

姚小英,王 莺,王 兴,等. 黄土高原旱塬区玉米田土壤水分变化特征及对产量的影响[J]. 江苏农业科学,2020,48(12):292-297.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2020.12.057

黄土高原旱塬区玉米田土壤水分变化特征 及对产量的影响

姚小英¹, 王 莺¹, 王 兴², 周忠文³, 张 蓓⁴, 杨子和⁴

[1. 中国气象局兰州干旱气象研究所/甘肃省(中国气象局)干旱气候变化与减灾重点开放实验室,甘肃兰州 730020;

2. 甘肃省气象局,甘肃兰州 730020; 3. 甘肃省庆阳市西峰农业气象试验站,甘肃西峰 745000;

4. 甘肃省天水市气象局,甘肃天水 741000]

摘要:黄土高原旱塬区属半干旱半湿润气候过渡区,土壤水是影响该地区玉米生长的主要因素。运用黄土高原旱塬区董志塬所在地西峰农业气象试验站 1981—2015 年玉米试验田土壤湿度及产量观测资料,利用统计学方法,计算分析 1981—2015 年这 35 年间土壤水的变化规律及对产量的影响。结果表明,黄土高原旱塬区玉米全生育期土壤平均贮水量呈高一低一高的抛物线状变化趋势,贮水量最大时期为乳熟期至成熟期,最小时期为拔节期至抽雄期;土壤耗水量呈低一高一低的抛物线变化趋势,最大时期为拔节期至抽雄期,最小时期为播种期至七叶期。35 年来土壤深度为 50 cm 的土层贮水量、耗水量均呈下降趋势;玉米产量受抽穗期土壤水分变化的影响最大。土壤深度为 50 cm 的土层贮水量及耗水量对玉米单产的最大影响均出现在 7 月中旬,分别为 21、27 kg/(hm²·mm)。建议采取有效保墒节水技术措施,减轻玉米关键生育期土壤水分不足对生长的胁迫。

关键词:黄土高原旱塬区;土壤水分;玉米;产量;变化特征;影响

中图分类号: S152.7 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2020)12-0292-06

黄土高原旱塬区是以旱作物为主的雨养农业区,自然降水和蒸发量是影响土壤含水量的主要因子。近年来,甘肃黄土高原气候暖干化特征明显,气候变暖导致温度增高,同时也改变了降雨类型(雨量及变化情况),土壤中水热耦合交互作用显著影响了土壤水分蒸发,由此对土壤墒情产生重要的影响。可以说,土壤含水量对气候变暖的响应更加敏感^[1-5]。

研究表明,作物生长所需要的水分主要依赖于大气降水^[6],大气降水对作物的水分供应需要土壤调节,并通过水热耦合效应对作物生长产生影响。黄土高原旱塬区作物生长季节,各地土壤含水量与最适水分含量均有一定差异,一般夏季的含水量最大,可达 100 mm,春季次之,为 30~70 mm。说明该地域作物生长受水分制约程度大。土壤水分的盈亏亏缺状况在很大程度上决定着作物生长状况的优劣和最终产量的高低^[4-5]。因此,从大气-土壤-作物循环系统的理论观点出发,探讨旱塬雨养

农业区土壤水分贮存、耗散变化特征对该地区农业生产具有科学指导意义^[6-7]。

陇东黄土高原旱塬区是甘肃省最主要的粮食主产区之一。近年来,有关甘肃黄土高原土壤水分的研究多集中在土壤水分演变规律、土壤贮水量、作物耗水量指标、土壤蒸散发变化时空分布特征等方面^[7-13]。随着气候变暖,陇东黄土高原粮食种植结构发生调整,压夏增秋,玉米种植面积逐年增大,比 20 世纪 80 年代增加近 3 倍,已成为“陇东粮仓”最主要的秋粮作物。对于玉米土壤水分的利用有关学者也进行过相关研究^[14],分析研究玉米田土壤水分变化特征,对旱作区粮食安全生产具有重要的现实意义。

1 数据来源与研究方法

1.1 研究区概况

甘肃黄土高原中部陇东董志塬属温和半湿润半干旱气候过渡带,是典型的旱作农业区,面积为 910 km²,为黄土高原保存最完整、面积最大的塬面,土层深厚。本研究选择最具代表性的董志塬所在地西峰农业气象试验站(国家一级农业气象试验站)作为试验研究区,该区域位于 35°44′N,

