

黄土坡耕地水土保持的“缝、洞”技术*

刘计良¹ 王正中¹ 刘铨鸿¹ 苏德慧² 赵延风¹

(1.西北农林科技大学水利水电工程研究所, 陕西杨凌 712100; 2.蒙特卡罗水利工程公司, 休斯顿 77067)

摘要:提出了一种防止黄土高原坡耕地水土流失的“缝、洞”技术,使坡面径流在重力作用下通过“缝”就地拦蓄于“洞”中形成土壤水库,通过“缝、洞”节节拦蓄,可抑制大面积坡面径流的汇聚并减少蒸发,达到防止水土流失的目的。指出了“缝、洞”措施在黄土坡耕地应用过程中应该注意的问题;提出了这种微型水利水保工程的设计标准,以相应标准暴雨径流全部流蓄“洞”中为原则,初步提出“缝、洞”的合理布置方案,推导出合理洞径与缝距之间的关系。应用有限元法模拟了成洞过程及渗流分析,得到了成洞后洞体周围土体的物理力学参数的变化规律:成洞后,在洞体周围约0.4倍洞径的区域,土体的物理力学性质较成洞前发生较大变化,土体的孔隙率和渗透系数显著降低,干密度和变形模量显著升高,并且离洞体越近,孔隙率和渗透系数越小,干密度和变形模量越大;渗流稳定后,洞体强度略有降低,洞体产生一定的变形。

关键词:黄土坡耕地 水土保持 缝洞技术 结构稳定性

中图分类号: S157.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2013)07-0107-06

“Slot and Hole” Measurement of Soil and Water Conservation in Loess Sloping Farmland

Liu Jiliang¹ Wang Zhengzhong¹ Liu Quanhong¹ Su Dehui² Zhao Yanfeng¹

(1. Institute of Water Resources and Hydropower Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China
2. Montgomery and Barnes, Inc., Houston 77067, USA)

Abstract: A method called “slot and hole” was proposed for preventing the soil and water loss of sloping farmland in Loess Plateau. Due to gravity load, slop surface runoff was intercepted and stored in a hole through a slot to form a soil reservoir. By applying this method, the convergence of slop runoff was avoided, and water evaporation also decreased. The loss of soil and water was thus prevented. Some skills for application of this method were pointed out. Additionally, the design standard of “slot and hole” method was proposed. Based on the principle that the corresponding standard runoff was totally stored in the hole, the reasonable layout scheme was determined, and the relationship of the diameter of the hole to the distance between two adjacent slots was obtained. Moreover, the formatting process of the hole and seepage process were simulated by employing FEM, and then the variation laws of physical and mechanical parameters of the soil around the hole were obtained. The results demonstrated that the physical and mechanical parameters of the soil around the hole varied significantly in the area of 0.4 times diameter of the hole, and the porosity and permeability coefficient of soil decreased as the dry density and deformation modulus of soil increased. The closer the area was to the hole, the smaller the porosity and permeability coefficient and the larger the dry density and deformation modulus were. After seepage analysis, the strength of the hole decreases slightly and certain deformation occurred.

Key words: Loess sloping farmland Soil and water conservation Slot and hole Structural stability

收稿日期: 2013-01-10 修回日期: 2013-02-02

* 国家自然科学基金资助项目(51179164)、陕西省农业科技创新项目(2011NXC01-20)和陕西省水利科技项目(SXSL2011-03)

作者简介: 刘计良, 博士生, 主要从事水工结构及工程力学研究, E-mail: liujiliang430@163.com

通讯作者: 王正中, 教授, 博士生导师, 主要从事水工结构及工程力学研究, E-mail: wangzz0910@163.com

引言

坡耕地占黄土高原耕地面积的 70% 左右,是水土流失的主要源地。严重的水分、养分流失使节水灌溉技术在该区得到了应用^[1-3]。防止黄土高原坡耕地水土流失有效的新方法受到黄土高原水土保持界的关注。

典型的水土流失治理措施有耕作措施、工程措施、生物林草措施等^[4-9]。每种水土保持措施总有其局限性,如:耕作措施拦截的径流量有限;坡改梯工作则耗时费工,投入大,且田坎会影响作物的光合作用和机械化耕作。

