

# 侵蚀土壤地表径流和土壤渗透的研究

杨艳生 史德明 姚宗虞

(中国科学院南京土壤研究所)

我国南方水土流失区属水蚀区,地表径流是引起土壤侵蚀的主要动力。研究不同土壤在特定降雨条件下,降雨持续时间与地表径流的关系、土壤渗透时间与渗透速度的关系、渗透时间与渗透总量的关系,掌握地表径流和土壤渗透规律,揭示地表径流、土壤渗透与土壤环境、土壤性质的内在联系,可为保护、改良土壤,防治土壤侵蚀,以及进行侵蚀预报提供理论依据。为此,我们在采用渗透筒法进行土壤渗透性研究<sup>[6]</sup>的基础上,进一步采用人工降雨方法,对侵蚀土壤地表径流和土壤渗透进行研究。

## 一、测试方法

用渗透筒法<sup>[7]</sup>进行测试,虽能对比不同土壤的渗透性,但是,由于测试条件的限制,测得的渗透量比实际土壤的渗透量要大<sup>[8]</sup>。而采用人工降雨方法,可以使测试在更接近自然降雨条件下进行,并可同时掌握地表径流与土壤渗透情况。

1. 人工降雨器装置。用长为1米,内径为2.5厘米的7根铝管,平行排列成一米见方的降雨架。在每根铝管上,相隔15厘米装上孔径为1毫米的针管,这样,在一米见方内共装有出水管42根。降雨架安置在距测试面中心位置1米高处,针管朝下;另有盛水桶与降雨架接通,并用桶的安置高度和消水量控制降雨强度,模拟出相当于降雨强度0.25, 0.30, 0.50, 0.75毫米/分的出水量。

2. 观测项目。测试在不同降雨强度、不同土壤、不同植被和坡度等条件下进行。记录开始出现径流的时间,降雨持续时间,液体径流量、固体径流量,并算出地表径流系数。根据测定资料,就可以导出在各测定条件下的相应关系方程。

3. 测定地点的选择。测试工作是在江西省赣南地区兴国县进行的。赣南地区的土壤侵蚀状况与我国南方土壤侵蚀区类似,而兴国县在赣南亦具有广泛的代表性。测试土壤选择在侵蚀严重,分布广泛的土类上。其中包括发育于花岗岩母质、第四纪红土母质的红壤和发育于紫红色砂页岩的紫色土;植被类型考虑了林、灌、草,天然植被和人工植被,以及不同植被覆盖度等条件;考虑到操作的方便,测试均在地面坡度 $20^\circ$ 或更平缓地段进行。

## 二、测试数据的处理

通过人工降雨测试,从出现地表径流时起,每隔10分钟测定出分期降水量、分期径流量、径流系数、渗透速度和渗透总量,并以此作为基本资料,推导出如下关系<sup>[1,3,5]</sup>。

1. 降雨持续时间与地表径流系数的关系。从测试结果可知,降雨之初并不立即产生地表径流,而是经过一定时间(通常是几分钟至十几分钟不等)以后,才出现径流,并且径

流量由小而大,一般至一小时左右,径流系数基本稳定,间隔单位时间后,其变化很小。将测试结果用降雨持续时间( $T$ )为横坐标,相应时间的径流系数( $W$ )为纵坐标,各测定值在这二维空间的坐标点的连线,呈现出形如  $W = aT^b$  曲线的形状。因此,降雨持续时间与地表径流系数的关系,就可用这一形式的方程来描述。以 24 号测点为例,根据实测径流系数所作的关系曲线,如图 1。该曲线的拟合方程和根据方程计算的径流系数列于表 1。

表 1 不同渗透时间的径流系数

Table 1 The runoff coefficient in different time duration

渗透时间 $T$ (min) Time	5	15	25	35	45	55	65	75	85	95	105	115
径流系数观测值 $W'$ (%) Coefficient (Tested)	8.5	17.7	23.3	24.0	28.5	30.8	33.5	35.4	36.5	37.4	38.4	39.3
径流系数计算值 $W$ (%) Coefficient (Calculated)	9.4	16.3	20.7	24.2	27.3	30.0	32.4	34.7	36.8	38.8	40.7	42.4

