

# 黄土降雨入渗过程中 水分分布平衡点运动规律的研究

张学栋 姜述孟

(中国科学院西北水土保持研究所)

## 一、前言

研究黄土地区降雨入渗,不仅与引起侵蚀的地表径流有关,而且对研究黄土地区的降雨滑坡也具有理论上和应用上的重要意义。多年来,国内外科学家虽然对土壤入渗进行了大量的研究工作,并在理论上和应用上都取得了一定的成就,但一些现象仍未搞清,特别是关于黄土地区降雨引起滑坡的入渗问题,尚未见到有关这方面的文章。

滑坡的发生除去本身的地质构造以外,作为诱发滑坡发生的外因,主要是降雨(地震和融雪在黄土地区比较少见)。雨水入渗到不透水层之后,即在不透水层上集聚,一方面形成沿不透水层流动的壤中流,向低处流动,从而使土体与不透水层之间的摩擦系数降低;另一方面,土体在本身自重和雨水重量的作用下,则沿不透水层面向下滑动,达到一定程度后,即发生滑坡。因此,调查和了解雨水入渗到土壤中后是如何运动的,何时到达不透水层,壤中流的运动如何,是一个具有重要意义的课题。

我们实验的主要目的,在于搞清雨水入渗到土壤中后,何时到达不透水层,形成沿不透水层的壤中流。首先是要搞清雨水入渗到土壤中后,是如何向着土壤深层运动,亦即何时方可到达不透水层。

## 二、实验的理论依据和方法

日本防灾科学技术中心的富永雅树先生认为,对土中的某一点来讲,该点的电阻率与该处的水分含量有如下的关系:

$$\frac{\rho_1}{\rho_0} = \frac{(N_w) t_0}{(N_w) t_1} \quad (1)$$

式中:  $\rho_0$ 和 $\rho_1$ 分别为时刻 $t_0$ 和 $t_1$ 时的电阻率,  $(N_w) t_0$ 和 $(N_w) t_1$ 分别为时刻 $t_0$ 和 $t_1$ 时的水分量。当雨水在土中某一点入渗时,他根据式(1)得出如下两点结论:

1、如果该点的电阻率值在降雨后的某一时刻开始下降,即认为雨水入渗的峰值,此时已到达该点;

2、如果仍在进行降雨,而该点的电阻率值经过下降后变为一恒定值,即该点的电阻率值已不再随着时间的延长而再下降,那么就认为该点周围水分场的分布达到了平衡。这个达到平衡时的

点称为平衡点。

采用四电极法，一次即可将上述两个点同时测出。这是四电极法较之其它方法的优点所在。实验中，我们使用与西安交通大学共同研制的SWIP—I型土壤水量渗透测量仪进行量测。为方便读数起见，仪器的输出改用电压输出。

实验是在西北水土保持研究所侵蚀室降雨实验大厅进行。实验用的黄土，采用陕西省扶风县揉谷三队的塋土母质层黄土(来自自然剖面，深度距地面约10米)，试验前进行风干，经孔径1厘米的筛筛选备用。表1为该土的粒度分布。实验降雨采用现有的侧喷式喷头进行。喷咀孔板分别选用孔径为 $\phi 15$ 、 $\phi 12.8$ 、 $\phi 11.1$ 、 $\phi 9.5$ 、 $\phi 7.15$ 、 $\phi 5$ 毫米等6种。实验土槽长2米、宽50厘米、深60厘米，土层厚度为55厘米，土槽坡度为 $20^\circ$ 。

表1 试验土样颗粒级配表

| 各级颗粒含量 (%) |           |           |            |             |        |       | 苏联制<br>土壤类别 |
|------------|-----------|-----------|------------|-------------|--------|-------|-------------|
| 1—0.25     | 0.25—0.05 | 0.05—0.01 | 0.01—0.005 | 0.005—0.001 | <0.001 | <0.01 | 重壤土         |
| 2.7        | 5.5       | 43.8      | 12.8       | 15.0        | 20.2   | 48.0  |             |

