

云南省金沙江流域土壤流失方程研究

杨子生

(云南大学资源环境与地球科学学院, 云南 昆明 650091)

摘 要:云南金沙江流域是长江中上游水土流失最严重的区域。本研究以“通用土壤流失方程”(USLE)为蓝本,运用小区实验等手段,综合分析了各个侵蚀因子,建立了云南金沙江流域土壤流失方程 $A = R \cdot K \cdot LS \cdot C \cdot P$,并确定了方程中诸因子的求算方法和数值,以及该流域土壤允许流失量,为方程的应用提供了基本的技术数据。同时,还进行了方程的检验,方程计算值与小区实测值的相对误差在 6.3% 以下,表明该方程在实际应用中是可靠的。该方程的建立,可为云南金沙江流域预测预报土壤侵蚀,制定土地合理利用规划方案、水土保持措施和土地生态安全格局提供了一套可靠的科学方法和依据。

关键词:土壤流失方程;降雨侵蚀力;土壤可蚀性;地形因子;植被覆盖与作物经营因子;水土保持措施因子;云南金沙江流域

中图分类号:S157.1 **文献标识码:**A

1 前言

土壤流失定量测算是制定土地资源合理利用与管理措施、流域水土保持规划、水利工程设计等诸多方面的重要科学依据之一,因而土壤流失预测预报研究工作受到各国的重视,先后开发和研制出许多模型。这些模型大致可分为统计模型和过程模型 2 类,前者以美国 1965 年提出的“通用土壤流失方程”(Universal Soil Loss Equation,简称 USLE)^[1,2]最有影响,后者以美国 1995 年发布的水蚀预报项目(Water Erosion Prediction Project,简称 WEPP)^[3,4]为代表。USLE 是基于大量小区观测资料和人工模拟试验资料而建立的,其模型形式简单,使用方便,但作为经验统计模型,它缺乏对侵蚀过程及其机理的深入剖析;WEPP 模型是迄今为止描述水蚀相关物理过程参数最多的模型,目前开发比较成功的有坡面版和流域版,作为过程模型,它比现有统计模型(USLE 及在此基础上的修正模型 RUSLE^[5]等)有着明显的优越性^[4,6],主要是可以估算土壤侵蚀的时空分布,即全坡面或坡面任一点的净侵蚀量及其随时间的变化。

总体上看,WEPP 模型虽然先进,但目前推广应用还很困难。而 USLE 模型由于其形式简单、明了、直观,易为人们所接受,因而便于推广和应用。近几十年来,USLE 模型已应用于许多国家和地区,成为世界著名的坡面土壤流失预报模型。从我国看,进入 20 世纪 80 年代以来,不少学者以美国 USLE 模型为蓝本,根据各研究地区实际情况对方程中有关因子进行修正,建立了一些区域性的土壤侵蚀预报模型,如小良水土保持试验站^[7](陈法扬等,1992)、黑龙江省^[8,9](张宪奎等,1992)、闽东南^[10](黄炎和等,1993)、福建省^[11](周伏建等,1995)、滇东北山区^[12,13](杨子生,1999)等。此外,江忠善等^[14](1996)建立了考虑陡坡地浅沟侵蚀的土壤流失预报模型,蔡国强等^[15](1996)建立了考虑坡面物理过程的土壤流失预报模型,等等,这些预报模型各有其优缺点。近年来,刘宝元等借鉴美国 USLE 的成功经验和建模思路,建立了中国坡面土壤流失预报方程(CSLE)^[6,16],该方程将 USLE 中的作物和水土保持措施两大因子扩展为水土保持三大措施因子,即生物(B)、工程(E)和耕作措施(T)因子,符合我国水土保持措施的实际情况,且其模型结构简单、明了,有望在全国推广应用。

收稿日期:2002-10-20。

基金项目:国家自然科学基金资助项目(40061006)《云南金沙江流域水土流失与土地利用安全格局研究》。

作者简介:杨子生(1964-),男,云南大理人,理学博士,教授。主要从事土地资源与土地利用规划、土壤侵蚀与水土保持、自然灾害与防灾减灾、土地生态学与生态建设等领域的研究工作。

云南金沙江流域是长江上游生态环境最脆弱、水土流失最严重的区域,已被《全国生态环境建设规划》列为我国生态建设的重中之重。为了能够定量地测算坡面土壤流失量,以便为制定土地合理利用规划和选择最佳保土措施提供技术支持,本研究拟以应用较为广泛的美国 USLE 为蓝本,在 1999 年所建立的滇东北山区(系水土流失最严重的金沙江下游区)坡耕地土壤流失方程的基础上,吸取已有的有关观测资料,进一步扩展和建立起该流域土壤流失方程。

2 研究方法

2.1 基本模型形式

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

式(1)中 A ——多年平均土壤流失量($t/hm^2 \cdot a^{-1}$); R ——降雨侵蚀力($J \cdot mm/m^2 \cdot h^{-1} \cdot a^{-1}$); K ——土壤可蚀性因子($t \cdot m^2 \cdot h \cdot a / hm^2 \cdot J^{-1} \cdot mm^{-1} \cdot a^{-1}$); LS ——地形因子,无因次,其中 L 为坡长(m), S 为坡度(°或°); C ——植被覆盖与作物经营管理因子,无因次; P ——水土保持措施因子,无因次。

由于该方程具有明显的区域性特点,为了应用该方程解决云南金沙江流域的问题,需要结合该流域地理环境状况,通过设置一定数量的侵蚀试验小区进行试验观测,对方程中的诸因子进行全面的分析研究。

2.2 侵蚀小区试验

下游的滇东北山区是云南金沙江流域水土流失最为严重的区域,尤其坡耕地水土流失非常突出。为此,我们曾于 1995~1997 年在昭通市乐居村官坝冲(位于渔洞水库附近)和原东川市播卡村(位于小江河谷上部)坡耕地上建立了水土流失试验站,共修建了 32 个不同因子试验小区,并根据试验结果建立起了滇东北山区土壤流失方程^[12,13,17-22],这是本次建立云南金沙江流域土壤流失方程的基础。

杨俊等^[23]1990 年在中游滇中“红岩”高原区南华县一街乡建立了径流试验场,共设置 6 个不同坡度与植被(耕作方式)的小区,在当年雨季进行了观测,取得了相应的实测数据。