关系方程:  $W = 4.540T^{0.471}$   $S^* = 1.759$

\*  $S$  为剩余标准离差,下表同。

2. 土壤渗透量的计算。测试地块面积定为 1 万厘米<sup>2</sup>,当降雨强度确定后,就能计算出一定时间内的降水量,从而计算出土壤渗透量:

$$M_t = 10000TS_t \left(1 - \frac{W_t}{100}\right)$$

式中  $M_t$  为降雨后  $t$  时间的土壤渗透量(毫升); 10000 为测试区面积(厘米<sup>2</sup>);  $T$  为降雨持续时间(分);  $S_t$  为降雨强度(厘米/分);  $W_t$  为降雨后  $t$  时间的径流系数(%)。

3. 土壤渗透速度的计算。在一段时间内,渗透速度是随时间而变化的。降雨初期,渗透速度快,但渗透时间延长,渗透速度就逐渐降低,约 90 分钟以后达到稳定的渗透速度。由于瞬时渗透速度难于测得,故这里的渗透速度指的是两次观测间的平均渗透,它可由下式算出:

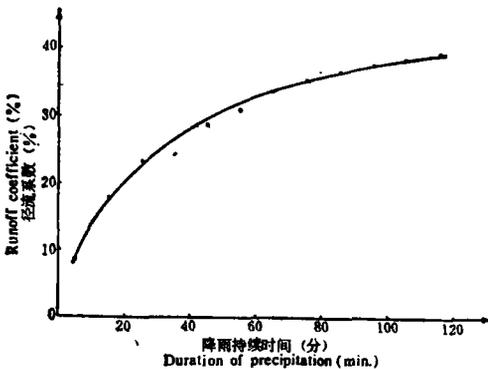


图 1 降雨持续时间与径流系数的关系曲线  
Fig. 1 The curve between raining duration and runoff coefficient

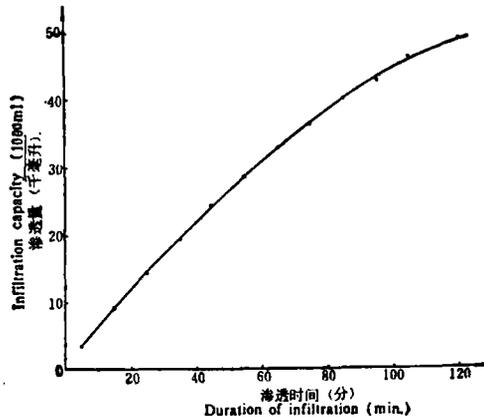


图 2 渗透时间与渗透量的关系曲线  
Fig. 2 The curve between infiltration time and its capacity

表 2 不同渗透时间的渗透量和渗透速度

Table 2 The infiltration capacity and its rate in different time duration

渗透时间 $T$ (min) Time	5	15	25	35	45	55	65	75	85	95	105	115
渗透量 $M'$ (l) Infiltration capacity (Tested)	3.40	9.45	14.90	19.91	24.54	28.85	32.87	36.61	40.10	43.36	46.40	49.23
渗透量 $M$ (计算值) Infiltration capacity (Calculated)	3.39	9.61	15.18	20.20	24.73	28.87	32.64	36.10	39.29	42.22	44.95	47.48
渗透速度 $V'$ (mm/min) Infiltration velocity (Tested)	0.68	0.61	0.55	0.50	0.46	0.43	0.40	0.37	0.35	0.33	0.30	0.28
渗透速度 $V$ (计算值) Infiltration velocity (Calculated)	0.80	0.58	0.50	0.46	0.42	0.40	0.38	0.37	0.35	0.34	0.33	0.32

关系方程:  $M = \left[ 0.00862 + \frac{1.431}{T} \right]^{-1}$ ,  $S = 0.875$ ;  $V = 1.2417T^{-0.287}$ ,  $S = 0.499$

$$V = \frac{10 M_{t_2-t_1}}{10000(t_2 - t_1)}$$

式中  $V$  为渗透速度(毫米/分);  $M_{t_2-t_1}$  为  $t_1$  与  $t_2$  两相邻观测时间内的土壤渗透量之差(厘米<sup>3</sup>);  $t_1$ ,  $t_2$  分别为前一次与后一次的观测时间(分)。

4. 不同渗透时间与渗透量、渗透速度的关系。从实测结果可以看到, 渗透开始时, 渗透速度较快, 单位降雨时段内的渗透量也较大, 并随降雨时间的延长而逐渐减小。以 24 号测点的渗透量和渗透速度为例(见表 2), 以渗透时间( $T$ )作  $x$  轴, 分别以渗透量( $M$ )和渗透速度( $V$ )作  $y$  轴, 相应量在二维空间的排列位置, 呈指数曲线、双曲线模型(见图

