

# 黄土高原土壤入渗速率的研究\*

蒋定生 黄国俊

(中国科学院西北水土保持研究所)

## 摘要

根据黄土高原土壤入渗速率的明显地域差异,绘制了黄土高原土壤入渗速率分区图;文中对比了用双圈法测得的土壤稳定入渗速率与用水文资料推出的小流域土壤稳定入渗速率。

## 一、前言

黄土具有结构疏松,孔隙度较大的特点,加之本区地下水埋藏较深,包气带平均厚达50余米,在降雨产流方式上一般属于超渗产流。因此,研究黄土高原土壤入渗特性,对于洪水预报和土壤侵蚀预测预报和防治,以及水土保持措施的设计和配置,均有重要的意义。

黄土高原水土流失极为严重,它不仅是本区低产、贫穷落后的重要原因之一,而且也使黄河下游溃决泛滥的潜在危险日益增大。鉴此,近年很多专家指出<sup>[1-3]</sup>,应充分发挥黄土入渗速率较强的优势,提议把“拦蓄降雨,就地入渗”作为整治黄土高原的战略措施来考虑。但是,有关黄土高原土壤入渗速率的试验研究,在五十年代虽有一些零星资料,而有关这方面的系统研究至今尚未见报道。本工作主要是研究黄土高原土壤入渗速率水平变化的规律性,研究影响水向土中入渗的主导因素,以及地面为水平时的积水型入参与地面为坡地时的天然降雨入渗二者之间的关系。

土壤渗透的测试在野外进行,采用双圈法<sup>[4]</sup>。内圈的直径为35.5厘米,高25厘米,打入土中15厘米;外圈直径50.5厘米,圈高及打入土中深度与内圈相同。内外圈中维持土层深度为5厘米,加水用人工控制。试验点遍及陕西、甘肃、宁夏、豫西和山西等地,试验小区一般选择在侵蚀比较轻微的山顶、梁顶或塬面,土地利用形式为农地,也有林地和草地。

## 二、试验结果分析

### (一) 土壤入渗速率对时间关系的数学表达式

描述土壤入渗速率对时间关系的数学表达式比较著名的有 A. H. Костяков 双曲线和 R. H. Horton 逆指数两种方程<sup>[5,7]</sup>。用这两种公式对黄土高原的实测资料进行拟合,

\* 谢永生、刘梅梅、刘乐融等同志参加部分工作。

其结果都不理想。通过分析,获得如下经验公式来描述黄土高原土壤在积水型条件下的人渗速率变化曲线,即

$$f = f_c + \frac{f_1 - f_c}{t^\alpha} \quad (1)$$

式中  $f$  为时间  $t$  时的瞬时入渗速率(毫米/分);  $f_c$  为土壤稳定入渗速率(毫米/分);  $f_1$  为第 1 分钟末土壤的入渗速率(毫米/分);  $t$  为时间(分钟);  $\alpha$  为常数。分析表明,在黄土高原,该值最小为 0.863,最大为 2.567。

不难看出,当  $t = 1$  时, (1) 式左边等于  $f_1$ ; 当  $t \rightarrow \infty$  时,  $f = f_c$ , 因而该式的物理涵义也比较明确。

土壤系一多孔介质,当水流在其中运动时,无疑要受土壤的孔隙状况、前期含水量、质地、土壤结构的水稳性等土壤物理性质的影响。分析试验记录的结果,发现第 1 分钟末土壤渗透速率  $f_1$  与土壤表层容重  $d_1$ 、含水量  $Q_0$  (用百分数表示)关系比较密切;土壤稳定渗透速率  $f_c$  则与底层(20—50 厘米)土壤容重  $d_2$  及  $>0.25$  毫米的水稳性团粒含量  $m$  有密切关系。

为了探求影响  $f_1$  和  $f_c$  的主导因素,用逐步回归方法分析  $f_1$  与  $d_1$  和  $Q_0$  的关系,以及  $f_c$  与  $d_2$  和  $m$  之间的关系。在显著性水平为 0.05 的情况下,  $d_1$  与  $Q_0$  均进入  $f_1$  方程,而  $d_2$  和  $m$  均进入  $f_c$  方程,所考虑的回归是高度显著的。比较方程中的  $F$  值表明,表层土壤容重  $d_1$  是影响  $f_1$  大小的主导因素;20—50 厘米土层内大于 0.25 毫米水稳性团粒含量是决定  $f_c$  值大小的主导因素。所得回归方程为:

$$f_1 = 97.63 - 68.63d_1 + 0.30Q_0 \quad (2)$$

$$(r = 0.8215, F_{d_1} = 45.78, F_{Q_0} = 3.64)$$

和  $f_c = 6.41 - 5.44d_2 + 0.15m \quad (3)$

$$(r = 0.8519, F_{d_2} = 8.95, F_m = 43.82)$$

将(2)及(3)式代入(1)式中,则得估算土壤瞬时渗透速率的经验公式:

$$f = 6.41 - 5.44d_2 + 0.15m + (91.21 - 68.63d_1 + 5.44d_2 + 0.30Q_0 - 0.15m)t^{-\alpha} \quad (4)$$

