

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.11.033

地下水超采区农业种植结构与作物耗水时空演变研究

孟建¹ 姚旭擎² 杨晓琳² 罗建美³ 沈彦俊³

(1. 河北农业大学园艺学院, 保定 071001; 2. 中国农业大学农学院, 北京 100193;

3. 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)

摘要: 针对河北省受农业生产活动和降水量变化影响, 社会用水与水资源承载能力严重失衡的问题, 基于河北省水资源变化特征, 利用 Penman - Monteith 公式和作物系数法计算区域主要作物需水量, 分析种植结构变化对灌溉需水量的影响。结果表明: 进入 21 世纪以来, 河北省水资源总量、地表水资源量和地下水资源量比 1956—2017 年年均值分别减少 22.36%、42.15% 和 9.01%, 地下水开采量和农田灌溉量逐年下降, 但地下水超采量仍高达 $3.31 \times 10^9 \text{ m}^3$, 典型深层地下水漏斗区地下水埋深依然处于 60.34 ~ 70.46 m。同一作物年际间的需水量呈现弱降低趋势, 蔬菜、水稻、水果、棉花、薯类、冬小麦、油料、大豆、玉米和谷子的需水量依次降低, 分别为 750.56 ~ 893.09 mm、698.25 ~ 832.60 mm、653.93 ~ 773.28 mm、506.30 ~ 634.23 mm、481.42 ~ 594.37 mm、401.66 ~ 504.60 mm、406.26 ~ 510.68 mm、335.28 ~ 429.74 mm、309.72 ~ 399.54 mm、269.94 ~ 345.77 mm。冬小麦的水分亏缺指数最高, 为 0.72; 蔬菜、水稻和水果的水分亏缺指数依次降低, 分别为 0.47、0.46 和 0.36。冬小麦、蔬菜和水果年均灌溉需水总量分别占作物总灌溉需水量的 46.87%、12.94% 和 12.24%。与 1980—1989 年相比, 2010—2017 年蔬菜和水果种植面积分别增加了 186.01% 和 59.98%, 灌溉需水量相应增加了 143.75% 和 18.91%, 而其他作物灌溉需水量均有所降低, 蔬菜和水果种植面积增加成为农业灌溉需水量保持高位运行的主导因素。从实现主要农产品供需平衡、水资源平衡和国家粮食安全考虑, 大幅减少高耗水作物(蔬菜和水果)种植面积是未来降低作物灌溉总需水量的有效途径。在保证京津冀市场需求的基础上, 河北省蔬菜和水果的种植面积分别缩减至 1.72×10^5 、 $1.97 \times 10^5 \text{ hm}^2$, 年灌溉总需水量可减少 $3.31 \times 10^9 \text{ m}^3$ 。

关键词: 地下水超采区; 种植结构; 作物需水量; 水分亏缺指数

中图分类号: S274.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2020)11-0302-11

OSID:



Spatial and Temporal Evolution of Agricultural Planting Structure and Crop Water Consumption in Groundwater Overdraft Area

MENG Jian¹ YAO Xuqing² YANG Xiaolin² LUO Jianmei³ SHEN Yanjun³

(1. College of Horticulture, Hebei Agricultural University, Baoding 071001, China

2. College of Agronomy and Biotechnology, China Agricultural University, Beijing 100193, China

3. Center for Agricultural Resources Research, Institute of Genetics and Developmental Biology, Chinese Academy of Sciences, Shijiazhuang 050022, China)

Abstract: Due to the influence of agricultural production activities and precipitation changes in Hebei Province, the social water use and water resource carrying capacity in Hebei Plain was seriously unbalanced. Based on the regional water resource condition and Penman - Monteith formula, the water consumption and irrigation water demand of staple crops were estimated and the effect of planting structure change on the water irrigation amount in Hebei Province was evaluated. Results showed that the total water resources, surface water resources and groundwater resources in Hebei Province during 2001—2017 were decreased by 22.36%, 42.15% and 9.01% with respect to the averages of the past 62 years (i. e. 1956—2017), respectively. Although the groundwater extraction and farmland irrigation amount

收稿日期: 2020-06-06 修回日期: 2020-08-16

基金项目: 国家自然科学基金项目(31601267)、国家重点研发计划项目(2016YFD0300105)、河北省重点研发计划项目(20326411D-1)和河北省小麦产业体系项目(HBCT2018010404)

作者简介: 孟建(1980—),男,研究员,主要从事水资源高效利用研究,E-mail: jianmeng80@126.com

通信作者: 杨晓琳(1986—),女,副教授,博士,主要从事节水种植制度研究,E-mail: yangxiaolin429@cau.edu.cn

displayed a slight decline trend, the groundwater overdraft still reached up to 3.31 billion m^3 , together with the groundwater table reached 60.34 ~ 70.46 m in the typical groundwater funnel area. Compared with that shown in 1980, the planting area of the staple crops was increased by 21.68% in 2017. The water requirement in the crop growing season for all of the text crops showed a decline trend, with the order from high to low to be vegetable (750.56 ~ 893.09 mm), rice (698.25 ~ 832.60 mm), fruit (653.93 ~ 773.28 mm), cotton (506.30 ~ 634.23 mm), potato (481.42 ~ 594.37 mm), winter wheat (401.66 ~ 504.60 mm), oil crops (406.26 ~ 510.68 mm), soybean (335.28 ~ 429.74 mm), maize (309.72 ~ 399.54 mm) and millet (269.94 ~ 345.77 mm). The water deficit index of winter wheat was the highest among all crops (0.72), followed by vegetables (0.47), rice (0.46) and fruit (0.36). The annual irrigation water of winter wheat, vegetable and fruit accounted for 46.87%, 12.94% and 12.24% of the total crop irrigation amount. Compared with that of 1980—1989, the planting area of vegetable and fruit was increased by 186.01% and 59.98% from 2010 to 2017, respectively. Correspondingly, the water demand of vegetable and fruit was increased by 143.75% and 18.91% whereas the water demand of other crops was decreased by 3.34% ~ 91.57%. The increasing planting area of vegetable and fruit resulted in the elevated amount of agricultural irrigation water. It was suggested to reduce the planting proportion of high water consumption crops, such as vegetable and fruit meanwhile to sustain the field crop cropping index by decreasing the planting scale of winter wheat-summer maize rotation. Moreover, these practices were benefit to balance the staple food's supply and demand, sustainable water resource and help the national food security. Scenario analysis showed that the planting area of vegetable and fruit should be decreased to $1.72 \times 10^5 \text{ hm}^2$ and $1.97 \times 10^5 \text{ hm}^2$, which could meet the market demand of Beijing - Tianjin - Hebei Plain and reduce the irrigation demand amount of 3.31 billion m^3 in this ecological region.

Key words: groundwater overdraft area; planting structure; crop water requirement; water deficit index

0 引言

华北平原是我国水资源最贫乏、水供需矛盾最突出的地区^[1]。华北地区水资源安全问题事关首都水安全、京津冀协同发展战略实施和雄安新区建设,具有十分重要的意义。地处海河流域的河北省是水资源严重超采最为典型的区域。受人类农业生产活动等因素影响^[2],自 20 世纪 80 年代以来,河北省地表水资源量和地下水资源量均呈现衰减趋势,而社会总供水量一直保持较高水平,致使地下水位快速下降,形成了世界最大的连片地下水降落漏斗区^[3-4]。根据《河北省地下水超采综合治理规划》,以 2010 年为基准年,河北省地下水超采量为 $5.97 \times 10^9 \text{ m}^3$,其中农村超采 $4.17 \times 10^9 \text{ m}^3$,农业灌溉超采占农村超采的 80%,河北省超采区面积占全省平原面积的 92% 以上,超采面积和超采量均为全国超采总面积和超采总量的 1/3,已累计超采 $1.50 \times 10^{11} \text{ m}^3$ ^[5]。经济社会用水大大超过水资源承载能力,地下水大量超采,生态赤字严重,对保障国家水安全和区域可持续发展构成严重威胁。

