

北京地区降雨侵蚀力简易计算方法研究

徐 丽¹, 谢 云¹, 符素华¹, 刘宝元¹, 路炳军², 袁爱萍²

(1. 北京师范大学 地理学与遥感科学学院, 北京 100875; 2. 北京市水土保持工作总站, 北京 100038)

摘 要: 降雨侵蚀力反映降雨对土壤侵蚀影响的潜在能力。降雨侵蚀力经典算法所需的降雨过程资料较难获得, 一般利用各种类型雨量资料建立降雨侵蚀力的简易算法, 为模型的参数输入服务。利用北京 10 个水文站 25 年 2 894 次降雨过程资料。其中 5 个站点用于建立日、月、年降雨侵蚀力简易计算公式, 另外 5 个站点用于模型检验。研究结果表明, 不同类型雨量资料估算降雨侵蚀力的精度不同, 用日或月雨量资料直接估算日或月降雨侵蚀力时, 模型的误差较大。用日、月或年雨量估算年降雨侵蚀力时, 模型的误差较小, 约有一半的样本相对误差绝对值小于 20%, 3 个模型相比, 日雨量模型估算的平均相对误差最小。用日、月或年雨量估算多年平均年降雨侵蚀力时, 模型的误差最小, 所有样本的相对误差绝对值均小于 20%, 平均相对误差绝对值最小值只有 0.8%, 最大值小于 7%, 3 个模型相比, 日雨量模型的估算精度最高。因此在具体应用过程中可以根据资料的占有情况来决定相应的降雨侵蚀力估算模型。本研究结果可以为北京地区土壤侵蚀量估算和水土资源评价提供参数服务。

关键词: 降雨侵蚀力; 雨量; 土壤侵蚀; 北京

中图分类号: S157.1 文献标识码: A 文章编号: 1005-3409(2007)06-0398-05

Simple Method of Estimating Rainfall Erosivity Under
Different Rainfall Amount of Beijing

XU Li¹, XIE Yun¹, FU Suhua¹, LIU Baoyuan¹, LU Bingjun², YUAN Aiping²

(1. School of Geography of Beijing Normal University, Beijing 100875, China;

2. Beijing Soil and Water Conservation Station, Beijing 100038, China)

Abstract: Rainfall erosivity can quantify the effect of raindrop impact and can also reflect the amount and rate of runoff likely to be associated with the rain. It is an important parameter in USLE and RUSLE. The value of rainfall erosivity for a given rain-storm equals the product of total storm energy (E) times the maximum 30-min intensity (I_{30}). It requires the continuous record of rainfall data. But the continuous record of rainfall data is difficult to obtain. Researchers developed other equations instead of the rainfall kinetic energy. In this study data of 2 894 rainfall events in 25 years in 10 hydrology gauge stations were used. Data of 5 stations were used to develop empirical equations of rainfall erosivity, and the other data were used to test model. The precision estimating rainfall erosivity is different with various rainfall data. The absolute relative error of daily rainfall erosivity and monthly rainfall erosivity estimated by the daily rainfall erosivity model and monthly rainfall erosivity model is very high. The errors of the annual and average annual rainfall erosivity estimated by the three models are low, and absolute relative errors about half of data are less than 20%. In three models, the average relative error of annual erosivity estimated by daily rainfall model is the lowest. Absolute relative errors of estimating the average annual rainfall erosivity estimated by the three models are less than 20%, the lowest one is 0.8%, the highest is less than 7%. So the daily rainfall erosivity model is more accurate than the other two models on estimating annual rainfall erosivity and average annual rainfall erosivity. The results can be served as predicting soil loss and evaluating soil and water resources.

Key words: rainfall erosivity; rainfall amount; soil erosion; Beijing

1 引 言

降雨侵蚀力因子 R 是土壤侵蚀经验模型中的一个重要参数, 反映降雨导致土壤侵蚀的潜在能力。Wischmeier 通过对降雨特性与土壤侵蚀量的回归分析, 提出用一次降雨的总动能(E)与该次降雨的最大 30 min 雨强 I_{30} 的乘积 $E I_{30}$ 作为降雨侵蚀力的定量指标^[1-2]。由于采用了雨强和降雨动能的组合, 在很大程度上揭示了降雨影响土壤侵蚀的动力过程:

即雨滴打击地表以及降雨产生径流对土壤侵蚀的综合效应。考虑到这一指标是经过统计分析得出的, Wischmeier 提出为了保证指标的精度, 应使用至少 20 a 以上长度的降雨过程资料计算^[3]。在实际应用中由于降雨过程资料获得难度大, 许多研究者提出用易于获得的常规观测资料计算降雨侵蚀力, 将这种算法称为简易算法。使用的常规观测资料主要是次雨量^[4]、日雨量^[5-7]、逐年或多年平均的月雨量和年雨