收稿日期:2019-08-09

基金项目:国家自然科学基金(编号:41605089);公益性行业(气象)

科研专项(编号:GYHY201506001-6)。

作者简介:姚小英(1968—),女,甘肃天水人,硕士,高级工程师,主要从事农业气象试验研究及服务。E-mail:tsyxy66@163.com。

107°38'E, 海拔高度为 1 421 m, 年平均降水量为 527 mm, 年平均气温为 8.7 °C。土壤质地为粉壤土, 土壤深度为 30 cm 的土层可容纳水分 85 mm, 土壤深度为 50 cm 的土层可容纳水分 140 mm; 作物凋萎土壤深度为 50 cm 的土层的含水量为 45 mm。一般情况下, 上层土壤能截留并保持大部分乃至全部降水入渗量。地下水位埋深在数十米至百米, 很难通过毛管力上升地表参与水分循环。该地段无灌溉设施, 种植方式采用地膜覆盖, 与冬小麦倒茬, 倒茬地块与玉米田相连, 生长环境、气象要素、土壤质地、物理水文常数相同。本研究所用供试品种为生物学特性基本一致的中熟品种, 1994—2008 年为中单及承单系列, 2009—2015 年为奥玉 3202, 种植密度均为 55 000 ~ 60 000 株/hm², 施肥等田间管理措施每年保持基本一致, 为当地中等水平。

1.2 资料来源

自 1980 年起, 根据业务要求, 西峰农业气象试验站连续进行玉米田作物生长状况及土壤水分观测。据有关研究, 玉米生长对土壤水分的利用主要体现在浅层土壤^[14], 故本研究选取西峰农业气象试验站 1981—2015 年玉米田土壤深度为 50 cm 的土层实际测的土壤水分数据, 同步逐年进行玉米产量测定。降水量数据取自与玉米观测地段紧邻的西峰国家基准气象站。

1.3 计算方法

1.3.1 贮水量计算 玉米田土壤水分测定采用土钻法^[15]。测定时间为玉米播种前的 3 月上旬至成熟后的 9 月下旬, 间隔 10 cm 分层取样, 每次测定设置 4 个重复, 计算土壤质量含水率(%) [(湿土质量 - 干土质量)/干土质量]。每月测定 3 次(当月 8 日、18 日、28 日), 测定深度为 50 cm。

$$W(t) = g \times \rho \times h. \quad (1)$$

式中: $W(t)$ 为土壤贮水量(mm); ρ 为土壤水分质量含水率(%); h 为土层厚度(mm); g 为重力加速度。

1.3.2 耗水量计算 耗水量包括玉米的蒸腾及田间蒸发减少的水分, 是大气降水及土壤运动共同作用结果的综合反映。玉米各生育阶段土壤耗水量可用简化的水分平衡方程计算^[16], 其公式如下:

$$WS = W_1 - W_2 + P - f + K - N. \quad (2)$$

式中: WS 为耗水量(mm); W_1 、 W_2 分别为计算时段初月(旬)、末月(旬)土壤深度为 50 cm 土层的贮水量(mm); P 为计算时段内降水量(mm); f 为径流量; K 为毛管上升水量; N 为渗漏量。由于甘肃黄土

高原地区气象观测站点地势平坦, 因此一年大部分时间不会产生较大径流, 所选试验区为旱作田, 同时地下水位较深, f 、 K 、 N 值均可忽略不计。

1.3.3 积分回归法 利用积分回归定量计算玉米生长期各时段土壤水分对地段实际产量的影响^[17]。以旬(10 d)为单位, 将玉米从播种期至收获期划分为 15 个时段, 各时段土壤贮水量和耗水量与单产关系可用下列积分回归表示:

$$y = C + \int_1^{15} a_j(t) w(t) dt. \quad (3)$$

式中: y 为该地段实际产量的估计值(kg/hm²); C 为待定常数; $w(t) dt$ 为 $t + \Delta t$ 时段内的土壤贮水量及耗水量; $a_j(t) = \Delta y / w(t)$, 为 t 时间的土壤贮水量、耗水量与玉米最终产量之间生理关系的一个时间函数, 即生长期不同时段内土壤水分每变化 1 个单位对玉米产量的影响效果, j 为生育时段。

