

# 低丘红壤区旱地土壤渗透性与可蚀性 定量关系的研究\*

于东升 史学正

(中国科学院南京土壤研究所, 南京 210008)

**摘要** 应用人工模拟降雨仪和 Guelph 仪对我国南方低丘红壤区旱地土壤的渗透性与可蚀性之间的定量关系进行了研究。结果表明, 第四纪红色粘土和红砂岩发育的旱地 0~5cm 表层土壤饱和渗透率  $K_{fs}$  与土壤的可蚀性  $K$  呈现负相关, 且它们之间的定量关系可概括为:  $K \approx a \cdot K_{fs}^{-b} + c$ , 其中  $a, b, c$  均为与土壤有关的系数。

**关键词** 土壤饱和渗透率, 土壤可蚀性

**中图分类号** S157.1

我国南方土壤退化的类型很多, 但最主要的、最为严重的, 也是分布最广的则是由土地利用不当所引起的土壤侵蚀退化。土壤侵蚀退化程度可用土壤侵蚀量衡量, 它不仅取决于引起土壤侵蚀的外部动力即外营力, 而且也取决于土壤的可蚀性 (Soil erodibility, 国际上通常用  $K$  值来衡量), 即内营力<sup>[1]</sup>, 这从国际上广为使用的通用土壤流失方程 (Universal soil loss equation, USLE) 的表达式  $A = R \cdot K \cdot LS \cdot C \cdot P$  也可看出。其中  $A$  为土壤流失量,  $R$  为降雨侵蚀力,  $K$  为土壤可蚀性,  $LS$  为地形因子,  $C$  为植被覆盖与管理因子,  $P$  为水土保持工程措施因子。而土壤可蚀性又是由土壤自身特性所决定的, 它与土壤的理化性质密切相关, 在国际上一直将它作为一个重要因子而加以深入地研究。确定土壤可蚀性  $K$  值的方法一般分为“经典”方法和简便方法, 前者是由 Wischmeier W. H. 在 1956 年建立的“标准单位小区 (Unit plot)”田间实测法<sup>[2]</sup>, 虽然它能够真实反映自然降雨条件下土壤侵蚀的实际状况, 但由于这种方法所需经费较多, 耗费时间长, 因此各国学者都纷纷研究、建立和采用简便方法。国际上常采用的简便方法, 一是用土壤的性质来估算土壤可蚀性  $K$  值, 如诺谟图法<sup>[3]</sup>, 二是采用先进的人工模拟降雨技术来研究和确定土壤可蚀性  $K$  值。显然“诺谟图法”较为快速、简捷, 但已有的研究表明, 在美国中西部总结出的“诺谟图法”并不完全适合于其它地区<sup>[1]</sup>, 因此, 利用人工模拟降雨仪来进一步探讨各地土壤可蚀性与土壤自身理化性质之间的关系, 并用土壤的性质特征来间接反映土壤的可蚀性, 也一直是国际上关心和研究的热点之一。

土壤渗透性是土壤极为重要的物理特征参数之一, 其渗透性能的好与坏, 直接关系到

\* 国家自然科学基金资助项目 (No. 49571045, 49631010)

收稿日期: 1999-01-15; 收到修改稿日期: 1999-11-19

地表产流量的大小,对土壤侵蚀的影响很大。在国际上,许多学者把土壤渗透性作为反映土壤可蚀性特征的一个极为重要因子而加以研究,有些学者甚至就直接利用土壤渗透性来表征土壤可蚀性<sup>[4~7]</sup>。在国内已有的研究也表明,土壤渗透性能越好,地表径流就会越少,土壤的流失量也会相应减少<sup>[8,9]</sup>,显然土壤渗透性与土壤可蚀性的关系十分密切。但这种关系往往都是定性的描述,它们之间究竟存在何种定量关系?从国内现有的文献资料来看,还没有这方面的深入报导。因此,本文在江西省鹰潭地区的红壤旱坡地上,利用人工模拟降雨仪和 Guelph 渗透仪,研究和探讨该地区土壤渗透性与可蚀性的相互关系,并将这一关系定量地加以反映和描述。