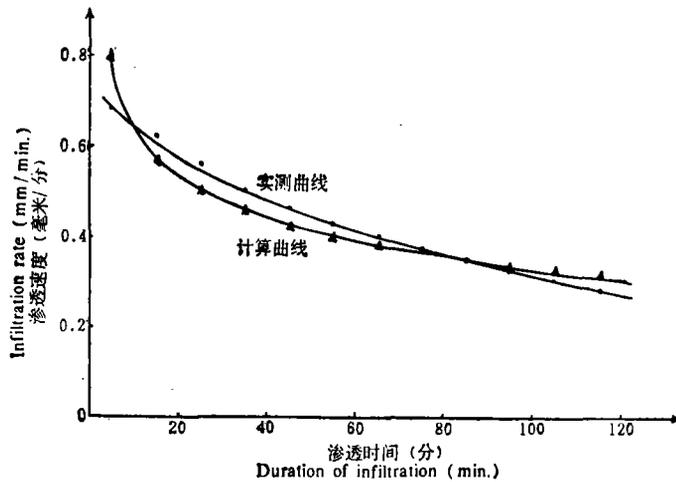


图 3 渗透时间与渗透速度的关系曲线

Fig. 3 The curve between infiltration time and its rate

表 3 各测点关系

Table 3 Constants of the relation equations

	测点编号 No. of plots	地面坡度 Slope	降雨强度 Rainfall intensity	固体径流重量 Weight of solid flow (g)	开始出现径流时间 (min) Time of runoff beginning	时间与径流系数关系方程常数 Constant of the equation $W=aT^b$		不同时间的径流系数% Runoff coefficient in different time duration (%)					时间与渗透速度关系方程常数 Constant of the equation $V=aT^{-b}$	
						a	b	5分	15分	30分	60分	120分	a	b
I	14	15°	0.5	1.79	2	1.651	0.725	5.30	11.76	19.44	32.13	53.11	1.875	0.600
	23	15°	0.50	0.65	4	7.622	0.350	13.39	19.67	25.07	31.95	40.72	0.636	0.197
	25	15°	0.50	0	47	0.0442	0.560	0.11	0.20	0.30	0.44	0.65	—	—
II	20	15°	0.30	0.35	12	3.778	0.349	6.63	9.72	12.38	15.77	20.09	0.320	0.0737
	23	15°	0.50	0.65	4	7.622	0.350	13.39	19.67	25.07	31.95	40.72	0.636	0.197
	24	15°	0.75	1.70	5	4.540	0.471	9.69	16.26	22.53	31.23	43.29	1.264	0.287
III	2	10°	0.25	3.95	18	2.507	0.510	5.70	9.98	14.21	20.23	28.81	0.330	0.161
	11	15°	0.25	3.67	15	0.536	0.877	2.20	5.76	10.58	19.44	35.70	0.499	0.301
IV	19	9°	0.30	0.15	16	0.357	0.793	1.28	3.06	5.30	9.18	15.90	0.373	0.100
	20	15°	0.30	0.35	12	3.778	0.349	6.63	9.72	12.38	15.77	20.09	0.320	0.0737
	21	20°	0.30	1.35	6	8.992	0.327	15.22	21.80	27.35	34.30	43.03	0.377	0.205
V	28	15°	0.25	5.00	5	13.025	0.244	19.29	25.22	29.87	35.37	41.89	0.264	0.157
	32	15°	0.75	9.25	9	0.203	1.099	1.19	3.98	8.53	18.27	39.13	2.061	0.411
	33	20°	0.75	—	6	33.810	0.0767	38.25	41.62	43.89	46.28	48.81	0.517	0.0764
VI	31	5°	0.25	0	22	0.0457	1.056	0.25	0.80	1.66	3.45	7.18	0.281	0.0486
	33	20°	0.75	—	6	33.810	0.0767	38.25	41.62	43.89	46.28	48.81	0.517	0.0764
VII	36	10°	0.25	—	30	$984 \times 10^{-6}$	2.144	0.03	0.33	1.45	6.39	28.23	0.651	0.357
	37	15°	0.25	—	20	0.0332	1.460	0.35	1.73	4.76	13.09	36.04	0.604	0.347
VIII	37	15°	0.25	—	20	0.0332	1.460	0.35	1.73	4.76	13.09	36.04	0.604	0.347
	40	15°	0.75	—	20	2.555	0.586	6.56	12.49	18.75	28.14	42.25	1.371	0.305
IX	41	15°	0.25	—	17	0.0705	1.340	0.61	2.66	6.72	17.02	43.08	0.787	0.459
	42	15°	0.25	—	7	2.566	0.650	7.30	14.92	23.41	36.73	57.64	0.839	0.561

