

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2022.02.021

基于农业灌溉需水量计算的黄河三角洲作物结构优化

曹丹^{1,2}, 易秀¹, 陈小兵²

(1. 长安大学水利与环境学院, 陕西 西安 710061;

2. 中国科学院海岸带环境过程与生态修复重点实验室, 山东 烟台 264003)

摘要:为优化黄河三角洲作物结构,以东营市垦利区为例,计算了当地主要作物各生育阶段及整个生育期内的作物需水量、有效降水量以及淋洗需水量,并对不同作物的水分盈亏情况进行了分析。结果表明:作物补充灌溉需水量从小到大依次为玉米、棉花、小麦、水稻;玉米水分亏缺程度最低,应适当增加玉米种植面积或者把冬小麦、夏玉米轮作更换为一年种植两季玉米(春玉米和夏玉米);减少棉花在中、轻度盐碱地的种植面积,对耐盐性较好的棉花改用排水回用或微咸水灌溉;兼用灌溉用水和洗盐用水种植水稻,在经水稻种植改良成轻度盐碱地的土壤上种植玉米和小麦。

关键词:农业灌溉;作物结构;净灌溉水量;黄河三角洲

中图分类号:S274.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2022)02-0154-06

Crop structure optimization based on agricultural irrigation water demand calculation in the Yellow River Delta//
CAO Dan^{1,2}, YI Xiu¹, CHEN Xiaobing² (1. School of Water and Environment, Chang'an University, Xi'an 710061, China;
2. Key Laboratory of Coastal Environmental Processes and Ecological Remediation, Chinese Academy of Sciences, Yantai 264003, China)

Abstract: With the Kenli District of Dongying City used as an example, a study on the optimization of crop structure in the Yellow River Delta was conducted. The water demand, effective precipitation, and leaching water demand of main crops in each growth stage and the whole growth period were calculated, and water surplus and deficit of different crops were analyzed. The results show that crops are ranked in the following ascending order according to the supplementary irrigation water demand: corn, cotton, wheat, and rice; corn has the lowest degree of water deficit, and thus, the planting area of corn can be increased appropriately or the rotation of winter wheat and summer corn can be replaced by planting corn (spring corn and summer corn) twice a year; the planting area of cotton can be reduced in moderately and slightly saline-alkali land, and drainage reuse or brackish water irrigation can be used for cotton planting because of its good salt tolerance; irrigation water and water for salt washing can be mixed for rice planting, and then, the slightly saline-alkali land improved by rice planting can be used for corn and wheat planting.

Key words: agricultural irrigation; crop structure; net irrigation water; Yellow River Delta

黄河三角洲是黄河携带大量泥沙在渤海凹陷处沉积形成的冲积平原^[1],以利津为顶点,北到徒骇河口,南到小清河口,呈扇状三角形,是我国三大河口三角洲之一。习近平总书记在《在黄河流域生态保护和高质量发展座谈会上的讲话》中指出,黄河流域是我国重要的生态屏障和经济地带,在我国经济社会发展和生态安全方面具有十分重要的地位,下游的黄河三角洲要做好保护工作,促进河流生态

系统健康,提高生物多样性。黄河三角洲地区后备土地资源丰富、开发潜力大^[2],同时也是我国重要的湿地生态保护区^[3]。但该地区降水量时空分布不均,作为客水的黄河水存在着断流、浪费、污染等问题,浅层地下水矿化度过高难以直接利用^[4],境内居民生活用水存在安全隐患,湿地生态系统的稳定性也易受到水资源短缺的破坏,农业与工业争夺水资源,其中农业用水占比最重,占总用水量的

基金项目:国家自然科学基金委员会-山东省人民政府联合基金(U180215);国家重点研发计划(2019YFD1002702);中国科学院 STS 项目(KFZD-SW-112-4)

