

DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.11.013

# EN-1对黄土性固化土水分垂直入渗特征的影响\*

刘月梅<sup>1,2</sup> 张兴昌<sup>3</sup>

(1. 西北农林科技大学资源环境学院, 陕西杨凌 712100; 2. 延安职业技术学院, 延安 716000;

3. 中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西杨凌 712100)

**【摘要】** 采用一维垂直入渗试验方法, 对不同容重、不同固化剂掺量处理的固化土水分入渗过程进行了研究。结果表明: 黄绵土容重在  $1.2 \sim 1.4 \text{ g/cm}^3$  范围内, 土壤容重对黄土性固化土的入渗能力有较大影响, 土壤容重越大, 对应于同一时刻入渗率越低, 累积入渗量越小, 湿润锋推进距离越短。3种土壤容重条件下, 不同 EN-1 固化剂掺量对累积入渗量和湿润锋运移距离的影响均显著 ( $P < 0.05$ ), 且随着固化剂掺量增大, 累积入渗量和湿润锋运移距离均有先增大后减小的趋势; 固化剂掺量在  $0.05\% \sim 0.1\%$  范围内累积入渗量最大; 累积入渗量与湿润锋运移距离呈良好的线性关系。固化剂掺量对土层含水率的影响在低容重 ( $1.2 \text{ g/cm}^3$ ) 条件下明显, 随着容重增加, 影响逐渐减小。利用 Philip 模型、Kostiakov 经验公式和指数公式对固化土入渗率与入渗历时的关系进行拟合时发现, Kostiakov 公式拟合值更接近于实测值, 且容重越大, 拟合精度越高。

**关键词:** EN-1 土壤固化剂 入渗率 累积入渗量 数学模型

**中图分类号:** S156.2; S152.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2012)11-0065-09

## Effects of EN-1 Soil Stabilizer on Water Vertical Infiltration Characteristics for Loess Stabilized Soil

Liu Yuemei<sup>1,2</sup> Zhang Xingchang<sup>3</sup>

(1. College of Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China

2. Yanan Vocational and Technical College, Yan'an 716000, China 3. Institute of Soil and Water Conservation,

Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China)

### Abstract

Characteristics and dynamic changes of soil water infiltration under different soil bulk density and different stabilizer content were analyzed by one-dimensional vertical infiltration experiments. The results showed that soil bulk density had significant influences on infiltration capacity of stabilized soil from  $1.2 \sim 1.4 \text{ g/cm}^3$  of soil bulk density ranged. The influences of soil bulk density on infiltration rate were stable and constituent. With increasing soil bulk density, cumulative infiltration decreased. Stabilizer amendment amount had effects on cumulative infiltration and wetting front under the same soil bulk density. Cumulative infiltration were the highest at  $0.05\% \sim 0.1\%$  amendment amount of EN-1 stabilizer, and were higher the control. There was good linear relationship between the amount of cumulative infiltration and the wetting front distance. With increasing amendment amount of EN-1 stabilizer, cumulative infiltration and wetting front had trend of increase first and decrease then. Fitting the relationship between infiltration rate and time with Philip model, Kostiakov empirical formula and index formula, the results showed Kostiakov formula was more accurate than other models and fitted values of its had the best results at higher soil bulk density.

**Key words** EN-1 soil stabilizer, Infiltration rate, Cumulative infiltration, Mathematical models

收稿日期: 2012-01-27 修回日期: 2012-04-28

\* 国家重点基础研究发展计划(973计划)资助项目(2007CB106803)和中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX2-YW-441)

作者简介: 刘月梅, 博士生, 延安职业技术学院副教授, 主要从事生态环境工程研究, E-mail: yameilin@126.com

通讯作者: 张兴昌, 研究员, 博士生导师, 主要从事土壤侵蚀与水土保持研究, E-mail: zhangxc@ms.iswc.ac.cn

## 引言

土壤本身的渗透性、抗蚀性决定了边坡坡面抵抗冲刷的能力。黄土的母质较为松散,在一定的雨强条件下,黄土边坡土壤入渗量大,抗蚀性较低。土壤固化剂是一种性能优良的土工复合材料,由多种无机和有机材料配制而成,在常温下能与土壤发生一系列的物理化学反应,可胶结土粒,改善土壤的强度、耐久性等<sup>[1-2]</sup>。有研究表明<sup>[3-7]</sup>,EN-1 土壤固化剂可以显著增大黄土干密度,提高土壤抗剪强度、抗渗性、抗蚀性、水稳性团聚体含量及土壤结构体的稳定性。土壤中加入适量的固化剂,可以促进植物光合作用,提高根系的吸收功能,有利于植物生物量的积累<sup>[8]</sup>。

土壤水分是联系地表水和地下水的纽带,是大气降水、地表水、土壤水相互转化的一个重要环节,也是地表水转化为可被植物利用水分的唯一途径,且与土壤中营养物质的运移、土壤微生物的活动和植物的生长发育密切相关<sup>[9-11]</sup>。水分在土体的入渗过程决定着降雨进入土壤的速度和数量、地表径流的大小及土壤侵蚀的程度<sup>[12-13]</sup>,也影响植被的生

长发育和水资源的有效利用<sup>[14]</sup>。目前,国内外已有大量关于土壤初始含水率、容重、土壤质地、有机质含量、水头、温度等因素对土壤入渗特征影响的研究<sup>[15-20]</sup>。将土壤固化剂应用于黄土边坡生态防护,固化剂掺量及其与土壤容重的双重作用对黄土性土壤水分入渗及水分再分布过程影响的定量研究较少。本文模拟积水入渗过程,通过分析入渗率、累积入渗量和湿润锋移动距离等描述入渗过程的重要特征量,比较不同入渗模型对固化土入渗率的适用性,探讨固化剂掺量、土壤容重对黄土性固化土水分垂直入渗特征的影响,旨在为黄土性土壤改良和将 EN-1 固化剂应用于黄土边坡生态防护及边坡植被生长提供理论依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 试验材料

#### 1.1.1 供试土样

供试土样为陕西省安塞地区的黄绵土,为弃耕地耕层土壤。土壤的颗粒组成采用英国马尔文公司生产的 MS2000 型激光分析粒度仪测定,按国际标准划分土壤质地,供试土壤物理性质见表 1。

