

文章编号: 1000-0690(2002)05-0604-06

北京地区坡面径流计算模型的比较研究

符素华^{1,4}, 刘宝元^{1,4}, 吴敬东², 段淑怀³

(1. 北京师范大学资源与环境科学系, 北京 100875; 2. 北京市水科所, 北京 100044; 3. 北京市水土保持监测总站, 北京 100073; 4. 北京师范大学环境演变与自然灾害教育部重点实验室, 北京 100875)

摘要: 利用北京市西南山区房山蒲洼两个坡耕地小区 30 场降雨径流资料和密云石匣示范区休闲地试验小区 13 场降雨径流资料, 对 Chu 修正的 Mein-Larson-Green-Ampt (GAML)、Phillip、Horton 和 SCS 径流曲线数法 4 种径流计算公式进行了对比。结果表明: GAML 和 Phillip 计算结果的模型确定性系数较高, Horton 入渗曲线和 SCS 曲线数的计算结果模型确定性系数偏低。根据模型参数的易获得性, 建议在北京山区, 在有降雨过程资料时, 使用 Chu 修正的 GAML 入渗曲线进行径流计算; 若无降雨过程资料可用 SCS 径流曲线数进行径流计算。本研究结果可用于北京地区径流量预报和水土资源评价。

关键词: 北京山区; 入渗; 径流计算

中图分类号: S157.1 文献标识码: A

引 言

降雨入渗产流是引起土壤侵蚀和生态环境污染的原因之一, 许多研究者对土壤入渗产流进行了研究。1911 年 Green-Ampt 以毛管理论为基础, 提出具有相同初始含水量的均质土壤的下渗方程^[1]。1973 年 Mein 和 Larson^[2]在 Green-Ampt 公式的基础上确定出了稳定降雨条件下, 地表积水时入渗方程(GAML), 该方程为:

$$f = \frac{dF}{dt}K(1 + SM/F) \quad (1)$$

式中: f 为下渗能力(mm/min); K 为土壤饱和导水率(mm/min); SM 为有效土壤水吸力(mm); t 为历时(min); F 为累积下渗量(mm)。

Chu^[3]考虑了不稳定降雨条件下的产流特性, 利用 GAML 方程, 提出了不稳定降雨条件下的产流计算方法。Chu 认为在非稳定降雨情况下, 地表时而有积水发生, 时而又无积水发生, 因此一场降雨有多个积水点。当将降雨过程看作是许多时段降雨的累积, 则小时段内可近似认为降雨强度是恒定的。在此假定条件下, 可推求出时段净雨。Philip^[4]1975 年在 Rechids 方程的基础上, 运用

Bolman 变换, 并结合一定的边界条件和初始条件, 得到了方程的级数解, 其二项式入渗方程为:

$$f_p = \frac{1}{2}S \cdot t^{-0.5} + A \quad (2)$$

式中: f_p 为下渗能力(mm/min); t 为历时(min); S 为吸渗率(mm/min^{-0.5}); A 为稳渗率(mm/min)。

Horton^[5]认为当降雨持续进行时, 下渗率逐渐减小。下渗过程是一个消退过程, 消退速率与剩余量成正比。即消退速率 df/dt 与给定时间 t 内有待消退的量(从该时刻的下渗率 f 到稳渗率 f_c 的改变量)成正比。根据以上假定得到下渗公式为:

$$f_p = f_c + (f_0 - f_c)e^{-kt} \quad (3)$$

式中: f_0 为初始下渗率(mm/min); f_c 为稳定下渗率(mm/min); k 为衰减指数。

美国土壤保持研究局为了计算无降雨过程记录地区的径流量, 研制了径流曲线数(Curve Number)法^[6]。该计算方法中只有一个反映流域特征的一个综合参数 CN, 它与流域土壤类型和土地利用现状等有关。该产流算法具有结构简单、计算方便的特点, 同时能考虑土地利用变化等对产流的影响。因此, 它在美国及其它一些国家已得到广泛应用。美国许多土壤侵蚀模型如 EPIC^[7]、CRE

