

## 广东小良水保站三种生态系统地表侵蚀的研究

周国逸 余作岳 彭少麟

(中国科学院华南植物研究所, 广州 510650)

**摘要** 在系统地研究了广东小良水保站的混交林, 桉树林, 裸地等三种生态系统类型的水文效益以后, 本文着重探讨了它们的水土保持效益。结果表明裸地的降雨侵蚀率分别是桉树林的 5.2 倍, 是混交林的 228.1 倍; 径流侵蚀率裸地是桉树林的 11.3 倍, 是混交林的 31.9 倍。从总体上来看, 无论是降雨侵蚀率还是径流侵蚀率都是混交林的最小, 而且从侵蚀物的组成来看, 混交林地表径流中的悬浮物占较大的比重。侵蚀物与降雨量存在  $x=f(P^A)$  的相关关系,  $A$  的大小反映了降雨对侵蚀的影响程度, 不同的土壤是不同的, 混交林  $A < 1$ , 桉树林  $A = 1.48$ , 裸地  $A = 1.85$ , 侵蚀率的年间变化以混交林的最大。用灰色系统的 GM (2, 1) 模型, 本文较为成功地预测了年际间的侵蚀率。  
**关键词** 地表侵蚀; 侵蚀率; 水土保持; 灰色系统

## A STUDY ON THE EROSION OF SURFACE SOIL IN THREE ECOSYSTEMS OF XIAOLIANG EXPERIMENTAL STATION

Zhou Guoyi Yu Zuoyue Peng Shaolin

(South China Institute of Botany, Academia Sinica, Guangzhou 510650)

**Abstract** Based on the systematic study on hydrological effects of mixed forest, eucalyptus forest and naked land in Xiaoliang experimental station, Guangdong Province, the profits of water and soil conservation were examined. It was shown that the total erosion rate by rainfall for naked land is 5.2 times than that for eucalyptus forest and 228.1 times as high as that for mixed forest, while the erosion rate by surface flow for naked land is 10.3 and 30.9 times higher than that for eucalyptus forest and mixed forest, respectively. The eroded components from mixed forest are mainly made up of smaller particles. There is the experimental relations  $X=f(P^A)$  between erosion ( $x$  represents weight in unit of kg) and rainfall ( $P$ , mm), in which the parameter  $A$  represents the influence of precipitation on erosion. For various soils,  $A$  is different. In mixed forest,  $A < 1$ ; eucalyptus forest,  $A = 1.48$ , and naked land,  $A = 1.85$ . Mixed forest has a larger change of erosion rate among different years. At the same time, we successfully estimated the annual erosion rate by applying the theory of "gray system" model GM (2, 1).

**Key words** Surface erosion; Erosion rate; Water and soil conservation; Gray system

伴随着降雨径流作用，不同的地表将有着完全不同的土壤侵蚀，虽然引起侵蚀发生的机理各有不同<sup>[1]</sup>，本文在此不作探究，但无疑都是由径流作用带出系统的，因此，通过研究不同地类下径流作用中侵蚀量的大小，可以间接反映某种植被保持水土的功效，本文应用中国科学院华南植物研究所在广东电白县小良水保站从1981—1990年连续10年的土壤侵蚀观测资料，以期对处于热带北缘海岸台地这一特殊生境条件下的混交林，桉树林，裸地三个地类的水土保持效益作一基本的探讨，与本文同一系列的还有诸如：地表径流效应，土壤水分及地下水运动，蒸发散，系统水分平衡等研究。

## 1 试验地概况

试验地位于广东电白县小良水保站的沿海台地上，地理位置为东经110°54'18"，北纬21°27'49"，为热带北缘地区，受人为活动的影响，原生植被已破坏殆尽，水土流失有上百年历史，年平均气温23℃，最高气温36.5℃，最低为4.7℃，月平均气温在18℃以上者达9个月，1981—1990年10年间平均雨量1454.5 mm，最大年雨量1985年2209.8 mm，最小年雨量1984年1128.7 mm，干湿季节分明，干季（10—4月）雨量只有28.7%，湿季（5—9月）占71.3%，降雨方式多为暴雨形式的对流雨及台风雨，地带性土壤为砖红壤，由于水土流失严重，绝大部分表土已被蚀去，有些地方的表土光裸成板状，故称为光板地，这种类型的土壤不仅在裸地大量存在，桉树林下也非常普遍，土壤孔隙度小，结构致密，几乎没有非毛管孔隙，持水量低，土壤板度干旱，即使是在雨季也是如此，试验地有着典型的海岸台地地貌，文章中三个试验小集水区地形地貌基本一致。