姚治君等^[24]1985 年在上游的丽江市玉龙雪山东南坡设置了土壤流失试验区,共 2 个样地,于当年雨季进行观测,建立起降雨因子与土壤流失量的定量关系。

水利电力部天津勘测设计院和云南省水利水电厅 1987 年在应用遥感技术调查云南省土壤侵蚀工作中,

在各地(州、市)实地调查了 100 多个不同坡度、土壤、植被与土地利用方式的侵蚀样方,测定了侵蚀量。

为了对植被、土地利用方式等因素对土壤流失的影响做进一步的分析,我们于 2001 年在赴中上游各地考察过程中,在宾川县金沙江南岸红壤坡地上选取同坡度(21°)、同坡长(15m)、不同植被与利用方式的 7 个小区进行了简易观测(仅测定土壤流失量),取得了基本的数据。

以上这些小区和样地的试验与观测为本文分析和确定土壤流失方程中各因子的合理取值问题、进而建立云南金沙江流域土壤流失方程奠定了较好的基础。

3 土壤流失方程各因子分析

3.1 降雨侵蚀力因子(R)分析及年均 R 值的简便计算

降雨侵蚀力(R)是指降雨引起侵蚀的潜在能力,它是土壤流失方程中首要的基础因子。 R 指标与降雨量、降雨历时、降雨强度、降雨动能有关,反映了降雨特性对土壤侵蚀的影响。降雨是引起土壤侵蚀的动力和前提条件, R 指标的研究和确定,可为定量预报土壤流失、科学制定水土保持措施提供可靠依据,也为分析确定土壤可蚀性奠定基础。

对降雨侵蚀力的研究,美国学者 Wischmeier W H 和 Smith D D^[1](1958)找出了降雨总动能($\sum E$)及其 30min 最大雨强(I_{30})的乘积与土壤流失量的关系最为密切,因而降雨侵蚀力的表达式为 $R = \sum E \cdot I_{30}$ 。多年来,在其它一些国家和我国一些水土保持科研部门一直引用公式计算降雨侵蚀力。近 10 余年来,我国已有不少科研工作者通过各地小区试验资料的统计分析,以 $E \cdot I$ 结构形式为基础,提出了各地区的 R 指标^[25],如王万忠^[26](1983)、贾志军等^[27](1987)在西北黄土地区,张宪奎^[8](1992)在东北黑土地地区,吴素业^[28](1992)、黄炎和等^[29](1992)、周伏建等^[30](1995)在南方红壤地区,等等。鉴于降雨动能计算的复杂性,也可以用雨量代替动能,即采用雨量与时段最大雨强的乘积计算降雨侵蚀力^[31-33]。就云南金沙江流域而言,我们在研究下游的滇东北山区降雨侵蚀力^[18]时得出的计算方法为 $R = E_{60} \cdot I_{30}$ 。姚治君等^[24](1985)在研究上游的丽江市玉龙雪山东南坡降雨因子与土壤流失量定量关系时,将 10min 最大雨强(I_{10})作为瞬时降雨强度、60 min 最大雨强(I_{60})作为峰值降雨强度,把此二者与一次降雨的平均强度(I_a)的乘积($I_{10} \cdot I_{60} \cdot I_a$)作

为降雨侵蚀因子,并命名为雨强递减系数。从单个降雨因子看,玉龙雪山东南坡 I_{10} 与土壤流失量的相关系数只有 0.57(W-1 样地)~0.64(W-2 样地),而 I_{60} 与土壤流失量的相关系数则达 0.77(W-1 样地)~0.84(W-2 样地)。从全流域的总体降雨特征及其它观测资料分析,该流域采用 $R = E_{60} \cdot I_{30}$ 是合适的,后文的检验结果也表明,采用 $R = E_{60} \cdot I_{30}$ 计算降雨侵蚀力所得出的土壤流失量误差较小。

在按 $E \cdot I$ 结构形式计算降雨侵蚀力时,需要详细的降雨过程资料以便计算降雨动能(E)。由于在不少国家和地区难以获得详尽的降雨过程资料,同时,其摘录和计算过程亦非常费时费力,因而许多学者相继推出了不同的降雨侵蚀力简易计算方法^[34],即通过建立常规降雨资料与实测降雨侵蚀力或 $E \cdot I$ 的关系,用常规降雨资料来计算多年平均年降雨侵蚀力。这样一来,既可免去对降雨动能 E 的复杂计算,又可通过扩展使用常规降雨资料,从而延长降雨侵蚀力的时间计算序列或增大计算的站点密度。从已有的简易算法看,所使用的常规降雨资料可归纳为 5 类:(1)逐年月雨量资料(黄炎和等,1992;吴素业,1992;周伏建等,1995;孙保平等,1990);(2)逐年年雨量和月雨量资料(刘秉正,1993;马志尊,1989;Wischmeier W H 等,1978;Ferro V 等,1991);(3)多年平均年雨量和月雨量资料(Arnoldus H M J, 1977;Renard K G 等,1994;Bofu Yu 等,1996);(4)逐年年雨量资料(Lo A 等,1985);(5)日雨量资料(Richardson C W 等,1983);(6)多年平均年雨量及海拔高程资料(Mikhailova E A 等,1997);(7)多年一遇的时段雨量(张宪奎,1992)。根据需求和可能条件,经反复比较和分析,云南金沙江流域年均降雨侵蚀力的计算采用年均月雨量资料,具体方法有 2 种:一是建立雨季(5~10 月)逐月 $E_{60}I_{30}$ 计算的 R 值与月雨量之间的定量关系式,以此推求逐月 R 值,再累加得到年均 R 值,简称简易算法 I;二是直接建立雨季(5~10 月) $E_{60}I_{30}$ 计算的 R 值与其雨量之间的定量关系式,从而求得年均 R 值,简称简易算法 II。建模结果见表 1。据此计算结果表明,简易算法 I 计算的 R 值与 $E_{60}I_{30}$ 计算 R 值的相对偏差最大为 5.00%,简易算法 II 计算的 R 值与 $E_{60}I_{30}$ 计算 R 值的相对偏差最大为 6.60%(见表 2)。可见,这 2 种简易计算方法的误差均不大,是可以采用的合适方法,本文采用简易算法 I 来计算该流域各站年均 R 值。

表 1 雨季各月 R 值与降雨量 P 的回归方程及相关系数表Table 1 The regression equation of monthly R values and precipitation in rainy season and their correlation coefficients