从黄土高原的 38 个样本中,通过频数分布计算表明,  $\alpha$  在 1.0765—1.2895 范围内的相对频数为 0.263;  $\alpha$  在 1.2895—1.5025 范围内的相对频数为 0.474;  $\alpha$  在 1.5025—1.7155 范围内的相对频数为 0.184, 三种相对频数之和为 0.921, 今取在 1.0765—1.7155 之间的所有  $\alpha$  值进行平均, 则得  $\alpha = 1.364$ 。黄土高原水源缺乏,进行渗透试验很不容易,但(4)式中四个简单土壤物理性质参数在野外很容易测得,据此即可估算出该种土壤的瞬时渗透速率,从而节省人力物力。

## (二) 黄土高原土壤入渗速率的水平变化规律

从试验结果来看,黄土高原土壤入渗速率的大小,是具有明显的地域性差异。根据土壤入渗速率的地域分异的客观规律,结合一定的自然条件特点,暂将黄土高原黄土覆盖(石质山地除外)的地区划分为五个一级土壤入渗速率区。为了便于进一步研究,又将包括范围较广的第四区划分为四个二级区(参见表 1 及图 1)。

I. 子午岭、黄龙山土壤入渗速率极高区 本区还包括崂山及吕梁山南段的部分地

方。区内次生梢林茂密，枯枝落叶层厚 2—6 厘米，结构疏松。土壤稳定入渗速率在 5—12 毫米/分之间，初渗介于 40—60 毫米/分。

II. 华家岭、董志塬土壤入渗速率很高区 本区还包括陕西秦岭北麓立茬土分布地区，以及宜君和晋南部分地方。土壤稳定入渗速率在 1.35—3.50 毫米/分之间，第 1 分钟末土壤入渗速率平均在 28.5 毫米/分左右。

III. 延安等地土壤入渗速率较高区 本区主要包括陕西境内的延安、榆林两地区的一部分，以及山西汾河盆地、大同盆地的部分地区。土壤稳定入渗速率为 1.15—1.30 毫米/分，第 1 分钟末之初始入渗速率平均为 23 毫米/分。

IV. 长城沿线、黄河峡谷和泾洛渭台塬土壤入渗速率一般区 划分四个二级区，即 IVa. 固原平凉区：本区主要包括六盘山、陇山以东，董志塬以西的部分地区。土壤稳定入渗速率在 1 毫米/分左右，第 1 分钟末之初始入渗速率平均为 25 毫米/分。IVb. 黄河峡谷区：本区分布于黄河龙门至河曲两岸的晋陕峡谷地带，汾河与太行山之间的晋东南部分地域也包括在本区范围之内。该区土壤稳定入渗速率在 0.9—0.6 毫米/分之间，初始入渗速率约 18 毫米/分。IVc. 泾洛渭台塬区： 本区与渭北旱塬的地理位置大体相当。区

