

# 黄土地区不积雨条件下降雨入渗及其湿润锋移动规律

杜玉鹏<sup>1a</sup>, 田堪良<sup>1b,2</sup>, 张爱军<sup>1a</sup>, 张世参<sup>1a</sup>

(1. 西北农林科技大学 a. 水利与建筑工程学院; b. 水土保持研究所, 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)

摘要: 目前,黄土地区降雨入渗规律研究已较为深入,但对不积雨持续降雨入渗及其湿润锋移动规律研究较少。对此设计并制作了一套模拟不积雨降雨条件下黄土土柱垂直入渗模型试验装置系统,共模拟了3组非饱和和重塑黄土表面不积雨降雨强度下的土柱垂直入渗试验,得到了3组不同干密度黄土垂直土柱试验各相应深度监测点土体含水率与降雨历时曲线,以及各试验组土柱渗流湿润锋和渗流稳定区到达不同深度的降雨时间。基于Green-Ampt入渗模型的假设,建立了黄土地区不积雨降雨垂直土柱湿润锋渗流模型,并结合试验结果,验证了假设及模型的正确性,求出不积雨持续降雨条件下黄土土柱渗流湿润锋形状参数 $m$ 接近于3,并进一步揭示了不积雨降雨条件下黄土地区降雨入渗湿润锋深度与渗流稳定区深度之间的关系。

关键词: 不积雨;黄土;土柱;入渗;湿润锋;形状参数  
中图分类号: U416.14

文献标志码: A

## 1 引言

滑坡等地质灾害与降雨直接相关,不积雨降雨为降雨过程中地面不产生积水。调查数据显示,在地质灾害发生中,当日降雨量小于30 mm占34.6%,当日降雨量0.1~10 mm占22.1%<sup>[1]</sup>,并且多处滑坡土体表面受侵蚀影响极小。黄土地区土质疏松,直立性强,但对流水抵抗力弱,易受侵蚀,由此对黄土地区不积雨降雨入渗规律进行研究尤为必要。近年来,对土体降雨入渗的研究已较为深入<sup>[2~6]</sup>,但室内外模拟降雨研究大都基于积雨试验,在积雨降雨条件下,土体的入渗率很难保证持续稳定不变。因此,本文设计制作了一套模拟不积雨降雨条件下黄土土柱垂直入渗试验装置系统,在土柱表面不积雨的情况下,持续均匀降雨,建立了黄土地区不积雨降雨垂直土柱湿润锋渗流模型,并通过试验验证了模型的准确性。

## 2 试验条件及方案

### 2.1 试验土样及其物理力学性质

试验土样取自陕西省延安市万花山治沟造地工程的开挖边坡,取土深度为2.5~6.5 m。坡面上部原状土样的干密度均值为1.35 g/cm<sup>3</sup>,中部均值1.53 g/cm<sup>3</sup>,下部均值1.62 g/cm<sup>3</sup>,天然含水率为12.5%,属Q<sub>3</sub>黄土。试验所用土样物理性质见表1。

表1 土样的物理性质

Tab.1 Physical properties of loess soil sample

| 液限<br>/% | 塑限<br>/% | 塑性指<br>数/% | 按塑性<br>图分类 | 比<br>重 | 颗粒组成/%      |                   |              | 按塑性<br>指数分类 |
|----------|----------|------------|------------|--------|-------------|-------------------|--------------|-------------|
|          |          |            |            |        | >0.05<br>mm | 0.050~0.005<br>mm | <0.005<br>mm |             |
| 30.7     | 17.3     | 13.4       | CL         | 2.71   | 13.8        | 71.7              | 14.5         | 粉质粘土        |

经室内渗透试验,得出干密度为1.35、1.53、1.62 g/cm<sup>3</sup>的重塑土饱和和渗透系数分别为1.191×10<sup>-5</sup>、2.021×10<sup>-5</sup>、6.172×10<sup>-5</sup> m/s,相应的降雨强度分别为4.29、7.28、22.22 mm/h。

### 2.2 试样制备及土壤水分传感器率定

降雨试验过程中含水率采用Decagon公司生产的ECH<sub>2</sub>O土壤水分传感器监测。试验前对传感器进行率定,将已配置成一定含水率的过筛土样分层压实制成体积均为12 cm<sup>2</sup>×12 cm的5