表 1 供试土壤基本理化性质  
Tab.1 Basic properties of soil samples

pH 值	风干含水率 /%	有机质质量比 /g·kg <sup>-1</sup>	总氮质量比 /g·kg <sup>-1</sup>	颗粒质量分数/%			土壤类型
				d≥0.02 mm	0.02 mm > d ≥ 0.002 mm	d < 0.002 mm	
8.58	0.045	3.08	0.370	67.93	18.61	13.46	砂壤土

#### 1.1.2 土壤固化剂

供试固化剂为美国 CSS 技术公司生产的路邦 EN-1 离子固化剂,是一种高浓缩的酸性酱棕黑色有机溶液,能将土壤中的矿物质和土壤分子分解,使其重新结晶形成金属盐,保持土壤持久稳定。它在浓缩状态下无挥发性、不燃烧,硫酸质量分数大于 1%,表面活性剂质量分数 6%,密度 1.709 g/cm<sup>3</sup>,沸点 282℃,25℃ 时相对密度 1.70, pH 值 1.05,稀释后无任何危害,对生态无破坏,对环保无影响<sup>[3]</sup>。

### 1.2 试验设计

试验采用完全随机区组设计,设 3 个土壤容重,分别为 1.2、1.3、1.4 g/cm<sup>3</sup><sup>[5,21]</sup>;7 个固化剂掺量(占干土质量百分比),即 0、0.01%、0.05%、0.10%、0.15%、0.20%、0.30% 的固化剂,分别记作 CK、G0.01、G0.05、G0.1、G0.15、G0.2、G0.3。

### 1.3 试验内容与方 法

室内土壤水分入渗试验在陕西杨凌中科院水土保持研究所黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室内进行,室内温度控制在 21℃ 左右。

土壤风干后过 2 mm 孔径土筛,试验时按 16% 含水率<sup>[6,22]</sup>(本文所指含水率均为质量含水率)量取一定体积的水,在水中加入一定比例的固化剂,搅拌均匀后用撒壶分层撒入土中拌匀,然后用塑料防水布盖好密闭 24 h 使土壤水分分布均匀。加入固化剂的土壤,按照设计容重分层装入桶内(下底宽×上底宽×高为 22 cm×29 cm×26 cm),再盖上塑料防水布室温下养护 10 d<sup>[3-6]</sup>后取出自然风干。

试验装置由试验土柱和供水系统两部分组成。试验土柱是选用厚 0.5 cm 的透明有机玻璃材料制作,内径 10 cm,高为 45 cm(其中土柱高为 40 cm),底部为厚 0.5 cm 的有机玻璃板,并均匀分布内径 0.3 cm 的细孔。土柱侧面 5 cm 以下,每隔 3 cm 开 3 个圆形取样口,3 个开口在垂直方向上呈 90° 错开,其直径为 1 cm,便于取土测定土壤含水率。供水系统是横截面积 28.3 cm<sup>2</sup>、高 60 cm 的马氏瓶装置,供水水头控制在 2 cm。

按预先设计的容重计算出每层装土的质量,并以每层装土高度 5 cm 均匀地装入有机玻璃柱内,有

机玻璃柱底填放滤纸,防止土样流失;土柱表面也填放滤纸,防止表层土壤受到强烈冲击,装土完后自然沉降 1 d。在试验过程中按照先密后疏的时间间隔通过马氏瓶读取水分入渗量,并观测湿润锋转移距离。当湿润锋前沿到达距土柱底部 1 cm 时,停止供水并迅速吸干土柱表层积水,从表层至湿润锋处每隔 3 cm 从取样口取出土样,用加热干燥法测定不同土层土壤含水率。

#### 1.4 数据处理

图中所有数据均为 3 次测定的算术平均值,试验数据处理用 SAS 9.0 软件进行方差分析,并在 0.05 显著水平上进行 Duncan 多重比较;用 Origin 8.0 软件进行绘图。

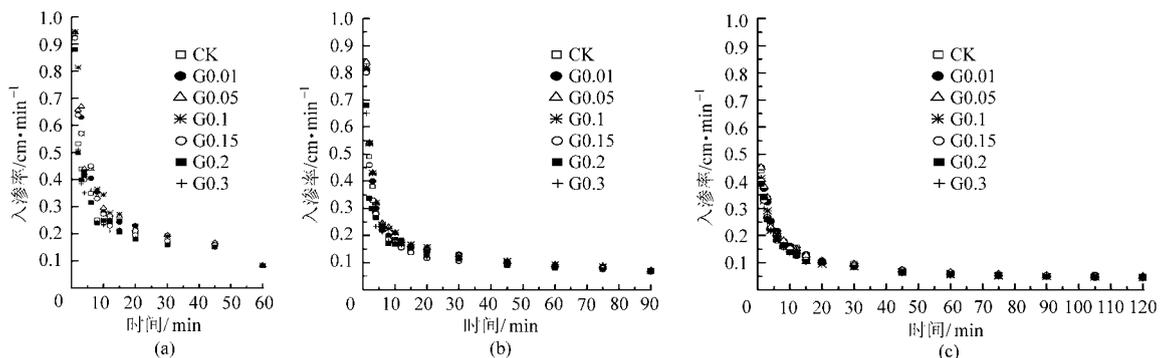


图 1 不同容重和固化剂掺量条件下入渗率的动态变化

Fig. 1 Dynamic changes of infiltration rate under different soil bulk densities and different stabilizer contents

(a) 1.2 g/cm<sup>3</sup> (b) 1.3 g/cm<sup>3</sup> (c) 1.4 g/cm<sup>3</sup>

在相同水头作用下,同一固化剂掺量固化土不同容重处理对表征土壤入渗能力的入渗率有显著影响。试验结果表明:不同土壤容重入渗率达到相对稳定时间有显著差异,容重分别为 1.2、1.3、1.4 g/cm<sup>3</sup>时,入渗速率达到相对稳定的时间分别为 60、90 和 120 min 左右,差异极显著( $p < 0.01$ ),说明不同容重土壤后期的入渗能力不相同<sup>[15]</sup>。当土壤容重从 1.2 g/cm<sup>3</sup>增加到 1.3 g/cm<sup>3</sup>和 1.4 g/cm<sup>3</sup>时,在入渗开始的 1 min 时段末,CK 入渗率从 0.88 cm/min 减小到 0.80 cm/min 和 0.44 cm/min, G0.1 从 0.95 cm/min 减小到 0.82 cm/min 和 0.41 cm/min;当入渗达到稳定时,CK 稳定入渗率分别从 0.082 6 cm/min 减小到 0.069 6 cm/min 和 0.047 2 cm/min, G0.1 从 0.084 2 cm/min 减小到 0.070 2 cm/min 和 0.044 5 cm/min,差异极显著,这与潘云、张振华等的研究相一致<sup>[18,23]</sup>,即在入渗过程中土壤容重对入渗率的影响具有稳定性和一致性,表现为对应于同一时刻容重越大入渗率越低。

