

积水和降雨下非饱和重塑黄土水分入渗模拟

胡海军¹, 李博鹏¹, 田堪良², 巴亚东¹, 崔玉军³

(1. 西北农林科技大学 水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100; 2. 中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100;
3. 法国国立路桥大学 纳维尔研究所岩土力学实验室, 巴黎 77455)

摘要: 为合理预测积水和降雨情况下非饱和重塑黄土水分迁移过程, 在已有模型基础上, 提出了能合理考虑浸润锋处吸力作用和水剖面形状的改进模型, 并给出了该模型计算方法以及求解 Richard 方程数值方法所需渗透参数的可靠确定方法. 研究表明: 与已有模型相比, 改进模型能更准确地预测室内一维非饱和重塑黄土土柱积水入渗试验中浸润锋迁移过程和各测点水分变化过程; 采用改进浸润锋前法获得的非饱和和渗透系数函数, 比采用根据室内饱和和渗透试验和持水曲线间接获得的参数所得预测结果更为准确; 降雨分析中, 改进模型得到径流发生后的水剖面基本接近于数值方法分析结果, 特别是在试样干密度比较大的情况.

关键词: 非饱和黄土; 降雨; 入渗; Green-Ampt 修正模型; 浸润锋前法

中图分类号: TU444

文献标志码: A

Simulation of Water Movement in Unsaturated Remolded Loess Under Ponding Infiltration and Rainfall Infiltration

HU Haijun¹, LI Bopeng¹, TIAN Kanliang², BA Yadong¹, CUI Yujun³

(1. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling 712100, China; 2. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling 712100, China; 3. Ecole des Ponts Paris Tech, Laboratoire Navier/CERMES, Paris 77455, France)

Abstract: In order to simulate the water movement in the unsaturated remolded loess under ponding and rainfall conditions, an improved infiltration model based on the modified Green-Ampt model and the model proposed by Wang Wenyan et al., which can reasonably consider the effect of suction at wetting front and the water content profile, was proposed. The reliable method for determining the parameters needed in the model based on the modified Green-Ampt model and the numerical method for solving Richard's equations was

also recommended. The research results show that the improved model can more accurately predict the movement of wetting front and the water content change at measured points in the one-dimensional ponding infiltration test, compared with the modified Green-Ampt model and the model proposed by Wang Wenyan et al. When the unsaturated hydraulic conductivity function was determined directly by the improved wetting front advancing method in the ponding infiltration test, the results are closer to the measured values compared with those parameters indirectly determined by the saturated permeability test and water retention curve. For rainfall infiltration, the water profile after runoff obtained by the improved model is similar to that obtained by the numerical method, especially for the soil with a higher dry density.

Key words: unsaturated loess; rainfall; infiltration; modified Green-Ampt model; wetting front advancing method

非饱和黄土具有显著的水敏性力学特性, 即其强度和变形模量与含水率密切相关. 黄土滑坡与降雨、灌溉和渠道渗漏等具有很大的关联性. 建于黄土地层之上的构筑物在浸水如降雨入渗情况下会产生沉降变形, 而计算浸水环境作用下地层水分迁移过程是计算边坡稳定性和地基沉降的前提. 降雨入渗是发生最为频繁的地层浸水情况. 积水入渗是降雨入渗的极端情况而通常被室内试验所采纳. 有关实际降雨情况下的水分入渗, 已有大量的试验研究. 如, 李毅等^[1]通过室内试验研究了不同降雨强度下黄土地层的水分迁移规律. 基于近似物理模型如 Green-Ampt 模型的解析方法和求解 Richard 方程的数值方法是计算积水和降雨入渗条件下土体水分迁移过程的两类基本方法.

基于近似物理模型的解析方法计算简便, 特别是考虑浸润锋处吸力合理计算后的 Green-Ampt 修

收稿日期: 2019-01-17

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFC0504703); 国家自然科学基金(51409220); 中央高校基本科研业务费专项资金(2014YB049)

第一作者: 胡海军(1982—), 男, 讲师, 工学博士, 主要研究方向为非饱和和黄土的力学特性. E-mail: hu.hai-jun@163.com

正模型能较好地模拟积水情况下累积入渗量和时间的关系^[2],却不能较好地计算水分剖面以及实际浸润锋迁移过程.为了模拟积水情况下水分剖面变化过程,王文焰等^[3]在 Green-Ampt 模型基础上提出了考虑积水入渗过程中原状黄土水分剖面形状入渗模型.本文应用该模型预测重塑黄土积水入渗情况水分迁移过程时,发现由于其不合理地考虑浸润区吸力作用而过快地预测了浸润锋迁移速率;结合 Green-Ampt 修正模型,本文提出了能合理考虑浸润锋处吸力作用和水剖面形状的改进模型,并基于 Mein 等^[4]降雨分析理论,将该模型引入到降雨情况下的水分剖面计算.

求解 Richard 方程的数值方法能严谨求解水分入渗过程,然而非饱和和渗透参数的准确选取是影响该方法预测准确度的重要因素^[2],有时不能采用间接法如 VG-Mualem 模型获得的非饱和渗透系数参数而需要反演^[5].基于近似物理模型的解析方法同样存在该问题,鉴于浸润锋前进法^[6]或改进的浸润锋前进法^[7]能较精确测试非饱和土的渗透系数函数,故本文应用改进的浸润锋前进法来获得非饱和和渗透系数函数.

1 模拟方法

1.1 改进模型

1.1.1 积水入渗情况

对于积水入渗情况,Green-Ampt 模型采用的水分剖面如图 1 所示,其将实际入渗深度为 Z_f 的浸润体简化为长度为 Z_s 的饱和体,水力梯度采用式(1)计算,根据达西定律得到入渗量增量,该值等于饱和体长度增量下土体水量的增量如式(2)所示,由式(1)和式(2)得到饱和体深度 Z_s 和时间的关系如式(3)所示.

$$i = \frac{H + Z_s + S_m}{Z_s} \quad (1)$$

$$K_s i dt = (\theta_s - \theta_i) dZ_s \quad (2)$$

$$t = \frac{\theta_s - \theta_i}{K_s} \left[Z_s - (H + S_m) \ln \frac{H + Z_s + S_m}{H + S_m} \right] \quad (3)$$

式中: i 为水力梯度; H 为积水水头; Z_s 为 Green-Ampt 模型的浸润锋深度(也即饱和体深度); S_m 为 Green-Ampt 模型浸润锋 Z_s 处的吸力水头(取为正值); K_s 为饱和渗透系数; θ_i 为土体初始体积含水率; θ_s 为土体饱和体积含水率.