## 1 试验设计与方法

### 1.1 人工模拟降雨仪和渗透仪

人工模拟降雨仪产自德国,其模拟降雨的最大有效面积为  $5.5\text{m} \times 20\text{m}$ ,降雨量可用喷头个数来调节,可调节范围为  $20 \sim 100\text{mm/h}$ <sup>[9]</sup>。土壤渗透仪是由加拿大 D. E. Elrick 教授研制的圭尔夫渗透仪 (Guelph permeameter, GP),可直接在田间测定土壤渗透率,主要由供水量测系统、入渗部件、支架等部分组成,其中的供水系统运用马氏瓶原理以保证供应水头的稳定性,入渗部件采用压力入渗仪 (GPI),此部件可直接放在土壤表层,测定表层土壤的渗透参数<sup>[10]</sup>。

### 1.2 试验设计

本次人工模拟降雨试验采用了 8 个喷头,降雨强度约  $60\text{mm/h}$  左右,降雨面积为  $45\text{m}^2$ 。降雨方式为:降雨一小时,停一小时,又降雨一小时,停一小时,再降雨一小时,降雨时雨滴下落的高度约为  $3\text{m}$ 。在每次试验前分别在上、中、下部位用土钻采集  $0 \sim 10$ 、 $10 \sim 20$ 、 $20 \sim 40$ 、 $40 \sim 60$ 、 $60 \sim 80$ 、 $80 \sim 100\text{cm}$  土层的土

表1 试验点的土地状况

Table 1 Land conditions of experiment field

序号 No.	地点 Site	地形 Topography	土地利用 Land use	试验状况 Conditions of Exp.
第四纪红色粘土发育的粘淀湿润富铁土				
1	东塘村	坡地,上坡,坡降为5.1%, 土层深厚。	旱地,种植花生、油菜、芝麻等,已连续耕种 15年,试验前种植花生。	收获花生后撂荒45 天左右。
2	东塘村	坡地,中坡,坡降为4.6%, 土层深厚。	旱地,种植花生、油菜、芝麻等,已连续耕种 15年,试验前种植花生。	收获花生后撂荒45 天左右。
3	东塘村	坡地,下坡,坡降为4.7%, 土层深厚。	旱地,种植花生、油菜、芝麻等,已连续耕种 15年,试验前种植山芋并套种芝麻。	收获山芋芝麻后撂 荒45天左右。
红砂岩发育的铝质湿润淋溶土				
4	六分场	坡地,上坡,坡降为4.1%, 土层约70cm厚。	旱地,种植花生、油菜、芝麻等,已连续耕种 6年,试验前种植花生并套种芝麻。	收获花生芝麻后撂 荒45天左右。
5	六分场	坡地,中坡,坡降为4.8%, 土层约100cm厚。	旱地,种植花生、油菜、芝麻等,已连续耕种 8年,试验前种植芝麻。	收获芝麻后撂荒45 天左右。
6	六分场	坡地,下坡,坡降为4.2%, 土层约100cm厚。	旱地,种植花生、油菜、芝麻等,已连续耕种 8年,试验前种植芝麻。	收获芝麻后撂荒45 天左右。

壤样品测定土壤含水量,测定 0~20、20~40cm 土层的土壤容重。同时利用圭尔夫渗透仪,采用双水头法测定 0~5cm、20~25cm 土层处的田间土壤饱和渗透率,并采集土壤样品供室内分析理化性质。在人工模拟降雨过程中每 10min 测量一次径流量( $R_i$ ),同时采集径流样品测定含沙量( $C_{si}$ )。一次人工模拟降雨的总径流量为 $\Sigma R_i$ ,土壤流失量为 $\Sigma(R_i \times C_{si})$ 。

