山丘区蓄水坑灌田间工程规划设计
——以山西省太谷县节水灌溉示范园为例

蔡尚彬[1], 马娟娟[1], 孙西欢[1,2], 郭向红[1], 陈倩秋[1], 柴梦滢[1]
(1. 太原理工大学 水利科学与工程学院, 山西 太原 030024; 2. 晋中学院, 山西 晋中 030619)

摘　要: [目的] 对蓄水坑灌田间工程规划设计进行研究,解决蓄水坑灌未来推广运用中的问题,为推动山丘区蓄水坑灌的规模化、产业化发展奠定基础。[方法] 以山西省太谷县节水灌溉示范园区为背景,将蓄水坑灌田间工程基本要素与微灌工程技术和低压管道输水灌溉工程技术相结合,因地制宜地对蓄水坑灌田间工程进行设计。[结果] 采用水平集雨沟整地方法;每株果树布置 4 个蓄水坑,蓄水坑深度 40 cm;在降雨径流蓄滞能力设计为 5 a 一遇 24 h 最大暴雨量标准下,蓄水坑设计直径为 30 cm;坑内布置一体化设计的底板、固壁和顶盖;环状沟深度 20 cm,宽度 30 cm,半径 50 cm;输配水闸管系统包括干管、支管、毛管 3 级,管材为聚乙烯;四孔出流毛管沿环状沟内径呈环形绕树布置;给出了各管道管径、长度及进口工作水头的计算方法,以及系统工作制度的确定方法。[结论] 对整地技术、蓄水坑设计与布置技术和低压管道系统设计技术的规划设计,能够满足山丘区蓄水坑灌的特殊灌溉要求。

关键词: 山丘区; 蓄水坑灌; 田间工程; 规划设计
文献标识码: B　　**文章编号**: 1000-288X(2018)06-0138-06　　**中图分类号**: S275.9

文献参数: 蔡尚彬, 马娟娟, 孙西欢, 等. 山丘区蓄水坑灌田间工程规划设计[J]. 水土保持通报, 2018, 38(6): 138-143. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2018.06.021. Cai Shangbin, Ma Juanjuan, Sun Xihuan, et al. Farmland works planning and design under water storage pit irrigation in hilly regions[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2018, 38(6): 138-143.

Farmland Works Planning and Design Under Water Storage Pit Irrigation in Hilly Regions
—A Case Study at Water-saving Irrigation Demonstration Garden in Taigu County of Shanxi Province

CAI Shangbin[1], MA Juanjuan[1], SUN Xihuan[1,2], GUO Xianghong[1], CHEN Qianqiu[1], CHAI Mengying[1]
(1. *College of Water Resources Science and Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan, Shanxi* 030024, *China*; 2. *Jinzhong University, Jinzhong, Shanxi* 030619, *China*)

Abstract: [Objective] The farmland works planning and design under water storage pit irrigation is studied to solve the problems of future promotion and application, in order to lay the foundation for promoting large-scale and industrialized development of water storage pit irrigation in hilly regions. [Methods] Taking the water-saving irrigation demonstration garden in Taigu County, Shanxi Province as an example, water storage pit irrigation farmland works planning and design was carried on, by reference to micro-irrigation projects and low-pressure pipeline irrigation projects. [Results] Parallel rainwater harvesting ditches were adopted in land leveling. Each tree was allocated 4 pits, the water storage pits were 40 cm deep. The pit diameter was 30 cm, under the detention capacity of rainfall runoff standard of 24 hours maximum rainstorm volume occurred every 5 years. Every pit was decorated with a baseplate, a solid wall and a head cover as a whole. The annular grooves were 20 cm deep, 30 cm wide, with a radius of 50 cm. The pipe network included three levels: main pipes, branch pipes and laterals, made of polyethylene. The annular four-outlets lateral was around the tree; the