本文中的三种生态系统除混交林（面积6.41 ha）有复杂的林相以外，桉树林地（面积3.78 ha）及裸地（面积3.73 ha）都有上述严酷的土壤条件。桉树林林相简单，只有一个层次，林下几乎寸草不生，有关三种试验地上的植被情况的详细资料请参看相应报导<sup>[2,3]</sup>。

## 2 研究方法

应用“小集水区径流场技术”，将生态系统的边界定义在集水区以内，集水区边界以自然分水为主并辅以人工圈定。

在三个小集水区中分别设有小气候观测站和大气降水与林内穿透水测量点，用自记雨量计及多个简易雨量筒分别测定。

在每个集水区的出口都设有测流堰，以控制地表径流的输出。同时设置地表径流冲砂槽，收集侵蚀物推移质的量。悬浮质的量通过收集与分析堰口下地表水中的侵蚀物含量，结合本次地表径流量的多少计算得出。

## 3 结果与分析

### 3.1 侵蚀率

用两种侵蚀率来加以研究：

降雨侵蚀率是指单位降雨量 (mm) 下, 每平方公里流域面积上的侵蚀物重量 (吨, t), 本文根据侵蚀物是悬浮质还是推移质而相应的有悬浮质降雨侵蚀率和推移质降雨侵蚀率。

径流侵蚀率是指单位径流深 (mm) 下, 每平方公里流域面积上的侵蚀物重量 (吨, t), 同样有悬浮质径流侵蚀率和推移质径流侵蚀率之分。

降雨侵蚀率反映了流域总的侵蚀状况, 但由于混交林, 桉树林, 裸地三种系统的地表径流存在极大的差异, 因而无法反映径流中的泥沙含量的浓度, 从而采用径流侵蚀率。

1981—1990年10年间, 混交林平均降雨侵蚀率为  $0.02114 \text{ t/km}^2 \cdot \text{mm}$ , 其中, 悬浮质占  $0.01254 \text{ t/km}^2 \cdot \text{mm}$ , 推移质占  $0.00860 \text{ t/km}^2 \cdot \text{mm}$ ; 桉树林平均降雨侵蚀率为  $0.93256 \text{ t/km}^2 \cdot \text{mm}$ , 其中悬浮质占  $0.55104 \text{ t/km}^2 \cdot \text{mm}$ , 推移质占  $0.38152 \text{ t/km}^2 \cdot \text{mm}$ ; 裸地平均降雨侵蚀率为  $4.8271 \text{ t/km}^2 \cdot \text{mm}$ , 其中悬浮质占  $2.0196 \text{ t/km}^2 \cdot \text{mm}$ , 推移质占  $2.8075 \text{ t/km}^2 \cdot \text{mm}$ 。裸地的降雨侵蚀率分别是桉树林的 5.2 倍, 是混交林的 228.3 倍。从侵蚀物的构成来看, 悬浮质与推移质的比例由混交林, 桉树林, 裸地逐渐减小, 分别是: 1.46, 1.44 和 0.72。说明不仅从总量而且从侵蚀物构成上, 混交林都更有效益。

表1 年侵蚀率表 ( $\text{t/km}^2 \cdot \text{mm}$ )