2 结果与分析

2.1 降水量变化特征

在无灌溉条件的黄土高原旱源区, 土壤水分的唯一供给来源是大气降水。由图 1 1981—2015 年试验区降水量年际变化表明, 35 年来玉米全生育期 4—9 月平均降水量为 361 mm, 降水量的最大值出现在 1988 年, 为 585 mm; 最小值出现在 1997 年, 为 190 mm, 最大值与最小值相差 395 mm, 年际变化以 19 mm/10 年($R = 0.0389$, $P > 0.1$) 线性趋势减少。玉米不同发育时期降水量不同, 播种期至七叶期平均降水量为 80 mm, 占全生育期的 22%, 年际线性变化趋势不明显; 拔节期至抽雄期平均降水量为 147 mm, 占全生育期的 41%, 年际变化以 5.9 mm/10 年($R = 0.085$, $P > 0.1$) 线性趋势减少; 乳熟期至成熟期平均降水量为 137 mm, 占全生育期的 38%, 年际线性变化趋势亦不明显。

2.2 土壤水分变化特征

2.2.1 贮水量年变化 土壤水分贮量的变化, 是土壤内部水分向上蒸散、向下渗透及外部降水共同作用、动态平衡的结果。计算分析结果表明, 玉米田 50 cm 土壤贮水总量的变化幅度均小于田间最大贮水量。说明一年之中, 土壤因持水过多而引起的重力下渗量是有限的, 土壤贮水量变化主要受作物吸收蒸腾及田间蒸发的影响。由图 2 可知, 1981—2015 年玉米全生育期土壤贮水量呈高一低一高的抛物线状变化趋势, 3 月播种前土壤贮水量为

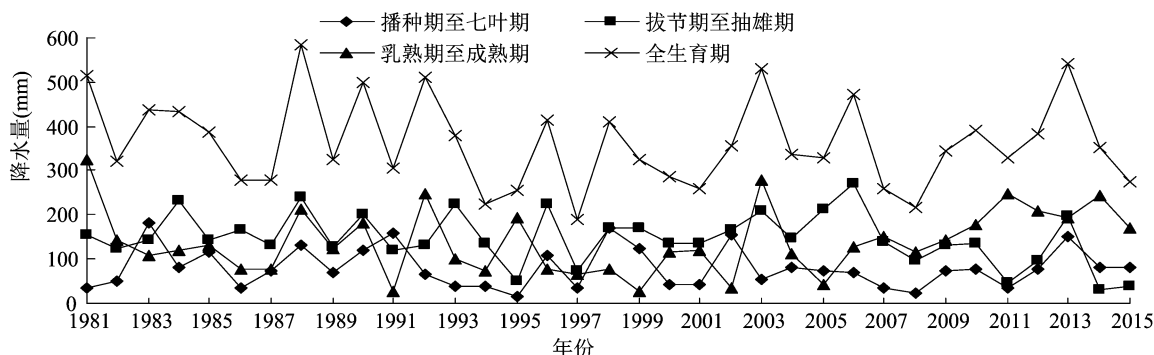
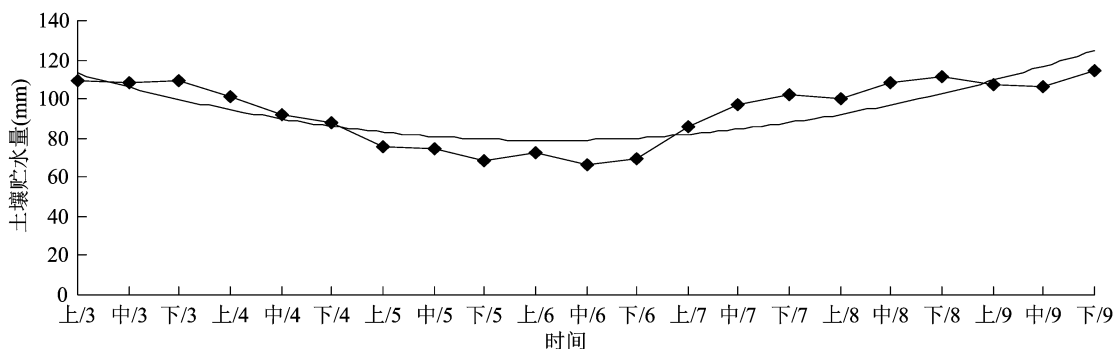


图1 玉米不同发育生长阶段降水量年际变化(1981—2015 年)

108 mm, 4 月上中旬播种出苗后, 含水量逐渐下降, 6 月中旬拔节期达到最低值 66 mm, 说明此时期土壤水分消耗最多, 为土壤水分最匮乏时期。之后, 随

