdot \text{h}$ 。灌溉水量在减少,而灌溉电力能耗增加,说明井灌提水的能耗在增加,平均每度电的可提取水量见图 4,1980 年每度电可提取 8 m^3 水,2015 年每度电仅能提取 0.9 m^3 灌溉水,假设水泵的效率不变,每度电的提水量以每年 0.24 $\text{m}^3/\text{kW} \cdot \text{h}$ 的速率递减。地下水位下降是灌溉水能耗增加的主要原因,河北省平原区浅层地下水平均埋深从 1986 年的 9.2 m 增加到 2015 年的 17.48 m,平均每年下降 0.24 m。

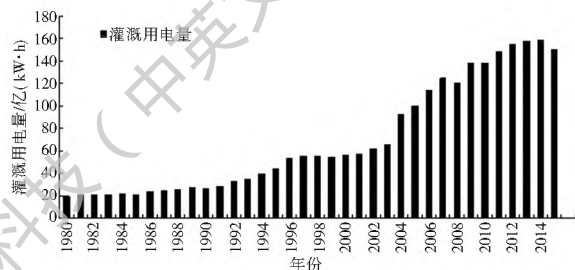


图 3 1980-2015 年河北省井灌区灌溉用电量变化
Fig. 3 The change of irrigation energy consumption in Hebei well irrigation areas from 1980 to 2015

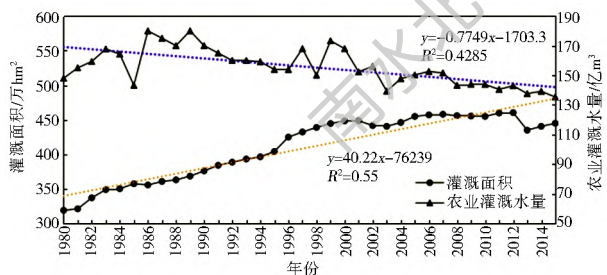


图 1 1980-2015 年河北井灌区灌溉面积和灌溉水量变化
Fig. 1 The change of irrigation area and irrigation water amount in Hebei well irrigation areas from 1980 to 2015

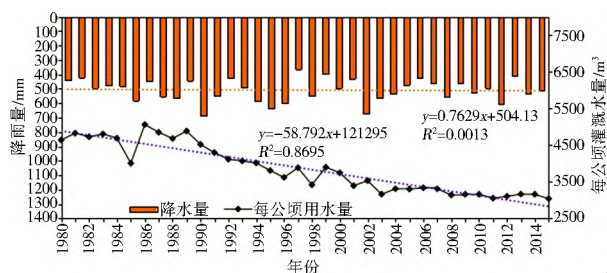


图 2 1980-2015 年河北省井灌区降水量及每公顷灌溉水量变化
Fig. 2 The change of precipitation and irrigation water per mu in Hebei well irrigation areas from 1980 to 2015

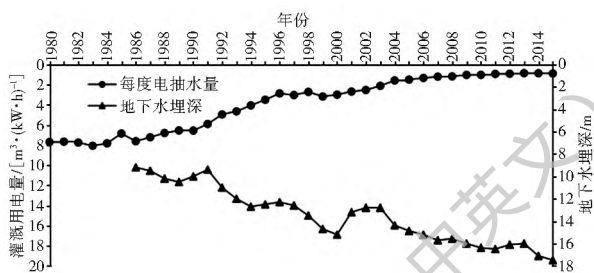


图 4 1980-2015 年每度电抽水量及地下水埋深变化规律
Fig. 4 The change of energy consumption per cubic meter water and groundwater depth in Hebei well irrigation areas from 1980 to 2015