作者简介:曹丹(1997—),女,硕士研究生,主要从事环境工程研究。E-mail: 1169459719@qq.com

通信作者:陈小兵(1974—),男,副研究员,博士,主要从事滨海盐碱土水肥盐运移过程与调控研究。E-mail: xbchen@yic.ac.cn

70% 以上^[5]。水资源短缺已成为限制该区域农业生产和经济发展的一大障碍。

为更好地保障黄河流域经济与自然的和谐发展,需做好区域水资源的协调管理,使其既能满足农业生产发展的需要以提供人口不断增长所必需的粮食产量,又能减少农业用水以保证生态用水,促进黄河流域生态保护和高质量发展。关于如何高效利用黄河流域水资源,已有诸多学者对其进行了研究阐述^[6-9]。针对黄河三角洲地区水资源短缺的现状,近年来有学者对其存在问题和解决措施进行了探讨^[10-12],但是这些研究大多是针对工程技术或政策法规,对调整作物种植结构以合理分配水资源的研究较少。有学者根据不同作物的需水特性进行了适当的节水灌溉管理研究^[13-16],但黄河三角洲地区这方面的研究还比较欠缺,特别是对淋洗需水量的计算鲜有涉及。本文以位于黄河三角洲地区的东营市垦利区为例,通过计算当地主要作物全生育期的需水量、有效降水量及淋洗需水量,分析几种作物的耗水能力,结合各作物的种植面积和单位面积产量,对该地区的作物种植结构和灌溉方法提出合理的调整建议。

1 研究区概况与数据来源

东营市垦利区位于山东省北部黄河三角洲地区,区内土壤母质为黄河冲积物,质地较轻,养分贫乏,盐碱偏重^[17]。0~15 cm 土层中度盐渍化土壤和盐土面积最大,分别占 43.37% 和 30.16%,其次为重度盐渍化和轻度盐渍化土壤^[18]。研究区属温带大陆性季风气候,全年气温偏高,冬季出现阶段性寒冷,春季温暖湿润,温度回升快,夏季出现阶段性酷热;多年平均降水量约为 550 mm,时空分布不均,6—8 月为丰水期,早春、晚秋以及冬季雨量很少,甚至为 0^[19]。受海水倒灌、频繁的旱涝气候变化等因素影响,垦利区地下水位较浅、矿化度较高^[20],不能直接用于农灌和人畜引用。境内可利用的地表水资源主要有自然降水(自产径流)和黄河客水水源(入境黄河水)两部分^[21],降水量的时空分布不均以及黄河来水的断流、污染等加剧了当地的水资源供需矛盾^[22]。垦利区种植的主要粮食作物有冬小麦、夏玉米和水稻,经济作物以棉花为主。冬小麦和夏玉米在轻度盐碱地上轮作,中度盐碱地可种植部分棉花,重度盐碱地种植水稻以洗盐压碱,成为盐碱改良带^[23]。根据《垦利年鉴》(2017),垦利区 2016 年农作物中玉米种植面积最大,约占 30%,与棉花、水稻和小麦分别位居前 4 位,总共约占全部种植面积的 89%。本文采用的气象数据来源于垦利区气象站

2014 年资料,包括垦利区逐日气温、降水量、相对湿度、平均风速、日照时数等气象要素;标准作物系数来自联合国粮农组织编写的 *Crop Water Requirements*。

2 灌溉需水量计算

本文主要研究的是灌溉水量与作物需水之间的供需关系,因此只考虑净灌溉水量,不考虑灌溉用水在运输、配送等过程中的损失量。净灌溉需水量可通过下式推算^[24]:

$$D_{min} = \frac{ET_c}{1 - L_R}$$
 (1)

式中: D_{min} 为净灌溉需水量,mm; ET_c 为作物需水量,mm; L_R 为淋洗需水量,%。

净灌溉需水量(下文称灌溉需水量)由有效降水量和补充灌溉需水量组成,必须符合作物的需水规律,因此本文分别计算研究区主要作物生育期内的总需水量、有效降水量和淋洗需水量,从而得出合理的补充灌溉需水量。

2.1 作物需水量

作物需水量 ET_c 是灌溉用水的重要依据,多年来,各国极为重视对其的研究^[25-29]。Penman-Monteith (P-M) 方程是目前最常用的参考作物蒸散量计算方法,适用于各种应用场合和气候条件下的灌溉系统设计和运行。研究表明,采用 P-M 方程估算蒸散量精度最高,稳定性最好^[30-31]。

本文采用 P-M 方程计算研究区逐日参考作物蒸散量,通过作物系数法,利用式(2)计算各阶段及整个生育期内的作物需水量:

$$ET_c = K_c ET_0$$
 (2)