收稿日期: 2018-05-29　　**修回日期**: 2018-06-28
资助项目: 国家自然科学基金项目"蓄水坑灌条件下苹果园水分运移机制与调控研究"(51579168); 山西省自然科学基金项目(201601D011053)
第一作者: 蔡尚彬(1992—),男(汉族),山西省万荣县人,硕士研究生,研究方向为灌排理论与技术。E-mail: 995985359@qq.com。
通讯作者: 马娟娟(1970—),女(汉族),山西省闻喜县人,教授,博士生导师,主要从事节水灌溉方面的研究。E-mail: mjjsxty@163.com。

calculation methods for the pipe diameters, lengths, and import working heads and the determination method for the working system were provided. [Conclusion] The planning and design of land leveling technology, water storage design and layout technology, and low-pressure pipeline system design technology can meet the special demand of water storage pit irrigation in hilly regions.

Keywords: hilly regions; water storage pit irrigation; farmland works; planning and design

干旱缺水与水土流失并存是我国北方山丘区普遍存在的共性问题,一方面气候干旱少雨使农业灌溉用水紧缺,另一方面水土流失严重使降雨难以集蓄利用、地表径流流失,进而导致水资源紧缺与水资源浪费并存的恶性循环。与此同时,中国农业灌溉用水浪费严重,尤其是北方自流灌区灌水的利用系数只有 0.5 左右[1]。喷灌和滴灌虽然灌溉水利用系数高,却因对水质要求高、设备投资大难以在农村推广。大力推广和普及高效节水灌溉技术、大力发展山丘区集雨节灌[2]成为亟待解决的课题。苹果树是我国北方种植最广泛的果树之一。孙西欢[3]于 1998 年提出的蓄水坑灌是一种具有拦蓄径流、保持水土特点的中深层立体果林灌溉方法,尤其在中国北方山丘区果树种植中具有极大发展潜力。目前,学者们已对蓄水坑灌下土壤入渗及水分运移特征[4-6]、土壤水氮运移特征[7-9]、果园 SPAC 系统水分运移机理及土壤微生态环境[10-15]及果树产量响应[16]等方向做了大量理论、试验和模拟研究,但是对蓄水坑灌田间工程的规划设计还有待研究。本文针对山丘区地形特点进行整地,结合微灌工程技术和低压管道输水灌溉工程技术,对蓄水坑灌田间工程规划设计进行研究,解决蓄水坑灌未来推广运用中的问题,为推动和发展山丘区蓄水坑灌的规模化、产业化发展奠定基础。

1　研究区概况

研究区域位于山西省农科院果树研究所的太谷县节水灌溉示范园区,地理位置处于山西省晋中市太谷县,东经 112°32′,北纬 37°23′,属于暖温带大陆性气候。平均海拔为 781.9 m,年均气温 9.8 ℃,无霜期 175 d。年均降雨量为 459.6 mm,年内降雨量分布不均,全年 60%以上的降雨量多集中于 6—9 月,地面坡度 0.1,易形成水土流失。种植作物为 5 年生密植矮砧红富士苹果树,行距 4 m,株距 2 m,南北向种植。研究区土壤类型主要为粉砂壤土,平均容重为 1.47 g/cm^3,饱和含水率(体积)为 49.21%,田间持水率(体积)为 30%。灌溉水源为地下井水。

2　田间工程规划原则

(1) 充分利用降雨资源。由于研究区的水资源量缺乏,尤其是农业灌溉用水量,在果树生育期内尽可能地利用自然降雨资源,以缓解当地水资源的供需矛盾;(2) 高效用水,提高灌溉用水利用率。目前研究区果园灌溉仍以地面灌溉为主,灌溉水的利用率较低,采用蓄水坑灌中深层立体灌溉方法,能使水分快速通过蓄水坑侧壁深入果树根区,有效减小土壤棵间蒸发,提高灌溉水的利用率;(3) 防止水土流失。采用蓄水坑灌法,通过其田间工程设计,能实现水土不下坡,有效控制水土流失的目的;(4) 减少田间工程施工量,节约投资。采用蓄水坑灌法拦蓄降水资源,其整地时充分利用自然坡度,尽量减少田间工程量;(5) 方便管理。在果树生育期内,尤其是果树需水关键期,在没有自然降雨条件下,通过低压管道系统实施灌溉管理,以保证果树正常生长和产量的形成。