3 种不同土壤容重,固化剂掺量从 0.01% 增加到 0.3% 处理的固化土,入渗率变化趋势相同,即均先增大后减小,说明不同固化剂掺量对入渗率影响

## 2 结果与分析

### 2.1 不同处理对土壤水分入渗特征的影响

#### 2.1.1 入渗率

入渗率是单位时间内通过地表单位面积渗入到土壤中的水量,反映了土壤的入渗性能,受土壤质地、孔隙状况、供水强度等因素的影响<sup>[23]</sup>。从图 1 可以看出,在整个入渗过程中,无论土壤中是否添加固化剂,各处理入渗率随入渗时间的变化趋势相同。开始入渗时,水分进入土壤的速度很快,土壤具有很高的初始入渗性能,但随着入渗时间的延长,土壤的入渗性能逐渐降低,入渗率急剧减小并最终趋于恒定。

不相同。3 种不同土壤容重,不同固化剂掺量处理的固化土入渗率出现的最大值不相同,容重 1.2、1.3、1.4 g/cm<sup>3</sup>时,对应时刻入渗率最大值分别出现在固化剂掺量 0.10%、0.05% 和 0.05%。说明在一定土壤容重下,适当的固化剂掺量会加快土壤水分入渗,但是当固化剂掺量增加到一定程度时,则会减缓土壤水分入渗,入渗率与固化剂掺量之间没有明显规律。

由图 1 还可以看出,当土壤容重从 1.2 g/cm<sup>3</sup>增加到 1.3 g/cm<sup>3</sup>和 1.4 g/cm<sup>3</sup>时,入渗 1 min 时段末,CK 入渗率分别减小了 9.1% 和 50%, G0.1 分别减小了 13.7% 和 56.8%。同一土壤容重下,不同固化剂掺量处理入渗率与 CK 相比,变化幅度均未超过 9%。当入渗达到稳定时,不同固化剂掺量处理稳定入渗率与容重 1.2 g/cm<sup>3</sup>下 CK 比较,变化幅度见表 2。由表 2 可见,不同处理稳定入渗率变化规律与 1 min 时段末入渗率相同。由此可见,容重对入渗率的影响远大于固化剂对入渗率的影响。

#### 2.1.2 累积入渗量

累积入渗量是入渗开始后一定时间内,通过地

表2 不同处理稳定入渗率比较

固化剂 掺量/%	容重/ $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$		
	1.2	1.3	1.4
0	0	-15.74	-42.86
0.01	1.33	-15.01	-41.16
0.05	1.45	-14.29	-41.04
0.10	1.94	-15.05	-46.13
0.15	0.36	-16.10	-47.34
0.20	-0.48	-20.34	-47.58
0.30	-1.21	-20.94	-48.06

表单位面积入渗到土壤中的总水量,对于分析降雨和灌溉入渗等问题十分重要<sup>[13]</sup>。水分在入渗过程中,如果入渗过深可能会导致深层渗漏发生,而入渗过浅则不能满足植物吸水的需求,而且会加剧土壤侵蚀<sup>[23]</sup>。容重影响入渗率,也必然影响累积入渗量。累积入渗量随入渗时间的延长而缓慢增加,对应于同一入渗时间,随着土壤容重增大,累积入渗量减小。当入渗率达到稳定时(图2),CK和G0.1累积入渗量在容重1.2、1.3、1.4  $\text{g}/\text{cm}^3$ 时分别为11.49、10.72、9.57 cm和13.20、11.64、8.92 cm。

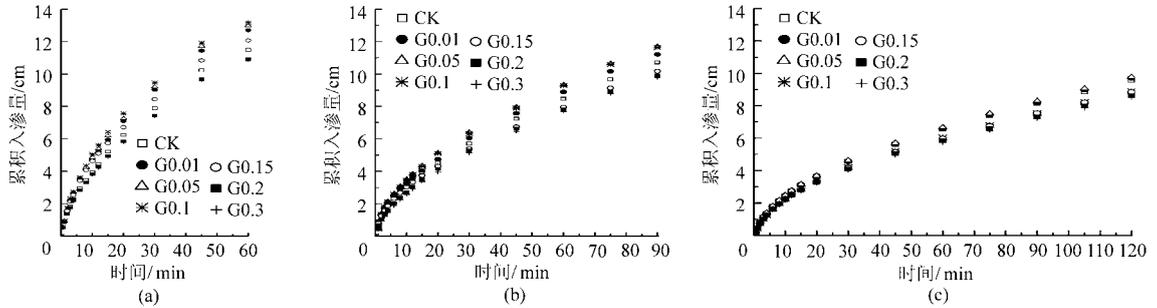


图2 不同容重和固化剂掺量条件下累积入渗量的变化规律

Fig.2 Regularity pattern for cumulative infiltration under different treatments

(a) 1.2  $\text{g}/\text{cm}^3$  (b) 1.3  $\text{g}/\text{cm}^3$  (c) 1.4  $\text{g}/\text{cm}^3$ 

当入渗率达到稳定时,不同处理对累积入渗量影响的显著性分析见表3。由表3可以看出,固化剂掺量在试验范围内对累积入渗量影响较大,但较低的固化剂掺量对累积入渗量影响差异不显著,较高的固化剂掺量对累积入渗量影响差异也不显著,说明不同容重分别具有不同的最佳固化剂掺量。3种土壤容重下固化剂掺量从0.01%增加到0.3%时,同时刻累积入渗量随固化剂掺量增加均呈先增大后减小的趋势。当固化剂掺量增加到一定程度时,高固化剂掺量反而会抑制土壤水分入渗,且随着土壤容重增加,要想获得较高的累积入渗量,固化剂掺量有减小的趋势。中、高容重(1.3  $\text{g}/\text{cm}^3$ 和1.4  $\text{g}/\text{cm}^3$ )下G0.05累积入渗量较大,低容重(1.2  $\text{g}/\text{cm}^3$ )下,G0.1累积入渗量较大,即适当的固化剂掺量能加速土壤水分入渗。

