

陕北山地苹果节水灌溉制度研究

——以绥德县为例

宋安利

(陕西省水文水资源勘测局, 陕西 西安 721000)

摘要: 为了缓解陕北山地苹果园的水分供需矛盾,提高水分有效利用率,提出适宜于该地区的节水灌溉制度。选取陕西省绥德县为代表性区域,利用该县1961-2017年的气象资料,采用水量平衡法,分析了该区苹果在滴灌与管灌下的充分与亏缺灌溉制度。结果表明:不同水文年,苹果树在前3个生育期均需灌溉,且主要集中在萌芽开花期与叶片生长期;对应于25%、50%、75%和95%的水文年,滴灌和管灌的充分灌水次数均分别为3、4、5和6次,滴灌灌溉定额分别为55、80、115和135 mm,管灌分别为85、125、175和200 mm;亏缺灌溉条件下灌水次数均在萌芽开花期减少1次,滴灌亏缺灌溉定额分别为50、80、110和120 mm,管灌分别为75、120、165和180 mm;亏缺灌溉推迟了灌溉时间但节水量并不大。

关键词: 山地苹果;管灌;滴灌;灌溉方式;灌溉制度;陕北

中图分类号:S274.1

文献标识码:A

文章编号:1672-643X(2021)03-0219-06

Water-saving irrigation scheduling of mountain apples in northern Shaanxi: A case study of Suide County

SONG Anli

(Shaanxi Survey Bureau of Hydrology and Water Resources, Xi'an 721000, China)

Abstract: In order to alleviate the contradiction between water supply and demand, improve the water use efficiency of apple orchards in Northern Shaanxi, it is of great significance to formulate a water-saving irrigation schedule suitable for this region. Based on the meteorological data of Suide County over the period of 1961-2021, the sufficient and deficit irrigation scheduling of apple orchards under drip irrigation and pipe irrigation were analyzed using water balance method. The results showed that apple orchards should be irrigated in different hydrological years. All irrigation events should be implemented in the first three growth stages, especially in bud development & flowering stage and the leaf expansion stage. Under sufficient irrigation, irrigation times were 3, 4, 5, 6 in different hydrological years (25%, 50%, 75%, 95%), irrigation quota for drip irrigation and pipe irrigation were 55, 80, 115, 135 mm and 85, 125, 175, 200 mm, respectively. Under deficit irrigation, irrigation times were reduced by one time in bud development & flowering stage in different hydrological years, irrigation quota for drip irrigation and pipe irrigation were 50, 80, 110, 120 mm and 75, 120, 165, 180 mm, respectively. Compared with sufficient irrigation, deficit irrigation delayed the irrigation time, especially at bud development and flowering stage, but the effect of water-saving was not obvious.

Key words: mountain apple; pipe irrigation; drip irrigation; irrigation method; irrigation scheduling; northern Shaanxi

1 研究背景

陕北地处黄土高原中北部,由于其光热资源丰富,

昼夜温差大,成为了公认的优质苹果生产基地^[1]。得天独厚的自然条件,加上苹果产业“北扩西进”的政策支持,使陕北山地苹果产业发展优势

收稿日期:2020-11-24; 修回日期:2021-01-18

作者简介:宋安利(1975-),男,陕西眉县人,学士,高级工程师,主要从事水文分析计算、水资源规划利用、水文规划计划及工程建设管理工作。

明显,截止 2018 年,陕北山地苹果栽植面积达到 280 万亩。然而该区属典型的黄土高原沟壑区,位于干旱与半干旱气候区,太阳辐射强,蒸发强烈,降雨较少且 70% 的降雨集中于 6-9 月份;加之苹果树强烈的蒸腾耗水,导致该区果园水分供需矛盾突出,从而对当地苹果产业的可持续发展造成了极大的影响,严重影响到果实的产量与品质^[2]。

