

# 内蒙古黄土高原旱作区典型作物水分供需平衡分析

王国帅<sup>1,2</sup>, 徐冰<sup>1,2\*</sup>, 汤鹏程<sup>1,2</sup>, 田德龙<sup>1,2</sup>, 张琛<sup>1,2</sup>, 任杰<sup>1,2</sup>, 李泽坤<sup>1,2</sup>

(1.水利部牧区水利科学研究所, 呼和浩特 010018; 2.中国水利水电科学研究院  
内蒙古阴山北麓草原生态水文国家野外科学观测研究站, 北京 100038)

**摘要:** 探明内蒙古黄土高原旱作区典型作物水分供需平衡关系, 以黄土高原旱作区玉米为研究对象, 以1981—2020年逐日气象资料为基础, 对不同水分年型进行划分, 基于水量平衡理论分析了黄土高原旱作区玉米在各生育期的需水特征及作物需水量和降水量的耦合情况。结果表明: 玉米全生育期需水量为499.6 mm; 其耗水强度平均为3.42 mm/d, 三叶—拔节期、拔节—抽雄期是玉米的耗水高峰期。玉米在三叶—拔节期、拔节—抽雄期的需水量最大; 丰水年、平水年、枯水年的降水量均小于需水量, 丰水年玉米播种—三叶期、三叶—拔节期、拔节—抽雄期、抽雄—成熟期的水分盈亏量分别为9.10、-67.5、30.10、-16.8 mm, 平水年分别为-2.30、-107.60、-42.2、-22.3 mm; 枯水年分别为-18.8、-142.9、-88.7、-37.9 mm, 无法满足玉米关键生育期对水分的需求, 需采取补水措施来保证玉米正常生长。

**关键词:** 黄土高原; 水文年型; 玉米; 需水量; 盈亏量; 耗水强度

中图分类号: TP399

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2022665

王国帅, 徐冰, 汤鹏程, 等. 内蒙古黄土高原旱作区典型作物水分供需平衡分析[J]. 灌溉排水学报, 2022, 41(Supp.2): 32-37.

WANG Guoshuai, XU Bing, TANG Pengcheng, et al. Analysis of Water Supply and Demand Balance of Typical Crops in Rainfed Land of Loess Plateau in Inner Mongolia[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2022, 41(Supp.2): 32-37.

## 0 引言

旱作农业是农业产生和发展中的重要类型之一<sup>[1-2]</sup>。全球大约有80%的耕地依靠天然降水来维持农业生产, 这种生产方式也被称为雨养农业。我国黄土高原区主要的农业生产模式为旱作农业, 主要受到2个因素限制<sup>[3]</sup>。其一为水资源供需矛盾突出, 水资源短缺限制了旱作农业的生产; 有限的水资源没有得到充分利用; 其二为黄土贫瘠、结构性差, 严重限制了该区域农业发展, 农业管理不善、降水利用效率较低<sup>[4-5]</sup>。为了缓解旱地农业中干旱缺水等因素的限制, 以往研究对旱作区水土资源高效利用做了大量工作<sup>[6]</sup>。美国的旱地农业以保护性耕作技术为主; 澳大利亚的旱作农业主要是利用粮草轮作的种植制度, 提高土壤地力和资源利用效率; 印度主要利用集水种植模式<sup>[5,7-8]</sup>。我国主要是从化肥施用、土壤改良等方面对黄土高原旱作农业的水土资源利用进行了大量研

究。例如: Bai等<sup>[9]</sup>指出黄土区过量施用化肥导致养分在土壤剖面积累, 潜层地下水存在污染的风险; Yang等<sup>[10]</sup>指出添加凹凸棒土到黄土区4种不同质地的土壤中, 可以调节土壤水力特性, 增加土壤有效水量。在不同降水分布年型下, 保护性耕作对作物产量存在显著差异<sup>[11-12]</sup>。王健等<sup>[13]</sup>通过人工模拟降水, 采用水量平衡的方法, 分析了玉米对降水入渗的响应。赵名茶<sup>[14]</sup>基于水量平衡法研究了黄土高原区作物长期的水分状况和作物水分盈亏值, 指出黄土高原降水的季节性指标及其与作物水分亏缺的关系。而长时间序列下不同水文年型降水量的变化特征以及作物水分盈亏量有待进一步研究。