### 2.1.3 湿润锋

通常湿润锋表征水分在土壤基质吸力和重力作用下的运动特征<sup>[17]</sup>,从图3可以看出,土体湿润深度的变化趋势与累积入渗量一致,随着入渗时间的延长,湿润锋逐渐下移,且随着容重的增大,同一固化剂掺量处理的固化土湿润锋推进距离变短,差异极显著( $p < 0.01$ ),与其他研究结果具有一致性<sup>[15]</sup>。

容重为1.2  $\text{g}/\text{cm}^3$ 时,不同固化剂掺量处理固化土对湿润锋运移距离的影响差异显著( $p < 0.05$ );容重为1.3  $\text{g}/\text{cm}^3$ 时,G0.05和G0.1对湿润锋运移距离影响不显著,但与其他处理相比差异显著;容重为1.4  $\text{g}/\text{cm}^3$ 时,G0.01、G0.05和G0.1对湿润锋运移距离影响不显著,但与其他处理相比差异显著。

根据3种土壤容重的实测湿润锋运移距离,利用SAS统计分析软件进行回归分析,结果表明:

表3 不同处理入渗率达到稳定时累积入渗量

Tab.3 Cumulative infiltration under different treatments

土壤容重 $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	固化剂掺量/%						
	0	0.01	0.05	0.10	0.15	0.20	0.30
1.2	11.49 ± 0.24 <sup>Ad</sup>	12.71 ± 0.10 <sup>Ab</sup>	12.99 ± 0.08 <sup>Ab</sup>	13.20 ± 0.08 <sup>Aa</sup>	12.08 ± 0.10 <sup>Ac</sup>	10.92 ± 0.06 <sup>Ae</sup>	10.84 ± 0.03 <sup>Ae</sup>
1.3	10.72 ± 0.17 <sup>Bc</sup>	11.22 ± 0.19 <sup>Bb</sup>	11.70 ± 0.15 <sup>Ba</sup>	11.64 ± 0.03 <sup>Ba</sup>	10.18 ± 0.12 <sup>Bd</sup>	9.90 ± 0.04 <sup>Be</sup>	9.76 ± 0.04 <sup>Be</sup>
1.4	9.57 ± 0.05 <sup>Cb</sup>	9.71 ± 0.19 <sup>Cab</sup>	9.78 ± 0.12 <sup>Ca</sup>	8.92 ± 0.06 <sup>Cc</sup>	8.86 ± 0.16 <sup>Cc</sup>	8.62 ± 0.09 <sup>Cd</sup>	8.50 ± 0.09 <sup>Cd</sup>

注:同列不同大写字母表示相同固化剂掺量下不同土壤容重处理间差异显著( $P < 0.05$ );同行不同小写字母表示相同土壤容重下不同固化剂掺量处理间差异显著( $P < 0.05$ )。

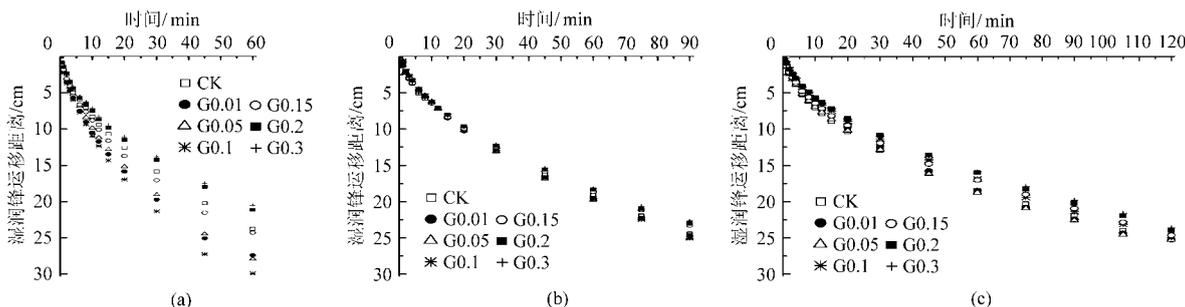


图 3 不同容重和固化剂掺量条件下湿润锋变化规律

Fig. 3 Regularity pattern for wetting front under different treatments

(a) 1.2 g/cm<sup>3</sup> (b) 1.3 g/cm<sup>3</sup> (c) 1.4 g/cm<sup>3</sup>

同一时刻湿润锋运移距离与累积入渗量呈良好的线性关系<sup>[24]</sup>,相关系数在 0.99 以上,故认为精确度较高,这里不再列出。

### 2.1.4 土壤剖面含水率

图 4 显示了入渗结束时不同处理对土壤含水率垂直分布的影响。可以看出,在本试验条件下,积水入渗导致上层土壤(土柱表层 5 cm 以下)具有较高的含水率,容重 1.2 g/cm<sup>3</sup>时,CK 上层土壤含水率分别比容重 1.3 g/cm<sup>3</sup>和 1.4 g/cm<sup>3</sup>高 10.17% 和 21.08%;G0.1 上层土壤含水率则分别比容重 1.3 g/cm<sup>3</sup>和 1.4 g/cm<sup>3</sup>高 9.89% 和 23.77%,与他人对土壤含水率研究结果一致<sup>[9]</sup>。随着入渗进程,土柱表层形成不断向下扩散的饱和区,土壤含水率随土层深度的增加而显著降低,在湿润锋附近处的含水率梯度最大,这一点在高

容重条件下表现最为明显。同一固化剂掺量处理,不同容重下的同一土层土壤含水率差异极显著( $p < 0.01$ ),但随着土层深度增加,土壤含水率降低幅度不相同。容重 1.2 g/cm<sup>3</sup>下,CK、G0.01、G0.05、G0.1、G0.15、G0.2、G0.3 土柱底部土壤含水率分别比上层降低了 32%、32%、29%、27%、29%、32%、32%,在中、高容重条件下,各固化剂掺量固化土随土层深度的增加,土壤含水率降低幅度差异不显著。3 种不同土壤容重下,随着固化剂掺量的增加,土柱上层和底部土壤含水率均呈先增大后减小的趋势。由此可见,随着容重加大,固化剂对土壤含水率的影响逐渐降低,中、低容重条件下合适的固化剂掺量可以增加土壤含水率,有利于植被生长;高容重条件下,固化土相对于 CK,土壤含水率差异不显著。