月 份	回归方程	相关系数 (r)
5 月	$R_5 = 0.04308 \times P_5^{1.28410}$	0.87556
6 月	$R_6 = 0.67348 \times P_6^{0.87439}$	0.80276
7 月	$R_7 = 1.32392 \times P_7^{0.81062}$	0.85958
8 月	$R_8 = 0.59120 \times P_8^{0.94287}$	0.91295
9 月	$R_9 = 1.15187 \times P_9^{0.74746}$	0.70723
10 月	$R_{10} = 0.00379 \times P_{10}^{1.84701}$	0.85323
5~10 月	$R_{5-10} = 0.44488 \times P_{5-10}^{0.96982}$	0.87829

表 2 简易算法计算的 R 值及其与 $E_{60}I_{30}$ 计算 R 值的相对偏差(E_r)Table 2 The R values calculated by simple estimating methods and their compared with $E_{60}I_{30}$

序号	站名	$E_{60}I_{30}$ 计算 R 值	简易算法 I 计算		简易算法 II 计算	
			R 值	E_r (%)	R 值	E_r (%)
1	丽江	297.3	311.4	4.74	306.0	2.93
2	南华	268.0	281.4	5.00	274.9	2.57
3	新村	220.3	222.1	0.82	226.1	2.63
4	汤丹	268.4	262.5	2.20	266.1	0.86
5	落雪	346.6	363.0	4.73	365.8	5.54
6	宜威	280.5	270.2	3.67	280.8	0.12
7	会泽	251.9	264.2	4.88	260.6	3.45
8	昭通	216.8	213.1	1.71	211.8	2.31
9	大山包	346.0	345.6	0.12	350.2	1.21
10	鲁甸	254.3	251.8	0.98	256.0	0.67
11	巧家	280.2	282.0	0.64	291.3	3.96
12	盐津	398.4	414.2	3.97	409.7	2.84
13	大关	348.1	355.1	2.01	349.8	0.49
14	永善	206.7	215.6	4.31	211.3	2.23
15	绥江	360.5	342.6	4.97	336.7	6.60
16	镇雄	300.9	307.0	2.03	311.1	3.39
17	彝良	278.0	291.8	4.96	283.8	2.09
18	威信	343.2	336.1	2.07	338.9	1.25

计算结果(见表 3)表明,云南金沙江流域年均 R 值的空间分布具有以下特点:(1)总体上,中下游区年均 R 值明显大于中上游区, R 值最大的是下游的盐津、水富等地,年均 R 值最小的是上游的德钦等地(见图 1)。(2)受山地地形的影响,年均 R 值的垂直分布特征显著。以东川小江流域为例,位于河谷区的新村站(海拔 1 254.1 m)年均 R 值只有 222.1 $\text{J} \cdot \text{mm}/\text{m}^2 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$,半山区的汤丹站(海拔 2251.0 m)年均 R 值增至 262.5 $\text{J} \cdot \text{mm}/\text{m}^2 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$,而山地上部的落雪站(海拔 3 227.1 m)年均 R 值达到 363.0 $\text{J} \cdot \text{mm}/\text{m}^2 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$;又如,位于昭鲁盆地区的昭通站(海拔 1 949.5 m)年均 R 值为 213.1 $\text{J} \cdot \text{mm}/\text{m}^2 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$,而山区的大山包站(海拔 3 119.6 m)年均 R 值却达 345.6 $\text{J} \cdot \text{mm}/\text{m}^2 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$ 。

