

# 滇东北山区坡耕地土壤流失方程研究\*

杨子生

(云南大学地球科学系·昆明市·650091)

**摘 要** 滇东北山区是云南省“长江上游水土保持重点防治工程”治理计划的重点区域,该区域水土流失的主体是坡耕地。该项研究通过对 32 个试验小区连续 3 a 实测数据的统计分析,建立了滇东北山区坡耕地土壤流失方程  $A = R \cdot K \cdot LS \cdot C \cdot P$ ; 并确定了方程中诸因子的求算方法和数值,以及滇东北山区土壤允许流失量,为方程的应用提供了基本的技术数据。并进行了方程的验证,方程计算值与实测值的误差在 6% 以下,表明该方程在实际应用中具有很大的可靠性。该方程的建立,为滇东北山区预测预报土壤侵蚀,制定土地合理利用规划方案和水土保持措施,实行可持续发展战略提供了一套可靠的科学方法和依据。

中图分类号: S157.1

**关键词:** 土壤流失方程 降雨侵蚀力 土壤可蚀性 试验小区 土壤允许流失量

## Study on Soil Loss Equation of Cultivated Slopeland in Northeast Mountain Region of Yunnan Province

Yang Zisheng

(Department of Earth Science, Yunnan University, Kunming, 650091, PRC)

**Abstract** The northeast mountain region of Yunnan province is a major region of soil and water conservation of the upper Yangtze river in Yunnan province, the chief part of soil erosion in this region is cultivated slopeland. By means of the statistical analysis of the experimental data measured on 32 experimental spots over three years continuously, the soil loss equation of cultivated slopeland in northeast mountain region of Yunnan province has been developed as follows  $A = R \cdot K \cdot LS \cdot C \cdot P$ . The algorithm and data for every factor in the equation as well as the capacity for permissible loss of soil in northeast mountain region of Yunnan province have been determined, which provided the fundamental technological data for future use of the equation. At the same time, the author has made a test to the equation, the results indicate that the error of data by calculating does not exceed 6% when compared with the practical experimental data, which proved the equation may be very reliable in future application. The development of the equation may provide a series of dependable scientific methods and bases for predicting soil erosion, mapping out the rational utilization planning of land and the countermeasures of soil and water conservation, and carrying out the strategy of sustainable development in northeast mountain region of Yunnan province.

**Keywords** soil loss equation; rainfall erosive force; soil erodibility; experimental spot; the capacity for permissible loss of soil

### 1 研究目的

滇东北山区位于云南省东北部,地处长江上游地带,现为云南省“长江上游水土保持重点

防治工程”治理计划的重点区域。在行政区划上包括昭通地区、东川市和曲靖地区的宣威市、会泽县,共 14 个县(市),土地面积 36 238.45 km<sup>2</sup>,是云南省人口密度最大(1996 年末达 193 人/km<sup>2</sup>)、土地垦殖率最高(目前达 27.4%)、森林覆盖率最低(现仅 15% 左右)、水土流失灾害最严重的区域<sup>[1]</sup>。本区水土流失的主体是坡耕地,坡耕地年均土壤侵蚀量约占全区总侵蚀量的 90%<sup>[2]</sup>。为了尽快控制水土流失,实现可持续发展战略,必须摸清水土流失规律,研究土壤侵蚀机理。本项目研究的重点是以美国“通用土壤流失方程”(USLE)为基础,研究确定各项侵蚀因子指标,从而建立滇东北山区坡耕地土壤流失方程。方程的基本形式为:

$$A = R \cdot K \cdot LS \cdot C \cdot P \quad (1)$$

式中:  $A$ — 单位面积多年平均土壤流失量 ( $t/hm^2 \cdot a$ );  $R$ — 降雨侵蚀力因子 ( $J/m^2$ );  $K$ — 土壤可蚀性因子 ( $t/hm^2 \cdot a$ );  $LS$ — 地形因子,其中  $L$  为坡长 ( $m$ ),  $S$  为坡度 ( $^\circ$  或  $^\circ$ );  $C$ — 作物经营管理因子;  $P$ — 水土保持措施因子。由于该方程具有明显的区域性特点,为了应用该方程解决滇东北山区的问题,必须结合本区地理环境状况,对方程中诸因子进行全面的分析研究

## 2 研究方法

我们从 1995 年开始在昭通市乐居村(代表南部山原区)和东川市播卡村(代表西部高山峡谷区)对滇东北山区坡耕地 3 种主要土壤——红壤、黄壤和紫色土建立了 32 个径流试验小区,利用天然降雨、人工模拟降雨和调查研究相结合的方法,通过观测土壤流失量、记录降雨资料(使用自记雨量计)和摘录本区域 16 个气象台(站)的降雨资料,对土壤流失方程中诸因子进行定量的分析研究,确定适合于滇东北山区的方程中各因子的指标