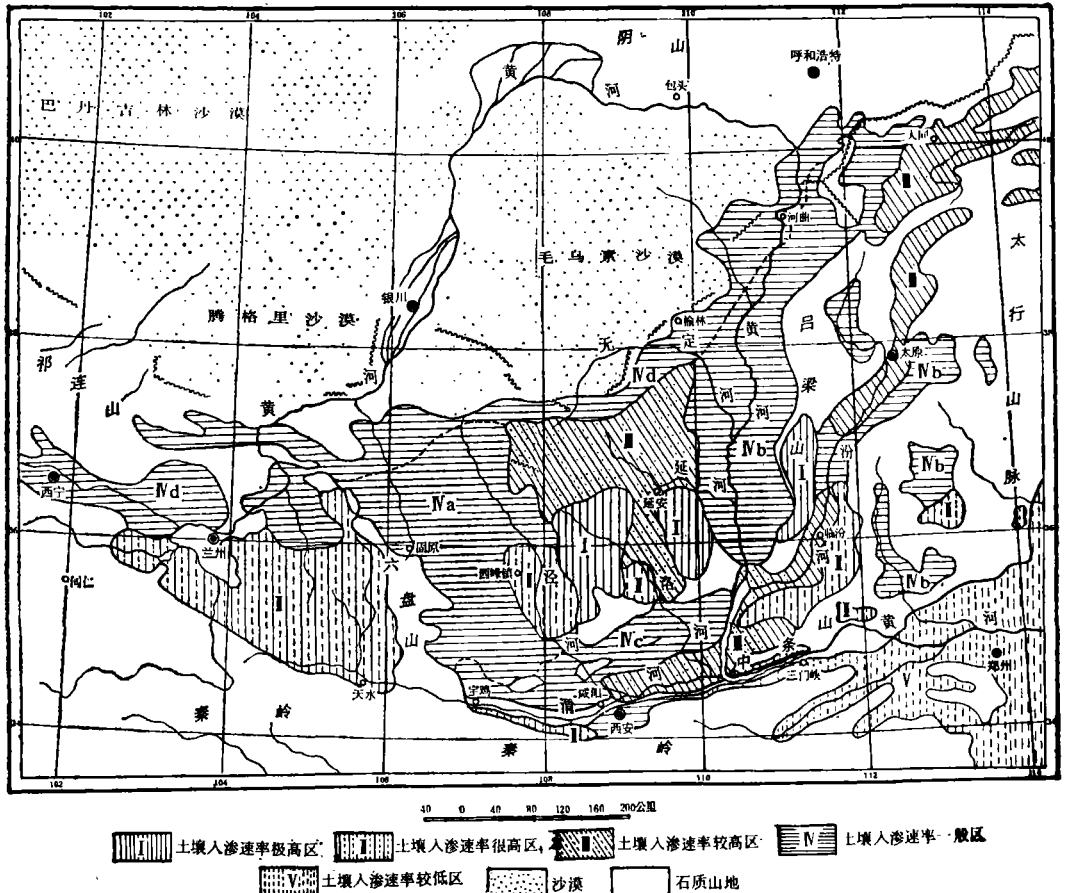


图 1 黄土高原土壤入渗速率分区略图

Fig. 1 Sketch map of the filtration rate of the soils on the Loess Plateau

表 1 黄土高原土壤入渗速率分区系统及主要参数

Table 1 The divisional system of the filtration rate of soils and the main parameters on Loess Plateau

一级区 1st grade regions	二级区 2nd grade regions	主要参数		
		稳定入渗速率 (mm/min) Steady filtration rate	表层土壤容重 (g/cm <sup>3</sup> ) Volume weight	>0.25 毫米水稳性 团粒含量* (%) Stable aggregates >0.25mm
I. 子午岭、黄龙山土壤入渗速率极高区		5—12	0.63—0.87	$\frac{67.9-79.9}{31.7-67.9}$
II. 华家岭、董志塬土壤入渗速率很高区		1.35—3.50	0.98—1.18	$\frac{21.6-61.4}{32.9-49.9}$
III. 延安等地土壤入渗速率较高区		1.15—1.30	1.09—1.20	$\frac{8.5-27.8}{6.0-23.3}$
IV. 长城沿线、黄河峡谷和泾洛渭台塬土壤入渗速率一般区	IVa. 固原平凉区	0.92—1.08	1.07—1.14	$\frac{15.1-17.6}{12.6-19.7}$
	IVb. 黄河峡谷区	0.6—0.9	1.10—1.30	$\frac{4.3-16.0}{2.5-13.1}$
	IVc. 泾洛渭台塬区	0.60—0.75	1.10—1.25	$\frac{8.4-17.4}{9.7-24.8}$
	IVd. 长城沿线区	0.5—0.6	1.11—1.26	$\frac{2.9-14.1}{2.10}$
V. 陕东、豫西土壤入渗速率较低区		<0.50	1.09—1.14	$\frac{20-23.0}{10.9-24.9}$

\* 分子表示表层土壤团粒含量；分母表示 20—50 厘米深度土壤中团粒含量。

内土壤质地比较粘重，<0.01 毫米的物理性粘粒含量，在 0—20 厘米土层内占 40—50%，在 30—50 厘米土层内含 50%。土壤稳定入渗速率介于 0.6—0.75 毫米/分，第 1 分钟末之初始入渗速率可达 15—18 毫米/分。IVd. 长城沿线区：这是紧靠毛乌素沙漠和腾格里沙漠南缘的一条狭长地带。植被稀疏，土壤结构差。稳定入渗速率为 0.5—0.6 毫米/分，第 1 分钟末之初始入渗速率小于 12.5 毫米/分。