式中: K_c 为作物系数,表示作物在不同生长阶段所需的水分条件差异,一般通过田间试验获取^[32]; ET_0 为参考作物蒸散量,mm。

根据联合国粮食及农业组织 (Flood and Agriculture Origanziation of United Nations, FAO) 提供的标准作物系数^[33],如表 1 所示,本文主要统计研究区玉米、棉花、水稻、小麦 4 种作物的需水量,表 1 中 K_{cini} 、 K_{cmid} 和 K_{cend} 分别表示生长初期、生育中期和生育后期的 K_c 。

表 1 FAO 推荐的标准作物系数

Table 1 Standard crop coefficients recommended by FAO

作物	K_{cini}	K_{cmid}	K_{cend}
玉米	0.21	1.20	0.35
棉花	0.35	1.20	0.50
水稻	1.00	1.20	0.60
小麦	0.70	1.15	0.40

快速发育期和发育后期每个日序的作物系数由下式计算:

$$K_{ci} = K_{cpi} + (K_{cni} - K_{cpi}) \frac{i - \sum L_{pi}}{L_{si}} \quad (3)$$

式中: K_{ci} 为第 i 天的作物系数; L_{si} 为第 i 天所处生育阶段的长度, d; K_{cni} 为第 i 天所处生育阶段的下一个生育阶段的作物系数; K_{cpi} 为第 i 天所处生育阶段的前一个生育阶段的作物系数; $\sum L_{pi}$ 为第 i 天所处生育阶段之前所有生育阶段的总长度, d。

研究区主要作物的初始生长期、快速发育期、生育中期和生育后期起止日期如表 2 所示。

表 2 作物生育阶段起止日期

Table 2 Starting and ending dates of crop growth stages

作物	初始生长期	快速发育期	生育中期	生育后期
玉米	5 月 31 日—	6 月 20 日—	7 月 25 日—	9 月 3 日—
	6 月 19 日	7 月 24 日	9 月 2 日	10 月 2 日
棉花	5 月 1 日—	5 月 31 日—	7 月 20 日—	9 月 13 日—
	5 月 30 日	7 月 19 日	9 月 12 日	10 月 27 日
水稻	5 月 20 日—	6 月 19 日—	7 月 19 日—	10 月 7 日—
	6 月 18 日	7 月 18 日	10 月 6 日	1 月 15 日
小麦	10 月 3 日—	11 月 3 日—	3 月 22 日—	5 月 1 日—
	11 月 2 日	3 月 21 日	4 月 30 日	5 月 30 日

2.2 有效降水量

农业用水领域内, 有效降水量即为自然降水中实际补充到植物根层土壤中的净水量^[34]。有效降水量与气象条件、地形特征、土壤特性、水文地质以及耕作制度等因素有关, 是制定作物灌溉制度、灌溉排水规划、灌溉用水管理等的重要依据^[35]。一般用有效降水系数的经验值计算有效降水量^[36], 即:

$$P_e = \alpha P_a \quad (4)$$

式中: P_e 为有效降水量, mm/d; P_a 为实际降水量, mm/d; α 为有效降水系数。当 $P_a < 3$ mm 时, $\alpha = 0$; 当 $3 \text{ mm} \leq P_a < 50 \text{ mm}$ 时, $\alpha = 1$; 当 $50 \text{ mm} \leq P_a < 150 \text{ mm}$ 时, $\alpha = 0.8$; 当 $P_a \geq 150 \text{ mm}$ 时, $\alpha = 0.70$ 。