3　田间工程设计技术

3.1　整地技术

山西省地处黄河中游,为华北地区的一个隆起台地,属于黄土高原的东部,地形复杂,多坡地;气候干旱,少雨,降雨多发生在夏季。因此,极易发生干旱、水土流失等自然灾害。为更好地集蓄利用雨水资源,拦蓄坡地径流,在坡地沿等高线布设水平集雨沟等水土保持工程措施,水平集雨沟与自然坡地顺坡度方向依次相间布置。集雨沟内种植果树,并布设蓄水坑。雨水在坡面沿等高线下泄汇集,流入水平集雨沟内,可补充沟内果树需水量,并起到拦截蓄积径流、蓄水保土、减少水土流失的作用。沟间集流坡面上种植优质牧草来增加经济效益,并对下一级水平集雨沟具有聚肥改良的作用,达到提高坡耕地综合生产力的目标[17]。研究区域坡面规则且较平整,坡度 0.1,故采用水平沟整地方法:沿等高线开挖深 50 cm、宽 1 m 的水平沟槽,挖出的土沿沟外侧修筑外埂拍实,埂高 50 cm,埂顶宽 40 cm,埂底宽 80 cm,埂侧斜坡 50°～70°。从沟内侧上方取虚表土,填入槽内,平整后水平集雨沟水平田面宽 2 m[18]。各级集雨沟之间保留一块宽 1.2 m 的原始坡面作为集流坡面。如图 1 所示为水平沟整地示意图。

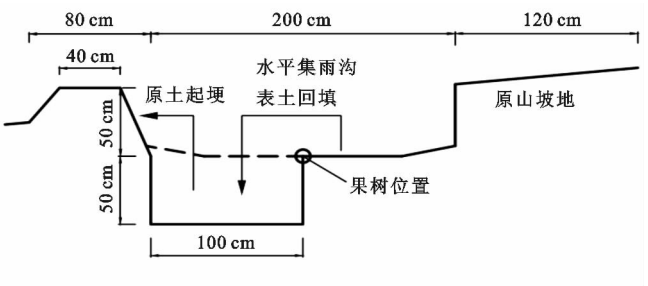


图 1 蓄水坑灌田间工程水平沟整地示意图

3.2 蓄水坑设计与布置技术

在水平集雨沟内，以果树树干为圆心挖一环状沟，在环状沟内等间距布置若干个一定深度的蓄水坑，相邻蓄水坑通过环状沟相互连通。灌溉水通过输水管道分配到各蓄水坑中，再通过蓄水坑坑壁入渗、扩散到根区土壤中。

(1) 坑数。根据根区土壤水分分布均匀情况确定蓄水坑个数，根据前期研究，坑数取 4 个。

(2) 坑深。蓄水坑的深度取决于计划湿润层。据不同灌水方法的苹果树根系调查，干旱地区根系分布在 50—150 cm 深度范围内[19]。主要根系活动层在 0—120 cm，故灌水计划湿润层拟定为 0—120 cm[20]，蓄水坑坑深可取 40—60 cm。本设计中蓄水坑坑深取 40 cm。

(3) 坑径。采用蓄水坑灌法进行果园灌溉，为防止水土流失，则蓄水坑灌法应有足够的降雨径流蓄滞能力，即单株果树控制面积内的降雨径流量即产即汇。本文降雨径流蓄滞能力设计为 5 a 一遇 24 h 最大暴雨量。计算蓄水坑的直径。

单株果树控制面积的设计径流量[21]：

$$W_R = AP - \frac{Ak}{1-\alpha}(t_p^{1-\alpha} - \alpha t_0^{1-\alpha}) \quad (1)$$

