径流曲线数法在黄土高原地表径流量计算中的应用

罗利芳，张科利，符素华
(北京师范大学 资源与环境科学系，北京 100875)

摘 要：坡面径流是土壤侵蚀发生的基本动力，径流量计算是定量估算水土流失和进行水土保持效益评价的关键步骤。径流曲线数法是美国农业部开发的计算地表径流量的经验模型，它有使用简单、有效，且适用于资料匮乏地区等优点。介绍了径流曲线数法的基本原理和计算方法，并以陕西安塞 25个小区的降雨径流资料(次降雨)为基础，计算了黄土高原地区不同下垫面条件下的曲线数(C_N)值大小，并分析研究了 C_N 值和各影响因子间的关系，对该模型在黄土高原地区使用的有效性也进行了评定。

关键词：径流；径流曲线数法；曲线数；降雨侵蚀
文献标识码：A 文章编号：1000-288X(2002)03-0058-04 中图分类号：S157.1

Application of Runoff Curve Number Method on Loess Plateau

LUO Li-fang, ZHANG Ke-li, FU Su-hua
(*The Department of Resource and Environmental Science, Beijing Normal University, Beijing* 100875, *China*)

Abstract Overland runoff is the primary force leading to soil erosion. Estimating runoff is a key step to predict the amount of soil and water loss and evaluate the efficiency of soil and water conservation practices. Runoff curve number method, an empirical model to estimate the storm runoff, was developed by USDA SCS. The curve number method is simple and predictable, especially for ungauged catchments. The purpose of this paper is to present the principle of the method, calculate the C_N on the basis of data from 25 differently covered unit plots on the loess plateau, and to analyze the relationship between C_N and its relevant factors. At last, the predictive efficiency of the method is assessed.

Keywords runoff; runoff curve number method; C_N; water erosion

1 引 言

土壤侵蚀是全球性的生态环境问题之一。降雨径流是引起土壤侵蚀的根本所在。定量计算不同下垫面条件下的径流量，对认识土壤侵蚀发生规律、开展水土流失预报，以及水土资源的合理利用和评价都有重要意义。而建立原理清晰、使用方便的产流模型是开展地表径流量定量计算的关键。

关于坡面产流，国内外不同学者已从入渗产流的过程和机理入手，提出了许多估算地表径流的过程模型，如 Green-Ampt[1]入渗公式和 Horton[2]入渗公式等。这类模型一般理论基础充分、层次清晰、计算结果也较为精确。但都有涉及参数过多，资料不易获取，计算过程也十分复杂等不足。对于缺乏详细降雨过程资料的我国大部分地区来说，上述模型很难推广使用。那么，就我国目前的工作经验积累而言，开发出一个既有一定精度、又简单实用的经验模型十分必要。

在目前众多的经验模型中，美国农业部土壤保持局(USDA SCS)开发的用来估算无资料区径流量(和洪峰流量)的经验模型——径流曲线数法(curve number method)已得到公认和普遍推广。从 20世纪 50年代中期起[3]，它在美国及其它国家开始使用以来，其有效性已在诸多学者的研究中已予以证明，如 Harbor(1994)[4], Grove and others(1998)[5]。而且已被应用于不同的水文、土壤侵蚀和水质模型中，如农业管理系统中的化学物质、径流和土壤侵蚀模型(CREAMS 1980)[6]，农业面源污染模型(AGNPS 1985)[7]，评价牧场利用的合理性和估算产量的模型(SPUR 1987)[8]，土壤侵蚀模型(EPIC 1990)[9]和农村地区水资源模拟模型(SWRRB 1990)[10]等。

径流曲线数法计算过程简单，所需的资料易于获取，尤其适用于资料缺乏的地区。而且它有效地考虑到了流域下垫面的特点，因此，利用此模型可以针对未来土地利用情况的变化，预测长期的降雨径流关系

收稿日期：2001-11-03
资助项目：国家重点基础发展项目(G19990436)、杰出青年基金(49725103)资助
作者简介：罗利芳(1980-)，女(汉族)，安徽利辛县人，在读研究生，研究方向为水土资源规划管理和水土保持。电话：(010)62207454-1342，E-mail: gnafil@mail.bnu.edu.cn