将提取单方水耗电量与地下水埋深进行拟合,见图 5,发现其符合幂函数规律,拟合公式为:

$$y = 0.0092e^{0.2818x} \quad R^2 = 0.9028 \quad (5)$$

式中: y 为提取单方水的耗电量($\text{kW} \cdot \text{h}$); x 为地下水埋深(m)。

幂函数规律意味着地下水埋深越大,灌溉耗电量对地下水位下降的响应越强烈,在地下水埋深较大的情况下,地下水位下降带来灌溉能耗的增加幅度越来越大。需要说明的是,该拟合曲线代表的河北省浅层地下水平均埋深情况,不能应用于局部一

个区域,在不同的区域需要通过试验拟合出不同的适用曲线,中国水科院在河北省地下水压采综合治理效果评估项目中,曾对衡水、沧州、邢台、邯郸四个地市开展抽水试验,发现拟合出的曲线均符合幂函数关系,以衡水市为例,衡水浅层地下水位在30~60 m,提取1 m³地下水耗电量约在0.3~0.8 kW·h之间,拟合结果如下式,

$$y = 0.1831e^{0.0243x} \quad R^2 = 0.8 \quad (6)$$

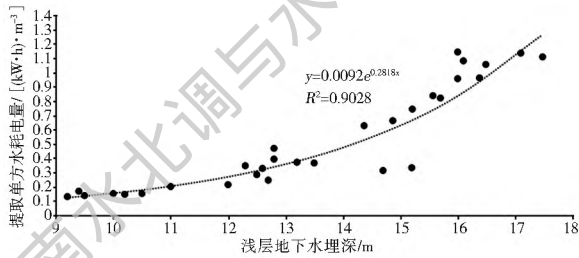


图5 提取单方水耗电量与地下水埋深拟合曲线

Fig. 5 The fitting curve of energy consumption per cubic meter water and groundwater depth

2.3 灌溉节水与灌溉耗能纽带关系

2.3.1 粮食生产中用水效率和耗能效率

1980年至2015年,河北省井灌区粮食产量从1500万t增长到3100万t,年均粮食产量增长了一倍,但是从用水和耗能上看却是相反的规律,从水分利用效率上看,1980年生产1 kg粮食需要灌溉水量0.8 m³,2015年需要灌溉水量0.4 m³,这里灌溉水量仅指灌区提水量并非作为实际耗水量;从灌溉能耗利用效率上看,1980年生产1 kg粮食需要耗电量为0.12 kW·h,而2015年需要的耗电量增加到0.52 kW·h,从能耗的角度上看,利用效率实际上一直在降低。在以往的农业节水研究中,只强调水资源的稀缺性,忽略了维持粮食高产是以增加能耗为代价的问题。

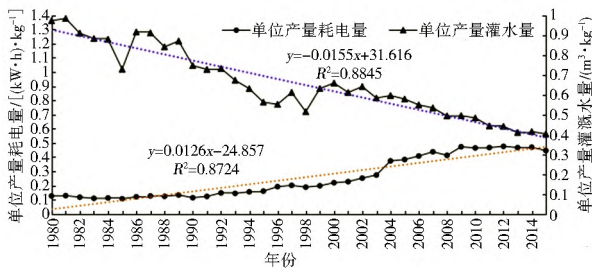


图6 1980-2015单位产量灌溉水量与耗电量变化规律

Fig. 6 The change of irrigation water amount and energy consumption per unit of production in Hebei well irrigation areas from 1980 to 2015

