

杨凌地区冬小麦 – 夏玉米水分供需适配性分析

姚德龙^{1,2,3}, 高 繁^{1,2,3}, 李志军^{1,2,3}, 胡田田^{1,2,3}

(1.西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100; 2.旱区农业水土工程教育部重点实验室, 陕西 杨凌 712100;
3.中国旱区节水农业研究院, 陕西 杨凌 712100)

摘 要: 采用 1984—2015 年气象观测站逐日气温、降水等资料, 计算冬小麦 – 夏玉米各生育期阶段的需水量和有效降水, 采用趋势分析及数理统计方法分析近 32 a 陕西杨凌示范区冬小麦和夏玉米生育期的降水特征, 并结合作物需水特征分析其水分供需的适配性。结果表明: 冬小麦和夏玉米生育期的有效降水都表现出不稳定性, 除个别年份外, 大多年份降水不能满足作物的需水要求。冬小麦播种 ~ 返青阶段有效降水量仅为 18.9 mm, 需水量在 126.5 mm 左右; 返青 ~ 拔节阶段有效降水 13.5 mm, 且变异系数达 130%, 而需水量为 81.2 mm; 拔节 ~ 孕穗阶段有效降水为 37.6 mm, 但小麦在此阶段需水量达 206.6 mm; 根据小麦生理需水规律, 一般年份在冬前灌水 45 ~ 50 mm, 拔节期灌水 50 mm 左右, 孕穗期视情况而定。夏玉米播种 ~ 出苗阶段有效降水变异系数最大, 其次是拔节 ~ 抽雄阶段, 各生育阶段有效降水均表现出不稳定性。出苗 ~ 抽雄阶段平均有效降水量为 126.8 mm, 此阶段玉米需水量为 157.2 mm; 玉米抽雄 ~ 灌浆阶段平均有效降水 73.9 mm, 而需水量为 166.6 mm; 根据玉米生理需水规律, 一般年份可在夏玉米大喇叭口期灌水 50 mm 左右, 抽雄灌浆期灌水 60 mm。

关键词: 冬小麦 – 夏玉米; 有效降水; 需水量; 水分供需适配性; 杨凌示范区
中图分类号: S274.1 **文献标志码:** A

Water supply and requirement of winter wheat and summer maize in Yangling

YAO De-long^{1,2,3}, GAO Fan^{1,2,3}, LI Zhi-jun^{1,2,3}, HU Tian-tian^{1,2,3}

(1. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;
2. Key Laboratory of Agricultural Soil and Water Engineering in Arid and Semi-arid of Ministry of Education, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3. Institute of Water Conservation in Dryland, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: Basing on daily precipitation from meteorological observation station of Northwest Agriculture and Forestry University in 1984—2015, the effective precipitation during growth stages of winter wheat and summer maize was calculated. The precipitation characteristics during the growing period of winter wheat and summer maize in Yangling demonstration area in recent 32 years were quantified by trend analysis and mathematical statistics. The results showed that the effective precipitation for winter wheat and summer maize was unstable. Winter wheat had the largest variation of effective precipitation during the emergence and winter stage with a coefficient of variation of 140%, followed by reviving jointing stage. The precipitation in this area is difficult to meet the requirement of wheat before winter and the jointing stage. The biggest variation was indentified at sowing and seedling stage. At jointing and grain filling stage, it is difficult to meet the water demand of maize.

Keywords: winter wheat-summer maize; effective precipitation; water demand; water supply and requirement adaptation property; Yangling demonstration zone

关中平原是陕西粮食主产区, 主要实行冬小麦 – 夏玉米轮作制。杨凌国家农业高新技术产业示范区(简称杨凌示范区)地处秦岭北麓和黄土高原之间的渭河流域, 属大陆性季风气候, 是关中平原主要粮食产区之一。冬小麦生育期一般在 10 月中旬至翌年 6 月上旬, 该时段光照条件相对稳定, 降雨和温度变化幅度较大, 平均有效降水量在 96.6 mm, 远低于冬小麦的需水量, 需进行适时补充灌水^[1]。夏玉米

收稿日期: 2016-10-15 修回日期: 2017-01-07
基金项目: 2015 公益性行业(农业)科研专项经费(201503124)
作者简介: 姚德龙(1989—), 男, 河南濮阳人, 硕士, 主要从事农作物水肥调控方面的研究。E-mail: xinongyaodelong@163.com。
通信作者: 胡田田(1966—), 女, 陕西礼泉人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事节水灌溉理论与技术研究。E-mail: hutiantian@nwsuaf.edu.cn。