的可能变化,看出人类活动对流域水文的影响。由于这种方法简单易懂,适合服务于流域管理者的决策[11]。实际上,只需要使用容易得到的日降雨量资料是径流曲线数法的最重要属性。

本文详细地介绍了径流曲线数法的基本原理和计算步骤,用黄土高原地区的小区观测资料,计算了不同下垫面条件下的 C_N,分析了 C_N 值与其它各因子间的关系,评定了径流曲线数法在黄土高原应用的有效性。其结果可为黄土高原坡面径流量估算提供基本参数。

2 方法与资料

2.1 基本原理

Boughton (1989)[3]对此模型的产生、演变给了详细的介绍。该方法的产生应归功于 Mockus (1949)[12],他曾提出了如下的假设方程:

$$\frac{F}{S} = \frac{Q}{P} \tag{1}$$

式中: F—— 一次降雨中的实际损失量 (mm); S—— 潜在最大损失量 (mm); Q—— 径流量 (mm); P—— 一次降雨的总量 (mm)。

最初的径流方程没有考虑到降雨初损 I_a (数值上等于产流前的降雨量)[3],几年以后方程改为:

$$\frac{F}{S} = \frac{Q}{P_a} \tag{2}$$

式中: P_a—— 一次降雨中产流后的降雨量或称有效降雨量 (mm); Q—— 径流量 (mm); F—— 产流后的实际损失量 (mm); S—— 产流后的潜在最大损失量 (mm),是 F的上限。

将 $P_a = P - I_a$, $F = P_a - Q$带入方程 (2),并采用经验关系公式 $I_a = 0.2S$,解出 Q,得到最常见的径流方程:

$$Q = \frac{(P - 0.2S)^2}{P + 0.8S} \quad P \geqslant 0.2S$$
$$Q = 0 \quad P < 0.2S \tag{3}$$

2.2 参数选定

在方程 (3)中, S值的变化幅度可以很大,不便于取值。为此,引入一个无因次参数 C_N, 即曲线数值, 并规定 C_N 与 S有以下关系:

$$C_N = \frac{25\,400}{S + 254} \tag{4}$$

C_N 是反映降雨前流域特征的一个综合参数[13], 取值范围为 0~ 100,图形表示如图 1所示。决定 C_N 的主要因素为土壤前期湿度、土壤类型、覆盖类型、管理状况和水文条件,同时坡度也对 C_N 有一定影响。

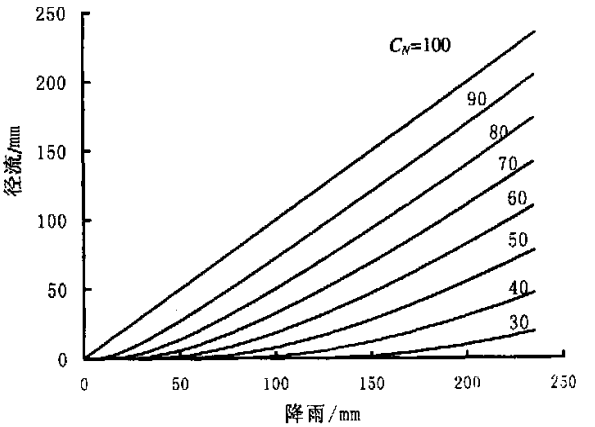


图 1　SCS曲线法的图形表示

前期湿度条件。长期以来,前期降雨量及其对应的土壤湿度条件被认为是径流变化的主要原因[11]。同一个流域由于降雨前的土壤含水量不同,其所对应的 C_N 也不同。鉴于此,自然资源保护局 (NRCS)引入了概念前期湿度条件—— AMC。通常 SCS把土壤前期湿度分为 3级: AMCⅠ 为干旱情况, AMCⅡ 为一般情况, AMCⅢ为湿润情况。在实际运用时,一般用此次降雨前 5d的降雨量来确定前期土壤湿度是干、湿还是一般。表 1给出了流域植物生长季节和休止期的前期土壤湿度条件指标[13]。但是对 3级前期土壤湿度所对应的条件并没有明确的标准[14]。