Table 1 Erosion rate in different years

年	度	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990
混交林	a	0.03365	0.02130	0.00155	0.05033	0.12549	0	0	0	0	0.00045
	b	0.05188	0.00826	0.00095	0.04458	0	0	0.00007	0	0	0
	c	0.08553	0.02956	0.00249	0.09491	0.12549	0	0.00007	0	0	0.00045
桉树林	a	0.63742	0.56381	0.58672	0.55692	0.69423	0.57577	0.42762	0.19324	0.65201	0.43286
	b	0.45563	0.38994	0.25806	0.33207	0.47948	0.50761	0.56390	0.27661	0.17384	0.37334
	c	1.09305	0.95375	0.84478	0.88899	1.17371	1.08278	0.99152	0.46985	0.82585	0.80621
裸地	a	1.93166	1.52678	1.46069	1.77085	2.46057	1.97785	2.98329	1.84700	1.42992	1.90037
	b	2.05421	1.30072	1.29366	1.39809	5.86587	2.49305	2.48040	1.86582	2.73599	2.87654
	c	3.98587	2.82751	2.75435	3.16894	8.32644	4.47090	5.46369	3.71282	4.16591	4.77691
混交林	a'	0.47653	0.20844	0.49721	0.58029	1.16327	0	0	0	0	0.21450
	b'	0.54379	0.26363	0.30469	0.51393	0	0	0.13730	0	0	0
	c'	1.02032	0.47207	0.80190	1.09422	1.16327	0	0.13730	0	0	0.21450
桉树林	a'	1.17652	0.89905	1.22351	0.92919	1.08269	1.07640	0.76342	0.92281	1.16901	0.99483
	b'	0.79633	0.57982	0.53813	0.55403	0.74778	0.94897	1.00672	1.32092	0.31169	0.86576
	c'	1.97285	1.47887	1.76164	1.48322	1.83047	2.02537	1.77014	2.24373	1.48070	1.86059
裸地	a'	7.45261	9.31082	6.16942	5.54285	9.64228	9.18775	13.6519	9.07783	6.63942	7.53762
	b'	10.3848	11.1937	5.46394	4.37608	22.9867	11.5811	11.3506	9.17034	12.7037	11.8869
	c'	17.8374	20.5045	11.6334	9.91893	32.6290	20.7688	25.0025	18.2482	19.3432	19.4245

a——降雨悬浮质侵蚀率 Rainfall suspension erosion rate; b——降雨推移质侵蚀率 Rainfall deposit erosion rate; c——降雨侵蚀率 Rainfall erosion rate; a'——径流悬浮质侵蚀率 Runoff suspension erosion rate; b'——径流推移质侵蚀率 Runoff deposit erosion rate; c'——径流侵蚀率 Runoff erosion rate

1981—1990年平均径流侵蚀率分别为，混交林：0.62073 t/km<sup>2</sup>.mm，其中悬浮质占0.36825 t/km<sup>2</sup>.mm，推移质占0.25248 t/km<sup>2</sup>.mm；桉树林：1.7450 t/km<sup>2</sup>.mm，其中悬浮质1.0311 t/km<sup>2</sup>.mm，推移质0.71388 t/km<sup>2</sup>.mm；裸地：19.7794 t/km<sup>2</sup>.mm，其中悬浮质8.2754 t/km<sup>2</sup>.mm，推移质占11.5040 t/km<sup>2</sup>.mm，径流侵蚀率裸地是桉树林的11.3倍，是混交林的31.9倍，同样大小的径流量仍然是混交林的侵蚀量最小。出口断面处的地表径流中悬浮质的含量裸地是桉树林的8.0倍，是混交林的13.3倍，这就是说混交林和桉树林下的地表径流比裸地的地表径流要精彻得多，从而减少对下游河道的淤积。

至此，我们对森林保持水土效应的机理有一个清晰的认识，即：首先，森林减低地表径流，从而减少侵蚀物的携带者；其次，森林减低单位地表径流的侵蚀物携带量。

### 3.2 降雨性质对土壤侵蚀的影响

将不同系统各年相应的降水量与侵蚀量作图（见图1），可以看到它们之间有很大的相关性。10年间的平均变动系数（标准差 $\delta$ 与平均数 $\bar{x}$ 之比 $\delta/\bar{x}$ ）见表2。

表2 10年间平均变动系数（ $\delta/\bar{x}$ ）

Table 2 The average change coefficients within ten years

生态系统类型 ecosystem type	混交林 Mixed forest	桉树林 Eucalyptus forest	裸地 Naked land
降雨 Rainfall	0.2866	0.2760	0.2428
侵蚀量 Erosion	2.0531	0.4506	0.6544
降雨侵蚀率 Erosion rate via rainfall	1.5770	0.2348	0.3788
径流侵蚀率 Erosion rate via runoff	1.0957	0.1414	0.3647