生育期一般在 6 月上旬至 10 月上旬,该时段高温多雨,光照和热量相对稳定,平均有效降水量在 284.4 mm,但降雨时段分布不均匀,不能完全满足夏玉米的正常需水^[2]。因此,干旱成为冬小麦-夏玉米生长季的主要农业气象灾害,灌溉是该地区实现粮食持续稳产高产的重要保障。

近年来,关于杨凌地区冬小麦和夏玉米的研究多侧重于栽培技术^[3-4]、水肥效应^[5-7]、生态环保^[8]等方面,对冬小麦-夏玉米生育期内降水等气象因素变化规律的研究较少^[9],分析生育期降水与作物需水适配性的研究更少。为进一步掌握杨凌区作物的水分供需特征,使研究结果更具有针对性,本研究结合有效降水的年际、年内分布和作物需水特征,分析二者的适配性,以期建立冬小麦-夏玉米轮作系统的稳健型灌溉制度、指导作物合理灌水提供参考。

1 资料来源与分析方法

1.1 资料来源

数据资料采用陕西杨凌示范区 1984—2015 年冬小麦-夏玉米生育期内逐日气温、降水、相对湿度等资料,该观测数据来源于西北农林科技大学气象观测站。

1.2 分析方法

1.2.1 冬小麦-夏玉米生育阶段的划分 根据杨凌示范区冬小麦生育期观测资料,冬小麦播期一般在 10 月上、中旬。小麦分蘖期需水量增加,且需要充足的光照和适宜的温度。进入越冬期,地上部分停止生长,而根系仍缓慢生长。拔节至孕穗是小麦需水关键期,小麦抽穗后进入生殖生长阶段。基于小麦各生育阶段的需水特征,并考虑到关中冬小麦-夏玉米轮作的生产实际,将杨凌地区冬小麦全生育期划分为以下 6 个阶段:播种~出苗(10 月 1 日至 11 月 10 日)、出苗~越冬(11 月 11 日至 12 月 20 日)、越冬~返青(12 月 21 日至 2 月 10 日)、返青~拔节(2 月 11 日至 3 月 15 日)、拔节~孕穗(3 月 16 日至 4 月 30 日)、孕穗~成熟(5 月 1 日至 6 月 4 日)。

杨凌示范区夏玉米播种时间一般在 6 月上旬,播期及出苗好坏受播前底墒的影响明显。拔节以后玉米耗水量逐渐增加,完全进入生殖生长期后玉米耗水量达到最高峰,需水量最大,后期需水量逐渐减小^[1]。鉴于此,将夏玉米生育期划分为如下 5 个阶段:播种~出苗(6 月 10 日至 6 月 20 日)、出苗~拔节(6 月 21 日至 7 月 20 日)、拔节~抽雄(7 月 21 日

至 8 月 10 日)、抽雄~灌浆(8 月 11 日-9 月 10 日)、灌浆~成熟(9 月 11 日至 9 月 30 日)。

1.2.2 有效降水量的计算 有效降水量通常指自然降水量实际补给到作物根部土壤的净降水量^[10-11]。降水的有效性与降水量级直接相关,同时也与作物生长状况、地表覆盖情况、土壤的质地结构和当前土壤实际含水量有关,精确计算比较困难。因此,本文采取如下经验公式^[12-13]:

$$Pe = a \times P \quad (1)$$

式中, Pe 为有效降水量(mm); P 为总降水量(mm); a 为有效降水系数。由于小于 5 mm 的降水量为无效水,采用以下经验系数:

$$a = \begin{cases} 0 & P < 5 \text{ mm} \\ 1.0 & P = 5 \sim 50 \text{ mm} \\ 0.8 \sim 0.75 & P = 50 \sim 150 \text{ mm} \\ 0.7 & P > 150 \text{ mm} \end{cases} \quad (2)$$

分别计算冬小麦和夏玉米各生育阶段的有效降水,以分析有效降水的变化及对冬小麦和夏玉米需水量的影响。

1.2.3 作物蒸发蒸腾量的计算 采用 FAO Penman-Monteith 公式计算参考作物蒸发蒸腾量(ET_0)^[14-18]:

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad (3)$$

式中, ET_0 为参考作物蒸发蒸腾量($\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$); R_n 为输入冠层净辐射量($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$); G 为土壤热通量($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$); T 为 2 m 高处日平均温度($^{\circ}\text{C}$); u_2 为 2 m 高处风速($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$); e_s 为实际水汽压(kPa); Δ 为饱和水汽压与温度关系曲线在某处的斜率($\text{kPa} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$); γ 为干湿温度计量常数($\text{kPa} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$)。

作物系数通常指主要作物生长发育期间作物需水量和参考作物需水量之间的比值,一般采用 K_c 表示,本文采用较为广泛的单作物系数法进行计算^[19-20],公式如下:

$$ET_c = K_c \times ET_0 \quad (4)$$

式中, ET_c 为作物供水充足条件下的蒸发蒸腾量($\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$); K_c 为作物系数; ET_0 为参考作物需水量($\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$)。