## 3 试验小区设置

尽管滇东北山区为国内闻名的水土流失灾害区,但长期以来缺乏径流小区试验资料(云南省水利水电厅曾于 1985 年在东川得莫建立了径流站,但该站未考虑具体侵蚀因子,因而参考价值不大)。根据上述研究目的,我们于 1995 年在昭通市乐居村官坝冲(位于渔洞水库附近)和东川市播卡村(位于小江河谷上部)坡耕地上分别建立了水土流失试验站,其中昭通市乐居试验站为主要观测站,内含黄壤和紫色土 2 类土壤,该站修建了 31 个试验小区;东川市播卡试验站为辅助站,主要用于测定红壤  $K$  值,该站仅修建了 1 个试验小区。实测时间为 1995—1997 年连续 3 a。各侵蚀因子试验小区设置情况见表 1

我们将坡长 20 m,宽 2 m,坡度  $5^\circ$ ,无植被,无任何水土保持措施的径流试验小区作为滇东北山区的标准径流小区。

## 4 研究结果与分析

### 4.1 降雨侵蚀力指标的确定与 $R$ 值的计算

4.1.1 侵蚀性降雨雨量标准的分析与确定 根据昭通乐居站标准径流小区 1995—1997 年的 56 次实测土壤流失量和天然侵蚀性降雨资料,采用 80% 经验频率的分析方法,求得侵蚀性降雨的基本雨量标准值为 9.2 mm;计算不同历时侵蚀性降雨标准的方程式为:

$$H = 5.5532T^{0.4682} \quad (2)$$

式中:  $H$ — 降雨量 ( $mm$ );  $T$ — 降雨历时 ( $h$ )。我们将侵蚀性降雨不同时段分为 10 min, 20 min, 30 min, 40 min, 60 min 5 个时段,由上式计算出侵蚀性降雨的瞬时雨强标准值为: 10 min 2.4 mm, 20 min 3.3 mm, 30 min 4.0 mm, 40 min 4.6 mm, 60 min 5.6 mm。用经验频率  $P = 80\%$

的实测值进行检验,计算值误差  $< 5\%$ 。因此,上述计算值即为我们搜集各站降雨资料所掌握的标准

表 1 滇东北山区坡耕地水土流失试验小区简况表

小区 编号	坡度 (°)	坡长 / m	面积 / m <sup>2</sup>	土壤 类型	土地利用与地表覆盖状况	试验目的(因子)
No. 1	5	20	20×2	黄壤	地表裸露(人工拔除作物和杂草)	R, K, L S 因子
No. 2	5	20	20×2	紫色土	地表裸露(人工拔除作物和杂草)	K 因子
No. 3	5	20	20×2	红壤	地表裸露(人工拔除作物和杂草)	K 因子
No. 4	5	5	5×2	黄壤	地表裸露(人工拔除作物和杂草)	LS 因子
No. 5	5	10	10×2	黄壤	地表裸露(人工拔除作物和杂草)	LS 因子
No. 6	9	10	10×2	黄壤	地表裸露(人工拔除作物和杂草)	LS 因子
No. 7	9	20	20×2	黄壤	地表裸露(人工拔除作物和杂草)	LS 因子
No. 8	15	5	5×2	黄壤	地表裸露(人工拔除作物和杂草)	LS 因子
No. 9	15	10	10×2	黄壤	地表裸露(人工拔除作物和杂草)	LS 因子
No. 10	15	20	20×2	黄壤	地表裸露(人工拔除作物和杂草)	LS 因子
No. 11	15	35	35×2	黄壤	地表裸露(人工拔除作物和杂草)	LS 因子
No. 12	21	10	10×2	黄壤	地表裸露(人工拔除作物和杂草)	LS 因子
No. 13	21	20	20×2	黄壤	地表裸露(人工拔除作物和杂草)	LS 因子
No. 14	29	5	5×2	黄壤	地表裸露(人工拔除作物和杂草)	LS 因子
No. 15	29	10	10×2	黄壤	地表裸露(人工拔除作物和杂草)	LS 因子
No. 16	29	15	15×2	黄壤	地表裸露(人工拔除作物和杂草)	LS 因子
No. 17	36	10	10×2	黄壤	地表裸露(人工拔除作物和杂草)	LS 因子
No. 18	36	16	16×2	黄壤	地表裸露(人工拔除作物和杂草)	LS 因子
No. 19	39	12	12×2	黄壤	地表裸露(人工拔除作物和杂草)	LS 因子
No. 20	45	8	8×2	黄壤	地表裸露(人工拔除作物和杂草)	LS 因子
No. 21	12	20	20×2	黄壤	种植玉米(无水土保持措施)	C 因子(玉米)
No. 22	12	20	20×2	黄壤	地表裸露(人工拔除作物和杂草)	玉米对照区
No. 23	12	20	20×2	黄壤	种植马铃薯(无水土保持措施)	C 因子(马铃薯)
No. 24	12	20	20×2	黄壤	种植黄豆(无水土保持措施)	C 因子(黄豆)
No. 25	12	20	20×2	黄壤	地表裸露(人工拔除作物和杂草)	马铃薯、黄豆对照区
No. 26	12	20	20×2	黄壤	玉米-黄豆间作(无水土保持措施)	C 因子(间作)
No. 27	20	30	30×5	黄壤	种植玉米(等高带状耕作)	P 因子
No. 28	20	30	30×5	黄壤	种植玉米(人工修筑地埂)	P 因子
No. 29	20	30	30×5	黄壤	种植玉米(生物防冲带-绿肥)	P 因子
No. 30	20	30	30×5	黄壤	种植玉米(生物防冲带-苹果)	P 因子
No. 31	20	30	30×5	黄壤	种植玉米(水平梯田)	P 因子
No. 32	20	30	30×5	黄壤	种植玉米(顺坡耕作)	P 因子对照区