随着苹果产业规模的逐渐扩大,实施合理的、精准的节水灌溉成为该区山地苹果产业可持续发展的有效途径。近年来,国内外学者对穴灌^[3]、喷灌^[4]、管灌^[5]、涌泉根灌^[6-7]、滴灌^[8-9]等节水灌溉方式进行了大量的研究,研究表明节水灌溉方式可以有效改善作物根区土壤水分条件,提升灌溉水分有效利用率。在干旱与半干旱区,由于水资源短缺与农业生产之间的矛盾日益突出,该区进行了大量的亏缺灌溉试验研究与应用。研究表明,在非需水临界期进行温和的水分亏缺,并不会显著影响作物正常生长,降低作物产量^[9-12]。然而这些试验研究多着眼于局部,加之长系列、大尺度试验资料的缺乏,因此区域性的灌溉需水规律难以反映出来。本文采用水量平衡法,通过分析绥德县 57 年的气象资料来探讨该区不同水文年的充分灌溉与亏缺灌溉制度,以期在有限水资源条件下陕北山地苹果的灌溉管理提供科学依据,为陕北山地苹果产业的可持续发展提供技术支撑。

2 数据来源与研究方法

2.1 研究区概况

陕西省绥德县(110°04'E~110°41'E,37°16'N~37°45'N)地处黄河中游、黄土高原腹地。该区属暖温带大陆性半干旱气候区,年平均气温 9.7℃,年平均无霜期 165 d,降雨少而不均,多年平均降雨量 453 mm,大部分集中在 6-9 月。土壤以黄绵土为主,0~1 m 土层平均土壤容重为 1.41 g/cm³、平均田间持水量为 0.30 cm³/cm³,土壤有机质含量为 0.5%,速效氮、速效磷、速效钾含量为 28.5、33.9、144.2 mg/kg^[13]。

2.2 数据来源

大气压强、降雨、太阳辐射、风速、风向、相对湿度及气温等气象资料(1961-2017年)来自于绥德气象站。当地主要栽植苹果品种为富士,根据该区富士苹果的物候期规律将其生育期划分为 4 个物候期(表 3)。

在充分灌水情况下,采用单作物系数法计算苹

果需水量(ET_c),计算公式为:

$$ET_c = K_c \cdot ET_0 \quad (1)$$

式中: K_c 为作物系数,综合参考文献[14-16]确定了不同月份的作物系数(表 1), ET_0 由 Penman-Monteith 公式^[17]结合 57 年的气象资料计算所得。

当土壤含水量不能满足作物充分供水状态下的水分条件时,随着土壤含水量的减小,作物的需水量将减小,此时有:

$$ET_a = K_s \cdot ET_c \quad (2)$$

式中: ET_a 为水分亏缺下的实际作物需水量; K_s 为土壤水分修正系数,由詹森模型^[18]计算确定。

表 1 苹果生育期作物系数 K_c

月份	4	5	6	7	8	9	10
K_c	0.5	0.7	0.8	1.0	1.0	0.8	0.6

降雨时,除受到降雨本身特征(降雨量、降雨时长)影响外,果园有效降雨量还受到土壤水力特性、冠层截留能力等因素的影响^[19]。本研究中,有效降雨量采用生产实践中常用的简化经验系数法进行计算,公式如下:

$$P_e = \alpha P \quad (3)$$

式中: P 为次降雨量; α 为经验系数,无实测资料时, α 取值为: $P < 5$ mm 时, $\alpha = 0$; 5 mm $< P < 50$ mm 时, $\alpha = 1$; $P > 50$ mm 时, $\alpha = 0.7 \sim 0.8$ ^[20]。本研究中,以旬为时段来进行水量平衡计算,每旬的降水量等于当月总降水量的 1/3^[19],根据当地实际情况,经验系数按以下取值: $P < 5$ mm, $\alpha = 0$; 5 mm $\leq P < 50$ mm, $\alpha = 1$; 50 mm $\leq P < 100$ mm, $\alpha = 0.9$, $P \geq 100$ mm, $\alpha = 0.8$ 。

灌溉制度一般都具有部分的预报性质,一般需在灌水季节之前确定灌溉制度。针对不同水文年份,拟定特旱年(95%)、干旱年(75%)、平水年(50%)及湿润年(25%)4 种类型(表 2)的灌溉制度。