2 结果与分析

2.1 冬小麦和夏玉米的需水量和需水规律

FAO 建议将作物的生育期划分为如下 4 个阶段,小麦和玉米各生育阶段需水量见表 1 和表 2。

表 1 冬小麦生育期内需水量和需水规律

Table 1 Water requirement of winter wheat during growth periods

生育阶段 Growth stage	天数 Days /d	需水量 Water requirement /mm	需水强度 Water requirement rate /(mm·d ⁻¹)
全生育期 Growth period	253	428.6	1.7
播种 ~ 返青 Sowing ~ reviving	133	126.5	1.0
返青 ~ 拔节 Reviving ~ shooting	35	81.2	2.3
拔节 ~ 孕穗 Shooting ~ booting	50	206.6	4.1
孕穗 ~ 成熟 Booting ~ maturity	35	41.8	1.2

2.2 冬小麦生育期内有效降水的变化特征

如图 1, 1984—2015 年杨凌示范区冬小麦生育期内有效降水呈减少趋势, 但变化不显著 ($P = 0.856$)。32 a 间冬小麦生育期内平均降水量为 151.2 mm, 平均有效降水量为 96.6 mm。有效降水最大值出现在 2014 年, 为 215.1 mm; 最小值为 2000 年(25.7 mm), 相差 189.4 mm。冬小麦生育期有效

降水占总降水量最高为 90% (2012 年), 最低为 41% (2000 年), 平均值占生育期总降水量的 64%。32 a 中有效降水量有 18 a 低于平均值, 时间集中在 1986—1996 年以及 2000—2003 年。可见, 杨凌示范区冬小麦生育期内有效降水量年际变化很大。

表 2 夏玉米生育期内需水量和需水规律

Table 2 Water requirement of summer maize during growth periods

生育阶段 Growth stage	天数 Days /d	需水量 Water requirement /mm	需水强度 Water requirement rate /(mm·d ⁻¹)
全生育期 Growth period	90	384.1	4.3
播种 ~ 出苗 Sowing ~ emergence	10	31.4	3.1
出苗 ~ 抽雄 Emergence ~ tasseling	30	157.2	5.2
抽雄 ~ 灌浆 Tasseling ~ filling	30	166.6	5.6
灌浆 ~ 成熟 Filling ~ maturity	20	40.5	2.0

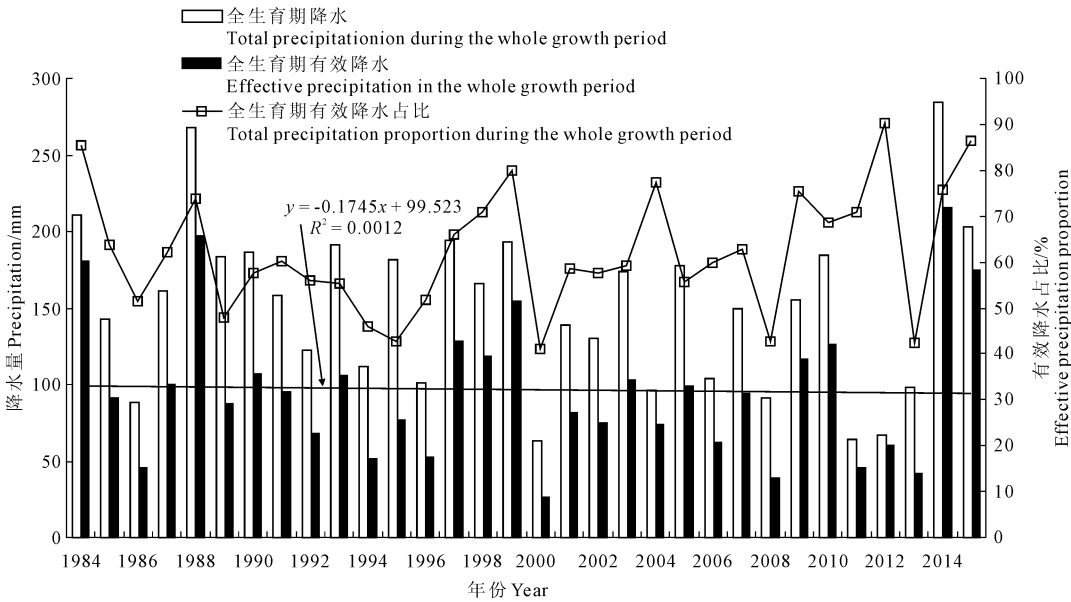


图 1 1984—2015 年冬小麦生育期降水量及有效降水量年际变化

Fig.1 Annual variation of precipitation and effective precipitation of winter wheat during 1984—2015