黄土高原干旱与半干旱地区年降水量少,为了有效积蓄降水及防止水土流失,使有限的自然降水得到有效利用,研究人员提出“拦蓄降水,就地入渗”作为整治黄土高原坡耕地水土流失的战略方针^[10],即以“降水就地入渗拦截”为核心,增加土壤入渗,形成“土壤水库”,使坡面径流转化为作物可以有效利用的水分。

基于此,参考东北地区农田排水与水土保持的成功经验,提出一种防止黄土高原坡耕地水土流失的“缝、洞”措施:通过在坡耕地上利用鼠洞犁等高耕作措施大体沿等高线建造一排排的“缝、洞”,使坡面径流在重力作用下通过“缝”就地拦蓄于“洞”,增加土壤入渗,减小径流,抑制水土流失,集蓄水和防止水土流失于一体。本文对“缝、洞”设计标准及其合理布置问题进行初步理论探索,以坡面径流全部流蓄入洞为原则,提出“缝、洞”合理布置方案,给出洞径与缝距之间的关系;应用有限元法模拟成洞过程及渗流分析,评价成洞前后洞体周围土体物理力学性质的变化,并评价渗流对洞体稳定性的影响。

1 “缝、洞”开凿机械——鼠洞犁

鼠洞犁是在田面犁底层以下一定深度开凿挤压出“洞”(又称为鼠洞)的农业机械(图 1),开凿出的鼠洞形状如图 2 所示,鼠洞常用在低洼易涝的地方用来排水^[11]。

鼠洞犁由 3 部分构成:连接板、犁尖和挤压器。鼠洞的成洞原理为:在拖拉机牵引下,由连接板前部

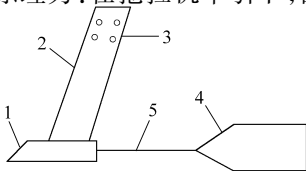


图 1 鼠洞犁结构简图
Fig.1 Sketch map of mole plough
1. 犁尖 2. 破土刀 3. 连接板 4. 挤压器 5. 拉链

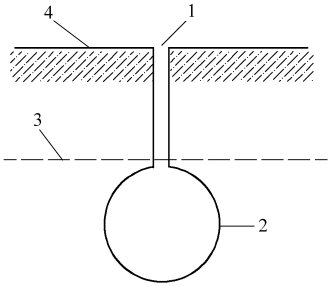


图 2 缝、洞简图
Fig.2 Sketch map of slot and hole
1. 缝 2. 洞 3. 犁底层 4. 田面

的破土刃切开土层,形成拦截坡面径流的缝,缝宽一般为 2~3 cm,连接板下部的犁尖在土壤中开出小洞,然后由犁尖后面的光滑尖头圆柱体状挤压器(直径通常为 10~20 cm)将小洞挤压扩大,并使洞壁加固且光滑,从而拉出一条无衬砌的排水通道,该通道不影响机械作业及地面耕种。鼠洞犁结构简单易造,便于使用,且成洞的效率高,成本低,无需使用建筑材料,不占用耕地,经过实践检验,排水效果明显^[11]。

2 坡耕地“缝、洞”措施合理布置

2.1 “缝、洞”的布设及应注意的问题

“缝、洞”建造简单,可由坡面手扶拖拉机牵引鼠洞犁进行机械作业,沿等高线布设一排排的鼠洞,投资小,不占用耕地,更新容易,播种后建造不影响地面耕种又能最大限度地减小对“缝、洞”的破坏,并能达到深松土壤的目的。实际施工过程中,由于受地形等因素的影响,可能不易全部按等高线布设,可参考等高耕作措施大体沿等高线建造一排排“缝、洞”。

黑龙江省红星农场曾采用“沟、管、洞、缝”相结合的综合措施成功用于小兴安岭地区坡耕地水土保持^[12]。在此地区,降水量较大,地下水位较高,“沟”的主要作用是坡头截流,防止外水进入坡耕地;“洞”布置在坡耕地,“管”则布置在局部闭流洼地和低洼地带,均用于排水以降低土壤含水率,达到减小径流、降低地下水位的目的;“缝”是为了增大土壤入渗,有效遏制土壤的面蚀,通过各项措施的综合作用实现水土保持效果。黄土高原蓄水洞与东北地区排水洞不同,黄土高原坡耕地年降水量少,地下水很深,重点不是排水而是蓄水、保水、保土,防止水土流失,故应保持洞线间断而互不连通,才能使每段鼠洞之间可单独封堵蓄水,实现径流就地拦蓄的目标。