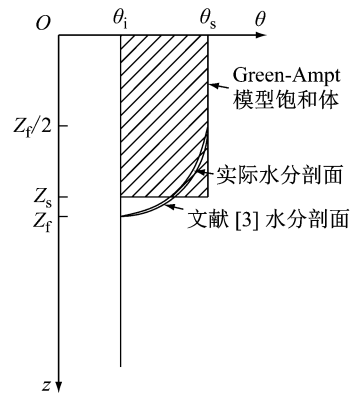


图 1 积水入渗下 Green-Ampt 模型、文献[3]模型以及实际的水分剖面示意图

Fig. 1 Water content profiles adopted by the Green-Ampt model, the model proposed by Wang Wenyan et al. and the actual water content profile in ponding infiltration

该模型浸润锋处吸力水头 S_m 并非土体初始含水率 θ_i 对应的吸力水头. Philip^[8]认为 S_m 是一个数学量,没有实际的物理意义,该值远小于浸润锋下土体初始含水率对应的吸力水头 S_i . Bourwer^[9]最早给出了 S_m 的计算公式如式(4)所示,并认为 S_m 可近似取为增湿过程中进水值,即增湿过程中气不连续时对应的吸力值,然而该值不容易测定,其建议取为饱和样(对应于抽真空饱和样)脱湿过程中进气值的 50%,该确定方法比较简单可行^[10].在浸润锋以上为饱和的假设下,Mein 等^[4]应用式(5)获得 S_m ,该值在初始含水率变化较大范围内相差很小,其对不同初始含水率和不同降雨强度下采用相同的值. Mein 等^[11]经过推导认为应用式(4)获得 S_m 是合理可靠的. Neuman^[12]通过推导得到了浸润锋处吸力值表达式与式(4)相同. Brakensiek^[13]通过比较,表明上述各种方法可得相近的结果.对于采用上述等效吸力的模型称为 Green-Ampt 修正模型.已有大量研究表明,Green-Ampt 修正模型在模拟入渗量和时间的关系上具有较高的准确度^[2,14],说明上述确定 S_m 的方法有足够精度.从公式(4)可见, S_m 小于初始含水率对应的吸力水头 S_i .

$$S_m = \int_0^{S_i} \frac{K}{K_s} dS \quad (4)$$

$$S_m = \frac{\int_{K_i}^{K_s} S dK}{K_s - K_i} \quad (5)$$

式中: S_i 和 K_i 分别为初始含水率对应的吸力水头和渗透系数; S 和 K 分别为吸力水头和渗透系数.

Green-Ampt 模型及修正模型仅能计算如图 1

所示的等效饱和体深度. 王文焰等^[3]根据大量原状黄土现场积水入渗试验中实测水分剖面,假定入渗深度为 Z_f 的区域近似由上部长为 $Z_f/2$ 的饱和区(严格来讲是传导区,因为饱和区和过渡区的区间都很小^[15],其中传导区和过渡区为接近饱和的区域,所以这里仍用饱和区称之)和下部长为 $Z_f/2$ 、水分剖面为椭圆的非饱和浸润区组成(见图 1),提出了能计算不同时刻水分剖面的模型,然而在计算浸润锋处等效吸力 S_m 上却没有采用上述确定方法,其采用下部 $Z_f/2$ 非饱和浸润区平均初始含水率对应的吸力 S_i 施加于上部饱和区底部,得到上部 $Z_f/2$ 饱和区的水力梯度如式(6)所示,根据达西定律和水量平衡原理,得到式(7),将式(6)代入式(7)整理可得入渗深度 Z_f 和时间 t 的关系如式(8)所示. 如上文所述,作用于长度 Z_s 饱和体的等效吸力 S_m 小于 S_i ,而将 S_i 作用于长度为 $Z_f/2$ 的饱和区,可见过大估计了下部吸力的作用. 该模型^[3]计算所得现场积水入渗试验中的水分剖面运移过程较为符合实测,可能在于原状黄土常存在节理和大孔隙,节理^[16]或大孔隙^[17]存在导渗的作用,加快了浸润锋迁移速率,对此问题应采用相应模型^[16-17]进行分析,而不应单独在模型中增加吸力作用.

$$i = \frac{H + 0.5Z_f + S_i}{0.5Z_f} \quad (6)$$

$$K_s i dt = 0.5(\theta_s - \theta_i) dZ_f + 0.125\pi(\theta_s - \theta_i) dZ_f \quad (7)$$

$$t = \frac{(4 + \pi)(\theta_s - \theta_i)}{16K_s} \cdot$$

$$\left[2Z_f - 4(H + S_i) \ln \frac{H + 0.5Z_f + S_i}{H + S_i} \right] \quad (8)$$

彭振阳等^[14]借助王文焰等^[3]提出的分层假定,采用求解 Richard 方程的数值方法获得了饱和区和非饱和区的比例变化;在计算浸润锋面吸力上,其建立了非饱和浸润区等效渗透系数 \bar{K} 和整个入渗区等效渗透系数 \bar{K}_w 的计算公式,如式(9)和式(10)所示,采用式(11)计算浸润锋 Z_f 处吸力 S'_m . 张杰等^[18]沿用式(11)并给出了更严格的 Z_f 与 t 的关系表达式,并在此基础上提出了考虑气阻效应下的改进模型. 式(11)的理论基础在文献^[14]中并没有明确给出,在不考虑气阻效应情况下,本文认为应该用式(12)计算 S'_m ,因为 Green-Ampt 修正模型在模拟入渗率方面具有很高的精度^[2,14],式(12)能保证与 Green-Ampt 修正模型具有相同的入渗率. 为了求解