2.3 淋洗需水量

研究区内轻度及中度盐渍化土壤分布广泛, 灌溉会给土壤带来大量盐分, 当土壤中的盐分积累到一定浓度时, 就会产生盐害问题, 妨碍作物生长, 导致作物产量显著降低。因此, 灌溉除了提供保证作物正常生长需要的水量外, 还需要提供一些水量保证土壤盐分的淋洗。淋洗需水量定义为为避免产量下降所需的最小淋洗水量比, 该参数主要由所种植的作物类型、灌溉水水质和土壤性质决定。相对均一盐分条件下可利用下式估算 L_R ^[37]:

$$L_R = \frac{D_d}{D_i} = \frac{\sigma_i}{\sigma_d} \quad (5)$$

式中: D_d 为排出水量, mm; D_i 为灌溉水量, mm; σ_i 为灌溉水的电导率, dS/m; σ_d 为通过作物根区底部排水的电导率, dS/m。根层中容许的最高盐浓度由种植作物的耐盐阈值 σ_e 决定。在田间灌溉实践中, σ_d 与 σ_e 存在以下关系^[38]:

$$\sigma_d = 5\sigma_e - \sigma_i \quad (6)$$

研究区主要引黄河水灌溉, 根据黄河山东段水质监测报告^[39], 研究区境内引黄灌溉水的平均电导率约为 0.9 dS/m。根据美国盐土实验室的作物耐盐性资料^[40], 研究区 4 种主要作物的耐盐阈值 σ_e 及相应的 σ_d 值如表 3 所示。

表 3 作物耐盐性阈值

Table 3 Threshold of salt tolerance of crops

作物	$\sigma_e / (\text{dS} \cdot \text{m}^{-1})$	耐盐评价	$\sigma_d / (\text{dS} \cdot \text{m}^{-1})$
玉米	1.7	中度敏感	7.6
棉花	7.7	耐受	37.6
水稻	3.0	中度敏感	14.1
小麦	6.0	中度耐受	29.1

2.4 水分盈亏指数

作物水分盈亏指数是农业生产监测的重要指标, 反映了作物正常发育及生产对水分的需求^[41]。计算公式如下:

$$I = \frac{P_e - ET_c}{ET_c} \quad (7)$$

式中 I 为水分亏缺指数。 $I > 0$ 表示农田水分供应充足, 作物水分有盈余; $I < 0$ 表示农田水分供应不足, 作物水分亏缺。

3 结果与讨论

3.1 计算结果

研究区 4 种作物全生育期的用水供需对比如表 4 所示, 各生育阶段的水分盈亏情况如表 5 所示。玉米对盐分最敏感, 淋洗需水量最大, 但其蒸散量较少, 生育期与自然降水的时间分布耦合度较高, 因此水分亏缺程度最低, 补充灌溉需水量也最低, 属于低耗水作物; 水稻的盐分敏感性仅次于玉米, 属于中度盐敏感作物, 淋洗需水量也相对较多, 且水田种植的生理特点决定了其具有较高的作物需水量, 因此最终补充灌溉需水量最多; 小麦和棉花的耐盐性相对较高, 淋洗需水量不高, 但冬小麦生育期主要在降水较少的春秋季节, 作物需水与自然降水的耦合度较低, 补充灌溉需水量仅次于水稻, 棉花生育期内需水量较高, 仅次于水稻。

3.2 讨论

李应林等^[42]采用 196 个气象站 1961—2000 年的实测气象资料和作物系数, 对我国主要旱地作物

表 4 垦利区主要作物灌溉需水量
Table 4 Irrigation water demand of main crops in Kenli District

作物	ET_c/mm	P_e/mm	$L_R/\%$	$D_{\min}/\text{mm}$	补充灌溉需水量/mm
玉米	594.6	283.6	11.8	674.1	390.5
棉花	902.8	340.4	2.4	925.0	584.6
水稻	1204.7	307.1	6.4	1287.1	980.0
小麦	790.8	94.8	3.1	816.1	721.3

表 5 作物不同生育阶段的水分盈亏指数

Table 5 Water surplus and deficit index of crops in different growth stages

作物	初始生长期	快速发育期	生育中期	生育后期
玉米	0.545	-0.385	-0.644	-0.639
棉花	-0.414	-0.504	-0.681	-0.748
水稻	-0.767	-0.600	-0.684	-0.984
小麦	-0.894	-0.920	-0.974	-0.093