式中：W_R——单株果树控制面积的设计径流量(m^3)；A——单株果树控制面积(m^2)；果树行距 4 m，株距 2 m，本文取 $A=8\ m^2$；k，α——k 为土壤入渗系数(m/min)；α——土壤入渗指数，根据试验分析[22]，本文取 $k=9.10\times10^{-4}$ m/min，$\alpha=0.202$；P——5 a 一遇 24 h 最大暴雨量(m)，经查《山西省水文计算手册》，本区域 $P=0.063\ 9$ m；t_p——设计降雨历时(min)，本文取 $t_p=120$ min；i_{pA}——设计降雨平均雨强，$i_{pA}=P/t_p$(m/min)；t_0——降雨初损历时，$t_0=(k/i_{pA})^{\frac{1}{\alpha}}$(min)。

经计算，研究区设计降雨平均雨强 $i_{pA}=5.33\times10^{-1}$ mm/min，初损历时 $t_0=14.193$ min，单株果树控制面积的设计径流量 $W_R=0.110\ m^3$。

由单株果树控制面积内的降雨径流量即产即汇，得：

$$W_R = 4\pi R^2 H \quad (2)$$

式中：R——蓄水坑半径(m)；H——蓄水坑深度(m)。

代入计算得 $R=0.148$ m，故本设计蓄水坑直径取 30 cm。

(4) 环状沟。环状沟是以树干为圆心、50 cm(取 1/2 树冠半径，树冠半径约 1 m)为半径的环状浅沟，宽度 30 cm，深度 20 cm[23]。它将相邻蓄水坑两两串联起来，降雨时可进一步蓄滞径流，将沟中汇集的降雨均匀分配到 4 个蓄水坑中，防止水土流失，充分利用降水资源。环状沟布置如图 2 所示。

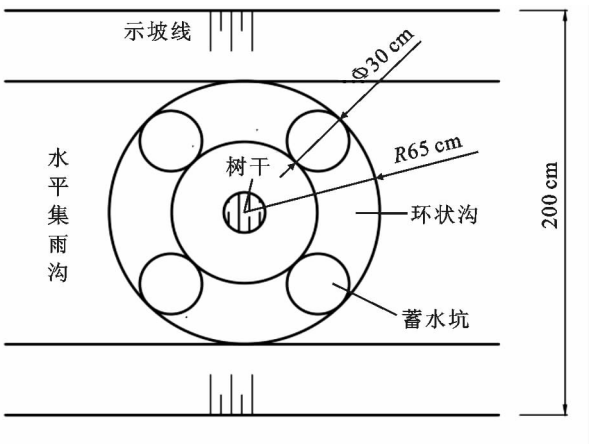


图 2 蓄水坑灌田间工程蓄水坑及环状沟布置图

(5) 坑底板、固壁设施及顶盖。蓄水坑底采用不透水的形式，有利于水分向水平方向运动，避免深层渗漏。底板材料使用直径 30 cm 的圆形聚乙烯板。固壁设施可防止灌水及降雨径流会入坑中时产生冲塌和渗透破坏，采用直径 30 cm 的圆柱形聚乙烯格栅套筒。顶盖可防止坑内水分过度蒸发和冬季低温对附近根系的影响，采用直径 30 cm 的聚乙烯泡沫塑料圆形顶盖。坑底板、固壁设施、顶盖三者连接为一体化设计，方便安装、拆卸、修理和更换如图 3 所示。

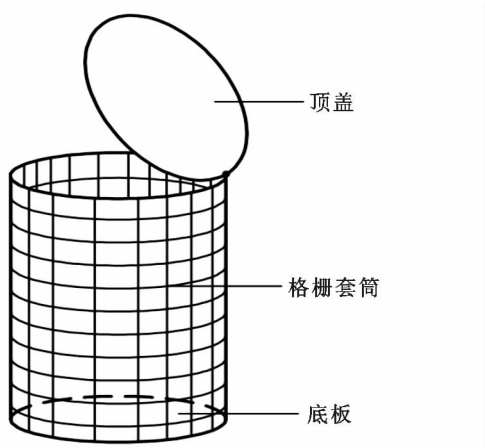


图 3 蓄水坑灌田间工程蓄水坑底板、固壁设施和顶盖示意图

3.3　低压管道系统设计技术

在没有充足自然降雨时,采用低压管道系统对果树进行灌水,以保证果树正常生长。

3.3.1　输配水管网布置　果树灌溉输配水闸管系统采用"丰"字形布置,系统的首部枢纽设于果园坡顶水源井处,管网包括干管、支管、毛管 3 级。干管从坡顶沿垂直高线方向向下顺坡布置,在干管双侧沿等高线方向平坡布置支管,支管间距 4 m。从支管起,在水平集雨沟内平坡布置环状毛管,毛管间距 2 m(图 4)。