注: \* No. 3 小区属东川市播卡试验站,其余小区均为昭通市乐居试验站。

4.1.2 降雨动能计算方法 我们于 1995-1997 年采用滤纸色斑测定法<sup>[4]</sup>取样,获得了 36 次天然降雨雨滴滴谱观测资料,经计算分析,求得降雨动能与相应雨强的关系式为:

$$E = E_0 \cdot P \quad (3)$$

$$E_0 = 31.58 + 12.16 \log I \quad (4)$$

式中:  $E$ ——一次降雨某段降雨量产生的动能 ( $J/m^2$ );  $E_0$ ——某段降雨单位面积上 1 mm 降雨所产生的动能 ( $J/m^2 \cdot mm$ );  $P$ ——某段降雨量 (mm);  $I$ ——某段降雨强度 ( $mm/min$ )

4.1.3 降雨侵蚀力分析参数的选取 国内外已有的实验研究表明<sup>[3,5]</sup>,降雨侵蚀力  $R$  指标的基本组合结构形式是  $E^{\circ} I$ ,这一结构形式既考虑了降雨动能和最大降雨强度的交互影响,又考虑了动能与径流速度的复合效应。为了解决  $E^{\circ} I$  在滇东北山区的合理取值问题,本文进行了单因子、复合因子分别与土壤侵蚀量的相关分析。结果表明,降雨侵蚀单因子与土壤流失量

的相关性有以下特征: (1) 从瞬时雨强分析,  $I_{30}$ 与土壤流失量的相关系数( $r$ )达 0.724, 高于  $I_{10}$ ,  $I_{20}$ ,  $I_{40}$ ,  $I_{60}$ 与土壤流失量的  $r$ 值, 说明在滇东北山区的  $R$ 值指标中取 30 min 最大降雨强度较为理想; (2) 降雨动能参数  $E_{60}$ 与土壤流失量的  $r$ 值(0.710)较  $E_E$ 与土壤流失量的  $r$ 值(0.565)高 25.66%, 表明降雨总动能与土壤流失量的相关性不如 60 min 最大降雨动能与土壤流失量关系密切

从计算结果还可看出, 复合参数  $E_{60}I$ 与土壤流失量的平均相关系数为 0.710, 比  $E_{EI}$ 与土壤流失量的平均相关系数 0.587 高 20.95%, 亦比  $E_{30}I$ 与土壤流失量的平均相关系数 0.659 高 7.74%。其中, 以  $E_{60}I_{30}$ 与土壤流失量的相关系数最高, 达 0.786, 此值较  $E_{EI_{30}}$ 与土壤流失量的相关系数 0.602 高 30.56%。这表明, 降雨总动能和降雨强度乘积( $E_{EI}$ )与土壤流失量的相关性不如 60 min 最大降雨动能和降雨强度乘积( $E_{60}I$ )好, 而其中  $E_{60}I_{30}$ 与土壤流失量的相关程度比其它所有复合参数与土壤流失量的相关程度高。可见, 在滇东北山区坡面产生径流的降雨指标是  $E_{60}I_{30}$ , 它较  $E_{EI_{30}}$ 更为理想。因此, 本区降雨侵蚀力的最佳计算指标应为:

$$R = E_{60} \cdot I_{30} \quad (5)$$

式中:  $R$ ——降雨侵蚀力 ( $J/m^2$ );  $E_{60}$ ——60 min 最大降雨动能 ( $J/m^2$ );  $I_{30}$ ——30 min 最大降雨强度 ( $mm/h$ )。这里  $E_{60}$ 取的量纲与  $R$ 相同,  $I_{30}$ 按系数处理

4.1.4 降雨侵蚀力( $R$ )计算结果  $R$ 指标及其计算方法确定后, 采用各气象站自记纸的降雨资料, 即可应用微机计算出各站每次侵蚀性降雨的  $R$ 值以及月、年  $R$ 值, 将各年份(因受自记雨量计资料所限, 本文统一采用 1980—1997年, 共 18<sub>a</sub>)的月、年  $R$ 值累加后除以年数, 即得到本区各站多年平均  $R$ 值, 结果见表 2