2014—2016 年,国家在河北省开展地下水超采综合治理试点,实施了“节、引、蓄、调、管”等综合措施。截止 2017 年底,年压减地下水超采量达 $2.66 \times 10^9 \text{ m}^3$,地下水超采治理取得阶段性成效,深层地下水位埋深趋于稳定或下降速率减缓,但下降态势并

未根本扭转,年超采量仍高达 $3.31 \times 10^9 \text{ m}^3$ ^[6],河北平原灌溉用水强度仍处于“极严重不适应”或“严重不适应”状态^[7]。随着灌溉条件的改善,华北平原低需水作物大幅减少,蔬菜和水果等高需水作物大面积增加,种植结构发生了巨大变化,逐渐形成以冬小麦和蔬菜、水果为主的高强度灌溉农业生产模式。种植规模扩大、种植结构变化和作物产量提高导致的高灌溉强度生产模式是农田灌溉消耗地下水量居高不下的根本原因^[8],水资源严重不足已成为制约农业可持续发展的主要瓶颈^[9],通过农业节水来缓解水资源危机的战略已成为共识^[10]。2017 年河北省用占全国 0.5% 的水资源、4.8% 的耕地面积,生产了占全国 5.6% 的粮食、7.3% 的蔬菜、5.4% 的水果,地下水耗竭的资源型障碍与农产品相对过剩生产的矛盾极为突出,建立适水种植制度刻不容缓^[11-12]。因此,结合区域水资源状况和消费需求,明确该区域灌溉需水结构和不同作物灌溉需水量,制定区域节水型种植制度方案,对于实现区域水资源安全意义重大。

农业用水估算是节水农业灌溉管理的核心,作物需水量是衡量区域农田水分平衡的重要参数^[13]。目前,国内外学者对于作物需水量估算已经做了大量研究。利用 Penman - Monteith 公式和作物系数, KUMAR^[14] 计算出印度比哈尔邦小麦、玉米、水稻和绿豆的需水量和灌溉需水量,刘小刚等^[15] 计算出 1958—2013 年河南省冬小麦和夏玉米的需水量分别为 350 ~

535 mm 和 243 ~ 368 mm,尹海霞等^[16]计算出 1967—2009 年黑河流域中游地区春小麦和玉米的需水量平均每 10 年分别下降 6 mm 和 8 mm,聂堂哲等^[17]计算出 1960—2015 年黑龙江省水稻需水量为 244 ~ 740 mm,平均值为 490.52 mm。LUO 等^[18]利用 CROPWAT 模型模拟得出,1961—2010 年间黄淮海平原主要农作物生育期平均年区域总需水量为 $1.15 \times 10^{11} \text{ m}^3$ 。白志杰等^[19]利用作物模型和蒸发皿法估算了 1986—2015 年雄安新区上游小麦、玉米、蔬菜、水果等灌溉需水量变化,认为需水总量随农业播种总面积和蔬菜、水果需水的增加而增加。陶国通等^[20]基于温度的作物系数计算模型,建立了冬小麦作物需水量预测模型。

在作物需水量方面前人已经做了大量研究,但结合河北省水资源变化,研究长时间尺度种植结构变化对区域灌溉需水的影响较少。本研究基于该地区 1980—2017 年水资源和种植结构的演变,研究不同作物长时间序列的灌溉需水量变化以及水分亏缺指数,以期为建立立足水资源禀赋的农业种植结构提供参考。

1 材料与方 法

1.1 数据来源

气象数据来源于国家气象科学数据共享平台,主要为 1980—2017 年邢台市、石家庄市、秦皇岛市、保定市、霸州市、饶阳县、泊头市、黄骅市、唐山市、遵化市、乐亭县、安阳市、北京市、北京市朝阳区、北京市延庆区、北京市密云区、天津市、天津市宝坻区、天津市塘沽区、德州市陵城区、惠民县等河北平原及其周边 21 个气象站的气象数据,包括平均气温、最高气温、最低气温、风速、日照时数、相对湿度和降水量等日值数据,用于计算作物需水量。

各作物播种面积、产量数据来源于 1980—2017 年《河北农村统计年鉴》和 1980—2017 年国家统计局数据。水资源数据来源于 1980—2017 年《河北省水资源公报》、《河北省水资源评价》和《海河流域水资源评价》。

1.2 研究方法

1.2.1 需水量计算

参照作物蒸散量 (ET_0) 采用 FAO 推荐的估算作物需水量的经典方法 Penmen - Monteith (P - M) 公式进行测算^[21-22],计算式为

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad (1)$$

式中 R_n ——作物表面净辐射量, $\text{MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$

G ——土壤热通量密度, $\text{MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$

T ——2 m 高处日平均空气温度, $^{\circ}\text{C}$

u_2 ——2 m 高处日平均风速, m/s

e_s ——饱和水汽压, kPa

e_a ——实际水汽压, kPa

Δ ——饱和水汽压与温度关系曲线斜率, kPa/K

γ ——湿度计常数, kPa/K

不同作物需水量采用作物系数法进行计算,计算式为

$$ET_c = K_c ET_0 \quad (2)$$

式中 ET_c ——作物生育期需水量, mm

K_c ——作物系数,本研究中蔬菜的生育期作物系数参考 FAO - CROPWAT 中的作物系数,其他作物的生育期作物系数参考《北方地区主要农作物灌溉用水定额》^[13]

1.2.2 作物灌溉需水量和水分亏缺指数计算

作物生育期灌溉需水量计算式为

$$W_i = ET_c - P \quad (3)$$

式中 W_i ——作物生育期灌溉需水量, mm

P ——作物生育期内有效降水量, mm

当 $ET_c > P$ 时, $ET_c - P$ 为正值,当 $ET_c \leq P$ 时,取值为 0。

本文将 3 ~ 50 mm 的日降水量视为有效降水量;当日降水量小于 3 mm 时由于冠层截留对土壤影响小,不计作有效降水量;当日降水量大于 50 mm 时,取日降水量的 80% 作为有效降水量^[23]。

水分亏缺指数 (CWDI) 计算式为

$$CWDI = W_i / ET_c \quad (4)$$

1.2.3 农产品年盈余量估算

农产品年盈余量计算式为

$$Q = S_c - \frac{R_u P_u + R_r P_r}{1000(1 - L_p - G_d)} \quad (5)$$

式中 Q ——农产品年盈余量, t

S_c ——农产品年供给量, t

R_u ——城镇居民人均年均消费量, $\text{kg}/\text{人}$

R_r ——农村居民人均年均消费量, $\text{kg}/\text{人}$

P_u ——城镇常住人口数, 人

P_r ——农村常住人口数, 人

L_p ——产后损失率, %

G_d ——种子用量占产量的比例, %

2 结果与分析

2.1 水资源利用与作物种植结构变化

2.1.1 水资源变化

由图 1 可知,1956—2017 年河北省水资源总量

变化波动较大,2001 年以后,水资源总量相对处于较低水平,仅 2012 年和 2016 年水资源总量高于 1956—2017 年的平均值($1.87 \times 10^{10} \text{ m}^3$),其余年份均低于平均水平。地表水资源量和地下水资源量变化趋势与水资源总量变化趋势基本一致。与 1956—2017 年均值相比,1956—1979 年年均水资源总量、地表水资源量和地下水资源量分别偏多 23.01%、39.04% 和 11.82%,1980—2000 年年均水资源总量、地表水资源量和地下水资源量分别偏少 8.19%、10.50% 和 6.21%,2001—2017 年年均水资源总量、地表水资源量和地下水资源量分别偏少 22.36%、42.15% 和 9.01%。