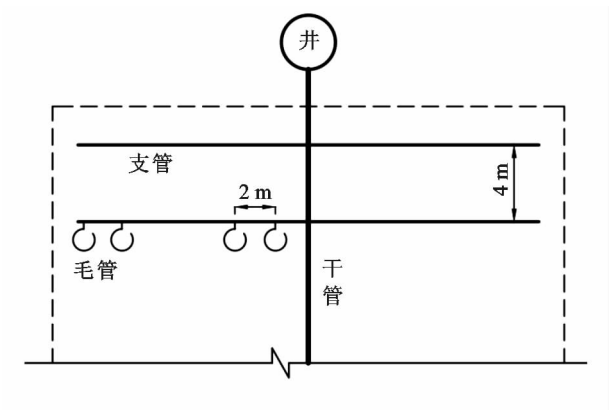


图 4　蓄水坑灌田间工程输配水管网布置图

3.3.2　灌水小区布置　因支管沿果树行平行等高线布置,行距同果树行距为 4 m。支管布置于自然坡面地下靠近集雨沟一侧,可减少毛管从支管向各蓄水坑输水的距离,缩短毛管长度。四孔出流毛管沿环状沟内径绕树环形布置,各出水口处分别连接一长度为 5 cm 的导流短管,4 根导流短管分别给同一株树下的 4 个蓄水坑灌水。灌水小区示意图如图 5 所示。

3.3.3　管材选择　设计采用聚乙烯管作为管材,根据微灌管道沿程水头损失计算系数、指数表,当微灌用聚乙烯管的管径大于 8 mm 时,流量指数 $m=1.75$,管径指数 $b=4.75$,摩阻系数 $f=0.505$[24]。

3.3.4　毛管设计　在蓄水坑灌系统中,毛管为四孔出流的环形管接一 80 cm 长的直管,间距同果树株距 2 m。四孔出流毛管沿环状沟内径绕树环绕布置,从支管取水,将水分配到环状沟中的各蓄水坑内。由于需水量较大,为了提高灌溉效率,适当选取较大直径的毛管。

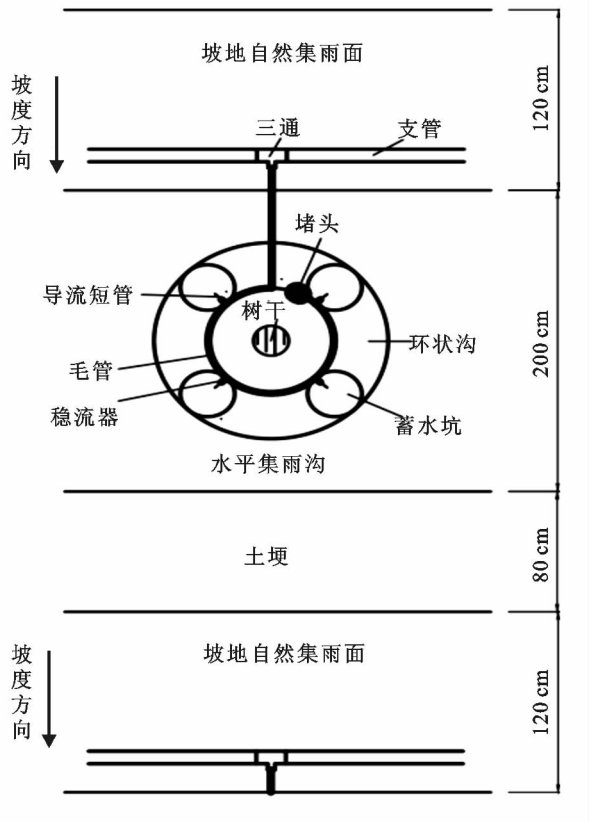


图 5　蓄水坑灌田间工程灌水小区布置图

(1) 毛管直径。在井灌区常采用计算简便的经济流速法确定管径。首先根据各管段流量和管材确定适宜的经济流速,然后根据管道水力学公式计算或查阅不同流量及流速下管径选择表[25],参考表 1 中低压管道输水适宜流速值[26],得到一组比较经济的管径,最后根据商品管径进行标准化修正。