2.3.2 地下水位下降对灌溉耗能的影响

灌溉节水与灌溉耗能的关系在不同尺度呈现不同的特征,在微观尺度,节水必然带来节能,少开采1 m³水就减少了开采1 m³水的能耗;但在整个区

域尺度上,受到地下水位变动的影 响,宏观上表现出灌溉水量减少而灌溉能耗增加。为厘清两者关系,我们采用双累积曲线法,解析地下水位下降带来的增耗影响。

绘制每公顷灌水量和每公顷耗电量的双累积曲线,经Pettitt法突变检验,发现1997年为突变点,突变前后的意义在于,1997年以前,尽管地下水位下降,抽取单方水耗电量增加,但同期每公顷灌溉水量减少,两者抵消作用致使灌溉的耗电量并没有显著性增加,但是1997年以后,每公顷灌溉水量减少节省的灌溉耗电量显著性小于地下水下降增加的灌溉耗水量,简单的说就是1997年后农业节水带来的节能效益已不足以抵消地下水下降带来的能耗损失,灌溉的能耗效率明显降低。图7所示,1998-2015年间,实线与虚线之间的面积代表1998年以后因地下水位下降带来的额外累积每公顷能耗损失,将累积值还原为实际值后可知,过去的18年间井灌区因地下水位下降带来的每公顷灌溉能耗损失约为20850 kW·h,平均每年每公顷灌溉能耗损失为105 kW·h;整个河北省井灌区每年因地下水位下降带来的灌溉能耗损失约为4.8亿kW·h,1998-2015年累积损失了87亿kW·h电能。值得注意的是,当前技术水平下,农业的节水潜力已经不大,从图2中也可看出,近些年每公顷农业灌溉水量处于平稳状态几乎没有下降趋势,但地下水位下降的趋势并没有有效的遏制,而从图5中可知,地下水位与提取单方水的耗电量呈指数关系,意味着若地下水位继续下降,井灌的能耗增幅会越来越大,终将难以持续。

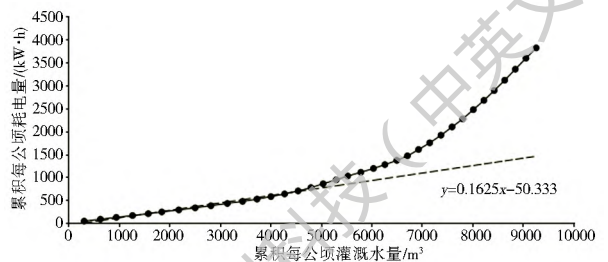


图7 每公顷灌水量和耗电量的双累积曲线

Fig. 7 The double mass curve of irrigation water consumption per mu and energy consumption per mu

3 讨论:灌溉能耗效率的提出及应用展望

在传统农田节水研究中,通常用农田灌溉水有效利用系数^[19-20] (Effective Coefficient Of Irrigative Water Utilization) 和水分利用效率^[21-22] (WUE, Water Use Efficiency) 作为衡量节水效果

的主要指标^[23],其中前者代表输水过程中的效率,后者代表水分被作物利用的效率。这两个指标能够很好的代表农田水利工程建设和灌溉制度优化后节水能力的提高。但是,这两个指标并没有反映出农田节水对区域水资源的影响,目前河北省农田灌溉水有效利用系数为0.695,水分利用效率小麦为 1.52 kg/m^3 ,玉米 1.87 kg/m^3 ^[24],在全国已属先进水平,然而河北省农业用水紧缺日益严重的现象依然是不争的事实,其中一个重要的原因就是没有从区域水资源的角度去指导农业节水^[25],也没有指标反映节水对区域水资源的影响。并非相关专家没有注意到这个问题,只是受限于水资源的监测能力不足,无法开展相关工作,但是井灌区有一个先天优势,就是灌溉必然提水,提水必然耗电,而耗电的多少又与地下水位高度相关,灌溉耗电量数据在电力部门有详细的统计^[26]。基于灌溉耗能与地下水位的关系,可以尝试利用灌溉能耗效率 *IEUE* (*Irrigation Energy Use Efficiency*) 指标来反映地下水的变化情况,灌溉能耗效率可定义为,该井灌区内消耗 $1 \text{ kW} \cdot \text{h}$ 电能可提取的水量,见式7,灌溉能耗效率越大,说明区域地下水埋深越浅,灌溉能耗效率越小,说明地下水埋深越深。以往的农业节水更关注农田灌溉水有效利用系数和水分利用效率的提高,而对地下水位的变化考虑较少,即便是用水效率提高到较高的水平,可能依旧需要超采地下水灌溉,从区域的角度看并不能说明农业节水是完全成功的。因此,若从农田灌溉水有效利用系数、水分利用效率和灌溉能耗效率三个维度共同评价农业节水的效果,可能会得到更为准确结果。