方便,本文并不用式(12)求解 S'_m ,而是应用该式的右端项来计算入渗量的增量,也即应用 Green-Ampt 修正模型来求出等效饱和体长度 Z_s ,然后根据等效饱和体水量如图 1 所示阴影面积与饱和区及浸润区水量相等,来得到实际浸润锋深度 Z_f 和饱和体深度 Z_s 的关系如式(13)所示. 当应用王文焰等^[3]所采用饱和区和非饱和浸润区长度相等的假定,此时 Z_f 和 Z_s 的关系如式(14)所示. 下文将用式(14)来求解实际浸润锋位置并结合浸润区为椭圆形求解水分剖面的方法,称之为本文改进模型方法.

$$\frac{\bar{K}}{K_s} = \frac{1 - K_i/K_s}{\ln(K_s/K_i)} \quad (9)$$

$$\bar{K}_w = \frac{\bar{K}K_s}{\epsilon\bar{K} + (1 - \epsilon)K_s} \quad (10)$$

式中: ϵ 为浸润区占入渗区的比例,其随 Z_f 的增加而线性增加,可表示为 $\epsilon = aZ_f + b$.

$$\frac{H + S_m}{H + S'_m} = \frac{\bar{K}}{K_s} \quad (11)$$

$$\bar{K}_w \frac{H + Z_f + S'_m}{Z_f} = K_s \frac{H + Z_s + S_m}{Z_s} \quad (12)$$

式中: Z_s 为如图 1 所示的饱和体长度,按浸润区为椭圆过渡,经过换算 $Z_s = (1 - \epsilon + 0.25\pi\epsilon)Z_f$.

$Z_f =$

$$\frac{(1 - 0.25\pi)b - 1 + \sqrt{(0.25\pi b - b + 1)^2 + Z_s(\pi - 4)a}}{(0.5\pi - 2)a} \quad (13)$$

$$Z_f = \frac{8}{\pi + 4} Z_s \quad (14)$$

1.1.2 降雨入渗情况

对于不同降雨强度下的水分入渗模拟,Mein 等应用 Green-Ampt 修正模型进行了降雨入渗分析^[4],得到与求解 Richard 方程的数值计算方法相近的入渗率和时间关系,但其并没有引入水分剖面形状来预测实际水分剖面. 本文应用上述改进模型,获得实际水分剖面. 当降雨强度小于饱和渗透系数时,不会发生径流,入渗率 $f(t)$ 一直等于降雨强度 P . 当降雨强度大于饱和渗透系数时,在地表发生径流前,入渗率等于降雨强度;发生径流时,降雨强度 P 等于入渗强度 $K_s i$,据此可得径流发生时等效饱和体长度 Z_s ,进而根据式(14)得到此时的实际入渗深度 Z_f ;根据此时入渗量 F_p 等于等效饱和体范围内土体水量变化,可得 F_p 如式(15)所示,进一步可得径流发生的时刻 t_p 如式(16)所示. 径流发生后,假定水及时排走没有积水水头,即发生积水水头为 0 的积水入渗,入渗量 F 和时间的关系可按式(17)计算,入渗深度

Z_i 由式(18)和式(14)计算得到.

$$F_p = \frac{S_m K_s (\theta_s - \theta_i)}{P - K_s} \quad (15)$$

$$t_p = \frac{F_p}{P} \quad (16)$$

$$t = t_p + \frac{1}{K_s} \cdot$$

$$\left\{ F - F_p + S_m (\theta_s - \theta_i) \ln \left[\frac{S_m (\theta_s - \theta_i) + F_p}{S_m (\theta_s - \theta_i) + F} \right] \right\} \quad (17)$$

$$Z_s = \frac{F}{\theta_s - \theta_i} \quad (18)$$

1.2 基于求解 Richard 方程的数值方法

Hydrus-1d 软件应用迦辽金有限元法求解给定初始条件和边界条件下的一维 Richard 方程, 获得非饱和土水分迁移过程. 一维 Richard 方程如式(19)所示. 对于本文积水和降雨入渗中初始含水率沿深度均相等情况, 初始条件如式(20)所示, 下边界条件为自由排水边界如式(21)所示. 对于积水入渗情况, 上边界条件如式(22)所示; 对于降雨入渗情况, 径流发生前, 上边界条件如式(23)所示, 当计算到上边界水头为 0 的时刻, 即为径流时刻, 从该时刻开始, 将上边界条件定义为水头为 0 的边界, 即应用式(22)所示边界条件并将 H 设置为 0; 另外还分析了停雨后 1 h 的水分再分布, 该过程将上边界设置为流量为 0 的边界, 即将式(23)所示 P 设置为 0. 求解时需要 h 和 θ 的关系, 以及 K 与 h 或 θ 的关系; 然而有时不能采用间接法 (如由 VG 模型持水曲线函数获得的非饱和渗透系数函数) 而需要反演计算^[5], 本文采用改进的浸润锋前进法^[7]进行求取, 具体参数确定过程见下文.

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(K \frac{\partial h}{\partial z} + K \right) \quad (19)$$

$$\theta(z, 0) = \theta_i \quad (20)$$

$$\frac{\partial h}{\partial z} = 0 \quad (21)$$

$$h(0, t) = H \quad (22)$$

$$-K \frac{\partial h}{\partial z}(0, t) - K = -P \quad (23)$$

式中: z 坐标取向上为正, 地表处 $z=0$; 此处 h 为吸水水头, 当孔隙水压力为负时取为负值; P 为降雨强度.

2 两类模拟方法的验证与分析

2.1 积水入渗情况水分运移计算的验证与结果分析

2.1.1 试验情况及参数确定

为检验上述两类模拟方法在模拟重塑黄土积水

情况下水分迁移的可靠性, 以延安治沟造地工程建设中开挖边坡土料制取的两种干密度重塑黄土土柱积水入渗试验^[19]为对象进行模拟. 两种土样干密度分别为 $1.35 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 和 $1.53 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, 土柱初始质量含水率均约为 12.5%, 初始体积含水率分别为 0.174 和 0.194, 积水水头为 2 cm, 土柱高 220 cm. 在不同高度处布置水分仪获得了积水过程中的含水率变化, 土柱底部为透气板, 且入渗速率较慢, 浸润锋下的气压阻渗作用可以不考虑.

