

基于土壤水分动态的梯田苹果园水窖配置

郝连安¹, 高建恩^{1,2†}, 张元星¹, 梁改革³, 赵春红¹

(1. 西北农林科技大学资源环境学院, 712100, 陕西杨凌; 2. 中国科学院水利部水土保持研究所, 712100, 陕西杨凌;
3. 中国水电顾问集团中南勘测设计研究院, 410014, 长沙)

摘要 针对如何合理配置水窖以解决黄土高原梯田种植苹果存在的水资源短缺问题, 利用 WEPP 模型, 在对 0 ~ 200 cm 土壤储水量动态变化模拟验证的基础上, 以满足梯田苹果在不同典型代表年的生育期需水为目标, 对水窖进行优化配置。结果表明: 在更新土壤及作物管理数据库后, WEPP 模型可实现对梯田苹果园 0 ~ 200 cm 土壤储水量的动态模拟; 利用土壤水分动态变化选择典型年来进行水窖优化配置, 更能满足苹果的需水要求; 黄土丘陵沟壑区适宜的水窖配置干旱年为 1 150 m³/hm², 平水年为 180 m³/hm², 湿润年为 50 m³/hm²。该研究为高效利用该区有限水资源提供了一种基于土壤水分动态变化来满足苹果生长需水的水窖优化配置方法。

关键词 WEPP; 土壤水动态; 水窖配置

Allocation of water cellar in *Malus pumila* Mill orchard on terrace based on soil moisture dynamic

Hao Lian'an¹, Gao Jian'en^{1,2}, Zhang Yuanxing¹, Liang Gaige³, Zhao Chunhong¹

(1. College of Resource & Environment, Northwest A&F University, 712100, Yangling, Shaanxi; 2. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Science and Ministry of Water Resources, 712100, Yangling, Shaanxi; 3. Mid-South Design & Research Institute, CHECC, 410014, Changsha: China)

Abstract Aiming to solving the problem of water resource shortage in apple orchard on terrace by reasonable allocation of water cellar, water cellars were optimally allocated based on the verification for water storage dynamic change in 0 – 200 cm soil using WEPP model, to meet the water demand of *Malus pumila* Mill during its growth period in different typical years. The results showed that water storage in 0 – 200 cm soil could be well dynamically and simultaneously simulated when the databases of soil and crop management in WEPP model were updated; The water cellar should be optimally allocated base on soil water dynamic variation in typical year, which could better meet the water demand of the *Malus pumila* Mill; The allocation of water cellar is 1 150 m³/hm² in typical dry years, 180 m³/hm² in the normal years and 50 m³/hm² in the wet years in loess hilly and gully region. This study provided a good water cellar optimal allocation method, base on soil water dynamic variation to meet the water demand of the *Malus pumila* Mill, for efficient utilization of the limited water resources.

Key words WEPP; soil moisture dynamic; allocation of water cellar

干旱与水土流失是黄土高原发展现代农业的一个主要限制因素^[1]。梯田苹果(*Malus pumila* Mill) +

收稿日期: 2011-12-19 修回日期: 2012-03-15

项目名称: 国家“十二五”科技支撑计划项目“黄土丘陵沟壑区水土保持与高效农业关键技术集成与示范”(2011BAD31B05); 水体污染控制与治理科技重大专项“保障渭河生态基流的关中地区农业节水及调控技术研究”(2009ZX07212-002-003-02)