表 2 不同水文年苹果生育期内水量平衡要素

生育期水量	频率/%			
	25	50	75	95
生育期需水量/mm	569.5	599.3	614.3	627.3
有效降雨量/mm	446.8	370.6	319.2	274.2
净灌水量/mm	122.7	228.6	295.1	353.1

2.3 灌溉制度相关参数

2.3.1 计划湿润层深度 黄土高原苹果树根系及活性吸收根主要分布于 1 m 以上土层^[21],因此在本

研究中,计划湿润层取为1 m。

2.3.2 生育期土壤含水率设计上下限 通常,土壤水分可间接反映作物的水分状况,李柏贞等^[22]用土壤相对含水量 R 对干旱等级进行划分,以土壤相对湿度从低到高划分为5种干旱程度:特别重度干旱 ($R \leq 30\%$)、重度干旱 ($30\% < R \leq 40\%$)、中度干旱 ($40\% < R \leq 50\%$)、轻度干旱 ($50\% < R \leq 60\%$)、无旱 ($R > 60\%$)。

(1) 充分灌溉。在充分灌溉中,必须确保作物根系层的土壤含水率处于适宜作物生长的含水率范围内,不引起水分亏缺,以作物达到最高产量为目标。对果树生长而言,适宜的土壤含水率为(0.6 ~ 0.8) θ_f (田间持水量)^[23]。参考干旱等级划分,确定充分灌溉条件下各物候期的土壤含水量上下限(表3)。

(2) 亏缺灌溉。干旱半干旱地区,水资源短缺

造成灌溉供水不足,高产条件下的作物水分条件难以满足。据此,国内外学者提出了亏缺灌溉这一节水理念,亏缺灌溉包括全生育期持续亏缺灌溉^[11]、调亏灌溉^[24]、分根交替灌溉^[25]等。亏缺灌溉施行的机理性原因是作物体内对水分胁迫产生的适应性生理反应,经过亏缺灌溉和干旱处理,作物气孔阻力增加,蒸腾失水减少,作物水分散失对气孔开度的依赖性大于光合对其的依赖性^[26]。蔡焕杰等^[24]认为,早期实施亏缺灌溉对产量影响较小。相关研究显示^[14, 27],在苹果生长期的萌芽开花期、果实成熟期进行亏缺灌溉对最终产量影响较小,且可以改善果实品质。

苹果树对土壤水分亏缺具有一定的适应性,根据苹果树的需水规律,结合以上的研究分析,将萌芽开花期及果实成熟期土壤计划湿润层土壤含水量上下限较充分灌溉降低0.1 θ_f (表3)。

表3 绥德县山地苹果物候期划分及灌溉要素

灌溉要素	生育期			
	萌芽开花期	叶片生长期	果实膨大期	果实成熟期
日期(月-日)	04-10 - 05-31	06-01 - 06-30	07-01 - 09-20	09-21 - 10-20
充分灌溉土壤含水量上下限	(0.7 ~ 0.6) θ_f	(0.8 ~ 0.6) θ_f	(0.8 ~ 0.6) θ_f	(0.8 ~ 0.6) θ_f
亏缺灌溉土壤含水量上下限	(0.6 ~ 0.5) θ_f	(0.8 ~ 0.6) θ_f	(0.8 ~ 0.6) θ_f	(0.7 ~ 0.5) θ_f
滴灌土壤计划湿润比	0.3	0.4	0.4	0.4
管灌土壤计划湿润比	0.5	0.6	0.6	0.6

2.3.3 灌溉湿润比 陕西省大力推广高效节水灌溉技术,计划“十三五”期间果园高效节水灌溉面积比重提高到30%。当地果园常采用管灌,即围绕树干起垄形成2/3树冠半径的灌水坑,并用移动软管灌水至灌水坑。滴灌是将水直接输入到田间作物根区土壤的一种灌溉方式,具有输水损失小、灌水均匀、能有效提升水分利用率的优点。本研究选择管灌及滴灌进行灌水,滴灌管采用单管布置,顺树行布置。参照文献^[19]确定各个生育期的土壤计划湿润比见表3。