本次试验选择在江西省鹰潭市中国科学院红壤生态试验站附近的旱坡地上,分别进行了 6 场次人工模拟降雨试验,其中 1~3 次试验点(东塘村)的土壤为第四纪红色粘土发育的粘淀湿润富铁土红壤,4~6 次试验点(六分场)的土壤为红砂岩发育的铝质湿润淋溶土红壤<sup>[11]</sup>。各试验点的土地利用状况以及土壤部分理化性质分别见表 1 和表 2。

表2 试验土壤的部分理化性质

Table 2 Some physical and chemical properties of soils on experiment site

序 号 No.	土壤 类型 Soil type	土壤 深度 Soil depth	土壤化学性质 Chemical property				容重 Bulk density (g/cm <sup>3</sup> )	土壤机械组成(%) Mechanical composition			
			有机质 O. M. (g/kg)	pH	游离铁 Free Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (g/kg)	CEC (cmol/ kg)		2~0.5 mm	0.5~0.05 mm	0.05~0.002 mm	<0.002 mm
1	粘 淀	0~20	11.0	5.0	44.67	8.46	1.37	1.0	23.5	33.6	46.4
		20~40	4.3	4.7	47.54	8.98	1.45	1.1	18.7	34.4	35.8
2	湿 润 富 铁 土	0~20	9.4	4.9	37.48	7.98	1.19	1.0	28.8	34.4	35.8
		20~40	4.7	4.8	38.97	7.00	1.46	1.1	27.0	32.3	39.6
3	土	0~20	14.7	4.5	35.76	7.50	1.33	4.7	29.9	34.5	30.9
		20~40	9.7	4.5	19.97	7.02	1.44	4.8	25.1	39.1	30.0
4	铝 质	0~20	11.9	4.6	18.22	6.25	1.43	1.7	61.0	19.8	17.5
		20~40	3.4	4.5	22.99	5.87	1.50	1.1	50.9	27.1	21.2
5	湿 润 淋 溶 土	0~20	8.2	4.8	16.72	6.25	1.50	0.5	64.3	15.7	19.5
		20~40	2.5	4.5	21.53	7.02	1.53	0.5	58.8	20.5	20.2
6	土	0~20	5.0	4.6	16.46	5.87	1.54	0.8	63.3	19.9	16.0
		20~40	3.4	4.4	19.28	6.35	1.60	0.5	64.2	16.8	18.5

## 2 试验结果

### 2.1 人工模拟降雨试验结果

人工模拟降雨试验结果见表 3。从表中可看出,在各场次的人工模拟降雨试验中,径流系数最大的是六分场 5 号试验地,其次是东塘的 2 号和六分场的 4 号试验地,且后两次降雨的径流系数总是大于第一次降雨。总的土壤流失量最大是东塘 2 号试验地,其次是六分场 5 号地,最小的为东塘村 3 号试验地,且后两次降雨的土壤流失量也总是大于第一次降雨。