收稿日期: 2018-12-03, 修回日期: 2018-12-31

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFC0504703)

作者简介: 杜玉鹏(1990-),男,硕士研究生、助理工程师,研究方向为黄土边坡稳定性分析,E-mail:2673756875@qq.com

通讯作者: 张爱军(1964-),男,博士、教授、博导,研究方向为岩土工程,E-mail:zaj@nwsuaf.edu.cn

组圆柱体试样,试样干密度为  $1.53 \text{ g/cm}^3$ ,5 组试样质量含水率分别为 10%、13%、16%、20%、27%,对应的体积含水率分别为 15.30%、19.89%、24.48%、30.60%、41.31%。试样制成后,用不透水保鲜膜和硬胶带将试样包裹好。将传感器插入试样中,24 h 后读取传感器输出数据。

更换 5 支传感器对应的土样,反复校核,取平均值,进行线性拟合,结果满足要求。将传感器输出数据拟合曲线为:

$$\theta = 0.083k - 43.915 \quad R^2 = 0.9882 \quad (1)$$

式中, $k$  为传感器输出体积含水率; $\theta$  为土体体积含水率。

### 2.3 试验装置

试验设计的模拟降雨装置系统由垂直土柱、模拟降雨和数据采集 3 部分组成,装置模型见图 1。垂直土柱模具高 210 cm,采用 5 节有机玻璃管组合而成,内径 14.5 cm,外径 15.5 cm。采用安装在土柱不同深度的 5 支 EC-5 土壤水分传感器,分别检测土柱 20、50、90、140、200 cm 深度处的含水率,每 5 min 检测一次,自动记录数据。

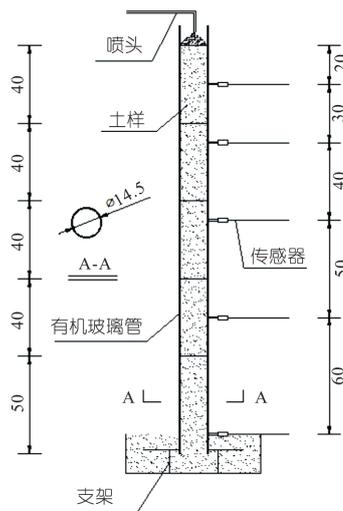


图 1 模拟降雨试验装置(单位:cm)

Fig.1 Equipment for rainfall simulating test

垂直土柱装置由下部土体、支架、土柱组成。试验前将土样晾干后碾碎过 2.0 mm 筛,测量过筛土样的含水率,加水配置成质量含水率为 12.5% 的土样,分层均匀击实,每层 5 cm。

### 2.4 模拟降雨条件

为了使雨水均匀持续地入渗到土体中且保持土体上表面无积水,试验自制了一套模拟降雨装置系统,即采用医用输液带将雨量均匀连续地降落在土体表面,并在土柱上表面紧敷一层土工布(国标  $400 \text{ g/m}^2$ ),输液带针头采用 #5 小针头。试验降雨强度通过输液带流速控制器来实现,经

试验确定,控制器上部小透明圆柱体内水流为 16.9 滴/g,降雨强度 1、2 mm/h 对应流量分别为 12.90、6.45 s/滴。试验开始后,调整输液带流速控制器控制降雨强度至设计值,每隔 12 h 校正一次流量,整个模拟降雨过程中实际降雨强度由入渗总水量和降雨总历时控制。

### 2.5 试验方案

试验前采用内径 10 cm,高 80 cm 的土柱进行模拟预降雨试验,发现土柱积雨与不积雨的临界降雨强度小于室内饱和和渗透系数所对应的降雨强度,干密度为  $1.62 \text{ g/cm}^3$  的重塑土土柱在 1 mm/h 的降雨强度下,土柱不产生积雨。为了探究土体干密度、降雨强度对黄土渗流及其湿润锋的影响,试验分 3 组进行,重塑土初始含水率 12.5%。①第 1 组干密度为  $1.35 \text{ g/cm}^3$ ,降雨强度 2 mm/h;②第 2 组干密度为  $1.53 \text{ g/cm}^3$ ,降雨强度 1 mm/h;③第 3 组干密度为  $1.62 \text{ g/cm}^3$ ,降雨强度 1 mm/h。本次试验模拟降雨参数见表 2。