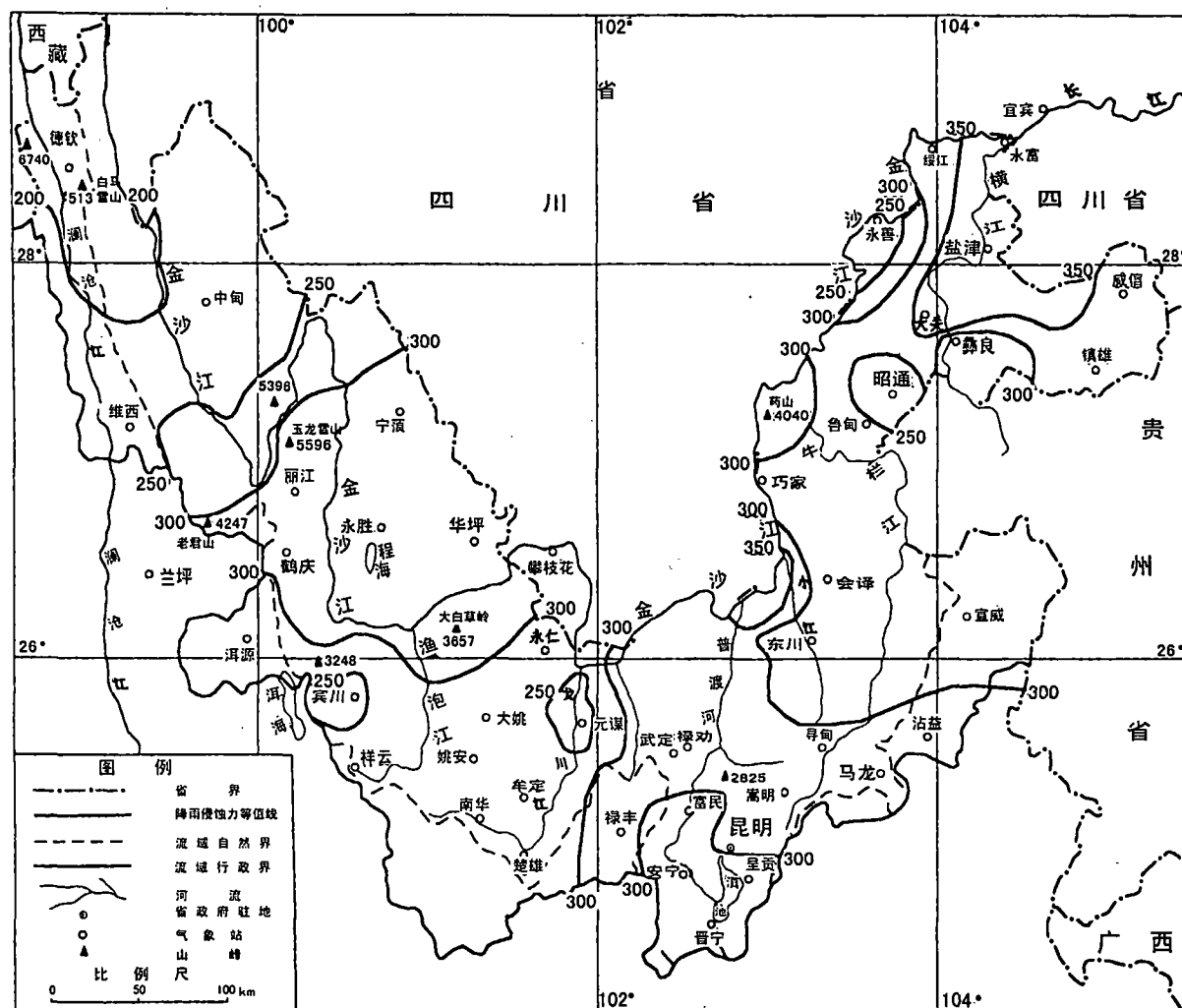


图1 云南金沙江流域年均降雨侵蚀力等值线图

Fig.1 The equiscalar line of the annual average erosive force of rainfall (R) in Jinsha River Basin of Yunnan Province ($J \cdot mm/m^2 \cdot h^{-1}$)

3.2 土壤可蚀性因子(K)

土壤可蚀性(soil erodibility)是定量计算土壤流失量的重要指标,是土壤流失方程中的必要参数。土壤可蚀性因子 K 值是一个由试验确定的定量数值,Olson和Wischmeier^[35](1963)提出的土壤可蚀性指标定义为单位降雨侵蚀力在标准小区上所造成的土壤流失量。降雨侵蚀力为 $R = \sum E \cdot I_{30}$,其标准小区为坡度9%或5%、坡长22.13m、顺坡耕作、连续清耕休闲的径流小区(我国学者张科利等^[36]提出的标准小区为坡度15%、坡长20m、宽5m的连续清耕休闲地)。Olson和Wischmeier提出的这一 K 指标在通用土壤流失方程(USLE)、修正通用土壤流失方程(RUSLE)、流域水土资源管理模型(SWRRB)等模型中得到了广泛应用。 K 值确定的方法较多,刘宝元

等^[37](1999)经过系统分析和总结,将土壤可蚀性的研究归纳为5种方法,即土壤理化性质测定法,仪器测定法,小区测定法,数学模型与图解法,水动力学模型实验求解法。其中,前2种方法只能作为对土壤特性的研究,未将可蚀性指标与土壤侵蚀结合起来,所得结果不能用于侵蚀预报^[37];第3种方法是测定土壤可蚀性的标准方法,可直接用于侵蚀量预报,只是实验费用很高;第4种方法是第3种方法的继续,其测定容易,所得结果亦较为稳定,便于应用,因而是各地应加强的研究方向;第5种方法用于土壤侵蚀过程模型,但方法还不够成熟^[37,38]。总体上看,确定土壤可蚀性的可靠途径应是以小区测定法为基础,通过对若干类典型土壤 K 值的实际测定,进而运用数学模型法(或结合图解法)建立土壤特性

表3 云南金沙江流域各站降雨侵蚀力计算表($J \cdot mm/m^2 \cdot h^{-1}$)
Table 3 The calculated value of erosive force of rainfall (R) of every station in
Jinsha River Basin of Yunnan Province ($J \cdot mm/m^2 \cdot h^{-1}$)

序号	站名	5月	6月	7月	8月	9月	10月	全年	序号	站名	5月	6月	7月	8月	9月	10月	全年
1	中甸	2.9	34.8	79.9	70.7	28.3	3.2	219.8	25	安宁	11.2	53.5	93.0	87.2	35.3	12.0	292.2
2	德钦	6.9	32.0	69.4	55.0	23.7	5.2	192.2	26	富民	10.1	55.3	92.3	80.3	34.4	9.8	282.2
3	维西	4.8	38.1	82.5	77.0	33.2	7.4	243.0	27	嵩明	12.8	70.4	93.8	95.7	45.4	13.4	331.5
4	丽江	7.4	57.2	104.7	89.9	43.3	8.9	311.4	28	禄劝	10.3	65.9	103.9	84.9	43.1	15.2	323.3
5	永胜	6.9	53.9	113.0	108.5	45.7	10.0	338.0	29	新村	10.3	57.1	62.9	48.6	33.0	10.2	222.1
6	华坪	6.5	64.4	114.3	120.0	55.2	12.2	372.6	30	汤丹	12.3	59.6	77.6	62.1	37.1	13.8	262.5
7	宁蒗	8.4	61.3	107.0	98.4	44.5	7.6	327.2	31	落雪	15.3	74.8	106.7	99.3	44.9	22.0	363.0
8	鹤庆	5.9	57.1	107.5	113.5	54.8	10.3	349.1	32	寻甸	15.0	72.8	91.9	89.1	45.1	15.0	328.9
9	洱源	5.5	51.0	83.7	83.4	41.0	8.9	273.5	33	沾益	15.9	78.8	90.1	87.0	39.7	16.6	328.1
10	宾川	3.5	40.4	66.7	66.0	32.8	5.7	215.1	34	马龙	16.4	72.6	87.6	86.2	40.3	14.4	317.5
11	祥云	5.9	52.9	77.0	79.6	40.5	14.7	270.6	35	宣威	19.1	68.4	74.6	58.8	37.7	11.6	270.2
12	楚雄	8.3	49.1	85.1	84.0	37.5	11.1	275.1	36	会泽	10.9	52.4	79.2	78.8	33.4	9.5	264.2
13	南华	6.9	51.1	82.7	88.9	40.7	11.1	281.4	37	昭通	9.7	47.8	66.1	50.6	32.9	6.0	213.1
14	牟定	8.1	55.3	83.4	84.3	41.2	13.0	285.3	38	大山包	18.1	64.4	109.5	94.5	47.8	11.3	345.6
15	姚安	5.8	49.5	79.7	85.0	38.2	11.5	269.7	39	鲁甸	12.9	55.9	78.4	58.0	37.0	9.6	251.8
16	大姚	5.2	54.8	82.4	85.4	40.0	8.6	276.4	40	巧家	13.1	71.5	77.4	58.4	45.6	16.0	282.0
17	永仁	6.3	51.8	82.6	93.9	46.0	13.0	293.6	41	盐津	16.1	70.8	124.4	138.3	49.8	14.8	414.2
18	元谋	5.1	42.7	70.6	62.8	32.9	7.9	222.0	42	大关	14.6	56.5	108.6	117.9	47.5	10.0	355.1
19	武定	11.3	66.1	103.4	90.2	44.2	17.1	332.3	43	永善	10.0	42.7	64.3	61.9	32.4	4.3	215.6
20	禄丰	11.2	51.6	98.8	91.0	37.9	12.9	303.4	44	绥江	17.2	56.6	105.6	113.3	42.4	7.5	342.6
21	昆明	15.0	62.5	105.2	92.2	40.6	15.6	331.1	45	镇雄	19.9	61.8	91.8	81.4	43.0	9.1	307.0
22	太华山	16.0	69.2	112.8	112.4	47.2	22.6	380.2	46	彝良	10.2	55.9	92.5	85.5	42.8	4.9	291.8
23	呈贡	12.9	49.8	80.5	72.5	30.6	6.2	252.5	47	威信	21.9	60.0	100.5	98.5	43.2	12.0	336.1
24	晋宁	12.8	54.7	84.0	88.7	38.4	11.6	290.2	48	水富	15.7	71.7	144.5	105.6	43.0	4.4	384.9

