

不同水文年型下河北旱碱麦需水量和缺水量的分析

秦俊灵^{1,2,3}, 魏瑞江^{1,2,4}, 魏秀梅³, 秦玉萍⁵, 任妙春³, 李琛³

(1. 河北省气象与生态环境重点实验室, 河北石家庄 050021; 2. 中国气象局雄安大气边界层重点开放实验室, 河北雄安 071800;
3. 河北省沧州市气象局, 河北沧州 061000; 4. 河北省气象科学研究所, 河北石家庄 050021; 5. 河北省怀来县气象局, 河北怀来 075000)

摘要:为量化河北旱碱麦各生育期需水量及缺水量指标,利用旱碱麦主产区气象观测资料,采用皮尔逊Ⅲ型曲线以降水频率界限值25%、50%、75%确定丰水年、平水年、枯水年、特枯水年4种水文年型及相应有效降水量,利用Penman-Monteith模型并结合作物系数法和土壤修正系数法,求得在4种水文年型下旱碱麦的需水量、缺水量和灌溉需求指数及其时空分布特征。结果表明,1988—2022年间,旱碱麦全生育期需水量显著增加,降水量、有效降水量、缺水量均呈增多趋势。缺水量和灌溉需求指数随年降水量的减少均明显增大,4种年型下缺水量分别为97.7、106.5、126.2和149.7 mm,灌溉需求指数分别为0.56、0.60、0.70和0.79;而不同年型间需水量差异较小,均值为181.0 mm。空间上,需水量呈北多南少,缺水量呈西北多东南少。各生育时期需水特征有明显差异,返青期至灌浆期需水量较大,水分亏缺较为严重,其中返青期亏缺最严重,需水量、缺水量和灌溉需求指数分别为48.1 mm、38.7 mm和0.80。综合来看,根据水文年型按照不同比例进行旱碱麦调水灌溉,可节约灌溉成本,保障旱碱麦稳产高产;区划时侧重向南部孟村、盐山、海兴县市扩展,可实现旱碱麦播种面积的有效扩展,加强盐碱地综合利用。

关键词:旱碱麦;水文年型;需水量;缺水量;灌溉需求指数

中图分类号:S512.1;S311

文献标识码:A

文章编号:1009-1041(2025)03-0404-08

Analysis of Water Demand and Water Deficit of Drought-Alkali Wheat in Hebei under Different Hydrological Year Patterns

QIN Junling^{1,2,3}, WEI Ruijiang^{1,2,4}, WEI Xiumei³, QIN Yuping⁵, REN Miaochun³, LI Chen³

(1. Key Laboratory of Meteorology and Ecological Environment of Hebei Province, Shijiazhuang, Hebei 050021, China;
2. China Meteorological Administration Xiong'an Atmospheric Boundary Layer Key Laboratory, Xiong'an, Hebei 071800, China;
3. Cangzhou Meteorological Bureau, Cangzhou 061000, China; 4. Meteorological Science Institute of Hebei Province, Shijiazhuang, Hebei 050021, China; 5. Huailai County Meteorological Bureau, Huailai, Hebei 07500, China)

Abstract: In order to quantify the water demand and water deficit indices of drought-alkali wheat in Hebei Province at each growth stage, using the meteorological observation data of the main production areas of drought-alkali wheat, the Pearson III type curve was used to determine the four hydrological annual types of wet year, average year, dry year and extreme dry year and the corresponding effective precipitation. Characteristics of water deficit and irrigation demand index and their spatial and temporal distribution characteristics were determined using the Penman-Monteith model, combined with the crop coefficient method and the soil correction coefficient method. The results showed that from 1988 to 2022, the water demand of drought-alkali wheat increased significantly during the whole growth period, and the precipitation, effective precipitation, and water deficit showed an increasing trend. The water deficit and irrigation demand indices increased significantly with the decrease of annual precipitation. For the four hydrological annual types, the water deficit were 97.7,

收稿日期:2024-01-09 修回日期:2024-03-20

第一作者 E-mail:1005647511@qq.com(秦俊灵)

通讯作者 E-mail:weirj6611@sina.com(魏瑞江)

106.5, 126.2 and 149.7 mm, respectively; the irrigation demand indices were 0.56, 0.60, 0.70 and 0.79, respectively, while the difference in water demand was 181.0 mm among different year patterns. Spatially, the water demand was more in the north and less in the south, and the water deficit was more in the northwest and less in the southeast. There were obvious differences in the characteristics of water demand at different growth stages, and the water demand from the reviving stage to the grain filling stage was larger, and the water deficit was more serious. The deficit was the most serious at the reviving stage, with the water demand, water deficit and irrigation demand indices were 48.1 mm, 38.7 mm, and 0.80, respectively. As a whole, the irrigation of drought-alkali wheat can be carried out according to the hydrological year with different proportions, which can save irrigation costs and ensure the stable and high yield of drought-alkali wheat. Expansion to Mengcun, Yanshan, and Haixing counties and cities in the south can effectively expand the sowing area of drought-alkali wheat and strengthen the comprehensive utilization of saline-alkali land.