V. 陕东、豫西土壤入渗速率较弱区 本区土壤入渗速率较低，稳定入渗速率小于 0.5 毫米/分，初始入渗速率在 20 毫米/分左右。

### (三) 试验值与用流域水文资料推算值之比较

双圈法所测得的土壤入渗速率，是有一定地表积水条件下的积水型入渗速率，或称有压入渗速率，与天然降雨条件下的人渗速率相比，二者有一定差异。前者入渗条件是，试区基本为水平，且在整个人渗过程中，地面不受雨滴的打击破坏作用；而天然降雨条件下的人渗，试区地面倾斜起伏，下垫面状况复杂，降雨入渗时，产流之前，地面并无水层覆盖，是一种无压入渗，而且土壤表面遭到雨滴的打击破坏作用，土壤孔隙被土粒封堵，土壤入渗速率很快被降低。因此，倘能找出二者之间的关系，就会使试验资料更具有生产实用价值。

在超渗产流情况下，要知道降雨时某一小流域任意时刻土壤的平均入渗速率，可通过分析降雨和径流的记录来解决。

试验研究表明<sup>[4]</sup>, 土壤的入渗速率  $f$  与上层土壤含水量  $Q$  有关, 亦即

$$f = f(Q) \quad (5)$$

而入渗期间渗入土壤中的水量可以看作是  $Q$  的增量, 即

$$\left. \begin{aligned} dQ &= f(Q)dt & i > f \\ dQ &= idt & i < f \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

式中  $i$  是降雨强度。

$f$  与  $Q$  的关系可通过实测  $f$  和  $Q$  建立, 也可运用流域实测水文资料推求。我们用陕西绥德县韭园沟流域内的想她沟和团圆沟的实测水文资料<sup>1)</sup>, 来推求这两条小流域的上层 (0—50 厘米深度) 土壤含水量和入渗速率的关系曲线。

想她沟是非园沟内一条治理沟。断面以上流域面积 0.454 平方公里。流域内坡面面积占 75.6%, 沟壑面积占 24.4%。在坡面上, 治理面积占总面积的 63.6%, 其中工程措施占 52.3%, 生物措施 11.3%。

团圆沟与想她沟相邻, 是一条对比沟。断面以上流域面积 0.491 平方公里。流域内坡面面积占 45.5%, 沟壑占 54.6%。坡面已治理 11.8%。

根据《中国湿润地区洪水预报方法》<sup>[4]</sup> 介绍, 推求流域  $f$  与  $Q$  的关系曲线程序如下:

首先, 从观测记录中挑选出有代表性的洪水场次, 绘出洪水的流量和雨量过程线。然后由流量过程线算出此场洪水的径流深  $R$ 。再在雨量过程线上以某一入渗速率  $f$  平割, 使超过该速率的雨量恰好等于  $R$ 。此  $f$  值即被看作为超渗时段的土壤平均入渗速率。另外, 绥德县气象站离这两条小沟不远, 我们采用该气象站的土壤水分观测资料, 作为这两条沟各次降雨对应时期的土壤前期含水量  $Q_0$  的估算值, 该值加上超渗产流刚刚开始之前下渗的降水量  $I$ , 近似当作超渗产流一开始时的土壤含水量  $Q$ , 即  $Q = Q_0 + I$  (由于地表浅凹积水, 严格说来,  $Q$  要小于  $Q_0 + I$ ), 它与入渗速率相对应。依此求出各次洪水的  $f$  与  $Q$  的对应值, 作图便得  $f$  与  $Q$  的相关曲线 (图 2)。从图 2 可以看出, 在这两条小流域内, 与土壤入渗速率关系密切的上层土壤含水量的范围在 100 毫米左右。当  $Q \geq$

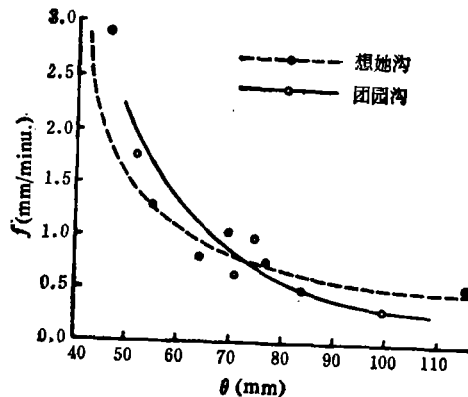


图 2 想她沟与团圆沟流域土壤平均入渗速率曲线

Fig. 2 The curve of filtration rate of soils at Xiangtiegou and Tuanyuanguo

1) 参见陕西省水土保持径流测验资料 (1954—1976 年, 上册), 陕西省水土保持局汇编。

100 毫米时,  $f$  值基本稳定不变, 这时  $f$  值分别为 0.3 毫米/分和 0.55 毫米/分。

由图 1 可知, 韭园沟属于第 IV 区的第二区, 根据在绥德县的实测资料, 土壤稳定入渗速率为 0.9 毫米/分, 与团圆沟和想她沟相比, 二者稳定入渗速率的比值分别为 3 和 1.64。从表 2 可以看出, 在所列资料中, 双圈法测得的土壤稳定入渗速率要比用水文资料推算出来的数值大 1.6—3.0 倍。

