



杨晓琳, 王语萌, 石恒煜, 李庆祥, 王显国, 杜太生. 河北低平原适水粮饲模式构建及综合效益评价[J]. 中国农业大学学报, 2024, 29(07): 181-192.
YANG Xiaolin, WANG Yumeng, SHI Hengyu, LI Qingxiang, WANG Xianguo, DU Taisheng. Different water saving grain-forage rotations and comprehensive benefit assessment in the low plains of Hebei Province[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2024, 29(07): 181-192.
DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2024.07.17

河北低平原适水粮饲模式构建及综合效益评价

杨晓琳¹ 王语萌¹ 石恒煜¹ 李庆祥¹ 王显国² 杜太生^{1*}

(1. 中国农业大学 水利与土木工程学院/农业水资源高效利用全国重点实验室, 北京 100083;

2. 中国农业大学 草业科学与技术学院, 北京 100193)

摘要 为推进“粮改饲”进程与发展节水农业, 构建适水型种植制度, 本研究以水资源短缺的河北沧州为研究对象, 聚焦饲草作物和粮食作物, 首先利用作物需水模型 SIMETAW 系统量化 1961—2020 年沧州地区 6 种主要饲草作物(夏播高粱、青贮玉米、饲用燕麦、饲用谷子、粮食作物冬小麦和夏玉米)的需水量及灌溉需水量, 对比分析各作物需水量的时间变化规律及作物间差异, 评估作物需水量的主要气象影响因素; 后采用 ROTAT 模型建立了 5 种多样化粮-饲及饲-饲轮作制度, 基于 Entropy-TOPSIS 对不同轮作模式的等价产量、生物量、经济效益、蛋白产出、生育期及周年需水量与降水耦合度进行综合评价。结果表明: 1) 这 6 种作物的年均生育期需水量表现为冬小麦(463.5 mm) > 夏玉米(366.2 mm) > 夏播高粱(354.6 mm) > 饲用燕麦(351.7 mm) > 青贮玉米(341.8 mm) > 饲用谷子(322.4 mm)。2) 各作物年均生育期灌溉量表现为冬小麦 > 饲用燕麦 > 谷子、夏玉米、夏播高粱。青贮玉米生育期灌溉需水量最低为 106.7 mm。3) 近 60 年来各作物需水量呈下降趋势, 主要由太阳辐射、风速的下降导致。4) 相比传统麦玉模式, 饲用燕麦基的一年两熟模式生育期需水量降低 14.9%~18.8%、灌溉需水量降低 15.1%~19.2%。5) 饲用燕麦基的饲草模式(饲用燕麦-青贮玉米(0.73)、饲用燕麦-饲用谷子(0.63)、饲用燕麦-夏播高粱(0.54))的综合评价指数均明显高于冬小麦-夏玉米(0.32)和冬小麦-夏播高粱(0.37)模式。因此, 本研究建议在兼顾粮食生产的同时, 适当发展饲-饲模式, 对当地水资源的可持续利用及产能有重要意义。

关键词 饲草作物; 需水量; 灌溉需水量; 节水粮饲模式; 节水种植结构

中图分类号 S344

文章编号 1007-4333(2024)07-0181-12

文献标志码 A

Different water saving grain-forage rotations and comprehensive benefit assessment in the low plains of Hebei Province

YANG Xiaolin¹, WANG Yumeng¹, SHI Hengyu¹, LI Qingxiang¹,
WANG Xianguo², DU Taisheng^{1*}

(1. College of Water Resources & Civil Engineering/State Key Laboratory of Efficient Utilization of Agricultural Water Resources, China Agricultural University, Beijing 100083, China;

2. College of Grassland and Technology, China Agricultural University, Beijing 100193, China)

Abstract In order to promote the process of "grain to feed" and develop water-saving agriculture, a water-appropriate planting system should be constructed. This study focused on forage crops and food crops in Cangzhou, Hebei Province, where water is scarce. This study employed the SIMETAW model to quantify

收稿日期: 2024-01-05

基金项目: 国家自然科学基金项目(32071975, 52239002); 国家重点研发计划(2022YFD1900401, 2022YFD1900801)

第一作者: 杨晓琳(ORCID: 0000-0001-9146-8722), 副教授, 主要从事节水种植制度研究, E-mail: yangxiaolin429@cau.edu.cn

通讯作者: 杜太生(ORCID: 0000-0002-6146-0217), 教授, 主要从事农业高效用水研究, E-mail: dutaisheng@cau.edu.cn

the water requirements (ET_c) and irrigation demands (ET_{aw}) of main forage crops (forage oats, silage maize, millet and summer sorghum) and staple grain crops (winter wheat and summer maize) from 1961 to 2020, analyzed the interannual variation trend of ET_c of different tested crops and revealed the effect of meteorological factors on crop ET_c during the past 60 years. The ROTAT model was further used to design five newly diversified forage-based crop rotations and assessed the comprehensive benefit index (CBI) based on Entropy-TOPSIS when considering equivalent yield, biomass, economic benefit, protein yield, water requirements and precipitation coupling degree of different crop rotations. The results showed that: 1) The annual average ET_c of six crops sorted from high to low is winter wheat (463.5 mm) > summer maize (366.2 mm) > summer sorghum (354.6 mm) > forage oats (351.7 mm) > silage maize (341.8 mm) > millet (322.4 mm). 2) Winter wheat had the highest annual average ET_{aw} , followed by forage oats, millet, summer maize, summer sorghum while silage maize had the lowest ET_{aw} . 3) The annual ET_c of six crops showed the decline trend from 1960 to 2020. The correlation analysis showed that solar radiation, sunshine and weed speed had the significant positive effect on ET_c . 4) Compared to the conventional wheat-maize rotation, the forage oats-based rotations decreased ET_c during the growth season by 14.9% to 18.8% and lowered the ET_{aw} by 15.1% to 19.2%. 5) The CBI of forage oats-based rotations (0.54 to 0.73) were obviously higher than winter wheat-based rotations (0.32 to 0.37) based on Entropy-TOPSIS. Therefore, it is important to develop the forage crop-based rotations while considering food production for the sustainable water resources management and capacity in Cangzhou area.

Keywords forage crop; water requirement; irrigation demand; forage-based rotations; water-saving planting structure

针对河北省黑龙港地区水资源短缺现状,种植低耗水作物和发展适水种植制度已经成为该地区农业绿色发展的核心内容^[1]。随着国家“粮改饲”政策的不断深入以及河北省节水压采方案的具体实施,构建适水粮-饲或饲-饲种植制度,逐渐成为该地区种植结构调整的重要基础,是提高农业用水效率,减少地下水超采的重要措施^[2]。

目前,有关华北地区主要粮食作物冬小麦、夏玉米的作物需水量的研究较多^[3-7],但该地区有关饲草作物的需水量报道较少。国内对主要饲草作物需水量的研究取得一定进展,但同种作物在不同地区不同时间的需水量存在较大差异^[8-13]。例如:王冲等^[8]采用作物需水量模型计算了1960—2014年华北和东北地区早播燕麦(4—7月)和晚播燕麦(5—8月)生育期需水量分别为305.1~362.9 mm、279.6~348.9 mm;孙洪仁等^[9]报道我国燕麦需水量范围为280~570 mm,需水强度范围为3.0~4.8 mm/d。陈伟等^[10]基于Penman-Monteith公式报道了黄土高原东部谷子、高粱平均作物需水量分别为527.5和368.1 mm,而且主要集中在6—8月,9月份作物需水量急剧减少;高玮等^[11]基于田间试验报道了陇东旱塬区饲用高粱在不同施氮水平下耗水量为483.4~505.8 mm;高赢磊等^[12]报道了河北不