表3 人工模拟降雨试验结果

Table 3 Soil erodibility measured by simulated rainfall

序号 No.	雨次 Rainfall times	雨强 P (mm/h)	降雨能量 Rainfall Energy (MJ/hm <sup>2</sup> )	降雨侵蚀力 Soil erodibility (17MJ.mm/ ha·h)	总侵蚀力 R (17MJ.mm/ ha3h)	地形 因子 LS	径流量 Runoff (mm)	径流系数 Runoff coefficient	土壤 流失量 Soil loss (t/ha)	总土壤 流失量 A (t/ha)	土壤 可蚀性 K (0.132h/ MJ.mm)
1	1	58.1	8.19	27.98	67.16	0.28	13.75	0.24	0.300	1.02	0.027
	2	51.8	7.30	22.24			23.92	0.46	0.399		
	3	45.2	6.37	16.94			24.45	0.54	0.318		
2	1	59.6	8.40	29.45	79.28	0.27	20.65	0.35	0.457	2.12	0.044
	2	56.3	7.93	26.28			31.37	0.58	0.988		
	3	53.3	7.51	23.55			32.09	0.60	0.679		
3	1	58.0	8.17	27.87	85.33	0.27	2.14	0.04	0.027	0.34	0.006
	2	57.3	8.08	27.22			12.79	0.22	0.101		
	3	60.4	8.51	30.24			21.89	0.36	0.211		
4	1	61.7	8.70	31.56	90.24	0.24	22.06	0.36	0.251	0.96	0.020
	2	57.3	8.07	27.22			32.49	0.57	0.347		
	3	61.6	8.68	31.46			33.83	0.55	0.367		
5	1	57.7	8.10	27.50	79.04	0.27	26.94	0.47	0.399	1.71	0.037
	2	55.1	7.77	25.17			33.12	0.60	0.607		
	3	56.4	7.95	26.37			37.42	0.66	0.703		
6	1	60.2	8.48	30.04	90.51	0.25	16.38	0.27	0.179	0.50	0.010
	2	61.6	8.64	31.32			28.79	0.47	0.130		
	3	59.3	8.36	29.15			28.63	0.48	0.193		

## 2.2 Guelph 渗透试验结果

从表 4 可看出, 试验前 0~5cm 土层土壤含水量低于 20~25cm 土层的土壤。各试验

表4 Guelph法测定的土壤饱和入渗率 $K_s^{1)}$ 

Table 4 Saturated soil permeability measured by Guelph method.

序 号 No.	地点 Site	土地利用状况 Conditions of land-use	深度 Depth (cm)	土壤 含水量 Soil moisture (%)	$Q_1$ (cm <sup>3</sup> / min)	$Q_2$ (cm <sup>3</sup> / min)	$K_s$ (10 <sup>-6</sup> m/s)	$Q_m$ (10 <sup>-7</sup> m <sup>2</sup> /s)	$\alpha$ (m <sup>-1</sup> )
1	东塘村	旱耕地, 上坡	0~5	15.36	11.55	23.1	15.85	2.14	74.01
			20~25	21.94	11.55	23.1	15.66	2.45	64.01
2	东塘村	旱耕地, 中坡	0~5	15.77	7.7	13.48	10.14	0.88	115.71
			20~25	20.5	23.1	40.43	30.40	2.65	114.68
3	东塘村	旱耕地, 下坡	0~5	18.46	86.63	142.45	97.93	29.99	32.66
			20~25	20.3	15.4	23.1	13.51	10.19	13.26
4	六分场	旱耕地, 上坡	0~5	11.26	11.55	17.33	10.24	7.63	13.29
			20~25	15.92	32.73	55.83	40.53	6.94	58.43
5	六分场	旱耕地, 中坡	0~5	9.29	7.55	13.7	9.03	2.66	34.01
			20~25	17.05	11.55	15.4	6.75	11.85	5.71
6	六分场	旱耕地, 下坡	0~5	12.01	19.25	32.73	23.65	4.31	54.86
			20~25	16.95	32.73	61.6	39.55	12.36	32.01

1)  $Q_1$ 、 $Q_2$ 分别为5cm和15cm水头的稳定入渗量 (cm<sup>3</sup>/min),  $Q_m$ 为非饱和入渗通量 (10<sup>-7</sup>m<sup>2</sup>/s),  $K_s$ 为土壤饱和入渗率 (10<sup>-6</sup>m/s),  $\alpha$ 为土壤入渗结构参数 (m<sup>-1</sup>)<sup>[10]</sup>。

点 15cm 水头的稳定入渗量  $Q_2$  都高于 5cm 水头的稳定入渗量  $Q_1$ , 两者匹配较好。根据圭尔夫渗透仪的设计原理和计算公式<sup>[10]</sup>, 由 5cm 水头稳定入渗量  $Q_1$  和 15cm 水头稳定入渗量  $Q_2$ , 可计算出各试验点土壤饱和入渗率  $K_{fs}$ 、非饱和入渗通量  $Q_m$  以及土壤入渗结构参数  $\alpha$ 。计算结果表明, 值最大的是 3 号点 0~5cm 表层土壤, 最小的为 5 号点 20~25cm 土层土壤, 大多数试验点土壤饱和入渗率  $K_{fs}$  数值都在 10~40 之间。