第一作者简介: 郝连安(1985—), 男, 硕士研究生。主要研究方向: 水土资源高效利用。E-mail: haolianan@126.com

† 责任作者简介: 高建恩(1962—), 研究员, 博士, 教授。主要研究方向: 地表径流控制与利用。E-mail: gaojianen@126.com

集流面+水窖作为黄土高原地区既能有效防止水土流失又能缓解干旱的重要措施,在该区得到广泛发展。但由于苹果产量、生物量和耗水量都较大,如何在实际中优化配置水窖以解决水短缺是一个重要问题。目前在进行梯田内水窖容积配置(以下简称水窖配置)时,多采用径流系数和灌溉定额相结合的方法^[2-3],配置一般未充分考虑降雨径流、蒸散发、植物生长等过程,不能达到水分高效利用的目的;而且水窖配置选择典型年时一般采用水文上的降雨频率,由于降雨年内分配和作物需水规律往往不一致^[4],配置结果与苹果的需水常发生错位。土壤水变化是降雨、径流、入渗、植物蒸散发、地下水等过程综合作用的结果,能综合反映作物水分亏缺状况,是梯田苹果园进行水窖配置的理想参考指标。李锡录等^[5]研究了土壤水在高效灌溉制度制订中的应用,给出了基于土壤水动态的灌溉制度制订及实现方案,但其在黄土丘陵区应用必须解决水源的问题。黄土丘陵沟壑区以土壤水动态变化为指标,通过满足梯田苹果需水来进行水窖配置的报道还很少,急需进行研究。

笔者选择新一代土壤侵蚀预报模型 WEPP,在进行梯田苹果园 0~200 cm 土壤储水量模拟验证的基础上,通过计算土壤水频率选择典型年,以 0~200 cm 土壤储水量动态变化为指标,研究满足苹果需水关键期和临界期的土壤最优储水量和最低储水量下水窖的优化配置,以期在梯田苹果园水窖的配置提供一种基于过程的快速、简便的方法。配置结果对黄土丘陵沟壑区梯田水源优化和提高该区苹果水分利用效率及获得高产有一定现实意义。

1 材料与方法

选择陕西省延安市宝塔区燕沟小流域为典型研究区域,在调整模型参数建立梯田苹果园模拟数据库和验证梯田苹果园 0~200 cm 土壤储水量基础上,利用 WEPP 模型模拟 0~200 cm 土壤储水量动态,研究满足苹果需水的水窖优化配置。

1.1 研究区概况

研究区位于陕西省延安市宝塔区燕沟流域,位于 E 109°20′~109°35′,N36°21′~36°32′之间,流域内梁峁起伏,沟壑纵横,属于典型的黄土丘陵沟壑区。流域大致呈东南—西北走向,海拔在 986~1425 m 之间,沟壑密度 4.8 km/km²。气候区划上属暖温带半湿润气候向半干旱气候过渡区,植被类型属森林草原。多年平均降雨量为 525.3 mm

(1951—2010年),春季降雨占 16.7%,夏季降雨占 54.6%,秋季降雨占 26.4%,冬季降雨占 2.2%。

1.2 典型梯田选择及土壤水分数据监测

典型梯田断面来自延安市宝塔区燕沟沟头 2009 年的 1 个实测典型梯田断面。其田坎宽度 850 cm,坡度为 58.5%,田坎为多年撂荒地;梯田田面宽度为 3400 cm,田面段种植苹果,株行距为 300 cm×400 cm。典型梯田土壤耕作层干密度为 1.28 g/cm³,田间持水量(质量含水量)为 20.8%,苹果为 5~8 年生,处于初果期,冠层高度平均为 320 cm,主要根系深度为 200 cm。根据冉伟等^[6]的研究,苹果果园 0~200 cm 土壤层次是苹果吸水根系的主要分布区域,也是土壤入渗水能够到达和起作用的层次,因此选择梯田土壤的 0~200 cm 层进行模拟。

土壤水分监测点的确定采用 S 型随机取样,具体为在典型梯田田面的对角线方向上,采用 S 型随机选择 5 个监测点。土壤水分监测采用烘干法,每 20 cm 测验 1 次,每隔 15 d 监测 1 次,有效降雨过后加测 1 次,最后取平均值作为模型模拟验证的数据。监测从 2002 年 3 月开始监测到 2005 年 11 月结束。

1.3 WEPP 模型简介

WEPP(Water Erosion Prediction Project)是迄今为止较为成熟和先进的土壤侵蚀过程模型之一。该模型采用模块化结构,包括气候、土壤、植物生长、残留物分解、冬季过程、灌溉、水文过程、地表径流、侵蚀等 9 个模块,不同模块间通过数据关系相互连接。王建勋等^[7]对 WEPP 模型坡面版在黄土高原的适用性进行了系统研究,指出在对数据库进行更新的条件下,其坡面版可应用于黄土丘陵沟壑区降雨、径流、侵蚀、灌溉、作物生长、土壤水分等过程的模拟。本文采用的 WEPP2010 是该模型的最新版本,可以输出日序列的径流、作物生长、土壤水等数据。