表 2 表明, 冬小麦各生育阶段 32 a 的平均有效降水量表现出明显差异: 其中拔节 ~ 孕穗阶段有效降水量最大, 占全生育期有效降水量的 39%; 其次为孕穗 ~ 成熟阶段, 占全生育期有效降水量的 28%; 出苗 ~ 越冬和越冬 ~ 返青阶段最小, 分别为 5 mm 和 3.9 mm, 占全生育期有效降水量的 5% 和 4%。1984—2015 年杨凌示范区冬小麦各生育阶段最大有效降水量变化很大, 为 15.8(越冬 ~ 返青) ~ 138.9 mm(拔节 ~ 孕穗); 各生育阶段最小有效降水量均为零, 表明无有效降水的情况在冬小麦各生育

阶段时有发生。从有效降水的变异系数来看, 出苗 ~ 越冬阶段有效降水变化最大, 为 140%; 其次是返青 ~ 拔节阶段(130%); 越冬 ~ 返青阶段有所减小, 为 120%; 拔节 ~ 孕穗阶段最小, 为 79%; 孕穗 ~ 成熟阶段有所增大, 为 101%; 全生育期有效降水的变异系数远小于各生育阶段, 但仍可达 49%。可见, 冬小麦全生育期及各生育阶段的有效降水表现明显的不稳定性, 尤以出苗 ~ 越冬 ~ 返青 ~ 拔节 3 个阶段表现突出, 而以拔节 ~ 孕穗、孕穗 ~ 成熟阶段有效降水量较大且相对稳定。

表 3 1984—2015 年杨凌示范区冬小麦各生育阶段的有效降水量

Table 3 Effective precipitation of winter wheat growth period in Yangling area during 1984—2015

生育期 Growth period	平均值/mm Average value	最大值/mm Maximal value	最小值/mm Minimum value	标准差/mm Standard deviation	变异系数/% Coefficient of variation
全生育期 Growth period	96.6	215.1	25.7	47.3	49
播种 ~ 出苗 Sowing ~ emergence	10.0	51.2	0	11.2	111
出苗 ~ 越冬 Emergence ~ overwintering	5.0	29.7	0	7.0	140
越冬 ~ 返青 Overwintering ~ reviving	3.9	15.8	0	4.7	120
返青 ~ 拔节 Reviving ~ shooting	13.5	55.3	0	17.5	130
拔节 ~ 孕穗 Shooting ~ booting	37.6	138.9	0	29.8	79
孕穗 ~ 成熟 Booting ~ maturity	26.6	99.5	0	26.9	101

2.3 冬小麦各生育阶段水分供需的适配性分析

对比表 1、表 3 可以看出,杨凌示范区冬小麦各生育阶段有效降水量少且分布不均,远不能满足冬小麦特定生育阶段的需水要求。那么,为了节约水资源、获得更高的作物水分利用效率,应该在哪个生育阶段进行补充灌溉呢?

有研究表明,土壤含水量在田间持水量的 60% ~ 70% 时最适宜小麦出苗^[21]。如果土壤过湿,无法整地,难以播种;土壤过于干燥,种子难以发芽,不利于播种和出苗。考虑到该区自然降雨主要集中在夏秋季(6—9 月),且当地土壤具有强大的蓄水能力,在播种 ~ 出苗阶段,可以依靠 9 月份及以前的降雨,灌水的需求很小。

小麦出苗后不久即进入分蘖期,需水量增加。冬小麦分蘖期以 0 ~ 20 cm 土层含水量占田间持水量的 60% ~ 80% 为宜。进入越冬期后,地上部分停止生长,而根系仍缓慢生长,且冬季干冷少雨,此时外来水分主要用于减轻地面蒸发,保持底墒。由 32 年降水资料可知,冬小麦出苗 ~ 越冬阶段平均有效降水量仅为 10 mm,而变异系数高达 110%,小麦播种 ~ 返青阶段需水量在 126.5 mm 左右,仅靠降水无法满足小麦的正常需水。冬小麦在生产实践中,通常在 11 月下旬至 12 月上旬越冬期来临前进行 40 ~ 50 mm 的灌水^[22],充分说明了此阶段需要适当的补充灌溉。

越冬 ~ 返青阶段冬小麦营养生长时间较长,水肥要求较低,还具有较强的补偿效应^[23],而且,适度的水分亏缺对冬小麦产量的影响并不明显,甚至有利于根系的发育和水分利用率的提高^[24-25]。另外,越冬前的灌水也可以蓄积一定的土壤水分。因此,虽然此阶段有效降水少,但春季第一次灌水仍可推迟至拔节期进行。