收稿日期: 2001-10-15; 修订日期: 2002-02-10

基金项目: 国家杰出青年基金项目中国水蚀预报模(49725103)、北京市科技项目、国家重点基础研究发展规划项目草地与农牧交错带生态系统重建机理及优化生态-生产范式(G2000018602)资助。

作者简介: 符素华(1973-), 女, 四川岳池县人, 博士后, 主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail: suhua.fu@263.net

AMS^[8]、AGNPS^[9]等模型中都运用该法进行产流量的计算。其计算公式为:

$$Q = \frac{(P - 0.2S)^2}{P + 0.8S} \quad (P > 0.2S) \quad (4a)$$

$$Q = 0 \quad (P \leq 0.2S) \quad (4b)$$

$$S = 25400/CN - 254 \quad (5)$$

式中: Q 为径流量(mm); P 为降雨量(mm); S 为吸水参数; CN 为径流曲线数,与植被覆盖、水文土壤组以及前期影响雨量等因素有关,取值范围为0~100。

在应用较为广泛的 Green-Ampt 入渗方程、Philip 入渗方程和 Horton 入渗方程的基础上,国内学者针对各地的实际情况,又提出了若干入渗产流模型。如包为民等^[10]根据蓄满产流和超渗产流的产流机制,结合流域产流的实际情况,提出了混合产流模型。郭瑛^[11]利用 Horton 入渗方程,结合流域入渗分配曲线,提出了非饱和产流的产流计算方法。郝振纯^[12]在饱和入渗理论的基础上,考虑新入渗雨水驱替旧土壤水分的作用,根据力学原理提出了一个简明入渗模型。但是到目前为止,对北京山区的入渗模型研究还比较少,本文用北京山区坡面径流小区的降雨径流资料,对 Chu 修正的 GAML 入渗方程, Phillip 入渗方程, Horton 入渗方程和 SCS 径流曲线数法进行比较分析,找出适合北京山区的径流计算方法。本研究结果可用于水土保持规划和评价以及水土资源管理。

1 研究方法

1.1 试验资料

选取了房山蒲洼两个坡耕地坡面径流小区(坡度分别为 11°和 23°,作物为玉米)1992~1995年30场实测降雨径流资料和密云石匣休闲地坡面径流小区(坡度为 14.6°)1993~1998年13场实测降雨径流资料。蒲洼坡面径流小区位于北京市西南石质山区,地理坐标为 115°35′~115°46′E, 39°43′~39°49′N,小区于1992年建成。土壤为棕壤,土壤质地粗,土层薄。小区长 10 m,宽 5 m。密云石匣休闲地径流试验小区位于北京市密云水库东北,地理坐标为 117°01′~117°07′E, 42°32′~42°38′N,小区于1993年建成,土壤为粗骨褐土,土层薄。小区坡长为 10 m,坡宽为 5 m。

1.2 入渗方程

本文选用常用的入渗方程,即:CHU 修正的

GAML 方程, Phillip 入渗方程, Horton 入渗方程进行计较。同时考虑到无资料地区的径流计算,本文在模型比较时也考虑了 SCS 径流曲线数,以确定该模型是否能在北京山区无降雨过程资料地区进行应用。

1.3 参数优化方法

为了使用不同模型计算径流量,首先必须确定每个模型的参数。GAML 和 Phillip 模型分别需要两个参数, Horton 模型需要三个参数, SCS 径流曲线数需要一个参数。参数采用优化方法得到。具体优化方法如下:

参数优化的目标函数为:

$$\frac{\left| \sum_{i=1}^n R_{cali} - \sum_{i=1}^n R_{obsi} \right|}{\sum_{i=1}^n R_{obsi}} < 1\% \quad (6)$$