Keywords: Drought alkali wheat; Hydrological year type; Water demand; Water deficit; Irrigation demand index

河北旱碱麦是一种抗逆性和适应性强,可在旱碱地上种植的小麦品种,近年种植面积达 10 万 hm^2 。河北为典型的暖温带大陆季风气候区,具有降水集中、干旱发生频繁的气候特征,在小麦长达近 8 个月(10 月中旬至次年 5 月底)的生长季中,降水量仅占全年降水量的 20.5%,不能满足小麦生长的需求。盐碱地的地下水含盐量较高,不能直接用于灌溉,因而旱碱麦的灌溉用水多是调水灌溉,灌溉成本明显高于普通冬小麦。因此,确定旱碱麦各生育时期需水量指标,掌握降水、需水、缺水特性,对节约灌溉成本,保障旱碱麦稳产高产具有重要意义。

目前,针对小麦水分供需特征研究已有大量报道,研究方法均为利用 Penman-Monteith 模型^[1-2]和作物系数法^[3],估算出中国不同地区冬小麦需水量和缺水量。如孙爽等^[4]基于中国 356 个站点冬小麦需水量数据分析,发现中国冬小麦需水量呈现西北部高、东南部低的分布特征,且华南及长江中下游冬麦区水分满足水平较好,其他区域不能满足水分需求;张力等^[5]定量计算出了黄淮海地区冬小麦生育期年均缺水量为 264 mm,且随着气温的不断升高,灌溉需求有加重趋势;胡玮等^[6-7]估算出了冀京津区域冬小麦全生育期缺水量为 291~381 mm,缺水量较多的地区为河北中东部沧州、衡水市一带;赵晗等^[8]提出,河北南部平原地区冬小麦生育期灌溉需水量 271~350 mm,返青一拔节期、拔节一抽穗期和抽穗一灌浆期灌溉需水量分别占全生育期需水量的 26%、

26%和 29%。但前人的研究多数未考虑到土壤因素对作物需水特性的影响,且研究对象均为常规条件下种植的小麦,对种植在盐碱化程度较高土壤上的旱碱麦水分供需特征的分析鲜有报道。

为了量化河北旱碱麦各生育期需水量及缺水量指标,本研究利用河北旱碱麦主产区 1988—2022 年气象观测资料和 2009—2022 年农业气象观测资料,采用皮尔逊 III 型曲线^[9]确定降雨频率界限值分别为 25%、50%、75% 的 4 种水文年型及其相应的有效降水量,利用 Penman-Monteith 模型计算参考作物需水量,并结合作物系数法和土壤修正系数法^[10]估算作物需水量,进而求得在 4 种水文年型下旱碱麦的需水量、缺水量和灌溉需求指数特征指标及其时空分布特征,以期及早碱麦节水灌溉技术的开展和种植区域的扩展提供科学依据。

1 资料与方法

1.1 资料来源

气象数据来源于河北省气象局。河北旱碱麦主产区位于河北中东部黄骅、海兴、青县、沧县、孟村和盐山 6 个县市,选取主产区 6 个气象观测站数据,包括 1988—2022 年逐日降水量(mm)、日平均、最高及最低气温($^{\circ}\text{C}$)、平均相对湿度(%),日照时数(h)、平均风速($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)等常规气象数据。农业气象资料采用主产区农业气象观测站 2009—2022 年旱碱麦生育期、10~50 cm 土壤墒情监测等人工观测资料。

根据旱碱麦生长过程生理及形态特征变化,参照其生育状况观测记录报表,采用各生育时期观测普遍期的上四分位日期作为该时期的起止时

间^[11],将旱碱麦全生育期划分为播种期(I)、出苗期(II)、分蘖期(III)、越冬期(IV)、返青期(V)、拔节期(VI)、抽穗期(VII)和灌浆期(VIII)(表 1)。

表 1 旱碱麦各生育时期起止日期及天数

Table 1 Date and duration of each growth stage of drought-alkali wheat from sowing to harvest

序号 Serial number	生育期 Growth stage	起止时间(月/日) Date(month/day)	天数 Days/d
I	播种期 Sowing	10/4—10/9	6
II	出苗期 Seedling	10/10—11/3	25
III	分蘖期 Tillering	11/4—11/28	25
IV	越冬期 Overwintering	11/29—3/1	94
V	返青期 Reviving	3/2—4/13	43
VI	拔节期 Jointing	4/14—5/1	18
VII	抽穗期 Heading	5/2—5/17	16
VIII	灌浆期 Grain filling	5/18—6/4	18

1.2 研究方法

1.2.1 水文年型及有效降水量的计算

根据旱碱麦主产区各站点多年降水资料,确定旱碱麦全生育期降水量资源序列,然后利用皮尔森 III 型曲线^[9]进行频率分析,参照前人研究结果^[12-13],以降水频率 25%、50%、75%作为丰水年(降水频率 ≥ 25%)、平水年(50% ≤ 降水频率 < 25%)、枯水年(75% ≤ 降水频率 < 50%)、特枯水年(降水频率 < 75%)划分的界限值(图 1),进而确定 4 种水文年型下的旱碱麦全生育期降水量和出现年份。