玉米生长对水分需求的减少及降水量的增多, 贮水量又逐渐上升, 成熟期在 9 月下旬达到最高峰值 115 mm, 为玉米生育期土壤水分贮存最多的时段。

图2 玉米生育期 50 cm 土层土壤贮水量变化 (1981—2015 年)
上/3 表示 3 月上旬, 中/3 表示 3 月中旬, 依此类推。图 4、图 6 同

统计分析表明, 玉米试验田 35 年的土壤贮水量随时间的变化特征可以很好地用抛物线方程拟合:

$$W_{\text{贮}}(t) = 120.7000 - 8.1481t + 0.3974t^2. \quad (4)$$

式中: $W_{\text{贮}}(t)$ 表示 0~50 cm 土层的贮水量; t 为玉米开始播种前 3 月上旬到生长后期 9 月下旬的旬序数 (3 月上旬, $t=1$; 3 月中旬, $t=2$; ...; 9 月下旬, $t=21$)。

得到 $F=60.87 > F_{0.05}=8.10$, 达显著水平。

对式(4)求一阶导数, 得出土壤贮水量随时间的变化率:

$$dW_{\text{贮}}(t)/dt = -8.1481 + 2 \times 0.3974t. \quad (5)$$

由式(5)可以看出, 贮水量变化率是时间的线性函数。令 $W_{\text{贮}}(t)'=0$, 得出土壤贮水量变化速度呈极小值的时间为 $t_{\min}=10.3$, 即 6 月上旬后期到中甸前期, 此期正值玉米七叶期至拔节期的关键生育阶段^[3], 为作物需水的关键期及敏感期, 土壤贮水量处于最低值时段。这同多年的实际测定情况完全吻合。

2.2.2 贮水量年际变化 由图 3 可知, 1981—2015 年玉米生育期 (4—9 月) 50 cm 土层土壤贮水量变化表明, 全生育期 50 cm 土层土壤贮水量平均值为 102 mm, 最大值在 1990 年, 为 130 mm; 最小值在

1995 年, 为 83 mm, 最大值与最小值相差 47 mm, 年际变化以 4.7 mm/10 年 ($R=0.1391, P>0.1$) 的线性趋势减少。玉米不同发育时期土壤贮水量不同, 贮水量最大时期为乳熟期至成熟期, 其次为播种期至七叶期, 最小时段在拔节期至抽雄期。播种期至七叶期 50 cm 土层平均贮水量为 103 mm, 年际变化较小, 以 1.1 mm/10 年 ($R=0.0049, P>0.1$) 的线性趋势减少。拔节期至抽雄期土壤平均贮水量为 92 mm, 最大值出现在 1988 年, 为 123 mm, 最小值在 2014 年, 为 55 mm, 最大值与最小值相差 68 mm, 年际变化以 6.3 mm/10 年 ($R=0.1227, P>0.1$) 线性趋势减少。乳熟期至成熟期平均贮水量为 110 mm, 年际变化较大, 最大值出现在 1990 年, 为 147 mm, 最小值在 1999 年, 为 82 mm, 最大值与最小值相差 65 mm, 年变化以 6.8 mm/10 年 ($R=0.1784, P>0.1$) 的线性趋势减少。35 年来土壤贮水量在玉米生长的各阶段均呈减少趋势, 其中乳熟期至成熟期线性减少趋势最为明显。据研究, 自 20 世纪 70 年代以来, 甘肃旱作区玉米全生育期降水适宜度呈下降趋势^[18]。可见, 气候暖干化导致土壤贮水量持续减少。

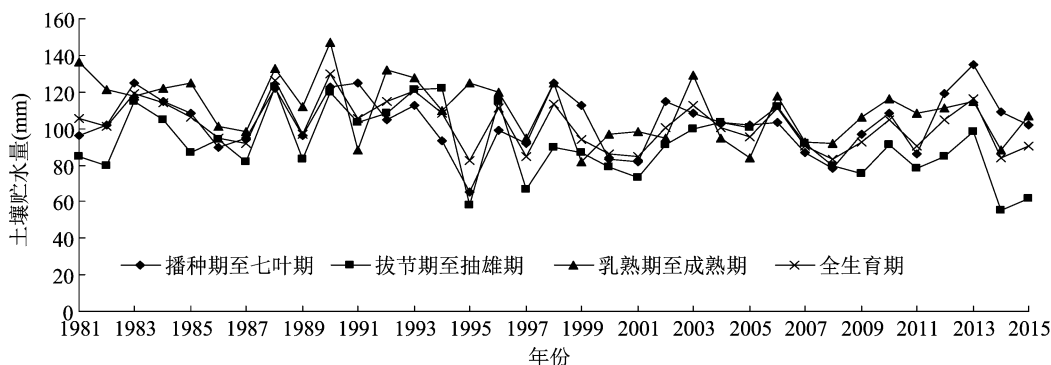


图3 玉米不同发育生长阶段 50 cm 土层土壤贮水量年际变化(1981—2015年)