式中: R_{cali} 和 R_{obsi} 分别为第 i 场降雨的计算径流量和实测径流量(mm); n 为计算的总降雨场次。

每种产流计算方法都利用步长加速法进行参数优选。其参数优化步骤如下(以两参数 S, A 为例): ①确定参数 S, A 的初始值和参数优化初始步长 ΔS 和 ΔA 。②先固定 S 不变,比较 $(S, A + \Delta A)$, (S, A) 和 $(S, A - \Delta A)$ 的目标函数值,并以目标函数值最小的点为临时矢点坐标 $(S, A_{0.1})$ 。再由此点出发,固定 $A_{0.1}$ 不动,比较 $(S + \Delta S, A_{0.1})$, $(S, A_{0.1})$ 和 $(S - \Delta S, A_{0.1})$ 的目标函数值,以目标函数值最小的点为临时矢点 $(S_{0.1}, A_{0.1})$,并将其作为第二个基点。③对 (S, A) 和 $(S_{0.1}, A_{0.1})$ 所构成的向量的模矢加速一倍,即 $S_{2.0} = S + 2(S_{0.1} - S)$, $A_{2.0} = A + 2(A_{0.1} - A)$,以 $(S_{2.0}, A_{2.0})$ 作为第二个模矢的初始临时点。④以 $(S_{2.0}, A_{2.0})$ 为初始临时点,重复步骤 2),得到新的临时点。⑤重复步骤 ②、③和 ④。如果在 $(S_{i.0}, A_{i.0})$ 附近得不到比 $(S_{i-1.1}, A_{i-1.1})$ 更好的点,则应退回到 $(S_{i-1.1}, A_{i-1.1})$,并在其附近进行搜索,如能得到新的下降点,即可引出新的模矢;否则,将步长缩小,以进行更精细的搜索,直到满足计算精度为止。

为了比较模型的优劣,本文选用了模型确定性系数 E_f 这一指标,该指标由 Nash 和 Sutcliffe^[13]1970年提出,用以评价计算值和实测值的接近程度。其计算公式为:

$$E_f = 1 - \frac{\sum (R_{obsi} - R_{cali})^2}{\sum (R_{obsi} - \bar{R}_{obs})^2} \quad (7)$$

式中: \bar{R}_{obs} 为实测径流量的平均值。

在许多情况下, 模型确定性系数类似于相关系数。但是模型确定性系数反映的是计算值与实测值 1:1 线的接近程度, 其取值范围为 $-\infty \sim 1$ 。如果模型确定性系数为 1, 表示模型计算结果与实测值非常接近; 模型确定性系数为 0, 表示计算值与实测值之差的平方和刚好等于实测值与其平均值的平方和, 这表明可以用实测值的平均值来进行径流量预报与模型预报的效果一样; 模型确定性系数为负则表示实测值的平均值比模型预报值能更好地进行径流量值的估计^[14]。相关系数反映的是计算值与观测值的线性相关程度, 其取值范围为 $-1 \sim 1$ 。

模型计算合格率也是水文预报中常用指标之一。本研究中首先统计出计算径流与实测径流绝对误差小于 2 mm, 或者相对误差小于 30% 的降雨场次, 并将该降雨场次数除以总的降雨场次作为模型计算合格率。本研究中用该指标来作为比较模型优劣的方法之一。

表 1 入渗方程基本参数表

Table 1 Basic parameters of infiltration equations

小 区	Green- Ampt		Phillip		Horton			SCS 曲线数
	K_s	SM	S	A	k	f_0	f_c	CN
蒲洼(1 β)	0.137	10	1.25	0.134	0.05	1.13	0.127	93.17
蒲洼(2 β)	0.156	9.9	1.21	0.16	0.052	1.15	0.155	92.4
密云休闲地	0.525	3.25	1.16	0.516	0.046	1.27	0.528	77.9