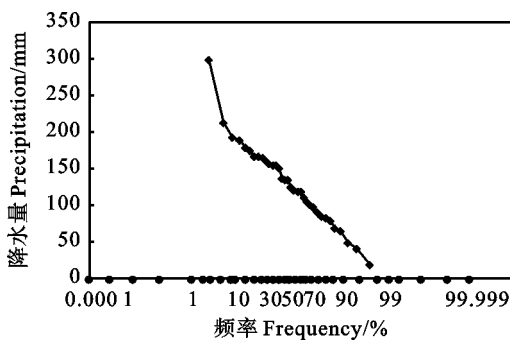


图 1 1988—2022 年旱碱麦全生育期降水量的皮尔森 III 型频率曲线

Fig. 1 Pearson III curve of precipitation during the whole growth period of drought-alkali wheat from 1988 to 2022

有效降水量是降水中可保留在根层土壤并被旱碱麦根系实际利用的净水量,代表总降水量中的有效部分^[14]。本研究采用美国农业部土壤保持局推荐的有效降水量分析方法,该方法是目前有效降水计算较为公认和普遍推广的方法之

一^[15-16]。计算公式如下:

$$R_e = R_i(4.17 - 0.2R_i) / 4.17 \quad R_i < 8.3 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1} \quad (1)$$

$$R_e = 4.17 + 0.1R_i \quad R_i \geq 8.3 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1} \quad (2)$$

式中, R_e 、 R_i 分别为日有效降水量和日降水量。

1.2.2 参考作物需水量计算

利用 FAO 推荐的 Penman-Monteith 模型计算参考作物需水量^[1-2],计算公式为:

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + r \frac{900}{t + 273} u_2 V_{PD}}{\Delta + r(1 + 0.34u_2)} \quad (3)$$

式中, ET_0 为参考作物潜在蒸散量 ($\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$); V_{PD} 为饱和水汽压与实际水汽压差 (kPa); u_2 为日平均风速 ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$); R_n 为每天净辐射 ($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$); r 为干湿表常数 ($\text{kPa} \cdot \text{°C}^{-1}$); t 为日平均温度; G 为土壤热通量 ($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$)。其中, R_n 、 G 、 Δ 、 u_2 可通过常规气象观测资料计算求得。

1.2.3 旱碱麦需水量计算

旱碱麦需水量是指满足作物蒸腾量及田间蒸散量之和,受作物及土壤因素影响,因旱碱麦种植区土壤盐碱化程度较高,对旱碱麦的实际蒸散量有较大的影响。因此,本研究引进土壤水分修正系数^[10]。并利用相对有效含水率幂函数进行计算,计算公式如下:

$$f(\omega) = C \left(\frac{\theta_i - \theta_{wp}}{\theta_j - \theta_{wp}} \right)^d \quad \theta_i < \theta_j \quad (4)$$

$$f(\omega) = 1.0 \quad \theta_i \geq \theta_j \quad (5)$$

式中: $f(\omega)$ 为土壤水分修正系数, θ_i 为计算时数内的平均土壤含水率; θ_{WP} 为凋萎系数; θ_j 为田间持水率; C 、 d 为经验系数,河北中东部县市取1。旱碱麦各生育时期土壤修正系数如表2。

因此,旱碱麦需水量计算公式为:

$$ET_c = K_c \times f(\omega) \times ET_0 \quad (6)$$

式中, ET_c 为旱碱麦需水量(mm); K_c 参考冬小麦作物系数^[3],采用分段单值平均法确定。

表2 旱碱麦各生育时期土壤修正系数

Table 2 Soil correction coefficients of drought-alkali wheat at different growth stages

生育期 Growth stage	土壤修正系数 Soil correction coefficient
播种期 Sowing	0.53
出苗期 Seedling	0.53
分蘖期 Tillering	0.48
越冬期 Overwintering	0.40
返青期 Reviving	0.43
拔节期 Jointing	0.36
抽穗期 Heading	0.34
灌浆期 Grain filling	0.35

1.2.4 旱碱麦缺水计算

旱碱麦各生育时期缺水是该生育时期的旱碱麦需水量与有效降水量之差,计算公式^[17]如下:

$$R_1 = \sum_{n=1}^N ET_c - \sum_{n=1}^N R_e \quad (7)$$

式中, R_1 为缺水(mm); N 为生育时期日数(d)。

1.2.5 灌溉需求指数计算

将缺水与需水量的比值定义为灌溉需求指数(IDI),反应作物生长对灌溉的依赖程度。计算公式^[18]为:

$$IDI = R_1 / ET_c \quad (8)$$

1.3 数据处理

利用 Microsoft Excel 和 SPSS 统计软件,采用皮尔逊相关系数、线性回归等方法进行数理统计分析,并进行显著性检验。利用 Surfer 软件,采用反距离权重插值方法对各站点要素数据进行空间差值分析^[19],绘制要素等值线空间分布图。