2.2.3 耗水量年变化 玉米田土壤耗水量包括植株的蒸腾及田间蒸发。图4表明,1981—2015年玉米全生育期土壤耗水量呈低—高—低的抛物线变化趋势($F=60.87 > F_{0.05}=8.10$, $R^2=0.6468$, 达显著水平)。玉米播种期耗水量最小,出苗后逐渐增多,6月中旬出现耗水量的第1个高值点,此期为玉米拔节的关键生育期,也是植株需水耗水的敏感时段;7月下旬达到耗水量的第2个高值点,此期正值玉米抽雄吐丝开花期,是营养生长转化为生殖生长的重要生育阶段,水分需求旺盛,加之为一年的温度最高时段,高温日数多,土壤水分蒸散加剧,耗水量达到全生育期最高,为40 mm。进入乳熟期后,耗水量逐渐减少,至成熟期以后,耗水量减少速度迅速

加快。计算表明,玉米田50 cm土层4—9月土壤累积耗水量为421 mm,与该地年平均降水量基本持平。从全生育期土壤累积耗水量的变化来看,4—5月气温回升快,随着玉米苗期生长发育对土壤水分需求的增加,累积耗水量上升较快,但由于春季大气降水相对较少,补充不足,尤其是表层土壤水蒸散速度较快,加上春季气温不高,蒸散所需的热能不足,使得土壤处于无水可蒸散或只有少量水可供蒸散的状态,总体累积耗水量增速相对较缓;6—9月是1年中降水相对较多的月份,上层土壤水补充比较及时充足,气温较高,能量较大,一方面较多的降水保证了蒸散的较丰供给,另一方面充足的能量又使得蒸散能力加强,累积耗水量增速逐渐加快。

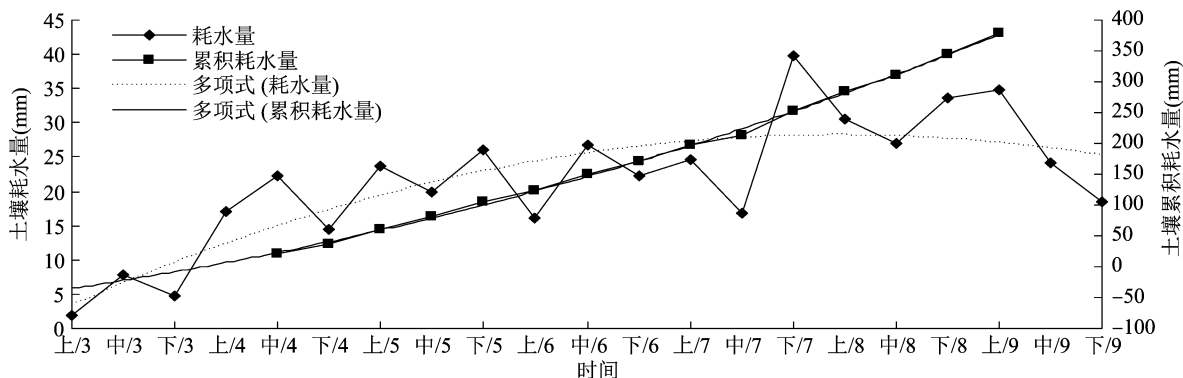


图4 玉米50 cm 土层土壤耗水量变化(1981—2015年)

玉米田50 cm土层4—9月土壤逐旬耗水量随时间的变化可用如下方程拟合:

$$W_{\text{耗}}(t) = 0.5926t^2 - 10.9941t - 46.5290. \quad (6)$$

得到 $F=60.87 > F_{0.05}=8.10$, $R^2=0.9989$, 达显著水平。式(6)中, $W_{\text{耗}}(t)$ 表示50 cm土层土壤耗水量; t 为玉米播种后4月中旬到生长后期9月下旬的旬序数(4月中旬, $t=1$; 4月下旬, $t=2$; ...; 9月下旬, $t=17$)。