$$d_{毛}=1\,000\sqrt{\frac{4Q_{毛}}{3\,600\pi v_{毛}}}=18.8\sqrt{\frac{Q_{毛}}{v_{毛}}} \tag{3}$$

式中:$d_{毛}$——毛管内径(mm);$V_{毛}$——毛管内水的流速(m/s);$Q_{毛}$——毛管的设计流量(m^3/h)。

表 1　低压管道输水适宜流速值

管　材	混凝土管	石棉水泥管	水泥砂管	塑料管	移动软管
适宜流速/($m\cdot s^{-1}$)	0.5～1.0	0.7～1.3	0.4～0.8	1.0～1.5	0.5～1.2

(2) 毛管进口工作水头。毛管进口工作水头计算公式为:

$$h_{毛0}=h_d+h_{f毛}+h_{j毛}\pm\Delta H_{i毛}' \tag{4}$$

式中:$h_{毛0}$——毛管进口工作水头(m);h_d——灌水器工作水头(m);$h_{f毛}$——毛管沿程水头损失(m);$h_{j毛}$——毛管局部水头损失(m);$\Delta H_{i毛}'$——毛管进口处与 i 断面处地形高差,顺坡为"+",逆坡为"−"(m)。

3.3.5　支管设计　在蓄水坑灌系统中,支管是指连接干管与毛管的管道。支管从干管取水分配到毛管,

为多孔出流管道，其流量比毛管大得多。支管平坡布置，行间距同果树行距为 4 m，埋于自然坡面地下靠近集雨沟一侧以使毛管长度尽可能短。

(1) 支管允许水头损失、管径及长度。

支管允许水头损失：

$$[\Delta h_{支}]=[\Delta h]-\Delta h_{毛} \tag{5}$$

式中：$[\Delta h]$——灌水器允许水头偏差(m)；$[\Delta h_{支}]$——支管允许水头损失(m)；$\Delta h_{毛}$——毛管实际最大水头差(m)。

支管管径计算方法同毛管管径，并在初步确定支管管径后进行校核，保证支管孔口最大水头差小于支管允许最大水头差。

支管极限分流孔数 N_{max} 和支管最大长度 L_{max} 按下式计算：

$$N_{max}=\mathrm{INT}\left[\left(\frac{5.446[\Delta h_{支}]d_{支}^{4.75}}{kS_e q_d^{1.75}}\right)^{0.364}+0.52\right] \tag{6}$$

$$L_{max}=S(N_{max}-1)+S_0 \tag{7}$$

式中：INT〔〕——将括号内实数舍去小数成整数；N_{max}——支管的极限分流孔数；L_{max}——支管最大长度(m)；k——水头损失扩大系数，$k=1.1\sim1.2$；$d_{支}$——支管内径(mm)；$[\Delta h_{支}]$——支管允许水头偏差(m)；S_e——支管出水口间距(m)；q_d——毛管设计流量(L/h)；S_0——支管第一个出水口与支管进口的距离(m)。

N_{max} 和 L_{max} 的计算值只是达到灌水均匀度要求的控制数，实际系统布置时还需根据地面形状、干管布置情况来确定支管实际长度 L 和出水口数 N。

(2) 支管进口工作水头。支管进口工作水头计算公式为：

$$h_{支0}=h_{毛0}+h_{f支}+h_{j支}+\Delta H_{i支}' \tag{8}$$

式中：$h_{支0}$——支管进口工作水头(m)；$h_{毛0}$——毛管进口工作水头(m)；$h_{f支}$——支管沿程水头损失(m)；$h_{j支}$——支管局部水头损失(m)；$\Delta H_{i支}'$——支管进口处与 i 断面处地形高差，顺坡为“+”，逆坡为“−”(m)。