同品种的青贮玉米耗水量约为337.3~381.9 mm。在新疆北部干旱地区,刘虎等^[13]报道该地区在适宜水分条件下的青贮玉米需水量高达593 mm。

适水种植制度的构建是区域种植结构调整的重要基础。已有研究多针对主要粮食作物和经济作物进行适水种植制度的构建与探索^[14-16]。例如:杨晓琳等^[14]在河北邢台基于10种主要粮经作物构建了11种不同的种植模式,得出春绿豆—夏谷子一年两熟模式的年均生育期需水量最低;Peng等^[15]在河南商丘基于8种主要粮经作物构建了14种一年两熟与两年三熟的不同轮作模式,得到多样化粮经轮作模式比传统麦玉模式周年节水9%~21%,且“冬小麦-夏大豆”-基的轮作模式具有较高的经济效益和蛋白产出;石鹏飞等^[16]基于河北衡水市景县的田间试验分析了7种粮-饲复合种植模式的光合,蛋白及能量效率,得出黑麦草基与春玉米基的一年两熟模式较优,但该研究并未对种植模式的水分利用进行探讨。因此,针对地下水超采区沧州地区,结合粮改饲政策的推行,对践行大食物观^[17]、探索适水粮-饲或饲-饲种植模式至关重要。

本研究拟以水资源短缺的河北沧州为研究对象,聚焦饲草作物和粮食作物,利用作物需水模型

(SIMETAW 模型)系统量化 1961—2020 年沧州主要饲草作物饲用作物需水量及灌溉需水量,揭示主要粮饲作物需水量的时间变化规律及主要气候因素;并通过 ROTAT(作物轮作模式构建模型)构建粮-饲、饲-饲模式,以传统的冬小麦-夏玉米一年两熟制为对照,系统评估新型粮饲种植制度的耗水特征及系统生产力,以期为该地区构建合理的适水粮饲种植制度提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

本项目以河北典型地下水漏斗区沧州为例,沧州市位于河北省东南部($37^{\circ}29' \sim 38^{\circ}57' \text{ N}$, $115^{\circ}42' \sim 117^{\circ}50' \text{ E}$)。该地区属于温带大陆性气候,四季分明、雨热同期、气温年较差大、降水集中。沧州市 1961—2020 年月平均降水与月均温度详见图 1。可知:1960—2020 年该地区年均降水为 573.9 mm,年际间降水差异大,年降水量最多可达 1 161.1 mm,最低为 192.8 mm;年内降水量分布不均,7 月平均降雨量,最高为 189.6 mm,1 月份平均降雨量最低,仅为 2.9 mm,全年降水量的 78.6% 集中在 6—9 月(57.7% 集中在 8 月)。此外,该站点多年平均总辐射量为 854.7 MJ/m^2 ,光资源丰富;多年平均气温为 13.29°C ,最高月平均温度出现在 7 月(27.44°C),最低月平均温度出现在 1 月(-3.26°C)。该地区目前的主要种植模式是冬小麦-夏玉米一年两熟,随着 2019 年沧州市“粮改饲”政策的推行,该地区主要饲草作物的种植面积开始上升,详见图 2。

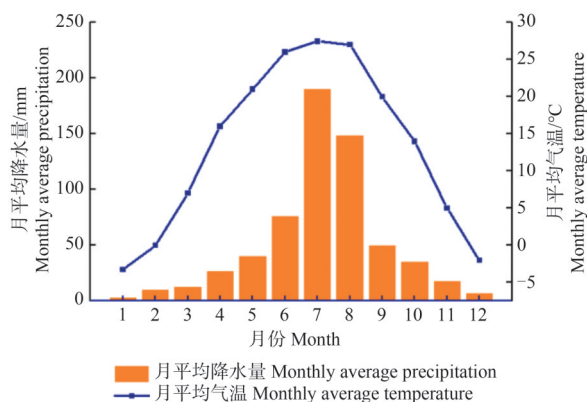


图 1 沧州市 1961—2020 年月平均降水与月均温度

Fig. 1 Average monthly precipitation and temperature in Cangzhou from 1961 to 2020

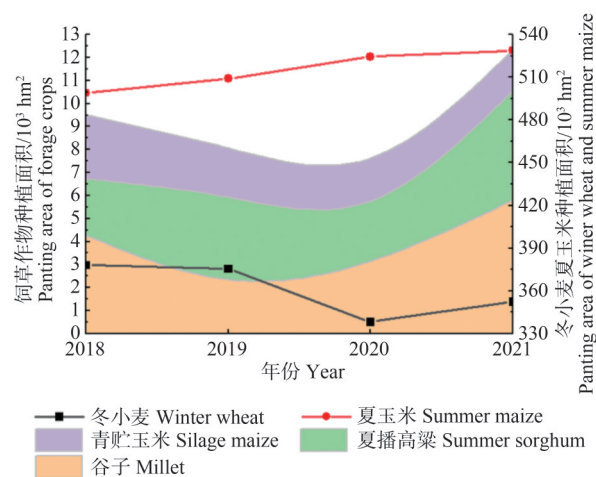


图 2 沧州市 2018—2021 年饲草作物及小麦玉米种植面积

Fig. 2 Forage crops, wheat and maize planting area in Cangzhou from 2018 to 2021

1.2 数据来源

1.2.1 气象数据和作物产量

本研究选取沧州气象站点 60 年(1961—2020 年)的逐日气象数据,包括最高气温、最低气温、平均气温、平均相对湿度、平均风速、日照时数和 24 h 累计降水量以及站点的地理特征数值(经纬度和海拔高度等)(数据来自中国气象数据共享网),进而计算得到 60 年内逐日最大饱和水汽压、最小饱和水汽压、平均水汽压、实际水汽压、露点温度和太阳辐射。

作物产量及生物量数据采用 2018—2020 年,其中燕麦、青贮玉米来自河北省现代农业产业技术体系草业创新团队统计数据;冬小麦、夏玉米、谷子、夏播高粱数据来自《沧州市统计年鉴(2018—2021)》^[18]。

1.2.2 轮作模式作物选取

本研究选取的作物包括河北省“粮改饲”政策下大力发展的 4 种主要饲草作物:青贮玉米、饲用燕麦、饲用谷子和高粱及主要粮食作物冬小麦、夏玉米。各作物的播种、收获日期的参数见表 1。

1.3 作物生育期需水量、灌溉需水量、有效降水量的计算方法

本研究采用基于 Penman-Monteith 公式开发的 SIMETAW 模型^[22]对沧州市饲草作物饲用燕麦、青贮玉米、谷子、夏播高粱以及冬小麦、夏玉米的生育期需水量 ET_c 、有效降水量 E_r 和灌溉需水量 ET_{aw} 等进行系统模拟量化。Penman-Monteith 公式如下^[23]:

表1 研究作物的播种和收获日期

Table 1 Sowing date and harvest date of tested crops

作物 Crop	播种日期 Sowing date	收获日期 Harvest date
饲用谷子 ^[2] Forage millet	07-04	10-21
饲用燕麦 ^[19] Forage oats	03-10	06-16
夏播高粱 ^[20] Summer sorghum	06-18	09-30
青贮玉米 ^[21] Silage maize	06-17	09-25
冬小麦 Winter wheat	10-11	次年 06-10
夏玉米 Summer maize	06-12	10-04

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

式中: ET_0 为参考作物蒸散量, mm; k 为饱和水汽压与温度关系曲线的斜率值, $KPa/^\circ C$; R_n 为作物表面的净辐射量, MJ/m^2 ; γ 为湿度计常数, $KPa/^\circ C$; T 为日平均气温, $^\circ C$; u_2 为 2 m 高处风速, m/s; G 为土壤热通量, $MJ/m^2 \cdot d$; e_s 为空气饱和水汽压, KPa ; e_a 为实际水汽压, $KPa/^\circ C$ 。根据实际情况对风速和太阳辐射等数据进行折算。作物需水量计算如下:

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

式中: ET_c 为作物生育期需水量, mm; ET_0 为参考作物需水量, mm; K_c 为作物系数, 不同作物在不同发育阶段的作物系数不同, 本研究采用 SIMETA W 模型内置的 FAO-56 推荐的作物系数^[23]。作物生育期灌溉需水量计算如下:

$$ET_{aw} = ET_c - E_r \quad (3)$$

式中: ET_{aw} 为作物生育期灌溉需水量, mm; E_r 为作物生育期有效降水, mm, SIMETA W 模型计算所得。当 $ET_c - E_r \geq 0$ 时, ET_{aw} 为两者之差; 当 $ET_c - E_r < 0$ 时, ET_{aw} 取值为 0^[14]。

1.4 降水年型划分及降水耦合度计算

降水年型(丰水年、平水年、枯水年)划分^[14]如下:

$$R_i > R + 0.33\delta \quad \text{丰水年} \quad (4)$$

$$R_i < R - 0.33\delta \quad \text{枯水年} \quad (5)$$

式中: R_i 为逐年降水量, mm; R 为多年平均降水量, mm; δ 为标准偏差。

表 2 为沧州地区 1961—2020 年降水年型分布

情况。可见: 沧州市年降水量 > 631.6 mm 的年份为丰水年(共 18 年), 丰水年年均降水量为 768.9 mm; 年降水量在 516.2~631.6 mm 的年份为平水年(共 21 年), 平水年年均降水为 575.8 mm; 年降水量 < 516.2 mm 的年份为枯水年(共 21 年), 枯水年平均降水为 404.7 mm。

降水耦合度(PCD, λ)为在某种作物或某种种植模式在特定生长阶段, 作物需水量与自然降水之间的满足程度, 取值范围为 $[0, 1]$ 。计算公式为^[24]:

$$\lambda_n = \begin{cases} 1 & (P_n > ET_{cn}) \\ P_n / ET_{cn} & (P_n < ET_{cn}) \end{cases} \quad (6)$$

式中: λ_n 为各作物或各轮作模式需水与自然降水的耦合度; P_n 为各作物或各轮作模式的各作物生长阶段的自然降水总量, mm; ET_{cn} 为各作物或各轮作模式的作物生长季的需水量总和, mm。

1.5 种植模式需水量及系统产出计算

本研究采用瓦赫宁根大学耕作制度生态研究组开发的 ROTAT 模型^[25], 基于当地气候和水资源条件、土壤条件、农学标准、作物信息(包括种类和属性、作物生长发育特性、作物需水特性、种植频率、作物间相互关系和轮作周期等), 综合当地形成的多年种植习惯与观念, 构建了含冬小麦-夏玉米在内的 5 种粮-粮、粮-饲、饲-饲等轮作模式。种植模式的需水量计算公式如下:

$$ET = \sum_{i=1}^n ET_{ci} + \sum_{j=1}^n E_j \quad (7)$$

$$E_j = OK_c \times ET_0 \quad (8)$$

式中: ET 为各轮作模式的周年需水量, mm; ET_{ci} 为第 i 季轮作作物的生育期需水量, mm; E_j 为第 j 季休闲期土壤蒸发量, mm; OK_c 为休闲期作物系数。

表 2 沧州市 1961—2020 年降水年型划分

Table 2 Classification of precipitation types in Cangzhou from 1961 to 2020

丰水年 Wet year		平水年 Normal year				枯水年 Dry year			
年份 Year	降水量/mm Precipitation	年份 Year	降水量/mm Precipitation	年份 Year	降水量/mm Precipitation	年份 Year	降水量/mm Precipitation	年份 Year	降水量/mm Precipitation
1961	672.0	1990	690.8	1962	563.2	1998	551.8	1965	322.3
1964	1 161.1	1994	680.9	1963	530.6	2004	537.1	1968	246.5
1966	673.6	1995	852.4	1967	621.3	2007	553.6	1975	398.1
1969	837.2	2003	681.0	1970	626.4	2008	627.0	1979	485.0
1971	807.2	2009	747.8	1972	618.1	2010	611.2	1983	357.3
1973	682.8	2012	740.1	1974	542.2	2011	533.2	1986	362.1
1977	1 065.6	2018	639.3	1976	571.2	2013	579.1	1989	382.5
1978	691.8			1981	542.0	2015	608.8	1991	501.8
1980	641.3			1982	565.6	2017	523.0	1992	408.6
1985	662.8			1984	615.2	2020	566.1	1993	492.8
1987	912.0			1988	598.8			1996	471.3

种植模式的系统产出,包含模式的等价产量,生物量,经济效益,蛋白产出,计算公式如下:

$$EY_i = Yield_i \times \frac{Price_i}{wheat\ price} \tag{9}$$

$$EB_i = Yield_i \times Price_i - Cost_i \tag{10}$$

$$PC_i = Yield_i \times \beta_i \tag{11}$$

式中: EY_i 为 i 作物作物等价产量, kg/hm^2 , 以冬小麦价格 wheat price 为基准折算; $Yield_i$ 为 i 作物产量, kg/hm^2 ; $Price_i$ 为 i 作物价格, $Yuan/kg$; EB_i 为 i 作物净经济效益, $元/hm^2$; $Cost_i$ 为 i 作物的生产成本, $元/hm^2$, 包括种子、化肥、灌溉、杀虫剂、耕种等过程产生的费用; PC_i 为 i 作物蛋白产量, kg/hm^2 , 以各作物蛋白含量 β_i 进行折算^[24]。各作物市场价格来自《中国农产品价格调查年鉴》^[26]。

1.6 数据分析方法

用 Excel 2018、SPSS 21.0、Origin2019 等软件进行数据整理、分析和作图。采用 ANOVA 分析比较不同作物或不同轮作模式的生育期需水、灌溉需水量;采用皮尔逊相关系数分析各作物需水量与气象因子的关系。采用 Entropy-TOPSIS 模型^[27]综合考虑各轮作模式的等价产量、生物量、经济效益、蛋白产出、周年需水量及降水耦合度进行不同轮作模

式的综合评价。

2 结果与分析

2.1 1961—2020 年沧州市主要粮饲作物生育期需水量、有效降水量、灌溉需水量比较

采用 SIMETAW 模型对 6 种粮饲作物的生育期需水量、有效降水量和灌溉需水量进行了系统计算,结果见图 3。由图 3(a)可知:6 种作物的年均生育期需水量表现为冬小麦(463.5 mm) > 夏玉米(366.2 mm) > 夏播高粱(354.6 mm) > 饲用燕麦(351.7 mm) > 青贮玉米(341.8 mm) > 饲用谷子(322.4 mm);冬小麦生育期需水量最高,显著高于夏玉米、夏播高粱、饲用燕麦、青贮玉米,饲用谷子生育期需水量最低。

由图 3(b)可知,6 种作物的年均生育期有效降水表现为夏玉米最大(250.3 mm)、夏播高粱(244.4 mm)、青贮玉米(235.7 mm)、饲用谷子(196.6 mm),冬小麦和饲用燕麦的生育期有效降水量最低,分别为 108.6、77.3 mm。同时,同一作物生育期有效降水量年际间变异大,主要由于长时间序列的年内和年际间自然降水存在较大差异所致。