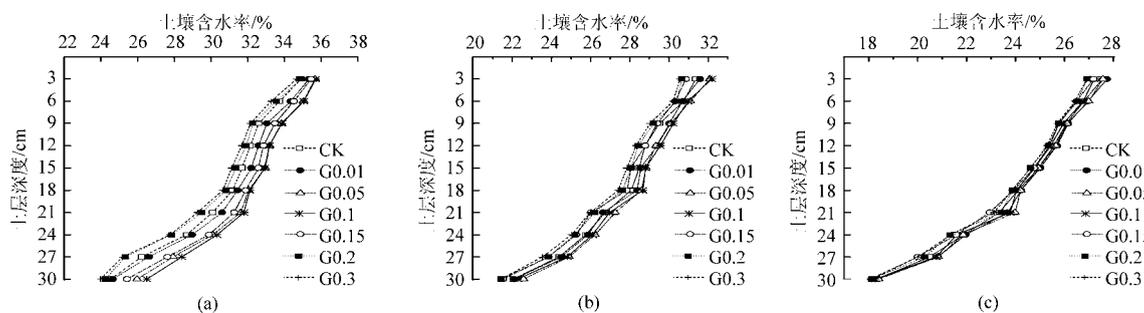


图 4 不同容重和固化剂掺量对土壤含水率的影响

Fig. 4 Effects of different soil bulk density and different stabilizer content on the distribution of soil water content

(a) 1.2 g/cm<sup>3</sup> (b) 1.3 g/cm<sup>3</sup> (c) 1.4 g/cm<sup>3</sup>

## 2.2 不同入渗模型对固化土入渗率的适用性

### 2.2.1 基本理论

国内外学者已对土壤水分入渗进行了大量研究,提出了具有不同特点和用途的入渗模型,并在农田灌溉、水文产流计算、农田排水、地下水补给等问题的研究中广泛应用<sup>[11,25]</sup>。随着土壤水分运动理论的发展,人们试图通过对土壤入渗模型中特征参数的对比分析,建立更适用于不同条件下的土壤水分入渗模型,以便于模型的实际应用。

估算土壤水分入渗率的模型大体可分为理论型

和经验型两种,其中 Philip 入渗模型属于理论模型,有一定的物理基础;Kostiakov 公式和指数模型属于经验公式,没有明确的物理基础。总的来说,土壤水分入渗参数由土壤质地、结构、孔隙率及其大小分布、有机质含量等因素决定<sup>[11]</sup>。

Philip 入渗模型主要解决初始含水率均匀分布的均质土壤一维入渗问题<sup>[11]</sup>,Philip 认为在入渗过程中任意时刻的入渗率与时间呈幂级数关系,具体入渗模型为

$$i(t) = 0.5St^{-1/2} + A$$

式中  $i(t)$ ——入渗率,  $\text{cm}/\text{min}$   
 $t$ ——入渗历时,  $\text{min}$   
 $A$ ——常数,  $\text{cm}/\text{min}$   
 $S$ ——土壤吸渗率,  $\text{cm}/\text{min}^{1/2}$

对于短历时入渗,且土壤基质势占优势的情况下,Philip入渗模型可以简化为<sup>[25]</sup>

$$i(t) = 0.5St^{-1/2} \quad (1)$$

农田水利工作及水土保持实践中则常用Kostiakov经验模型进行验证<sup>[15-16]</sup>。Kostiakov经验公式为

$$i(t) = Bt^{-c} \quad (2)$$

式中  $B, c$ ——入渗参数

指数模型源于Horton模型<sup>[26]</sup>,可简记为

$$i(t) = Ne^{-wt} \quad (3)$$

式中  $N, w$ ——入渗参数

## 2.2.2 对比分析

为了比较分析Philip模型、Kostiakov经验公式

和指数公式对固化土入渗率拟合精度的影响,对不同处理的固化土水分入渗率进行拟合,并与实测入渗率进行比较,图5显示了3种土壤容重条件下,G0.1处理的3个入渗模型拟合值与实测值的比较。

由图5可以看出,对于不同容重固化剂掺量0.1%的固化土而言,入渗率用指数公式拟合相关系数为0.73~0.83,拟合效果较差;Kostiakov经验公式的拟合值和实测值较为接近,相关系数均在0.95以上;Philip模型拟合相关系数也在0.95以上,但拟合值普遍高于实测值,且在入渗初期拟合效果低于Kostiakov经验公式,故认为Kostiakov经验公式拟合精度最高。不同容重条件下其他固化剂掺量处理固化土3种模型拟合结果与图5类似,这里不再列出。为了进一步探索Kostiakov经验公式在固化土水分入渗中的应用价值,将不同容重、不同固化剂掺量处理固化土水分入渗率用Kostiakov经验公式进行拟合,参数见表4。

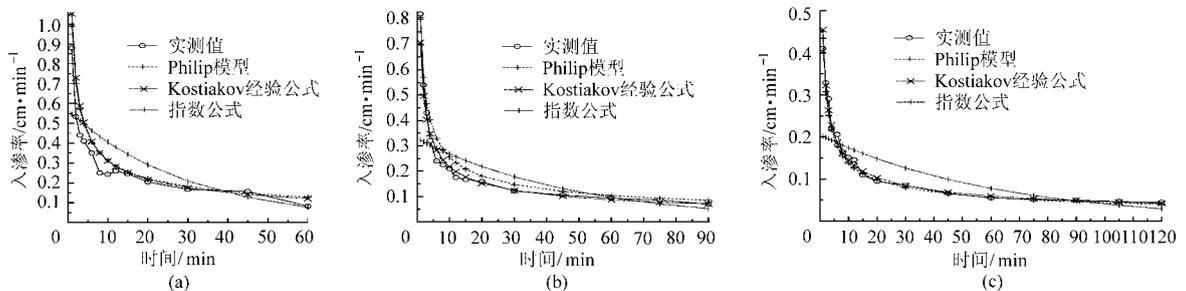


图5 不同容重时各入渗模型入渗率计算结果与实测结果对比

Fig.5 Variations of infiltration rate vs time

(a)  $1.2 \text{ g}/\text{cm}^3$  (b)  $1.3 \text{ g}/\text{cm}^3$  (c)  $1.4 \text{ g}/\text{cm}^3$