2、图 3), 并可分别用方程  $V = aT^{-b}$ ,  $M = [a + b/T]^{-1}$ , ( $b > 0$ ), 与之相拟合。

5. 各关系方程拟合效果检验。表 3 为 18 个测点的相应方程, 是根据实测的 10—14 对数据处理后得出的。其中  $T$  表示时间,  $W$ 、 $V$ 、 $M$  分别表示径流系数、渗透速度和渗透总量。为了检验各方程的拟合效果, 分别计算出相应值的剩余标准离差值(S)。结果表明, 径流系数各实测值与计算值计算出的 2S 值有 60% 小于 5, 40% 为 5—10, 说明应用拟合方程得到的径流系数计算值, 与实测值比较, 其误差 95% 以上都不超过 10%, 多数误差 不超过 5%。渗透速度的 2S 值不超过 0.10, 渗透总量 2S 值不超过 5.0。可见各方程的拟

## 方程的常数项值

for 18 experimental plots

不同时间的渗透速度 (毫米/分) Infiltration rate in different time duration (mm/min)					时间与渗透总量关 系方程常数项 Constant of the equation $M = \left[ a + \frac{b}{T} \right]^{-1}$		不同时间的渗透总量 (千毫升) Infiltration capacity in different time duration (1)					植被类型 Type of vegetation	母质 Parent rock
5分	15分	30分	60分	120分	a	b	5分	15分	30分	60分	120分		
0.71	0.37	0.24	0.16	0.11	0.0163	2.026	2.37	6.61	11.93	19.97	30.14	风化物光板地	
0.46	0.37	0.33	0.28	0.25	0.0120	2.264	2.15	6.14	11.43	20.11	32.30	林下光板地	
0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	$159 \times 10^{-6}$	2.000	2.50	7.49	14.96	29.86	59.43	灌木林地	
0.28	0.26	0.25	0.24	0.23	0.00692	3.549	1.40	4.11	7.99	15.14	27.4	林下光板地	花岗岩
0.46	0.37	0.33	0.28	0.25	0.0120	2.264	2.15	6.14	11.43	20.11	32.40	林下光板地	
0.80	0.58	0.48	0.39	0.32	0.00862	1.431	3.39	9.61	17.75	30.80	48.67	林下光板地	
0.26	0.21	0.19	0.17	0.15	0.0140	4.182	1.18	3.42	6.52	11.95	20.47	红土光板地	
0.31	0.22	0.18	0.15	0.12	0.0164	4.011	1.22	3.52	6.66	12.01	20.07	红土光板地	
0.32	0.29	0.27	0.25	0.23	0.00532	3.354	1.48	4.37	8.54	16.34	30.06	林下光板地	
0.28	0.26	0.25	0.24	0.23	0.00692	3.549	1.40	4.11	7.99	15.14	27.40	林下光板地	
0.27	0.22	0.19	0.16	0.14	0.0205	3.863	1.26	3.60	6.70	11.78	18.99	林下光板地	
0.21	0.17	0.16	0.14	0.13	0.0224	4.882	1.00	2.88	5.40	9.64	15.85	光板地	
1.06	0.68	0.51	0.38	0.29	0.00568	1.315	3.72	10.71	20.20	36.24	60.10	光板地	紫红色砂页岩
0.46	0.42	0.40	0.38	0.36	0.00594	2.143	2.30	6.72	12.92	24.01	42.02	光板地	
0.26	0.25	0.24	0.23	0.22	0.00265	3.988	1.25	3.72	7.38	14.47	27.87	草地	
0.46	0.42	0.40	0.38	0.36	0.00594	2.143	2.30	6.72	12.92	24.01	42.02	光板地	
0.37	0.25	0.19	0.15	0.12	0.00706	3.948	1.26	3.70	7.21	13.73	25.03	光板地	
0.35	0.24	0.19	0.15	0.12	0.0130	3.918	1.26	3.65	6.96	12.77	21.91	光板地	
0.35	0.24	0.19	0.15	0.12	0.0130	3.918	1.26	3.65	6.96	12.77	21.91	光板地	第四纪红土
0.84	0.60	0.49	0.39	0.32	0.00788	1.393	3.49	9.93	18.41	32.16	51.31	光板地	
0.38	0.23	0.17	0.12	0.09	0.0159	3.931	1.25	3.60	6.81	12.28	20.55	松林地	
0.34	0.18	0.12	0.08	0.06	0.0384	4.120	1.16	3.19	5.69	9.34	13.75	草地	