表 2 滇东北山区降雨侵蚀力( $R$ )计算结果

气象站名称	计算年限	侵蚀性降雨次数	降雨侵蚀力 $I/(J \cdot m^{-2})$							年值
			5月	6月	7月	8月	9月	10月	年值	
昭通	18	242	9.6	40.6	68.2	59.8	30.0	8.6	216.8	
大山包	18	278	18.7	59.8	108.4	97.1	46.0	16.0	346.0	
鲁甸	18	207	12.1	58.7	76.3	59.4	34.2	13.6	254.3	
巧家	18	151	13.2	79.1	74.0	58.6	41.5	13.8	280.2	
盐津	18	162	18.2	64.0	121.4	130.0	49.6	15.2	398.4	
大关	18	154	15.5	53.4	103.8	119.5	45.3	10.6	348.1	
永善	18	139	8.8	45.7	63.4	59.2	26.8	2.8	206.7	
绥江	18	165	10.3	56.2	116.0	123.0	45.2	9.8	360.5	
镇雄	18	198	19.3	52.6	95.1	85.4	40.1	8.4	300.9	
彝良	18	215	10.4	46.9	91.6	85.0	39.8	4.3	278.0	
威信	18	250	23.0	54.7	107.2	101.4	43.7	13.2	343.2	
新村	18	132	11.1	58.1	58.8	48.6	32.9	10.8	220.3	
汤丹	18	157	13.3	68.5	76.3	58.4	40.7	11.2	268.4	
落雪	18	262	20.0	77.5	96.9	80.5	50.8	20.9	346.6	
宣威	18	172	17.3	78.9	74.7	58.7	41.8	9.1	280.5	
会泽	18	152	9.6	54.4	76.4	69.5	35.1	6.9	251.9	
合计	288	3036	230.4	949.1	1408.5	1294.1	643.5	175.2	4700.8	
平均	18	10.54	14.4	59.3	88.0	80.9	40.2	11.0	293.8	
占年 %			4.90	20.19	29.96	27.53	13.69	3.73	100	
累加 %			4.90	25.09	55.05	82.58	96.27	100		

注: 因本区 16 个气象站大多从 1980 年开始使用自记雨量计, 故本文计算年限统一为 1980—1997(共 18<sub>a</sub>)

## 4.2 土壤可蚀性因子( $K$ )值的测算

土壤可蚀性因子系反映在其它条件均相同时, 由于土壤本身性质不同所引起的土壤侵蚀

量的差异。K 值等于标准径流小区单位降雨侵蚀力的土壤流失率,即  $K = A / R$  (因为标准小区的  $LS, C, P$  值均为 1.0)。本文的研究采用实测法和诺模方程法相结合,即以滇东北山区坡耕地分布面积广,且侵蚀强度大的 3 类土壤——红壤、黄壤、紫色土的实测 K 值为基础,并与用美国诺模方程计算 K 值进行比较,找出二者的差异,据此修订诺模方程中的系数,建立起适合滇东北山区的修正诺模公式。

4.2.1 实测法测定 K 值 通过在昭通市乐居站和东川市播卡站建立 3 个不同土壤的标准试验小区,并进行连续 3 a (1995-1997 年) 实测,我们得到了 3 类代表性土壤的 K 值 (见表 3)

表 3 滇东北山区坡耕地代表性土壤实测 K 值

年 份	红 壤			黄 壤			紫色土		
	$A / (t^{\circ} \text{ hm}^{-2})$	$R / (J^{\circ} \text{ m}^{-2})$	$K / (t^{\circ} \text{ hm}^{-2})$	$A / (t^{\circ} \text{ hm}^{-2})$	$R / (J^{\circ} \text{ m}^{-2})$	$K / (t^{\circ} \text{ hm}^{-2})$	$A / (t^{\circ} \text{ hm}^{-2})$	$R / (J^{\circ} \text{ m}^{-2})$	$K / (t^{\circ} \text{ hm}^{-2})$
1995	85.26	230.41	0.370	66.78	225.63	0.296	93.56	225.63	0.415
1996	72.20	212.34	0.340	62.45	203.45	0.307	79.82	203.45	0.392
1997	83.08	225.50	0.368	65.98	219.61	0.300	92.66	219.61	0.422
平均值	80.18	222.75	0.360	65.07	216.23	0.301	88.68	216.23	0.410

注: 此表土壤 K 值均指耕作层

4.2.2 用美国诺模方程求算 K 值 美国学者威斯奇迈尔 (Wischmeier, W. H) 等<sup>[3]</sup>在进行区域性土壤性质与 K 值关系研究的基础上,建立了通过土壤基本性质查算 K 值的方法,并绘制了用以查算的诺模图。对于“粉砂+极细砂”含量不超过 70% 的土壤,诺模方程式为:

$$100K = 2.1M^{1.14} (10^{-4})(12 - a) + 3.25(b - 2) + 2.5(c - 3) \quad (6)$$

式中:  $M =$  “粉砂 + 极细砂” 含量百分数  $\times$  (100 - 粘粒含量百分数);  $a =$  有机质含量百分数;  $b =$  土壤结构编号;  $c =$  土壤剖面渗透等级。各项土壤参数确定如下:

土壤质地 ( $M$ ) 参数: 粉砂 (粒径 0.002~0.05 mm)、极细砂 (粒径 0.05~0.1 mm) 和砂粒 (粒径 0.1~2.0 mm) 含量百分数采用图解法将已有的土壤颗粒测定数据转换成美国制数据,据此计算  $M$  值

土壤有机质含量 ( $a$ ) 参数: 采用我们新测定的数据

土壤结构编号 ( $b$ ) 参数: 按照美国诺模图,分为 4 表 4 滇东北山区坡耕地土壤不同质地的土壤渗透等级参数  $c$  值

土壤渗透等级 ( $c$ ) 参数: 按美国诺模图,土壤渗透等级分为 6 个等级,分别对应着 6 个数值,即: 1(快), 2

砂粒含量 % (粒径 0.5~ 0.05 mm)	10 min 稳定 渗透率 / ( $\text{mm}^{\circ} \text{ min}^{-1}$ )	土壤渗透 等级	$c$ 值
> 50	> 1.50	快	1
50~ 40	1.50~ 1.00	中等~ 快	2
40~ 30	1.00~ 0.60	中等	3
30~ 20	0.60~ 0.35	慢~ 中等	4
20~ 5	0.35~ 0.10	慢	5
< 5	< 0.10	非常慢	6

(中等~快), 3(中等), 4(慢~中等), 5(慢), 6(非常慢)。为了较准确地划分滇东北山区坡耕地土壤的渗透等级,我们于 1996 年在昭通地区选取地形坡度为 5°、无植被 (人工拔除作物和杂草) 的 10 个不同质地的土壤剖面,用人工降雨方法来测定土壤渗透率。根据实测资料,我们确定出滇东北山区坡耕地土壤不同质地的渗透等级 (见表 4)。

上述  $M, a, b, c$  4 个参数确定后,即可由式 (6) 计算出土壤 K 值。我们所计算的滇东北山区坡耕地 3 类代表性土壤——红壤、黄壤和紫色土的 K 值见表 5

4.2.3 对美国诺模方程的修正 比较表 3 和表 5 可以看出,滇东北山区坡耕地 3 类代表性土

壤平均实测  $K$  值比计算  $K$  值大 30.35%。分析其原因,由于上述诺模方程是用美国的区域实测资料求得的,我们在计算  $R$  值时根据滇东北山区实际情况,将  $R$  指标定为  $E_{60}I_{30}$ ,而美国的  $R$  指标为  $E_{EI_{30}}$  (即降雨总动能与 30min 最大雨强的乘积),用  $E_{60}I_{30}$  计算的  $R$  值比用  $E_{EI_{30}}$  计算的  $R$  值小,因而用  $E_{60}I_{30}$  求得的  $K$  值要比用  $E_{EI_{30}}$  求得的  $K$  值大。我们对式 (6) 的右边各项常数均乘以 (1+ 0.3035) 后,即可得到适合滇东北山区求算土壤  $K$  值的修正诺模公式:

$$K = [2.737M^{1.14}(10^{-4})(12-a) + 4.236(b-2) + 3.259(c-3)]/100 \quad (7)$$

式 (7) 中的  $M, a, b, c$  4 项参数均与式 (6) 相同。

运用上述修正后的诺模公式求得的  $K$  值为: 红壤 0.360, 黄壤 0.300, 紫色土 0.411。与实测  $K$  值相比,修正后的计算值误差小于 0.5%。因此,修正诺模公式在滇东北山区是实用的。

表 5 用美国诺模方程计算的滇东北山区代表性土壤  $K$  值

土类	粉砂+ 极细砂含量 / %	砂粒含量 / %	有机质含量 / %	土壤结构编号	土壤渗透性等级	$K$ 值 / $(t^{\circ} \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1})$
红壤	56.76	3.54	1.14	3	3	0.276
黄壤	52.42	2.16	1.21	3	3	0.230
紫色土	58.26	10.34	0.50	3	2	0.316

### 4.3 地形因子 ( $LS$ ) 值的测算

地形因子 ( $LS$ ),是指在其它条件相同的情况下,特定坡面 (特定坡度和坡长) 的土壤流失量与标准径流小区土壤流失量之比值,即:

$$LS = A/A_0 \quad (8)$$

式中:  $A$ ——特定坡面土壤流失量 ( $t/\text{hm}^2 \cdot \text{a}$ );  $A_0$ ——标准径流小区土壤流失量 ( $t/\text{hm}^2 \cdot \text{a}$ )。

本文研究的基本方法是采取实测手段,通过分析滇东北山区 18 个  $LS$  因子小区试验资料,求取定量的  $LS$  关系式,以揭示本区域坡耕地土壤侵蚀的坡面地形因子效应。