返青至拔节阶段,冬小麦开始复苏,生长速度加

快,加之春季气温回升,蒸发加强,小麦需水量开始迅速增加。冬小麦进入拔节期后,营养器官生长旺盛,同时生殖器官开始加速生长,此时持续的水分亏缺会造成干物质更多向支持生长的营养器官分配,导致穗部占比相对减少,将严重影响花粉粒发育,使穗粒数下降^[26-27]。表 1、表 2 表明,冬小麦返青 ~ 拔节阶段平均有效降水量为 13.5 mm,且变异性很大,而需水量为 81.2 mm,降水无法满足冬小麦正常生长需求。因而,返青 ~ 拔节阶段应进行必要的补充灌溉,灌溉定额在 60 mm 左右^[28]。

拔节后穗部器官逐步形成,营养生长与生殖生长共同进行,耗水量大。拔节到孕穗是小麦的需水关键期,此时若降水及时可促进小麦生长。抽穗后小麦进入全面生殖生长阶段,进行扬花授粉并形成种子。此时植株生长很快,需水量加大,整个时期要求土壤含水量占田间持水量的 80% ~ 90%^[9]。这一阶段,虽然当地有效降水量较大且相对稳定(表 3),平均有效降水量为 37.6 mm,但孕穗灌浆期干旱对产量影响较其它生育阶段大^[29],且此阶段需水量也最大,为 206.6 mm,仅靠降雨无法满足小麦的水分需求,若能适时地进行必要的补充灌溉,控制灌水定额在 50 mm 左右^[1,30],可促进小麦稳产高效。

2.4 夏玉米生育期内有效降水的变化特征

如图 2,1984—2015 年杨凌示范区夏玉米生育期内有效降水呈递增趋势,但变化不显著($P = 0.91$)。32 年间夏玉米生育期内平均降水量为 351.1 mm,平均有效降水量为 284.4 mm。有效降水最大值出现在 2003 年,降水量为 607.7 mm,最小值为 1994 年(87.7 mm),相差 520 mm。夏玉米生育期有效降水占生育期总降水量最高为 95%(1999 年),最低为 60%(2002 年),平均值占生育期总降水量的 81%。32 a 间有 16 a 低于平均值。可见,杨凌示范区夏玉米生育期内有效降水量年际变化很大。

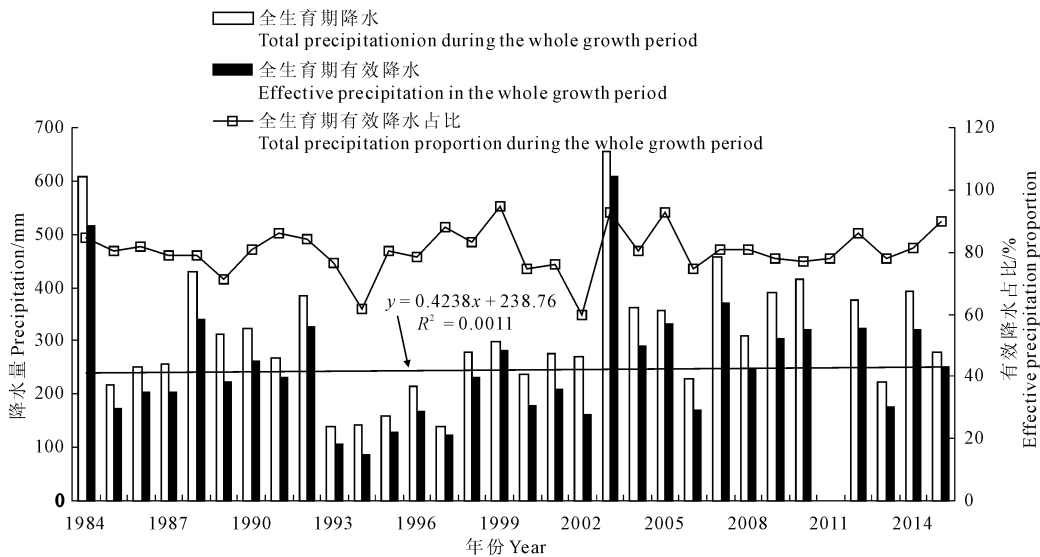


图 2 1984—2015 年夏玉米生育期降水量及有效降水量年际变化

Fig.2 Annual variation of precipitation and effective precipitation for summer maize during 1984—2015

表 4 表明,夏玉米各生育阶段 32 a 的平均有效降水量表现出明显差异:其中出苗~拔节和抽雄~灌浆阶段有效降水量最大,分别占全生育期有效降水量的 25%和 26%,其次是灌浆~成熟和拔节~抽雄阶段,分别占全生育期有效降水量的 21%和 19%,播种~出苗阶段最小,有效降水量为 23 mm,占全生育期有效降水量的 8%。表明除播种~出苗阶段外,夏玉米各生育阶段间有效降水分布比较均匀。1984—2015 年杨凌示范区夏玉米各生育阶段有效降水量最大值变化很大,为 69.5 mm(播种~出苗)~192.3 mm(灌浆~成熟);而播种~出苗和拔节