因此, 本文通过划分不同水分年型, 揭示不同水文年型下的降水量变化特征, 基于水量平衡理论, 评估黄土高原旱作区玉米在各生育期的需水和供水关系。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

选取清水河县作为内蒙古黄土高原典型研究区域。清水河位于内蒙古中部地区, 地处东经110°46′—112°10′、北纬40°51′—41°8′, 地处内蒙古高原和黄土高原交接地带, 平均海拔高度为1 373.6 m。该地四

收稿日期: 2022-11-24

基金项目: 内蒙古自治区科技重大专项—水资源供需平衡机制与利用方式研究(2020ZD0005-0102)

作者简介: 王国帅(1992-), 男, 内蒙古呼和浩特人。工程师, 博士, 主要从事节水灌溉与灌区水转化研究。E-mail: imau\_wgs@163.com

通信作者: 徐冰(1977-), 男, 正高级工程师, 博士, 主要从事节水灌溉研究。E-mail: nmuxubing@163.com

季差异明显，降水集中，温度条件适宜，是典型的温带半干旱大陆性气候，年平均气温为 7.5 ℃，平均无霜期为 135 d。年平均降水量为 410 mm，年平均蒸发量为 2 577.2 mm。清水河大部分地区受气候与自然资源条件的限制，农业种植品种单一，玉米是主要经济作物，占全市农作物种植总面积的 40%，产量占粮食总产量的 60% 以上。近年来，玉米种植面积与

产量明显增加。

### 1.2 作物生育期确定

通过查阅相关文献资料和当地生育期资料发现，清水河玉米在 5 月初播种，9 月中下旬收获，生育阶段由三叶期、拔节期、抽雄期、成熟期 4 个阶段组成，全生育期共计 146 d。清水河玉米生育期具体划分及生长特征见表 1。

表 1 清水河玉米生育期划分及生长特征

Table 1 The division of growing period and growth characteristics of maize in Qingshuihe

生育期	起止日期	生长特征
播种—三叶期	0501—0601	植株第 3 片叶露出叶心约为 3 cm
三叶—拔节期	0613—0717	植株雄穗伸长，茎节总长度 2~3 cm，叶龄指数约为 30
拔节—抽雄期	0718—0818	植株雄穗尖端露出顶叶 3~5 cm
抽雄—成熟期	0819—0923	植株果穗中部籽粒干重迅速增加并基本建成 胚乳呈糊状或蜡状，种胚下方尖冠处形成黑色层

### 1.3 作物生育期需水量计算

参考作物需水量是指在土壤水分条件适宜、土壤肥力适宜、耕作技术措施恰当、在给定生产环境中作物能够充分发挥生产潜力的理想条件下的能够满足植株蒸发蒸腾所需的水量<sup>[15]</sup>。即作物最大可能消耗的水量。

实际作物需水量计算式为：

$$ET_c = K_c \times ET_0, \quad (1)$$

式中： $ET_c$  为实际作物需水量 (mm)； $ET_0$  为参考作物

物腾发量 (mm)； $K_c$  为作物系数。

### 1.4 作物系数的确定

清水河玉米作物系数参考 FAO-56 推荐的玉米标准作物系数<sup>[15]</sup>，应用单作物系数法并结合已有研究成果确定。其生长初期的作物系数 ( $K_{cini}$ ) 为 0.2，生长中期的作物系数 ( $K_{cmid}$ ) 为 1.1，生长末期的作物系数 ( $K_{cend}$ ) 为 0.61。清水河玉米作物系数呈平稳-上升-平稳-下降的趋势 (表 2)。

表 2 黄土高原区玉米的作物系数 ( $K_c$ )

Table 2 Crop coefficient of maize in the Loess Plateau ( $K_c$ )

时间	5 月			6 月			7 月			8 月			9 月		
	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬
$K_c$	0.20	0.20	0.23	0.48	0.71	0.96	1.10	1.10	1.10	1.09	1.00	0.84	0.70	0.61	