表 1　前期土壤湿润程度等级划分

AMC	前 5d降雨量 /mm	
	生长期	休止期
Ⅰ	< 13	< 36
Ⅱ	13~ 28	36~ 53
Ⅲ	> 28	> 53

水文土壤组。美国根据土壤的最小渗透率 (经长时间湿润的裸地),把土壤分成 4组[13],如表 2。

土壤水文条件。在一定的水文土壤类型、覆盖类型和管理方式下[13],水文条件好土壤一般产流能力低。通常根据样方的植被密度和地表残余物覆盖度来估计。估计覆盖类型对入渗和径流的作用时,考虑的因素有: 草、农作物和其它植被类型的密度;轮耕中草的数量;残余物覆盖度;地表粗糙度等。

表 2　SCS水文土壤组定义指标

土壤类型	最小下渗率 / (mm· h^{-1})	土壤质地
A	7.26~	砂土、壤质砂土、砂质壤土
B	3.81~ 7.26	壤土、粉砂壤土
C	1.27~ 3.81	砂黏壤土
D	0.00~ 1.27	黏壤土、粉砂黏壤土、砂黏土、粉砂黏土、黏土

2.3 参数优化及评定模型有效性

为确定模型参数,使用穷举法和公式(5)对参数进行优化。给定任一 C_N,用公式(3),(4),计算各次降雨下的径流量 Q_{esti},然后加和,再和实际径流量 Q_{obsi} 的加和相比较,满足公式(5)的 C_N 即为所求。

$$\left|\sum_{i=1}^{n} Q_{esti} - \sum_{i=1}^{n} Q_{obsi}\right| < 0.5 \qquad (5)$$

式中: Q_{esti}—— 第 i场计算径流量; Q_{obsi}—— 指第 i场实测径流量; n—— 指总降雨场次。

为了评定模型的有效性,我们采用 Nash公式(6)[15]求出模型有效系数 Q_f:

$$Q_f = 1 - \frac{\sum (Q_{esti} - Q_{obsi})^2}{\sum (Q_{obsi} - Q_{obs})^2} \qquad (6)$$

式中: Q_{esti}—— 第 i场计算径流量; Q_{obsi}—— 第 i场实测径流量; Q_{obs}—— 指实测降雨量的平均值。

模型有效系数 Q_f 越大,表明模型有效性越好;否则,则有效性越差。

表 **3** 野外径流小区的基本情况

小区编号	坡度 /(°)	坡长 /m	坡向	面积 /m²	土壤类型	土地利用	观测年限
A_1	27	20	WN20	100	黄绵土	刺槐林	1987- 1991
A_2	27	20	EN20	100	二色土	沙棘林	1987- 1990
A_3	27	20	ES25	100	二色土	沙棘油松	1987- 1990
A_4	27	20	SE40	100	二色土	沙棘杨树	1987- 1991
A_5	27	20	ES15	100	黄绵土	柠条林	1987- 1990
A_6	27	20	ES7	100	黄绵土	沙打旺	1987- 1991
A_7	27	20	ES7	100	黄绵土	红豆草	1987- 1991
A_8	27	20	ES30	100	黄绵土	苜蓿地	1987- 1991
A_9	27	20	ES37	100	黄绵土	农耕地	1987- 1994
A_{10}		20		100	黄绵土	侧柏紫穗槐	1987- 1991, 1994
A_{11}		20		100	黄绵土	荒 地	1988, 1989, 1992- 1994
B_1	5	20		100	黄绵土	裸 露	1985- 1989
B_2	10	20		100	黄绵土	裸 露	1985- 1989
B_3	15	20		100	黄绵土	裸 露	1985- 1989
B_4	20	20		100	黄绵土	裸 露	1985- 1989
B_5	25	20		100	黄绵土	裸 露	1985- 1989
B_6	28	20		100	黄绵土	裸 露	1985- 1989
C_1	25	20	N	100	黄 土	荞 麦	1987- 19922
C_2	25	20	N	100	黄 土	马铃薯	1987- 1992
C_3	25	20	N	100	黄 土	黄 豆	1987- 1992
C_4	25	20	N	100	黄 土	谷 子	1987- 1992
C_5	25	20	N	100	黄 土	裸地(农)	1987- 1992
D_1	27.6	20	E	100	黄 土	红豆草	1987- 1992
D_2	27.6	20	E	100	黄 土	沙打旺	1987- 1992
D_3	27.6	20	E	100	黄 土	裸地(草)	1987- 1992