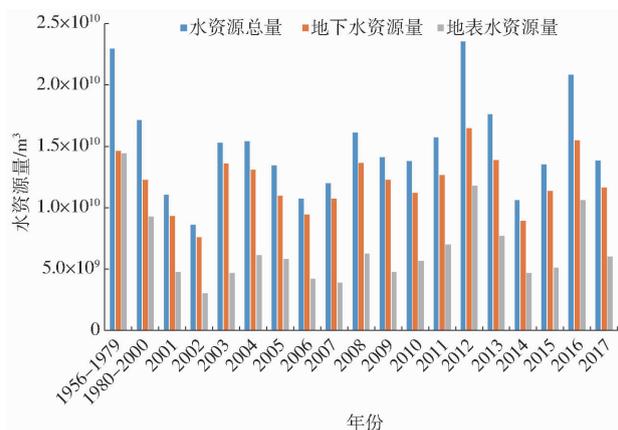


图 1 1956—2017 年河北省水资源量变化趋势

Fig. 1 Annual changing trend of water resources in Hebei Province during 1956—2017

2.1.2 用水量年际间变化

地下水供水量(地下水开采量)包含浅层地下水开采量与深层地下水开采量。由图 2 可知,20 世纪 80 年代地下水开采量较为平稳,90 年代地下水开采量大幅度增加,1999 年达到最高,为 $1.76 \times 10^{10} \text{ m}^3$,21 世纪以来地下水开采量持续下降,至 2017 年降低至 $1.15 \times 10^{10} \text{ m}^3$ 。地表水供水量呈现先降低后增加的趋势,1980 年地表水供水量最高,为 $8.27 \times 10^9 \text{ m}^3$,而后逐年下降,至 2003 年达到最低,为 $3.37 \times 10^9 \text{ m}^3$,从 2004 年开始地表水供水量逐年提高,至 2017 年达到 $5.95 \times 10^9 \text{ m}^3$ 。地表及地下水总供水量呈现稳中有降,2017 年为 $1.75 \times 10^{10} \text{ m}^3$,比 1980—2017 年系列均值减少 11.95%。

农田灌溉量呈现持续降低趋势,2017 年比 1980 年减少 38.16%。农田灌溉量占社会用水总量的比例由 1980 年的 84.39% 降低至 2017 年的 62.95%。灌溉需水总量与农田灌溉量变化趋势一致,总体呈降低趋势,降水偏少年份的灌溉不能满足作物生长水分需求,致使部分年份灌溉需水总量高于农田灌溉量,作物灌溉需水仍是社会用水的主体。灌溉需水总量变化及作物灌溉需水量构成见 2.2.2 节。

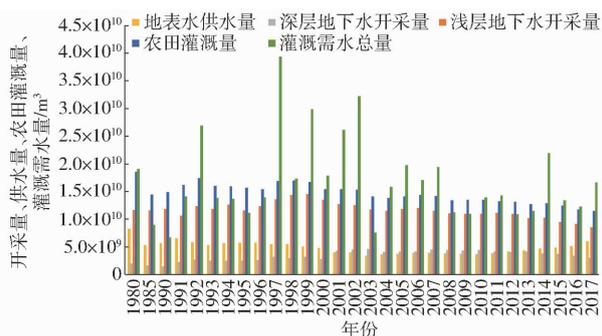


图 2 1980—2017 年河北省用水结构变化趋势

Fig. 2 Annual changing trend of water consumption structure in Hebei Province during 1980—2017

2.1.3 地下水埋深变化

连续多年超量开采地下水致使河北平原形成许多深、浅层地下水降落漏斗。深层地下水降落漏斗主要位于中东部平原,形成了以沧州复合漏斗、冀枣衡漏斗等为代表的深层地下水水位降落漏斗,漏斗封闭面积约 $2.39 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。虽然近年来农田灌溉量有所降低(最低的 2017 年为 $1.14 \times 10^{10} \text{ m}^3$),但仍高于地下水可开采量($1.10 \times 10^{10} \text{ m}^3$),致使水位持续下降。如图 3 所示,1980—2017 年,河北平原区平均浅层地下水埋深和典型深层地下水降落漏斗区地下水埋深均呈逐年下降趋势。其中,浅层地下水埋深由 1980 年的 5.85 m 下降至 2017 年的 17.47 m,平均每年下降 0.31 m;邢台中东部平原、衡水和沧州平原区深层地下水埋深分别由 1980 年的 11.20、17.17、19.06 m 下降至 2014 年的 62.16、65.94、70.52 m,地下水埋深年均下降 1.50、1.43、1.51 m。2015 年受实施地下水超采综合治理影响,邢台中东部平原和沧州漏斗中心水埋深逐步趋于稳定并有所回升,但衡水漏斗中心水埋深仍以年均 1.51 m 的速率下降。至 2017 年河北省深层地下水降落漏斗区地下水位仍处于 60.34 ~ 70.46 m。

2.1.4 种植结构与作物产量年际间变化

由图 4 可知,1980—2017 年期间,研究区主要种

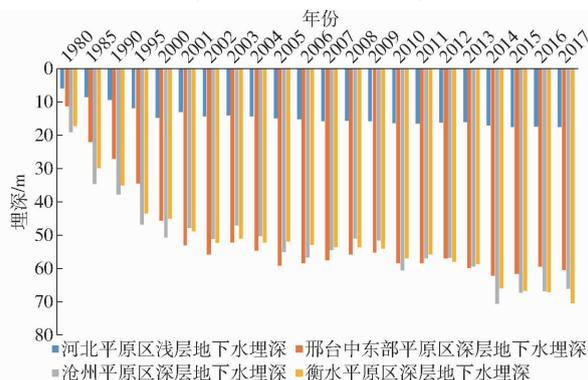


图 3 1980—2017 年河北省地下水埋深变化趋势

Fig. 3 Changing trend of groundwater level depth in Hebei Province during 1980—2017

植物有:冬小麦、玉米、蔬菜、水果、棉花、油料、薯类、大豆、谷子、水稻等。年均种植面积由大到小依次为玉米($2.57 \times 10^6 \text{ hm}^2$, 29.59%)、冬小麦($2.47 \times 10^6 \text{ hm}^2$, 28.40%)、水果($8.17 \times 10^5 \text{ hm}^2$, 9.41%)、棉花($5.83 \times 10^5 \text{ hm}^2$, 6.72%)、蔬菜($5.83 \times 10^5 \text{ hm}^2$, 6.71%)、油料($5.37 \times 10^5 \text{ hm}^2$, 6.18%)、谷子($3.63 \times 10^5 \text{ hm}^2$, 4.18%)、薯类($3.51 \times 10^5 \text{ hm}^2$, 4.04%)、大豆($3.00 \times 10^5 \text{ hm}^2$, 3.46%)、水稻($1.13 \times 10^5 \text{ hm}^2$, 1.31%)。

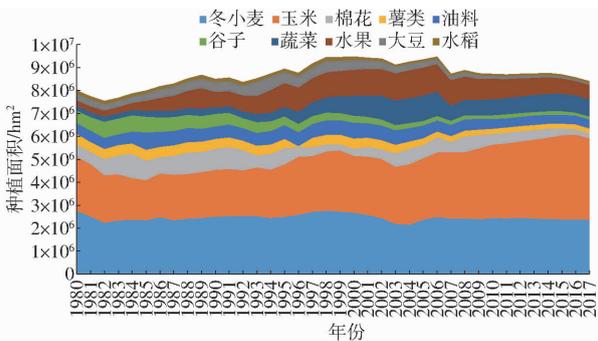


图4 1980—2017年河北省主要农作物种植面积

Fig.4 Planting area of main crops in Hebei Province during 1980—2017

1980—2017年间,玉米种植面积持续增加,蔬菜和水果的种植面积均呈现先增加后降低趋势。2016年玉米种植面积最大,为 $3.70 \times 10^6 \text{ hm}^2$,比1980年增加了57.89%;2005年蔬菜种植面积最大,为 $1.10 \times 10^6 \text{ hm}^2$,比种植面积最小的1980年增加了416.91%;2005年水果种植面积最大,为 $1.22 \times 10^6 \text{ hm}^2$,比种植面积最小的1980年增加了405.30%;2006—2017年蔬菜和水果种植面积呈现降低趋势,至2017年蔬菜和水果的种植面积降低至 7.49×10^5 、 $6.31 \times 10^5 \text{ hm}^2$,但仍远高于1980年水平。与1980年相比,2017年玉米、蔬菜和水果的种植面积分别增加了51.40%、250.25%和161.16%。