合效果还是比较好的。

## 三、关系方程的实用意义

用人工降雨方法,在42个观测点取得了实际数据,表3列出了其中18个观测点的关系方程,这些方程大体上有三个方面的实用意义:

1. 揭示出不同土壤在不同条件下的地表径流和渗透特点: 花岗岩母质发育的红壤,

一般土体较深厚,土体中砂粒含量较多,较疏松,渗透较好,也易产生较多的固体径流。在地面坡度相同( $15^\circ$ )、降雨强度相同(0.5 毫米/分)、不同植被下测试结果表明:在无植被的风化物表面,地表径流系数大,而渗透速度和渗透总量则较小;林下光板地次之;对覆盖度大的灌木林地,径流系数很小,且不出现固体径流,出现径流的时间也迟(见表 3-I)。充分说明良好的植被有减少径流、增加渗透、固土保水的显著作用。在坡度相同( $15^\circ$ )的林下光板地,不同降雨强度下测试表明:雨强较小(0.3 毫米/分)时,地表径流、渗透速度和渗透总量均较小,而雨强加大后,前述各值均有所增大。雨强小时,开始出现径流的时间较迟,固体径流量也较少。雨强 0.75 与 0.30 毫米/分时比较,固体径流量约增加五倍之多。说明在光板地上,降雨强度增大,加剧水土流失的事实。雨强较小(0.25 毫米/分)时,在红土光板地上,地面坡度从 $10^\circ$ 到 $15^\circ$ ,地表径流和渗透状况基本相同(见表 3-III)。对于林下光板地,当雨强为 0.3 毫米/分、坡度分别为 $9^\circ$ 、 $15^\circ$ 、 $20^\circ$ 时,随坡度增加,径流系数增加,而渗透速度和渗透总量减小。而且坡度小时,出现地表径流的时间迟,固体径流量也较小(见表 3-IV)。足以说明,采取打堰筑埂,减缓地面坡度,或改坡地为梯地,有明显的水保效果。

南方紫色土区水土流失严重,侵蚀方式主要是沟蚀、片蚀和泻溜侵蚀。紫色土有透水性悬殊,风化物吸水能力差和母岩风化速度快的特点。厚度为 1 米左右的耕作土壤,渗透速度可达 2.2 毫米/分;而在光坡上的薄层风化物仅为 0.02 毫米/分,5—10 厘米厚的坡面表层,最多仅能吸水 4.7 毫米<sup>[4]</sup>。从表 3-V 可见,坡度相同( $15^\circ$ )时,薄层风化碎屑物的光板地(28 号)比有较厚土层的光板地(32 号),径流系数大,渗透速度和渗透总量均较小。这主要与薄层风化碎屑物直接垫于硬实的母岩之上,而且其吸水力差,贮水量小有关。降雨强度相同,地面坡度分别是 $15^\circ$ 和 $20^\circ$ 时,坡度小,径流系数也较小,开始出现径流的时间也较迟。

发育于第四纪红土母质的红壤,分布于河谷阶地,靠近密集居民区,植被严重破坏,片蚀或沟蚀严重。从表 3-VII 可见,雨强为 0.25 毫米/分时,坡度 $10^\circ$ 比 $15^\circ$ 地面的径流系数较小,渗透量和渗速也较大,开始出现径流的时间较迟。这是由于坡度较缓的地面,雨水滞留的时间较长、滞留量也较大、水分下渗力较强所致。地面坡度( $15^\circ$ )相同的光板地,降雨强度较小时,径流系数、渗透量和渗透速度均较小。这是因为这类土壤粘粒含量高,降雨量大时,由于雨滴增大或降落密度增加,使溅蚀作用增强,易使表土孔隙闭塞,从而影响水分下渗。当降雨强度相同(0.25 毫米/分)、坡度相同( $15^\circ$ )时,网纹红土光板地(37 号)、地面有地衣和少量凋落物的松林地(41 号)和稀疏茅草地(42 号)比较,径流系数光板地最小,松林地次之,茅草地最大。这是因为网纹红土干燥后出现一定的小裂隙,在雨强较小时,有利水分下渗;而茅草地表面并无有机质累积,除稀疏茅草外,与光板地无异,故有较大的径流系数。这类土壤粘粒含量较高,土体胶结较紧实,因此,地表径流中的夹带物多呈胶态分散,并未测到正常沉淀的固体物质量。