对式(6)求一阶导数,得出土壤累积耗水量随时间的变化率:

$$dW_{\text{耗}}(t)/dt = 2.0000 \times 0.5926t - 10.9941. \quad (7)$$

从式(7)可以看出,土壤累积耗水量的变化率是时间的线性函数。令 $W_{\text{耗}}(t)'=0$, 得出土壤累积耗水量增加速度变化的最小时间: $t_{\min}=9.3$, 此期为玉米抽雄期的7月上旬。证明盛夏是玉米田土壤累积耗水量增加最快、累积耗水变化速度比较稳定的一个时期。这同多年的实际测定情况也是完全吻合的。

2.2.4 耗水量年际变化 由图5 1981—2015年玉米全生育期50 cm土层土壤耗水量年际变化表明,全生育期土壤耗水量变化与降水量变化特征相似。

平均耗水量为 345 mm, 最大耗水量在 1988 年, 为 540 mm; 最小值在 1997 年, 为 198 mm, 最大值与最小值相差 342 mm, 年变化以 6.3 mm/10 年的线性趋势减少。不同发育时段土壤耗水量不同, 播种期至七叶期平均耗水量为 93 mm, 占全生育期的 27%, 年变化以 8.9 mm/10 年的线性趋势减少; 拔节期至抽雄期耗水量为 131 mm, 占全生育期的 38%, 年变化以 6.8 mm/10 年线性趋势减少; 乳熟

期至成熟期耗水量为 108 mm, 占全生育期的 31%, 线性变化趋势不明显, 且 2000 年以后, 随气温增高, 特别是高温日数的增多, 耗水量较苗期明显增大。拔节期至抽雄期土壤耗水量最大, 播种期至七叶期与乳熟期至成熟期相差不大, 但乳熟期至成熟期由于处于夏末到初秋, 高温多雨导致耗水强度较播种至七叶期明显增多, 增幅达 57%。

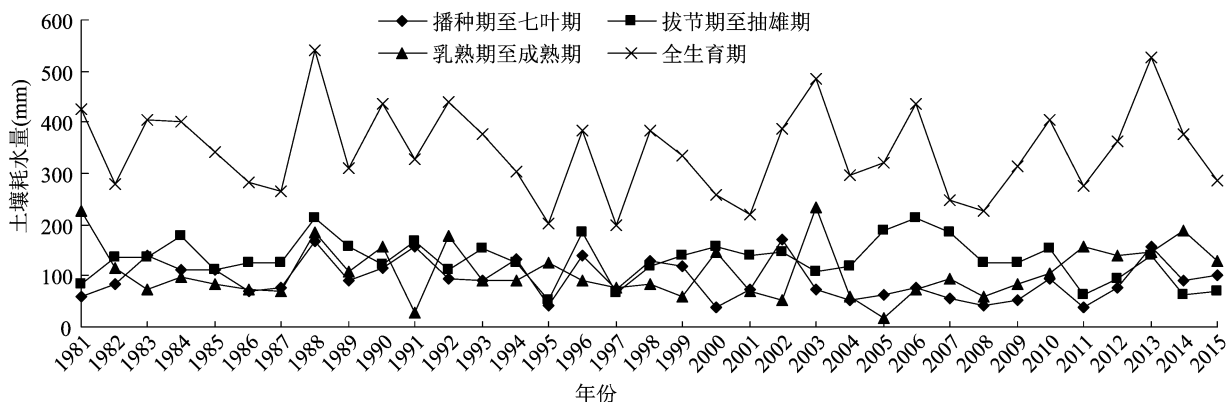


图5 玉米不同发育生长阶段 50 cm 土层土壤耗水量年际变化(1981—2015 年)

2.3 土壤水分对玉米产量的影响

为探究土壤水分变化对玉米最终产量形成的影响, 利用积分回归法计算了 50 cm 土层土壤水分对地段玉米单产的影响程度。结果表明, 土壤贮水量在播种期至七叶期对产量影响较小, $a_j(t)$ 值小于 $6 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{mm})$; 拔节期至抽雄期对产量的影响迅速加大, 最大值出现在 7 月中旬, 为 $21 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{mm})$, 7 月中旬玉米抽雄开花以后, 贮水量对产量的影响逐渐降低。耗水量对产量的影响亦具有明显的阶段性, 播种期至七叶期土壤耗水量对产量影响相对较小, $a_j(t)$ 值与贮水量相差不大; 拔节期至抽雄期以后, 耗水量对产量的影响增大速度大于贮水量, 最大值出现在 7 月中旬, 为 $27 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{mm})$, 之后影响程度快速减弱, 乳熟期