由图5可知,1980—2017年间,冬小麦、玉米和水果产量均呈增加趋势,由1980年的 3.84×10^6 、 6.63×10^6 、 $1.26 \times 10^6 \text{ t}$ 增加到2017年的 1.50×10^7 、 2.04×10^7 、 $1.37 \times 10^7 \text{ t}$,分别增长了291.70%、207.01%、983.43%;蔬菜产量呈先增加后降低趋势,先由1980年的 $5.32 \times 10^6 \text{ t}$ 增加到2005年的 $6.47 \times 10^7 \text{ t}$,而后又降低至2017年的 $5.06 \times 10^7 \text{ t}$,比1980年增长了851.56%。

2.2 主要农作物需水量与水分亏缺指数

2.2.1 主要农作物需水量

由图6可知,1980—2017年蔬菜、水稻、水果、棉花、薯类、冬小麦、油料、大豆、玉米和谷子的需水量分别为750.56~893.09 mm、698.25~832.60 mm、653.93~773.28 mm、506.30~634.23 mm、481.42~

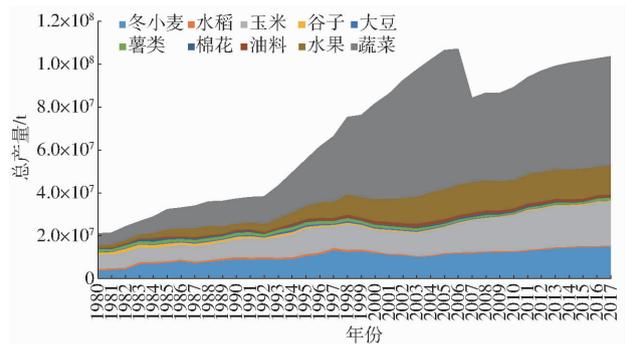


图5 1980—2017年河北省主要农作物产量

Fig.5 Yield of main crops in Hebei Province during 1980—2017

594.37 mm、401.66~504.60 mm、406.26~510.68 mm、335.28~429.74 mm、309.72~399.54 mm和269.94~345.77 mm。同一作物年际间的需水量呈现降低趋势,与1980—1989年相比,1990—1999年、2000—2009年和2010—2017年蔬菜需水量分别降低了2.11%、1.72%和2.68%,水稻需水量分别降低了2.74%、2.95%和3.20%,水果需水量分别降低了1.85%、2.05%和3.02%,棉花需水量分别降低了1.65%、3.20%和4.40%,薯类需水量分别降低了1.84%、3.30%和4.12%,冬小麦需水量分别降低了3.12%、0.28%和0.14%,油料需水量分别降低了2.12%、3.32%和3.80%,大豆需水量分别降低了1.59%、3.40%和4.70%,玉米需水量分别降低了1.56%、3.66%和4.87%,谷子需水量分别降低了1.63%、3.32%和4.57%。

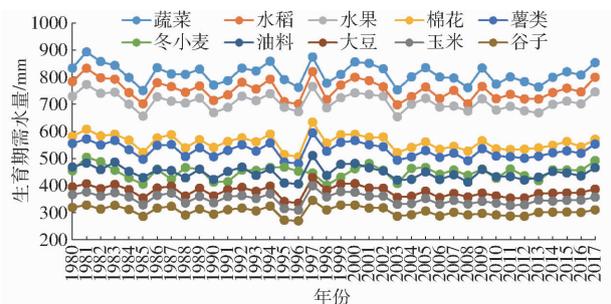


图6 1980—2017年河北省主要作物生育期需水量

Fig.6 Water requirement of main crops in Hebei Province during 1980—2017

2.2.2 主要农作物水分亏缺指数及灌溉需水量

由图7可知,冬小麦生育期内有效降水量为66.59~253.53 mm,年均仅为125.52 mm,需水与降水耦合度最差,水分亏缺指数最高,为0.72,年均灌溉需水量为324.42 mm;蔬菜生育期内有效降水量和灌溉需水量分别为225.61~593.13 mm和197.96~649.08 mm,水分亏缺指数仅次于冬小麦,为0.47;水稻、水果、棉花、薯类、油料、大豆、玉米和谷子的灌溉需水量分别为138.61~639.68 mm、50.57~513.64 mm、0~453.77 mm、0~413.91 mm、

0 ~ 348.75 mm、0 ~ 278.56 mm、0 ~ 248.36 mm 和 0 ~ 194.60 mm,水分亏缺指数分别为 0.46、0.36、0.28、0.24、0.21、0.18、0.14 和 0.09。

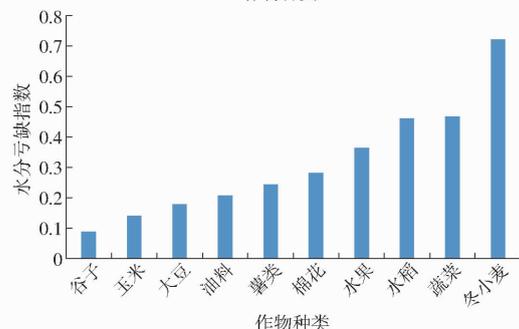
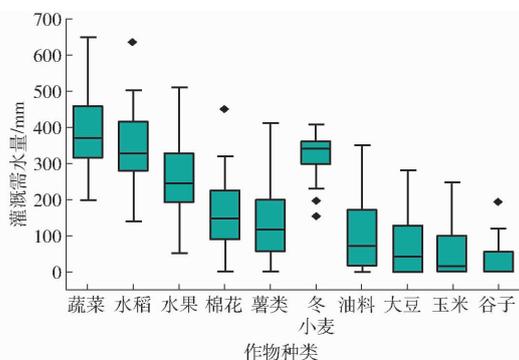


图 7 1980—2017 年河北省主要作物生育期灌溉需水量与年均水分亏缺指数

Fig. 7 Water requirement and water deficit index of main crops in Hebei Province during 1980—2017

由图 8 可知,各作物的年灌溉需水总量由大到小依次为冬小麦 ($4.88 \times 10^9 \sim 9.85 \times 10^9 \text{ m}^3$, 年均 $8.01 \times 10^9 \text{ m}^3$)、蔬菜 ($6.26 \times 10^8 \sim 5.66 \times 10^9 \text{ m}^3$, 年均 $2.21 \times 10^9 \text{ m}^3$)、水果 ($3.40 \times 10^8 \sim 5.16 \times 10^9 \text{ m}^3$, 年均 $2.09 \times 10^9 \text{ m}^3$)、玉米 ($0 \sim 6.03 \times 10^9 \text{ m}^3$, 年均 $1.21 \times 10^9 \text{ m}^3$)、谷子 ($0 \sim 6.75 \times 10^9 \text{ m}^3$, 年均 $1.06 \times 10^9 \text{ m}^3$)、棉花 ($0 \sim 2.54 \times 10^9 \text{ m}^3$, 年均 $8.84 \times 10^8 \text{ m}^3$)、油料 ($0 \sim 2.10 \times 10^9 \text{ m}^3$, 年均 $5.07 \times 10^8 \text{ m}^3$)、薯类 ($0 \sim 1.74 \times 10^9 \text{ m}^3$, 年均 $4.88 \times 10^8 \text{ m}^3$)、水稻 ($1.66 \times 10^8 \sim 9.94 \times 10^8 \text{ m}^3$, 年均 $4.04 \times 10^8 \text{ m}^3$)、大豆 ($0 \sim 1.28 \times 10^9 \text{ m}^3$, 年均 $2.23 \times 10^8 \text{ m}^3$)。主要作物年灌溉需水总量合计为 $6.71 \times 10^9 \sim 3.93 \times 10^{10} \text{ m}^3$, 年均灌溉需水总量为 $1.71 \times 10^{10} \text{ m}^3$ 。其中冬小麦、蔬菜和水果是灌溉需水总量最大的作物,分别占年总灌溉需水量的 28.12% ~ 82.34%、4.70% ~ 29.09% 和 3.94% ~ 18.32%, 年均占比分别为 46.87%、12.94% 和 12.24%。