指标与 K 值的回归关系模型,以便于推广应用。Wischmeier 等在进行区域性土壤特性与 K 值关系研究的基础上,建立了通过土壤基本性质求算 K 值的方法,还绘制了用以查算的诺模图,应用于 USLE 中^[1]。我们 1995 ~ 1997 年在下游的滇东北山区选取严重侵蚀的 3 类主要坡地土壤——红壤、黄壤和紫色土进行小区试验,得到了这 3 类土壤的实测 K 值,据此修正了 Wischmeier 等诺模方程式中的系数,得出适合本地区的 K 值计算方程式为^[19]:

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

由于上述 3 类土壤不仅在下流的滇东北山区为代表性土壤,而且在全流域也是最主要的侵蚀性土类,加之条件所限,本文在确定该流域 K 值时以上述修正诺模方程式来求算。根据该流域土壤调查资料,按式(2)计算了 20 个土类(亚类)的 K 值(见表 4),并编制了该流域土壤可蚀性(K)分布图(见图 2)。

表4 云南金沙江流域主要土壤的 K 值

Table 4 The K values of main soils in Jinsha River Basin of Yunnan

序号	土类(亚类)	K 值	序号	土类(亚类)	K 值
01 ₁	红壤	0.410	06 ₁	棕色针叶林土	0.250
01 ₂	黄红壤	0.330	07 ₁	燥红土	0.336
01 ₃	山原红壤	0.412	07 ₂	褐红土	0.342
01 ₄	红壤性土	0.420	08 ₁	冲积土	0.350
02 ₁	黄壤	0.380	09 ₁	红色石灰土	0.250
02 ₂	黄壤性土	0.347	09 ₂	黑色石灰土	0.308
03 ₁	黄棕壤	0.321	09 ₃	黄色石灰土	0.263
03 ₂	暗黄棕壤	0.304	10 ₁	酸性紫色土	0.416
04 ₁	棕壤	0.292	10 ₂	中性紫色土	0.404
05 ₁	暗棕壤	0.286	10 ₃	石灰性紫色土	0.395

注:各类(亚类)土壤 K 值为土体(A层+B层)平均值,且为代表性耕作土与自然土的平均值。在实际测算中,应结合考虑不同成土母质和土层的理化性质来推算土壤 K 值。

3.3 地形因子(LS)

坡度和坡长是影响土壤侵蚀的基本地形因素。坡度因子(S)是在其它条件相同的情况下,特定坡度的坡地土壤流失量与坡度为 9% 或 5°(即标准径流小区的坡度)的坡地土壤流失量之比值。国内外