表4 Kostiakov经验公式拟合参数

Tab.4 Fitting parameters of Kostiakov empirical formula

固化剂掺量 /%	容重为 $1.2 \text{ g}/\text{cm}^3$			容重为 $1.3 \text{ g}/\text{cm}^3$			容重为 $1.4 \text{ g}/\text{cm}^3$		
	$B$	$c$	$R^2$	$B$	$c$	$R^2$	$B$	$c$	$R^2$
0	0.803 3	0.483 5	0.950 5	0.631 0	0.506 5	0.971 5	0.490 9	0.499 3	0.991 0
0.01	0.977 1	0.518 5	0.954 4	0.662 6	0.507 8	0.970 7	0.492 4	0.495 9	0.992 0
0.05	1.015 5	0.523 9	0.952 3	0.714 2	0.513 9	0.984 4	0.499 2	0.498 2	0.992 7
0.10	1.052 2	0.528 7	0.950 1	0.707 5	0.512 4	0.983 8	0.455 2	0.496 9	0.991 7
0.15	0.952 7	0.531 0	0.958 1	0.602 4	0.507 4	0.970 1	0.443 3	0.491 5	0.993 5
0.20	0.772 9	0.489 6	0.956 6	0.526 6	0.466 6	0.977 3	0.442 2	0.498 9	0.992 4
0.30	0.751 8	0.485 2	0.950 4	0.489 9	0.447 6	0.971 5	0.433 5	0.496 4	0.991 6

从表4可以看出,在中容重( $1.3 \text{ g}/\text{cm}^3$ )和高容重( $1.4 \text{ g}/\text{cm}^3$ )条件下,相关系数达到0.97以上。低容重( $1.2 \text{ g}/\text{cm}^3$ )的土壤由于受土壤和水自身重力的影响在入渗过程中表层土壤会下陷,从而导致表层土壤容重加大影响水分入渗,因而拟合效果较中、高容重固化土稍差。Kostiakov经

验公式特征参数 $B, c$ 能较好地反映容重和固化剂对固化土水分入渗的影响。Kostiakov经验公式也表明:无论土壤中是否加有固化剂,各处理起始入渗时入渗率均较大,在较短或中等长度时间范围内,随着入渗时间延长入渗率呈幂函数递减。

### 3 讨论

土壤水分入渗能力除受水头、温度等外在因素影响外,也受土壤自身特性的影响,如土壤容重、土壤质地、土壤前期含水率、土壤结构等<sup>[11]</sup>。土壤内部是由大小、形状不同的固体颗粒物质和孔隙以一定形式连接所形成,土壤颗粒的大小、数量及结合方式决定着土壤的结构特性,进而影响土壤水分的入渗性能。因此,作为表征土壤特性的基本参数,土壤颗粒、团聚体的分布及孔隙的大小和连通性对土壤水分入渗性能均有着重要影响。

EN-1 离子固化剂是一种高浓缩的酸性有机溶液,由多种无机和有机材料配制而成,在常温下能将土壤中的矿物质和土壤分子分解,使其重新结晶形成金属盐,同时可以胶结土粒、填充土壤空隙,使土壤颗粒之间的连接力增强,提高了土壤的紧密程度,从而保持土壤持久稳定。影响固化剂对土壤加固效果的因素有土壤类型、性质、固化剂掺量、养护时间、压实度及含水率等<sup>[3-7]</sup>。通常固化土养护时间越长,胶结作用发挥越充分,土壤强度越大;固化剂掺量越大,固化土壤所需的最优含水率越小,最大干密度越大。如果固化剂掺量适宜,并采用最优含水率和较大的压实度(土壤容重)处理土壤,固化土的抗渗性能得到改善,土壤透水性一般从固化前中等透水性变成固化后的弱透水性<sup>[4]</sup>。在兼顾黄土边坡生态防护的基础上,本试验固化土的处理并未采用最优含水率和较大的压实度。另外,经固化剂处理的扰动固化土与原状固化土的土壤水分入渗性能有较大差异,固化剂的胶结作用并未体现出来,固化剂对土壤颗粒的胶结作用之外的其他作用均可改变土壤水分入渗性能,且这种影响是多种因素综合作用的结果。

土壤水分入渗性能与土壤中有效孔隙的数量有关,而影响土壤孔隙的因素有土壤容重、土壤机械组成、土壤微团聚体含量等,有机质和粘粒的胶结在团聚体内部也会形成大量的毛管孔隙,土壤中的各种离子及胶体颗粒与溶解在入渗水中的固化剂离子与胶体发生作用也会改变土壤孔隙组成<sup>[11]</sup>。从试验结果可知,无论土壤是否经固化剂处理,土壤容重对水分入渗影响极显著,并且与他人研究结果相类似,说明土壤中加入固化剂并没有改变土壤容重增加入渗率逐渐降低这一规律。

不同质地的土壤,土壤孔隙的大小、存在的数量和比例有很大的差别。有研究表明<sup>[4,6]</sup>,EN-1 固化剂除了胶结土粒、填充土壤空隙之外,对土壤颗粒组成、团聚体含量、有机质含量、pH 值均有显著影

响;通常固化剂掺量越大,有机质含量越高,pH 值越低。固化剂能改变土壤颗粒组成、增加团聚体含量,影响大小由固化剂掺量、土质、土壤压实度、土壤含水率等多种因素决定,其作用机理有待于进一步研究。压实度越大,固化剂与土壤作用所需要的土壤最优含水率越低,固化剂与土壤作用效果越显著<sup>[4]</sup>。在本试验条件下,从理论上分析,3 种土壤容重处理条件下,容重越大,固化剂与土壤的作用效果越显著,对土壤颗粒组成的影响越大。试验结果所示,随着土壤容重加大,最大累积入渗量出现时固化剂掺量有减小的趋势可以说明此问题。由于固化剂中所含离子成分及其他化学成分与土壤胶体及土壤中化学成分发生物理化学作用而改变土壤孔隙特征,不同固化剂掺量能影响土壤溶液和胶体上吸附离子数量,也能对土壤水分入渗产生影响。固化剂改变了土壤土体结构,进而影响土壤水分入渗<sup>[27]</sup>。从试验结果可知,固化剂掺量过大时,出现了减渗效应,可能会使土壤水分浅层化,造成土壤物理干旱,进而影响植物生长。黄土地区主要靠降雨补给水分,如何在利用固化剂增加土壤的抗蚀性与保证土壤水分的有效供给之间寻求平衡,是值得深入研究的课题。