1.4 WEPP 模型数据库建立

WEPP 模型运行需要建立气候、坡面、土壤、作物初始条件 4 个数据库。在气象数据库建立方面,以中科院水利部水土保持研究所地球系统科学数据平台——黄土高原数据共享服务中心黄土高原重要水文站数据库延安市宝塔区次降雨过程资料(1958—1990年)、黄土高原生态环境数据库黄土高原地区气候数据库延安市宝塔区实测日序列气象资料(1951—2001年)以及 1990—2010 年延安市燕沟流域实测气象资料为基础,依据王建勋^[7]的研究成果,建立 WEPP 模型需要的 CLIGEN 格式实测气象数据库^[8]。在土壤数据库建立方面,根据《陕西土

壤》^[9]和燕沟小流域实测土壤资料,在黄土丘陵区 WEPP 模型已有研究^[10-11]基础上建立该区黄绵土的土壤数据库(表1);在坡面数据库建立方面,利用延

安宝塔区燕沟流域 2009 年实测的一个典型梯田断面建立坡面数据库,并根据梯田初始作物类型的不同将坡面分为田坎和田面 2 部分(图1)。

表1 WEPP 模拟梯田的主要土壤参数
Tab.1 Main soil parameters of WEPP modelsimulated terrace

序号	参量	取值	说明
1	土壤初始饱和度/%	25~85	根据土壤的实测数据给出
2	细沟间侵蚀性/(kg·s·m ⁻⁴)	1.5×10 ⁻⁶ ~10.0×10 ⁻⁶	根据实测数据验证给出
3	细沟侵蚀性/(s·m ⁻¹)	0.019~0.026	根据实测数据进行验证给出
4	临界剪切力/Pa	3.51~5.1	根据实测数据进行验证给出
5	有效导水率/(mm·h ⁻¹)	19.7~22.7	根据实测数据进行验证给出

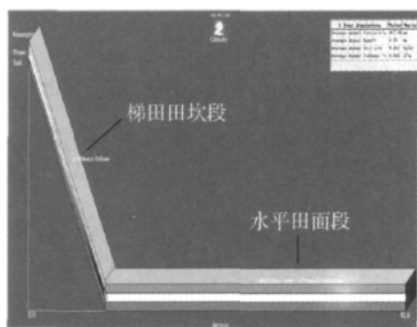


图1 WEPP 坡面模块分段
Fig.1 Break of slope in WEPP

在作物管理数据库建立方面,梯田田坎段初始作物条件选择经过验证的休闲地模块^[12],梯田田面段为苹果模块;但 WEPP 作物管理数据库中没有相应的苹果模块,所以本文以 5 年生乔木模块为基础,以 0~200 cm 土壤层内的土壤储水量为相似条件,建立 5~8 年生苹果作物管理数据库,其主要参数为:开始生长的累积度日 28.3℃,基点气温 5℃,多年生植物停止生长的最高温度 40℃,多年生植物停止生长开始休眠的低温为 8℃,最大叶面积指数为 1.5,最大根系深度为 200 cm。

1.5 研究方法

针对黄土丘陵沟壑梯田中水窖的优化配置问题,以 WEPP 模拟为工具,以苹果需水关键期和临界期的 0~200 cm 土壤储水量为指标,选择典型年进行水窖配置,主要包括:1) 利用 WEPP 坡面分段功能,建立苹果梯田模型;调整模型参数,对苹果园 0~200 cm 土壤储水量进行验证;2) 利用 WEPP 模型,模拟具有详细实测气象资料 1990—2005 年的 0~200 cm 土壤储水量,根据苹果的需水特点,确定苹果水分管理的关键时期,对关键时期的土壤水进行频率计算,选择进行水窖配置的典型年;3) 针对典型年,以关键时期 0~200 cm 土壤储水量变化为