多年平均生育期需水量进行了估算,其中垦利区所处位置的估算结果为冬小麦 600 ~ 700 mm、夏玉米 300 ~ 400 mm、棉花约 500 mm,均低于本文计算结果,原因是其研究范围过大,不能准确反映垦利区当地种植作物的具体需水情况。尹春艳^[43]利用垦利区 2013 年 9 月至 2014 年 9 月的气象数据和打渔张灌区实测作物系数估算作物生育期需水量,结果为冬小麦 791 mm、夏玉米 615 mm、棉花 847 mm,与本文计算结果相近;计算的补充灌溉需水量结果为冬小麦 442 mm、夏玉米 133 mm、棉花 353 mm,与本文计算结果相差较大。龚元石等^[44]建立了农田土壤水分模型,利用华北平原 1951—1990 年气象资料和实测作物系数模拟计算土壤水分变化,估算得到的作物多年平均灌溉需水量为冬小麦 200 ~ 250 mm、夏玉米 0 ~ 50 mm、棉花 150 ~ 200 mm,与本文计算结果相差较大。与本研究相比,尹春艳^[43]的补充灌溉需水量估算中包含了地下水的利用量,龚元石等^[44]的估算基于 180 ~ 240 mm 的土壤最大有效水量,且二者的研究均没有考虑到淋洗需水量,因此估算结果显著低于本文计算结果。另外,以上几位学者的估算中均采用了实测数据计算得到的作物系数值,与本文采用的 FAO 标准作物系数值相比精确度更高。龚元石等^[44]建立的模型只在作物关键需水期缺水时实施模拟灌水,与本研究相比,其灌溉需水量偏小。

根据表 4,垦利区自然降水与作物需水耦合度较低,在不引水灌溉的情况下,作物普遍处于水分亏缺状态,自然降水的补给量无法满足作物对水分的需求。加大黄河引水灌溉又势必会加剧当地生产、生活及生态 3 方对水资源需求的矛盾。为此,可开

发地下微咸水资源,用微咸水或咸水淡水交替灌溉来替代淡水灌溉^[45-47],该方法适用于棉花等耐盐作物,在一定程度上可缓解当地的农田用水压力,但长期使用会加重土壤的盐分积累,需要采取进一步的水盐监测和调控措施。除此之外,要提高农业用水效率,还可以从扩大低耗水作物种植面积、种植具有多种功能价值的耐盐碱作物、耕种改良土壤等方面着手^[48-53],根据本文研究结果,参照作物的耗水特性,适当调整作物的种植规模,以缩减农业用水。

4 结 论

a. 垦利区地下水矿化度高,不适于农畜直接利用,境内可利用的地表水资源主要是自然降水和黄河客水水源,而降水时空分布不均,黄河客水时有断流且污染频发,当地农业用水资源短缺。

b. 玉米耗水量小而高产,应进一步扩大其种植比例;棉花的种植面积仅次于玉米,但单位面积产量低、收益小,且需水、耗水较多,应尽量减少其种植面积;水稻和小麦产量高而耗水量大,应在保留优质种植面积的基础上合理压缩其种植比例,或调整种植制度,将玉米、小麦轮作改为一年种植春、夏两季玉米。

c. 种植棉花和水稻具有脱盐抑盐、改良土壤等效应,可在盐碱土壤上种植,兼用排水回用或微咸水进行灌溉;种植水稻能将重度盐碱地改良为中、轻度盐碱地,在此基础上可搭配玉米、小麦等高产粮食作物进行轮作。

参考文献:

- [1] AN D Y, ZHAO G X, CHANG C Y, et al. Hyperspectral field estimation and remote-sensing inversion of salt content in coastal saline soils of the Yellow River Delta [J]. International Journal of Remote Sensing, 2016, 37 (2): 455-470.
- [2] 刘立军,李玉涛,刘泽鑫,等.基于盐碱地改良的生态循环共生模式构建与示范:以黄河三角洲地区为例[J].山东国土资源,2019,35(8):59-63. (LIU Lijun, LI Yutao, LIU Zexin, et al. Construction and demonstration of ecological cycle symbiosis model based on saline alkali land improvement: a case study of the Yellow River Delta [J]. Shandong Land and Resources, 2019, 35(8): 59-63. (in Chinese))
- [3] 陈怡平,傅伯杰.关于黄河流域生态文明建设的思考[N].中国科学报,2019-12-20(6).
- [4] 高茂生,骆永明.我国重点海岸带地下水资源问题与海水入侵防控[J].中国科学院院刊,2016,31(10):1197-1203. (GAO Maosheng, LUO Yongming. Groundwater resources and seawater intrusion prevention and control in