2.3.4 灌水时间及灌水量的确定 采用水量平衡法确定灌水时间及灌水量,计算公式如下:

$$W_t - W_0 = W_r + K + P_e + M - ET - F - R \quad (4)$$

式中: W_0 与 W_t 分别为始、末时段计划湿润层土壤的储水量,mm; W_r 为由于计划湿润层深度变化而增减的土壤储水量,mm,本文确定全生育期计划湿润层为1 m,因此本研究中 W_r 为0; K 为地下水补给量,mm,该区地下水埋深超过50 m,因此忽略不计; P_e 为该时段内的有效降雨量; M 为该时段内的灌溉水

量,mm,根据表3中的计划湿润比,计算可得实际灌水量; ET 为时段内作物需水量,mm; F 为深层渗漏量,mm; R 为地表径流量,mm,当地 F 及 R 均较小,在计算中均可忽略,故公式(4)简化为:

$$W_t - W_0 = P_e + M - ET \quad (5)$$

计算时以1旬为单位时段,当计划湿润层内土壤储水量低于相应下限时,进行灌水。

2.4 数据分析

使用 Microsoft Excel 2010 对数据进行处理,借助 SPSS 25.0 统计软件进行相关性分析,采用 Origin 2018 软件作图。

3 结果与分析

3.1 充分和亏缺灌溉制度研究

表4和5分别为研究区不同水文年充分和亏缺灌溉制度的研究结果。由表4和5可知,随着降雨量的减少,灌水次数逐渐增加。湿润年、平水年、干旱年和特旱年4种水文年份下,充分灌溉的灌水次

数分别为3、4、5和6次,非充分灌溉的灌溉次数较充分灌溉均减少一次,且发生在萌芽开花期。滴灌条件下,亏缺灌溉在湿润年、平水年、干旱年、特早年灌溉定额较充分灌溉分别降低5、0、5、15 mm,管灌条件下则分别降低5、5、10、20 mm。相较于管灌,滴灌能有效降低灌水量,不同水文年充分灌溉条件下滴灌较管灌节水30、45、60、65 mm,而在亏缺灌溉条件下滴灌分别较管灌减少25、40、55、60 mm。

3.2 不同生育期需水规律与灌溉制度的关系

萌芽开花期:该物候期阶段,气温逐渐上升,根系开始活动,苹果逐渐进行萌芽开花,新梢生长。由于气温较低,太阳辐射较弱,因此该阶段苹果园蒸发蒸腾较弱。但该阶段降雨量也较小,即使该阶段需水量较低,降雨量仍难以满足作物正常的生长发育要求,容易形成春旱^[28]。因此在该阶段,应根据土壤水分情况及时灌水,以保证苹果树的正常萌芽、开花、坐果。

表4 研究区不同水文年充分灌溉制度研究结果

物候期	灌水时间	灌水定额/mm								
		湿润年		平水年		干旱年		特早年		
		滴灌	管灌	滴灌	管灌	滴灌	管灌	滴灌	管灌	
萌芽开花期	4月中旬							10	15	
	4月下旬			10	20	10	15			
	5月上旬	15	25					15	20	
	5月中旬			15	20	15	20			
	5月下旬	10	15					15	25	
叶片生长期	6月上旬			30	45	30	45			
	6月中旬	30	45					35	50	
果实膨大期	7月上旬			25	40					
	7月中旬					30	50	30	45	
	8月下旬					30	45	30	45	
合计			55	85	80	125	115	175	135	200

叶片生长期:进入6月份后,气温升高,太阳辐射增强,叶面积迅速扩大,果树生理机能旺盛,苹果园蒸发蒸腾量急剧增加,苹果进入需水临界期。但该阶段降雨量仍然较小,土壤水分含量较低,会影响新梢的生长,造成幼果脱落,应适当补灌。

果实膨大期:该物候期阶段,气温与太阳辐射处于全年最高的水平,加之苹果进入旺盛生长期,因此该阶段日蒸发蒸腾量也处于全年最高的水平,该阶段的耗水量占到苹果全生育期耗水量的50%以上^[27]。同时,该物候期阶段也是该区雨季,降雨能有效补充果园土壤储水量,因此本阶段苹果园土壤储水量处于急剧变化的状态,易发生伏旱,尤其是在干旱年与特早年。因此在本物候期阶段,应根据天气情况适当补灌。