由于黄土的湿陷特性,为防止“缝、洞”的塌陷,鼠洞的深度不仅要大于深耕所要求的深度,考虑作物根系能充分吸收水分的深度,还应详细研究犁体

及挤压器的合理形状及尺寸。目前,洞深可控制在 40 ~ 50 cm,聚储在洞中的水分不仅易被作物利用又可降低建造消耗的动力。为了避免机械施工时对作物的破坏,应在播种后打洞,由于在地上仅有一条“缝”,不影响地面作物生长,又能达到深松土壤的目的。

根据鼠洞用于粘土区及沙壤土区的排水经验及排水效果来看^[11],为了防止淤泥涌进洞口及部分洞口坍塌造成排水效果减弱,当地通常采用一些措施保护洞口,延长鼠洞的使用寿命,如“缝”上侧设小坎、使用苇把、麦秸、瓦管等既对洞口加以保护又可降低径流速度,减少挟泥量。如果采用配套完善的管理措施,鼠洞的使用寿命通常可达 3 年以上。鉴于黄土高原坡耕地土质松散的特性,推荐一年一打以防止洞的坍塌及保持鼠洞的水保效果。

在暴雨来临时,坡面径流在重力作用下沿“缝”流入“洞”中储存起来,形成“土壤水库”,大大提高雨水渗入土壤深层的效率,且由于“缝”非常窄,可减少雨后高温干燥引起的水分蒸发损失量,提高有限雨水的利用效率。通过“缝、洞”的节节拦蓄,既抑制了坡面水土流失,又积蓄了宝贵的水肥资源,洞中的水缓慢渗入有效耕作层被作物吸收利用,从而使“缝、洞”措施起到保土、保水、保肥的目的。

2.2 “缝、洞”的设计标准

“缝、洞”这种微型水保工程在黄土高原尚属新的探索,没有合理布置原则及设计标准,缝距和洞径的取值缺乏理论依据,无法达到高效保水、保土、保肥的目的。为了指导开展相应的试验研究,有必要先进行理论研究。

由于黄土结构疏松并且抗冲击力差,严重的土壤侵蚀主要是由高强度、短历时暴雨造成的,有时一次高强度暴雨的土壤侵蚀量占全年侵蚀总量的大部分,这是黄土高原坡耕地土壤侵蚀的一个重要特点。故“缝、洞”的防御设计标准应根据坡耕地所处位置、坡度、土壤性质、侵蚀性暴雨径流情况及水土流失情况加以确定,以最易引起坡耕地水土流失的暴雨来推算径流量,以此作为“缝、洞”的防御设计标准,如以 2 年一遇、5 年一遇等不同历时暴雨降雨强度 $I(t)$ 作为设计标准,以某设计标准下暴雨径流不造成水土流失为原则(“缝”间局部径流全部入洞)合理布置鼠洞间距。

令“缝、洞”沿等高线布设,相邻“缝”之间的间距为 L ,坡耕地坡度为 θ ,洞的面积为 S ,洞径为 D 。在坡面上任取一个微段 dx ,通过某断面的单宽径流量为 q ,则经过 dx 增量后径流量为: $q + \frac{\partial q}{\partial x}dx$,某时

刻 t 时的入渗率为 $f(t)$ 。图 3 为布设了“缝、洞”措施的坡面径流示意图。

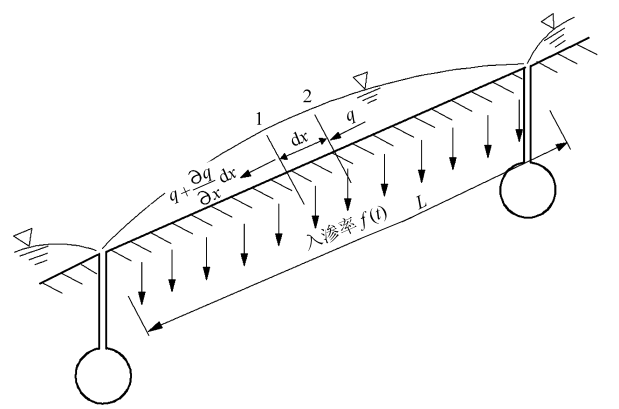


图 3 坡面径流示意图
Fig. 3 Schematic diagram of runoff on slop

在某一时刻 t ,断面 1、2 之间形成的径流量为 $(I(t) - f(t)) dx \cos \theta$, $I(t)$ 为降雨强度,故有^[13]