$$IEUE = \frac{Q_t}{E_t} \quad (7)$$

式中: E_t 和 Q_t 分别为 t 时段内水泵消耗的电能和提取的水量。与上一年度比较 *IEUE* 减小代表地下水位下降,区域地下水资源量减少, *IEUE* 增加则相反。只有当 *IEUE* 逐年增加,才能说明节水工作真正的改善了井灌区水资源紧张情势。

目前,河北省的农业灌溉水量仍在不断被压缩,但主要手段已经从提高用水效率转向压缩种植面积、作物轮耕休作、发展雨养农业等方式,这些措施的节水效果需要量化评价,可以尝试用 *IEUE* 指标去初步评价, *IEUE* 增大说明这些措施手段对恢复区域地下水起到显著作用,增大的幅度越大,说明作用越明显。相对于有限的地下水位监测井来说,这种方法涉及区域更广泛,数据更丰富,与地下水位监测数据互相补充,相信可以得到更准确的结果。

4 结论

国内北方井灌区地下水位下降是一个普遍而严峻的问题,本文分析了河北省井灌区1980–2015年灌溉水量、灌溉能耗及地下水位变化规律,解析了地下水埋深与灌溉能耗的幂函数关系,埋深越大,地下水下降导致灌溉能耗增加的幅度越大,过去将两者概化为线性关系实际上低估了地下水持续下降带来的影响。传统的农业节水以追求灌溉水有效利用系数和水分利用效率的提高为目标,但从灌溉能耗的角度看,可以得出相反的结果,因此本文提出了灌溉能耗效率 (*IEUE*) 指标,初步探讨用三个指标对取水、输水、用水全过程的节水评价,但是其适用范围仅限于纯井灌区,未来需要进一步探讨地表水渠灌区或井渠双灌区的用水、耗能关系,更加科学的指导节水工作。

参考文献(References):

- [1] 王电龙,张光辉,冯慧敏,等.华北平原典型井灌区地下水保障能力空间差异[J].南水北调与水利科技,2015(4):622-625. (WANG D L, ZHANG G H, FENG H M, et al. Spatial variation of groundwater guarantee extent in typical well irrigation area of North China Plain[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology. 2015(4): 622-625. (in Chinese) DOI: 10.13476/j.cnki.nsbtdqk.2015.04.004.
- [2] 李国正,胡韶磊,张凤泉,等.井灌区节水改造项目规划实施方案可行性分析[J].南水北调与水利科技,2010,8(2):120-123. (LI G Z, HU S L, ZHANG F Q, et al. Feasibility analysis on the implementation scheme of water saving rehabilitation program in well irrigation region [J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology. 2010, 8(2): 120-123. (in Chinese))
- [3] 王金平,王玉真.井灌区不同灌溉方式的耗能分析[J].中国农村水利水电,2001(S1):10-11. (WANG J P, WANG Y Z. The energy consumption analysis of different irrigation methods in the well irrigated area[J]. China Rural Water and Hydropower. 2001(S1): 10-11. (in Chinese))
- [4] CHENG L I, WANG Y, QIU C Y. Water and energy consumption by agriculture in the Minqin Oasis Region[J]. Journal of Integrative Agriculture. 2013, 12(8): 1330-1340.
- [5] 朱永霞,赵勇,王建华.衡水市地下水超采区农业灌溉耗能分析[J].水电能源科学,2016(8):165-168. (ZHU Y X, ZHAO Y, WANG J H, et al. Energy consumption analysis of agricultural irrigation in the area of groundwater over exploitation[J]. Water Resources and Power 2016(8): 165-168. (in Chinese))
- [6] 章数语,王建华,翟家齐,等.海河北系1956年2012年降水时序演变特征[J].南水北调与水利科技,2016(3):36-42. (ZHANG S Y, WANG J H, ZHAI J Q, et al., Characteristics analysis of time serial of rainfall in the northern part of Haihe River Basin from 1956 to 2012 [J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology. 2016(3): 36-42