为了能用上述两类方法模拟试验中水分运移过程, 本文测试了饱和渗透系数和持水曲线, 各分析方法所需参数如表 1 所示. 其中, 间接法 1 采用室内制取相同初始状态的土样进行增湿或脱湿测试的持水曲线(图 2), 应用 VG 模型如式(24)拟合; 对制成相同初始状态的试样进行浸水饱和, 应用变水头法测得的饱和渗透系数 K_s , 应用 VG-Mualem 模型^[20]即式(25)间接获得非饱和渗透系数函数, 进而获得 S_m . 间接法 2 除饱和渗透系数应用改进的浸润锋前进法根据积水入渗土柱试验获得的饱和渗透系数外, 其他参数与间接法 1 相同. 直接法则采用改进的浸润锋前进法^[7]根据积水入渗土柱试验获得的非饱和渗透系数函数.

$$\theta_w = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{\left[1 + \left(\frac{\Psi}{a} \right)^n \right]^m} \quad (24)$$

$$K = K_s \Theta^{0.5} [1 - (1 - \Theta^{1/m})^m]^2 \quad (25)$$

式中: θ_w 为体积含水率; Ψ 为基质吸力; a, n, θ_r, θ_s 均为拟合参数; n 为与曲线斜率有关的参数, $m = 1 - 1/n$; θ_s 为饱和体积含水率, 本文中该参数不是拟合所得, 具体按表 1 注释取值. $\Theta = \frac{\theta_w - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \left(1 + \left(\frac{\Psi}{a} \right)^n \right)^{-m}$.

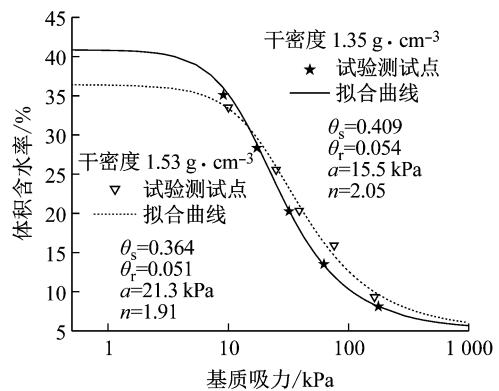


图 2 实测的持水曲线及 VG 模型拟合函数

Fig.2 Measured water-retention curves along with VG water-retention functions fitted to independent data

表 1 各模拟分析中所需参数

Tab.1 Parameters needed in each simulation

土柱干密度/ ($g \cdot cm^{-3}$)	确定方法	两类方法公用参数	基于 Green-Ampt 修正模型的方法		基于求解 Richard 方程的方法
			文献[3]模型	Green-Ampt 修正模型及本文改进模型	
1.35	间接法 1	$K_s=5.16 \times 10^{-5} cm \cdot s^{-1}$, $\theta_s=0.409$, $\theta_i=0.174$	$S_i=409 cm$	$S_m=63.1 cm$ ^③	$\theta_r=0.054, a=15.5 kPa, n=2.05$
	间接法 2	$K_s=6.1 \times 10^{-5} cm \cdot s^{-1}$, $\theta_s=0.409, \theta_i=0.174$	$S_i=409 cm$	$S_m=63.1 cm$	$\theta_r=0.054, a=15.5 kPa, n=2.05$
	直接法	$K_s=6.1 \times 10^{-5} cm \cdot s^{-1}$, $\theta_s=0.409, \theta_i=0.174$	—	$S_m=72.7 cm$	$\theta_r=0.114, a=16.5 kPa, n=3.10$
1.53	间接法 1	$K_s=0.65 \times 10^{-5} cm \cdot s^{-1}$, $\theta_s=0.364, \theta_i=0.194$	$S_i=450 cm$	$S_m=77.1 cm$ ^③	$\theta_r=0.051, a=21.3 kPa, n=1.91$
	间接法 2	$K_s=1.8 \times 10^{-5} cm \cdot s^{-1}$, $\theta_s=0.364, \theta_i=0.194$	$S_i=450 cm$	$S_m=77.1 cm$	$\theta_r=0.051, a=21.3 kPa, n=1.91$
	直接法	$K_s=1.8 \times 10^{-5} cm \cdot s^{-1}$, $\theta_s=0.364, \theta_i=0.194$	—	$S_m=86.1 cm$	$\theta_r=0.138, a=16.5 kPa, n=2.60$

注:① 两种干密度抽真空饱和和试样渗透系数分别为 $6.50 \times 10^{-5} cm \cdot s^{-1}$ 和 $3.32 \times 10^{-5} cm \cdot s^{-1}$, 由于浸水饱和和试样与一维土柱试验入渗后饱和度接近, 渗透系数均采用浸水饱和和试样的渗透系数; ② 根据浸水饱和和试样及一维土柱试验入渗后土柱含水率确定 θ_s , 该含水率对应土柱入渗试验中传导区含水率^[20], 并不是完全饱和的含水率; ③ 根据式(5)计算得到两种干密度试样 S_m 分别为 65.6 cm 和 80.1 cm, 鉴于式(4)更为严格, 这里仅采用式(4)计算值。

其中应用改进的浸润锋前进法获得非饱和和渗透参数的过程如下: 根据土柱上各测点含水率开始变化的时间即浸润锋达到该处的时间, 按幂函数关系拟合得到浸润锋迁移距离和时间的关系, 对于两种干密度试样, 所得结果分别如式(26)和(27)所示。应用该关系很容易得到不同时刻浸润锋迁移速率 v_{z_t} , 以其中一个测点 A 为例, 按式(28)计算得到 $t_1 \sim t_2$ 时间段通过 A 断面的水流速度 v , 浸润锋前进法^[12]采用式(29)计算相应水力梯度 i , 依据改进的浸润锋前进法^[7]相应采用式(30)计算 $t_1 \sim t_2$ 时间段 A 断面的水力坡降 i , 根据达西定律便可得到该时间段平均吸力下的渗透系数, 选取不同的时间段便可得到不同吸力下的渗透系数。图 3 给出了应用改进的浸润锋前进法所得不同吸力下的渗透系数结果。应用 VG