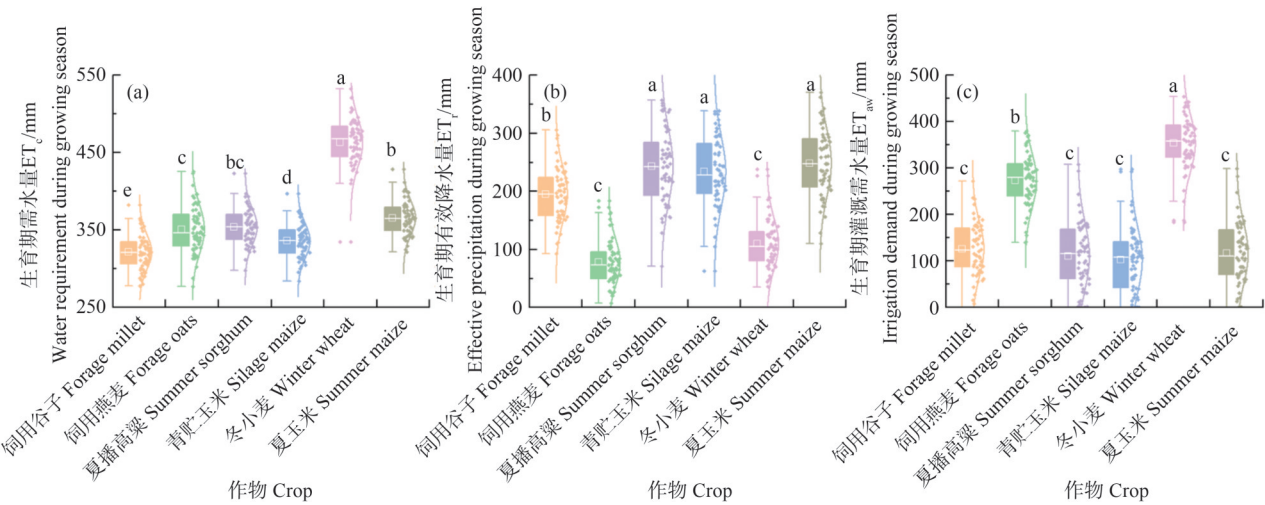


图3 沧州市1961—2020年6种主要粮饲作物的生育期需水量(a)、生育期有效降水量(b)与生育期灌溉需水量(c)

Fig. 3 Water requirement during growing season (a), effective precipitation during growing season (b) and irrigation demand during growing season (c) of seven tested crops in Cangzhou during the period from 1961 to 2020

由图3(c)可知,6种作物的年均生育期灌溉需水量表现为冬小麦(354.9 mm) > 饲用燕麦(274.3 mm) > 饲用谷子(125.7 mm) > 夏玉米(116.4 mm) > 夏播高粱(110.2 mm) > 青贮玉米(106.7 mm)。冬小麦生育期灌溉需水量最高,显著高于其他作物;青贮玉米灌溉需水量最低。

2.2 1961—2020年沧州市主要粮饲作物生育期需水量与气象因素的关系

图4展示了沧州地区1961—2020年6种主要粮饲作物的生育期需水量逐年变化情况。可见:1961—2020年间各粮饲作物的生育期需水量呈显著下降趋势($P<0.05$);从长时间变化趋势来看,冬小麦生育期需水量高于其他作物,燕麦、谷子、夏播高粱、夏玉米及青贮玉米的生育期需水量的年均变化率约为0.5 mm/年。

根据沧州气象站1961—2020年6种气象数据绘制气象因子年变化趋势图,结果见图5。由图5(a)~(c)可见,沧州地区1961—2020年逐年日均太阳辐射、日均日照时数与日均风速均呈显著下降趋势($P<0.05$),60年间分别下降了2.25 KJ/m²、1.85 h、2.03 m/s。由图5(d)~(e)可见,日均降水量和相对湿度,呈现略微下降趋势,年际间波动大。由图5(f)可见,逐日平均气温则呈现显著上升趋势($P<0.05$),年均变化速率为0.02 ℃。

图6展示了6种研究作物生育期需水量与6种气象因子的相关性。可见6种作物的生育期需水量

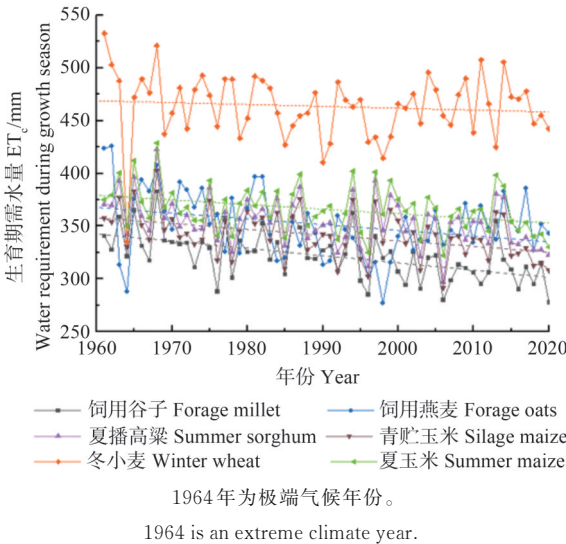


图4 沧州市1961—2020年6种主要粮饲作物的生育期需水量的逐年变化

Fig. 4 Yearly variation of ET_c of six tested crops in Cangzhou from 1961 to 2020

与太阳辐射、日照时数、风速呈正相关,与日降水、相对湿度呈负相关。其中,6种作物的生育期需水量与太阳辐射($P<0.01$)与风速($P<0.05$)呈显著正相关。因此,太阳辐射、风速的下降是作物生育期需水量下降的最主要气象因素。

2.3 多样化粮饲轮作制度的构建及需水量分析

基于本地化的ROTAT模型,本研究确定了以下5种粮饲、粮粮及饲饲新型轮作模式,分别为饲用燕麦-夏播高粱(O-S)、饲用燕麦-青贮玉米(O-C)、

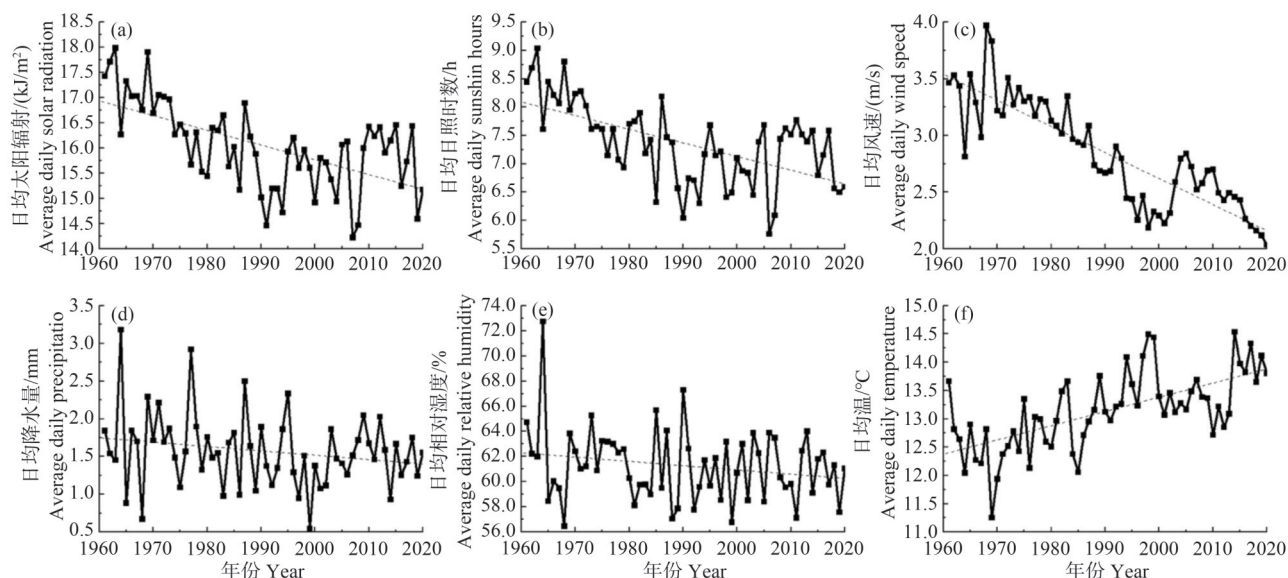
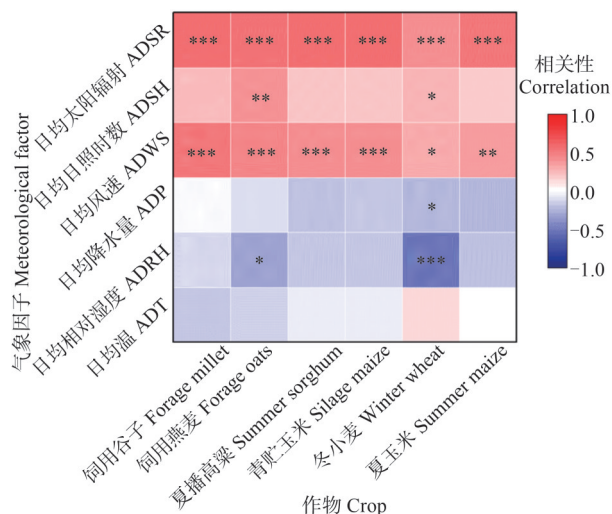