表 2 不同径流计算方法平均值和标准差比较

Table 2 Comparison of means and standard deviation for different calculation methods

小 区	实测		GAML		Phillip		Horton		SCS 曲线数	
	均值	标准差	均值	标准差	均值	标准差	均值	标准差	均值	标准差
蒲洼(1 β)	9.31	6.74	9.30	6.94	9.31	6.87	9.32	7.41	9.31	8.00
蒲洼(2 β)	8.54	6.50	8.54	6.64	8.55	6.57	8.54	7.07	8.54	7.67
密云休闲地	9.41	6.49	9.41	8.22	9.41	8.45	9.41	9.02	9.41	8.30

2.2 不同计算方法模型计算合格率比较

从模型计算合格率也可以看出: GAML 和 Phillip 的计算结果比 Horton 和 SCS 径流曲线数好(表 3)。GAML 和 Phillip 计算结果没有明显差异, Horton 和 SCS 径流曲线数的计算结果也没有显著差异。

2.3 不同计算方法的模型确定性系数比较

与标准差相比, 模型确定性系数能更好地反映

2 结果分析

2.1 不同径流计算方法的标准差比较

利用蒲洼两个坡耕地和密云石匣休闲地的降雨径流资料, 根据优化方法得到的入渗方程基本参数见表 1。表 2 列出了 GAML、Phillip、Horton 和 SCS 径流曲线数这 4 种径流计算方法计算径流的平均值和标准差与实测径流的比较。4 种径流计算方法计算的径流平均值基本相同, 这与本研究目标函数的选取有关。标准差可以反映计算值与平均值之间的离散程度, 而本研究中各计算方法的平均值与实测平均径流基本相同, 因此标准差也可以反映不同径流计算方法计算结果的好坏。蒲洼 11° 坡耕地小区和 2 β 坡耕地小区, GAML 和 Phillip 方法计算结果的标准差与实测径流的标准差比较接近, 而 Horton 和 SCS 径流曲线数计算结果的标准差偏高, 这表明 GAML 和 Phillip 的计算结果比 Horton 和 SCS 径流曲线数更接近实测值。密云休闲地小区, 4 种径流计算方法的标准差都比实测径流的标准差偏高。

实测值与计算值的接近程度。从模型确定性系数 E_f 来看, GAML 和 Phillip 计算方法计算结果的模型确定性系数较高, 而 Horton 和 SCS 曲线数法计算结果的模型确定性系数偏低(表 4)。这表明 GAML 和 Phillip 计算方法的计算结果更好。这也可以从图 1~ 图 4 反映出来。GAML 和 Phillip 的计算值比较集中地分布在实测值 1:1 线的两侧; 而 Horton 和 SCS 径流曲线数的计算结果值则比较

表3 不同计算方法的模型计算合格率

Table 3 Model certified proportion for different runoff calculation methods

小区	总降雨 场次	GAML		Phillip		Horton		SCS 曲线数	
		合格	合格率	合格	合格率	合格	合格率	合格	合格率
		场次	(%)	场次	(%)	场次	(%)	场次	(%)
蒲洼(1 β)	30	23	76.7	23	76.7	17	56.7	16	53.3
蒲洼(2 β)	30	25	83.3	23	76.7	17	56.7	17	56.7
密云休闲地	13	7	53.8	6	46.2	8	61.5	7	53.8

表4 不同径流计算方法相关系数和模型确定性系数比较

Table 4 Correlative coefficient and model efficiency for different calculation methods

小区	GAML		Phillip		Horton		SCS 曲线数	
	R^2	E_f	R^2	E_f	R^2	E_f	R^2	E_f
蒲洼(1 β)	0.905	0.804	0.906	0.807	0.865	0.693	0.721	0.690
蒲洼(2 β)	0.914	0.824	0.914	0.825	0.881	0.734	0.710	0.688
密云休闲地	0.870	0.600	0.887	0.614	0.879	0.512	0.835	0.500