表 2 模拟降雨参数

Tab.2 Simulated rainfall parameters

| 试验组 | 重塑土干密度 | 降雨历时/h | 降雨总重量/g   | 降雨总量/mm | 降雨强度 (mm·h <sup>-1</sup> ) | 与设计降雨强度偏差/% |
|-----|--------|--------|-----------|---------|----------------------------|-------------|
| 1   | 1.35   | 385.48 | 12 459.95 | 754.56  | 1.957                      | 2.2         |
| 2   | 1.53   | 622.03 | 10 729.43 | 649.76  | 1.045                      | 4.5         |
| 3   | 1.62   | 699.20 | 10 988.40 | 665.78  | 0.952                      | 4.8         |

注:重塑土干密度单位为  $\text{g/cm}^3$ 。

## 3 黄土地区不积雨条件下降雨入渗及其湿润锋移动规律

### 3.1 不积雨降雨条件下湿润锋模型建立

模拟降雨试验全过程不产生积雨,即入渗水量等于降雨量。根据 Green-Ampt 模型的假设,假设试验模拟降雨入渗过程中任意时刻土柱中的土体由饱和含水率区和初始含水率区两部分组成,分界线为湿润锋,土柱深度足够大。同时根据“活塞定律”,假定在稳定的水力势头和基质势头作用下:①湿润锋深度  $L$  随降雨时间  $t$  呈线性关系;②渗流稳定区深度  $h$  随降雨时间  $t$  呈线性关系。即  $h = aL$ ,  $a$  为常数。假设模型见图 2。

试验中土柱表面不产生积雨,故本次试验过程中雨水入渗的速率满足:

$$i_{(t)} = q \quad (2)$$

式中, $i_{(t)}$  为土柱上表面的雨水入渗速率,  $\text{cm/min}$ ;  $q$  为降雨强度,  $\text{cm/min}$ 。

(1)当渗流稳定区深度  $h$  近似等于湿润锋深度  $L$ ,即常数  $a \approx 1$  时,降雨时间足够长时,湿润锋

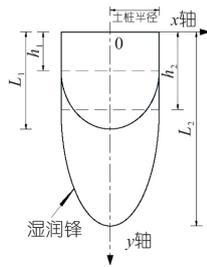


图 2 假定的土柱试验湿润锋模型

Fig.2 The assumed moistening front model of soil column test

深度  $L$  满足:

$$q\pi r^2 t = (\theta_s - \theta_i) \pi r^2 L \quad (3)$$

式中,  $r$  为试验土柱半径, 取 7.25 cm;  $\theta_s$  为饱和体积含水率,  $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ ;  $\theta_i$  为初始体积含水率,  $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ ;  $t$  为降雨历时, min.

化简式(2)得:

$$qt = (\theta_s - \theta_i) L \quad (4)$$

(2)假定在稳定的水力势头和基质势头作用下渗流湿润锋形状呈椭圆形, 渗流稳定区深度  $h$  近似等于  $aL$ , 则湿润锋深度  $L$  满足:

$$q\pi r^2 t = (\theta_s - \theta_i) [aL\pi r^2 + 2\pi r^2 (1-a)L/3] \quad (5)$$

即:

$$qt = (\theta_s - \theta_i) [1 - (1-a)/3] L \quad (6)$$

(3)假定在稳定的水力势头和基质势头作用下渗流湿润锋形状呈幂次方形, 湿润锋曲线满足方程式(7), 渗流稳定区深度  $h$  近似等于  $aL$ , 则湿润锋深度  $L$  同时满足式(8), 即:

$$y - L = -(1-a)Lx^n/r^n \quad (7)$$

$$q\pi r^2 t = (\theta_s - \theta_i) \left( aL\pi r^2 + \int_{aL}^L \pi x^2 dy \right) \quad (8)$$