从各作物灌溉需水总量占主要作物灌溉总需水量合计值的比例看,1980—2017 年间,种植面积仅次于玉米的冬小麦生育期内有效降水量最少,灌溉需水总量占比最高;水稻、棉花、薯类、油料、大豆、谷子灌溉需水总量占比均随种植面积降低而下降;玉

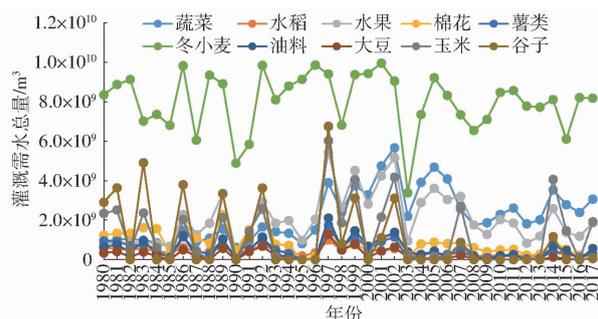


图 8 河北省主要作物年灌溉需水总量

Fig. 8 Annual irrigation water requirement of crops in Hebei Province during 1980—2017

米灌溉需水总量占比随年际间生育期内降水量大幅变化而变化;蔬菜和水果灌溉需水总量占比均随着种植面积变化而变化,蔬菜和水果灌溉需水总量占比分别由 1980 年(最低值)的 4.70% 和 3.94% 增加到最高的 29.09% (2003 年) 和 18.32% (2004 年), 而后分别下降至 2017 年的 18.45% 和 11.20%。1980—1989 年、1990—1999 年、2000—2009 年和 2010—2017 年年均冬小麦、蔬菜和水果三大作物的灌溉需水总量占比之和分别为 66.03%、74.06%、82.80% 和 86.40%, 其中蔬菜和水果占比之和分别为 14.39%、21.84%、36.07% 和 29.04%。与 1980—1989 年相比,2010—2017 年蔬菜种植面积和灌溉需水总量分别增加了 186.01% 和 143.75%, 水果种植面积和灌溉需水总量分别增加了 59.98% 和 18.91%, 其他作物灌溉需水总量均有所降低(水稻、棉花、薯类、冬小麦、油料、大豆、玉米和谷子灌溉需水总量降幅分别为 50.72%、68.40%、70.85%、3.34%、51.75%、88.94%、27.50% 和 91.57%), 蔬菜和水果种植面积增加成为农业灌溉需水总量保持高位运行的主导因子。

2.3 河北省深层地下水降落漏斗区种植结构变化

由表 1 可知,深层地下水降落漏斗区高灌溉需水作物冬小麦、蔬菜和水果种植面积及占全省种植总面积的比例均呈增加趋势。深层地下水降落漏斗区冬小麦和蔬菜的种植面积分别由 1982—1986 年年均 7.99×10^5 、 $4.67 \times 10^4 \text{ hm}^2$ 增加到 2012—2016 年年均 8.80×10^5 、 $2.14 \times 10^5 \text{ hm}^2$, 占全省冬小麦和蔬菜播种面积的比例分别由 32.86%、18.99% 增加到 36.43%、28.66%; 水果种植面积由 1992—1996 年年均 $2.67 \times 10^5 \text{ hm}^2$ 增加到 2012—2016 年年均 $2.91 \times 10^5 \text{ hm}^2$, 占全省水果种植面积的比例由 27.45% 提高到 40.92%。可见,深层地下水降落漏斗区高灌溉需水作物面积增加和所占全省高灌溉需水作物总面积的比例提高,加剧了水资源的紧缺形势。其中:沧州深层地下水降落漏斗区冬

小麦和蔬菜的种植面积分别由1982—1986年年均 3.47×10^5 、 1.48×10^4 hm^2 增加到2012—2016年年均 3.87×10^5 、 9.01×10^4 hm^2 ,占全省冬小麦和蔬菜播种面积的比例分别由14.25%、5.99%增加到16.02%、12.05%,水果种植面积由1992—1996年年均 1.47×10^5 hm^2 增加到2012—2016年年均 1.65×10^5 hm^2 ,占全省水果种植面积的比例由15.12%提高到23.15%。衡水地下水降落漏斗区冬小麦和蔬菜的种植面积分别由1982—1986年年均 2.42×10^5 、 1.58×10^4 hm^2 增加到2012—2016年年均 2.76×10^5 、 8.36×10^4 hm^2 ,占全省冬小麦和蔬菜播种面积的比例分别由9.96%、

6.38%增加到11.42%、11.18%,1992—2006年间水果种植阶段面积基本稳定在 $7.14 \times 10^4 \sim 7.97 \times 10^4$ hm^2 ,占全省水果种植面积的比例由8.17%提高到10.28%。邢台中东部平原深层地下水降落漏斗区冬小麦和蔬菜的种植面积分别由1982—1986年年均的 2.10×10^5 、 1.62×10^4 hm^2 增加到2012—2016年年均 2.17×10^5 、 4.06×10^4 hm^2 ,占全省冬小麦和蔬菜播种面积的比例分别由8.65%、6.54%调整为8.99%、5.43%,水果种植面积由1992—1996年年均 4.56×10^4 hm^2 增加到2012—2016年年均 5.21×10^4 hm^2 ,占全省水果种植面积的比例由4.70%下降到4.30%。

表1 深层地下水降落漏斗区高耗水作物播种面积变化

Tab.1 Changes of planting area of staple crops in deep groundwater funnel area

年份	参数	冬小麦	蔬菜	水果
1982—1986	沧州深层地下水降落漏斗区播种面积/ hm^2	3.47×10^5	1.48×10^4	
	衡水深层地下水降落漏斗区播种面积/ hm^2	2.42×10^5	1.58×10^4	
	邢台中东部平原深层地下水降落漏斗区播种面积/ hm^2	2.10×10^5	1.62×10^4	
	合计占全省比例/%	32.86	18.99	
1987—1991	沧州深层地下水降落漏斗区播种面积/ hm^2	3.62×10^5	1.63×10^4	
	衡水深层地下水降落漏斗区播种面积/ hm^2	2.38×10^5	1.50×10^4	
	邢台中东部平原深层地下水降落漏斗区播种面积/ hm^2	2.17×10^5	1.82×10^4	
	合计占全省比例/%	31.96	16.67	
1992—1996	沧州深层地下水降落漏斗区播种面积/ hm^2	3.71×10^5	2.04×10^4	1.47×10^5
	衡水深层地下水降落漏斗区播种面积/ hm^2	2.43×10^5	2.17×10^4	7.52×10^4
	邢台中东部平原深层地下水降落漏斗区播种面积/ hm^2	2.29×10^5	1.90×10^4	4.56×10^4
	合计占全省比例/%	32.56	15.65	27.45
1997—2001	沧州深层地下水降落漏斗区播种面积/ hm^2	4.23×10^5	4.40×10^4	1.69×10^5
	衡水深层地下水降落漏斗区播种面积/ hm^2	2.84×10^5	5.17×10^4	7.97×10^4
	邢台中东部平原深层地下水降落漏斗区播种面积/ hm^2	2.57×10^5	2.70×10^4	4.63×10^4
	合计占全省比例/%	35.78	16.13	26.68
2002—2006	沧州深层地下水降落漏斗区播种面积/ hm^2	3.31×10^5	7.17×10^4	1.85×10^5
	衡水深层地下水降落漏斗区播种面积/ hm^2	2.55×10^5	8.43×10^4	8.42×10^4
	邢台中东部平原深层地下水降落漏斗区播种面积/ hm^2	2.13×10^5	3.47×10^4	4.36×10^4
	合计占全省比例/%	34.14	17.82	26.11
2007—2011	沧州深层地下水降落漏斗区播种面积/ hm^2	3.70×10^5	7.79×10^4	1.79×10^5
	衡水深层地下水降落漏斗区播种面积/ hm^2	2.82×10^5	7.77×10^4	7.14×10^4
	邢台中东部平原深层地下水降落漏斗区播种面积/ hm^2	2.134×10^5	3.50×10^4	4.98×10^4
	合计占全省比例/%	35.68	28.08	31.67
2012—2016	沧州深层地下水降落漏斗区播种面积/ hm^2	3.87×10^5	9.01×10^4	1.65×10^5
	衡水深层地下水降落漏斗区播种面积/ hm^2	2.76×10^5	8.36×10^4	7.34×10^4
	邢台中东部平原深层地下水降落漏斗区播种面积/ hm^2	2.17×10^5	4.06×10^4	5.21×10^4
	合计占全省比例/%	36.43	28.66	40.92