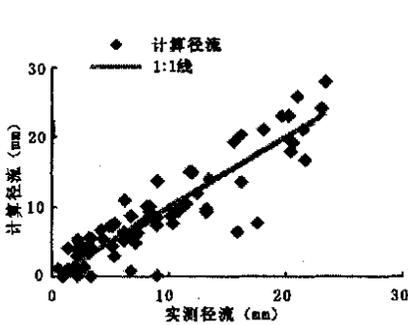


图1 Phillip方法计算径流与实测径流比较

Fig. 1 Comprison of calculated and observed runoff for Phillip

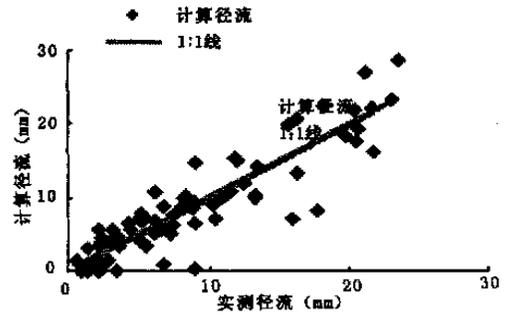


图2 GAML方法计算径流与实测径流比较

Fig. 2 Comprison of calculated and observed runoff for GAML

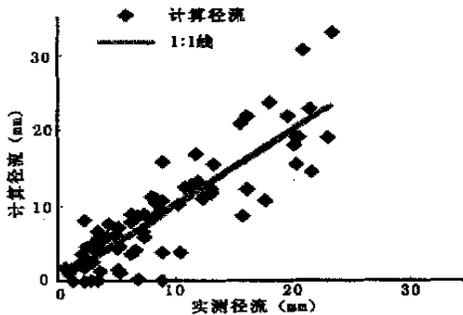


图3 Horton方法计算径流与实测径流比较

Fig. 3 Comprison of calculated and observed runoff for Horton

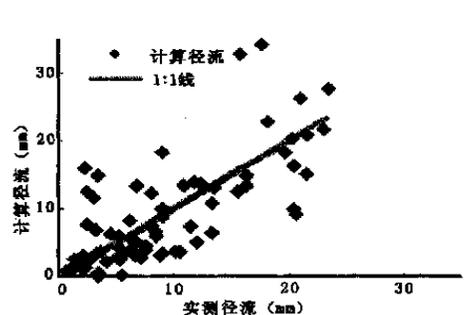


图4 SCS曲线数方法计算径流与实测径流比较

Fig. 4 Comprison of calculated and observed runoff for SCS curve number

离散地分散在实测值 1:1 线两侧。SCS 径流曲线数的计算结果尤其明显。GAML、Phillip 和 Horton 这三种径流计算方法在产流计算过程中均与降雨过程相结合,可以反映降雨强度对产流的影响;而入渗曲线本身则很好地反映了流域下垫面特性对

产流的影响。因此这 3 种计算方法的模型确定性系数均比 SCS 径流曲线数高。

其他人的研究结果也表明,SCS 径流曲线数计算结果比考虑降雨过程的入渗曲线要差^[14,15]。Rawls 和 Brakensiek^[14]利用 17 个小流域的 330 次