图5 沧州市1961—2020年日均气象数据逐年变化趋势

Fig. 5 Yearly changes of meteorological data in Cangzhou from 1961 to 2020



*, **和***分别表示在 0.05、0.01 和 0.001 的水平上差异显著。

Significant levels are: * $P < 0.05$, ** $P < 0.01$, *** $P < 0.001$.

图6 作物生育期需水量与气象因子的相关性

Fig. 6 Correlation between crop water requirement during the growth period and meteorological factors

饲用燕麦-饲用谷子(O-M)、冬小麦-夏播高粱(W-S)以及对照模式冬小麦-夏玉米(W-M)一年两熟。

本研究进一步分析比较了5种多样化种植模式的生育期需水量、生育期灌溉需水量及周年需水量,结果见图7。由图7(a)可知,传统麦玉模式的需水量最高为829.3 mm,其次为冬小麦-夏播高粱(817.7 mm);饲用燕麦基的一年两熟模式相比传统

麦玉模式,生育期需水量降低14.9%~18.8%,其中饲用燕麦-饲用谷子模式最小为673.0 mm。由图7(b)可知,传统麦玉模式的生育期灌溉需水量为471.3 mm,其次为冬小麦-夏播高粱(465.1 mm),饲用燕麦基的一年两熟模式相比传统麦玉模式,生育期灌溉需水量降低15.1%~19.2%,其中饲用燕麦-青贮玉米模式生育期灌溉需水量最小,为381.0 mm。由图7(c)可知,冬小麦基一年模式的年均周年需水量最高,饲用燕麦基的饲-饲模式比传统麦玉模式降低4%~7%。

表3为不同降水年型下不同粮饲模式的降水耦合度。可见:不同粮饲轮作模式在不同降水年型下的降水耦合度不同,呈现丰水年>平水年>枯水年。在丰水年,各模式的降水耦合度接近0.9;其中饲用燕麦-饲用谷子在丰水年的降水耦合度最高,为0.94。在平水年,各轮作模式的降水耦合度介于0.67~0.77。饲用燕麦-饲用谷子在平水年的降水耦合度依然最高,为0.77,其次是饲用燕麦-青贮玉米、饲用燕麦-夏播高粱轮作模式(0.73~0.74),冬小麦基轮作模式最低(0.67~0.68)。在枯水年,各轮作模式的降水耦合度显著降低,仅为0.47~0.54。饲用燕麦-饲用谷子在枯水年的降水耦合度依然最高但仅为0.54。综合来看,以饲用燕麦为主的一年两熟轮作模式(-夏播高粱、-青贮玉米、饲用谷子)在各降水年型降水耦合度都较高,以饲用燕麦-饲用谷子最佳。

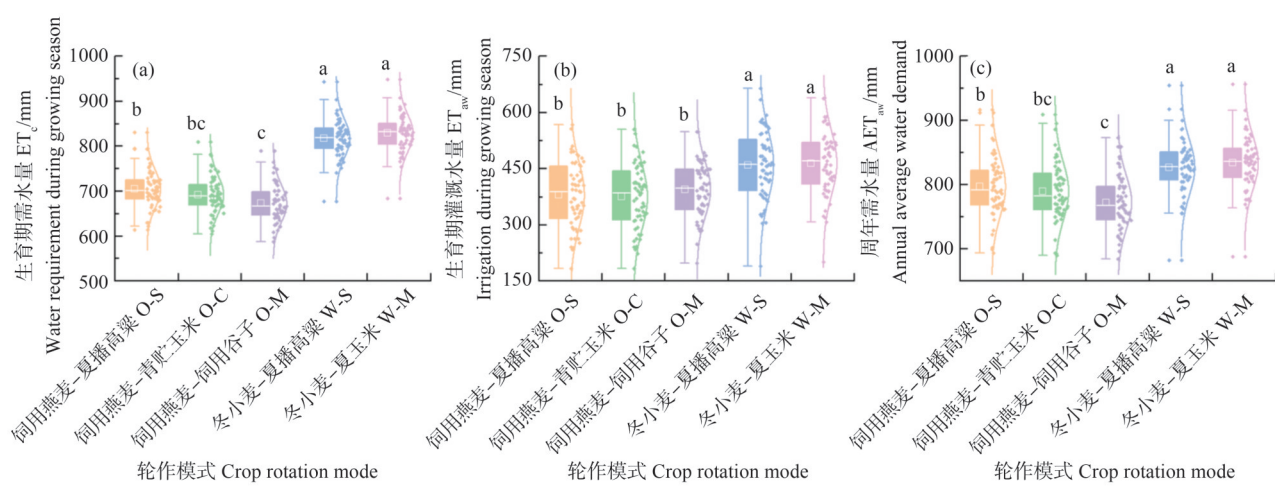


图7 不同轮作模式的生育期需水量(a)、灌溉需水量(b)与周年需水量(c)

Fig. 7 Water requirement during growing season(a), irrigation demand during growing season(b)and annual average water demand(c) of five different crop rotation modes

表3 不同降水年型下不同粮饲模式的降水耦合度

Table 3 Rainfall coupling of different crop rotation modes in different rainfall years

轮作模式 Crop rotation mode	降水耦合度 Rainfall coupling		
	丰水年 Wet year	平水年 Normal year	枯水年 Dry year
饲用燕麦-夏播高粱 O-S	0.92	0.73	0.52
饲用燕麦-青贮玉米 O-C	0.92	0.74	0.52
饲用燕麦-饲用谷子 O-M	0.94	0.77	0.54
冬小麦-夏播高粱 W-S	0.87	0.68	0.47
冬小麦-夏玉米 W-M	0.90	0.67	0.47

2.4 基于 Entropy-TOPSIS 的新型粮饲种植模式综合评价

进一步系统测算了不同轮作模式的系统产出,包括作物等价产量、生物量、经济效益、蛋白产出,结果见

表4及图8(a)。可见:与传统麦玉模式相比,饲用燕麦-青贮玉米模式的生物量提高34%、饲用燕麦-谷子模式的经济效益提高16%,饲用燕麦-青贮玉米、饲用燕麦-夏播高粱模式的饲料蛋白产出分别提高121%、77%。