至成熟期耗水量对产量的影响小于贮水量(图 6)。说明玉米生长后期为夏末初秋, 温度尚处于较高阶段, 因土壤蒸散消耗的有效水分较多。

3 讨论

1981—2015 年陇东旱塬区降水量在玉米全生育期 4—9 月有减少趋势。50 cm 土层平均贮水量在玉米全生育期及各生长阶段均呈下降趋势, 土壤贮水量持续减少, 平均耗水量亦呈下降趋势, 拔节期至抽雄期耗水量最多。抽雄期土壤贮水量及耗水量对玉米单产的影响最大。据有关研究表明, 近 40 年陇东黄土高原春季的特旱天气、初夏及伏期的重旱天气虽然出现频次少, 但对玉米生长影响较大^[19]。在玉米全生育期内, 干旱引起的水分胁迫以

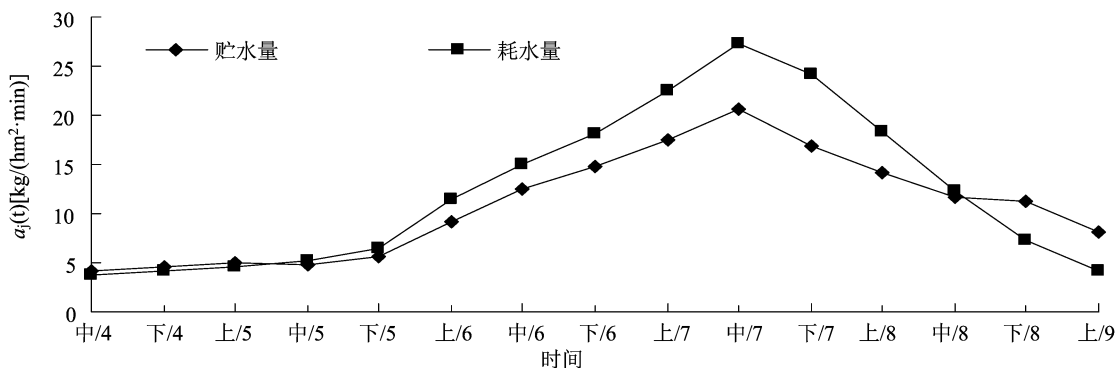


图6 各旬 50 cm 土层贮水量、耗水量与玉米地段单产积分回归曲线

拔节期至抽雄期最大,抽雄前后是玉米水分需求最多、对干旱反应最敏感的时期,此期的干旱也称为“卡脖子旱”,直接影响最终产量。本研究进一步说明在气候变暖背景下,陇东黄土高原玉米生长受水分胁迫影响较大,尤其在关键生育时段,由此导致种植风险程度增高。因此,合理安排适播期,创建旱塬区现代农业发展模式,加强农田科学管理,积极推广抗旱栽培、土壤水的科学利用、农田覆盖等农业干旱灾害防御技术及有效保墒节水措施^[20],减少水分无效消耗,在关键生育期保持适宜土壤湿度,减轻因土壤水分不足对玉米生长的影响是夺取优质高产的关键。

某一特定地区,在其他因子相对稳定的前提下,作物生长状况及产量形成主要受制于热量、水份、光照等气候条件。而事实上,作物生长及产量形成除气候因子外,还会受坡向、坡度、坡位等地形因子,土地类型,作物品种,管理方式,病虫害等多因素影响。因此,实际应用中,在分析评估土壤水分对玉米生长的影响时,应结合各种因素综合考量。

本研究所用简易的水分平衡方程,忽略了径流、植物截流、土壤渗漏等因素的影响;同时,作物品种不同,需水及耗水特性也会有一定差异,虽然计算结果会因此有一定的偏差,但对土壤含水量总体变化趋势及特征不会造成影响,研究结果对实际生产及保障秋粮种植安全仍具有较好的参考价值。