2 结果与分析

2.1 旱碱麦不同生育时期有效降水、需水、缺水及灌溉需求指数特征

旱碱麦的有效降水量在不同生育时期存在

不同程度的差异(图2a)。在丰水年,不同生育时期有效降水量差异不大,变化范围9.0~12.8 mm。在平水年,越冬期、返青期和抽穗期有效降水量较多,变化范围12.0~12.7 mm;播种期有效降水最少,仅有2.1 mm;其他生育时期变化范围7.8~10.9 mm。枯水年间,播种期有效降水量最少,仅有1.3 mm;其他时期有效降水量差异不大,变化范围6.3~8.7 mm。在特枯水年,出苗期、越冬期、返青期和抽穗期有效降水量较多,变化范围6.3~8.2 mm;其他时期变化范围1.1~4.9 mm。不同水文年型间,各时期有效降水量差异明显,大多数时期表现为丰水年>平水年>枯水年>特枯水年。4种年型下旱碱麦全生育期有效降水量分别为91.2、77.2、55.8和40.0 mm。

旱碱麦不同生育时期的需水量也有明显差异(图2b)。播种期、出苗期、分蘖期和越冬期需水量相对较少,均值分别为3.7、12.4、6.7和8.4 mm。返青期开始需水量明显增大,均值为48.1 mm,随生育进程的推进,需水量逐渐减小,拔节期、抽穗期、灌浆期需水量均值分别为38.0、35.2和28.5 mm。不同水文年型间,各时期需水量差异均较小,但大多数按照丰水年、平水年、枯水年、特枯水年顺序依次略微增加,4种年型下旱碱麦全生育期需水量分别为175.0、178.5、180.7和189.7 mm。

除越冬期外,旱碱麦在其他生育时期均存在不同程度的水分亏缺,特别是在返青期及其之后阶段缺水明显严重(图2c)。旱碱麦播种期、出苗期、分蘖期缺水较少,均值分别为1.7、3.3和0.8 mm。越冬期旱碱麦缺水最少,仅特枯水年缺水0.6 mm。返青期是缺水最多阶段,均值达38.7 mm。随着生育进程的推进,缺水逐渐减少,拔节期、抽穗期、灌浆期缺水均值分别为30.3、25.1和20.0 mm。不同水文年型间,各生育时期缺水均随年降水量的减少明显增加。4种年型下旱碱麦全生育期缺水分别为97.7、106.5、126.2和149.7 mm,平水年、枯水年和特枯水年较丰水年分别增加8.8、28.6和52.1 mm,年型间差值较大,表明旱碱麦缺水受年降水量的影响较大,随年降水量的减少而明显增多。

旱碱麦灌溉需求指数随着生育进程先减后增,以越冬期最小,均值仅0.02(图2d)。越冬期之前,旱碱麦灌溉需求指数较低,播种期、出苗期、分蘖期灌溉需求指数均值分别为0.47、0.27、0.11。

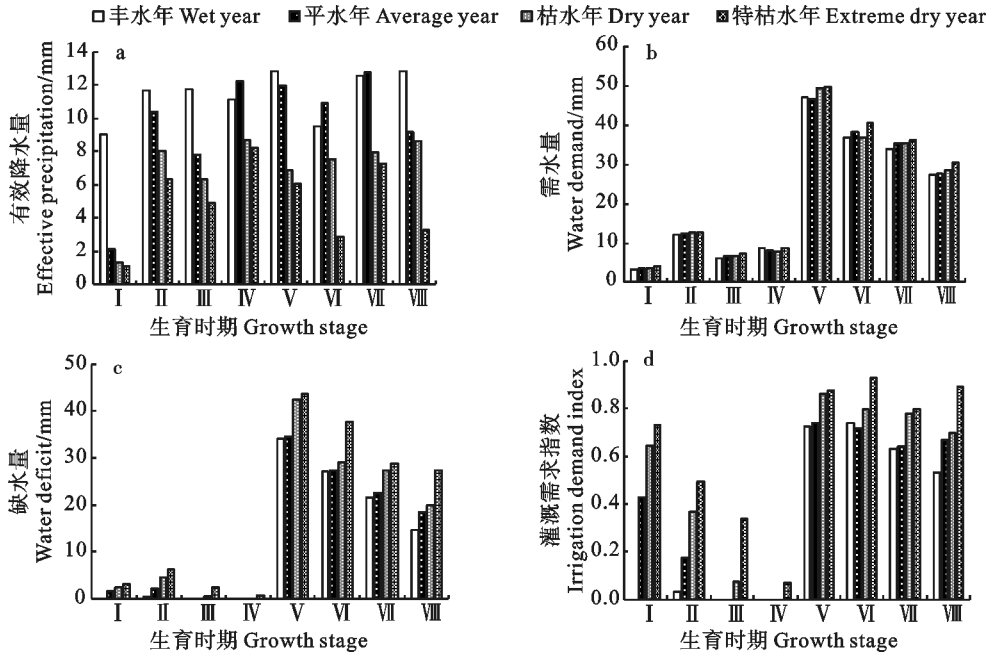


图 2 不同水文年型下河北早碱麦各生育期有效降水量、需水量、缺水量和灌溉需求指数
 Fig. 2 Effective precipitation, water demand, water deficit and irrigation demand index at different growth stages of drought-alkali wheat in Hebei under different hydrological year patterns