$$\frac{\partial q}{\partial x}dx = (I(t) - f(t)) dx \cos \theta \tag{1}$$

则每一段(间距为 L)内 L 处 t 时刻的单宽径流为

$$q = \int_0^L \frac{\partial q}{\partial x}dx = \int_0^L (I(t) - f(t)) dx \cos \theta \tag{2}$$

即
$$q = (I(t) - f(t)) L \cos \theta \tag{3}$$

根据图 4 阴影部分,每一段内总的单宽径流为

$$Q = \int_{t_1}^{t_2} (I(t) - f(t)) L \cos \theta dt \tag{4}$$

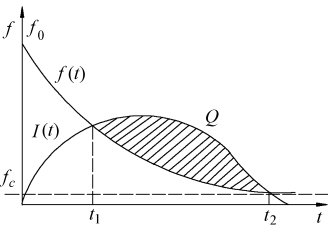


图 4 径流量计算示意图
Fig. 4 Schematic diagram of computation of runoff amount

在最易引起坡耕地水土流失的某设计暴雨标准下,以每一段 L 内坡面产生的径流在重力作用下通过“缝”全部入渗“洞”为原则(无水土流失)确定洞径与缝距之间的关系,以确定出其合理布置方案,即

$$S = \frac{\pi D^2}{4} = \int_{t_1}^{t_2} (I(t) - f(t)) L \cos \theta dt \tag{5}$$

则洞径与缝距的关系为

$$L = \frac{\pi D^2}{4 \int_{t_1}^{t_2} (I(t) - f(t)) \cos \theta dt} \tag{6}$$

洞径 D 由鼠洞犁圆柱状挤压器的半径确定,可看成定值(挤压器通常有不同的规格)。相邻两“缝”的合理布置间距由式(6)确定。

3 洞体蓄水能力及稳定性

3.1 洞体蓄水能力分析

为了发挥洞体作为土壤水库的功能,应对黄土洞体进行蓄水能力评价,计算洞水渗漏完所需要的时间(详见算例)。

3.2 洞体稳定性评价

挤压成形后的洞体属于浅埋无衬砌结构,洞体的稳定需要靠其自身来维持,当洞体蓄水后,聚储在洞中的水慢慢渗入周围土体,由于含水率的增大,土体强度有所降低,或可导致洞体发生坍塌。黄土鼠洞破坏之前表现为它维持稳定性的能力,既与洞体的尺寸大小及埋深有关,也与黄土的诸多性质有关,如黄土颗粒的粘结特性、孔隙率、含水率及均匀性等,在黄土地区采用“缝、洞”措施时,应对洞体的稳定性进行评价。

对于黄土鼠洞而言,经过鼠洞犁挤压器开孔挤压后,洞体周围土体的物理力学性质发生变化,储存在洞中的水的入渗使洞周围土体含水率提高。土体孔隙率和含水率的变化均会对黄土洞的结构安全产生影响,故应采用合理的评价标准预测经过鼠洞犁挤压密实及水的入渗后洞体的稳定性。

为了评价黄土洞的结构安全性,应用有限元法对黄土洞的成洞过程进行数值模拟并分析渗流对黄土洞结构稳定的影响,具体内容包括:分析坡耕地成洞过程前、后洞体周围土壤物理力学特性的变化规律(孔隙率、干密度、变形模量、渗透系数);通过渗流分析洞室蓄满水后并且渗流稳定后黄土洞变形情况;根据有限元模拟结果评价洞体稳定性。

4 算例

以渭北高原某县一块坡耕地为例,坡长 40 m,坡度 10°,拟采用“缝、洞”措施防止水土流失,试确定“缝、洞”的合理布置方案并对洞体的成洞过程及渗流过程进行数值模拟。