注: 小区编号大写字母相同的为同一小组(同一地点、同期试验站资料)。

2.4 资料来源

本文分析了陕西安塞 25个试验小区的降雨径流资料(次降雨),通过公式(3),(4),来计算不同下垫面下 C_N。安塞站位于陕西省安塞县,属典型梁峁丘陵沟壑区。年均降水量为 591.4 mm。从土壤质地看,属轻粉质壤土。小区基本情况见表 3。

3 结果与讨论

3.1 C_N 随土地利用的变化

从表 4可以看出,在同一小组中,不同的土地利用方式下 C_N 值大小不同。大致规律是裸地的 C_N 最大,其次是农地,再则是多年生草、灌木,最小的是乔木。如在 A组中乔木林(刺槐林) C_N 最小,为 42.7,乔、灌混和林(沙棘油松、沙棘杨树、侧柏紫穗槐)较大,分别为 43.6, 49, 48,灌木林和多年生草沙棘林、沙棘林、沙打旺、红豆草居中,分别为 43, 59.2, 52.8, 56.1,农耕地为 57.6,荒地最大(近于裸地),为 66.2。C组、D组也符合上述规律。

在不同小组间, C_N 随着地表覆盖的不同有相同的变化规律。林草类如 A组 1~ 8, 10,变化范围为 42.7~ 59.2,农地 C_N 多在 75~ 80,裸地比农地略大。但由于各组具体情况不同如土壤特征、观测年限、位置和试验记录数据方式等方面的不同,同种植被下的也略有差异。

3.2 C_N 随地坡度的变化

地形条件对降雨径流有较大影响,也势必反映在 C_N 值大小的变化上。B组为其它条件相同,坡度不同的试验小区,小区内保持地面无杂草。从图 2可以看出,B组 C_N 先随坡度的增大而增大,随后在 25°左右缓慢减小,但变化幅度并不太大。随着坡度在 5°~ 28°之间变化,C_N 值的变化范围为 74.90~ 78.18

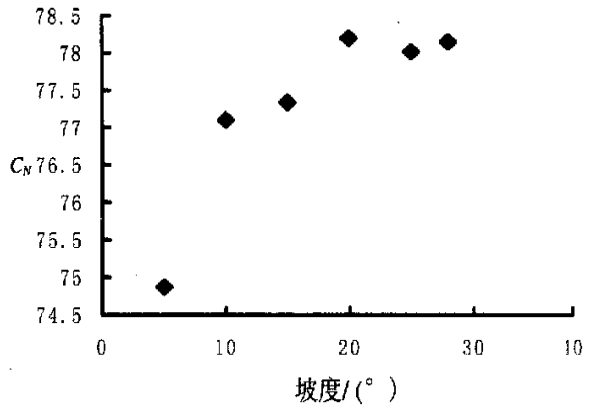


图 2　C_N 随坡度的变化

3.3 模型有效性分析

从表 4可以看出,B组、C组和 D组的模型有效系数 Q_f 较高,多在 0.7以上,但 A组 Q_f 较小,多为负值。影响模型有效系数 Q_f 的因素有以下几个。

(1) 径流曲线数法本身的不足。经验模型都会存在不同程度的不足。就降雨因素来说,它只考虑了降雨量,而没有考虑进其它降雨特征的影响。而实际上,径流量不仅受降雨量的影响,还受降雨强度、雨型等因素的影响。这就不可避免地造成计算值和实测值间的差异。如对 C_3 小区,1987年 7月 16日降雨 12.6 mm(前第 6d降雨 46.7mm),平均雨强为 25.20mm/h,实测径流量 2.19mm,计算径流量为 0mm; 1988年 8月 16日降雨 38.0mm,平均雨强为 1.89mm/h,实测径流量只有 0.42 mm,计算径流量却为 4.91 mm。