返青期开始后早碱麦灌溉需求指数明显增大,返青期、拔节期灌溉指数达到最大,均值均为 0.80,其次抽穗期和灌浆期分别为 0.71、0.70。不同水文年型间,早碱麦各生育期灌溉需求指数也表现为随着降水量的减少明显增加,4 种年型下早碱麦全生育期灌溉需求指数分别为 0.56、0.60、0.70、0.79。

2.2 早碱麦全生育期有效降水、需水、缺水量和灌溉需水指数的时间变化特征

1988—2022 年早碱麦全生育期降水量和有效降水量变化范围分别为 19.8~299.5 mm 和 17.3~101.1 mm,有效降水量大约为降水量的 5~6 成,需水量变化范围为 154.4~204.9 mm,缺水变化范围为 61.3~166.8 mm,灌溉需求指数变化范围为 0.38~0.91(图 3),4 个指标年际波动均较大。从年际波动特点可以看出,早碱麦全生育期降水量、需水量及灌溉需求指数均同降水量及有效降水量具有较好的反位对应关系。经皮尔逊相关性分析,降水量与有效降水量、需水量、缺水、灌溉需求指数的相关系数分别为 0.919 ($P < 0.01$)、-0.365 ($P < 0.05$)、-0.829 ($P < 0.01$)、-0.891 ($P < 0.01$),表明在降水量多的年份,需水量、缺水及灌溉需求指数相应减少。因此,采用不同水文年型来分类统计早碱麦

需水量、缺水及灌溉需求指数,在很大程度上有助于提高灌溉节水的精度。从年际变化特征来看,降水量、有效降水量、需水量、缺水均表现出增多趋势,气候倾向率分别为 8.7、2.6、7.1、4.5 mm · (10 a)⁻¹,但仅需水量增多趋势通过 0.01 水平显著性检验;灌溉需求指数年际变化趋势不明显,近 34 年早碱麦全生育期灌溉需求指数平均值为 0.63。

2.3 早碱麦全生育期有效降水、需水、缺水量和灌溉需水指数的空间分布特征

河北主产区早碱麦全生育期有效降水量、灌溉需求指数的空间差异不明显。丰水年、平水年、枯水年、特枯水年的有效降水量分别为 88.4~94.9、75.0~77.4、51.8~57.3、39.2~43.1 mm,区域间最大差值为 2.4~6.5 mm;4 种水文年型的灌溉需求指数分别为 0.56~0.65、0.60~0.64、0.70~0.76、0.79~0.82,区域间最大差值为 0.03~0.09。两者的空间差异均较小。

河北主产区早碱麦全生育期需水量的空间差异明显(图 4)。需水量在 4 种水文年型下大体上均表现为由北向南减少趋势,大值区多位于青县、沧县和黄骅,4 种水文年型下分别为 173.9~176.0、175.7~178.5、180.7~182.4 和 182.7~189.7 mm;低值区位于孟村,4 种水文年型下分别为 161.9、

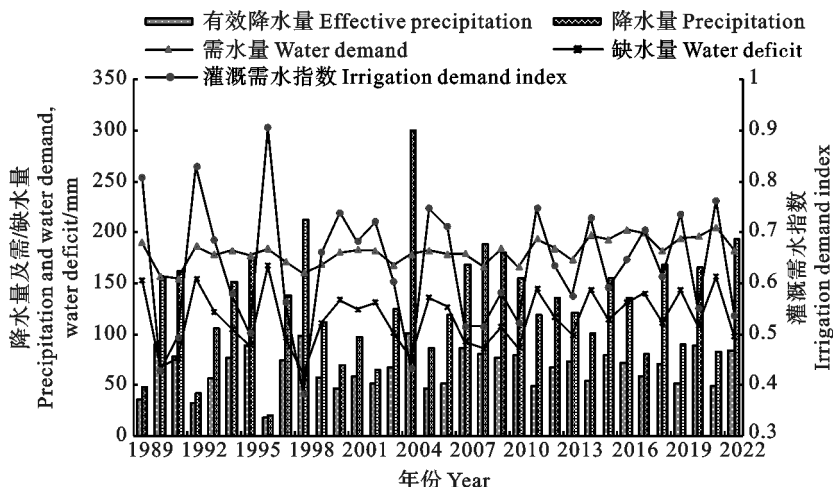


图 3 1988—2022 年旱碱麦全生育期降水及需水情况的年际变化

Fig. 3 Interannual variation of precipitation and water demand during the whole growth period of drought-alkali wheat from 1988 to 2022