每次实验前测定土层表面含水量。每次实验完后，将已用过的土取出，换上新土，以尽量保证实验土各层的含水量相同。共进行了10次实验，其中有5次实验表层土出现沟蚀。我们选用了没有沟蚀的5次实验结果进行分析。表2为这5次实验土层表面的前期含水量及降雨强度。

表2 土层表面的前期含水量及降雨强度

|              |       |       |       |      |       |
|--------------|-------|-------|-------|------|-------|
| 降雨强度 (毫米/小时) | 26.4  | 39.6  | 60    | 86.4 | 103.2 |
| 前期含水量 (%)    | 14.02 | 13.68 | 11.51 | 12.8 | 7.3   |

在土槽中部1米处的土层断面上，在装填新土时，即按5厘米的等间距，埋入了用直径3毫米的紫铜管制作的12个探头。第1个探头埋在土层表面处，第12个探头埋在土槽最底部。按照四电极法，每4个探头组成一个测点。本实验共9个测点，第一个测点距土层表面7.5厘米，用细导线将探头与SWIP—I型土壤水量渗透测量仪相连，进行连续扫描测定。相邻两个测点之间的测定间隔为5秒。表3为各测点距土层表面的距离。

表3 各测定点距土层表面的距离

|              |     |      |      |      |      |      |      |      |      |
|--------------|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 测点编号         | 1   | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    | 9    |
| 距土层表面的距离(厘米) | 7.5 | 12.5 | 17.5 | 22.5 | 27.5 | 32.5 | 37.5 | 42.5 | 47.5 |

### 三、实验结果和讨论

图1-a为1985年8月28日，图1-b为1985年9月18日的实验结果。降雨强度分别为103.2毫米/小时和26.4毫米/小时；喷咀孔板直径分别为 $\phi 9.5$ 和 $\phi 5$ 毫米两种。

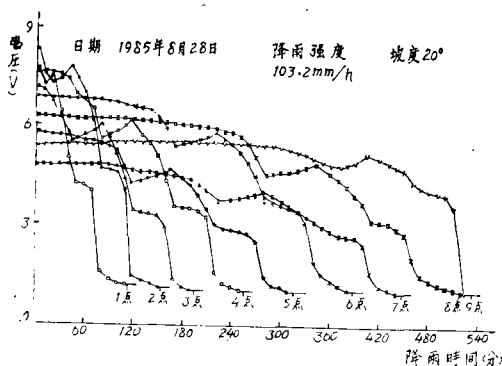


图 1-a 降雨入渗与时间的关系

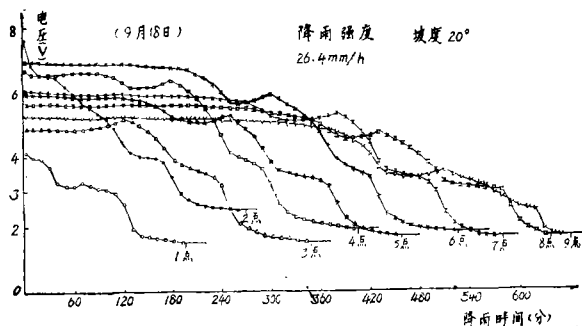


图 1-b 降雨入渗与时间的关系

图中 1、2…9 等数字分别代表从土层上部向土层深部的测点的编号。由该图可以看出：

1、不论大雨强（103.2毫米/小时）还是小雨强（26.4毫米/小时），尽管实验开始前各测点处的起始电压不一样（亦即初期含水量不一致），但当各测点达到水分分布平衡点状态时，其时的电压值却均变为一致。这说明在实验降雨终了时，土层内各点的含水量是均匀一致的。