### 1.5 参照作物腾发量 ( $ET_0$ ) 计算

参照作物腾发量计算与风速、气压、温度、太阳辐射等多种气象因素有关，为计算更加准确方便，本文通过 Microsoft Excel 软件进行数据录入，利用式(2)计算逐日的参考作物腾发量：

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)}, \quad (2)$$

式中： $ET_0$  为参考蒸散量 (mm/d)； $R_n$  为作物表面的净辐射量 ( $MJ/(m^2 \cdot d)$ )； $G$  为土壤热通量密度 ( $MJ/(m^2 \cdot d)$ )； $T$  为 2 m 高处的平均日气温 ( $^{\circ}C$ )； $u_2$  为 2 m 高度处风速 (m/s)； $e_s$  为饱和蒸汽压力 (kPa)； $e_a$  为实际蒸汽压力 (kPa)； $e_s - e_a$  为饱和蒸汽压力亏缺 (kPa)； $\Delta$  为蒸汽压力曲线斜率； $\gamma$  为湿度常数。

### 1.6 作物水分亏缺量计算及水文年的划分

通过对研究区年降水量的统计，使用保证率划分

不同的水文年，选择保证率  $P < 25\%$ 、 $25\% \leq P \leq 50\%$ 、 $P > 75\%$  的设计年降水量划分为丰水年、平水年和枯水年，保证率计算式为：

$$P = \frac{m}{1+n} \times 100\%, \quad (3)$$

式中： $P$  为保证率； $m$  为统计的降水年数； $n$  为降水量降序排列的序号。

有效降水量：

$$P_a = \delta P, \quad (4)$$

式中： $\delta$  为有效降水系数 (0.8)； $P_a$  为有效降水量。

作物水分盈亏量是反映作物水分亏缺程度的指标，与降水量和需水量的关系密切，作物在不同生育期水分盈亏程度相差明显，为充分体现作物水分的盈亏阶段及程度，计算作物各生育期水分盈亏量，计算式为：

$$\Delta = P_a - ET_c, \quad (5)$$

式中： $\Delta$  为水分盈亏量 (mm)；正值为作物水分盈余量，负值为作物水分亏缺量。

## 2 结果与分析

### 2.1 天然降水量

#### 2.1.1 降水年际变化规律

根据清水河 1981—2020 年的降水数据,对研究区的年平均降水量进行了统计分析。清水河全年降

水量主要集中在 7—9 月,历年 7—9 月平均降水量占全年平均降水量的 63.3%,最大月降水量一般出现在 7—9 月。清水河地区为半干旱大陆性气候,多年平均降水量仅为 329.4 mm,降水量呈“升-降-升”的波动变化趋势(图 1)。

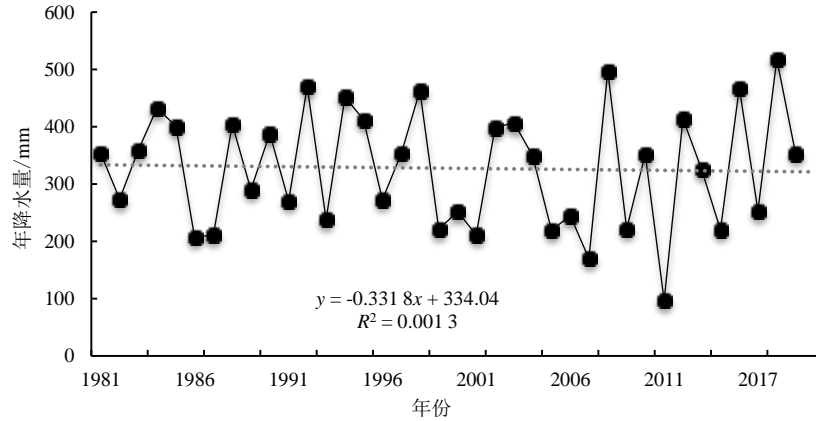


图 1 清水河降水量年际变化

Fig.1 Annual variation of precipitation in Qingshuihe

#### 2.1.2 不同水文年玉米生育期降水量

对降水量进行水文年划分并参考有关文献确定了清水河玉米生育期,经过统计和整理得出其全生育期降水量。由图 2 可知,不同水文年型玉米全生育期天然降水量差异较大,整体呈下降趋势,丰水年降水