模型即式(24), 对所得非饱和和渗透系数和基质吸力的关系进行拟合, 拟合得到的饱和和渗透系数在抽真空饱和和试样和浸水饱和和试样所测渗透系数之间。可见, 虽然浸水饱和和试样和土柱入渗试验后的饱和度接近, 但在渗透系数上仍存在试样不对等性。文献[21]则建议采用入渗试验后的土柱进行渗透试验以获得饱和和渗透系数。由于应用式(23)拟合非饱和和渗透系数时, 所得 a 和 n 与原持水曲线拟合参数不同, 因此需要在新的 a 和 n 下, 重新对持水曲线拟合, 得到残余含水率 θ_r 分别为 0.114 和 0.138, 虽然该参数有较大改变, 但前后两次所得持水曲线在大于初始含水率时都很接近测试点, 而入渗过程是增湿过程, 所得持水曲线和非饱和和渗透系数函数在含水率大于初始含水率时具有足够的精度。

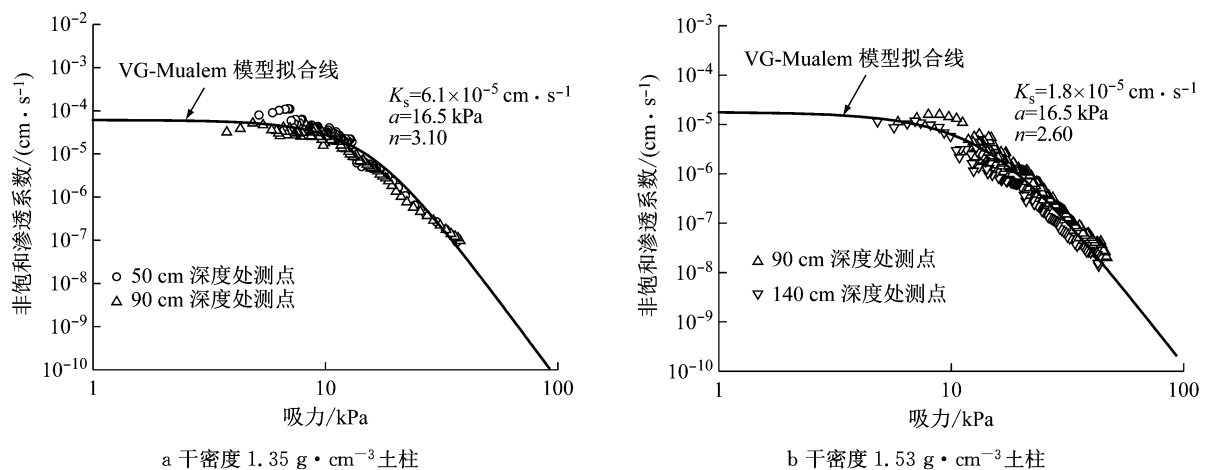


图 3 改进的浸润锋前进法所得非饱和和渗透系数

Fig.3 Unsaturated hydraulic conductivity obtained by using improved wetting front advancing method

$$Z_f = 1.053t^{0.622} \quad (26)$$

$$Z_f = 0.692t^{0.592} \quad (27)$$

$$v\left(z_A, \frac{t_1+t_2}{2}\right) = \frac{1}{4}[\theta(z_A, t_2) + \theta(z_A, t_1) - 2\theta_i] \cdot [v_{Z_f}(t_1) + v_{Z_f}(t_2)] \quad (28)$$

$$i(z_A, t_2) = \frac{\Psi(z_A, t_1) - \Psi(z_A, t_2)}{0.5\gamma_w[v_{Z_f}(t_1) + v_{Z_f}(t_2)](t_2 - t_1)} + 1 \quad (29)$$

$$i\left(z_A, \frac{t_1+t_2}{2}\right) = \frac{1}{4}[i(z_A, t_1) + 2i(z_A, t_2) + i(z_A, t_3)] \quad (30)$$

式中: $\theta(z_A, t_2)$ 为时刻 t_2 、深度 z_A 处测点 A 的体积含水率; Ψ 为基质吸力,由前面所测持水曲线拟合函数根据含水率反算得到; v_{Z_f} 为 $t_1 \sim t_2$ 时间段浸润锋

迁移速度.

2.1.2 模拟结果分析

图 4 给出了各方法所得浸润锋入渗深度和时间的关系以及与实测结果的对比. 总体上,王文焰等提出的模型^[3]过快地预测了入渗过程,Green-Ampt 修正模型较慢地预测了入渗过程,而采用相同参数情况下改进模型较 Green-Ampt 修正模型提高了浸润锋迁移速率,相比前两种方法均更加接近实测值. 针对采用不同方法确定的参数,采用间接法 1 所得参数误差较大,而采用间接法 2 或直接法所得参数预测结果均较为接近实测值,说明饱和渗透系数的准确性在很大程度上决定了预测的准确度. 另外整体上,对于干密度 $1.53 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 土柱预测较为准确,这可能与 $1.35 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 土柱具有导渗的大孔隙有关.

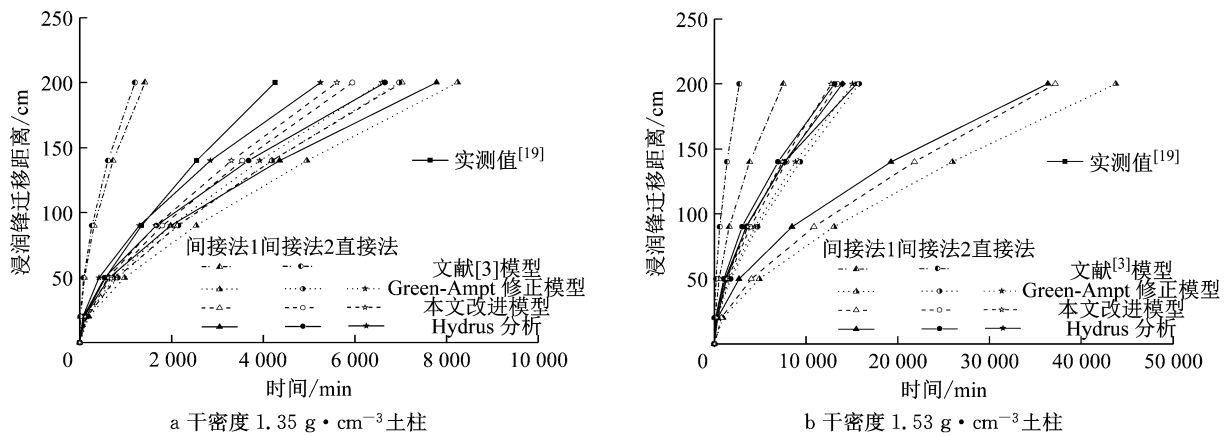


图 4 积水入渗过程中浸润锋入渗深度与时间的关系
Fig.4 Depth of wetting front versus time in ponding infiltration

图 5 给出了土柱不同深度测点体积含水率随时间变化的实测与预测结果. 本文改进模型和 Hydrus 软件数值方法都能模拟出浅部测点体积含水率变化

快,深部测点体积含水率变化稍慢的特点. 总体上,对于干密度 $1.53 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 土柱预测较好,而对于干密度 $1.35 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 土柱预测稍差.