4 结论

1981—2015 年黄土高原旱塬区降水量在玉米全生育期为减少趋势。玉米全生育期土壤平均贮水量呈高一低一高的抛物线状变化趋势,土壤贮水量最大时期为乳熟期至成熟期,其次为播种期至七叶期,最小时期为拔节期至抽雄期,拔节期 6 月中旬达到最低值 66 mm;玉米全生育期 50 cm 土层土壤耗水量呈低一高一低的抛物线变化趋势,6 月中旬及 7 月下旬分别为耗水量的 2 个高值时段。土壤水分贮量最低时段与耗水最高时段重叠,玉米拔节期至抽雄期水分供需矛盾突出。

35 年来玉米全生育期及各生长阶段 50 cm 土层平均贮水量均呈下降趋势,土壤贮水量持续减少,其中乳熟期至成熟期线性减少趋势最明显。50 cm 土层平均耗水量亦呈下降趋势,拔节期至抽雄期耗水量最多。

在无灌溉条件的黄土高原旱塬区,土壤水分是影

响玉米产量的关键因子。玉米产量受抽穗期土壤贮水量变化的影响最大。50 cm 土层土壤贮水量及耗水量对玉米单产的可能最大影响均出现在 7 月中旬,分别为 21、27 kg/(hm² · mm)。

参考文献:

- [1] 邓振镛. 高原干旱气候作物生态适应性研究[M]. 北京:气象出版社,2005:25-38.
- [2] 邓振镛,仇化民,李怀德. 陇东气候与农业开发[M]. 北京:气象出版社,2000:33-46.
- [3] 邓振镛. 干旱地区农业气象研究[M]. 北京:气象出版社,1999:41-96.
- [4] 姚小英,王澄海,蒲金涌,等. 甘肃黄土高原地区土壤水热特征分析研究[J]. 土壤通报,2006,37(4):666-670.
- [5] 姚小英,蒲金涌,王澄海,等. 甘肃黄土高原 40a 来土壤水分蒸散量变化特征[J]. 冰川冻土,2007,29(1):126-130.
- [6] 邓振镛,张强,王强,等. 黄土高原旱作区土壤贮水力和农田耗水量对冬小麦水分利用率的影响[J]. 生态学报,2010,30(14):3672-3678.
- [7] 杨小利. 陇东黄土高原土壤水分演变及其对气候变化的响应[J]. 中国沙漠,2009,29(2):305-311.
- [8] 蒲金涌,姚小英,邓振镛,等. 气候变化对甘肃黄土高原土壤贮水量的影响[J]. 土壤通报,2006,37(6):1086-1090.
- [9] 孙秉强,张强,董安祥,等. 甘肃黄土高原土壤水分气候特征[J]. 地球科学进展,2005,20(9):1041-1046.
- [10] 王润元,杨兴国,张九林,等. 陇东黄土高原土壤蓄水量与蒸发和气候研究[J]. 地球科学进展,2007,22(6):625-635.
- [11] 郭海英,赵建萍,韩涛,等. 陇东黄土高原土壤干旱特征分析[J]. 土壤通报,2007,28(5):837-877.
- [12] 王锡稳,王毅荣,张存杰. 黄土高原半干旱区水热变化及其土壤水分响应[J]. 中国沙漠,2007,27(1):123-129.
- [13] 仇化民,邓振镛,方德彪. 甘肃东部旱作区土壤水分变化规律研究[J]. 高原气象,1996,15(3):334-341.
- [14] 张谋草,赵玮,周忠文,等. 旱作区玉米田土壤水分变化对产量的影响及水分利用效率分析[J]. 中国农学通报,2013,29(33):242-247.
- [15] 中国气象局. 农业气象观测规范[M]. 北京:气象出版社,1993:27-31.
- [16] 蒲金涌,姚小英,贾海源. 甘肃陇西黄土高原旱作区土壤水分变化规律及其有效利用程度研究[J]. 土壤通报,2005,36(4):483-486.
- [17] 王清,王琪延,苏成义,等. 应用统计学[M]. 北京:中国统计出版社,1991:256-268,397-401.
- [18] 姚小英,蒲金涌,姚茹莘,等. 气候暖干化背景下旱作区玉米气候适宜性变化[J]. 地理学报,2011,66(1):59-65.
- [19] 姚小英,吴丽,田广旭,等. 甘肃旱作区玉米近 40 年干旱影响评估[J]. 干旱区资源与环境,2015,29(5):192-196.
- [20] 邓振镛,王强,张强,等. 中国北方气候暖干化对粮食作物的影响及应对措施[J]. 生态学报,2010,30(22):6278-6288.