指标,以满足作物最优需水和最低需水为目标,进行苹果梯田水窖优化配置。

2 梯田苹果园 0~200 cm 土壤储水量验证

2.1 坡面分段处理

WEPP 坡面模块中的分段功能,可按不同土壤和作物管理措施将坡面分为数个段^[13]。通过这个功能可以实现梯田整体模拟。对于连续的坡面,不同的“段”是相互联系的,即一个“段”产生的径流、泥沙会进入下一级,并参与这一级的产汇流和蒸散发过程,径流最终在坡面的末“段”流出。根据梯田苹果园模拟的需要,将坡面分为梯田田坎段和水平田面段 2 段,各段的土壤、作物初始条件等特征如表 2 所示。在设计暴雨标准下梯田不产生径流,而 WEPP 由于不能提供田埂模拟,在模拟年内很有可能会产生径流。此时,在模拟时需要进行径流的调节,即将 WEPP 田面段产生的径流,通过水平田面段作物管理模块,在翌日以灌溉的方式补回水平田面段。

表2 应用 WEPP 模拟梯田时坡面分段明细
Tab.2 Slope section of WEPP model in terrace

序号	分段名称	长度/cm	坡度/%	土壤类型	初始作物条件
1	梯田田坎	840	58.5	黄绵土	休闲地
2	梯田田面	3400	0	黄绵土	5~8年生苹果

2.2 土壤水动态模拟验证

利用 WEPP 模型,采用建立数据库时坡度、土壤和初始条件参数,对延安宝塔区燕沟流域 2002—2004 年 3 年梯田苹果生育期内(4—10月) 0~200 cm 土壤储水量过程进行模拟和 WEPP 模型参数调整,通过取其月平均值与这 3 年在延安燕沟梯田苹果果园实测的 0~200 cm 土壤水分资料进行验证(图2)。结果表明:采用以上休闲地和苹果果园的土壤参数和作物初始条件参数,利用实测初始土壤

含水量参数,模拟的苹果生育期梯田 0~200 cm 土壤储水量变化与实测资料的 R^2 达到 0.87,为显著相关,模型的有效性系数^[14]达到 0.87,大于一般认为模型可用 0.5;因此,WEPP 模型通过模型数据库更新和参数的调整,能够较好地模拟梯田苹果园 0~

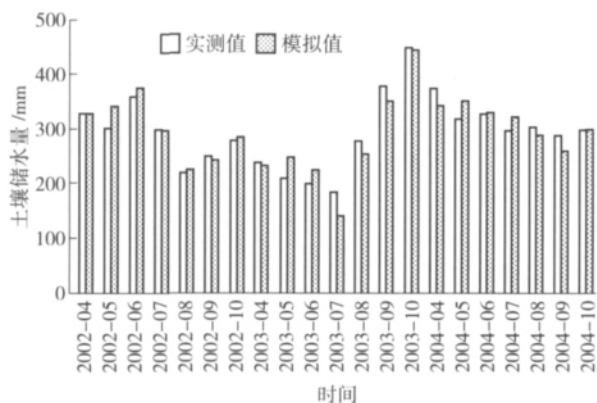


图 2 苹果园土壤储水量模拟验证

Fig. 2 Confirmation of water store in orchard soil of *Malus pumila* Mill

200 cm 土壤水分变化情况。

3 梯田苹果园水窖优化配置

3.1 苹果缺水规律

土壤水综合了降雨、径流、入渗、蒸发、植物蒸腾、灌溉等过程,且易于监测,是进行水窖灌溉设计的理想指标。根据苹果生长规律已有研究^[15],划分了研究区苹果的物候期,如表 3 所示。在不同的物候期内,苹果正常生长需要一定的土壤含水量,其值一般为田间持水量的 60%~80%^[16],但是不同的时期又略有不同:苹果需水的苹果萌芽期到开花期是苹果需水的关键期,果实膨大期是苹果需水的临界期^[17],这 2 个阶段对最低土壤储水量要求高,其最优需水量的下限一般为田间持水量的 65%左右;对于苹果正常生长来说,其最低土壤水为田间持水量的 60% (表 3);在苹果的生长末期一定的水分胁迫有利于苹果品质的提高,因此可以不针对后期进行水窖配置。