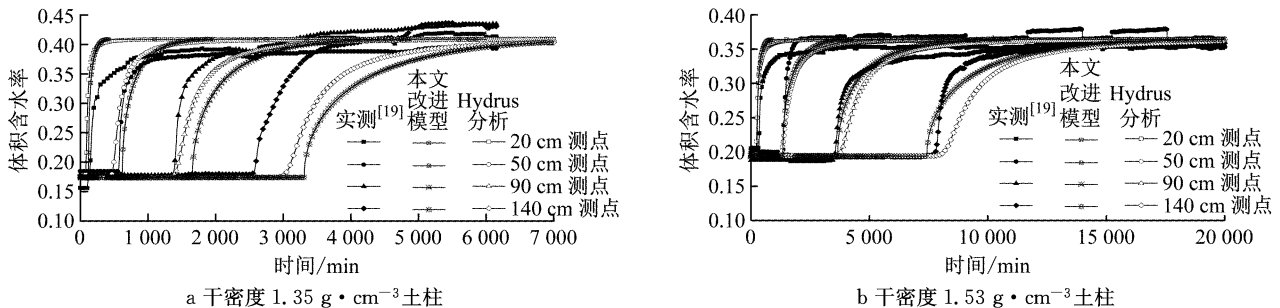


图 5 积水入渗过程中各测点含水率随时间变化预测与实测值的对比
Fig.5 Comparison of predicted and measured water content change at measuring points in ponding infiltration

图 6 给出了浸润锋到达各测点时的水分分布预测值和实测结果的对比. 本文改进模型和 Hydrus 软件数值方法所得结果很接近,只是在浸润锋位置处稍有差异. 有限的实测点结果接近于两种方法所得

的水分分布线,说明两种方法的可靠性. 另外,根据 Hydrus 软件所得结果,分析水分剖面从饱和到非饱和的过渡点,得到饱和区(严格来讲为传导区)所占比例随着入渗深度的增加由 0.3 变化到 0.6.

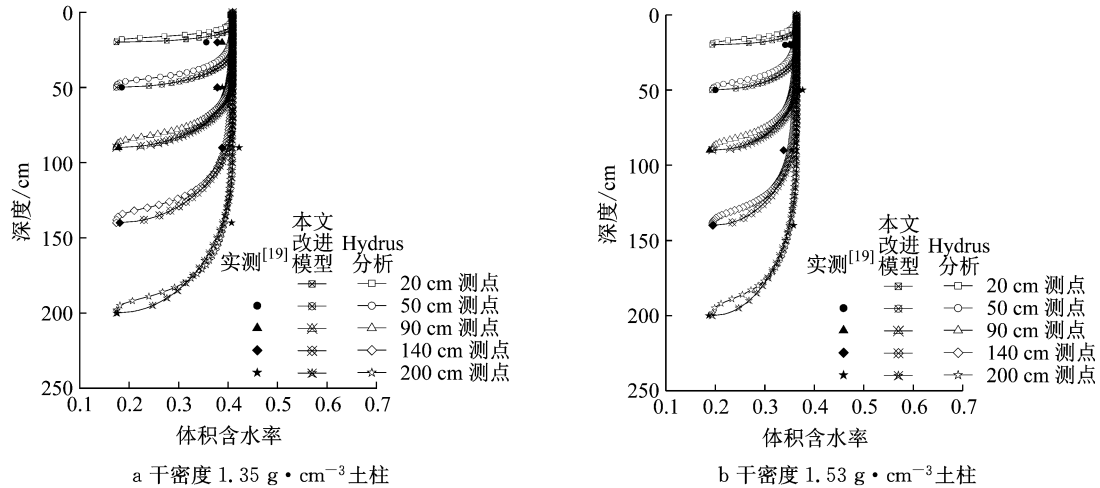


图 6 积水入渗过程浸润锋到达各测点时的水分分布预测值和实测结果对比

Fig.6 Comparison of predicted and measured water content profile when wetting front arrived at measurement points in ponding infiltration

2.2 降雨入渗情况的验证与分析

为了获得积水入渗和降雨入渗的差别以及本文改进模型相对于 Green-Ampt 修正模型在降雨入渗过程分析的适宜性,对比了 Green-Ampt 修正模型、本文改进模型和 Hydrus 软件数值方法所得降雨情况下浸润锋入渗规律和水分剖面,并与积水情况进行了对比。

结合取土地区的降雨情况资料^[22],本文选取特大暴雨 $1.170 \text{ cm} \cdot \text{h}^{-1}$ 、大雨 $0.208 \text{ cm} \cdot \text{h}^{-1}$ 和中雨 $0.104 \text{ cm} \cdot \text{h}^{-1}$ 3 种雨强下降雨 24 h 和停雨 24 h 作为分析情况.对于 Green-Ampt 修正模型和本文改进模型,按式(16)计算得到干密度 $1.35 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 和 $1.53 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 土柱仅特大暴雨情况下分别在 3.4 h 和 0.73 h 发生径流,其他两种雨强在 24 h 内均未发

生径流;Hydrus 分析结果表明 24 h 内也仅特大暴雨下发生了径流,径流时间分别为 4.5 h 和 0.8 h,这与 Green-Ampt 修正模型和本文改进模型所得结果相近。