### 3 讨论

#### 3.1 人工模拟降雨的旱耕地土壤可蚀性 $K$ 值

根据通用土壤流失方程  $A = K \cdot R \cdot LS \cdot C \cdot P$  中各因子的取值方法, 由于在试验时, 各试验点的旱作物都已收获且落荒 40 多天, 未采取任何水保工程措施, 因此, 植被覆盖与管理因子  $C$  和工程措施因子  $P$  的取值均为 1, 通用土壤流失方程可简写成  $A = K \cdot R \cdot LS$ 。在本次人工模拟降雨试验中, 土壤流失量  $A$  和降雨侵蚀力  $R$  以及  $LS$  都可测定或计算出, 因此, 旱耕地土壤的可蚀性  $K$  的算式可表示为  $K = A / (R \cdot LS)$ <sup>[9]</sup>, 计算结果见表 3。在本次试验中土壤可蚀性  $K$  值最小的是第四纪红色粘土发育 3 号试验点的土壤, 其次是红砂岩发育的 6 号试验点的土壤,  $K$  值最大的是第四纪红色粘土发育 2 号试验点的土壤, 其次是红砂岩发育的 5 号试验点的土壤。

#### 3.2 土壤的渗透性与可蚀性间的定量关系

综合上述结果(表 3、表 4), 起初很难看出旱地土壤的渗透性与可蚀性间有明显的关系。但对第四纪红色粘土发育的旱地和红砂岩发育的旱地土壤分别加以考虑, 可以发现, 在第四纪红色粘土发育的旱地上, 下坡土壤的可蚀性  $K$  值最小为 0.006, 其次上坡土壤为 0.027, 最大的中坡为 0.044。而第四纪红色粘土发育的 0~5cm 表层土壤饱和和渗透率  $K_{fs}$  值的大小顺序恰好相反, 下坡最大为 97.93, 其次是上坡为 15.58, 最小的下坡为 10.14。在红砂岩发育的旱地土壤上, 也同样具有上述情形。这表明不论土壤的母质状况如何, 该地区 0~5cm 表层土壤饱和和渗透率  $K_{fs}$  值与土壤的可蚀性  $K$  值之间呈现负相关, 即土壤的渗透性能越好, 土壤的可蚀性也就相应减弱, 在同种状况下土壤的流失量也就相应减少, 这与国内外的许多学者的研究结论是一致的<sup>[4~6, 9, 12]</sup>。

经过对这两种母质发育的土壤可蚀性与渗透性的关系进一步研究表明, 0~5cm 表层土壤饱和和渗透率  $K_{fs}$  值与土壤可蚀性  $K$  值存在下列定量关系:

$$K \approx a \cdot K_{fs}^{-b} + c \quad (1)$$

式中,  $a, b, c$  均为与土壤有关的结构系数。由此, 只要确定了关系式中的结构系数, 对不同类型土壤的可蚀性与渗透性之间的定量关系就可确定。在本次试验中, 第四纪红色粘土发育的粘淀湿润富铁土和红砂岩发育的铝质湿润淋溶土则分别表现为:

$$K \approx 0.779059 K_{fs}^{-1.27952} + 0.003791, \quad (\text{粘淀湿润富铁土}) \quad (2)$$

$$K \approx 941403.6 K_{fs}^{-7.89190} + 0.009986, \quad (\text{铝质湿润淋溶土}) \quad (3)$$