量基本大于平水年及枯水年,最大值为 518.2 mm,枯水年降水量较少,最小值仅为 96.8 mm,二者间差距较大。丰水年、平水年、枯水年玉米生长阶段的降水量平均值分别为 459、333、202 mm。

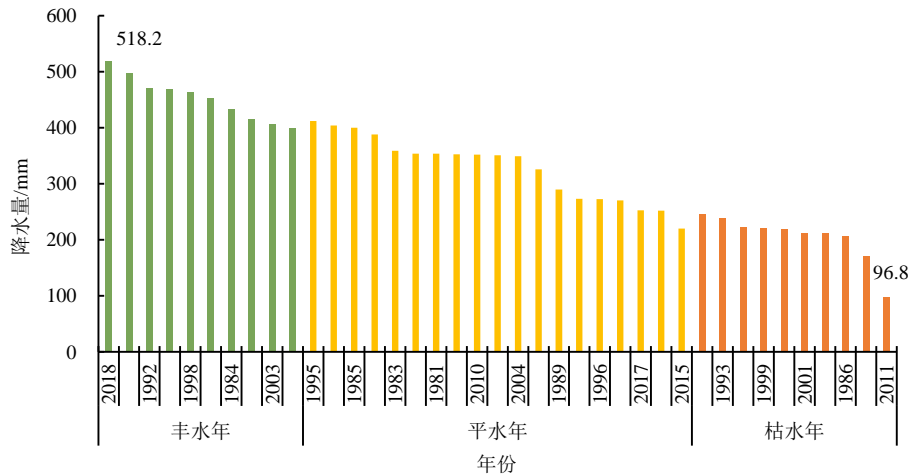


图 2 不同水文年玉米全生育期降水量

Fig.2 Rainfall in the whole growth period of maize in different hydrological years

### 2.2 生育期降水量

经过对清水河研究区近 40 年玉米生育期降水量的统计分析发现,天然降水集中发生在三叶—抽雄期,此时期为雨季,符合降水规律(图 3)。清水河属半干旱典型大陆性气候,全年降水量呈季节性变化,降水一般集中于夏季,年内变化较大。

### 2.3 作物需水量

清水河不同水文年天然降水条件下的玉米作物

需水量见图 4。清水河玉米全生育期需水量表现为小-大-小-小的变化趋势,全生育期耗水强度表现为小-大-大-小的变化趋势,播种—三叶期需水量最小,三叶—拔节期需水量达到顶峰。玉米全生育期需水量为 499.6 mm,平均耗水强度为 3.42 mm/d,三叶—拔节期、拔节—抽雄期是玉米生长的关键时期,也是耗水高峰期,耗水强度分别为 4.42 mm/d 和 4.85 mm/d。

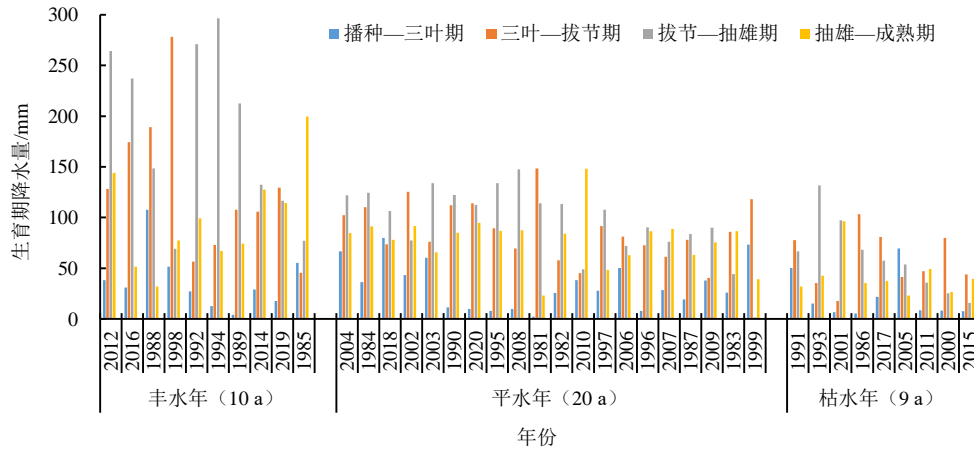


图3 不同水文年玉米各生育期降水量

Fig.3 Rainfall in different growth periods of maize in different hydrological years