~抽雄阶段的最小有效降水量均为零,表明无有效降水的情况在夏玉米这 2 个生育阶段也时有发生。从有效降水的变异系数来看,播种~出苗阶段有效降水变化最大,为 102%;其次是拔节~抽雄阶段(81%);出苗~拔节阶段最小,为 52%;抽雄~灌浆~成熟阶段有所增大,均为 67%。全生育期有效降水的变异系数远小于各生育阶段,但仍达 43%。可见,夏玉米全生育期及各生育阶段的有效降水表现出明显的不稳定性,尤以播种~出苗和拔节~抽雄 2 个阶段表现突出,但以出苗~拔节、抽雄~成熟阶段有效降水量较大且相对稳定。

表 4 1984—2015 年杨凌示范区夏玉米生育期有效降水量

Table 4 Effective precipitation of summer maize growth period in Yangling area during 1984—2015

生育期 Growth period	平均值/mm Average value	最大值/mm Maximal value	最小值/mm Minimum value	标准差/mm Standard deviation	变异系数/% Coefficient of variation
全生育期 Growth period	284.4	607.7	87.7	123.8	43
播种~出苗 Sowing~emergence	23.0	69.5	0	23.5	102
出苗~拔节 Sowing~shooting	72.4	163.1	7.5	37.6	52
拔节~抽雄 Shooting~tasseling	54.4	176.0	0	43.9	81
抽雄~灌浆 Tasseling~filling	73.9	152.8	2.4	49.7	67
灌浆~成熟 Filling~maturity	60.7	192.3	9.2	40.7	67

2.5 夏玉米各生育阶段水分供需的适配性分析

夏玉米苗期根系生长较快,而地上部分生长缓慢,比较耐旱。这一时期,人为控制土壤水分,进行抗旱锻炼,可促使根系向深层发展,增加对深层土壤水分的利用。虽然夏玉米在播种–出苗阶段有效降水量较少,平均值为 23 mm(表 4),但此阶段玉米需

水量不大(31.4 mm),如果能在小麦收获后趁墒播种保证出苗,一般无需灌水,还有利于增强玉米中、后期抗旱能力。

玉米进入拔节期后,植株生长旺盛,雌雄穗开始分化形成,是生长发育最活跃的时期,蒸发蒸腾强烈,此时缺水会引起营养体生长不良,植株体型矮

小^[31-32]。夏玉米出苗~抽雄阶段平均有效降水量分别为 126.8 mm,小于此阶段耗水量 157.2 mm,可在大喇叭口这个产量形成的关键生育期进行补充灌溉。但灌水定额不宜过多,一般在 50 mm 左右^[33-34],防止深层渗漏,以达到节水效果。

玉米抽雄灌浆期,温度高,日照时间长,需水量达到高峰,从开花前 8~10 d 开始,30 天内的耗水量约占总耗水量的一半^[35]。如果水分不足,将影响玉米开花授粉,造成减产;如果水分胁迫严重,还会造成雌雄花开花期脱落,花粉活力降低,严重影响产量^[31]。由表 1 可知抽雄~灌浆阶段夏玉米耗水量在 166.6 mm 左右,而此阶段有效降水量平均仅 73.9 mm,因此需要补充灌溉,灌水定额宜 60 mm 左右^[34]。

玉米乳熟~成熟阶段,玉米茎叶逐渐衰老,果穗日趋定型,气温下降,耗水量为 40.5 mm,而此时有效降水量 60.7 mm 且相对较稳定(表 4),多数年份有效降水量可以满足玉米的需水量,因此不需要灌水。

3 结 论

1) 1984—2015 年,杨凌示范区冬小麦在出苗~越冬阶段有效降水变化最大,其次是返青~拔节阶段。冬小麦全生育期及各生育阶段的有效降水表现出不稳定性,除个别年份外,大多年份降水不能满足冬小麦的需水要求;其中播种~返青阶段有效降水量仅为 18.9 mm,需水量在 126.5 mm 左右,根据小麦生理需水规律需冬前灌水 45~50 mm;返青~拔节阶段有效降水 13.5 mm,且变异系数达 130%,而需水量为 81.2 mm,故拔节期可灌水 60 mm;拔节~孕穗阶段有效降水相对稳定,为 37.6 mm,但小麦在此阶段需水量达 206.6 mm,根据小麦生理需求需灌水 50 mm 左右;若遇多雨年份,拔节期灌水可往后推迟,与灌浆期灌水并作一水浇灌。