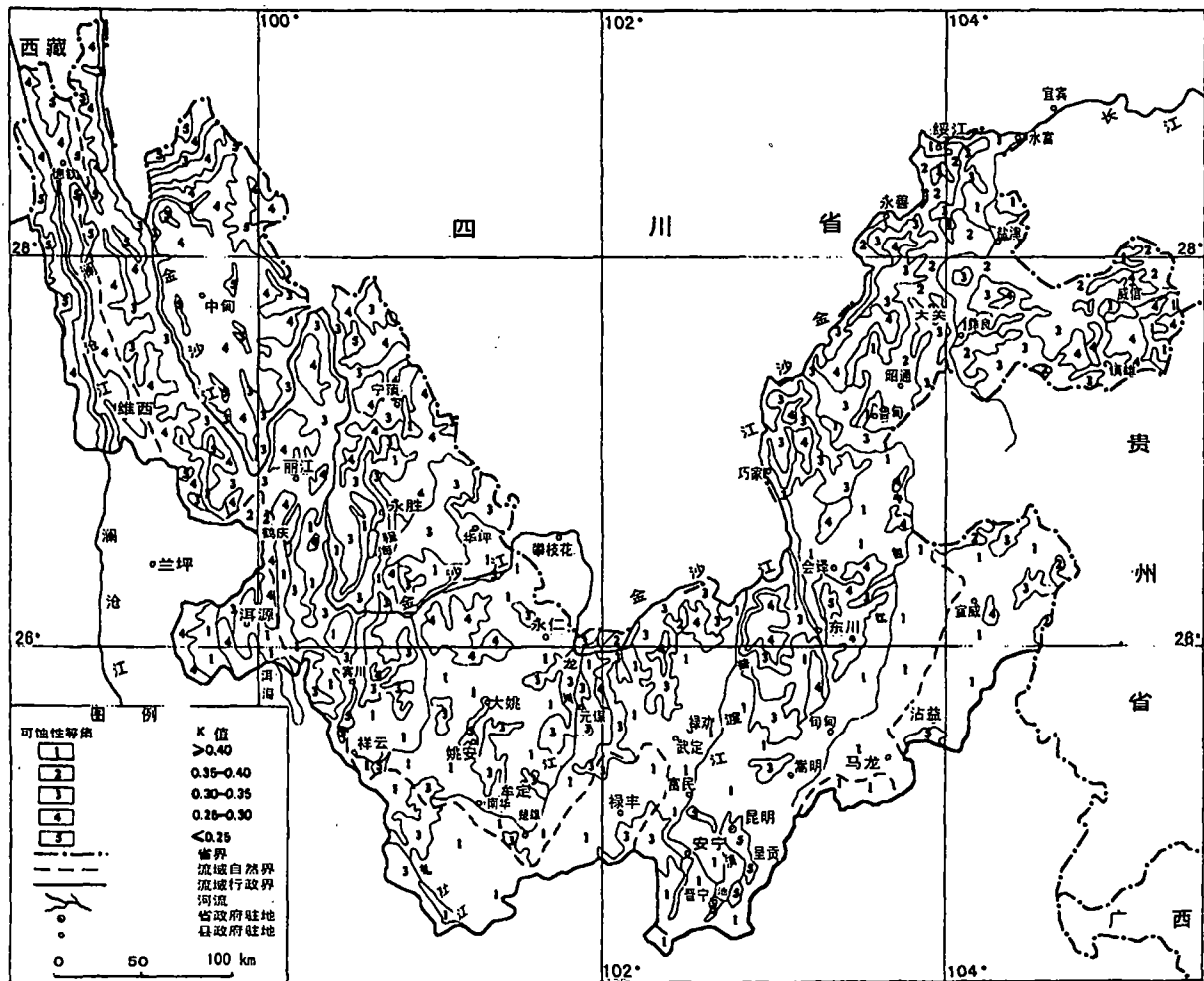


图2 云南金沙江流域土壤可蚀性(K值)分布图

Fig.2 The distribution map of soil erodibility (the K values) in Jinsha River Basin of Yunnan Province

研究者通过统计分析,大多认为土壤流失量与坡度呈幂函数关系,但坡度指数的变化幅度较大,我国坡度指数多在0.5~2.5之间。坡长因子(L)是在其它条件相同的情况下,特定坡长的坡地土壤流失量与标准小区坡长(在USLE中为22.1m,我国多数取20m)的坡地土壤流失量之比值。国内外已有的分析研究表明^[25],土壤流失量与坡长亦呈幂函数关系,我国坡长指数多数在0.15~0.50之间。在实际工作中,将坡度因子S和坡长因子L结合起来,作为一个复合因子(即地形因子LS)进行综合测算较单因子更为方便。所谓地形因子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)的坡地土壤流失量(A)与标准径流小区的坡地土壤流失量(A₀)之比值,即 $LS = A/A_0$ 。我们已于1995~1997

年在下游的昭通地区通过设置18个LS因子试验小区,建立了LS因子的计算公式^[20]即

$$LS = \left(\frac{L}{20}\right)^{0.24} \left(\frac{S}{5^\circ}\right)^{1.32} \quad (3)$$

式(3)中,L为坡长(m),S为坡度(°)。这一LS关系式与国内外已有的LS公式基本形式相似,但坡度与坡长支书有所不同,这是由区域特点决定的。式(3)坡度的适用范围为5°~45°。从地形特征上分析,式(3)在云南金沙江流域是适合的。

3.4 植被覆盖与作物经营因子(C)

植被覆盖与作物经营管理因子(cover and management factor)(简称C因子)是土壤流失方程式中的一个重要因子,它对降雨引起土壤侵蚀的影响非常敏感。在USLE中,C因子是指在一定条件下有植被覆盖或实施田间管理的坡地土壤流失量与同

等条件下实施清耕的连续休闲地土壤流失量的比值^[1,39],属无量纲数,其值介于0~1之间。

为了确定坡耕地作物经营管理因子 C 值,我们于1995~1997年在下游的昭通地区通过设置6个试验小区,测定了4种主要农作物种植类型(玉米、马铃薯、黄豆、玉米-黄豆间作)的 C 值(见表5)。对于其它作物,未再设置试验小区进行试验,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估算其 C 值。

表5 昭通地区实验作物 C 值表

Table 5 The C value of experimental crops in Zhaotong in the lower reaches of Jinsha River

作物类型	玉米	马铃薯	黄豆	玉米-黄豆间作
C 值	0.3517	0.3721	0.3551	0.1990

2001年5~10月,我们又在中游的宾川县金沙江南岸红壤坡地(位于宾川县钟英乡皮厂村)上设置了6个小区进行试验,得到了5种植被与土地利用状况下的 C 值(见表6)。

表6 宾川县不同植被与利用方式红壤坡地土壤流失量与 C 值

Table 6 The soil loss amounts and the C values on slopland with red soil under different states of vegetation cover and land use types in Binchuan county

简易 小区 编号	小区基本情况			土壤流 失量观 测值 ($t/tm^2 \cdot a^{-1}$)	C 值
	坡长 (m)	坡度 (°)	土地利用与植被状况		
No.1	15	21	清耕休闲地	442.26	1.0000
No.2	15	21	坡地玉米	157.20	0.3554
No.3	15	21	疏林地(地面覆盖度40%)	63.42	0.1434
No.4	15	21	林地(地面覆盖度约60%)	35.61	0.0805
No.5	15	21	荒草地(地面覆盖度50%)	46.67	0.1055
No.6	15	21	荒草地(地面覆盖度80%)	15.40	0.0348
No.7	15	21	林草地(地面覆盖度90%)	4.32	0.0098

注:试验地点位于宾川县钟英乡皮厂村(金沙江南岸)附近坡地上,海拔约1300米。No.1小区为清耕休闲地,采用常规耕土措施,人工拔除作物与杂草,土层疏松。观测时间为2001年雨季(5月中旬~10月中旬)。

鉴于云南金沙江流域下垫面条件很复杂,为了满足测算各地块土壤流失量的需求,参考USLE^[1]和国内一些地区的研究结果^[25],表7列出了几种自然植被类型不同地面覆盖度的 C 值。

表7 不同植被覆盖的 C 值

Table 7 The C values with different vegetation cover degree (%) on earth surface

植被类型	地面覆盖度(%)					
	0	20	40	60	80	100
草地	0.50	0.25	0.15	0.10	0.04	0.01
林地	0.40	0.22	0.14	0.09	0.04	0.01
茂密森林	0.10	0.08	0.06	0.02	0.004	0.001

3.5 水土保持措施因子(P)

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,可定义为:在其它条件相同的情况下,布设某一水土保持措施的坡地土壤流失量(A_p)与无任何水土保持措施的坡地土壤流失量(A)之比值,即 $P = A_p/A$ 。 P 值的大小介于0~1之间。

水土保持措施一般可分为3个方面措施,即农业耕作措施、工程措施和生物措施(或称林草措施)。农业耕作措施主要有3类^[25]:(1)以改变微地形为主,如等高耕作、沟垄种植等;(2)以增加地面覆盖率为主,如轮作、间作、等高带状间轮作等;(3)以改变土壤物理性状为主,如少耕免耕等。工程措施种类也较多,对于坡耕地而言,最基本的水土保持工程措施就是梯田(梯地)化。生物措施主要是荒山荒地的造林种草和封山育林育草、陡坡耕地的退耕还林还草以及生物防冲带等。不同的水土保持措施对坡地土壤流失的控制作用是不同的。我们于1995~1997年在金沙江下游的昭通地区设置了6个 P 因子试验小区(其中一个为无任何水土保持措施的对照区),得到了5种水土保持措施的 P 值(见表8)。