果实成熟期:9月下旬,进入果实成熟期,该物候期阶段,果实处在着色与糖分转化期,果实需水量较小,加之气温与太阳辐射降低,因此耗水强度较小。在计算分析中,无论是充分灌溉还是亏缺灌溉,无论是湿润年亦或是特早年,该期的降雨均能满足果园的耗水要求,不需要灌水。因此本物候期阶段

应控制灌水,以提高苹果品质。

4 讨论

在干旱与半干旱区,水资源十分短缺,而苹果树蒸腾作用强烈,其耗水量高于普通农作物。因此对于该区苹果产业的可持续发展而言,如何满足苹果树的需水要求是其中的关键。影响植物生长发育及产量的因素很多,土壤水分是最重要的因素之一,栗晓玲等^[29]认为即使土壤储水量发生很小的变化,作物的生产力也会受到较大的影响。在当地的苹果灌溉果园中,降雨及灌水后的水分入渗是土壤储水量补充的主要途径,因此对于制定合理的灌溉制度而言,探寻灌溉、降雨与苹果耗水的规律具有十分重要的意义。

本文采用不同频率典型水文年来进行灌溉制度的划分,该方法充分考虑到降水的年内分配以及作物需水量的变化规律对净灌溉需水量的影响。经过计算分析,苹果生育期需水量与有效降雨量呈显著负相关关系(图1),因此根据不同频率典型水文年来进行灌溉制度的划分是合理的。

表 5 研究区不同水文年亏缺灌溉制度研究结果

物候期	灌水时间	灌水定额/mm							
		湿润年		平水年		干旱年		特旱年	
		滴灌	管灌	滴灌	管灌	滴灌	管灌	滴灌	管灌
萌芽开花期	5 月上旬							15	20
	5 月中旬			15	25	15	25		
	5 月下旬	15	25					15	25
叶片生长期	6 月上旬			40	60	40	60	35	50
	6 月中旬	35	50						
果实膨大期	7 月上旬			25	35			30	45
	7 月中旬					30	45		
	8 月上旬							25	40
	8 月中旬								
	9 月上旬					25	35		
合计		50	75	80	120	110	165	120	180

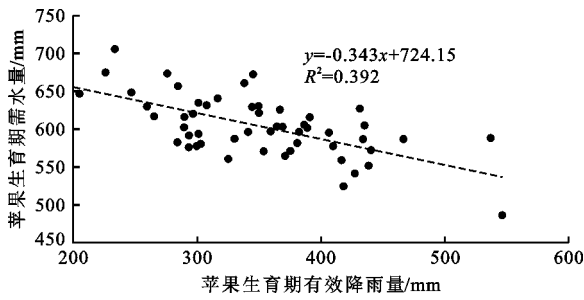


图 1 苹果生育期有效降雨量与需水量线性分析

本研究中,灌水主要集中于生育期前期(萌芽开花期、叶片生长期),而降雨则更多的集中于生育后期(果实膨大期、果实成熟期),这体现了在提升和保持土壤储水量上,降雨及灌水在时间上的互补性^[30]。而果实成熟期由于降雨量能够满足作物的耗水需求,因此不需要灌水。李天星等^[31]根据水量平衡法分析得出陕北丘陵沟壑区适宜灌水时间为 5 月中旬至 8 月下旬,在果实成熟期不需要灌水,这与本研究的结果一致。绥德山地苹果休眠期为 11 月至翌年 3 月,此阶段由于苹果园蒸发蒸腾量及降雨量均较低,因此土壤储水量变化较小。但由于该区冬春季气温低,昼夜温差较大,冻害频发,严重影响到苹果的生长发育,降低其产量与品质,建议有条件的果园在苹果采摘后(11 月),对果园进行冬灌,使土壤地温保持稳定^[32],除满足越冬以外,也有利于抵御翌年可能的春旱。

由表 4 和 5 可知,与充分灌溉相比,亏缺灌溉延后了苹果树的灌水时间,减少了果园的灌水次数,且发生在萌芽开花期,但对灌水量的减少并不显著。这说明本研究区苹果园亏缺灌溉的意义更多的在于