2) 夏玉米各生育期有效降水的最大、最小年际差较大,全生育期有效降水变异系数小于各生育阶段;其中播种~出苗期有效降水变化最大,变异系数达 102%,其次是拔节~抽雄(81%)。夏玉米全生育期及各生育阶段的平均有效降水总体表现出不稳定性,出苗~抽雄阶段平均有效降水量为 126.8 mm,此阶段玉米需水量为 157.2 mm;玉米抽雄~灌浆阶段平均有效降水 73.9 mm,而需水量为 166.6 mm;根据玉米生理需水规律,一般年份可在夏玉米大喇叭口期灌水 50 mm 左右,抽雄灌浆期灌水 60 mm。

参 考 文 献:

[1] 李军平.冬小麦灌溉规律分析[J].湖南农机,2013,40(3):228-229.

[2] 李红梅,范建忠.关中夏玉米生育期气象干旱特征分析[J].陕西气象,2015,(4):1-4.

[3] 王 雅,金晓团,孙文雅.陕西关中平原水浇地冬小麦高产栽培技术[J].现代农业科技,2012,(3):122-123.

[4] 高瑞景,孟继宏,康建恩.关中夏玉米区陕 308 高产栽培技术研究[J].西北农业学报,2007,16(5):84-88.

[5] 武继承,杨永辉,郑惠玲,等.水肥互作对小麦-玉米周年产量及水分利用率的影响[J].河南农业科学,2015,44(7):67-72.

[6] 刘 芬,同延安,王小英,等.陕西关中灌区冬小麦施肥指标研究[J].土壤学报,2013,50(3):556-562.

[7] 焦艳平,孟祥琴,马香玲,等.不同施氮量对小麦、玉米产量和土壤养分分布的影响[J].南水北调与水利科技,2012,10(3):103-108.

[8] 王少杰,高鹏程,林 文,等.氮肥与秸秆还田对陕西关中灌区冬小麦农田 CO₂ 排放的影响[J].干旱地区农业研究,2013,31(1):117-121.

[9] 李兆元,陈建文,王秀琴.关中地区冬小麦生育期气象条件分析[J].陕西气象,1995,(6):36-38.

[10] 徐凤琴.有效降水量浅析[J].气象水文海洋仪器,2009,(1):96-97.

[11] 王文玉,张 强,阳伏林.半干旱榆中地区最小有效降水量及降水转化率的研究[J].气象学报,2013,71(5):953-961.

[12] 王晓东,马晓群,许 莹,等.淮河流域主要农作物全生育期水分盈亏时空变化分析[J].资源科学,2013,35(3):665-672.

[13] 刘战东,段爱旺,肖俊夫,等.旱作物生育期有效降水量计算模拟研究进展[J].灌溉排水学报,2007,26(3):27-30.

[14] Allen R G, Pruitt W O, Wright J L, et al. A recommendation on standardized surface resistance for hourly calculation of reference ET₀, by the FAO56 Penman - Monteith method[J]. Agricultural Water Management, 2006, 81(1-2):1-22.

[15] Allan R G, Pereira L S, Raes D, et al. Crop Evapotranspiration: Guidelines for Computing Crop Water Requirements[C]//FAO Irrigation and Drainage Paper No.56. Rome:Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1998:19-24.

[16] Grismer M E, Orang M, Snyder R, et al. Pan evaporation to reference evapotranspiration conversion methods[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2002,128(3):180-184.

[17] Pauwels V R N, Samson R. Comparison of different methods to measure and model actual evapotranspiration rates for a wet sloping grassland[J]. Agricultural Water Management, 2006,82(1):1-24.

[18] Doorenbos J, Kassam A H. Yield response to water[C]//FAO Irrigation and Drainage Paper (33). Rome:Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1979.

[19] 汪志农.灌溉排水工程学[M].北京:中国农业出版社,2010:33-34.

[20] 郑冬燕,夏 军,黄友波.生态需水量估算问题的初步探讨[J].水电能源科学,2002,(3):1-5.