(2) 本文没有考虑前期土壤湿度的影响,给计算造成一定的误差。如 C_4 小区 1991年 9月 17日降雨 8.5mm,产流 4.59mm,计算径流量为 0mm(1991年 9月 14日、9月 16日分别降雨 27.5 mm, 13.8mm); 而同年 7月 26日降雨量 10.7mm,只产流 0.72mm,计算径流量也为 0mm。

(3) 经验模型一般在不同程度上都要受区域的限制。径流曲线数法虽然适用范围较广泛,但黄土高原具有极大的特殊性,如深厚的黄土层,多暴雨的降水形式和超渗产流等。这就可能需要修正径流曲线数法以适应黄土高原地区的需要。

表 4　各小区分析及计算结果

小区编号	径流场次	水文土壤组	土地利用	水文状况	C_N	模型有效系数
A_1	19	A	刺槐林	好	42.70	-17.80
A_2	17	A	沙棘林	好	43.00	-26.82
A_3	17	A	沙棘油松	好	43.60	-12.36
A_4	20	A	沙棘杨树	好	49.00	-0.97
A_5	22	A	沙棘林	好	59.20	0.78
A_6	38	A	沙打旺	好	52.80	-3.59
A_7	37	A	红豆草	好	56.10	-1.81
A_8	36	A	苜蓿	好	57.80	-0.04
A_9	50	A	农耕地	好	57.60	0.33
A_{10}	27	A	侧柏,紫穗槐	好	48.00	-25.22
A_{11}	16	A	荒地	好	66.20	-0.36
B_1	39	A	裸露	差	74.90	0.84
B_2	39	A	裸露	差	77.10	0.83
B_3	39	A	裸露	差	77.34	0.80
B_4	39	A	裸露	差	78.20	0.81
B_5	39	A	裸露	差	78.06	0.78
B_6	39	A	裸露	差	78.15	0.81
C_1	49	A	荞麦	差	76.35	0.74
C_2	49	A	马铃薯	差	75.20	0.58
C_3	49	A	黄豆	差	75.20	0.67
C_4	49	A	谷子	差	75.15	0.68
C_5	49	A	裸地(农)	好	78.75	0.78
D_1	49	A	红豆草	差	73.57	0.50
D_2	49	A	沙打旺	差	72.00	0.57
D_3	49	A	裸地(草)	好	77.80	0.79

4 结　论

(1) 在不同的土地利用方式下,表征产流状况的 C_N 值大小不同。大致为裸地的 C_N 最大,其次农地,再则是多年生草、灌木,最小是乔木的变化规律。

(2) C_N 值随地形条件的不同有所差别,其大小先随坡度的增大而增大,随后在 25°左右缓慢减小,但变化幅度不大,在 74.90~ 78.18

(3) 总体来说,在黄土梁峁丘陵区使用径流曲线数法模型的有效性较好,但由于 SCS曲线值法本身的不足及本文没有考虑前期土壤湿度的影响等原因,模型有效性受到一定限制。

[参　考　文　献]

[1] Green W H, et al. Studies on soil physics: 1. Flow of air and water through soils[J]. J. Agri. Sci, 1911, 4: 1-24.

[2] Horton R E. An approach toward a physical interpretation of infiltration-capacity [J]. Soil Sci. Soc. Am. Proc., 1940, 5: 399-417.

[3] Boughton W C. A review of the USDA SCS curve number method[J]. Australian Journal of Soil Research, 1989, 27: 511-523.

(下转第 68页)

建议山丘区各级政府,从大局出发,根据南水北调中线工程的要求,加强对水土保持工作的领导,将其列入目标管理,健全各级水保机构,并协调农、林、水利、水保等有关部门的工作,拧成一股劲,分工合作,将资金捆起来使用,按照"各投其资,各计其功"的原则,尽职尽责,搞好水土保持工作。实行领导干部任期内目标管理责任制,把水保工作的好坏作为政绩考核的主要内容之一。

4.2 增大水土保持的投入

水土保持工作是实现生态系统良性循环,确保南水北调中线工程质量,增强农业后劲的基础性工作,是振兴山区经济的战略任务。建议各级政府按照《水土保持法》规定,把水土保持规划纳入国民经济建设计划,增加对水土保持工作的投入,以保证规划目标顺利实施。同时,南水北调中线工程中,应有足够的资金用于水土流失治理。