整理化简得:

$$qt = (\theta_s - \theta_i) [1 - 2(1-a)/(2+n)] L \quad (9)$$

(4)比较式(6)与(9), 假定  $m$  为土体渗流湿润锋的形状参数, 当湿润锋为一定形状的光滑曲线时, 在所建立的假设条件下, 黄土土柱不积水降雨、降雨强度  $q$ 、降雨历时  $t$ 、湿润锋深度  $L$  满足下式:

$$qt = (\theta_s - \theta_i) [1 - (1-a)/m] L \quad (10)$$

式(10)即为建立的不积水降雨条件下黄土垂直土柱湿润锋模型, 当湿润锋为一定形状的光滑曲线时, 式(10)中湿润锋形状参数  $m$  可反映出湿润锋形状的不同。

综上所述, 黄土地区不积水降雨湿润锋深度  $L$  与降雨历时  $t$ , 降雨强度满足:

$$qt = A(\theta_s - \theta_i)L \quad (11)$$

其中  $A = [1 - (1-a)/m]$

### 3.2 试验结果分析及模型验证

3组模拟降雨试验的土柱黄土体积含水率与降雨历时的关系曲线见图3。

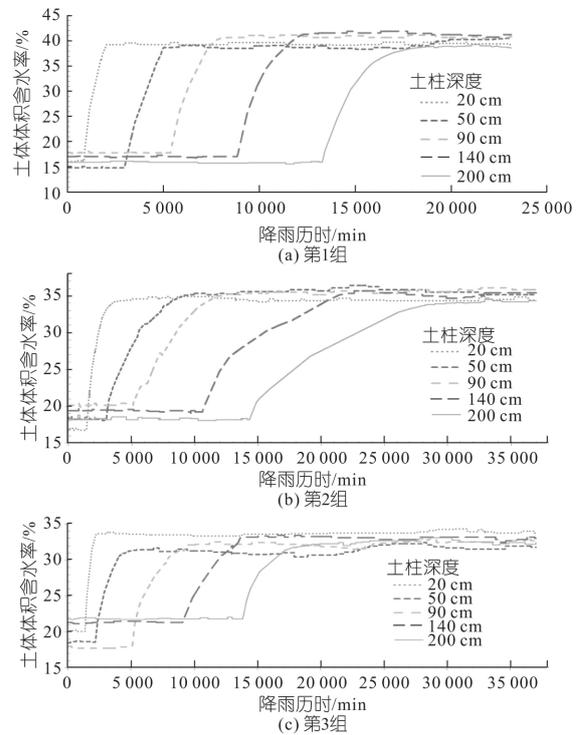


图 3 试验土体体积含水率随时间变化曲线

Fig.3 The volumetric moisture content of soil varied with time of experiments

各组试验湿润锋深度  $L$  和渗流稳定区深度  $h$  到达相应土柱深度  $z$  的时间  $t_1, t_2$  见表3。

表 3 试验土柱湿润锋  $L$  与渗流稳定区  $h$  到达相应土柱深度时间

Tab.3 Time of moistening front and moisture content stable zone line reaching the corresponding depth in the tests

| 土柱深<br>度 $z/\text{cm}$ | $L$ 到达 $z$ 时间 $t_1/\text{min}$ |        |        | $h$ 到达 $z$ 时间 $t_2/\text{min}$ |        |        |
|------------------------|--------------------------------|--------|--------|--------------------------------|--------|--------|
|                        | 第 1 组                          | 第 2 组  | 第 3 组  | 第 1 组                          | 第 2 组  | 第 3 组  |
| 20                     | 825                            | 1 430  | 1 345  | 2 015                          | 3 940  | 2 290  |
| 50                     | 2 945                          | 3 005  | 2 165  | 4 985                          | 9 615  | 5 425  |
| 90                     | 5 355                          | 5 110  | 5 070  | 8 290                          | 13 135 | 9 515  |
| 140                    | 8 830                          | 10 605 | 9 080  | 12 785                         | 21 795 | 13 645 |
| 200                    | 13 255                         | 14 320 | 13 805 | 20 745                         | 32 645 | 19 990 |

将表3中相应渗流时间数据  $t_1, t_2$  与相应渗流到达的土柱深度进行线性拟合, 得出降雨历时与相应渗流到达土柱深度拟合曲线的相关系数均大于 0.975, 表明湿润锋深度  $L$  和渗流稳定区深度  $h$  均与降雨历时呈线性关系, 拟合良好, 假设正确。将拟合结果与式(11)相结合得出3组试验湿润锋深度、渗流稳定区深度与降雨历时的关系方程式见表4。