3.3.6 干管设计 干管的作用是输送其所属轮灌组工作时能够满足下一级管道工作压力需求的对应的设计流量，是负责将灌溉水输送并分配给支管的管道。干管设计的主要内容是确定管径，采用经验公式法计算初选管径，然后根据压力要求、分流条件和布置情况进行调整、对比后确定管径。

对于中、小型规模的微灌系统，采用公式(15)或公式(16)估算干管管径：

当 $Q<120$ m^3/h 时，

$$d=13 \tag{9}$$

当 $Q\geqslant120$ m^3/h 时，

$$d=11.5 \tag{10}$$

式中：d——干管内径(mm)；Q——干管设计流量(m^3/h)。

3.3.7 系统工作制度 本蓄水坑灌系统采用轮灌工作制度。按照水量平衡原理，系统轮灌组的最大数目 N_{max} 为：

$$N_{max}=\frac{CT_d}{t_d} \tag{11}$$

式中：N_{max}——系统轮灌组的最大数目；C——设计灌溉系统日工作时数(h)；T_d——设计灌水周期(d)；t_d——设计一次灌水延续时间(h)。

本设计具体划分轮灌组时考虑以下原则：任意轮灌组的流量不与水源设计可供水流量接近；不同轮灌组工作时水泵功率尽可能接近，以保持水泵良好工况；系统操作管理比较方便。

4 结 论

(1) 整地技术采用水平集雨沟整地技术，宽度 2 m的水平集雨沟、底宽 80 cm 的土埂和宽度 1.2 m 的原山坡地集雨面沿等高线方向依次相间布置，果树、蓄水坑、环状沟等皆布置于水平集雨沟内。

(2) 每株果树布置 4 个蓄水坑，蓄水坑深度 40 cm，在降雨径流蓄滞能力设计为 5 a 一遇 24 h 最大暴雨量标准下，根据单株果树控制面积内的降雨径流量即产即汇原理，计算得蓄水坑直径为 30 cm，环状沟深度 20 cm，宽度 30 cm，半径 50 cm，坑内布置一体化设计的聚乙烯底板、聚乙烯固壁和聚乙烯泡沫塑料顶盖；

(3) 输配水闸管系统采用“丰”字形布置，包括干管、支管、毛管 3 级，管材为聚乙烯；四孔出流毛管沿环状沟内侧呈环形绕树布置；管材选用聚乙烯材料，并对各级管道管径、长度及进口工作水头的计算方法和系统工作制度的确定方法进行归纳。

(4) 综上所述，对整地技术、蓄水坑设计与布置技术和低压管道系统设计技术的规划设计，能够满足山丘区果园蓄水坑灌的特殊灌溉要求。

[参 考 文 献]

[1] 侯书林，刘英超. 国内外节水灌溉技术装备与自控技术综述[J]. 中国农村水利水电，2011(6)：49-51.

[2] 陈雷. 认真贯彻落实中央一号文件精神全面开创农村水利工作新局面：在全国农村水利工作会议上的讲话[J]. 中国水利，2011(7)：1-7.

[3] 马娟娟，郑利剑，孙西欢等. 蓄水坑灌法研究进展[J]. 太原理工大学学报，2017，48(3)：427-434.

[4] 郭向红,孙西欢,马娟娟,等. 不同入渗水头条件下的 Green-Ampt 模型[J]. 农业工程学报,2010,26(3):64-68.

[5] 马娟娟,孙西欢,郭向红. 基于 Green-Ampt 模型的变水头积水入渗模型建立及其参数求解[J]. 水利学报,2010,41(1):61-67.

[6] 李京玲,孙西欢,马娟娟,等. 蓄水坑灌单坑土壤水分运动模型的有限体积法求解[J]. 农业机械学报,2011,42(5):63-67.