4.3.1 试验结果 经过 1995—1997 年连续 3 a 的试验观测,我们获得了 18 个  $LS$  因子试验小区各年份和年均土壤流失量资料,并由式 (8) 计算出各小区的平均  $LS$  值 (见表 6)。

表 6 滇东北山区坡耕地土壤侵蚀地形因子 ( $LS$ ) 试验小区实测结果

小区编号	土壤流失量 $I/(t^{\circ} \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1})$				$LS$ 值	小区编号	土壤流失量 $I/(t^{\circ} \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1})$				$LS$ 值
	1995年	1996年	1997年	年平均			1995年	1996年	1997年	年平均	
No. 1	66.78	62.45	65.98	65.07	1.00	No. 12	386.80	339.43	372.14	366.12	5.63
No. 4	48.32	43.59	47.76	46.56	0.72	No. 13	456.21	409.76	430.45	432.14	6.64
No. 5	59.75	50.62	53.57	54.65	0.84	No. 14	508.90	437.55	475.66	474.04	7.29
No. 6	125.89	110.94	121.77	119.53	1.84	No. 15	590.78	529.50	559.82	560.03	8.61
No. 7	151.12	128.04	144.56	141.24	2.17	No. 16	650.39	587.73	615.95	618.02	9.50
No. 8	212.71	181.27	200.63	198.20	3.05	No. 17	792.35	697.85	750.14	746.78	11.48
No. 9	242.36	224.84	236.72	234.64	3.61	No. 18	889.18	771.82	845.27	835.42	12.84
No. 10	290.12	261.28	279.98	277.13	4.26	No. 19	922.56	802.70	872.39	865.88	13.31
No. 11	339.90	290.28	322.42	317.53	4.88	No. 20	991.48	897.58	958.22	949.09	14.59

4.3.2  $LS$  关系式的分析推导 根据上述 18 组坡度、坡长和土壤流失量的统计分析,经过反复推导,我们得出滇东北山区坡耕地  $LS$  因子的计算公式为:

$$LS = (L/20)^{0.24} (S/5A)^{1.32} \quad (9)$$

式 (9) 中:  $L$ ——坡长 (m);  $S$ ——坡度 ( $^{\circ}$ )。由式 (9) 可看出,滇东北山区  $LS$  的关系式与国内外已有的  $LS$  公式基本形式相似,但坡度与坡长指数有所不同,这是由区域特点决定的。式 (9) 的

坡度适用范围为  $5^{\circ} \sim 45^{\circ}$ 。由式 (9) 计算的  $LS$  值的相对误差一般小于  $2\%$ , 表明式 (9) 在滇东北山区是适用的。

#### 4.4 作物经营因子 ( $C$ ) 值的测算

作物经营因子 ( $C$ ) 值是指某作物在各个生育期的  $C$  值与该作物同一生育期内的降雨侵蚀力 ( $R$ ) 值占全年  $R$  值的百分数之乘积的总和<sup>[6]</sup>。其计算公式为:

$$C = \sum_{i=1}^n C_i R_i \quad (10)$$

式中:  $n$ ——作物生育期, 一般可分为 4 个生育期;  $C_i$ ——某作物在某个生育期内的坡地土壤流失量与同期休闲地的土壤流失量的比值;  $R_i$ ——作物在某个生育期内的降雨侵蚀力  $R$  值占全年  $R$  值的百分数

4.4.1 作物生育期的划分  $C$  值的大小是由覆盖率决定的, 不同的覆盖率有着不同的  $C$  值。为了便于对坡耕地进行水土保持规划设计, 我们将作物的生育期划分为以下 4 个时期: (1) 苗期 (第 1 期): 从播种到播种后 45 d 左右 (玉米从 4 月 25 日到 6 月 10 日; 马铃薯、黄豆从 5 月 1 日到 6 月 15 日); (2) 生长期 (第 2 期): 在苗期后的 40 d 左右 (玉米从 6 月 11 日到 7 月 20 日; 马铃薯、黄豆从 6 月 16 日到 7 月 25 日); (3) 成熟期 (第 3 期): 在生长期后到收割为止 (玉米从 7 月 21 日到 9 月 10 日, 马铃薯、黄豆从 7 月 25 日到 9 月 5 日); (4) 残茬期 (第 4 期): 收获以后 (玉米从 9 月 11 日以后, 马铃薯、黄豆从 9 月 6 日以后)。

4.4.2  $C_i$  值的计算 通过 1995—1997 年连续 3 a 试验, 获得了各试验作物在各个生育期的坡地土壤流失量和对照区 (休闲地) 同期土壤侵蚀量实测资料, 按上述方法计算出  $C_i$  值 (见表 7)。

4.4.3  $R_i$  值的计算 利用昭通站历年自记雨量资料, 按式 (5) 计算出作物各生育期  $R$  值和年  $R$  值, 即可求得  $R_i$  值 (见表 7)。