- China's key coastal zones[J]. Journal of Chinese Academy of Sciences, 2016, 31(10): 1197-1203. (in Chinese))
- [5] 白清俊, 张庆华, 闫奎奎, 等. 山东省灌溉农业分区农业用水特征影响因素研究[J]. 灌溉排水学报, 2009, 28(5): 13-15. (BAI Qingjun, ZHANG Qinghua, YAN Yongluan, et al. Study on the influencing factors of agricultural water use characteristics in Shandong Province [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2009, 28(5): 13-15. (in Chinese))
- [6] 罗其友, 陶陶, 宫连英, 等. 黄河流域农业水资源优化配置[J]. 干旱区资源与环境, 1994(2): 1-6. (LUO Qiyu, TAO Tao, GONG Lianying, et al. Optimal allocation of agricultural water resources in the Yellow River Basin [J]. Resources and Environment in Arid Areas, 1994(2): 1-6. (in Chinese))
- [7] 武雪萍, 蔡典雄, 梅旭荣, 等. 黄河流域农业水资源与水环境问题及技术对策[J]. 生态环境, 2007(1): 248-252. (WU Xueping, CAI Dianxiong, MEI xurong, et al. Agricultural water resources and water environment problems and technical countermeasures in the Yellow River Basin [J]. Ecological Environment, 2007(1): 248-252. (in Chinese))
- [8] 彭少明, 郑小康, 王煜, 等. 黄河流域水资源-能源-粮食的协同优化[J]. 水科学进展, 2017, 28(5): 681-690. (PENG Shaoming, ZHENG Xiaokang, WANG Yu, et al. Collaborative optimization of water resources energy grain in the Yellow River Basin [J]. Advances in Water Science, 2017, 28(5): 681-690. (in Chinese))
- [9] 董战峰, 璩爱玉, 冀云卿. 高质量发展战略下黄河下游生态环境保护[J]. 科技导报, 2020, 38(14): 109-115. (DONG Zhanfeng, JIAN Aiyu, JI Yunqing. Ecological environment protection in the lower Yellow River under high quality development strategy [J]. Science and Technology Guide, 2020, 38(14): 109-115. (in Chinese))
- [10] 曹建荣, 于洪军, 徐兴永, 等. 黄河三角洲水资源变化特征及其优化配置[J]. 人民黄河, 2010, 32(6): 71-72. (CAO Jianrong, YU Hongjun, XU xingyong, et al. Water resources change characteristics and optimal allocation in the Yellow River Delta [J]. Yellow River, 2010, 32(6): 71-72. (in Chinese))
- [11] 欧阳竹, 王竑晟, 来剑斌, 等. 黄河三角洲农业高质量发展新模式[J]. 中国科学院院刊, 2020, 35(2): 145-153. (OUYANG Zhu, WANG Hongsheng, LAI Jianbin, et al. New model of high quality agricultural development in the Yellow River Delta [J]. Journal of Chinese Academy of Sciences, 2020, 35(2): 145-153. (in Chinese))
- [12] 王开荣. 黄河三角洲生态保护及高质量发展策略初探[J]. 中国水利, 2020(9): 26-28. (WANG Kairong. Ecological protection and high quality development strategy of the Yellow River Delta [J]. China Water Conservancy, 2020(9): 26-28. (in Chinese))