2.4 主要农产品供需与适水种植

由表2可知,2017年北京市和天津市城乡人口共为 3.73×10^7 人,占京津冀地区人口总数的33.14%。粮食、蔬菜和水果的需求量分别占京津冀地区需求总量的34.14%、35.15%和35.89%,而粮食、蔬菜和水果的生产量仅占京津冀地区总生产量

的6.21%、7.77%和8.86%。从满足本省(市)需求考虑,北京市和天津市粮食、蔬菜和水果的需求缺口分别达到 8.97×10^6 、 1.32×10^6 、 6.82×10^5 t,河北省粮食、蔬菜和水果盈余量分别为 1.61×10^7 、 4.03×10^7 、 1.01×10^7 t。故此,以下将京津冀作为一个整体来分析主要农产品供需现状。

表 2 2017 年京津冀地区人口和粮食蔬菜水果供需结构

Tab. 2 Supply and demand structure of grain, vegetable and fruit in Beijing – Tianjin – Hebei region

省市	城市人口/人	农村人口/人	粮食供应量/t	蔬菜供应量/t	水果供应量/t	粮食需求量/t	蔬菜需求量/t	水果需求量/t
北京	1.88×10^7	2.94×10^6	4.11×10^5	1.57×10^6	5.83×10^5	6.71×10^6	3.26×10^6	1.18×10^6
天津	1.29×10^7	2.66×10^6	2.12×10^6	2.70×10^6	7.44×10^5	4.79×10^6	2.31×10^6	8.32×10^5
河北	4.14×10^7	3.38×10^7	3.83×10^7	5.06×10^7	1.37×10^7	2.22×10^7	1.03×10^7	3.59×10^6

由表 3 可知,以京津冀地区生产满足京津冀地区居民消费需求为基准,除水稻和大豆外,其他主要农产品供应均存在较大盈余量。粮食作物盈余量为 7.13×10^6 t, 盈余量占供给量的 17.47%。其中冬小麦、玉米和薯类的盈余量分别达到 3.77×10^6 、 6.50×10^6 、 9.99×10^5 t, 盈余量占相应供应量的比例分别为 23.98%、29.72% 和 73.44%。高耗水作物蔬菜和水果的盈余量分别为 3.90×10^7 、 9.38×10^6 t, 盈余量占京津冀总供应量的比例分别为 71.05% 和 62.65%。蔬菜和水果种植规模的迅猛

增加,致使区域蔬菜和林果产品出现大量盈余的同时,也加剧了水资源紧缺矛盾。从保障国家粮食安全角度分析,粮食种植规模不宜作大面积调整。据此估算,在京津供应量现状下,河北省蔬菜和水果的种植面积分别减少至 1.72×10^5 、 1.97×10^5 hm^2 ,既可以满足京津冀地区对蔬菜和水果的消费需求,又可以使蔬菜和水果的灌溉需水量分别减少 2.19×10^9 、 1.12×10^9 m^3 (蔬菜和水果的灌溉需水量分别按 1980—2017 年年均值 380.36、257.70 mm 测算)。

表 3 京津冀地区主要农产品供需现状

Tab. 3 Supply and demand status of main agricultural products in Beijing – Tianjin – Hebei region

作物种类	城镇居民人均年消耗量/($\text{kg} \cdot \text{人}^{-1}$)	农村居民人均年消耗量/($\text{kg} \cdot \text{人}^{-1}$)	年供应量/t	年需求量/t	年盈余量/t	盈余量占供应比例/%
粮食作物	287.00	246.00	4.08×10^7	3.37×10^7	7.13×10^6	17.47
冬小麦	89.00	105.00	1.57×10^7	1.20×10^7	3.77×10^6	23.98
玉米	143.00	90.00	2.19×10^7	1.54×10^7	6.50×10^6	29.72
水稻	35.00	28.00	7.68×10^5	4.02×10^6	-3.25×10^6	-423.56
大豆	10.00	6.00	1.83×10^5	1.06×10^6	-8.80×10^5	-480.36
薯类	3.00	2.00	1.36×10^6	3.61×10^5	9.99×10^5	73.44
蔬菜	121.00	88.00	5.48×10^7	1.59×10^7	3.90×10^7	71.05
水果	47.00	30.00	1.50×10^7	5.60×10^6	9.38×10^6	62.65

注:城镇居民和农村居民人均年消耗量为 2013—2016 年的平均值;主要农产品消费需求考虑了产后损耗与种子用量需求部分,粮食、薯类、水果和蔬菜的产后损失率分别为 7%~11%、15%~20%、15%~20% 和 20%~25%^[24],本研究取中间值进行估算,冬小麦种子用量按照 2% 计算,其余作物用种量较小,不予考虑。

3 讨论

降水量减少、种植高耗水作物和农业灌溉用水占比偏高是造成地下水超采形势严峻的主要原因^[25-26]。20 世纪 60 年代中期以来,河北省降水量每 10 年减少 7.6 mm ^[25],本研究表明,2001—2017 年河北省年均地表水资源量、地下水资源量和水资源总量分别较 1956—2017 年年均值减少了 42.15%、9.01%、22.36%。1980—2017 年间,河北省年社会总用水量为 1.74×10^{10} ~ 2.26×10^{10} m^3 ,其中年农田灌溉量为 1.14×10^{10} ~ 1.85×10^{10} m^3 ,年地下水开采量为 1.15×10^{10} ~ 1.76×10^{10} m^3 ,年地下水开采量超过年地下水可开采量 (1.10×10^{10} m^3),是地下水位持续降低的主要原因。

利用作物系数法计算主要作物需水量,计算出的 1980—2017 年研究区主要作物年需水量,与康绍

忠等^[27]计算出的蔬菜和果树的需水量、SUN 等^[28]用作物系数法估算出的河北省曲周县冬小麦-夏玉米年需水量 (784~868 mm)、聂堂哲等^[29]计算出的黑龙江省玉米年需水量 (302~487 mm)、李玖颖等^[30]计算出的黑龙江省大豆年需水量 (336~465 mm)、LIU 等^[31]用大型蒸渗仪观测的京津冀平原区栾城县冬小麦-夏玉米年需水量 (800~900 mm)、ZHANG 等^[32]利用农田水量平衡估算出的冬小麦-夏玉米 1979—2009 年平均需水量 (810 mm)、刘钰等^[33]计算出的稻谷 (700~950 mm) 和棉花 (500~800 mm) 的需水量结果较为一致。

1980—2017 年间,河北省作物种植总面积增加了 1.39×10^7 hm^2 。1980—2017 年间冬小麦、蔬菜和水果对灌溉需水总量的贡献率达到 72.05%。与 1980—1989 年相比,2010—2017 年蔬菜种植面积和灌溉需水量分别增加了 186.01% 和 143.75%,水果