4.4.4  $C$  值的计算 按式 (10), 作物各生育期的  $C_i$  值与其相对应的  $R_i$  值乘积之和即为  $C$  值。试验区各作物  $C$  值的计算结果见表 7 对于其它农作物, 未设试验区进行试验, 但可根据其覆盖程度, 参照上述 4 种作物种植类型的覆盖度来估算其  $C$  值。

表 7 滇东北山区坡耕地土壤侵蚀试验作物  $C$  值计算表

作物	生育期	$C_i$	$R_i$	$C$	年 $C$ 值
玉米	1	0.4612	0.0812	0.0374	0.3517
	2	0.3836	0.4041	0.1550	
	3	0.3021	0.4185	0.1264	
	4	0.3421	0.0962	0.0329	
马铃薯	1	0.4725	0.0958	0.0453	0.3721
	2	0.4069	0.3975	0.1617	
	3	0.3162	0.4018	0.1270	
	4	0.3629	0.1049	0.0381	
黄豆	1	0.4873	0.0958	0.0467	0.3551
	2	0.4294	0.3975	0.1707	
	3	0.2571	0.4018	0.1033	
	4	0.3284	0.1049	0.0344	
玉米— 黄豆间作	1	0.3943	0.0812	0.0320	0.1990
	2	0.2134	0.4041	0.0862	
	3	0.1523	0.4185	0.0637	
	4	0.1773	0.0962	0.0171	

注: 地面无植被的地块的  $C$  值为 1

#### 4.5 水土保持措施因子 ( $P$ ) 值的测算

土壤流失方程式中的  $P$  因子反映了水土保持措施对于坡地土壤流失量的控制作用。我们将  $P$  因子定义为: 在其它条件相同的情况下, 布设某一水土保持措施的坡耕地土壤流失量与无任何水土保持措施的坡耕地土壤流失量之比值, 即:

$$P = A_P / A \quad (11)$$

式中:  $A_P$ ——布设某一水土保持措施的坡耕地土壤流失量 ( $t/hm^2 \cdot a$ );  $A$ ——无任何水土保持措施的坡耕地土壤流失量 ( $t/hm^2 \cdot a$ );  $P$  值的大小介于 0~1 之间。

滇东北山区坡耕地的主要水土保持措施有等高带状耕作、地埂、生物防冲带—绿肥、生物

防冲带-苹果、水平梯田(梯地)等 5 种。本文采用试验方法,通过对这 5 种措施分别设置试验小区,同时设置对照区,实际测定各种水土保持措施的  $P$  值大小。

经过 1995-1997 年连续 3 a 的试验观测,我们得到了各个试验小区的年均土壤流失量实测资料,由式(11)计算出各种水土保持措施的  $P$  值,详见表 8。

表 8 滇东北山区坡耕地水土保持措施因子 ( $P$ ) 值实测表

水土保持措施	试验小区侵蚀模数 $I/(t^{\circ} \text{hm}^{-2} \text{a}^{-1})$				对照区侵蚀模数 $I/(t^{\circ} \text{hm}^{-2} \text{a}^{-1})$				$P$ 值
	1995 年	1996 年	1997 年	年平均	1995 年	1996 年	1997 年	年平均	
等高带状耕作	92.78	76.08	89.64	86.17					0.5532
地 埂	30.37	26.50	28.92	28.60					0.1836
生物防冲带-绿肥	64.92	50.81	59.27	58.33	165.73	143.24	158.32	155.76	0.3745
生物防冲带-苹果	82.24	71.42	78.20	77.29					0.4962
水平梯地(梯田)	5.36	4.43	4.98	4.92					0.0316

## 5 土壤流失方程的验证

为了检验土壤流失方程在实际应用中的可靠性,我们在昭通市乐居试验站东南侧和西北侧坡耕地上建立了 2 个集水区,分别称为 I 区和 II 区。用这 2 个集水区 1995-1997 年连续 3 a 实测土壤流失量与方程计算的土壤流失量进行比较,结果见表 9。

由表 9 可以看出,在较大面积的坡耕地土壤侵蚀中,用土壤流失方程计算的年均土壤流失量稍高于实测值,但其误差在 6% 以下(I 区误差为 5.43%,II 区误差为 4.52%),表明土壤流失方程在实际应用中具有很大的可靠性。

表 9 昭通市乐居站两侧坡耕地集水区土壤流失量实测值与计算值之比较

坡耕地 集水区	简 况					土壤流失量 $I/(t^{\circ} \text{hm}^{-2} \text{a}^{-1})$					
	面积 / $\text{hm}^2$	坡度 / $(^{\circ})$	坡长 / m	土壤类型	作物	水土保持 措 施	实 测 值				方 程 计 算 值
							1995 年	1996 年	1997 年	年平均	
I 区	0.86	18	238	砂岩类黄壤	玉米	顺坡耕作	235.45	187.53	216.72	213.23	224.80
II 区	0.24	12	126	砂页岩紫色土	马铃薯	顺坡耕作	174.89	134.99	160.24	156.71	163.79