4.1 “缝、洞”的合理布置

如采用“缝、洞”措施防止水土流失,可根据文中理论确定“缝、洞”的合理布置方案。根据该地水土流失情况,确定以 2 年一遇 30 min 暴雨历时为防御设计标准,其最大降雨强度为 0.087 cm/min,根据文中理论及径流计算方法(求解过程略),算得
$$\int_{t_1}^{t_2} (I(t) - f(t)) \cos\theta dt = 1.31 \text{ cm},$$
如果鼠洞犁采用 10 cm 直径的挤压器,则相邻两“缝”的合理布置间距
$$L = \frac{\pi D^2}{4 \int_{t_1}^{t_2} (I(t) - f(t)) \cos\theta dt} = 0.599 \text{ m},$$
考虑实

际情况,每隔 0.6 m 沿等高线布设一个直径为 10 cm 的鼠洞,则在此坡耕地上共需布设 66 排鼠洞。

4.2 洞体的渗流分析和稳定性评价

应用有限元软件 ABAQUS 进行黄土洞成洞过程的模拟及渗流分析和稳定性评价。

4.2.1 成洞过程模拟

(1)建立二维有限元模型,考虑洞体的对称性,只考虑洞体的右半部分,见图 5。设置洞深 50 cm,缝宽 3 cm,查阅该坡耕地的黄土性质的相关资料,设定土体的相关参数:孔隙率 $n = 63\%$,变形模量 $E = 24 \text{ MPa}$ 。

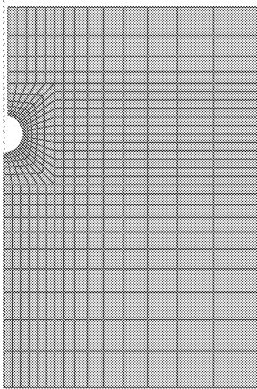


图 5 有限元网格
Fig. 5 Finite element meshes

(2)假设一个初始洞径(2.5 cm),对模型边界施加约束并考虑地应力平衡,通过位移约束的方式实现洞径由 2.5 cm 变大到 10 cm,完成洞体的扩张过程。

(3)成洞前后黄土物理力学特性的变化:根据成洞过程数值模拟结果并参照黄土的物理力学性质的变化规律^[14],绘出孔隙率 n 、干密度 ρ 、变形模量 E 、渗透系数 k 沿洞体径向 r 的变化规律(坐标原点设置在洞体中心),分别见图 6~9。

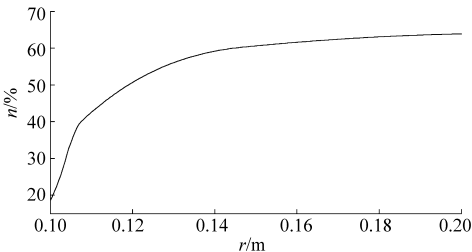


图 6 孔隙率 n 沿径向的变化规律
Fig. 6 Variation law of porosity n along radial direction

由图 6~9 可知,经过鼠洞犁的挤压密实后,洞体周围黄土的物理力学性质较未成洞前发生了较大变化,在洞体四周约 0.4 倍洞径的区域内,土体的孔隙率和渗透系数显著降低,干密度和变形模量则显著升高;离洞体越近,孔隙率和渗透系数越小,干密度和变形模量越大;在离洞体较远处,挤压过程对黄