式中, 土壤可蚀性  $K$  值单位为 0.132h/MJ.mm, 0~5cm 表层土壤饱和入渗速率  $K_{fs}$  值的单位为  $10^{-6}$ m/s。由  $K$  的预测值与测定值比较的结果表明, 它们间的相关系数和期望方差均接近 1.0 和 100%。图 1, 图 2 分别表示了第四纪红色粘土和红砂岩发育的旱耕地 0~5cm 表

层土壤饱和渗透率  $K_s$  值与土壤可蚀性  $K$  值的上述定量关系。

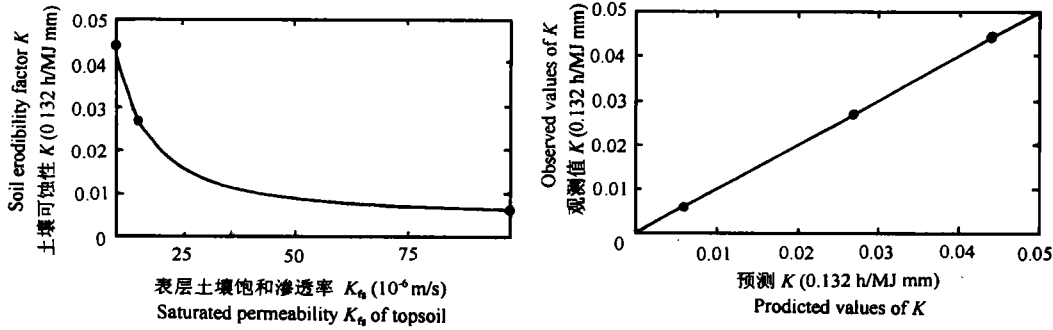


图1 第四纪红色粘土发育的土壤可蚀性  $K$  与表层土壤饱和和渗透率  $K_s$  的关系图

Fig.1 Relationship between saturated permeability  $K_s$  of topsoil and erodibility ( $K$ ) of soil derived from Quaternary red clay

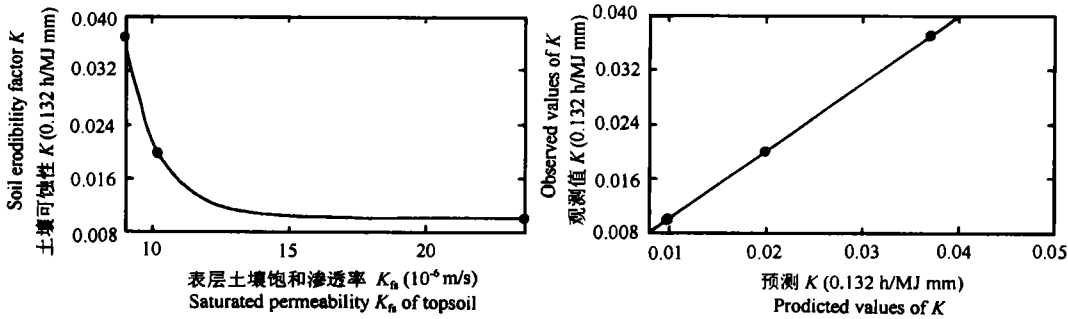


图2 红砂岩发育的土壤可蚀性  $K$  与表层土壤饱和和渗透率  $K_s$  的关系图

Fig.2 Relationship between saturated permeability  $K_s$  of topsoil and erodibility ( $K$ ) of soil derived from red sandstone

从上述关系式我们容易看出,结构系数  $a$ 、 $b$ 、 $c$  的值与土壤的类型紧密相关,特别是土壤的母质状况,从某种意义上说它们是由土壤的母质所决定的。但在我国南方地区,土壤的类型较多,人们不可能对每一种土壤都进行研究和测定,但土壤的母质类型相对较少,可在有代表性母质类型的土壤进行研究和测定出  $a$ 、 $b$ 、 $c$  的值,由此确定的关系式也可以应用于该母质发育的其它类型的土壤。因此,即使在土壤的性质特征不是很明确的条件下,只要了解了该土壤的母质状况,并能进行土壤的渗透性的测定,我们就能够初步估算出该土壤的可蚀性状况。这将有利于控制我国南方地区的土壤侵蚀,加强土壤的治理和保护。