表 4 线性拟合结果

Tab.4 Linear fitting results

| 试<br>验组 | 降雨强度<br>(mm·h <sup>-1</sup> ) | 湿润锋深度 L 与降<br>雨历时 t 拟合曲线 | 相关系<br>数 R <sup>2</sup> | 渗流稳定区 h 与降<br>雨历时 t 拟合曲线 | 相关系<br>数 R <sup>2</sup> |
|---------|-------------------------------|--------------------------|-------------------------|--------------------------|-------------------------|
| 1       | 2                             | t=64.205L                | 0.993 2                 | t=98.790L                | 0.988 7                 |
| 2       | 1                             | t=70.644L                | 0.979 6                 | t=160.370L               | 0.989 0                 |
| 3       | 1                             | t=65.491L                | 0.977 4                 | t=100.310L               | 0.996 6                 |

由表 3 得出相应土柱深度的渗流从湿润锋到达至渗流稳定的时间差  $\Delta t$ , 即  $\Delta t = t_1 - t_2$ 。试验土体干密度为 1.35、1.53、1.62 g/cm<sup>3</sup> 的重塑土饱和和体积含水率分别为 50.18%、43.54%、40.22%，结合试验各组检测点土体含水率随降雨时间的变化结果, 可得各试验组土柱含水率监测深度处渗流稳定时的土体饱和度, 见表 5。

表 5 土柱相应深度渗流稳定时饱和度与自湿润锋到达渗流稳定时的时间差  $\Delta t$

Tab.5 The seepage stability of the saturation and time starting from the moistening front reaching to the seepage stability at certain depths  $\Delta t$

| 相应土<br>柱深度<br>/cm | 第 1 组                  |                  | 第 2 组                  |                  | 第 3 组                  |                  |
|-------------------|------------------------|------------------|------------------------|------------------|------------------------|------------------|
|                   | 时间差<br>$\Delta t$ /min | 渗流稳定时<br>土体饱和度/% | 时间差<br>$\Delta t$ /min | 渗流稳定时<br>土体饱和度/% | 时间差<br>$\Delta t$ /min | 渗流稳定时<br>土体饱和度/% |
| 20                | 1 190                  | 78.32            | 2 510                  | 79.02            | 945                    | 83.69            |
| 50                | 2 040                  | 77.14            | 6 610                  | 80.86            | 3 260                  | 78.05            |
| 90                | 2 935                  | 81.11            | 8 025                  | 81.93            | 4 445                  | 80.06            |
| 140               | 3 955                  | 82.93            | 11 190                 | 81.17            | 4 565                  | 82.72            |
| 200               | 7 490                  | 77.72            | 18 325                 | 79.04            | 6 185                  | 80.26            |

由表 5 可看出, 土柱试验渗流稳定时, 土体饱和和含水率区饱和度约为 80%, 当  $\theta_s$  取土体饱和和体积含水率的 80% 时, 土体干密度为 1.62 g/cm<sup>3</sup>, 由式(11)得,  $q_{max} = 1.19$  mm/h, 与降雨模拟试验所得结果基本一致。

随着深度增大, 时间差  $\Delta t$  逐渐增大, 表明湿润区高度  $L-h$  随深度的增大而增大。由表 3 中渗流稳定区  $h$  到达土柱相应深度的时间  $t_2$  和表 5 中湿润锋深度  $L$  与降雨历时  $t$  拟合曲线, 得出渗流稳定区  $h$  到达土柱相应深度时所对应的湿润锋深度  $L$ , 并得出相应的  $h/L$  值见表 6。