- [13] 翟正丽, 桑学锋, 顾世祥, 等. 基于水资源配置平衡的云南省水系连通格局效果分析[J]. 水资源保护, 2019, 35(3): 48-52. (ZHAI Zhengli, SANG Xuefeng, GU Sixiang, et al. Effect analysis of water system connectivity pattern in Yunnan Province based on water resources allocation balance [J]. Water Resources Protection, 2019, 35(3): 48-52. (in Chinese))
- [14] 向龙, 范云柱, 刘蔚, 等. 基于节水优先的水资源配置模式[J]. 水资源保护, 2016, 32(2): 9-13. (XIANG Long, FAN Yunzhu, LIU Wei, et al. Model of water resources allocation based on idea of giving priority to water-saving [J]. Water Resources Protection, 2016, 32(2): 9-13. (in Chinese))
- [15] 刘笑吟, 徐俊增, 杨士红, 等. 节水灌溉稻田蒸散时空尺度特征及影响因素[J]. 水资源保护, 2018, 34(2): 42-51. (LIU Xiaoyin, XU Junzeng, YANG Shihong, et al. Characteristics and influencing factors of evapotranspiration in water-saving irrigation paddy field on different space-time scales [J]. Water Resources Protection, 2018, 34(2): 42-51. (in Chinese))
- [16] 王羽辉, 谢三桃, 骆克斌, 等. 现代农业灌溉减排模式的建立与应用[J]. 水资源保护, 2016, 32(1): 161-166. (WANG Yuhui, XIE Santao, LUO Kebin, et al. Establishment and application of modern agricultural irrigation reduction model [J]. Water Resources Protection, 2016, 32(1): 161-166. (in Chinese))
- [17] 常春艳. 黄河三角洲土地利用变化及其水土资源效应[D]. 泰安: 山东农业大学, 2013.
- [18] 王卓然, 赵庚星, 高明秀, 等. 黄河三角洲垦利县夏季土壤水盐空间变异及土壤盐分微域特征[J]. 生态学报, 2016, 36(4): 1040-1049. (WANG Zhuolan, ZHAO Gengxing, GAO Mingxiu, et al. Spatial variability of soil water and salt and micro domain characteristics of soil salt in Kenli County, Yellow River Delta [J]. Acta Zoologica Sinica, 2016, 36(4): 1040-1049. (in Chinese))
- [19] 安乐生. 黄河三角洲地下水水盐特征及其生态效应[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2012.
- [20] 吕真真, 杨劲松, 刘广明, 等. 黄河三角洲土壤盐渍化与地下水特征关系研究[J]. 土壤学报, 2017, 54(6): 1377-1385. (LYU Zhenzhen, YANG Jinsong, LIU Guangming, et al. Relationship between soil salinization and groundwater characteristics in the Yellow River Delta [J]. Acta Pedologica Sinica, 2017, 54(6): 1377-1385. (in Chinese))
- [21] 崔树强. 黄河断流对黄河三角洲生态环境的影响[J]. 海洋科学, 2002(7): 42-46. (CUI Shuqiang. The impact of the Yellow River cutoff on the ecological environment of the Yellow River Delta [J]. Marine science, 2002(7): 42-46. (in Chinese))
- [22] 庞桂斌, 张保祥, 张双. 黄河三角洲地区农业用水水平分析[J]. 济南大学学报(自然科学版), 2014, 28(6):