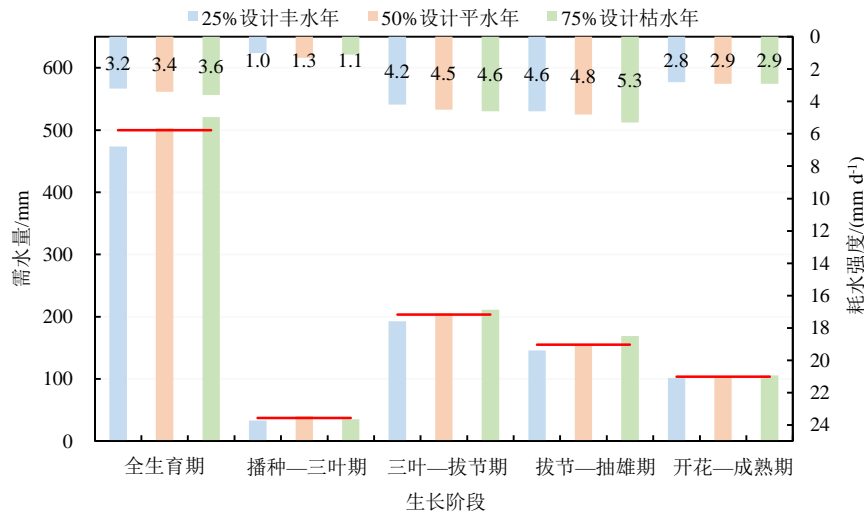


图4 清水河不同水文年划分玉米不同生育阶段需水量

Fig.4 Water demand of different growth stages of maize in different hydrological years of Qingshuihe River

#### 2.4 不同水文年玉米水分亏缺量

由表3可知，玉米在三叶—拔节期、拔节—抽雄期的需水量最大，分别占总需水量的40.73%和31.04%，丰水年播种—三叶期、三叶—拔节期、拔节—抽雄期、抽雄—成熟期水分盈余量分别为9.10、-67.5、30.10、-16.8 mm，平水年分别为-2.30、-107.60、

-42.2、-22.3 mm，枯水年分别为-18.8、-142.9、-88.7、-37.9 mm。三叶—拔节期玉米的水分亏缺最大，抽雄期—成熟期次之。总体看来，丰水年，部分年份需要补充灌溉；平水年作物水分亏缺量在2.3~107.6 mm之间，降水量越低，其需灌溉水量越大；枯水年缺水程度加剧。

表3 不同水文年雨养玉米各生育期的水分亏缺量差异

Table 3 Difference of water deficit of rain fed maize in different hydrological years at different growth stages

生育期	玉米需水量/mm	25%设计丰水年		50%设计平水年		75%设计枯水年	
		降水量/mm	亏缺量/mm	降水量/mm	亏缺量/mm	降水量/mm	亏缺量/mm
播种—三叶期	36.3	45.4	9.1	34.0	-2.3	17.5	-18.8
三叶—拔节期	202.9	135.4	-67.5	95.3	-107.6	60.0	-142.9
拔节—抽雄期	155.6	185.7	30.1	113.4	-42.2	66.9	-88.7
抽雄—成熟期	103.8	87.0	-16.8	81.5	-22.3	65.9	-37.9
合计	498.6	453.50	-45.1	324.2	-174.4	210.3	-288.3