推迟及降低非需水关键期的灌水,将更多的水资源用于需水关键期以提高苹果的水分利用效率。滴灌是目前正在大力推广的一种节水灌溉方法,可以将水分直接输入到作物根区,可进行实时、精量的水、肥控制灌溉^[33]。本研究中,滴灌相对管灌在充分灌溉与亏缺灌溉条件下,分别可节水 30~65 mm、25~60 mm,节水效果显著。此外,滴灌还具有灌水均匀、可提高作物产量与品质的优点^[34-35],因此建议有条件的果园推广使用。

5 结 论

(1) 绥德县苹果树生育期需水量与有效降雨量呈显著负相关,不同水文年均需进行灌溉,且灌水量与灌水次数随降水量的减少而增加。

(2) 湿润年、平水年、干旱年和特旱年 4 种水文年下,充分灌溉的灌水次数分别为 3、4、5 和 6 次,滴灌灌溉定额分别为 55、80、115 和 135 mm,管灌分别为 85、125、175 和 200 mm。

(3) 亏缺灌溉下各水文年灌水次数均较充分灌溉减少 1 次,且均发生在萌芽开花期,最终表现为亏缺灌溉推迟了灌溉时间,但节水效果不显著。从提高水分利用效率和节约用水的角度,建议有条件的果园采用滴灌,并执行亏缺灌溉制度。

参考文献:

[1] 李青华, 张 静, 王 力, 等. 黄土丘陵沟壑区山地苹果林土壤干化及养分变异特征[J]. 土壤学报, 2018, 55(2): 503-514.
 [2] 刘威宏, 王延平, 韩明玉, 等. 根区滴灌对干旱山地苹