- (in Chinese) DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdkq.2016.03.007.
- [7] 许月卿,李双成,蔡运龙.基于小波分析的河北平原降水变化规律研究[J].中国科学,2004,34(12):1176-1183.(XU Y Q, LI S C, CAI Y L. Study on precipitation change of HEBEI plain based on wavelet analysis[J]. Science in China. 2004, 34(12): 1176-1183. (in Chinese))
- [8] 沈彦俊,刘昌明.华北平原典型井灌区农田水循环过程研究回顾[J].中国生态农业学报,2011(5):1004-1010.(SHEN Y J, LIU C M. Agror ecosystems water cycles of the typical irrigated farmland in the North China Plain. Chinese[J]. Journal of Eco Agriculture 2011(5): 1004-1010. (in Chinese))
- [9] 袁再健,谢庐乐,张秉文,等.河北平原农田净灌溉耗水研究[J].南水北调与水利科技,2015,13(4):780-784.(YUAN Z J, XIE L L, ZHANG B W. Agricultural irrigation water net consumption in the Hebei Plain[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology 2015, 13(4): 780-784. (in Chinese) DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdkq.2015.04.038.
- [10] 王文青.全面小康社会目标下河北农村电力消费研究[D].华北电力大学(河北),2005.(WANG W Q. Under the goal of the comprehensive well off society, the rural electric power dissipation in hebei province[D]. North China Electric Power University. 2005. (in Chinese))
- [11] 刘佳,马振峰,范广洲,等.多种均一性检验方法比较研究[J].气象,2012(9):112F-1128.(LIU J, MA Z F, FAN G Z. Research on the comparison of different homogeneity test methods[J]. Meteorological Monthly. 2012(9): 112F-1128. (in Chinese))
- [12] 陈占寿,乔爱芳.几种水文序列变异点诊断方法的性能比较[J].青海师范大学学报(自然科学版),2014(3):1-5.(CHEN Z S, QIAO A F Comparison on the performance of several hydrological time series change point testing methods[J]. Journal of Qinghai Normal University, 2014(3): 1-5. (in Chinese) DOI: 10.16229/j.cnki.issn1001-7542.2014.03.004.
- [13] 胡彩虹,王艺璇,管新建,等.基于双累积曲线法的径流变化成因分析[J].水资源研究,2012,01(4):204-210.(HU C H, WANG Y X, GUAN X J, et al. The causes of runoff variation based on double cumulative curve analysis method[J]. Journal of Water Resources Research. 2012, 01(4): 204-210. (in Chinese) DOI: 10.12677/JWR.2012.14028.
- [14] 王秀兰,王海宁,刘佳,等.天然年径流系列一致性检验与修正方法[J].水科学与工程,2017(6):62-65.(WANG X L, WANG H N, LIU J, et al. The methods of consistency test and correction for natural annual runoff series[J]. Water Sciences and Engineering Technology. 2017(6): 62-65. 2017(6): 62-65. (in Chinese))
- [15] 张乾,包为民,杨小强,等.基于统计学与新安江模型相结合的土地利用变化引起的径流响应分析方法[J].水电能源科学,2015(7):12-15.(ZHANG Q, BAO W M, YANG X Q, et al. Land us change in response to runoff based on combination statistics with xinganjiang model[J]. Water Resources and Power. 2015(7): 12-15. (in Chinese))
- [16] 穆兴民,张秀勤,高鹏,等.双累积曲线方法理论及在水文气象领域应用中应注意的问题[J].水文,2010(4):47-51.(MU X M, ZHANG X Q, GAO P et al. The theory of double cumulative curve method and the problems that should be paid attention to in the application of hydrometeorology[J]. Journal of China Hydrology, 2010(4):47-51. (in Chinese))