4.3 以经济手段保持水土

水土流失地区大都是贫困地区,饲料、草料困难,有的地方温饱问题尚未解决,建议各级政府要对水土流失地区农村的粮食征购、燃料供应,产品运销等采取优惠政策,以调动群众陡坡退耕,造林种草,保护植被的积极性,保证合理利用土地,搞好水土保持。

4.4 执行《水土保持法》,加强预防监督工作

建立健全各级水保监督体系,制定有关配套法规,做到"有法可依,有法必依,违法必究"。制止毁林毁草现象,对各类生产建设造成新的水土流失,坚持"谁破坏,谁治理"的原则,及时做好水土保持工作。

4.5 控制人口增长,减轻土地压力

水土流失的根本原因在于人口过多形成的对土地和环境压力和负荷的增加,治理水土流失的根本措施是控制人口增长,使人口数量同环境承载力相适应。要妥善解决丹江口库区移民遗留问题,避免人口负载过度带来的环境破坏。要搞好计划生育,切实控制人口增长,减轻人口增长对环境容量的压力,为合理利用水土资源,防治水土流失创造有利条件。

[参 考 文 献]

[1] 高更和,等.可持续发展的理论与实践[M].北京:中国文联出版社,2000.99-109.

[2] 黄国泉,张风,等.鄂西三峡库区移民区水土流失防治对策[J].水土保持学报,2001,14(5):45-48.

[3] 吴风声.黄土高原水土流失诸因素分析及治理展望[J].重庆工学院学报,2000,15(2):115-118.

(上接第 61页)

[4] Hobor J. A practical method for estimating the impact of land use change on surface runoff, groundwater recharge and wetland hydrology [J]. Journal of American Planning Association, 1994, 60: 91-104.

[5] Grove M, J Horbor, B Engel. Composite versus distributed curve numbers: Effects on estimates of storm runoff depths [J]. Journal of the American Water Resources Association, 1998, 34(5): 1015-1023.

[6] Knesel W G, et al. CREAMS: A field-scale model for chemicals, runoff and erosion from agricultural management systems [M]. USDA Conserv. Res. Rep. No26, 1980.

[7] Young R A, Onstad C A, Bosch D D, et al. AGNPS: A Nonpoint-Sourse Model for Evaluating Agricultural Watersheds [J]. Journal Soil and Water Conversation, 1989, 44: 168-173.

[8] Wight J R, Skiles J W, et al. SPUR: Simulation of production and Utilization of Rangelands [M]. Documentation Users Guide. USDA, Agric. Res. Serv., ARS63. Natl Tech. Inform. Serv., Springfield., VA 22161, 1987.

[9] Sharpley A N, J R Williams. EPIC-Erosion/Productivity Impact Calculator: 1. Model Documentation [M]. U. S. Department of Agriculture Technical Bulletin. No. 1768, U. S. Government Printing Office, Washington, D. C. 1990.

[10] Williams J R, A D Nicks, J G Arnold. Simulation for Water Resources in Rural Basions [J]. Journal Hydraulic Eng, 1985, III: 970-986.

[11] Bhasuri B. Assessing long-term hydrologic effects of land use change [J]. Journal AWWA, 1997, 89: 94-107.

[12] Mockus V. Estimation of total (and peak rates of) surface runoff for individual storms [M]. In: Interim Survey Report Grand (Neosho) River Watershed. Exhibit A of Appendix B. U. S. Dep. Agric (U. S. Gov. print. Office: Washington, D. C.), 1949.

[13] U. S. Department of Agriculture, Soil Conservation Service. Hydrology [M]. In "SCS National Engineering Handbook", Section 4. U. S. Gov. Print. Office: Washington, D. C., 1972.

[14] Rallison R E, Cronshey R G. Discussion of "Runoff Curve Numbers with Varying Site Moisture" [J]. Journal of the Irrigational Drainage Division, ASCE, 1979, 105: 439-441.

[15] Nash J E, Sutcliffe J V. River flow forecasting through conceptual models, Part 1: A discussion of principles [J]. J. Hydrol, 1970, 10(3): 282-290.