- 416-420. (PANG Guibin, ZHANG Baoxiang, ZHANG Shuang. Analysis of agricultural water use level in the Yellow River Delta [J]. Journal of Jinan University (Natural Science Edition), 2014, 28 (6): 416-420. (in Chinese))
- [23] 许学工. 黄河三角洲土地结构分析[J]. 地理学报, 1997 (1):18-26. (XU Xuegong. Analysis of land structure in the Yellow River Delta[J]. Acta Geographica Sinica, 1997 (1):18-26. (in Chinese))
- [24] 李法虎. 土壤物理化学[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006:244-246.
- [25] BATCHELOR C H. The accuracy of evapotranspiration estimated with the FAO modified penman equation[J]. Irrigation Science, 1984, 5(4):223-233.
- [26] BOWEN L S. The ratio of heat losses by conduction and by evaporation from any water surface [J]. Physical Review, 1926, 27(6):779.
- [27] THORNTHWAITTE C W, HOLZMAN B. The determination of evaporation from land and water surfaces [J]. Monthly Weather Review, 1939, 67(1):4-11.
- [28] PENMAN H L. Natural evaporation from open water, bare soil and grass [J]. Proceedings of the Royal Society Society A: Mathematical and Physical Sciences, 1948, 193 (1032):120-145.
- [29] MONTEITH J L. Evaporation and environment [J]. Symposium of the Society of Exploratory Biology, 1965, 19:205-234.
- [30] JENSEN M E, BURMAN R D, ALLEN R G. Evapotranspiration and irrigation water requirements: a manual[J]. ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice, 1990(70):311-327.
- [31] 刘绍民, 孙中平, 李小文, 等. 蒸散量测定与估算方法的对比研究[J]. 自然资源学报, 2003 (2):161-167. (LIU Shaomin, SUN Zhongping, LI Xiaowen, et al. Comparison of evapotranspiration measurement and estimation methods [J]. Journal of Natural Resources, 2003(2):161-167. (in Chinese))
- [32] 刘钰, PEREIRA L S. 对 FAO 推荐的作物系数计算方法的验证[J]. 农业工程学报, 2000(5):26-30. (LIU Yu, PEREIRA L S. Verification of the calculation method of crop coefficient recommended by FAO [J]. Acta Agriculturae Sinica, 2000(5):26-30. (in Chinese))
- [33] ALLEN R G, PRUITT W O, WRIGHT J L, et al. A recommendation on standardized surface resistance for hourly calculation of reference ET_0 by the FAO56 Penman-Monteith method [J]. Agricultural Water Management, 2006, 81(1/2):1-22.
- [34] MOHAMED A, EVAN G R D. On the accuracy of crop production and water requirement calculations: process-based crop modeling at daily, semi-weekly, and weekly time steps for integrated assessments [J]. Journal of Environmental Management, 2019, 238:460-472.
- [35] 段爱旺, 信乃谄, 王立祥. 节水潜力的定义和确定方法[J]. 灌溉排水, 2002 (2):25-28. (DUAN Aiwang, XIN Naiquan, WANG Lixiang. Definition and determination of water saving potential [J]. Irrigation and Drainage, 2002 (2):25-28. (in Chinese))
- [36] 刘战东, 段爱旺, 肖俊夫, 等. 旱作物生育期有效降水量计算模式研究进展[J]. 灌溉排水学报, 2007 (3):27-30. (LIU Zhandong, DUAN Aiwang, XIAO Junfu, et al. Research progress on calculation model of effective precipitation in dry crop growth period [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2007(3):27-30. (in Chinese))
- [37] 张妙仙, 杨劲松. 灌溉入渗条件下农田土壤水盐动态简化模型及应用[J]. 土壤学报, 2002(1):75-82. (ZHANG Miaoxian, YANG Jinsong. Simplified dynamic model of soil water and salt under irrigation infiltration and its application [J]. Acta Pedologica Sinica, 2002(1):75-82. (in Chinese))
- [38] 杨劲松, 陈小兵, 胡顺军, 等. 绿洲灌区土壤盐分平衡分析及其调控[J]. 农业环境科学学报, 2007(4):1438-1443. (YANG Jinsong, CHEN Xiaobing, HU Shunjun, et al. Analysis and control of soil salt balance in oasis irrigation area [J]. Journal of Agro-Environmental Science, 2007(4):1438-1443. (in Chinese))
- [39] 师吉华, 李秀启, 董冠仓, 等. 黄河山东段水环境质量分析与评价[J]. 渤海大学学报(自然科学版), 2017, 38 (3):229-235. (SHI Jihua, LI Xiuqi, DONG Guancang, et al. Analysis and evaluation of water environment quality in Shandong section of the Yellow River [J]. Journal of Bohai University (Natural Science Edition), 2017, 38 (3):229-235. (in Chinese))
- [40] TANJI K K. Agricultural salinity assessment and management[M]. New York: American Society of Civil Engineering, 1990.
- [41] 苏永秀, 李政, 吕厚荃. 水分盈亏指数及其在农业干旱监测中的应用[J]. 气象科技, 2008 (5):592-595. (SU Yongxiu, LI Zheng, LYU Houquan. Water profit and loss index and its application in agricultural drought monitoring [J]. Meteorological Science and Technology, 2008 (5):592-595. (in Chinese))
- [42] 李应林, 高素华, 郭建平. 我国主要旱地作物水分供需状况分析及改善对策[J]. 气候与环境研究, 2004 (2):331-341. (LI Yinglin, GAO Suhua, GUO Jianping. Analysis of water supply and demand of main dryland crops in China and improvement countermeasures [J]. Climate and Environment Research, 2004 (2):331-341. (in Chinese))
- [43] 尹春艳. 黄河三角洲滨海盐渍土水盐运移特征与调控技术研究[D]. 烟台: 中国科学院烟台海岸带研究所, 2017.