然而,不仅土壤的渗透性与土壤可蚀性  $K$  有密切相关,土壤其它的某些性质,如土壤有机质含量,土壤的颗粒大小及分布等等也同样具有密切的关系,这在文中都未作讨论,因此上述关系式并不是一个完整的算式。但是,对于第四纪红粘土和红砂岩发育的土壤,如果仅仅考虑土壤的渗透性与土壤可蚀性  $K$  值的相关性,由上述关系表达式,在田间实际测定表层土壤的渗透率后,就可初步估计出该处土壤的可蚀性状况。当然,在该地区使用上述算式时,还存在一个边界条件以及结构系数  $a$ 、 $b$ 、 $c$  与土壤的关系等问题,因此要使得

上述关系式成为实用算式, 还需再作进一步的研究和验证。

致 谢 本研究工作承蒙龚子同先生和史德明先生的指导, 在此深表谢意!

### 参 考 文 献

1. 史学正, 于东升, 邢廷炎. 用田间实测法研究我国亚热带土壤的可蚀性  $K$  值. 土壤学报, 1997, 34(4): 299~305
2. Wischmeier W H, Smith D D. Predicting rainfall erosion losses—A guide to conservation planning, Agriculture Handbook 537, USDA, Washington D.C., 1978. 58
3. Wischmeier W H. A soil erodibility nomograph for farmland and conservation sites. J. Soil and Water Conservation, 1971, 26: 189~193
4. Bruce R R et al. Surface soil degradation and soil productivity restoration and maintenance. Journal Soil Sci. Soc. Am., 1995, 59(3): 654~660
5. Ekwue E I. Effect of organic and fertilizer treatments on soil physical properties and erodibility. Soil and Tillage Research, 1992, 22:(3-4), 199~209
6. Wilco B P. Runoff and erosion in intercanopy zones of pinyon-juniper woodlands. Journal of Range Management, 1994, 47(4): 285~295
7. Takuma K, Kono H, Hiyama H. Soil factors which prescribe soil erodibility. Bulletin of the faculty of Agriculture, Tottori University, 1991, 44: 15~20
8. 吕喜望, 史学正, 于东升. 用人工模拟降雨研究南方低丘土壤的渗透. 水土保持学报, 1995, 9(3): 1~8
9. 于东升, 史学正等. 用不同人工模拟降雨方式对我国亚热带土壤可蚀性  $K$  值的研究. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1996, 2(4): 74~79
10. 杨诗秀, 段新杰. 田间测定土壤水分参数的研究. 灌溉与排水, 1991, 10(2): 43~47
11. 龚子同主编. 中国土壤系统分类(修订方案). 北京: 中国农业科技出版社, 1995. 1~218
12. 杨艳生, 梁音等. 缓丘坡耕地模拟降雨及土壤通透性研究. 土壤学报, 1991, 28(3): 237~247

## QUANTIFICATIONAL RELATIONSHIP BETWEEN SOIL PERMEABILITY OF UPLAND AND SOIL ERODIBILITY IN HILLY RED SOIL REGION

Yu Dong-sheng Shi Xue-zheng

(The Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008)

### Summary

In the paper quantificational relationship between soil permeability of upland and soil erodibility in hilly red soil region of southern China was studied, by using simulated rainfall and Guelph Permeameter. Results showed that there were negative correlations between saturated permeability  $K_{fs}$  of 0~5cm top soil and erodibility factor  $K$  of soil derived from Quaternary red clay and red sandstone, and the quantificational relationship can be expressed as  $K \approx a \cdot K_{fs}^{-b} + c$ , where coefficients  $a$ ,  $b$  and  $c$  were decided by soil properties.

**Key words** Saturated soil permeability  $K_{fs}$ , Soil erodibility factor  $K$