- 果树生长发育和结实的影响[J]. 灌溉排水学报, 2016, 35(7): 40-45+77.
- [3] 毕润霞, 杨洪强, 杨萍萍, 等. 地下穴灌对苹果冠下土壤水分分布及叶片水分利用效率的影响[J]. 中国农业科学, 2013, 46(17): 3651-3658.
- [4] 姚素梅, 康跃虎, 刘海军. 喷灌与地面灌溉冬小麦干物质积累、分配和运转的比较研究[J]. 干旱地区农业研究, 2008, 26(6): 51-56.
- [5] 王玉明. 滴灌、喷灌及管灌对马铃薯产量与水分生产效益的影响[J]. 华北农学报, 2007, 22(S3): 83-84.
- [6] 汪有科, 黎朋红, 马理辉, 等. 涌泉根灌在黄土坡地的水分运移规律试验[J]. 排灌机械工程学报, 2010, 28(5): 449-454.
- [7] ZHONG Yun, FEI Liangjun, LI Yibo, et al. Response of fruit yield, fruit quality, and water use efficiency to water deficits for apple trees under surge-root irrigation in the Loess Plateau of China[J]. *Agricultural Water Management*, 2019, 222: 221-230.
- [8] 胡晓棠, 李明思. 膜下滴灌对棉花根际土壤环境的影响研究[J]. 中国生态农业学报, 2003, 11(3): 121-123.
- [9] 张效星, 樊毅, 贾悦, 等. 水分亏缺对滴灌柑橘光合和产量及水分利用效率的影响[J]. 农业工程学报, 2018, 34(3): 143-150.
- [10] CUI Ningbo, DU Taisheng, KANG Shaozhong, et al. Regulated deficit irrigation improved fruit quality and water use efficiency of pear-jujube trees[J]. *Agricultural Water Management*, 2008, 95(4): 489-497.
- [11] JAOUHARI N E, ABOUABDILLAH A, BOUABID R, et al. Assessment of sustainable deficit irrigation in a Moroccan apple orchard as a climate change adaptation strategy[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 642: 574-581.
- [12] 高照良, 侯满伟, 魏克武. 不同节水灌溉及覆盖方法对红富士苹果幼树生长发育的影响[J]. 西北农业学报, 2003, 12(4): 119-123.
- [13] 相微微, 段义忠, 王建武, 等. 榆林主要山地苹果园地土壤养分状况调查与评价[J]. 山西农业科学, 2017, 45(9): 1503-1506.
- [14] 朱德兰, 王得祥, 朱首军, 等. 渭北地区苹果高产灌溉制度研究[J]. 干旱地区农业研究, 2000, 18(1): 95-100.
- [15] 王进鑫, 张晓鹏, 高保山, 等. 渭北旱塬红富士苹果需水量与限水灌溉效应研究[J]. 水土保持研究, 2000, 7(1): 69-72.
- [16] 樊引琴, 蔡焕杰. 单作物系数法和双作物系数法计算作物需水量的比较研究[J]. 水利学报, 2002(3): 50-54.
- [17] ALLEN R G, PEREIRA L S, RAES D, et al. Crop evapotranspiration — Guidelines for computing crop water requirements — FAO Irrigation and drainage paper 56[M]. Rome: FAO, 1998.
- [18] JENSEN E. 耗水量与灌溉需水量[M]. 熊运章, 林性粹, 译. 北京: 农业出版社, 1982.
- [19] 李天星, 曹红霞, 陈红武, 等. 渭北旱塬沟壑区苹果节水灌溉制度分析[J]. 干旱地区农业研究, 2016, 34(5): 255-261.
- [20] 徐凤琴. 有效降水量浅析[J]. 气象水文海洋仪器, 2009, 26(1): 96-100.
- [21] 甘卓亭, 刘文兆. 渭北旱塬不同龄苹果细根空间分布特征[J]. 生态学报, 2008, 28(7): 3401-3407.
- [22] 李柏贞, 周广胜. 干旱指标研究进展[J]. 生态学报, 2014, 34(5): 1043-1052.
- [23] 朱德兰, 吴发启. 黄土高原旱地果园土壤水分管理研究[J]. 水土保持研究, 2004, 11(1): 40-42.
- [24] 蔡焕杰, 康绍忠, 张振华, 等. 作物调亏灌溉的适宜时间与调亏程度的研究[J]. 农业工程学报, 2000, 16(3): 24-27.
- [25] 康绍忠, 张建华, 梁宗锁, 等. 控制性交替灌溉——一种新的农田节水调控思路[J]. 干旱地区农业研究, 1997, 15(1): 1-6.
- [26] 吕金印, 山仑, 高俊凤. 非充分灌溉及其生理基础[J]. 西北植物学报, 2002, 22(6): 1512-1517.
- [27] 钟韵, 费良军, 曾健, 等. 根域水分亏缺对涌泉灌苹果幼树产量品质和节水的影响[J]. 农业工程学报, 2019, 35(21): 78-87.
- [28] 马延庆, 徐志达, 刘长民, 等. 陕西渭北旱塬苹果种植区域农田水分特征分析[J]. 干旱地区农业研究, 2009, 27(2): 54-59.
- [29] 栗晓玲, 石培泽, 杨秀英, 等. 石羊河流域干旱沙漠区滴灌条件下苹果树耗水规律研究[J]. 水资源与水工程学报, 2005, 16(1): 19-23.
- [30] 廖阳, 曹红霞, 刘星, 等. 覆盖及亏缺灌溉对山地苹果生长、耗水及产量的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2020, 38(4): 47-56.
- [31] 李天星, 曹红霞, 李宏礼, 等. 基于水量平衡原理陕西省苹果适生区滴灌灌溉制度分析[J]. 灌溉排水学报, 2016, 35(S2): 9-13.
- [32] 王厚臣, 刘增魁, 常克亮, 等. 2018年果树冻害情况调研[J]. 烟台果树, 2018(3): 32-34.
- [33] 王建东, 龚时宏, 高占义, 等. 滴灌模式对农田土壤水氮空间分布及冬小麦产量的影响[J]. 农业工程学报, 2009, 25(11): 68-73.
- [34] 刘永, 缴锡云, 陈俊克, 等. 浅埋式滴灌条件下毛管间距对苜蓿生长的影响[J]. 水资源与水工程学报, 2019, 30(5): 255-260.
- [35] 徐剑, 赵经华, 洪明, 等. 膜下滴灌不同灌水定额及水氮耦合对打瓜耗水规律的影响[J]. 水资源与水工程学报, 2019, 30(2): 231-238.