表4 不同粮饲模式的系统产出

Table 4 System output of different crop rotation modes

轮作模式 Crop rotation mode	等价产量/(kg/hm ²) Equivalent yield	生物量/(kg/hm ²) Biomass	经济效益/(元/hm ²) Economic benefit	饲料蛋白产出/(kg/hm ²) Feed protein output
饲用燕麦-夏播高粱 O-S	12 041±1 598	34 956±4 270	21 951±4 922	3 755±476
饲用燕麦-青贮玉米 O-C	13 831±2 637	47 017±8 370	25 958±7 541	4 693±866
饲用燕麦-饲用谷子 O-M	15 851±3 259	21 792±5 267	32 835±10 562	1 814±383
冬小麦-夏播高粱 W-S	14 054±510	44 124±1 732	25 584±1 619	3 796±69
冬小麦-夏玉米 W-M	15 621±554	35 026±1 126	28 253±1 982	2 120±85

综合考虑了不同轮作模式的等价产量、生物量、经济效益、蛋白产出、生育期耗水量、周年耗水

量及降水耦合度,采用 Entropy-TOPSIS 计算了不同轮作模式的综合评价指数,结果见图8(b)。可

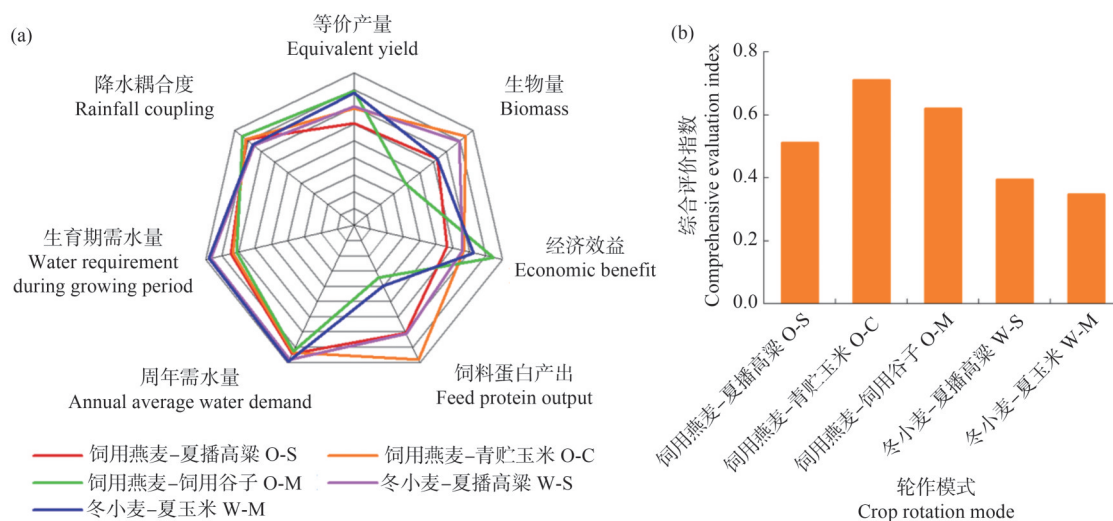


图 8 不同粮饲模式综合评价雷达图及综合评价指数

Fig. 8 Radar chart of comprehensive evaluation and comprehensive evaluation index of different crop rotation modes

见,饲用燕麦-青贮玉米模式的综合评价指数最高为 0.73,其次是饲用燕麦-谷子模式(0.63)、饲用燕麦-夏播高粱模式(0.54),饲用燕麦基饲草模式的综合评价指数均明显高于冬小麦-夏播高粱(0.37)和冬小麦-夏玉米(0.32)模式,因此,在该研究地区适合发展饲用燕麦基的一年两熟饲-饲轮作模式。

3 讨论

3.1 饲草作物需水量及灌溉需水量

系统量化沧州地区不同饲草作物的需水量变化是构建适水饲草种植制度的重要基础,同时也是推动“粮改饲”进行的重要抓手。目前,有关沧州地区饲草作物需水量与灌溉需水量的研究比较少。本研究主要系统量化了饲用燕麦、谷子、青贮玉米、夏播高粱等饲草作物的 1961—2020 年近 60 年的需水量与灌溉需水量,为该研究区域饲草作物需水量建立了丰富的数据库基础。本研究计算得出夏播高粱、饲用谷子的需水量约在 354.6、322.4 mm,这与下列的研究结果基本一致:曹昌林等^[28]基于大田试验报道不同水分梯度下的粒用高粱需水量 326.9~498.1 mm;王子豪^[2]基于盆栽试验及大田试验报道不同品种的饲用谷子的需水量在 261.8~334.1 mm;孟建等^[29]基于彭曼公式计算了 1980—2017 年河北平原谷子需水量约为 269.9~345.8 mm。本研究量化的冬小麦、夏玉米 60 年年均生育期需水量分别为 463.5、366.2 mm,年均生育期灌溉需水量为 354.9、116.4 mm,这与杨晓琳

等^[3-5]在黄淮海农作区基于 50 个气象站点得到的结果相符。本研究得到青贮玉米与饲用燕麦的年均生育期需水量约为 351.7 mm、341.8 mm,这与 Li 等^[1]和王冲等^[8]研究结果一致。高赢磊等^[12]报道了河北不同品种的青贮玉米耗水量约为 337.3~381.9 mm。王冲等^[8]基于 SIMETAW 模型得到华北和东北地区 1960—2014 年早播燕麦生育期需水量在 305.1~362.9 mm。总体上,饲用燕麦、谷子、高粱、青贮玉米与冬小麦相比,具有生长日期短、需水量较低的特点。同时,本研究建立的 60 年不同饲草作物灌溉需水量的基础数据库,也为该地区饲草作物优化灌溉制度的构建提供了重要依据。

3.2 影响饲草作物需水量的关键气象因子

本研究发现近 60 年来多种作物的生育期需水量呈现下降趋势,主要原因由太阳辐射、日照时数与风速的下降所致。在已有报道中,华北的冬小麦^[4,6-7]、夏玉米^[5-7]、春玉米^[3]、棉花^[30]、东北的春小麦^[31]、大豆^[32]以及燕麦^[33]生育期需水量均呈现下降趋势。作物生育期需水量受多种气候因子的综合影响。Roderick 等^[34]和 Stanhill 等^[35]研究报道,在北半球过去 50 年,太阳辐射呈下降趋势,是导致水面蒸发下降的最主要因素。同时,作物需水量下降被报道与其生育期日照和风速的下降趋势相一致。尽管温度上升、相对湿度下降和降雨减少都有使需水量增加的趋势,但其综合作用小于日照、风速和太阳辐射的作用,导致作物需水量逐年下降。而本研究发现作物的生育期需水量与太阳辐射($P <$

0.01)与风速($P<0.05$)呈显著正相关。因此,太阳辐射、风速的下降是作物生育期需水量的最主要气象因素。本研究中作物需水量、气象因素变化趋势及相关性与刘晓英等^[7]、Jia等^[33]的研究一致。