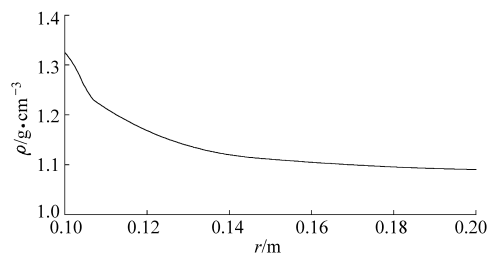


图 7 干密度 ρ 沿径向的变化规律

Fig. 7 Variation law of dry density ρ along radial direction

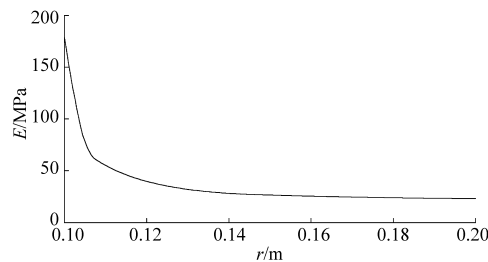


图 8 变形模量 E 沿径向的变化规律

Fig. 8 Variation law of deformation modulus E along radial direction

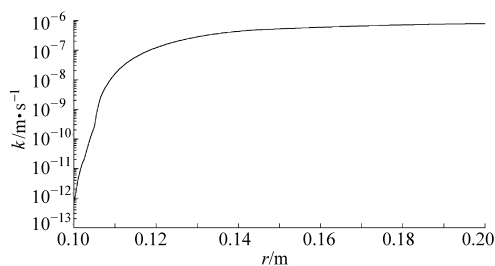


图 9 渗透系数 k 沿径向的变化规律

Fig. 9 Variation law of permeability coefficient k along radial direction

土物理力学性质的影响较小,物理力学参数可视为常数。

4.2.2 渗流分析及洞体稳定性评价

(1) 洞体建成后,撤去鼠洞犁,位移约束得以解除,这实际上是一个应力释放的过程,即洞体采用成洞后的洞径,洞周应力仅为土体的自重应力场,其初始物理力学参数设置为成洞后土体的相应参数。

(2) 渗流过程模拟:初始时刻对洞体周边施加满洞水压力,对洞体进行流固耦合分析;在求解过程中,判断洞周渗漏量的变化来修改洞周的水压力分布,当洞体水压力等于零时结束计算,得出渗漏的总时间 t_{end} 以及应力场分布。

(3) 满洞水渗漏完,洞体的 Mises 等效应力分布及应变分布见图 10、11。

由图 10 和图 11 可知,经过满洞水的渗漏,洞体产生较大变形,圆形洞体变成了椭圆形,最大等效应力和最大应变分别位于洞体中部和顶部,其值分别为 1.409 kPa 和 2.561×10^{-4} ,并未出现塑性区,说

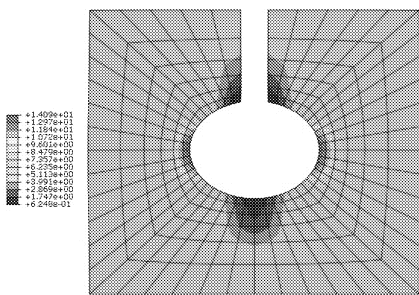


图 10 Mises 应力云图

Fig. 10 Mises stress distribution

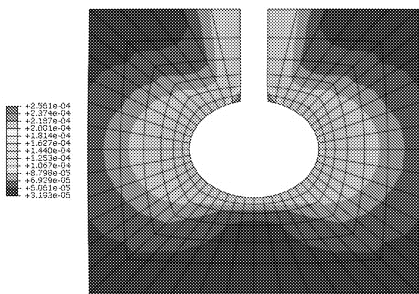


图 11 应变云图

Fig. 11 Strain distribution

明洞体在渗流作用下仍能保证自身稳定;经过渗流分析,满洞水渗漏完约需要 4.6 h。改变洞深,将其值分别设置为 45 cm 和 40 cm,重复上面的渗流分析过程,等效应力和应变的分布和洞深为 50 cm 时的结果相似,只是最大值有所减小。

需要说明的是,黄土是一种典型的结构性土,尤其对于湿陷性黄土,浸水饱和后土体结构迅速破坏,粘聚力迅速减小,产生显著附加下沉的黄土,故在湿陷性黄土地区采用缝、洞措施时,对黄土洞体稳定的研究除了数值模拟外尚需要进行浸压试验。

5 结束语

提出一种微型水保工程——“缝、洞”用于黄土高原坡耕地水土保持工作,使坡面径流在重力作用下全部入渗洞中贮存起来,可极大地消减径流功能,既防止了坡面水土流失,又蓄存了宝贵的雨水资源,并可抑制水分蒸发。在合理设计标准下,以每一段内坡面径流全部流蓄洞中为原则,给出了黄土高原坡耕地“缝、洞”的合理布置方案;通过对黄土洞的成洞过程的有限元数值模拟及渗流分析,评价了洞体周围土体的物理力学性质的变化:在洞体周围约 0.4 倍洞径的区域,土体的物理力学性质较成洞前发生较大变化,土体的孔隙率和渗透系数显著降低,干密度和变形模量显著升高,并且离洞体越近,孔隙率和渗透系数越小,干密度和变形模量越大;渗流稳定后,洞体强度略有降低,洞体产生一定的变形,但仍能维持自身稳定。

参 考 文 献

1 王全九,王辉,郭太龙. 黄土坡面土壤溶质随地表径流迁徙特征与数学模型[M]. 北京: 科学出版社, 2010.