2. 预测地表径流深度和土壤侵蚀量:一定的土壤所处的条件不同,出现侵蚀时,其降雨强度和降雨时间也不一样。如果利用前述方程,就可以计算出相应条件下的地表径流量和土壤渗透量,为水利、水保工程设施的规范化提供参数。如在花岗岩母质发育红壤的疏林地上修筑水平台地,就可参照表 3 中类似土壤类型的径流系数和渗透速度计算水平

台地的安全埂高。由于当地日降雨量 100 毫米以上并不罕见, 200—300 毫米的日降雨量也有出现。若降雨历时为 5 小时, 径流系数(参照 24 号测点)约 50%, 集水面以每块台地面积的二倍计算, 这时台地安全埂高应为 20—30 厘米。如果降雨强度增大, 地埂的安全高度还应增高。对有坚实下垫面的薄层风化物, 两小时后的径流系数在 50% 以上, 地埂也应加高。在南方, 雨季多暴雨而又多出现伏旱, 暴雨降雨时间一般为十多分钟或几十分钟, 因此, 通过透透方程的计算, 可以大致了解某次降雨后, 渗入土壤中的水量, 从而推算土壤御旱时间的长短。

3. 应用关系方程可以预测在一定区域, 特定降雨条件下的地表径流和土壤渗透量。如果通过观测小区, 掌握了不同降雨时的侵蚀量, 就能比较准确的预测出一个小流域或一个坡面上各类土壤的侵蚀量和侵蚀强度, 这为水土保持效益的估算, 也提供了一种手段。

## 四、结 语

用人工降雨方法, 在 42 个测点取得了实测资料, 并运用曲线拟合法, 作出了与地表径流、土壤渗透的有关方程。通过这些方程使大量的实测资料得以归纳, 达到了条理化、规律化。利用这些方程, 就可进行在相同降雨条件下, 不同土壤上地表径流和土壤渗透比较, 揭示不同土壤上的地表径流和渗透特点; 结合其它测试资料, 估算特定降雨条件下, 不同土壤上的地表径流量和土壤侵蚀量, 为水利水保工程的安全建筑规格提供数值依据; 还能为水保效益提供一种推算方法。但是, 上述测试仅是在很小面积和一段时间上进行的, 每一测点也仅有一或两次重复, 为了取得更全面的资料, 还有待深入的研究。

## 参 考 文 献

- [1] 中国科学院计算中心概率统计组编, 1979: 概率统计计算。145—175 页, 科学出版社。
- [2] 中国科学院南京土壤研究所土壤物理研究室编, 1978: 土壤物理性质测定法。141—144 页, 科学出版社。
- [3] 北京林学院森林改良土壤教研组编, 1961: 水土保持学。9—23 页, 农业出版社。
- [4] 史德明等, 1965: 江西省兴国县紫色土地区的土壤侵蚀及其防治方法。土壤学报, 第 13 卷 2 期, 181—192 页。
- [5] 杨艳生, 1983: 地表径流与土壤渗透拟合方程。水土保持通报, 第 6 期, 40—44 页。
- [6] 杨艳生等, 1983: 江西省兴国县土壤渗透性的研究。水土保持通报, 第 6 期, 33—39 页。

## STUDY ON RUNOFF AND PERMEABILITY OF ERODED SOILS

Yang Yansheng, Shi Deming and Yao Zongyu

*(Institute of Soil Science, Academia Sinica, Nanjing)*

### Summary

Based on the data of artificial rain obtained from 42 experimental plots on the different eroded soils including red earths derived from quaternary red clay and granite and purple soils in Xingguo County of Jiangxi Province, the equations,  $W = aT^b$ ,  $V = aT^{-b}$  and  $M = (a + b/T)^{-1}$ , were established by curve-fitting method to give expression to the relationship between raining duration and runoff coefficient, infiltration time and its rate, and infiltration time and its capacity. These equations are of practical significance for revealing the characteristics of runoff and permeability, estimating the amount of runoff and loss of soil by erosion and evaluating the beneficial effect of soil conservation.