种植面积和灌溉需水量分别增加了 59.98% 和 18.91%,其他作物灌溉需水量均呈下降趋势,蔬菜和水果种植面积增加成为农业灌溉总需水量保持高位运行的主导因素,这与白志杰等^[19]在雄安新区研究得出的蔬菜、水果播种面积的增加是导致农田灌溉需水量增加的主要因素的结果一致,也与王道波等^[34]得出的蔬菜种植面积扩大是导致河北平原大部分地区 2000 年农田用水量较前几年有增加趋势的主要原因的研究结果较为一致。

另外,以满足京津冀地区农产品消费需求为标准,粮食作物盈余量占供给量的 17.47%,其中冬小麦、玉米和薯类的盈余量分别为 2017 年供应量的 23.98%、29.72%、73.44%。这与河北省 17% 的粮食、24% 的冬小麦和 26% 的玉米净输向京津冀以外地区的调查数据基本吻合^[35]。高耗水作物蔬菜和水果的盈余量分别为 2017 年京津冀地区供应量的 71.05% 和 62.65%。

4 结论

(1) 受农业生产活动和降水量变化等因素影响,2001—2017 年河北省水资源总量、地表水资源量和地下水资源量比 1956—2017 年年均值分别减少 22.36%、42.15% 和 9.01%。自 20 世纪 90 年代起,河北省地下水开采量大幅度增加,2001 年之后,受地表水用量和降水量的影响,地下水开采量逐年下降,但仍高于地下水可开采量,农田灌溉用水占比依然高达 62.95%。1980—2014 年邢台中东部平原、衡水和沧州平原区深层地下水埋深以每年平均 1.43 ~ 1.51 m 的速度下降,自 2015 年实施地下水超采综合治理以来,邢台中东部平原和沧州漏斗区略有回升,但衡水漏斗区中心水埋深年均下降速率仍达 1.51 m。深层地下水降落漏斗区高灌溉需水作物种植面积占全省高灌溉需水作物种植总面积的比例大幅提高、区域水资源不足和高灌溉需水作物面积快速增加是导致深层地下水漏斗区水位持续降低的重要原因。

(2) 1980—2017 年,河北省主要农作物种植总面积增加了 21.68%,其中蔬菜和水果的种植面积分别增加了 250.25% 和 161.16%。蔬菜和水果的种植面积均呈现先增加、后降低趋势,均在 2005 年达到最大,分别比 1980 年增加了 416.91% 和 405.30%。蔬菜产量与其种植面积变化趋势保持一致,水果产量呈现先增加、后趋于稳定的趋势。

(3) 利用 Penman - Monteith 公式和作物系数法,计算出 1980—2017 年河北平原主要种植模式需水量。需水量由大到小依次为蔬菜(750.56 ~ 893.09 mm)、水稻(698.25 ~ 832.60 mm)、水果(653.93 ~ 773.28 mm)、棉花(506.30 ~ 634.23 mm)、薯类(481.42 ~ 594.37 mm)、冬小麦(401.66 ~ 504.60 mm)、油料(406.26 ~ 510.68 mm)、大豆(335.28 ~ 429.74 mm)、玉米(309.72 ~ 399.54 mm)、谷子(269.94 ~ 345.77 mm)。

(4) 河北省主要农作物中冬小麦生育期内有效降水量最少(125.52 mm),水分亏缺指数最高(0.72),灌溉需水量(324.42 mm)仅次于蔬菜和水果;蔬菜灌溉需水量最高(380.36 mm),水分亏缺指数为 0.47;水果灌溉需水量和水分亏缺指数分别为 257.70 mm 和 0.36,低于冬小麦、蔬菜和水果,但高于其他作物。冬小麦、蔬菜和水果灌溉需水总量较大,分别占作物总灌溉需水量的 46.87%、12.94% 和 12.24%。

(5) 与 1980—1989 年相比,2010—2017 年蔬菜和水果种植面积分别增加了 186.01% 和 59.98%,灌溉需水量相应分别增加了 143.75% 和 18.91%,其他作物灌溉需水量下降了 3.34% ~ 91.57%,蔬菜和水果种植规模的增加是灌溉需水总量高位运行的主要原因。河北省蔬菜和水果的种植面积分别缩减至 1.72×10^5 、 1.97×10^5 hm^2 ,既满足京津冀地区消费需求,又能使年灌溉需水总量减少 3.31×10^9 m^3 ,是降低区域作物灌溉需水量和解决地下水严重超采的有效途径。

参 考 文 献

- [1] TAO S L, ZHANG H, FENG Y H, et al. Changes in China's water resources in the early 21st century[J]. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2020, 18(4): 188 - 193.
- [2] PEI H W, SCANLIN B R, SHEN Y J, et al. Impacts of varying agricultural intensification on crop yield and groundwater resources: comparison of the North China Plain and US High Plains[J]. *Environment Research Letter*, 2015, 10(4): 044013.
- [3] FAMIGLIETTI J S. The global groundwater crisis[J]. *Nature Climate Change*, 2014, 4: 945 - 948.
- [4] 李晓爽, 党红凯, 宋妮, 等. 肥沙混施对盐碱地冬小麦耗水特性与生长的影响[J/OL]. *农业机械学报*, 2020, 51(5): 272 - 284. LI Xiaoshuang, DANG Hongkai, SONG Ni, et al. Effects of biological organic fertilizer and yellow river sediment mixture on water consumption and growth of winter wheat in saline-alkali land[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2020, 51(5): 272 - 284. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20200530&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.05.030. (in Chinese)
- [5] 郑连生. 广义水资源与适水发展[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2009.
- [6] 水利部, 财政部, 国家发展改革委, 等. 华北地区地下水超采综合治理行动方案[EB/OL]. (2019-01-25) <http://>

www.mwr.gov.cn/zwgk/zfxgkml/201903/t20190305_1109647.html? from = timeline.