降雨资料比较了 Green- Ampt 入渗曲线和 SCS 径流曲线数, 研究结果表明 Green- Ampt 入渗曲线比 SCS 径流曲线数能更好地预报径流量。另外 King 等^[15] 也在 Goodwin Creek 流域 (21 km²) 用 SWAT 模型 (Soil and Water Asses Tool) 评价了 Green- Ampt 入渗曲线和 SCS 径流曲线数用于计算次降雨径流量的好坏, 研究结果表明在次降雨径流量计算中, Green- Ampt 入渗模型比 SCS 径流曲线数法有更好的精度。美国土壤保持局 SCS 径流曲线数法的模型确定性系数之所以较低, 主要是两种降雨引起的。一种是降雨历时长、雨强小、降雨量大的降雨场次, 这种降雨预报的径流量偏大, 如 940708 场次降雨, 降雨量为 51.3 mm, 降雨历时为 9.17 小时, 最大 30 分钟雨强为 0.4 mm/min, 蒲洼 23° 坡耕地小区的实际径流量为 15.28 mm, 而由 SCS 径流曲线数计算的径流量为 32.65 mm。另一类是降雨强度大、历时短的降雨场次, 这种降雨预报的径流量偏低。如 930720 场次降雨, 降雨量为 31.1 mm, 降雨历时为 1.33 小时, 最大 30 分钟雨强为 0.78 mm/min, 蒲洼 23° 坡耕地小区的实测产流量为 21.6 mm, 由 SCS 径流曲线数计算的径流量为 15.6 mm。由于径流曲线数反映的是流域下垫面情况对降雨产流的影响, 而并不反映降雨过程中的降雨强度对产流的影响, 这样就导致了对这两类降雨预报结果比较明显的偏大或偏小。

Green- Ampt 入渗方程、Phillip 入渗方程和 Horton 入渗方程这三种径流计算方法中, Horton 入渗方程的计算结果最差。这与 Clausnitzer 等^[16] (1998) 的研究结果一致。而 Green- Ampt 入渗方程与 Phillip 入渗方程的模型确定性系数相对较高, 且二者的计算结果差异不大 (见表 4、图 1 和图 2)。

通过相关系数也可以反映不同计算方法计算结果的相对优劣。GAML 和 Phillip 有较好的相关系数, SCS 径流曲线数计算结果的相关系数最差 (表 4)。这四种计算方法的相关系数都比模型确定性系数值高, 有的相差还很大, 如密云休闲地小区, Horton 计算结果的相关系数为 0.879, 模型确定性系数为 0.512, 二者相差了 0.367。但正如前面所说, 相关系数反映的是计算值与观测值的线性相关程度, 因此尽管计算径流比较散乱 (见图 4), 但是计算径流与实测径流之间还可以近似地用线性关系表示。可见用模型确定性系数比相关系数

能更好地描述模型计算结果的好坏。

3 结 论

在北京山区, GAML 和 Phillip 入渗方程的计算结果模型确定性系数较高。GAML 和 Phillip 入渗方程在蒲洼 11° 坡耕地小区的模型确定性系数分别为 0.804 和 0.807; 蒲洼 23° 坡耕地小区的模型确定性系数分别为 0.824 和 0.825; 密云休闲地小区的模型确定性系数分别为 0.600 和 0.614。Horton 入渗方程和 SCS 径流曲线数的计算结果模型确定性系数偏低。蒲洼 11° 坡耕地小区的模型确定性系数分别为 0.693 和 0.690; 蒲洼 23° 坡耕地小区的模型确定性系数分别为 0.734 和 0.688; 密云休闲地小区的模型确定性系数分别为 0.512 和 0.500。并且 GAML 和 Phillip 的模型计算合格率也比 Horton 和 SCS 径流曲线数高, 但 GAML 和 Phillip 之间没有明显的差异 (见表 3)。因此从模型参数的物理意义及参数确定的方便性考虑, 当有降雨过程资料时, 在实际应用中以用 Chu 修正的 GAML 入渗方程为宜。但是 SCS 径流曲线数计算径流时, 对资料要求较低, 不需降雨过程资料而仅需降雨总量。因此若无降雨过程资料则可用 SCS 曲线数法进行径流量的估算。

参考文献:

- [1] Green W H and Ampt G A. Studies on soil physics. part 1: the flow of air and water through soils[J]. Jour. Ag. Sci. 1911, 4 (1): 1- 24.
- [2] Mein R G, Larson C L. Modelling infiltration during a steady rain[J]. Water Resour. Res. 1973, 9(2): 384- 394.
- [3] Shu Tung Chu. Infiltration during an unsteady rain[J]. Water Resource Research. 1978, 14(3): 461- 466.
- [4] Philip J R. The theory of infiltration: 1. the infiltration equation and its solution[J]. Soil Sci. 1957, 8(3): 345- 357.
- [5] Chow V T, Maidment D R, Mays L W. Applied hydrology [M]. McGraw - Hill Book Company, 1988. 109.
- [6] U. S. Soil Conservation Service, National engineering handbook [M]. Hydrology Section 4, 1985. 79.
- [7] 包为民. 格林- 安普特下渗曲线的改进和应用[J]. 人民黄河, 1993, 9: 1~ 3.
- [8] 郭 瑛. 一种非饱和产流模型的探讨[J]. 水文, 1982, 1: 1~ 7.
- [9] 郝振纯. 黄土地区降雨入渗模型初探[J]. 水科学进展. 1994, 5(3): 186~ 192.
- [10] Williams J R. EPIC, the erosion - productivity impact calculator volume 1: model documentation[R]. Agricultural Re

- search Service, U. S. D. A., Washington, D. C. . 1983.
- [11] Knisel W G (ed). Creams: a field scale model for chemicals, runoff, and erosions from agricultural management systems [R], USDA Conservation Research Report No. 26, 1980.
- [12] Young R A, Onstad C A, Bosch D D, et al. Agnps: a nonpoint source pollution model for evaluating agricultural watersheds [J]. Soil and Water Conservation Society. 1989, **44**(2): 168 - 173.
- [13] Nash J E, Sutcliffe J V. River flow forecasting through conceptual models, part I: a discussion of principles [J]. J. Hydrol. 1970, **10**(3): 282- 290.
- [14] Nearing M A, Liu B Y, Risse L M, et al. Curve numbers and Green- Ampt effective hydraulic conductivities[J]. Water Resources Bulletin. 1996, **32**(1): 125- 136.
- [15] Rawls W J, Brakensiek D L. Comparison between Green- Ampt and curve number runoff predictions[J]. Trans. Asae 1983, **29**(6): 1597- 1599.
- [16] King K W, Arnold J G, Bingner R L. Comparison of Green- Ampt and curve number methods on Goodwin Creek watershed using Swat[J]. Trans. ASAE. 1999, **42**(4): 1- 7.
- [17] Clausnitzer V, Hopmans J W and Lstarr J. Parameter uncertainty analysis of common infiltration models [J]. Soil Sci. Soc. Am. J. 1998, **62**(6): 1477- 1487.

Study on Runoff Calculation Method in Beijing Mountainous Area

FU Suhua^{1,4}, LIU Baoyuan^{1,4}, WU Jingdong², DUAN Shuhuai³

(1. Department of Resources and Environmental Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100875; 2. Beijing Institute of Water Science, Beijing 100044; 3. Beijing Soil Loss Conservation Station, Beijing 100073; 4. Key Laboratory of Environmental Change and Natural Disaster, the Ministry of Education of China, Beijing 100875)

Abstract: Runoff causes soil erosion and environmental pollution. It is very important for soil loss calculation and soil and water resources evaluation to select suitable runoff calculation method. The 30 single storm data of two conventional tillage plots at Puwa watershed, Fangshan County and 13 single storm data of one fallow plot at Shixia watershed, Miyun County were used. Several runoff calculation methods, including GAML revised by Chu, Phillip, Horton, SCS curve number, were compared. The results showed that the model efficiencies of GAML and Phillip were higher than those of Horton and SCS curve number. According to the parameters easily obtained, GAML revised by Chu is suggested when there are the continuous records of rainfall in Beijing mountainous area. If not, SCS curve number should be used. The results can be served as soil and water evaluation and plan.

Key words: Beijing mountainous area; infiltration; runoff calculation