- 态学杂志, 2015, 34(2): 582-588.
- [22] 蔡福, 米娜, 纪瑞鹏, 等. 关键生育阶段持续干旱对东北春玉米光合特性的影响[J]. 生态学杂志, 2017, 36(6): 1578-1589.
- [23] 齐伟, 张吉旺, 王空军, 等. 干旱胁迫对不同耐旱性玉米杂交种产量和根系生理特性的影响[J]. 应用生态学报, 2010, 21(1): 48-52.
- [24] 米娜, 蔡福, 张玉书, 等. 不同生育期持续干旱对玉米的影响及其与减产率的定量关系[J]. 应用生态学报, 2017, 28(5): 1563-1570.
- [25] 纪瑞鹏, 车宇胜, 朱永宁, 等. 干旱对东北春玉米生长发育和产量的影响[J]. 应用生态学报, 2012, 23(11): 3021-3026.
- [26] 刘庚山, 郭安红, 任三学, 等. 夏玉米苗期有限水分胁迫拔节期复水的补偿效应[J]. 生态学杂志, 2004, 23(3): 24-29.
- [27] 马树庆, 王琪, 陈凤涛, 等. 春旱背景下春玉米苗情对产量的影响及减产评估模式[J]. 农业工程学报, 2015, 31(S1): 171-179.
- [28] Cheng Z Q, Meng J H, Wang Y M. Improving spring maize yield estimation at field scale by assimilating time-series $h_j - 1$ ccd data into the wofost model using a new method with fast algorithms[J]. Remote Sensing, 2016, 8(4): 303.
- [29] 赵锦, 杨晓光, 刘志娟, 等. 全球气候变暖对中国种植制度的可能影响Ⅰ. 气候变化对东北三省春玉米气候适宜性的影响[J]. 中国农业科学, 2014, 47(16): 3143-3156.
- [30] 张建平, 王春乙, 杨晓光, 等. 温度导致的我国东北三省玉米产量波动模拟[J]. 生态学报, 2009, 29(10): 5516-5522.
- [31] 刘实, 王勇, 缪启龙, 等. 近 50 年东北地区热量资源变化特征[J]. 应用气象学报, 2010, 21(3): 266-278.
- [32] 刘志娟, 杨晓光, 王文峰, 等. 全球气候变暖对中国种植制度可能影响Ⅱ. 未来气候变暖对东北三省春玉米种植北界的可能影响[J]. 中国农业科学, 2010, 43(11): 2280-2291.
- [33] 于文颖, 纪瑞鹏, 冯锐, 等. 不同生育期玉米叶片光合特性及水分利用效率对水分胁迫的响应[J]. 生态学报, 2015, 35(9): 2902-2909.
- [34] 吕厚荃, 张玉书, 李茂松, 等. GB/T 32136-2015. 农业干旱等级[S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.
- [35] 韩希英, 宋凤斌. 干旱胁迫对玉米根系生长及根际养分的影响[J]. 水土保持学报, 2006, 20(3): 170-172.
- [36] 蔡福, 明惠青, 米娜, 等. 基于 CoLM 模型的根分布对陆-气水热交换的影响研究: 以玉米农田为例[J]. 气象学报, 2015, 73(3): 566-576.

(上接第 120 页)

- [21] 李丁仁,张振海,王永宏,等.宁夏小麦、水稻、玉米高产栽培技术[M].银川:宁夏人民出版社,2012:19.
- [22] 刘涛,周广胜,谭凯炎,等.华北地区冬小麦灌溉制度机器环境效应研究进展[J].生态学报,2016,36(19):1-8.
- [23] 赵丽英,邓西平,山仓.水分亏缺下作物补偿效应类型及机制研究概述[J].应用生态学报,2004,15(3):523-526.
- [24] 杨静敬,卢振广,潘国强,等.亏缺灌溉对冬小麦耗水规律及产量的影响[J].节水灌溉,2013,(4):8-11.
- [25] 李红梅,李志宏,韩湘玲.冬小麦降水年型与补水灌溉动态管理[J].灌溉排水,2001,20(1):60-64.
- [26] 张建军,唐小明,党翼.灌水量及其分配方式对冬小麦水分李龙效率、光合特性和产量的影响[J].麦类作物学报,2008,28(1):85-90.
- [27] 肖俊夫,刘战东,段爱旺,等.不同灌水处理对冬小麦产量和水分利用效率的影响研究[J].灌溉排水学报,2006,25(2):20-23.
- [28] 张崇智.西安市主要作物节水灌溉制度研究[J].干旱地区农业研究,2005,23(3):150-153.
- [29] 韩绍林.旱作农业与河南旱地小麦栽培[M].郑州:河南水利出版社,2010:171.
- [30] 王文佳,冯浩.基于CROPWAT-DSSAT关中地区冬小麦需水规律及灌溉制度研究[J].中国生态农业学报,2012,20(6):795-802.
- [31] 张英普,何武全,韩健.玉米不同生育期水分胁迫指标[J].灌溉排水,2001,20(4):18-20.
- [32] 东先旺,刘培利,刘树堂,等.夏玉米耗水特性与灌水指标的研究[J].玉米科学,1997,2(16):55-57.
- [33] 王辛未.谈玉米灌溉[J].陕西水利,1989,(4):28-30.
- [34] 吕军杰,王聪慧,丁志强,等.豫西夏玉米不同灌水方式研究[J].河南农业科学,2006,(11):31-32.
- [35] 陈丹,钟思强.农业气象[M].北京:气象出版社,2009:180-182.