图 7 给出了积水和 3 种雨强条件下浸润锋入渗深度和时间的关系.对于 Green-Ampt 修正模型和本文改进模型,径流之前,由于土柱表面处于非饱和状态不能应用改进模型预测,图中仅给出了径流发生后的入渗深度和时间的关系.从结果上可见,本文改进模型比 Green-Ampt 修正模型更加接近 Hydrus 所得结果.对比 3 种雨强和积水入渗结果,特大暴雨情况比较接近于积水入渗情况,特别是干密度为 $1.53 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 土柱.这也说明了积水入渗可以作为降雨入渗的极端条件予以研究。

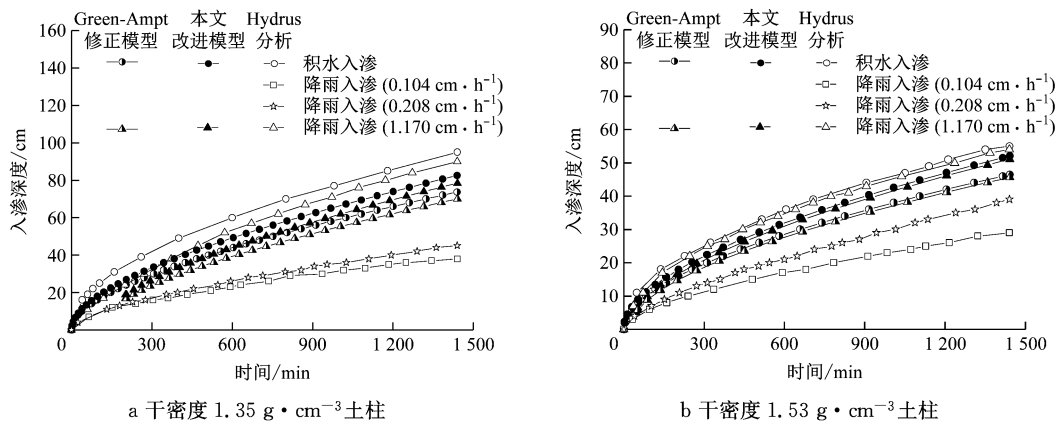


图 7 降雨 24 h 过程中入渗深度和时间的关系以及与积水入渗的对比

Fig.7 Infiltration depth versus time during 24 h rainfall compared with that under ponding condition

图 8 给出了特大暴雨情况下,在降雨 24 h 和停雨 24 h 时间段,两种干密度土柱水分入渗及水分再分布过程水分剖面图. Hydrus 分析结果表明,初始

入渗时土柱表面由非饱和状态逐渐过渡到饱和状态,Green-Ampt 修正模型和本文改进模型不能预测径流发生前的水分分布变化;发生径流时及降雨 24

h 时,本文改进模型所得水分分布与 Hydrus 所得水分分布接近,特别是干密度 $1.53 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 土柱,而 Green-Ampt 修正模型预测水分剖面精度较差.相对于降雨 24 h,发生径流时 Green-Ampt 修正模型和本文改进模型所得结果与 Hydrus 分析结果差异较大.这主要是由于径流发生的时间不同导致两者入渗量不同,另外如前面分析表明入渗深度浅时,饱和区所占比例小,改进模型在此阶段采用了相对较大

的饱和区比例.降雨结束后,改进模型不能预测水分重分布,Hydrus 分析得到土柱表面含水率减少并且更深处水分增加,这与已有实测规律^[1]相符.需要说明的是,该分析过程宜采用增湿后脱湿的持水曲线函数,另外停雨后一般涉及到蒸发,需要测试或计算蒸发强度 E ,此时可将式(23)中 P 替换为 $-E$ 的上边界条件进行计算.

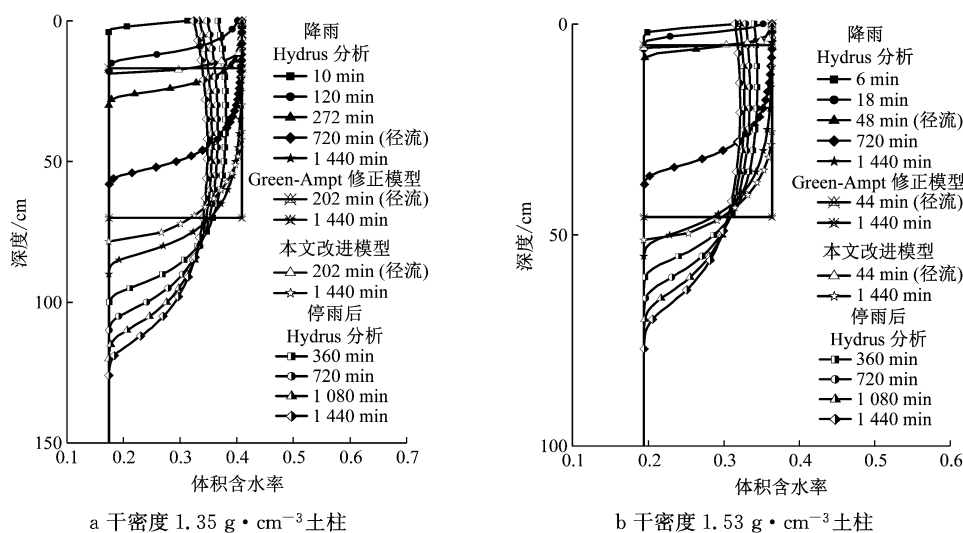


图 8 降雨 24 h 及停雨 24 h 过程中的水分剖面变化

Fig. 8 Change of water content profile during one day of rain and following one day without rain

3 结论

在 Green-Ampt 修正模型和王文焰等提出的模型^[3]基础上,提出了可较为合理预测入渗过程中水分剖面及迁移过程的改进模型,应用各模型和求解 Richard 方程的数值方法模拟了室内重塑黄土积水入渗试验,并对比了特定雨强下本文改进模型和数值方法所得的水分剖面.主要结论如下:

(1) 本文改进模型合理考虑了浸润锋处吸力作用和水剖面形状,相比 Green-Ampt 修正模型和王文焰等提出的模型,能更好地模拟室内非饱和和重塑黄土积水入渗试验中水分迁移过程.

(2) 根据土柱入渗试验各测点水分变化,采用改进的浸润锋前法^[7]获得的饱和渗透系数和非饱和渗透系数函数时,能较好地预测水分迁移过程,而采用室内制样获得的饱和渗透系数和间接法获得的非饱和渗透系数函数时预测误差较大.