从对容重和固化剂两因素对入渗影响的显著性上分析可知,容重对水分入渗的影响大于固化剂的影响,由此可见大孔隙的存在对于土壤水分入渗的影响远大于土壤颗粒组成、团聚体、有机质含量及 pH 值等因素的影响。将固化剂应用于黄土边坡生态防护时,在兼顾土体稳定和植被生长时,应首先考虑土壤容重对边坡防护的影响,即在保证植被正常生长的条件下尽可能选择有利于边坡稳定的较大容重,固化剂最佳掺量的选择应根据土壤容重确定。

### 4 结束语

无论土壤中是否加入固化剂,土壤容重对黄绵土的入渗能力均有较大影响,在整个入渗过程中,入渗率、累积入渗量和土体湿润深度随入渗时间变化趋势相同,入渗率与时间关系采用 Kostiakov 经验公式拟合更接近于实测值,累积入渗量与湿润锋运移距离呈显著的线性函数关系。3 种土壤容重条件下,随着固化剂掺量增大,稳定入渗率、累积入渗量和湿润锋运移距离均有先增大后减少的变化趋势,但与固化剂掺量不成正比。适量的固化剂能增加水分入渗能力,高固化剂掺量反而会阻碍水分入渗,这种现象在中、高容重土壤中表现更为明显。固化剂掺量对累积入渗量和湿润锋运移距离的影响均达到显著,容重对土壤水分入渗的影响大于固化剂掺量。

低容重条件下,固化剂对土壤含水率的影响高于中、高容重土壤。从试验结果可知,恰当的固化剂处理有利于保持土壤水分,且在提高黄土边坡稳定性的同时对植物生长也有利,有利于黄土边坡生态防护。

### 参 考 文 献

- 杜应吉,朱建宏. 土壤固化剂对不同土质固化性能影响的试验研究[J]. 干旱地区农业研究,2004,22(4):229~231.  
Du Yingji, Zhu Jianhong. Impact on soil solidifying agent to different soil characteristics[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2004,22(4):229~231. (in Chinese)
- 童彬,李真. 土壤固化剂研究进展[J]. 合肥师范学院学报,2009,27(3):91~93.  
Tong Bin, Li Zhen. Research progress in soil consolidator[J]. Journal of Hefei Teachers College, 2009,27(3):91~93. (in Chinese)
- 张丽萍,张兴昌,孙强. EN-1 固化剂加固黄土的工程特性及其影响因素[J]. 中国水土保持科学,2009,7(4):60~65.  
Zhang Liping, Zhang Xingchang, Sun Qiang. Engineering properties and influencing factors of solidified loess by EN-1 solidifying agent[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2009,7(4):60~65. (in Chinese)
- 张丽萍. 黄土边坡坡面稳定及防治技术研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2009.  
Zhang Liping. Researches on loess slope stability and prevention strategies[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2009. (in Chinese)
- 单志杰,张兴昌,赵伟霞,等. EN-1 固化剂对土壤抗蚀性的影响[J]. 水土保持学报,2010,24(5):6~9.  
Shan Zhijie, Zhang Xingchang, Zhao Weixia, et al. Effects of EN-1 soil stabilizer on soil anti-erodibility[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2010,24(5):6~9. (in Chinese)
- 单志杰. EN-1 离子固化剂加固黄土边坡机理研究[D]. 杨凌:中国科学院教育部水土保持与生态环境研究中心,2010.  
Shan Zhijie. Mechanism study on the reinforcement of EN-1 ionic soil stabilizer to the loess slope[D]. Yangling: Institute of Soil and Water Conservation, 2010. (in Chinese)
- 苏涛,张兴昌. EN-1 对砒砂岩固化土坡面径流动力学特征的影响[J]. 农业机械学报,2011,42(11):68~75.  
Su Tao, Zhang Xingchang. Effects of EN-1 soil stabilizer on slope runoff hydraulic characteristics of pisha sandstone stabilized soil[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011,42(11):68~75. (in Chinese)
- 刘月梅,张兴昌,王丹丹. 黄土性土壤固化对黑麦草生长和根系活力的影响[J]. 应用生态学报,2011,22(10):2604~2608.  
Liu Yuemei, Zhang Xingchang, Wang Dandan. Effects of loess soil stabilization on *Lolium perenne* L. growth and root activity[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2011,22(10):2604~2608. (in Chinese)
- 吴忠东,王全九. 不同初始含水率条件下的微咸水入渗实验[J]. 农业机械学报,2010,41(9):53~58.  
Wu Zhongdong, Wang Quanjiu. Saline water infiltration with different initial moisture contents[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010,41(9):53~58. (in Chinese)
- 李雪转,樊贵盛. 土壤有机质含量对土壤入渗能力及参数影响的试验研究[J]. 农业工程学报,2006,22(3):188~190.  
Li Xuezhuang, Fan Guisheng. Influence of organic matter content on infiltration capacity and parameter in field soils[J]. Transactions of the CSAE, 2006,22(3):188~190. (in Chinese)
- 邵明安,王全九,黄明斌. 土壤物理学[M]. 北京:高等教育出版社,2006:126~133.
- 王全九,邵明安. 土壤中水分运动与溶质迁移[M]. 北京:中国水利出版社,2007:13~15.
- 白文波,宋吉青,李茂松,等. 保水剂对土壤水分垂直入渗特征的影响[J]. 农业工程学报,2009,25(2):18~23.  
Bai Wenbo, Song Jiqing, Li Maosong, et al. Effect of super absorbent polymer on vertical infiltration characteristics of soil water[J]. Transactions of the CSAE, 2009,25(2):18~23. (in Chinese)
- 范军亮,张富仓. 负水头条件下的土壤水分垂直一维入渗特征研究[J]. 土壤学报,2010,147(3):415~421.  
Fan Junliang, Zhang Fucang. Characteristics of vertical one-dimensional infiltration of soil water under negative hydraulic head[J]. Acta Pedologica Sinica, 2010,147(3):415~421. (in Chinese)
- 李援农,林性粹. 均质土壤积水入渗的气阻变化规律及其影响[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报,1997,3(3):88~93.  
Li Yuannong, Lin Xingcui. Regularity of the soil air-resistance change and its influences under water-accumulated infiltration in the homogenous soil[J]. Journal of Soil Erosion and Soil and Water Conservation, 1997,3(3):88~93. (in Chinese)
- 李卓,吴普特,冯浩,等. 容重对土壤水分入渗能力影响模拟试验[J]. 农业工程学报,2009,25(6):40~45.  
Li Zhuo, Wu Pute, Feng Hao, et al. Simulated experiment on effect of soil bulk density on soil infiltration capacity[J]. Transactions of the CSAE, 2009,25(6):40~45. (in Chinese)
- 宋日权,褚贵新,冶军,等. 掺砂对土壤水分入渗和蒸发影响的室内试验[J]. 农业工程学报,2010,26(增刊1):109~114.  
Song Riquan, Chu Guixin, Ye Jun, et al. Effects of surface soil mixed with sand on water infiltration and evaporation in