2、若按降雨强度将各次实验中各测点达到水分分布平衡时的时间进行统计，其结果如表 4 所示。

表4 各测点达到水分分布平衡所需时间（分）

| 降雨强度（毫米/小时） | 各 测 点 编 号 |     |     |     |     |     |     |     |
|-------------|-----------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
|             | 1         | 2   | 3   | 4   | 5   | 6   | 7   | 8   |
| 26.4        | 190       | 250 | 320 | 380 | 440 | 510 | 570 | 630 |
| 39.6        | 145       | 195 | 250 | 310 | 350 | 420 | 480 | 545 |
| 60.0        | 95        | 120 | 155 | 205 | 245 | 300 | 355 | 390 |
| 86.4        | 80        | 120 | 150 | 190 | 230 | 270 | 300 | 350 |
| 103.2       | 80        | 125 | 170 | 220 | 285 | 350 | 420 | 475 |

分析表 4 即可看出：

（1）随着降雨强度的增加，各测点达到水分分布平衡所需之时间明显地在缩短，然而降雨强度103.2毫米/小时的实验的情况却是一个例外；

（2）由表 2 可知，降雨强度103.2毫米/小时的实验含水量在10%以下，很明显土中所含空气的阻力是不能忽略的。其它 4 次实验，土中含水量基本相差不大，都在10%以上。在这种含水量的情况下，降雨强度的大小对入渗影响较大；

3、将表 4 所列数据，在双对数坐标纸上标出，并进行一元回归分析，其结果如图 2 所示。图中实线为实测点线，虚线为计算点线，其回归方程为：

$$y = ax^b \quad (2)$$

式中：y为测点距土层表面的间距，单位为厘米；x为该测点达到水分分布平衡状态时所需之时间

同，单位为分钟；a、b分别为两个系数。表5为各降雨强度下的回归分析的系数及相关系数值，分析图2和表5可知：

（1）计算值与实测值之间相关性较好，因此方（2）基本上可用以描述各测点达到水分分布平衡状态时，测点位置与时间及降雨强度之间的关系；

（2）系数a反映曲线的截距，系数b反映曲线的斜率。如果说这两个系数与降雨强度有关，还不如说更与土层中的含水量密切相关。从表2看出，在降雨强度为86.4毫米/小时的情况下，由于土中含水量增加了11.21%，而导致a减少，b增加。其具体情况见表6。

表6中“+”表示增加，“-”表示减少。由表6可以看出，从降雨强度26.4毫米/小时

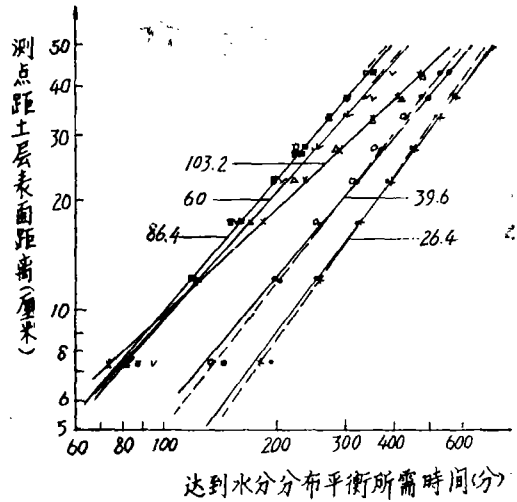


图2 测点达到水分分布平衡时间与降雨强度的关系

表5 回归系数及相关系数值

| 降雨强度<br>(毫米/小时) | 26.4   | 39.6   | 60     | 86.4   | 103.2  |
|-----------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| a               | 0.0048 | 0.0133 | 0.0499 | 0.0448 | 0.1249 |
| b               | 1.4174 | 1.2915 | 1.1382 | 1.1786 | 0.9511 |
| 相关系数R           | 0.9971 | 0.9953 | 0.9871 | 0.9989 | 0.9967 |