2 Shi Hui, Shao Mingan. Soil and water loss from the Loess Plateau in China [J]. Journal of Arid Environment, 2000, 45(1): 9~20.

3 汪有科,黎鹏红,马理辉,等. 涌泉根灌在黄土坡地的水分运移规律实验[J]. 排灌机械工程学报,2010, 28(5): 449~454. Wang Youke, Li Penghong, Ma Lihui, et al. Experiment on water migration of surge root irrigation in loess sloping fields [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2010, 28(5): 449~454. (in Chinese)

4 赵龙山,宋向阳,梁心蓝,等. 黄土坡耕地耕作方式不同时微地形分布特征及水土保持效应[J]. 中国水土保持科学,2011, 9(2): 64~70. Zhao Longshan, Song Xiangyang, Liang Xinlan, et al. Micro-relief characteristics of loess sloping farmland under different tillage practices and its effects of soil and water conservation [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2011, 9(2): 64~70. (in Chinese)

5 贾洪雷,马成林,刘昭辰,等. 北方旱作农业区蓄水保墒耕作模式研究[J]. 农业机械学报,2007,38(12):190~194. Jia Honglei, Ma Chenglin, Liu Zhaochen, et al. Overview of study on the tillage mode of water storage and soil moisture conservation for dry farming region in northern China [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007,38(12):190~194. (in Chinese)

6 Strudley M W, Green T R, Ascough J C. Tillage effects on soil hydraulic properties in space and time: state of the science [J]. Soil and Tillage Research, 2008, 99(1):4~48.

7 薛瑾,刘国彬,张超,等. 黄土高原丘陵区坡改梯后的土壤质量效应[J]. 农业工程学报, 2011, 27(4): 310~316. Xue Jie, Liu Guobin, Zhang Chao, et al. Effects of terracing slope cropland on soil quality in hilly region of loess plateau[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(4): 310~316. (in Chinese)

8 Hammand A H A, Brresen T, Haugen L E. Effects of rain characteristics and terracing on runoff and erosion under the Mediterranean [J]. Soil and Tillage Research, 2006, 87(1): 39~47.

9 Vancampenhout K, Nyssen J, Gebremichael D, et al. Stone bunds and soil conservation in the northern Ethiopian highlands: impacts on soil fertility and crop yield [J]. Soil and Tillage Research, 2006, 90(1): 1~15.

10 朱显谟. 维护土壤水库确保黄土高原山川秀美[J]. 中国水土保持, 2006(1): 6~7.

11 徐跃光,王旭东. 鼠洞犁在农田内涝治理中的试验应用[J]. 农机化研究, 1996(2): 63~65.

12 张宝丽,王存国. 采用“沟、管、洞、缝”模式治理水土流失的探讨[J]. 黑龙江科技信息, 2008(8): 69.

13 吴发启,赵晓光,刘秉正. 缓坡耕地侵蚀环境及动力机制分析[M]. 西安:陕西科学技术出版社,2001.

14 刘祖典. 黄土力学与工程[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 1997.

(上接第 126 页)

17 韩文霆. 喷灌均匀系数的三次样条两次插值计算方法[J]. 农业机械学报,2008, 39(10):134~139. Han Wenting. Calculation of sprinkler irrigation uniformity by double interpolation using cubic splines and linear lines [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008,39(10):134~139. (in Chinese)

18 Li J S, Kawano H. Sprinkler performances as function of nozzle geometrical parameters[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 1996, 122(4): 244~247.

19 Burguete J, Playan E, Montero J, et al. Improving drop size and velocity estimates of an optical disdrometer: implications for sprinkler irrigation simulation[J]. Transactions of the ASABE, 2003, 50(6): 2 103~2 116.

20 Bautista-Capetillo C F, Salvador R, Burguete J, et al. Comparing methodologies for the characterization of water drops emitted by an irrigation sprinkler[J]. Transactions of the ASABE, 2009, 52(5): 1 493~1 504.

21 Salvador R, Bautista-Capetillo C, Burguete J, et al. A photographic method for drop characterization in agricultural sprinklers [J]. Irrigation Science, 2009,27(4): 307~317.