- laboratory[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(Supp. 1): 109 ~ 114. (in Chinese)
- 18 潘云, 吕殿青. 土壤容重对土壤水分入渗特性影响研究[J]. 灌溉排水学报, 2009, 28(2): 59 ~ 61, 77.  
Pan Yun, Lü Dianqing. Effects of soil bulk density on characteristics of soil infiltration[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2009, 28(2): 59 ~ 61, 77. (in Chinese)
- 19 王锐, 孙西欢, 郭向红, 等. 不同入渗水头条件下土壤水分运动数值模拟[J]. 农业机械学报, 2011, 42(9): 45 ~ 48.  
Wang Rui, Sun Xihuan, Guo Xianghong, et al. Numerical simulation for soil water movement at different infiltration heads[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(9): 45 ~ 48. (in Chinese)
- 20 李淑芹, 王全九. 垂直线源入渗土壤水分分布特性模拟[J]. 农业机械学报, 2011, 42(3): 51 ~ 57.  
Li Shuqin, Wang Quanjiu. Simulation of soil water distribution under vertical line source infiltration[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(3): 51 ~ 57. (in Chinese)
- 21 肖蓉, 高照良, 张兴昌, 等. 陕北黄土丘陵沟壑区高速公路边坡不同生物防护模式的土壤特性—以铜(川)—黄(陵)—延(安)高速公路为例[J]. 中国水土保持科学, 2009, 7(3): 79 ~ 85.  
Xiao Rong, Gao Zhaoliang, Zhang Xingchang, et al. Soil features on slopes of expressway under different biological protection models in the Hilly-gully Region of Loess Plateau: Taking Tongchuan-Huangling-Yan' an expressway as an example[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2009, 7(3): 79 ~ 85. (in Chinese)
- 22 韩信来, 高建恩, 樊恒辉, 等. 黄土高原不同地区固化土强度变化规律研究[J]. 人民长江, 2009, 40(22): 76 ~ 78.  
Han Xinlai, Gao Jianen, Fan Henghui, et al. Study on the change rules of stabilized soil intensity in different regions of Loess Plateau[J]. Yangtze River, 2009, 40(22): 76 ~ 78. (in Chinese)
- 23 张振华, 谢恒星, 刘继龙, 等. PAM 对一维垂直入渗特征量影响的试验研究[J]. 中国农村水利水电, 2006(3): 75 ~ 77.  
Zhang Zhenhua, Xie Hengxing, Liu Jilong, et al. The experimental study on the influences of PAM on one-dimensional vertical infiltration[J]. China Rural Water and Hydropower, 2006(3): 75 ~ 77. (in Chinese)
- 24 王全九, 王文焰, 吕殿青, 等. 水平一维土壤水分入渗特性分析[J]. 水利学报, 2000(6): 34 ~ 38.  
Wang Quanjiu, Wang Wenyan, Lu Dianqing, et al. Theoretical analysis of horizontal one dimensional unsteady soil water transfer[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2000(6): 34 ~ 38. (in Chinese)
- 25 王全九, 来剑斌, 李毅. Green-Ampt 模型与 Philip 入渗模型的对比分析[J]. 农业工程学报, 2002, 18(2): 13 ~ 16.  
Wang Quanjiu, Lai Jianbin, Li Yi. Comparison of Green-Ampt model with Philip infiltration model[J]. Transactions of the CSAE, 2002, 18(2): 13 ~ 16. (in Chinese)
- 26 刘春成, 李毅, 任鑫, 等. 四种入渗模型对斥水土壤入渗规律的适用性[J]. 农业工程学报, 2011, 27(5): 62 ~ 67.  
Liu Chuncheng, Li Yi, Ren Xin, et al. Applicability of four infiltration models to infiltration characteristic of water repellent soils[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(5): 62 ~ 67. (in Chinese)
- 27 梁爱民, 邵龙潭. 土壤中空气对土结构和入渗过程的影响[J]. 水科学进展, 2009, 20(4): 502 ~ 506.  
Liang Aimin, Shao Longtan. Experimental study of the air entrapment effects on soil structure and infiltration[J]. Advances in Water Science, 2009, 20(4): 502 ~ 506. (in Chinese)

(上接第 225 页)

- 8 李先锋, 朱伟兴, 孔令东, 等. 基于 SVM 和 D-S 证据理论的多特征融合杂草识别方法[J]. 农业机械学报, 2011, 42(11): 164 ~ 168, 163.  
Li Xianfeng, Zhu Weixing, Kong Lingdong, et al. Method of multi-feature fusion based on SVM and D-S evidence theory in weed recognition[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(11): 164 ~ 168, 163. (in Chinese)
- 9 吴兰兰, 刘剑英, 文友先, 等. 基于支持向量机的玉米田间杂草识别方法[J]. 农业机械学报, 2009, 40(1): 162 ~ 166.  
Wu Lanlan, Liu Jianying, Wen Youxian, et al. Weed identification method based on SVM in the corn field[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(1): 162 ~ 166. (in Chinese)
- 10 刘洪臣, 陈忠建, 冯勇. 结合颜色和形态特征的杂草识别方法[J]. 光电工程, 2006, 33(7): 90 ~ 93.  
Liu Hongchen, Chen Zhongjian, Feng Yong. Real-time weed recognition method based on color and morphological features[J]. Opto-electronic Engineering, 2006, 33(7): 90 ~ 93. (in Chinese)
- 11 刘波, 方俊永, 刘学, 等. 基于成像光谱技术的作物杂草识别研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2010, 30(7): 1 830 ~ 1 833.  
Liu Bo, Fang Junyong, Liu Xue, et al. Research on crop-weed discrimination using a field imaging spectrometer[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2010, 30(7): 1 830 ~ 1 833. (in Chinese)