表 2 双圈法测得的土壤稳定入渗速率与用流域水文资料推算值之比较

Table 2 Comparison between the soil steady infiltration rate values determined by two-circle and hydrological data methods

地 点 Localities	双圈法测试结果 $f_c$ (mm/min) By two-circle method	用水文资料推算值 $f'_c$ (mm/min) By hydrological data	$\frac{f_c}{f'_c}$
子洲径流站团山沟流域**	0.90	0.35	2.57
山西浑河流域**	1.20	0.40	3.00
团圆沟流域	0.90	0.30	3.00
想她沟流域	0.90	0.55	1.64
陕西杨陵镇	0.60	0.30*	2.00

\* 扰动土室内模拟试验, 7 种坡度下试验结果平均值<sup>[6]</sup>。

\*\* 华东水利学院资料。

### 三、结 论

1. 黄土高原土壤入渗速率有明显的地域差异。高值区分布在高原腹地的子午岭、黄龙山、崂山等梢林地区; 其次是土壤结构良好, 肥力水平较高的黄麻土、黑麻土、黑垆土和立茬土地区(华家岭、董志塬、陕西秦岭北麓等地)。

2. 土壤入渗速率与土壤容重、含水量, 以及  $>0.25$  毫米的水稳性团粒含量关系密切。

3. 用水文资料推求出来的  $f$  与  $Q$  的关系, 能真实地反映流域的下垫面特征和降雨结构(如雨型、降雨强度、雨滴粒径)的综合影响, 更能概括整个流域土壤的入渗特性。根据已有资料对比分析表明, 用双圈法测得的土壤稳定入渗速率要比用水文资料推算的流域土壤稳定入渗速率约大 1.6—3.0 倍。

### 参 考 文 献

- [1] 黄秉维, 1983: 谈黄河中游土壤保持问题。中国水土保持, 第 1 期, 第 10 页。
- [2] 朱显谟, 1984: 黄土高原土地的整治问题。水土保持通报, 第 4 期, 第 1 页。
- [3] 陈永宗, 1984: 一项具有战略意义的水土保持技术措施。中国水土保持, 第 1 期, 第 5 页。
- [4] 华东水利学院, 1978: 中国湿润地区洪水预报方法。水利电力出版社。
- [5] 方正三等合著, 1958: 黄河中游黄土高原梯田的调查研究。科学出版社。
- [6] 蒋定生等, 1984: 地面坡度对降水入渗影响的模拟试验。水土保持通报, 第 4 期, 第 10 页。
- [7] Kirkby, M. J., 1978: Hillslope Hydrology. John Wiley and Sons, New York.

## STUDY ON THE FILTRATION RATE OF SOILS ON THE LOESS PLATEAU OF CHINA

Jiang Dingsheng and Huang Guojun

(Northwestern Institute of Soil and Water Conseration, Academia Sinica)

### Summary

The filtration rate of soils on Loess Plateau is different in various regions. In accordance with the steady infiltration rate of the soils, Loess Plateau is divided into five regions of grade-I and four regions of grade-II. The regions of the highest filtration rate are located in Ziwuling, Liaoshan, Huanglongshan and the southern sector of Luliangshan Mt. on the central of the Plateau generally covered by secondary broad-leaf forests of abores or brushes, the soil surface is commonly covered by a thick layer of litters; with good structure and greater porosity, the soils are the highest in filtration rate. The regions of higher filtration rate include Hujialing, Dongzhiyuan of Gansu, Yijun, Zhouzhi, Meixian and Changan of Shaanxi, and Yicheng, Quwo of Shanxi.

Results obtained showed that the relationship between the infiltration rate of soils and time can be described by the follow equation:

$$f = f_c + \frac{f_1 - f_c}{t^\alpha}$$

Where  $f$  is instantaneous infiltration rate ( $IR$ ),  $f_c$  the steady minimum  $IR$ ,  $f_1$  the initial maximum  $IR$ ,  $\alpha$  a constant, and  $t$  is time.

It is found that the ratio for steady  $IR$  calculated from hydrological data to that obtained by two-circle method is about 1.6—3.0.