3.3 多样化粮饲轮作模式的综合效益

根据国家“供给侧改革”、“粮改饲”、“种植结构调整”等政策文件出台与推进,考虑到河北黑龙港地区水资源短缺的现状,改变传统种植模式、发展兼顾粮食生产及饲草生产的新型适水种植模式是该地区农业可持续发展的路径之一。本研究基于ROTAT模型构建了5种含麦玉模式在内的粮-饲、饲-饲轮作模式,研究表明,饲用燕麦与青贮玉米、谷子、夏播高粱形成的燕麦基的一年两熟饲-饲模式比传统麦玉生育期需水量降低14.9%~18.8%,灌溉需水量降低15.1%~19.2%。尽管已有研究^[14-15,21]在河北地下水超采区对适水种植制度进行了探索,但都集中在主粮及经济作物且多以主要分析种植模式的水分需求为主。本研究是对沧州地区饲草作物进行了不同的粮-饲、饲-饲种植模式的构建,在考虑节水效益的同时,又综合考虑了不同模式的产量、经济效益、生物量、饲料蛋白产出等,并基于Entropy-TOPSIS对所构建的5种多样化粮饲轮作模式进行了综合评价,得到饲用燕麦基的一年两熟轮作模式均比冬小麦基的一年两熟模式的综合评价指数高,尤其是饲用燕麦-青贮玉米模式为最佳,为该地区适水饲草种植模式的发展与种植结构的调整提供了依据。

4 结 论

本研究聚焦河北地下水超采区,基于SIMETAW模型系统量化了1960—2020年6种粮饲作物的生育期需水量与灌溉需水量,主要结论如下:1)冬小麦生育期需水量与灌溉需水量均最高,显著高于夏玉米、夏播高粱、饲用燕麦,饲用谷子与青贮玉米,其中饲用谷子生育期需水量最低、青贮玉米灌溉需水量最低;2)近60年来6种粮饲作物的生育期需水量均呈现下降趋势,主要由太阳辐射、日照时数与风速的下降所致;3)基于Entropy-TOPSIS对构建的5种饲-饲、粮-饲轮作模式的综合评价,结果显示饲用燕麦基饲草模式(-青贮玉米、-谷子、-夏播玉米)的综合评价指数均明显高于冬小麦基一年两熟模式(-夏玉米、-夏播高粱),饲用燕麦-青贮玉米模

式表现最佳;4)在沧州地区适合发展饲用燕麦轮作夏茬饲料作物的种植模式。同时,在不同降水年型下应结合降水耦合度采用不同的灌溉制度。

本研究可为河北沧州地区未来建立适水型种植制度,优化作物布局,加快“粮改饲”进程与发展节水农业提供理论依据。

参考文献 References

- [1] Li S, Wu J C, Ma L. Economic, energy and environmental consequences of shifting from maize-wheat to forage rotation in the North China Plain [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 328: 129670
- [2] 王子豪. 不同种植条件下饲用谷子耗水及生长特性的试验研究[D]. 保定:河北农业大学, 2019
Wang Z H. Experimental study on water consumption and growth characteristics of forage millet under different planting conditions [D]. Baoding: Hebei Agricultural University, 2019 (in Chinese)
- [3] 杨晓琳, 黄晶, 陈阜, 褚庆全. 黄淮海农作区玉米需水量时空变化特征比较研究[J]. 中国农业大学学报, 2011, 16(5): 26-31
Yang X L, Huang J, Chen F, Chu Q Q. Comparison of temporal and spatial variation of water requirements of corn in Huang-Huai-Hai farming system region [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2011, 16(5): 26-31 (in Chinese)
- [4] 杨晓琳, 宋振伟, 王宏, 石全红, 陈阜, 褚庆全. 黄淮海农作区冬小麦需水量时空变化特征及气候影响因素分析[J]. 中国生态农业学报, 2012, 20(3): 356-362
Yang X L, Song Z W, Wang H, Shi Q H, Chen F, Chu Q Q. Spatio-temporal variations of winter wheat water requirement and climatic causes in Huang-Huai-Hai Farming Region [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2012, 20(3): 356-362 (in Chinese)
- [5] Yang X L, Gao W S, Shi Q H, Chen F, Chu Q Q. Impact of climate change on the water requirement of summer maize in the Huang-Huai-Hai farming region [J]. *Agricultural Water Management*, 2013, 124: 20-27
- [6] 李春强, 李保国, 洪克勤. 河北省近35年农作物需水量变化趋势分析[J]. 中国生态农业学报, 2009, 17(2): 359-363
Li C Q, Li B G, Hong K Q. Trend of crop water requirement in recent 35 years in Hebei Province [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2009, 17(2): 359-363 (in Chinese)
- [7] 刘晓英, 李玉中, 郝卫平. 华北主要作物需水量近50年变化趋势及原因[J]. 农业工程学报, 2005, 21(10): 155-159
Liu X Y, Li Y Z, Hao W P. Trend and causes of water requirement of main crops in North China in recent 50 years [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2005, 21(10): 155-159 (in Chinese)
- [8] 王冲, 林倩, 石晓宇, 李硕, 揭晓婧, 褚庆全. 基于SIMETAW模型的不同地区燕麦需水量研究[J]. 中国农业科技导报, 2020, 22(3): 131-139
Wang C, Lin Q, Shi X Y, Li S, Jie X J, Chu Q Q. Assessment on water requirement of oat in different areas using SIMETAW model [J]. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2020, 22(3): 131-139 (in Chinese)
- [9] 孙洪仁, 王显国, 李茂娜, 白春利, 杜雪燕, 李林霞. 我国燕麦需水规律研究[J]. 中国奶牛, 2023(8): 61-65