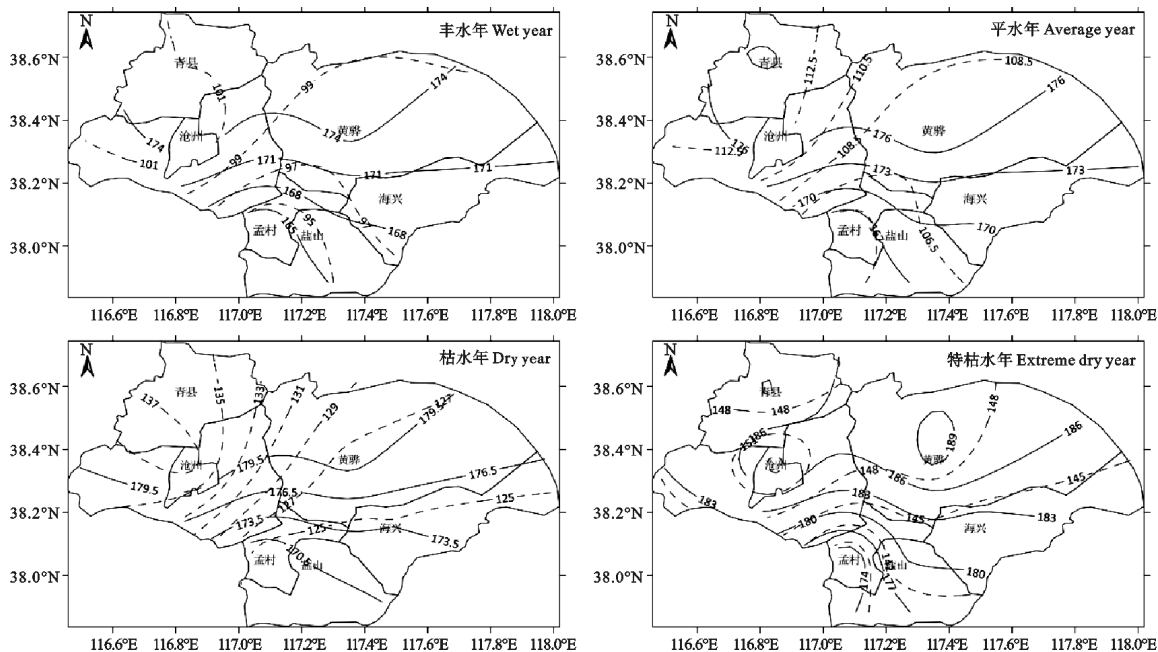


图 4 不同水文年型下旱碱麦全生育期需水量(实线)和缺水(虚线)的空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of water demand(solid line) and water deficit(dotted line) during the whole growth period of drought-alkali wheat under different hydrological year patterns

163.7、167.5、171.2 mm。4 种水文年型下,河北主产区旱碱麦全生育期需水量区域间最大差值依次为 14.2、14.8、15.0 和 18.5 mm,年型间区域差值差异较小。

河北主产区旱碱麦全生育期缺水量的空间差异也明显(图 4)。缺水量在 4 种水文年型下大体上均表现为由西北向东南减少趋势,大值区多位于青县、沧县,4 种水文年型下分别为 100.9~102.9、113.5~113.9、136.2~137.8 和 151.0~155.2 mm;低值区多位于孟村、盐山、海兴,4 种

水文年型下分别为 93.0~94.6、102.7~106.0、123.3~124.9 和 135.4~143.5 mm。4 种水文年型下,旱碱麦主产区缺水量区域间最大差值依次为 9.9、10.9、14.5 和 19.8 mm,年型间区域差值随年降水量的减少而明显增加。

3 讨论

旱碱麦各生育时期土壤修正系数为 0.34~0.53,与于红等^[20]研究天津武清区冬小麦各生育期土壤修正系数 0.52~0.89 相比明显偏小,这是

由于旱碱地土壤的盐碱化在很大程度上加大了土壤对旱碱麦吸水性的负面影响。旱碱麦全生育期需水量为 175.0~189.7 mm, 较于红等^[20]研究获得的冬小麦需水量明显偏少 3~5 成。由此也可以看出, 旱碱地土壤对小麦的影响力要远大于普通土壤, 在研究旱碱麦需水特征分析时增加旱碱地土壤因素的影响是非常有必要的。旱碱地土壤盐碱度有明显的季节变化特征, 经夏季降水冲刷及沉淀作用, 旱碱地土壤含盐量会有所降低, 而随着秋冬季降水量的减少, 春季及夏初旱碱地含盐量会有所增加。本研究虽然测算了各生育时期土壤修正系数, 但在计算旱碱地田间持水量及凋萎系数过程中采用土壤监测建站时测定的数据, 未考虑到土壤含盐量的季节变化对田间持水量及凋萎系数的影响, 因此在今后旱碱麦研究中, 可以开展对旱碱地土壤含盐量变化特征及其对土壤吸水性影响方面的研究, 以进一步增加估算旱碱麦各生育期需水量及缺水率准确率的精度。