- [7] 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 Guanghui, FEI Yuhong, LIU Chunhua, et al. Adaptation between irrigation intensity and groundwater carrying capacity in North China Plain[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(1):1-10. (in Chinese)
- [8] 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, 2020, 28(1):8-16. ZHANG Yafang, GUO Ying, SHEN Yanjun, 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. (in Chinese)
- [9] YANG X L, CHEN Y Q, PACENKA S, et al. Effect of diversified crop rotations on groundwater levels and crop water productivity in the North China Plain[J]. Journal of Hydrology, 2015, 522: 428-438.
- [10] LI P, REN L. Evaluating the effects of limited irrigation on crop water productivity and reducing deep groundwater exploitation in the North China Plain using an agro-hydrological model: II. Scenario simulation and analysis[J]. Journal of Hydrology, 2019, 574: 715-732.
- [11] SUN H Y, ZHANG X Y, LIU X W, et al. Impact of different cropping systems and irrigation schedules on evapotranspiration, grain yield and groundwater level in the North China Plain[J]. Agricultural Water Management, 2019, 211: 202-209.
- [12] ZHANG X L, REN L, WAN L. Assessing the trade-off between shallow groundwater conservation and crop production under limited exploitation in a well-irrigated plain of the Haihe River basin using the SWAT model[J]. Journal of Hydrology, 2018, 567: 253-266.
- [13] 段爱旺, 孙景生, 刘钰, 等. 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.
- [14] KUMAR S. Reference evapotranspiration (ET_0) and irrigation water requirement of different crops in Bihar[J]. Journal of Agrometeorology, 2017, 19(3): 238-241.
- [15] 刘小刚, 符娜, 李闯, 等. 河南省主粮作物需水量变化趋势与成因分析[J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(9):188-197. LIU Xiaogang, FU Na, LI Chuang, et al. Trends and causes analysis of water requirement for main grain crops in Henan Province[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(9): 188-197. http://www.jcsam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20150927&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.09.027. (in Chinese)
- [16] 尹海霞, 张勃, 王亚敏, 等. 黑河流域中游地区近 43 年来农作物需水量的变化趋势分析[J]. 资源科学, 2012, 34(3): 409-417. YIN Haixia, ZHANG Bo, WANG Yamin, et al. Research on the change trend of crop water requirement in the middle reaches of Heihe River Basin in the recent 43 years[J]. Resources Science, 2012, 34(3):409-417. (in Chinese)
- [17] 聂堂哲, 张忠学, 齐智娟, 等. 1960—2015 年黑龙江省水稻需水量时空分布特征[J/OL]. 农业机械学报, 2019, 50(5):279-290. NIE Tangzhe, ZHANG Zhongxue, QI Zhijuan, et al. Spatial and temporal distribution characteristics of rice water requirement in Heilongjiang Province during 1960—2015[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(5):279-290. http://www.jcsam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190532&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.05.032. (in Chinese)
- [18] 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.
- [19] 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, 2019, 27(7): 1067-1077. BAI Zhijie, REN Dandan, YANG Yanmin, 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. (in Chinese)
- [20] 陶国通, 王景雷, 南纪琴, 等. 基于温度的作物需水量估算方法[J]. 应用生态学报, 2014, 25(7): 2019-2025. TAO Guotong, WANG Jinglei, NAN Jiqin, et al. Calculating method for crop water requirement based on air temperature[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2014, 25(7): 2019-2025. (in Chinese)
- [21] ZERMEÑO-GONZÁLEZ A, MELENDRES-ALVAREZ A I, FUERTE-MOSQUEDA L A, et al. Evapotranspiration rate of a vineyard and its relation to the reference of the FAO Penman - Monteith method [J]. Agrobiencia, 2017, 51(1): 1-12.
- [22] AMAZIRH A, ER-RAKI S, CHEHBOUNI A, et al. Modified Penman - Monteith equation for monitoring evapotranspiration of wheat crop: relationship between the surface resistance and remotely sensed stress index [J]. Biosystems Engineering, 2017, 164: 68-84.
- [23] 刘玉春, 姜红安, 李存东, 等. 河北省棉花灌溉需水量与灌溉需求指数分析[J]. 农业工程学报, 2013, 29(19): 98-104. LIU Yuchun, JIANG Hongan, LI Cundong, et al. Analysis of irrigation water requirement and irrigation requirement index for cotton of Hebei Province[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(19): 98-104. (in Chinese)
- [24] 宗锦耀. 关于我国农产品加工业发展问题的思考[Z/OL]. (2014-03-24) http://jiuban.moa.gov.cn/zwillm/zwdt/201403/t20140324_3826730.htm.
- [25] 李春强, 杜毅光, 李保国, 等. 河北省近四十年(1965—2005)气温和降水变化特征分析[J]. 干旱区资源与环境, 2009, 23(7): 1-7. LI Chunqiang, DU Yiguang, LI Baoguo, et al. An analysis on variation characteristics of temperature and precipitation in Hebei Province during 1965—2005[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2009, 23(7):1-7. (in Chinese)
- [26] 马俊永, 郑春莲, 党红凯, 等. 河北地下水超采情势及种植结构调整对策的经济分析[J]. 水资源研究, 2019, 8(6): 575-580. MA Junyong, ZHENG Chunlian, DANG Hongkai, et al. The situation of over-exploitation aquifer in Hebei Province and

- economic analysis on the cropping system adjustment countermeasure[J]. *Journal of Water Resources Research*, 2019, 8(6): 575–580. (in Chinese)
- [27] 康绍忠, 孙景生, 张喜英, 等. 中国北方主要作物需水量与耗水管理[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2018.
- [28] SUN Q P, KRÖBEL R, MÜLLER T, et al. Optimization of yield and water-use of different cropping systems for sustainable groundwater use in North China Plain[J]. *Agricultural Water Management*, 2011, 98(5): 808–814.
- [29] 聂堂哲, 张忠学, 林彦宇, 等. 1959—2015年黑龙江省玉米需水量时空分布特征[J/OL]. *农业机械学报*, 2018, 49(7): 217–227.
NIE Tangzhe, ZHANG Zhongxue, LIN Yanyu, et al. Spatial and temporal distribution characteristics of maize water requirement in Heilongjiang Province during 1959—2015 [J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2018, 49(7): 217–227. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180726&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.07.026. (in Chinese)
- [30] 李玖颖, 王欣亮, 王忠波, 等. 黑龙江省近50年大豆需水量与干旱时空分布特征研究[J/OL]. *农业机械学报*, 2020, 51(8): 223–237.
LI Jiuying, WANG Xinliang, WANG Zhongbo, et al. Spatial and temporal distribution characteristics of soybean water requirement and drought in Heilongjiang Province in recent 50 years [J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2020, 51(8): 223–237. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20200825&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.08.025. (in Chinese)
- [31] LIU C M, ZHANG X Y, ZHANG Y Q. Determination of daily evaporation and evapotranspiration of winter wheat and maize by large-scale weighing lysimeter and micro-lysimeter[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2002, 111(2): 109–120.
- [32] 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.
- [33] 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 Yu, WANG Lin, NI Guangheng, et al. Spatial distribution characteristics of irrigation water requirement for main crops in China[J]. *Transactions of the CSAE*, 2009, 25(12): 6–12. (in Chinese)
- [34] 王道波, 邢素丽, 李会龙, 等. 河北平原农田用水现状及灌溉方式和保证率对农田用水的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2005, 23(2): 21–24.
WANG Daobo, XING Suli, LI Huilong, et al. Effects of current farmland water uses as well as irrigation modes and irrigation guaranty rates on the farmland water uses in the Hebei plain in terms of ArcGIS[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2005, 23(2): 21–24. (in Chinese)
- [35] 罗建美. 京津冀平原农业种植结构优化及其节水效应研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2019.
LUO Jianmei. Evaluating water saving effects due to planting structure optimization in the Beijing–Tianjin–Hebei plain[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2019. (in Chinese)

(上接第301页)

- [26] 刘莫尘, 马郡祥, 韩守强, 等. 固态发酵饲料自动发酵饲喂一体设备设计与试验[J/OL]. *农业机械学报*, 2018, 49(11): 141–147.
LIU Mochen, MA Junxiang, HAN Shouqiang, et al. Design and experiment of automatic fermenting and feeding equipment for solid-state fermented feed[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2018, 49(11): 141–147. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20181116&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.11.016. (in Chinese)
- [27] 薛子萱. 立式螺旋开沟机工作部件设计及优化[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2011.
XUE Zixuan. Design and optimization of working parts in uprigh screw ditcher[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2011. (in Chinese)
- [28] 张力群. 取土器的合理选用与改进[J]. *探矿工程(岩土钻掘工程)*, 2003(3): 33–34.
- [29] 夏蓓娅, 胡欣欣. 长螺旋钻机工作参数与土的运动[J]. *建筑机械*, 1999(4): 3–5.
XIA Beiya, HU Xinxin. Efficiency analysis and working parameters of an earth auger[J]. *Construction Machinery*, 1994(4): 3–5. (in Chinese)
- [30] 王子铭. 螺旋钻机主要参数计算[J]. *筑路机械与施工机械化*, 1998, 15(6): 8–10.
- [31] 郭峰, 李瑰贤, 赵伟民. 螺旋钻具输土速度与阻力的实验[J]. *工程机械*, 2006(9): 23–26, 105.
GUO Feng, LI Guixian, ZHAO Weimin. Test for soil delivering speed and resistance of auger drill[J]. *Construction Machinery and Equipment*, 2006(9): 23–26, 105. (in Chinese)
- [32] 刘丹. 长钻尖孔机全液压自动钻进系统的研究[D]. 长沙: 中南大学, 2007.
LIU Dan. Researching on full-hydraulic automatic drilling system[D]. Changsha: Central South University, 2007. (in Chinese)
- [33] 杨晓刚. 螺旋钻进钻屑运移规律及临界转速的研究[J]. *中国矿业大学学报*, 1994, 23(4): 101–108.
YANG Xiaogang. Study on transportation rule of screw drilling sludge and critical rotational speed[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 1994, 23(4): 101–108. (in Chinese)