表 3 苹果物候期的划分及需水规律

Tab. 3 Division of *Malus pumila* Mill phenophase and their soil water demand

参 量	11-01— 03-30	04-01— 04-09	04-10— 04-30	05-01— 05-12	05-13— 06-07	06-08— 07-25	07-26— 10-13	10-14— 10-31
物候期	休眠期	萌芽前期	萌芽期	开花期	幼果期	果实膨大期	果实成熟期	枝条成熟期
0~200 cm 土壤 W_{\min} /mm	310	310	310	310	310	310	310	310
0~200 cm 土壤 W_{Omin} /mm	310	310	336	336	310	336	310	310
0~200 cm 土壤 W_{Omax} /mm	336	364	416	390	364	416	416	336

注: W_{\min} 为苹果蓄水的下限; W_{Omin} 为苹果最优需水量的下限; W_{Omax} 为苹果最优需水量的上限。

由此确定苹果不同物候期内最优的最小土壤储水量及允许的最低的最小土壤储水量,通过苹果需水关键期和临界期 2 个阶段主要根系层次(0~200 cm)内土壤储水量的盈亏情况,进行水窖的优化配置,能够最大的满足作物生长需要,达到水分高效利用的目的。

3.2 典型年选取

作物生育期内需水过程与降雨过程很难完全匹配,用降雨频率来进行灌溉设计往往不能满足作物需水要求。土壤水作为降雨、径流、入渗、蒸发、植物蒸腾、灌溉等过程综合作用的表征,更能代表作物的实际需水情况,因此选择苹果需水关键期和临界期 2 个阶段的土壤水进行频率分析,来确定水窖配置的典型年。

利用具有详细实测气象资料的 1990—2005 年,运行 WEPP 模拟苹果梯田土壤 0~200 cm 内水分动态数据,以苹果水分管理的 2 个重要阶段萌芽到开

花期(4月中旬到5月中旬)和果实膨大期(6月中旬到7月下旬)0~200 cm 土壤平均水分情况,利用适配法进行频率分析。对 1990—2005 年 2 个时期的土壤水频率进行分析,结果表明,不同年 2 个时期的土壤水频率基本一致(图 3);因此可以选择相同典型年进行水窖配置。按就近选取的原则,选取典型平水年为 1997 年,典型干旱年为 1992 年,典型湿润年为 2002 年(表 4)。

对比 3 种典型年苹果生育期的 0~200 cm 土壤储水量变化情况(图 4),可以看出,在苹果需水的关键期(4月中旬到5月中旬)和临界期(6月中旬到7月下旬)的土壤水分动态,干旱年低于苹果生长最适土壤储水量的下限,平水年基本上与苹果生长最适土壤储水量的下限齐平,湿润年基本上符合苹果生长的最优土壤储水量;因此,选择的典型年能够很好地代表苹果的需水规律,可以作为水窖配置的典型年。

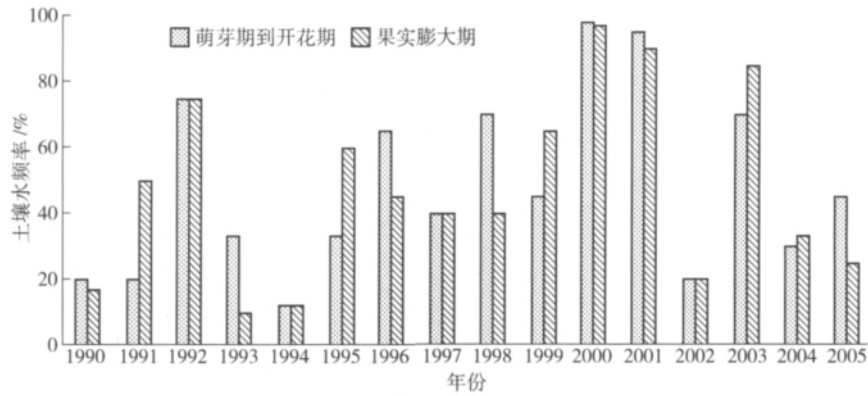


图3 1990—2005年萌芽期到开花期及果实膨大期土壤水频率曲线

Fig.3 Frequency curve of soil water in sprouting to flower and inflating stage from 1990 to 2005