旱碱麦播种至越冬期水分亏缺较少, 返青期至灌浆期水分亏缺严重, 其中返青期亏缺最重, 这与姚宁等^[21]研究结论基本一致。该阶段是麦类产量形成的关键时期, 也是麦类灌溉需求最大的阶段, 因此, 在灌溉条件有限条件下, 优先开展返青水的灌溉。旱碱麦全生育期缺水率 97.7~149.7 mm, 与于红等^[20]、胡玮等^[6]的研究结论相比偏少 5~7 成, 这也表明在旱碱麦灌溉管理过程中不能将冬小麦的灌溉经验作为参考, 形成一套旱碱麦专用的灌溉管理体系是非常有必要的。

不同水文年型间, 各生育时期缺水率以及灌溉需求指数差异明显。相较丰水年, 其他年型的缺水率分别增加 8.8、28.6 和 52.1 mm, 灌溉需求指数分别增加 0.04、0.14 和 0.2, 可见随着年降水量的减少, 缺水率及灌溉需求指数明显增多, 与赵晗等^[8]研究结果一致。明确不同水文年型下旱碱麦种植区域需水状况以及作物生长对灌溉的依赖程度, 可以根据当年的水文年型, 按照不同比例进行调水规划。遇到枯水年、特枯水年时, 需要补充灌水 126~150 mm 才能满足旱碱麦的生长需求, 生产中应采用非充分灌溉制度, 优先保证旱碱麦需水关键期的用水, 必要时须适当调整种植结构, 做到减水少减产甚至减水不减产; 相反, 遇到丰水年、平水年时, 需要补充灌水 97~107 mm, 实际生产中可采用充分灌溉, 以追求最高产量。

本研究下近 34 年旱碱麦全生育期需水量有

显著增加趋势, 与胡玮等^[6]研究结果有差异性, 这主要受研究年限的影响, 胡玮研究时间为 1961—2010 年, 这也说明近年需水量变化趋势同历史变化特征具有较大差异。近 34 年旱碱麦全生育期降水量及有效降水量也有增多趋势, 但其气候倾向率明显低于作物需水量, 最终导致旱碱麦全生育期缺水率呈增多趋势。但从灌溉需求指数来看, 其年际变化趋势不明显, 平均值为 0.63, 说明近 34 年来旱碱麦生长对灌溉的依赖程度变化不大。空间上旱碱麦需水量由北向南明显减少, 最终造成旱碱麦缺水率呈西北多东南少的特征, 缺水率区域最大差值达 19.8 mm。因此, 在扩大旱碱麦种植区划时, 可以考虑侧重向南部孟村、盐山、海兴县市扩展, 以减少旱碱麦对灌溉的需水量。

4 结论

在旱碱麦生长进程中, 返青期至灌浆期水分亏缺严重, 其中返青期亏缺最重, 是旱碱麦需水关键期。旱碱麦灌溉时应根据当年的水文年型, 按照不同比例进行调水规划, 枯水年、特枯水年可采用非充分灌溉制度, 优先保证需水关键期用水, 以求保产稳产; 而丰水年、平水年可采用充分灌溉, 以追求最高产量。在扩大旱碱麦种植区划时, 应侧重向南部孟村、盐山、海兴县市扩展, 以实现旱碱麦播种面积的有效扩展, 加强盐碱地综合利用。

参考文献:

- [1] ALLEN R G, PEREIRA L S, RAES D, *et al.* Crop evapotranspiration-guidelines for computing crop water requirements [J]. *FAO Irrigation and Drainage Paper*, 1998, 56: 2-3.
- [2] 宋妮, 孙景生, 王景雷, 等. 河南省冬小麦需水量的时空变化及影响因素[J]. *应用生态学报*, 2014, 25(6): 1694.
SONG N, SUN J S, WANG J L, *et al.* Temporal and spatial variation of water requirement of winter wheat and its influencing factors in Henan Province, China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2014, 25(6): 1694.
- [3] 李春强, 李保国, 洪克勤, 等. 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): 360.
LI C Q, LI B G, HONG K Q, *et al.* Trend of crop water requirement in recent 35 years in Hebei Province [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2009, 17(2): 360.
- [4] 孙爽, 杨晓光, 李克南, 等. 中国冬小麦需水量时空特征分析[J]. *农业工程学报*, 2013, 29(15): 80.
SUN S, YANG X G, LI K N, *et al.* Analysis of spatial and temporal characteristics of water requirement of winter wheat in China [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2013, 29(15): 80.
- [5] 张力, 陈阜, 雷永登. 黄淮海地区冬小麦—夏玉米生育期内水