注 \*正值为作物水分盈余量，负值为作物水分亏缺量。

玉米在5月中旬播种，到9月中、下旬收获，一般需140 d左右。丰水年、平水年、枯水年的水分亏

缺量分别为 10.50~64.22、56.75~348.30、287.09~418.37 mm。从丰水年到枯水年，玉米水分一直处于亏缺状

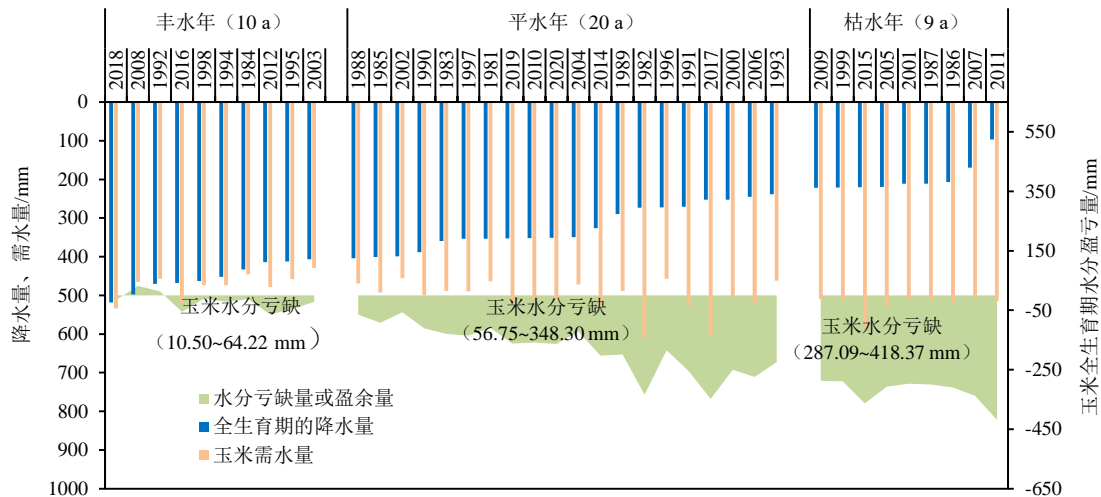


图 5 不同水文年雨养玉米全生育期的水分亏缺量

Fig.5 Water deficit of rain fed maize in different hydrological years during the whole growth period