## 6 土壤允许流失量的确定

土壤允许流失量是指在保证土壤在经济上能够长期地维持高生产力水平的条件下所允许的最大土壤流失量 ( $t/\text{hm}^2 \cdot \text{a}$ ),它是土壤流失方程应用中必不可少的技术指标。在应用方程选择保土措施之前,首先必须确定所研究地块的允许土壤流失量。

滇东北山区的土壤允许流失量,根据本区域地理环境特点、土壤性状、耕作和施肥水平、土壤侵蚀程度以及我国水利部土壤侵蚀强度分级指标的规定,并参考国内外资料,经本研究课题组和有关部门专家共同分析讨论,认为滇东北山区坡耕地土层较薄、透水性能差、侵蚀程度又很严重,可将土壤允许流失量定为  $2.5 \sim 5.0 (t/\text{hm}^2 \cdot \text{a})$  (约  $0.2 \sim 0.4 \text{ mm/a}$ )。

## 7 土壤流失方程的应用

由于土壤流失方程所考虑的影响土壤侵蚀的因素较为齐全,计算方法比较科学,完成了从定性到定量研究的重大突破,它不仅能较准确地预测预报土壤侵蚀量,更重要的是它已成为制定土地合理利用规划方案和选择最佳保土措施的有用技术工具。加之其形式简单、明了、直观,易为人们所接受,因而便于推广应用。

目前,滇东北山区坡耕地土壤流失方程已应用于土地利用总体规划、耕地适宜性评价和土

地可持续利用研究工作中。例如,最近由笔者负责完成的《东川市土地利用总体规划》《云南省耕地适宜性评价研究》和《云南省土地利用总体规划(1997-2010年)》等项目均不同程度地应用了土壤流失方程,其成果得到了云南省有关部门的充分肯定和好评。由于篇幅所限,具体情况将另文介绍。

参加此项研究和试验观测的还有云南大学谢应齐教授,东川市气象局田学云工程师,昭通地区气象局宗德孝工程师,杨麟忠助理工程师,陈祥邦农艺师,以及云南省地理研究所王云鹏高级工程师。本文研究工作得到黑龙江省水土保持科学研究所张宪奎先生的帮助,特此致谢!

#### 参 考 文 献

- 1 谢应齐,杨子生.云南省农业自然灾害区划.北京:中国农业出版社,1995.170-205
- 2 杨子生,谢应齐.滇东北坡耕地水土流失分析.中国农业资源与区划,1997(6):17-23
- 3 Wischmeier W H, Smith D D. Predicting rainfall erosion losses—a guide to conservation planning. Agriculture handbook, No. 537, U S D A, 1978. 12-72
- 4 江忠善,宋文经,李秀英.黄土地区天然降雨雨滴特性研究.中国水土保持,1983(3):32-36
- 5 王万忠,焦菊英.中国的土壤侵蚀因子定量评价研究.水土保持通报,1996,16(5):1-20
- 6 高博文.介绍土壤流失方程中  $R$  值和  $C$  值的计算方法.中国水土保持,1982(4):42-44

## 植物物质化学近似组成系统分析中半纤维、 纤维素的还原糖方法改进

植物物质化学近似组成系统分析是一项复杂繁琐的测定方法(此法选自《土壤有机质研究法》),主要是通过对枯枝落叶有机物质的化学转化,了解植物残体、绿肥等植物物质的化学组成。此组成中半纤维、纤维素是除去水分、苯醇溶性和水溶物质的残渣,先后经盐酸、硫酸水解而转化成还原糖,再通过测定还原糖的量来换算出半纤维素、纤维素的含量。

在原方法即斐林—铜量法试验过程中,存在如下几个问题:(1)水解液调试不易掌握;(2)需要一套用于洗滤  $\text{Cu}_2\text{O}$ (氧化亚铜)的特殊装置;使操作程序繁琐;(3)滴定终点突变不明显,分析结果重现性差。为了解决这些问题,参考了其它有关测定还原糖的方法,根据还原糖测定方法的化学原理,以及实验室的现有条件,选用了斐林—碘量法。经反复试验,用两种方法测定豆子根中的半纤维素做比较,结果见表 1。

表 1 两种方法测定半纤维素比较

分析方法	半纤维素%		平均%	绝对偏差%	相对偏差%
铜量法	12.33	11.79	12.06	0.27	2.24
碘量法	13.96	13.74	13.85	0.11	0.79

结论:试验结果表明:(1)水解液调试易掌握;(2)碘量法相对偏差明显小于铜量法;(3)在试验操作过程中,不需要任何特殊洗滤装置,即简化了程序,而且系统误差减小,重现性也好。因此,认为用系统法测定半纤维素、纤维素时,可以用斐林—碘量法代替斐林—铜量法。

(田梅霞·中国科学院水利部水土保持研究所·陕西杨陵·712100)