从表2中可以看到，各个系统的侵蚀量比降雨侵蚀率的变动系数要大得多，这是可以理解的，因为侵蚀量与降雨侵蚀率相比较，前者更受降雨的影响，但由侵蚀量除以相应年度的降雨量和固定的流域面积所得来的降雨侵蚀率并没有完全消除受降雨的影响，这从表1中降雨侵蚀率的年度变化与图1中的降雨量的年度变化一致性就可以看出，因此，表2中降雨侵蚀率的变动系数还有一部分是由于降雨性质的变异引起的。

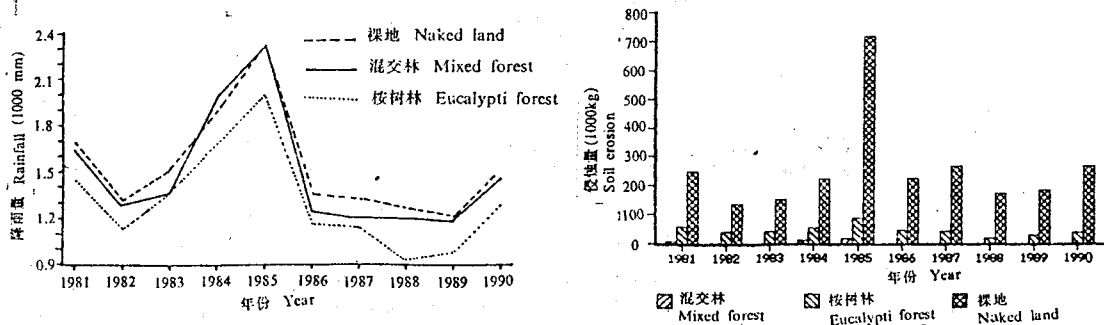


图1 不同年份的降水量与侵蚀量图

Fig. 1 Rainfall and soil erosion in various years

为了消除降雨性质的影响, 作这样一个统计量  $Y$ , 令:

$$Y = \frac{\sqrt{\{n^2 x_i / P^{\wedge}(i) - n \Sigma [x_i / P^{\wedge}(i)]\}^2}}{\Sigma [x_i / P^{\wedge}(i)]}$$

其中,  $x_i$  ( $i=1, 2, \dots, n$ ) 为流域单位面积 ( $\text{km}^2$ ) 上的侵蚀量的某时间序列;  $P(i)$  ( $i=1, 2, \dots, n$ ) 为相应的降雨量时间序列。

当  $|Y|$  取极小值时, 用最小二乘法解出  $A$ , 则  $x_i / P^{\wedge}(i)$  就最小限度地消除了降雨的影响, 同时我们也确实了  $x$  与  $P$  有  $x = f(P^{\wedge})$  的相关关系。  $A$  的大小反映了降水对侵蚀的影响程度, 不同的土壤是不同的。

计算结果是: 混交林  $A < 1$ , 桉树林  $A = 1.48$ , 裸地  $A = 1.85$ , 其最小  $|Y|$  分别是: 混交林 1.5621, 桉树林 0.2009, 裸地 0.2830。

最小  $|Y|$  有一定的意义, 其大小表明了除降水以外的其它因素的影响对于年间变动的贡献, 这些因素包括由于植被的作用年度间地表本已发生改变及观测误差等。混交林由于能成功地影响地表的土壤, 因此年度间的变异就大, 并且由于混交林地土壤侵蚀小, 观测的相对误差大, 因而其最小  $|Y|$  较大是不足奇怪的。

### 3.3 三种系统地表侵蚀量的预测

地表侵蚀过程实际上是一个不纯的随机过程, 其时间序列起落不平, 规律性不明显, 受制于很多的因子。上面的研究指出, 侵蚀率在年度上的变化非常大, 很难预测其规律性。(参见图 1)