- 分供需时空变化特征[J]. 中国农业大学学报, 2020, 25(4): 8.
- ZHANG L, CHEN F, LEI Y D. Spatial and temporal characteristics of water supply-demand during the development of winter wheat-summer maize in the Huang-Huai-Hai Region [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2020, 25(4): 8.
- [6] 胡玮, 严昌荣, 李迎春, 等. 冀京津冬小麦灌溉需水量时空变化特征[J]. 中国农业气象, 2013, 34(6): 652.
- HU W, YAN C R, LI Y C, *et al.* Spatial and temporal variation of irrigation water requirement for winter wheat in Jingjin Region [J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2013, 34(6): 652.
- [7] 胡玮, 严昌荣, 李迎春, 等. 气候变化对华北冬小麦生育期和灌溉需水量的影响[J]. 生态学报, 2014, 34(9): 2374-2375.
- HU W, YAN C R, LI Y C, *et al.* Impacts of climate change on winter wheat growing period and irrigation water requirements in the North China Plain [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(9): 2374-2375.
- [8] 赵晗, 刘玉春, 吴迪, 等. 河北省5个县域冬小麦-夏玉米连作灌溉需水特性分析[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2020, 18(4): 187-188.
- ZHAO H, LIU Y C, WU D, *et al.* Analysis of irrigation water requirement characteristics for wheat-maize continuous cropping in the five counties of Hebei Province [J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2020, 18(4): 187-188.
- [9] 车国文. 皮尔逊Ⅲ型曲线的 Excel 绘制法[J]. 辽宁师专学报(自然科学版), 2018, 20(4): 9-10.
- CHE G W. The method of using Excel to plot the Pearson type-III curve [J]. *Journal of Liaoning Teachers Colleges (Natural Science Edition)*, 2018, 20(4): 9-10.
- [10] 彭世彰, 索丽生. 节水灌溉条件下作物系数和土壤水分修正系数试验研究[J]. 水利学报, 2004, 35(1): 20.
- PENG S Z, SUO L S. Water requirement model for crop under the condition of water-saving irrigation [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2004, 35(1): 20.
- [11] 祁贵明, 雒维萍, 霍治国, 等. 柴达木盆地藜麦适宜农业气象指标构建[J]. 中国农业资源与区划, 2022, 43(4): 192-194.
- QI G M, LUO W P, HUO Z G, *et al.* Construction of suitable agrometeorological indexes for quinoa in Qaidam Basin [J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2022, 43(4): 192-194.
- [12] 刘棚辰, 马守田, 黄超, 等. 黄淮海平原夏玉米需水量和缺水时空分布特征[J]. 水土保持学报, 2023, 37(2): 182.
- LIU X C, MA S T, HUANG C, *et al.* Spatial and temporal distribution of water requirement and water deficiency of summer maize in Huang-Huai-Hai Plain [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2023, 37(2): 182.
- [13] 马志红, 许蓬蓬, 朱自玺, 等. 河南省冬小麦灌溉需水量及年型特征[J]. 气象与环境科学, 2009, 32(4): 63.
- MA Z H, XU P P, ZHU Z X, *et al.* Irrigation water requirement for winter wheat and its year pattern characteristics in Henan Province [J]. *Meteorological and Environmental Sciences*, 2009, 32(4): 63.
- [14] 姬兴杰, 成林, 朱业玉, 等. 河南省冬小麦需水量和缺水量的时空格局[J]. 生态学杂志, 2014, 33(12): 3270.
- JI X J, CHENG L, ZHU Y Y, *et al.* Spatial and temporal characteristics of water requirement and water deficit of winter wheat in Henan Province [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2014, 33(12): 3270.
- [15] DÖLL P, SIEBERT S. Global modeling of irrigation water requirements [J]. *Water Resources Research*, 2002, 38(4): 1037.
- [16] 李勇, 杨晓光, 叶清, 等. 1961—2007年长江中下游地区水稻需水量的变化特征[J]. 农业工程学报, 2011, 27(9): 176.
- LI Y, YANG X G, YE Q, *et al.* Variation characteristics of rice water requirement in middle and lower reaches of Yangtze River during 1961-2007 [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2011, 27(9): 176.
- [17] 邵晓梅, 严昌荣. 黄河流域主要农作物的降水盈亏格局分析[J]. 中国农业气象, 2007, 28(1): 41.
- SHAO X M, YAN C R. Study on the pattern of water requirements of main crops and rainfall in the Yellow River Basin [J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2007, 28(1): 41.
- [18] 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): 11.
- 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 Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2009, 25(12): 11.
- [19] 靳国栋, 刘衍聪, 牛文杰, 等. 距离加权反比插值法和克里金插值法的比较[J]. 长春工业大学学报, 2003, 24(3): 53.
- JIN G D, LIU Y C, NIU W J, *et al.* Comparison between inverse distance weighting method and Kriging [J]. *Journal of Changchun University of Technology*, 2003, 24(3): 53.
- [20] 于红, 陈丽丽, 陈思宁, 等. 天津市武清区冬小麦各生育期灌溉需水量分析[J]. 中国农学通报, 2018, 34(10): 19.
- YU H, CHEN L L, CHEN S N, *et al.* Winter wheat in Wuqing of Tianjin: Irrigation requirement of different growth periods [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2018, 34(10): 19.
- [21] 姚宁, 宋利兵, 刘健, 等. 不同生长阶段水分胁迫对旱区冬小麦生长发育和产量的影响[J]. 中国农业科学, 2015, 48(12): 2387.
- YAO N, SONG L B, LIU J, *et al.* Effects of water stress at different growth stages on the development and yields of winter wheat in arid region [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, 48(12): 2387.