表6 降雨强度和土中含水量对回归系数a、b的影响

| 降雨强度 (毫米/小时)    | 26.4     | 39.6     | 60      | 86.4 | 103.2    |
|-----------------|----------|----------|---------|------|----------|
| 相邻两次降雨强度的增量(%)  | + 50.00  | + 51.52  | + 44.00 |      | + 19.44  |
| 相邻两次土中含水量的变化(%) | - 2.43   | - 15.86  | + 11.21 |      | - 42.97  |
| a的变化 (%)        | + 177.08 | + 275.19 | - 10.22 |      | + 155.94 |
| b的变化 (%)        | - 8.88   | - 11.87  | + 3.55  |      | - 19.3   |

到86.4毫米/小时止这4次降雨中，每次降雨强度所增加的量基本上是差不多的，但相应的土中含水量的变化却比较大，因而导致a和b的变化也比较大。

当然，上述分析仅是一个粗略的分析，只能看出一个大致的倾向，实际上这是一个比较复杂的关系，只有通过大量的实验，进行定量的分析后，才能阐明其中的变化规律。

4、不论是大雨强还是小雨强,从测点1开始,平衡点基本上以等速向土层深部移动。表7为土中相邻两测定点之间平衡点移动所需的时间。

表 7 土中相邻两测点间平衡点移动所需时间

| 雨 强(毫米/小时) | 1 - 2 | 2 - 3 | 3 - 4 | 4 - 5 | 5 - 6 | 6 - 7 | 7 - 8 |
|------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 26.4       | 60    | 70    | 60    | 60    | 70    | 60    | 60    |
| 103.2      | 45    | 45    | 50    | 65    | 65    | 70    | 55    |

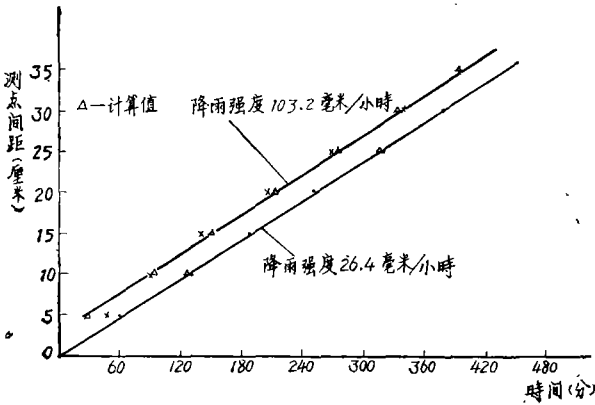


图 3 相邻测点间平衡点移动时,时间与间距累加分析结果

分析表7所列两组数据即可看出,在小雨强情况下,从第1测点开始直到第8测点为止,平衡点基本上以等速向着土层深部移动。在大雨强情况下,平衡点在土层深部的移动速率有所下降。这是因为这个实验中所用土的含水量只有7.3% (见表2),因而土中含有较多的空气。这些空气构成了阻止雨水渗入的阻力。将表7所列数据累加,并进行一元回归分析后,其结果如式3及图3所示。

其回归方程为:

$$y = xQ_1 + Q_2 \quad (3)$$

式中y为从第1测点算起的相邻两测点间的距离(厘米);x为时间(分); $Q_1$ 及 $Q_2$ 为系数,见表8。

表 8 将表7累加并回归分析后的相关系数和回归系数值

| 降雨强度(毫米/小时) | $Q_1$  | $Q_2$  | 相关系数R  |
|-------------|--------|--------|--------|
| 26.4        | 0.0791 | 0.0096 | 0.9998 |
| 103.2       | 0.0880 | 2.3988 | 0.9978 |

由表8及图3可知其相关性较好。

5、式(2)和式(3)虽然都是描述入渗过程的,但描述的过程不同。式(2)描述的是土层中的某一点,在从降雨开始起直到该点水分分布达到平衡时止的这一水分集聚过程的变化,而式(3)却是描述平衡点的移动过程。

由上述分析可知,除第一测点之外,如果要求得其它测点达到平衡时的时间,共有两种方法:其一是直接利用式(2)求出该点达到平衡时的时间;其二是首先根据式(2)求出第1测点达到平衡时的时间,再根据式(3)算出该点的时间,最后将两时间相加即得该点达到平衡时