但是, 如果我们将如上时间过程作如下处理<sup>[4]</sup>

设  $X_t(0)$  ( $t=1, 2, \dots, N$ ) 是侵蚀率随某个时间尺度 (可以是年, 月) 而变的系列, 令:

$$X_t(1) = \sum_{i=1}^t X_i(0) \quad (t=1, 2, \dots, N) \quad (1)$$

则由图 2 (A) 可以看到  $X_t(1)$  随时间的变化较  $X_t(0)$  有规律多了, 起伏性大大变小, 随机性的成分减弱。

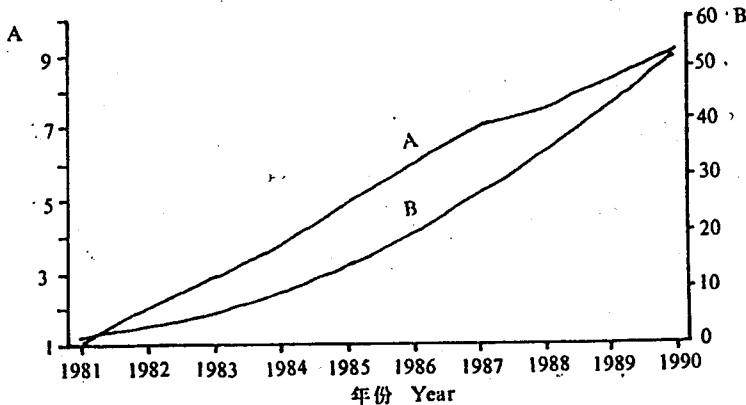


图 2 桉树林地表侵蚀率的一二阶累积曲线 (1981—1990)

Fig. 2 The first and second order summation curves of erosion rate for eucalyptus forest land

A——一阶累积曲线, First order summation curve; B——二阶累积曲线, Second order summation curve

然而，图 2 (A) 仍然为折线，还是难于用单一的数学模型来表示，如果用于预测还不够。为此，将 (1) 式再累加一次，得到：

$$X_t(2) = \sum_{i=1}^t X_i(1) \quad (t=1, 2, \dots, N) \tag{2}$$

从而得到一个相当平稳的二阶累积曲线，见图 2(B)。

这就是二阶一维灰色系统模型记为 GM(2,1) 的基本思路。

不失一般性，令图 2(B) 的相应微分方程为：

$$\frac{d^2X}{dt^2} + \frac{adX}{dt} + bX = \mu \tag{3}$$

由于 X 为二阶累积值序列，则  $dX/dt$  是一阶累积序列，而  $d^2X/dt^2$  则为原时间序列。(3) 式的解为：

$$X_{t+1} = e^{At} [B \sin Ct + D \cos Ct] + E \tag{4}$$

表 3 三种系统类型下公式 (4) 的参数 (逐年)

Table 3 The parameter of equation (4) for the three vegetation types (in the unit of year)

参数 Parameter	A	B	C	D	E
混交林 Mixed forest	0.14015	0.57982	0.19982	-0.42028	0.50581
桉树林 Eucalyptus forest	0.02483	27.77517	0.11105	-70.69982	71.7929
裸地 Naked land	0.14148	59.44726	0.16142	-37.81873	41.8046

表 4 原序列的预测精度 (年地表侵蚀率)

Table 4 The accuracy of estimation for the basic time series (annual erosion rate)

年 度 years		1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990
混交林 Mixed forest	a	0.09	0.03	0.01	0.09	0.13	0	0.00	0	0	0
	b	0.09	0.00	0.06	0.06	0.05	0.07	0.07	0.05	0.05	0.03
	c										
桉树林 Eucalyptus forest	a	1.09	0.95	0.84	0.89	1.17	1.08	0.99	0.47	0.83	0.81
	b	1.09	0.74	1.00	1.02	1.05	1.00	0.90	1.00	0.90	0.60
	c	0	22.1	19.1	14.5	10.2	7.8	9.0	110	9.0	26.0
裸地 Naked land	a	3.99	2.83	2.75	3.17	8.33	4.47	5.46	3.71	4.17	4.78
	b	3.99	1.82	3.59	4.3	5.0	5.8	5.8	6.6	6.7	6.5
	c	0	36	31	35.2	40.0	29.6	6.2	75.3	60.4	36.0

a——实测值 Measured; b——预测值 Estimated; c——偏差 Deviation

为求出 (4) 式中的参数，将 (3) 式改写成差分方程形式，再分别将二阶累积值，一阶累积值和原序列值代入，用最小二乘法解出参数 a, b, μ，再将 (4) 式代入 (3) 式，注意到恒等的条件，则有如下联立方程组：

$$\{A = -a/2$$

$$\{C = \sqrt{b - A^2}$$

$$\{E = \mu / (A^2 + C^2)$$

$$\{D = X^0 - E$$

(5)