表4 水窖配置典型年

Tab.4 Typical year of water cellar allocation

0~200 cm 土壤水频率/%	0~200 cm 土壤储水量计算值/mm		典型年份	0~200 cm 土壤储水量实测值/mm	
	萌芽期到开花期	果实膨大期		萌芽期到开花期	果实膨大期
75	273	236	1992	276	236
50	310	281	1997	324	296
25	348	326	2002	356	331

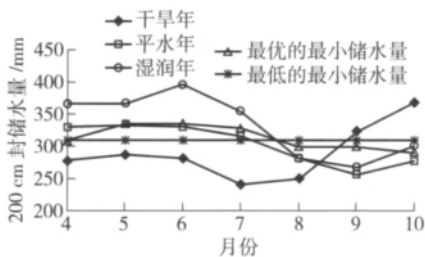


图4 典型年苹果生育期各月0~200 cm 土壤储水量

Fig.4 Monthly 0-200 cm soil water of *Malus pumila* Mill orchard in *Malus pumila* Mill growth period of typical years

3.3 基于 WEPP 模型梯田水窖配置

对3种不同典型年,苹果萌芽到开花期及果实膨大期2个阶段的土壤水分亏缺状况分析(表5),可以看出:对满足苹果最优需水来说,不同典型年的水分亏缺都很大,需要配置较大的水窖;对于满足苹果最少需水来说,其亏水量不是特别大,配置水窖的

体积也应该小得多。

无论以满足苹果2个阶段的最优需水还是最少需水为目标,水窖配置都需要2个阶段:1)水窖体积初步确定。首先通过 WEPP 模拟典型年土壤0~200 cm 内储水量,依据苹果需水规律,查找萌芽期到开花期苹果开始缺水的时间节点;然后以该期最大的亏水量作为第一次灌溉水量,以该时间节点为灌溉日期,进行 WEPP 模型增加灌溉进行土壤水模拟,根据苹果需水规律,查看该期缺水的满足情况,以调整第一次灌水量,直到该期苹果需水得到满足;对果实膨大期采用同样的步骤进行,找到膨大期第一次灌水的最大值;比较2个阶段第一灌溉用水情况,其最大值即为初步确定的水窖体积。2)水窖体积最终确定。根据水窖体积以径流系数法计算集流面积,然后减少最大一次的灌溉水量(本文每次减少5 mm),进行 WEPP 苹果园0~200 cm 土壤

表5 不同典型年萌芽期到开花期及果实膨大期苹果缺水

Tab.5 Water deficit of *Malus pumila* Mill in sprouting to flower and inflating stage in different typical years

频率/%	典型年份	苹果最优需水亏缺/mm			苹果最少需水亏缺/mm		
		萌芽期到开花期	果实膨大期	总计	萌芽期到开花期	果实膨大期	总计
75	2002	48	97	145	23	72	95
50	1997	3	40	43	0	15	15
25	2002	0	18	18	0	2	2

水模拟,查找缺水时间节点,计算2个阶段2个节点间的水窖能收集的径流量,以确定是否需要减少第一次灌溉水量;这样多次计算后的最大灌水量即为水窖的最终体积。

运用本文水窖配置的方法对这3个时期苹果水窖进行配置的计算,图5展示了平水年满足苹果最优需水的水窖配置过程。因其2个阶段缺水时间节点间的降雨径流很少,不能满足灌溉需要,所以水窖的最终配置结果为 $550\text{ m}^3/\text{hm}^2$ 。运用同样的方法

得到不同典型年,满足苹果最优需水要求和最少需水要求的水窖配置情况,如表6,为满足苹果的最优需水的下限,典型干旱年水窖的配置为 $1\,680\text{ m}^3/\text{hm}^2$,平水年为 $550\text{ m}^3/\text{hm}^2$,湿润年为 $220\text{ m}^3/\text{hm}^2$;为满足苹果正常生长的最小需水,干旱年修要配置水窖 $1\,150\text{ m}^3/\text{hm}^2$,平水年为 $180\text{ m}^3/\text{hm}^2$,湿润年为 $50\text{ m}^3/\text{hm}^2$ 。根据张社红等^[18]研究表明,进入挂果期的苹果其耗水量呈波动下降趋势,因此配置结果对于挂果期后不同生长年限的苹果都适用。