表8 坡耕地水土保持措施因子(P)值实测表

Table 8 The practical P values of the factor of soil and water conservation measures of sloping cultivated land in the lower reaches of Jinsha River

水土保持措施	P 值
等高带状耕作	0.5532
地埂	0.1836
生物防冲带 绿肥	0.3745
生物防冲带 苹果	0.4962
水平梯地(梯田)	0.0316

这表明,在所有水土保持措施中,防治水土流失作用最大、最有效的是水平梯地(梯田);其它措施亦有一定程度的作用和效果。

3.6 土壤允许流失量(T)分析与确定

土壤允许流失量(tolerance of soil loss 或 soil loss

tolerance),简称 T 值,是指“在长时期内保持土壤的肥力和维持土地生产力基本稳定的最大土壤流失量”^[41]。根据这一定义,当某地土壤侵蚀强度小于土壤允许流失量时,它对永续维持该地的土地生产力基本没有影响。因此, T 值是土壤流失方程应用中必不可少的技术指标。在应用该方程选择保土措施、设计土地利用生态安全格局之前,首先必须确定所研究地块的允许土壤流失量。

根据云南金沙江流域的地理环境特点、土壤性状、耕作与施肥水平、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,并参考国内外有关资料,我们认为,鉴于云南金沙江流域属于西南土石山区,山高坡陡,土层较薄,土壤透水性能差,侵蚀程度又很严重,故可将土壤允许流失量确定为 $500 \text{ t/km}^2 \cdot \text{a}^{-1}$ (约 0.4 mm/a)。

4 结果与分析

4.1 方程的基本模式

云南金沙江流域土壤流失方程的基本模式为: $A = R \cdot K \cdot LS \cdot C \cdot P$ 。式中, A 代表多年平均土壤流失量($\text{t/hm}^2 \cdot \text{a}^{-1}$); R 代表降雨侵蚀力($\text{J} \cdot \text{mm/m}^2 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$); K 代表土壤可蚀性因子($\text{t} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{a}) / (\text{hm}^2 \cdot \text{J} \cdot \text{mm} \cdot \text{a})$); LS 代表地形因子,无因次,其中 L 为坡长(m), S 为坡度(%或 $^\circ$); C 代表植被覆盖与作物经营管理因子,无因次; P 代表水土保持措施因子,无因次。

4.2 方程的适用范围

该方程主要适用于坡耕地和林地(含园地)、草地、荒山、荒坡及稳定沟系的水蚀,包括面蚀和沟蚀。不能应用于水蚀中的重力侵蚀(崩塌、滑坡、泥石流等侵蚀)、风蚀和冻融侵蚀。

4.3 方程的主要用途

1、预测预报任一地块(land parcel)的土壤流失量。
2、选择最佳的土地利用方向(land use type)和水土保持措施。

3、规划和设计水土流失区土地利用生态安全格局(ecological security pattern of land use)。

4.4 方程的检验

为了检验该方程的合理性和可靠性,以上述宾川县红壤坡地 7 个小区土壤流失量观测值与计算值作比较,结果(见表 9)表明,该方程计算的相对误差在 $3.2\% \sim 6.3\%$ 之间,因而可以认为,该方程是较为可靠的。我们已结合该流域土地资源详查 2000

年变更调查数据和图件以及有关资料,应用该方程和 GIS 技术编制了土壤侵蚀图,并得出了不同地类的年均土壤流失量^[40],其结果基本上是合理的。

表 9 宾川县红壤坡地土壤侵蚀观测值与计算值比较表
Table 9 Comparison between the practical values and the calculated value of soil loss amounts on slopeland with red soil in Binchuan county

简易 小区 编号	土壤流 失量观 测值 ($\text{t/hm}^2 \cdot \text{a}^{-1}$)	土壤流失方程计算参数					土壤流 失量计 算值 ($\text{t/hm}^2 \cdot \text{a}^{-1}$)	方程计 算相对 误差 (%)
		R	K	LS	C	P		
No. 1	442.26	220.0	0.34	6.20	1.00	1	463.76	+ 4.86
No. 2	157.20	220.0	0.34	6.20	0.35	1	162.32	+ 3.26
No. 3	63.42	220.0	0.30	6.20	0.15	1	61.38	- 3.22
No. 4	35.61	220.0	0.30	6.20	0.09	1	36.83	+ 3.43
No. 5	46.67	220.0	0.30	6.20	0.12	1	49.10	+ 5.21
No. 6	15.40	220.0	0.30	6.20	0.04	1	16.37	+ 6.30
No. 7	4.32	220.0	0.30	6.20	0.01	1	4.09	- 5.32

致谢:参加本项研究工作的还有王云鹏、贺一梅、田敏等课题组有关同志以及部分本科生。特此致谢。

参考文献:

- [1] Wischmeier W H, Smith D D. Predicting rainfall erosion losses——a guide to conservation planning [S]. Agriculture handbook, USDA, 1978. 537.
- [2] Meyer L D. Evolution of the universal soil loss equation. J. of Soil and Water Conservation [J], 1984, 39: 99 ~ 104.
- [3] Nearing M A, Foster G R, Lane L J, et al. A process - based soil erosion model for USDA - Water Erosion Prediction Project Technology [J]. Trans. ASAE, 1989, 32 (5): 1587 ~ 1593.
- [4] 刘宝元,史培军. WEPP 水蚀预报流域模型[J]. 水土保持通报, 1998, 18(5): 6 ~ 12.
- [5] Renard K G, Foster G R, Weesies G A et al. Predicting rainfall erosion by water: A guide to conservation planning with the revised universal soil loss equation (RUSLE) [S]. Agricultural handbook, USDA, 1997. 703.
- [6] 郑粉莉,刘峰,杨勤科,等. 土壤侵蚀预报模型研究进展[J]. 水土保持通报, 2001, 21(6): 16 ~ 18.
- [7] 陈法扬,王志明. 通用土壤流失方程在小良水土保持试验站的应用[J]. 水土保持通报, 1992, 12(1): 23 ~ 41.
- [8] 张宪奎,许靖华,卢秀琴,等. 黑龙江省土壤流失方程的研究[J]. 水土保持通报, 1992, 12(4): 1 ~ 9.
- [9] 张宪奎. 黑龙江省土壤流失方程应用简介[J]. 国土与自然资源研究, 1995, (1): 30 ~ 32.
- [10] 黄炎和,卢程隆,付勤,等. 闽东南土壤流失预报研究[J]. 水土保持学报, 1993, 7(4): 13 ~ 18.
- [11] 周伏建,陈明华,林福兴,等. 福建省土壤流失预报研究[J]. 水土保持学报, 1995, 9(1): 25 ~ 30.
- [12] 杨子生. 滇东北山区坡耕地土壤流失方程研究[J]. 水土保持通报, 1999, 19(1): 1 ~ 9.
- [13] 杨子生. 长江上游滇东北山区坡耕地水土流失与可持续利用研究简介[J]. 山地学报, 1999, 19(增刊): 1 ~ 5.
- [14] 江忠善,王志强,刘志. 黄土丘陵区小流域土壤侵蚀空间变化定量研究[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1996, 2(1): 1 ~ 10.