容易得到 (4) 式中的全部参数。

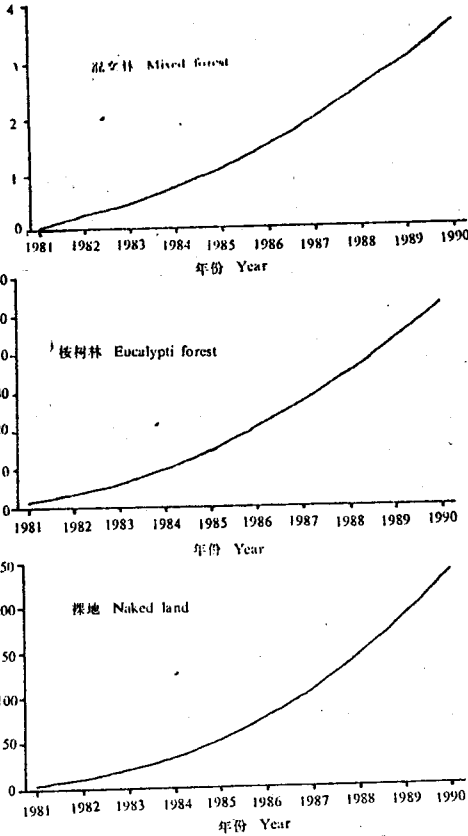


图3 三种系统下年地表侵蚀率二阶累积曲线

Fig. 3 The second order summation curve of annual erosion rate for the three ecosystem types

将计算得到的二阶累积曲线差分二次得到预测的原序列值, 再将原序列的预测值与实测值对比, 列于表4中。

从图3和表4中可以看到, GM(2, 1)模型用于预测三种生态系统下的侵蚀量比较高的精度, 特别是桉树林和裸地的情况更是如此, 完全可以用来对其年侵蚀量进行预测预报。如果考虑的是一个时段(如几年), 则预报精度将更高。

#### 4 结论

降雨侵蚀率和径流侵蚀率分别反映了总体的侵蚀水平和径流中的侵蚀物的含量, 裸地降雨侵蚀率分别是桉树林的5.2倍, 是混交林的228.1倍, 径流侵蚀率裸地是桉树林的11.3倍, 是混交林的31.9倍。因此从总体来看, 无论是降雨侵蚀率还是径流侵蚀率都是混交林的最小, 而且从侵蚀物的组成来看, 混交林的悬浮值占的比重较大。

侵蚀量与降雨量存在  $x = f(P^A)$  的相关关系, A的大小反映了降雨对侵蚀的影响程度, 不同的土壤是不同的, 混交林  $A < 1$ , 桉树林  $A = 1.48$ , 裸地  $A = 1.85$ 。

侵蚀率的年间最小变动系数反映了除降水以外的其他因素对于年间变动的贡献, 由于混交林成功地改变了地面, 使得年际间地表的物理性状发生了改变, 因而混交林的这个参数最大。

用灰色系统的GM(2, 1)模型, 本文成功地预测了年际间的侵蚀率。

#### 参考文献

- 1 周国逸. 中国亚热带杉木人工林生态系统水文学的研究. 博士论文. 1989
- 2 余作岳等. 广东热带沿海侵蚀地的植被恢复途径及其效应. 热带亚热带森林生态系统研究, 1985, 3: 97-108
- 3 余作岳, 彭少麟, 张文其等. 广东小良热带人工林水分系统研究. 1990, 6: 117-124
- 4 胡荣轩等. 黄河中游区水、沙变化趋势及其预测. 地理学报, 1992, 47(4): 315-324
- 5 Bras, Rafael L et al. Random function and Hydrology. Addison-Wesley publishing company, U. S. A. the first edition. 1984
- 6 Mosley M P. Subsurface flow velocities through selected forest soil. J Hydrology, 1982, 55: 1-4
- 7 冈本美芳. 日本列岛森林流域降雨径流现象与过程的研究. 径流实验研究译文集, 1975. 华东水利学院