### 3 结论

黄土高原区丰水年、平水年、枯水年玉米生长阶段的降水量平均值分别为 459、333、202 mm，玉米全生育期的需水量约为 499.6 mm；降水量均小于需水量。

玉米在全生育期的平均耗水强度为 3.42 mm/d，三叶一拔节期、拔节一抽雄期是玉米的耗水高峰期，分别占总需水量的 40.73%和 31.04%。

在丰水年，部分年份需要补充灌溉，平水年作物水分亏缺量在 2.3~107.6 mm 之间，枯水年缺水程度加剧。

#### 参考文献:

- [1] GAN Y, SIDDIQUE K H, TURNER N C, et al. Ridge-furrow mulching systems—an innovative technique for boosting crop productivity in semiarid rain-fed environments[J]. In *Advances in agronomy*. Academic Press, 2013, 118: 429-476.
- [2] LI S X, WANG Z H, HU T T, et al. Nitrogen in dryland soils of China and its management[J]. *Advances in Agronomy*, 2009, 101: 123-181.
- [3] LI S X, WANG Z H, LI S Q, et al. Effect of plastic sheet mulch, wheat straw mulch, and maize growth on water loss by evaporation in dryland areas of China[J]. *Agricultural Water Management*, 2013, 116: 39-49.
- [4] 孙东宝. 北方旱作区作物产量和水肥利用特征与提升途径[D]. 北京: 中国农业大学, 2017.
- [5] 卜令铎. 旱地春玉米高产高效栽培体系构建 评价及区域模拟[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2013.
- [6] 邱苏闯, 游松财, 刘喆惠. 基于 GIS 的水量平衡模型在黄土高原地区土壤水分模拟中的应用[J]. *中国农村水利水电*, 2012(5): 11-14.
- [7] FU W, FAN J, WANG S, et al. Woody peat addition increases soil organic matter but reduces carbon sequestration via higher mineralization in degenerated coarse-textured erodible soil[J]. *Agricultural, Ecosystem and Environment*, 2021, 318: 107 495.
- [8] FU W, FAN J, HAO M, et al. Evaluating the effects of plastic film mulching patterns on cultivation of winter wheat in a dryland cropping system on the Loess Plateau, China[J]. *Agricultural Water Management*, 2021, 244: 106 550.
- [9] BAI Z, CASPARI T, GONZALEZ MR, et al. Effects of agricultural management practices on soil quality: A review of long-term experiments for Europe and China[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2018, 265: 1-7.
- [10] YANG T, XING X, THUDUWE K D, et al. Relationships among water and gas transport properties in soils from natural and induced clay gradients[J]. *Vadose Zone Journal*, 2022, 20: 180.
- [11] PENG Z, WANG L, XIE J. et al. Conservation tillage increases yield and precipitation use efficiency of wheat on the semi-arid Loess Plateau of China[J]. *Agricultural Water Management*, 2020, 231: 106 024.
- [12] DAI Z, HU J, FAN J, et al. No-tillage with mulching improves maize yield in dryland farming through regulating soil temperature, water and nitrate-N[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2021, 309: 107 288.
- [13] 王健, 马璠, 孟秦倩, 等. 基于 Green-Ampt 模型分析坡地种植玉米对降水的促渗作用[J]. *灌溉排水学报*, 2018, 37(11): 99-105, 120.
- [14] 赵名茶. 黄土高原降水的季节性指标及其与作物水分亏缺的关系[J]. *自然资源学报*, 1990, 5(3): 218-229.
- [15] ALLEN R G, PEREIRA L S, RAES D, et al. *Crop Evapotranspiration. Guidelines for Computing Crop Water Requirements*. Rome: FAO Irrigation and Drainage, 1998.

## Analysis of Water Supply and Demand Balance of Typical Crops in Rainfed Land of Loess Plateau in Inner Mongolia

WANG Guoshuai<sup>1,2</sup>, XU Bing<sup>1,2\*</sup>, TANG Pengcheng<sup>1,2</sup>, TIAN Delong<sup>1,2</sup>, ZHANG Chen<sup>1,2</sup>, REN Jie<sup>1,2</sup>, LI Zekun<sup>1,2</sup>

(1. Institute of Water Resources for Pastoral Area Ministry of Water Resources, Hohhot 010018, China,

2. Yinshanbeilu Grassland Eco-hydrology National Observation and Research Station,

China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

**Abstract:** water resources in the Loess Plateau are extremely scarce and supplies and demands of crop water under different hydrological year are not clear. This study takes maize in rainfed area of the Loess Plateau as the research object. Based on the daily meteorological data from 1981 to 2020 in the Loess Plateau, through the division of different hydrological years and based on the water balance theory, the water demand characteristics of maize at different growth periods and the relationship between water demand and precipitation were analyzed. The results showed that the water demand of Maize in the whole growth period was 499.6 mm, and the average water consumption intensity is 3.42 mm/d. The peak water consumption periods of maize is from three leaf to jointing stage and from jointing to tasseling stage, and the water consumption intensity is 4.42 mm/d and 4.85 mm/d, respectively. The water demand of maize was the largest in the three leaf to jointing stage and jointing to tasseling stage, accounting for 40.73% and 31.04% of the whole water demand, respectively. The precipitation in high, normal, low flow years can not meet the water demand of maize. The water surplus and deficit in the sowing to three leaf stage, three leaf to jointing stage, jointing to tasseling stage and tasseling to maturity stage of maize was 9.10, -67.5, 30.10 mm and -16.8 mm (high flow year); -2.30、-107.60、-42.2、-22.3 mm(normal flow year); -18.8, -142.9, -88.7, -37.9 mm(low flow year), respectively. It is necessary to take water supplement measures to ensure the growth of crops. The results of this study can provide reference for regulate and control of agricultural water resources in the Loess Plateau area of Inner Mongolia.

**Key words:** Loess Plateau; hydrological year; maize; water demand; surplus and deficit; water consumption intensity

责任编辑：韩 洋