- [15] 蔡国强,陆兆熊,王贵平. 黄土丘陵沟壑区典型小流域侵蚀产沙过程模型[J]. 地理学报,1996,51(2):108~116.
- [16] 符素华,张卫国,刘宝元,等. 北京山区小流域土壤侵蚀模型[J]. 水土保持研究,2001,8(4):114~120.
- [17] 杨子生. 滇东北山区坡耕地水土流失试验[J]. 山地学报,1999,17(增刊):6~9.
- [18] 杨子生. 滇东北山区坡耕地降雨侵蚀力研究[J]. 地理科学,1999,19(3):265~270.
- [19] 杨子生. 滇东北山区坡耕地土壤可蚀性因子[J]. 山地学报,1999,17(增刊):10~15.
- [20] 杨子生. 滇东北山区坡耕地土壤侵蚀的地形因子[J]. 山地学报,1999,17(增刊):16~18.
- [21] 杨子生. 滇东北山区坡耕地土壤侵蚀的作物经营因子[J]. 山地学报,1999,17(增刊):19~21.
- [22] 杨子生. 滇东北山区坡耕地土壤侵蚀的水土保持措施因子[J]. 山地学报,1999,17(增刊):22~24.
- [23] 杨俊. 山区水土流失产生、发展与控制[A]. 见:中国科学技术协会首届青年学术年会云南卫星会议论文集[C]. 昆明:云南科技出版社,1992. 247~253.
- [24] 姚治君,廖俊国,陈传友. 云南玉龙山东南坡降雨因子与土壤流失关系的研究[J]. 自然资源学报,1991,6(1):45~53.
- [25] 王万忠,焦菊英. 中国的土壤侵蚀因子定量评价研究[J]. 水土保持通报,1996,16(5):1~19.
- [26] 王万忠. 黄土地区降雨特性与土壤流失关系的研究:II 降雨侵蚀力指标 R 值的探讨[J]. 水土保持通报,1983,3(5):62~64.
- [27] 贾志军,王小平,李俊义. 晋西黄土丘陵沟壑区降雨侵蚀力指标 R 的确定[J]. 中国水土保持,1987,(6):18~20.
- [28] 吴素业. 安徽大别山区降雨侵蚀力简易算法与时空分布规律研究[J]. 中国水土保持,1994,(4):12~13.
- [29] 黄炎和,卢程隆,郑添发,等. 闽东南降雨侵蚀力指标 R 值的研究[J]. 水土保持学报,1992,6(4):1~5.
- [30] 周伏建,陈明华,林福兴,等. 福建省降雨侵蚀力指标 R 值[J]. 水土保持学报,1995,9(1):13~18.
- [31] 王万忠,焦菊英,郝小品. 中国降雨侵蚀力的计算与分布(I)[J]. 水土保持学报,1995,9(4):5~18.
- [32] 谢云,章文波,刘宝元. 用日雨量和雨强计算降雨侵蚀力[J]. 水土保持通报,2001,21(6):53~56.
- [33] 章文波,谢云,刘宝元. 用雨量和雨强计算次降雨侵蚀力[J]. 地理研究,2002,21(3):384~390.
- [34] 伍育鹏,谢云,章文波. 国内外降雨侵蚀力简易计算方法的比较[J]. 水土保持学报,2001,15(3):31~34.
- [35] Olson T C, Wischmeier W H. Soil erodibility evaluations for soils on the runoff and erosion stations [J]. Soil Science Society of American Proceedings, 1963,27(5): 590~592.
- [36] 张科利,刘宝元,蔡永明. 土壤侵蚀预报研究中的标准小区问题论证[J]. 地理研究,2000,19(3):297~302.
- [37] 刘宝元,张科利,焦菊英. 土壤可蚀性及其在侵蚀预报中的作用[J]. 自然资源学报,1999,14(4):345~350.
- [38] 史培军,刘宝元,张科利,等. 土壤侵蚀过程与模型研究[J]. 资源科学,1999,21(5):9~18.
- [39] 张岩,袁建平,刘宝元. 土壤侵蚀预报模型中的植被裂盖与管理因子研究进展[J]. 应用生态学报,2002,13(8):1033~1036.
- [40] 杨子生,梁洛辉,王云鹏. 云南金沙江流域水土流失基本特征分析[J]. 山地学报,2002,20(增刊):10~15.
- [41] 中华人民共和国水利部. SL 190-96. 土壤侵蚀分类分级标准[S]. 北京:中国水利水电出版社,1997. 2~26.

Study on Soil Loss Equation in Jinsha River Basin of Yunnan Province

YANG Zi-sheng

(School of Resources Environment and Earth Science, Yunnan University, Kunming, 650091 China)

Abstract: Soil erosion in Jinsha River Basin of Yunnan Province is very serious, and the Basin is a major region of ecological construction planning in China. The study takes universal soil loss equation (USLE) as original version, and analyses all factors of soil erosion in the Basin by means of the statistical analysis of the experimental data measured on experimental spots. As a result, the soil loss equation in Jinsha River Basin 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 tolerance of soil loss in the Basin 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 6.3% 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 resources and the countermeasures of soil and water conservation, and projecting the ecological security pattern of land use in the Basin.

Key words: soil loss equation, erosive force of rainfall, soil erodibility, topographic factor, cover and management factor, the factor of soil and water conservation measures, Jinsha River Basin of Yunnan Province