- [17] 苑文昌,李会民.河北省节水灌溉技术介绍[J].灌溉排水,1989(1):33-37.(YUAN WC, LI H M. Introduction of water saving irrigation technology in HEBEI province[J]. Irrigation and drainage, 1989(1): 33-37. (in Chinese))
- [18] 张金杰.河北省农业灌溉用水状况及其节水对策[J].海水水利,1988(5):12-16.(ZHANG J J. The water situation of agricultural irrigation in HEBEI province and its water-saving countermeasures[J]. Haibe Water Resource. 1988(5): 12-16. (in Chinese))
- [19] 孙雪峰,杨志娟.计算区域农田灌溉水有效利用系数的新方法[J].水科学与工程,2012(s1):109-111.(SUN X F, YANG Z J. New method of calculating area farmland irrigation water effective utilization coefficient[J]. Water Sciences and Engineering Technology. 2012(s1): 109-111. (in Chinese))
- [20] 徐学飞,胡学祥.农田灌溉水有效利用系数测算和主要作物需水量试验方案设计与实施[J].水资源研究,2017(4):407-414.(XU X F, HU X X. Design an implementation of irrigation water effective utilization coefficient and major crop water requirement [J]. Journal of Water Resources Research. 2017(4):407-414. (in Chinese))
- [21] 张英华,张琪,徐学欣,等.适宜微喷灌溉水频率及氮肥量提高冬小麦产量和水分利用效率[J].农业工程学报,2016(5):88-95.(ZHANG Y H, ZHANG Q, XU X X. Optimal irrigation frequency and nitrogen application rate improving yield formation and water utilization in winter wheat under micro sprinkling condition [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering. 2016(5): 88-95. (in Chinese))
- [22] 张素瑜,王和洲,杨明达,等.水分与玉米秸秆还田对小麦根系生长和水分利用效率的影响[J].中国农业科学,2016,49(13):2484-2496.(ZHANG S Y, WANG H Z, YANG M D, et al. Influence of returning corn stalks to field under different soil moisture contents on root growth and water use efficiency of wheat[J]. Scientia Agricultura Sinica. 2016, 49(13): 2484-2496. (in Chinese))
- [23] 李静,连少伟,谢磊.河北省井灌区小型农田水利项目监测评价探讨[J].南水北调与水利科技,2012(a02):19F-192.(LI J, LIAN S W, XIE L. monitoring and evaluation of small scale irrigation and water conservancy projects for well irrigation areas in HEBEI province[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology 2012(a02): 19F-192. (in Chinese))
- [24] 刘晓敏,张喜英,王慧军.太行山前平原区小麦玉米农艺节水技术集成模式综合评价[J].中国生态农业学报,2011(2):42F-428.(LIU X M, ZHANG X Y, WANG H J. A comprehensive evaluation of wheat/maize agronomic water saving modes in the piedmont plain region of the Mount Taihang [J]. Chinese Journal of Eco Agriculture. 2011(2): 42F-428. (in Chinese))
- [25] 杨柳,陈喜,章树安,等.基于地表地下水文过程模拟的农业灌溉开水量估算[J].南水北调与水利科技,2016(1):54-58.(YANG L, CHEN X, ZHANG S A. Estimation of groundwater withdrawal for agricultural irrigation based on surface groundwater hydrological simulation [J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology 2016(1): 54-58 (in Chinese) DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdkq.2016.01.009.
- [26] 王剑永.“电折水”方法研究与应用[J].中国水利,2017(11):34-35.(WANG J Y. Research and application of the method of "electric-water"[J]. China Water Resources. 2017(11): 34-35. (in Chinese))