[7] 尹燕喆. 蓄水多坑肥灌条件下复水对水氮运移规律的影响[D]. 山西 太原:太原理工大学,2013.

[8] 冯晓波. 蓄水坑灌条件下不同体系温度对水氮运移的影响[D]. 山西 太原:太原理工大学,2014.

[9] 王军,马娟娟,孙西欢,等. 蓄水坑灌条件下不同土温对土壤水氮运移规律的影响[J]. 节水灌溉,2015(8):79-83.

[10] Zhao Yunge, Ma Juanjuan, Sun Xihuan, et al. Spatial distribution of soil moisture and fine roots of apple trees under water storage pit irrigation[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2014, 140(1): 333-340.

[11] 郑利剑,马娟娟,郭飞,等. 蓄水坑灌下矮砧苹果园水分监测点位置研究[J]. 农业机械学报,2015,46(10):160-166.

[12] 张学琴,马娟娟,孙西欢,等. 不同灌水方法对苹果树果实膨大期根系生长和土壤酶活性的影响研究[J]. 节水灌溉,2016(3):1-5.

[13] 郭飞. 蓄水坑灌下苹果树根系吸水深度与水分运移特性研究[D]. 山西 太原:太原理工大学,2016.

[14] 桑永青,马娟娟,孙西欢,等. 蓄水坑灌下不同灌水对新梢旺长期苹果园 SPAC 系统水势影响研究[J]. 节水灌溉,2016(3):6-10.

[15] 李波. 蓄水坑灌条件下幼龄苹果树的适宜灌水下限研究[D]. 山西 太原:太原理工大学,2016.

[16] 张敏,孙西欢,郭向红,等. 蓄水坑灌下苹果树光合日变化与影响因子的分析[J]. 中国科技论文,2015(9):1095-1100.

[17] 王月玲,蔡进军,张源润,李生宝,蒋齐. 宁南黄土丘陵区新型集流造林工程的规划设计与应用[J]. 西北农业学报,2006,15(4):25-30.

[18] 李英武,柳晔,海钦. 宁南山区抗旱集流整地及树种配置技术[J]. 栽培技术,2008(5):23-24.

[19] 李子春,周长旭,张众,谢金岭. 苹果需水量与灌溉管理[J]. 节水灌溉,1998(4):21-23.

[20] 孙西欢,马娟娟,周青云,等. 蓄水坑灌法技术要素初探[J]. 沈阳农业大学学报,2004,35(5/6):405-407.

[21] 马娟娟,孙西欢,李占斌. 蓄水坑灌降雨径流的产汇流特性研究[J]. 水土保持学报,2005,19(4):57-59.

[22] 王晓红. 均质土中蓄水单坑水分运动的数值模拟与试验分析[D]. 山西 太原:太原理工大学,2001.

[23] 郭向红. 蓄水坑灌条件下果园 SPAC 系统水分运移研究[D]. 山西 太原:太原理工大学,2010.

[24] 姚彬. 微灌工程技术[M]. 河南 郑州:黄河水利出版社,2012.

[25] 李龙昌,王彦军,李永顺,等. 管道输水工程技术[M]. 北京:中国水利水电出版社,1998.

[26] 迟道才. 节水灌溉理论与技术[M]. 北京:中国水利水电出版社,2009.

(上接第 137 页)

[23] Yang Changwei, Zhang Jianjing, Zhang Ming. A prediction model for horizontal run-out distance of landslides triggered by Wenchuan earthquake[J]. Earthquake Engineering & Engineering Vibration, 2013,12(2):201-208.

[24] Chen Hongxin, Zhang Limin, Gao Liang, et al. Presenting regional shallow landslide movement on three-dimensional digital terrain[J]. Engineering Geology, 2015,195:122-134.

[25] Hayashi J N, Self S. A comparison of pyroclastic flow and debris avalanche mobility[J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 1992,97(97):9063-9071.

[26] Evans S G, Clague J J, Woodsworth G J, et al. The Pandemonium creek rock avalanche, British Columbia[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1989,26(3):427-446.