- Sun H R, Wang X G, Li M N, Bai C L, Du X Y, Li L X. Regularity of water demand of oats in China[J]. *China Dairy Cattle*, 2023(8): 61-65 (in Chinese)
- [10] 陈伟, 陈丽, 孙从建, 郑振婧, 李晓明. 黄土高原东部主要作物需水量空间分布规律[J]. 水土保持研究, 2020, 27(5): 166-171, 176
- Chen W, Chen L, Sun C J, Zheng Z J, Li X M. Spatial distribution of water requirements for different crops in North Loess Plateau [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2020, 27(5): 166-171, 176 (in Chinese)
- [11] 高玮, 受娜, 蒋丛泽, 马仁诗, 沈禹颖, 杨宪龙. 施氮量对饲用高粱干物质积累、分配及水分利用效率的影响[J]. 草业学报, 2022, 31(9): 26-35
- Gao W, Shou N, Jiang C Z, Ma R S, Shen Y Y, Yang X L. Effect of nitrogen application rate on dry matter accumulation, allocation and water use efficiency of forage sorghum [J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2022, 31(9): 26-35 (in Chinese)
- [12] 高赢磊. 河北低平原区青贮玉米耗水特性与品种适用性研究[D]. 保定: 河北农业大学, 2018.
- Gao Y L. Research on water consumption features and variety suitability of maize in the Hebei lowland plain area[D]. Baoding: Hebei Agricultural University, 2018 (in Chinese)
- [13] 刘虎, 魏永富, 郭克贞. 北疆干旱荒漠地区青贮玉米需水量与需水规律研究[J]. 中国农学通报, 2013, (33): 94-100
- Liu H, Wei Y F, Guo K Z. Water requirement and its law of silage corn in Northern Xinjiang arid desert grassland [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2013, (33): 94-100 (in Chinese)
- [14] 杨晓琳, 梁芳婷, 闫菊萍, 陈源泉, 贾秀领. 冀中南多样化种植模式的适水效应分析[J]. 中国农业大学学报, 2021, 26(4): 1-17
- Yang X L, Liang F T, Yan J P, Chen Y Q, Jia X L. Research on water requirements of diversified crop rotations in the middle and southern areas of Hebei Province [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2021, 26(4): 1-17 (in Chinese)
- [15] Peng H H, Xiong J R, Zhang J Y, Zhu L H, Wang G Y, Pacenka S, Yang X L. Water requirements and comprehensive benefit evaluation of diversified crop rotations in the Huang-Huai Plain [J]. *Sustainability*, 2023, 15(13): 10229
- [16] 石鹏飞, 杨东玉, 郑媛媛, 梁鸣媛, 党静, 王贵彦. 华北平原粮饲复合种植模式[J]. 草业科学, 2015, 32(12): 2107-2113
- Shi P F, Yang D Y, Zheng Y Y, Liang M Y, Dang J, Wang G Y. Study on compound cropping systems of food and forage in North China Plain [J]. *Pratacultural Science*, 2015, 32(12): 2107-2113 (in Chinese)
- [17] 吴圣. 从粮食观到大食物观的思想进程、现实挑战与实践路径[J]. 粮食问题研究, 2023(6): 4-9
- Wu S. The ideological process, realistic challenge and practical path from grain view to Big food view [J]. *Grain Issues Research*, 2023(6): 4-9 (in Chinese)
- [18] 沧州市统计局. 沧州统计年鉴(2018—2021) [M]. 北京: 中国统计出版社, 2018—2021
- Cangzhou Municipal Bureau of Statistics. *Cangzhou Statistical Yearbook* (2018-2021) [M]. Beijing: China Statistics Press, 2018—2021 (in Chinese)
- [19] 刘青松, 贾艳丽, 肖宇, 赵忠祥, 黄素芳, 岳明强, 刘震, 王秀玲, 阎旭东, 徐玉鹏. 河北东部平原区饲用燕麦适应性评价研究[J]. 黑龙江畜牧兽医, 2022(2): 102-106
- Liu Q S, Jia Y L, Xiao Y, Zhao Z X, Huang S F, Yue M Q, Liu Z, Wang X L, Yan X D, Xu Y P. Study on the adaptability evaluation of feeding oats in the eastern plain of Hebei Province [J]. *Province Heilongjiang Animal Science and Veterinary Medicine*. 2022(2): 102-106 (in Chinese)
- [20] 周汉章, 刘环, 周新建, 袁淑红, 魏志敏, 侯升林. 河北饲用高粱种植技术规程探讨[J]. 河北农业科学, 2017, 21(1): 36-39
- Zhou H Z, Liu H, Zhou X J, Yuan S H, Wei Z M, Hou S L. Technical regulation for planting forage sweet Sorghum [J]. *Journal of Hebei Agricultural Sciences*, 2017, 21(1): 36-39 (in Chinese)
- [21] 冯健英, 邢东海, 许洛, 李中建, 王绍新, 郑书海, 陈莉. 河北省夏播青贮玉米绿色高效关键栽培技术[J]. 中国种业, 2020(7): 80-81
- Feng J Y, Xing D H, Xu L, Li Z J, Wang S X, Zheng S H, Chen L. Key cultivation techniques of green and efficient summer sowing silage corn in Hebei Province [J]. *China Seed Industry*, 2020(7): 80-81 (in Chinese)
- [22] Snyder R L, Geng S, Orang M, Sarreshteh S. Calculation and simulation of evapotranspiration of applied water [J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2012, 11(3): 489-501
- [23] Orang M N, Snyder R L, Shu G, Hart Q J, Sarreshteh S, Falk M, Beaudette D, Hayes S, Eching S. California simulation of evapotranspiration of applied water and agricultural energy use in California [J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2013, 12(8): 1371-1388
- [24] Wang S Q, Xiong J R, Yang B Y, Yang X L, Du T S, Steenhuis T, Siddique K, Kang S Z. Diversified crop rotations reduce groundwater use and enhance system resilience [J]. *Agricultural Water Management*, 2023, 276(19): 108067
- [25] Dogliotti S, Rossing W A H, van Ittersum M K. Rotat, a tool for systematically generating crop rotations [J]. *European Journal of Agronomy*, 2003, 19(2): 239-250
- [26] 国家统计局. 中国农产品价格调查年鉴(2018—2021) [M]. 北京: 中国统计出版社, 2018—2021
- National Bureau of Statistics of China. *Chinese Yearbook of Agricultural Price Survey* (2018-2021) [M]. Beijing: China Statistics Press, 2018-2021 (in Chinese)
- [27] Wang H D, Wang X K, Bi L F, Wang Y, Fan J L, Zhang F C, Hou X H, Cheng M H, Hu W H, Wu L F, Xiang Y Z. Multi-objective optimization of water and fertilizer management for potato production in sandy areas of Northern China based on TOPSIS [J]. *Field Crops Research*, 2019, 240: 55-68
- [28] 曹昌林, 白文斌, 张建华, 史丽娟, 彭之东, 范娜, 李光, 闫凤霞. 粒用高粱需水量及耗水特性的研究[J]. 中国农学通报, 2015, 31(21): 86-91
- Cao C L, Bai W B, Zhang J H, Shi L J, Peng Z D, Fan N, Li G, Yan F X. Studies on water requirement and water consumption characteristics of grain Sorghum [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2015, 31(21): 86-91 (in Chinese)
- [29] 孟建, 姚旭擎, 杨晓琳, 罗建美, 沈彦俊. 地下水超采区农业种植结构与作物耗水时空演变研究[J]. 农业机械学报, 2020, 51(11): 302-312
- Meng J, Yao X Q, Yang X L, Luo J M, Shen Y J. Spatial and temporal evolution of agricultural planting structure and crop water consumption in groundwater overdraft area [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2020, 51(11): 302-312 (in Chinese)
- [30] Yang X L, Jin X N, Chu Q Q, Pacenka S, Steenhuis T S. Impact of climate variation from 1965 to 2016 on cotton water requirements in North China Plain [J]. *Agricultural Water Management*, 2021, 243: 106502
- [31] 姜雨林, 尹小刚, 王猛, 文新亚, 田家瑞, 胡惠杰, 陈阜. 1961—2010年东北农作区春小麦需水量的时空变化特征[J]. 中国农业大学学报, 2015, 20(5): 24-30
- Jiang Y L, Yin X G, Wang M, Wen X Y, Tian J R, Hu H J, Chen F.

- Temporal and spatial changes of crop evapotranspiration for spring wheat in the Northeast Farming Region of China during 1961 to 2010[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2015, 20(5): 24-30 (in Chinese)
- [32] 胡惠杰, 王猛, 尹小刚, 姜雨林, 文新亚, 陈阜. 气候变化下东北农作区大豆需水量时空变化特征分析[J]. 中国农业大学学报, 2017, 22(2): 21-31
Hu H J, Wang M, Yin X G, Jiang Y L, Wen X Y, Chen F. Spatial and temporal changes of soybean water requirement under climate changes in the Northeast Farming Region of China [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2017, 22(2): 21-31 (in Chinese)
- [33] Jia H, Zhang T, Yin X G, Shang M F, Chen F, Lei Y D, Chu Q Q. Impact of climate change on the water requirements of oat in northeast and North China[J]. *Water*, 2019, 11(1): 91
- [34] Roderick M L, Farquhar G D. The cause of decreased pan evaporation over the past 50 years[J]. *Science*, 2002, 298(5597): 1410-1411
- [35] Stanhill G, Cohen S. Global dimming: A review of the evidence for a widespread and significant reduction in global radiation with discussion of its probable causes and possible agricultural consequences [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2001, 107(4): 255-278

责任编辑: 杨爱东



第一作者简介: 杨晓琳, 中国农业大学水利与土木工程学院副教授。主要从事多样化种植制度的节水固碳减排研究, 先后主持国家自然科学基金青年基金、面上项目等多项。在 *Nature Communications*、*Field Crops Research*、*Agricultural Water Management* 等期刊发表论文 50 余篇。



通讯作者简介: 杜太生, 中国农业大学水利与土木工程学院教授。主要从事农业高效用水研究, 先后主持和参加国家自然科学基金、国家重点研发计划项目课题等 30 多项。在本领域国际知名期刊 *Journal of Experimental Botany*、*Agricultural Water Management* 以及国内相关期刊发表论文 130 余篇。