的时间。表 9 列出了在两种降雨强度情况下，各测点达到平衡时的实测时间，根据式(2)算出的平衡时间(方法 1)、根据式(2)和式(3)联立后求得的时间(方法 2)。

表 9 两种求平衡点时间方法的比较

| 测点编号    | 1   |     | 2   |     | 3   |     | 4   |     | 5   |     | 6   |     | 7   |     | 8   |     |
|---------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
|         | A*  | B*  | A   | B   | A   | B   | A   | B   | A   | B   | A   | B   | A   | B   | A   | B   |
| 实测值(分)  | 190 | 180 | 250 | 125 | 320 | 170 | 380 | 220 | 440 | 285 | 510 | 350 | 570 | 420 | 630 | 475 |
| 方法 1(分) | 180 | 74  | 258 | 127 | 327 | 181 | 391 | 235 | 450 | 291 | 506 | 346 | 560 | 403 | 612 | 459 |
| 方法 2(分) | -   | -   | 243 | 105 | 306 | 166 | 370 | 222 | 433 | 286 | 496 | 346 | 559 | 407 | 622 | 467 |

A—降雨强度 26.4 毫米/小时的情况；B—降雨强度 103.2 毫米/小时的情况。

由表 9 明显可以看出，根据方法 2 所求得的时间，更接近于实测值。

6、对图 1 进一步分析即可发现，相邻两测点之间的电压值变化(亦即水分变化)，有如下的关系：当前一个测点的电压值开始急剧下降时，则相邻的下一个测点的电压值在急剧的上升。为明确起见将图 1-a 中 3、4、5 三个测点的变化曲线单独画出，如图 4 所示。

图 4 中  $A_{3,2}$  和  $A_{3,3}$  点代表第 3 测点电压值开始急剧下降及下降速度变为平缓之点； $A_{4,1}$ 、 $A_{4,2}$ 、 $A_{4,3}$  分别代表第 4 测点的电压值开始急剧上升、电压值急剧下降、电压值下降为平缓点； $A_{5,1}$ 、 $A_{5,2}$ 、 $A_{5,3}$  分别表示第 5 测点的相应各点。

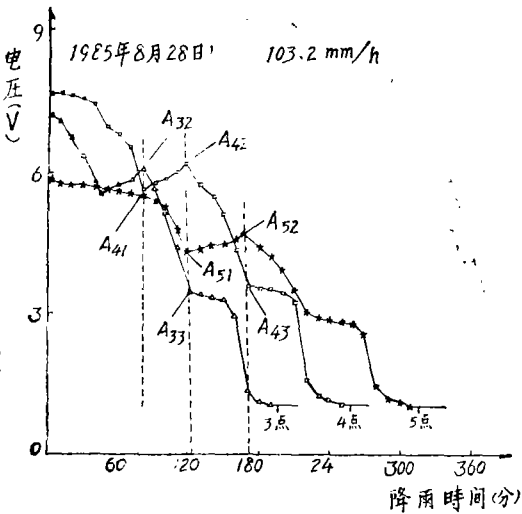


图 4 测点之间电压变化关系

由图 4 可知，当第 3 测点处于  $A_{3,2}$  点时，第 4 测点即处于  $A_{4,1}$  点；而当第 3 测点处于  $A_{3,3}$  状态时，第 4 测点则处于  $A_{4,2}$  点的状态。此时第 4 测点的电压值上升到顶点，此后即开始急剧下降，第 5 测点这时正处于  $A_{5,1}$  点的状态，即第 5 测点的电压值开始急剧上升。

当第 3 测点的电压值经过一段平缓下降再度急剧下降而达到不变化时，第 4 测点电压值急剧下降也就停止而变为平缓地下降。接着在第 4 和第 5 测点之间又继续重复存在于第 3 和第 4 测点之间的变化关系。每一测点的电压值急剧上升段，是由于电极极化现象所致。真正表示雨水入渗到达该点的时刻，应从电压值急剧下降开始，即图 4 上的  $A_{3,2}$ 、 $A_{4,2}$ 、 $A_{5,2}$  各点。