(3) 根据文献^[4]提出的降雨入渗理论,将改进模型推广到降雨情况下径流发生后的水分剖面预测,所得结果与求解 Richard 方程的数值方法分析

结果接近,特别是在试样干密度比较大的情况,改进模型相对数值方法计算简便、易于应用.另外,应用 Hydrus 软件可以分析得到径流发生前和停雨后的水分迁移变化过程,结果与已有试验规律相符,显示出较强的模拟能力.

参考文献:

- [1] 李毅, 邵明安. 雨强对黄土坡面土壤水分入渗及再分布的影响[J]. 应用生态学报, 2006, 17 (12): 2271.
LI Yi, SHAO Ming'an. Effects of rainfall intensity on rainfall infiltration in soil on loess slope land [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2006, 17 (12): 2271.
- [2] MA Y, FENG S Y, SU D Y, *et al.* Modeling water infiltration in a large layered soil column with a modified Green-Ampt model and HYDRUS-1D [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2010, 71(S): S40.
- [3] 王文焰, 汪志荣, 王全九, 等. 黄土中 Green-Ampt 入渗模型的改进与验证[J]. 水利学报, 2003, 34 (5): 30.
WANG Wenyang, WANG Zhirong, WANG Quanjiu, *et al.* Improvement and evaluation of the Green-Ampt model in loess soil [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2003, 34 (5): 30.
- [4] MEIN R G, LARSON C L. Modeling the infiltration component of the rainfall-runoff process [R]. Minnesota: University of Minnesota, 1971.

- [5] 吴奇凡,樊军,杨晓莉,等. 晋陕蒙接壤区露天矿层状土壤水分入渗特征与模拟[J]. 土壤学报, 2015, 52(6): 1280.
WU Qifan, FAN Jun, YANG Xiaoli, *et al.* Experiment and simulation of infiltration from layered soils in open pit mine in Jin-Shaan-Meng adjacent region [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2015, 52(6): 1280.
- [6] LI X, ZHANG L M, FREDLUND D C. Wetting front advancing column test for measuring unsaturated hydraulic conductivity [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2009, 46(12): 1431.
- [7] 胡海军,李常花,崔玉军,等. 增湿情况重塑黄土非饱和渗透系数的测定方法研究[J]. 水利学报, 2018, 49(10): 1216.
HU Haijun, LI Changhua, CUI Yujun, *et al.* Research on the determination of permeability coefficient of unsaturated remolded loess under wetting condition [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2018, 49(10): 1216.
- [8] PHILIP J R. The theory of infiltration 7[J]. *Soil Sciences*, 1958, 85(6): 333.
- [9] BOUWER H. Unsaturated flow in ground water hydraulics [J]. *Journal of Hydraulics Division*, 1964, 90(5): 121.
- [10] BOUWER H. Rapid field measurement of air-entry value and hydraulic conductivity of soil as significant parameters in flow system analysis [J]. *Water Resources Research*, 1966, 2(4):729.
- [11] MEIN R G, FARRELL D A. Determination of wetting front suction in the Green-Ampt equation [J]. *Soil Science Society of America Proceedings*, 1974, 38(4): 872.
- [12] NEUMAN S P. Wetting front pressure head in the infiltration model of Green and Ampt [J]. *Water Resources Research*, 1976, 12(3): 564.
- [13] BRAKENSIEK D L. Estimating the effective capillary pressure in the Green and Ampt infiltration equation [J]. *Water Resources Research*, 1977, 13(3): 680.
- [14] 彭振阳,黄介生,伍靖伟,等. 基于分层假设的 Green-Ampt 模型改进[J]. 水科学进展, 2012, 23(1): 59.
PENG Zhenyang, HUANG Jiasheng, WU Jingwei, *et al.* Modification of Green-Ampt model based on the stratification hypothesis [J]. *Advances in Water Science*, 2012, 23(1): 59.
- [15] BODMAN G B, COLMAN E A. Moisture and energy conditions during downward entry of water into soils [J]. *Soil Science Society of America Proceedings*, 1944, 8(C): 116.
- [16] 罗扬,王铁行,王娟娟. 含节理黄土渗流数值模型研究[J]. 工程地质学报, 2014, 22(6):1115.
LUO Yang, WANG Tiehang, WANG Juanjuan. Finite element seepage flow model for unsaturated loess with joints [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2014, 22(6):1115.
- [17] SIMUNEK J, JARVIS N J, VAN GENUCHTEN M T, *et al.* Review and comparison of models for describing non-equilibrium and preferential flow and transport in the vadose zone [J]. *Journal of Hydrology*, 2003, 272(1): 14.
- [18] 张杰,韩同春,豆红强,等. 探讨考虑气阻作用下分层假定的雨水入渗计算分析模型 [J]. 岩土工程学报, 2013, 35(12): 2219.
ZHANG Jie, HAN Tongchun, DOU Hongqiang, *et al.* Analysis model for rainwater infiltration considering gas resistance under stratified assumption [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2013, 35(12): 2219.
- [19] 钟佩文,张慧莉,田堪良,等. 持续降雨入渗对黄土边坡稳定性的影响[J]. 人民黄河, 2018, 40(1): 76.
ZHONG Peiwen, ZHANG Huili, TIAN Kanliang, *et al.* Study on the influence of continuous rainfall infiltration on the loess slope stability [J]. *Yellow River*, 2018, 40(1): 76.
- [20] VAN GENUCHTEN M T H. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils [J]. *Soil Science Society of American Journal*, 1980, 44(5): 892.
- [21] 邵明安,王全九, HORTON R. 推求土壤水分运动参数的简单入渗法 II. 实验验证[J]. 土壤学报, 2000, 37(2): 217.
SHAO Ming'an, WANG Quanjiu, HORTON R. A simple infiltration method for estimating soil hydraulic properties of unsaturated soils, II: experimental results [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2000, 37(2): 217.
- [22] 贺春雄. 延安治沟造地工程水毁成因及对策[J]. 陕西水利, 2014(1): 161.
HE Chunxiong. Causes and measures of water damage in Yan'an gully reclamation engineering [J]. *Shaanxi Water Resources*, 2014(1): 161.