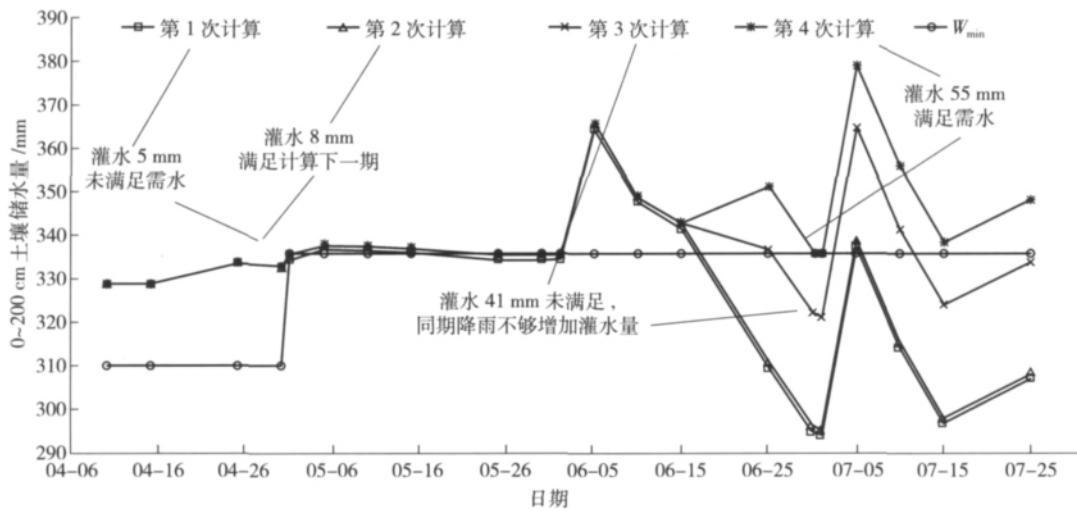


图5 满足苹果最优需水的平水年水窖配置计算

Fig. 5 Optimal allocation of water cellar to meet water demand of *Malus pumila* Mill in typical normal year

表6 不同典型年水窖配置结果

Tab. 6 Allocation result of water cellar in typical year

频率/%	代表年份	满足最优需水		满足最少需水	
		水窖配置 $\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$	灌溉 次数/次	水窖配置 $\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$	灌溉 次数/次
75	2002	1 680	2	1 150	2
50	1997	550	2	180	2
25	1992	220	1	50	1

延安市宝塔区5~8年生苹果的产量约为 $2\text{万}6\,000\text{ kg}/\text{hm}^2$,其收购单价为 $4.0\text{元}/\text{kg}$,普通砖砌水泥砂浆水窖单方造价约为 $280\text{元}/\text{m}^3$,不考虑修建人工集流面的基础上,以10年为计算期进行经济效益计算,根据表6中水窖配置结果,典型干旱年满足最优需水情况下苹果的产量要比满足最少需水苹果的产量增加15%以上,典型平水年增产10%以上,典型湿润年要增产5%以上才能弥补应为修建大容量水窖而增加的经济投入。根据朱德兰等^[19]对延安地区苹果的研究,灌水量对苹果产量的影响不明显,该区仅通过灌溉水量增加很难获得这样的增产。因此,推荐黄土丘陵沟壑区苹果水窖设计以

满足最少需水量为目标,典型干旱年、平水年、湿润年的水窖配置分别为 $1\,150$ 、 180 、 $50\text{ m}^3/\text{hm}^2$ 。在实际应用中,可以根据当地的社会经济情况,选择合适的年型(保证率)来进行水窖配置。在黄土丘陵沟壑区,推荐采用平水年进行水窖容积配置,该结果与该区目前实际应用水窖的体积($150\text{ m}^3/\text{hm}^2$)比较接近,比孟岩^[20]的研究结果($105\text{ m}^3/\text{hm}^2$)偏大,其最终验证还需要长期土壤水分数据监测的支持。