表 6 渗流稳定区  $h$  到达一定深度时相应的湿润锋深度  $L$  与  $h/L$  值

Tab.6 When the seepage stability line  $h$  reaches the corresponding depth, the moistening front depth  $L$  and value of  $h/L$

| 土柱渗流<br>稳定区深<br>度 $h$ /cm | 第 1 组             |       | 第 2 组             |       | 第 3 组             |       |
|---------------------------|-------------------|-------|-------------------|-------|-------------------|-------|
|                           | 湿润锋深<br>度 $L$ /cm | $h/L$ | 湿润锋深<br>度 $L$ /cm | $h/L$ | 湿润锋深<br>度 $L$ /cm | $h/L$ |
| 20                        | 31.38             | 0.637 | 55.77             | 0.359 | 34.97             | 0.572 |
| 50                        | 77.64             | 0.644 | 136.10            | 0.367 | 82.84             | 0.604 |
| 90                        | 129.12            | 0.697 | 185.93            | 0.484 | 145.29            | 0.619 |
| 140                       | 199.13            | 0.703 | 308.52            | 0.454 | 208.35            | 0.672 |
| 200                       | 323.11            | 0.619 | 462.11            | 0.433 | 305.23            | 0.655 |

令  $a$  等于表 6 中相应试验组  $h/L$  值的平均

值, 当  $\theta_s$  取土体饱和和体积含水率的 80% 时, 将  $a$  值代入式(10), 可得对应的湿润锋形状参数  $m$  值, 见表 7。比较表 7 中湿润锋形状参数  $m$ , 3 组试验的  $m$  值均接近 3。当假定湿润锋形状为椭圆形时,  $m=3$ , 基本满足试验结果。当假定湿润锋形状为幂次方形、 $m=3$  时, 幂次数  $n=4$  基本满足试验要求。

表 7 将  $a$  值代入式(10)求出  $m$  值

Tab.7 Substitute the value of  $a$  into equation (10) to calculate the value of  $m$

| 试验<br>组 | 降雨强度<br>(mm·h <sup>-1</sup> ) | 湿润锋深度 L 与降<br>雨历时 t 拟合曲线 | 80%<br>$\theta_s - \theta_i$ | $a = h/L$ | $m$  |
|---------|-------------------------------|--------------------------|------------------------------|-----------|------|
| 1       | 2                             | t=64.205L                | 0.232 7                      | 0.660     | 4.24 |
| 2       | 1                             | t=70.644L                | 0.157 1                      | 0.419     | 2.32 |
| 3       | 1                             | t=65.491L                | 0.119 3                      | 0.624     | 4.42 |

### 4 结论

a. 在不积雨降雨条件下, 同一种黄土土样干密度和初始含水率一定、降雨强度一定时, 黄土土柱渗流湿润锋深度和渗流稳定区深度与降雨历时基本呈线性关系, 且湿润区高度  $L-h$  随渗流深度的增加逐渐增大, 黄土土柱垂直渗流湿润锋形状参数  $m$  的数值接近于 3。

b. 在不积雨降雨、同一黄土土样条件下, 降雨强度一定时土样干密度越大, 渗流稳定区深度  $h$  与湿润锋深度  $L$  的比值  $a$  的数值越大; 干密度一定时, 降雨强度越大,  $a$  值越大。

### 参考文献:

[1] 滕泉宏, 范立民, 向茂西, 等. 陕北黄土梁峁沟壑区地质灾害与降雨关系浅析—以陕北延安地区 2013 年强降雨引发地质灾害为例[J]. 地下水, 2016, 38(1): 155-157.

[2] Green W H, Ampt G A. Studies on Soil Physics Part I: The Flow of Air and Water Through Soils[J]. Journal of Agricultural Science, 1911(4): 1-24.

[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(5): 30-34.

[4] 王春颖, 毛晓敏, 赵兵. 层状夹砂土柱室内积水入渗试验及模拟[J]. 农业工程学报, 2010, 26(11): 61-67.

[5] PHILIP J R. The Theory of Infiltration: 4. Sorptivity and Algebraic Infiltration Equations[J]. Soil Science, 1957, 84(3): 257-264.

[6] 胡晋川, 谢永利, 王文生. 降雨条件下阶梯状黄土边坡稳定性试验[J]. 广西大学学报: 自然科学版, 2010, 35(1): 83-89.

(下转第 190 页)

外送体系及其利润分配模型[J].电力系统自动化, 2013,37(23):63-70.

2012 中国区域电网基准线排放因子的公告[EB/OL].[2012-01-13].https://wenku.baidu.com/view/698ae8ed81c758f5f61f6762.html.