由以上分析可知，对每一个测点，当入渗的雨水从将要到达该点起，直到该点的水分分布达到平衡时为止，其电压值大致上经历了电压急剧上升(电极极化现象)→急剧下降→平缓下降→达到终值等几个阶段。而且除去第 1 个测点之外，其余的每一个测点都受相邻的上一个测点所处状态的影响，也就是说第 4 测点究竟何时处于  $A_{4,1}$ 、 $A_{4,2}$ 、 $A_{4,3}$ ，均受第 3 测点状态的影响。

上述各测点之间电压值的变化规律，以前在研究日本关东垆垆土的入渗问题时，曾观察到了这一奇特的现象。然而日本关东垆垆土的性质与中国黄土的性质差异较大，(下转第 37 页)

除上述主要技术措施外,为保护和促进林木生长,提高林分生产力,作为经营活动,应加强抚育管护,防治鼠害。同时,对该地区构成严重威胁的冰雹频繁袭击,除开展耐雹树种的选择外,建议地方政府采取措施进行预防。

表 4 尿素追肥对柠条和二色胡枝子生长的影响

| 处 理   | 柠 条 (直播)    |            |             |            | 二色胡枝子 (截干)  |            |             |            |
|-------|-------------|------------|-------------|------------|-------------|------------|-------------|------------|
|       | 平 均 高       |            | 平均地径        |            | 平 均 高       |            | 平均地径        |            |
|       | 增长量<br>(厘米) | 增长率<br>(%) | 增长量<br>(毫米) | 增长率<br>(%) | 增长量<br>(厘米) | 增长率<br>(%) | 增长量<br>(厘米) | 增长率<br>(%) |
| 尿素追肥  | 12.1        | 69.5       | 1.1         | 32.4       | 57.4        | 367.9      | 4.2         | 131.3      |
| 对 照   | 9.8         | 43.4       | 1.0         | 27.8       | 44.3        | 325.7      | 2.3         | 74.2       |
| 差 值   | 2.3         |            | 0.1         |            | 13.1        |            | 1.9         |            |
| 增 长 率 | 23.5%       |            | 10.0%       |            | 29.6%       |            | 82.6%       |            |

注: 5—8月每月各追肥一次。

(上接第63页)

特别易于入渗,因此上述现象每一变化阶段所需时间较短,当时未引起足够重视。由于黄土较日本关东垆土难于入渗,故所需时间较长,因而上述现象在黄土实验中较为明显。

如何从物理意义上解释上述变化规律,亦即如何用测点周围水分场的分布变化来解释上述现象,是一个亟待解决的课题。由于此次实验未测定土中含水量的变化,还难于解释此现象。

7、当降雨强度超过100毫米/小时,容易引起坡面地表沟蚀,尤其是所使用的这种侧喷式喷头,更容易造成沟蚀。沟蚀发生后,雨水则很快入渗到土层深部。

## 四、结 论

根据以上分析,可得出如下结论:

1、土层中各深度层,尽管起始含水量不同,但当各处的水分分布达到平衡状态时,各处的含水量变得一致。

2、水分分布平衡点在雨水入渗过程中,基本上以等速从土壤表层向深处移动。

3、所得出的求土层中某一点达到水分分布平衡状态所需时间的两种方法是可行的,但还得进一步验证。

4、土层中的某一点在雨水入渗过程中,该点周围水分场的变化过程大致为:

水分急剧增加阶段→水分缓慢增加阶段→水分急剧增加阶段→达到平衡,不再增加。

这次实验由于是首次利用四电极法对黄土雨水入渗进行研究,因而实验中存在的一些现象是没有料到的,例如雨水分段集聚的现象。式(1)和式(2)中各个系数的关系以及影响这些系数的因素是哪些,其关系如何等,都需要今后通过大量实验进一步搞清楚。