4 结论

1) 黄土丘陵沟壑区,与满足最优苹果需水相比,满足苹果最少缺水是进行水窖配置的合理指标。据此配置的典型年水窖容积为:典型干旱年 $1\,150\text{ m}^3/\text{hm}^2$,典型平水年 $180\text{ m}^3/\text{hm}^2$,典型湿润年 $50\text{ m}^3/\text{hm}^2$,在实际生产中推荐采用平水年结果进行水窖配置。

2) WEPP模型在进行参数调整的基础上,能较好模拟黄土丘陵沟壑区年平均降雨量在 500 mm 地区苹果地 $0\sim 200\text{ mm}$ 土壤层的储水变化情况。

3) 土壤水是降雨、径流、入渗、蒸发、植物蒸腾、

灌溉等过程综合作用的结果,利用 WEPP 通过对土壤水分的动态模拟进行水窖配置,是一种基于过程的、高效利用水分的、快速准确的水窖配置技术。

5 参考文献

- [1] 吴普特,高建恩. 黄土高原水土保持新论 [M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2006: 15-22
- [2] 孟岩,高建恩,杨世伟,等. 基于径流调控的集雨补灌苹果利用模式研究 [J]. 节水灌溉, 2010(6): 21-25
- [3] 住房和城乡建设部. GB/T50596—2010 雨水集蓄利用工程技术规范 [S]. 北京: 中国计划出版社出版, 2010: 9
- [4] 曲辉辉,杨晓光,张晓煜,等. 基于作物需水与自然降水适配度的湖南省防旱避灾种植制度优化 [J]. 生态学报, 2010, 30(16): 4257-4265
- [5] 李锡录,聂俊华,单艳红. 土壤水研究及在作物需水灌溉中的应用 [J]. 山东农业大学学报, 1997, 28(2): 178-186
- [6] 冉伟,谢永生,郝明德. 黄土高原沟壑区不同种植年限果园土壤水分变化 [J]. 西北农业学报, 2008, 17(4): 229-233
- [7] 王建勋. WEPP 模型(坡面版)在黄土高原丘陵沟壑区的适用性评价 [D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2007
- [8] Elliot W J, Arnold C D. Validation of the weather generator CLIGEN with precipitation data from uganda [J]. Transactions of the ASAE, 2001, 44(1): 53-58
- [9] 郭兆元,黄自立,冯立孝,等. 陕西土壤 [M]. 北京: 科学出版社, 1992: 187-205
- [10] 幸定武,高建恩. WEPP 在黄土高原坡面径流调控中的适用性研究 [J]. 人民黄河, 2008, 30(4): 66-68
- [11] 王建勋,郑粉莉,江忠善. WEPP 模型坡面版在黄土丘陵沟壑区的适用性评价 [J]. 水土保持通报, 2007, 27(2): 50-55
- [12] 梁改革,高建恩,韩浩,等. 基于作物需水与降雨径流调控的隔坡梯田结构优化 [J]. 中国水土保持科学, 2011, 9(1): 24-32
- [13] Frankenberger D C, Flanagan J R. Water erosion prediction project (WEPP) windows interface tutorial [M]. Indiana: USDA-Agricultural Research Service & Purdue University National Soil Erosion Research Laboratory West Lafayette, 2004: 22
- [14] Zhang Xunchang. Calibration, refinement, and application of the WEPP model for simulation climatic impact on wheat production [J]. American Society of Agricultural Engineer, 2004, 47(4): 1075-1085
- [15] 汪景彦. 苹果优质生产入门到精通 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2001: 125-145
- [16] 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
- [17] 陈锡云,刘文兆. 半干旱黄土丘陵区果园水分蒸散特征研究 [J]. 水土保持学报, 2000, 14(3): 67-70
- [18] 张社红,李军,王学春,等. 渭北旱塬苹果园地产量和深层土壤水分效应模拟 [J]. 生态学报, 2011, 31(13): 3767-3777
- [19] 朱德兰,王文娥,楚杰. 黄土高原丘陵区红富士苹果水肥耦合效应研究 [J]. 干旱地区农业研究, 2004, 22(1): 152-155
- [20] 孟岩. 黄土高原坡面降雨径流不同利用模式初步研究 [D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2010: 34-35

(责任编辑:程云)