[6] 国家发展和改革委员会应对气候变化司.关于公布

### Operation Optimization Model and Simulation Analysis for Power System in an Industrial Park

YANG Shen-bo, TAN Zhong-fu, TAN Qing-kun, LIN Hong-yu, Degejirifu, JU Li-wei

(School of Economics and Management, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

**Abstract:** Energy policies, such as carbon trading and green certificate trading, affect net income to varying degrees. In order to maximize economic benefits, it is necessary to rationally allocate power generation among different energy types and energy-consuming generators. By considering the energy policy and with the objective of maximizing net income, an economic optimization model of thermal power units' separate operation and multi-energy complementary operation in a certain park is established. Secondly, various scenarios are set up with carbon trading and green certificate trading as changing factors. Finally, an example is analyzed by using chaotic binary particle swarm optimization. The results show that under the influence of energy policies, it is necessary to increase the output of clean energy in order to improve the level of net income; Combined with energy policies, the output of power generation units in industrial parks has been adjusted, and the net income has also increased significantly.

**Key words:** carbon trading; green certificate; multi-energy complementary system in park; operation optimization

\*\*\*\*\*  
(上接第 12 页)

### Study on Rainfall Infiltration with No Accumulated Precipitation on the Ground and the Movement of Its Moistening Front in Loess Area

DU Yu-peng<sup>1a</sup>, TIAN Kan-liang<sup>1b,2</sup>, ZHANG Ai-jun<sup>1a</sup>, ZHANG Shi-can<sup>1a</sup>

(1a. College of Water Conservancy and Construction Engineering; 1b. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A & F University, Yangling 712100, China; 2. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling 712100, China)

**Abstract:** At present, the infiltration of rainfall in loess area has been studied deeply, but there are few studies on the infiltration of continuous rainfall with no accumulated precipitation on the ground and the movement of its moistening front. This paper designed and produced a set of simulation process system that can simulate vertical loess soil column under the condition of continuous rainfall without accumulated rainfall on the surface of the column. Three groups of unsaturated loess tests were conducted using the simulation process system under continuous rainfall with no accumulated precipitation on the loess column. A lot of results that vertical seepage stability depth of soil column with different dry density, depth of moistening front and seepage stability area changed with time and volume moisture content of monitoring points changed with time were got through the tests. Based on the hypothesis of Green-Ampt infiltration model, the seepage mode of moist front movement of soil column under continuous rainfall with no accumulated precipitation on the ground in loess area was established. The hypothesis and seepage mode was verified by the test. The result shows that the hypothesis parameter m of seepage moist front' shape movement of soil column is close to 3 under the condition of the test. The movement relationship of rainfall infiltration moistening front' depth and seepage stability area' depth in loess area under continuous rainfall with no accumulated precipitation on the ground was further revealed.

**Key words:** no accumulated rainfall; loess; pillar; infiltration; moistening front; shape parameter

\*\*\*\*\*  
(上接第 116 页)

### Pressure Fluctuation Characteristics of Hydraulic Turbine Runner with Negative Blade Dip Angle

GONG Kui<sup>1</sup>, ZHU Bao-shan<sup>2</sup>, HU Zan-ao<sup>3</sup>, ZHANG fei<sup>1</sup>

(1. Technology Center of State Grid Xinyuan Company, Beijing 100161 China ; 2. State Key Laboratory of Hydro Science and Engineering, Department of Energy and Power Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 3. Department of Energy and Power Engineering, Xihua University, Chengdu 610039, China)

**Abstract:** The pressure fluctuation characteristics of the runner with negative blade dip angle under the rated condition and the 50% load condition are researched in this paper. Based on a runner with negative blade dip angle in a certain pumped-storage power station, the 3D modeling software NX is used to build the computation domain. And then the ANSYS ICEM and TURBOGrid are applied to the mesh generation. Finally, the ANSYS CFX is used to numerical simulation to obtain the pressure fluctuation signals of each monitoring point. The results show that under the two operation conditions, the dominant frequency of the unit is the blade passing frequency. The amplitude of pressure fluctuation for negative dip angle blade increases along the negative z axis is obvious. The amplitude of the pressure fluctuation is increased first and then decreased under the two conditions. The maximum amplitude of the pressure fluctuation is at the vanless zone.

**Key words:** pump-turbine; negative dip angle runner; water turbine; pressure fluctuation