*收稿日期: 2007-01-18
基金项目: 国家重点基础研究发展规划项目(2007CB407204); 北京自然科学基金项目(8072016); 北京市科技项目(D0704004040191)
作者简介: 徐丽(1981-), 女, 山东青岛人, 硕士研究生, 主要从事土壤侵蚀研究。
通信作者: 符素华。

量^[8-13]等。在这些简易计算模型中,用到的数学形式主要有幂函数方程^[5,10,12-17]、一次线性方程^[10,11,15]、二次方程^[11]、三次方程^[19]等。其中采用幂函数形式比较普遍,这与降雨特性有关:一般情况下,雨强随降雨历时递减,由于降雨侵蚀力指标主要受雨强影响,因此历时短、大雨强降雨,往往雨量不大,但却具有较大的降雨动能,进而具有较大的降雨侵蚀力。幂函数形式能够反映小雨范围内降雨侵蚀力增加快的特点。在各种简易算法中,一般没有给出与 EI_{30} 指标相比的估算误差是多少,而且大部分模型建立时,使用的资料年限往往少于 20 a。目前的简易算法主要集中在估计年降雨侵蚀力,土壤侵蚀经验模型中需要估算年内降雨侵蚀力的季节变化,有必要建立能反映这种变化的简易模型,为此,Richardson^[5]、章文波^[15,23]等分别建立了计算日降雨侵蚀力的模型。但他们都没有给出与 EI_{30} 相比的误差,资料长度也有限。该研究拟采用北京地区 10 个水文站 25 年 2 894 次降雨过程资料,建立直接用日雨量、月雨量和年雨量估算日、月、年降雨侵蚀力的简易算法,并给出各种简易算法与 EI_{30} 指标的估计误差,为能够方便、科学地应用降雨侵蚀力进行土壤侵蚀预报提供理论依据。

2 资料与方法

2.1 降雨过程资料摘录与处理

本研究摘录了北京 10 个水文站 1980–2004 年 25 a 间所有侵蚀性降雨的过程资料(图 1)。北京地区由东南向西北地势逐渐增高,由平原区过渡为山区,水文站在平原区分布较多。10 个水文站中,5 个站的数据用于建立降雨侵蚀力简易计算模型,另外 5 个站的数据用来检验模型,估计计算误差。

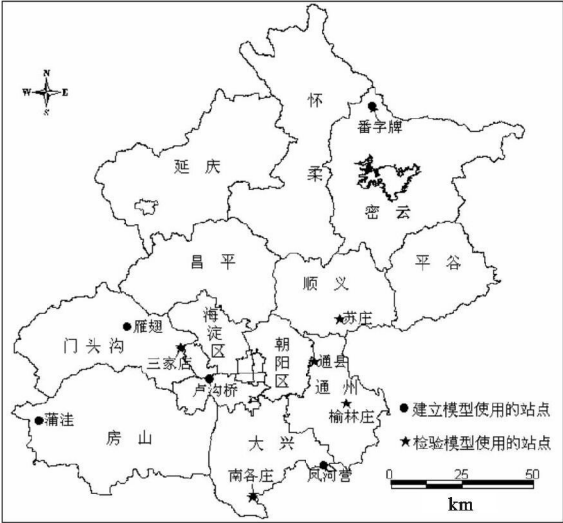


图 1 10 个水文站分布

所有站点资料摘录于自记雨量计观测数据。已有研究表明,仅摘录侵蚀性降雨,不仅使工作量减少 79%^[20,21],还可以提高降雨侵蚀力计算精度,因此本研究只摘录侵蚀性降雨过程资料。侵蚀性降雨标准采用次雨量 12 mm,即只摘录次降雨量大于等于 12 mm 的降雨,如果次雨量小于 12 mm,但 15 min 内降雨量超过 6 mm,也作为侵蚀性降雨进行摘录。如果两次降雨的间歇时间不足 6 h,则作为一次降雨过程摘录,超过 6 h,视为两次降雨过程。具体摘录每个时段的起止时间和累积雨量,然后计算各时段的雨强、该次降雨的最大 30 min 雨量、次雨量,并进一步计算相应的日、月和年

雨量。10 个水文站 25 a 共摘录 2 894 次侵蚀性降雨,各站 25 a 间侵蚀性降雨次数变化于 234~368 次(表 1)。

表 1 10 个水文站点的经纬度和侵蚀性降雨次数

站点	建立简易模型使用的数据		
	经度	纬度	1980–2004 年 侵蚀性降雨次数
雁翅	115° 53′	40° 02′	276
番字牌*	116° 53′	40° 44′	266
凤河营	116° 41′	39° 36′	251
卢沟桥	116° 13′	39° 52′	296
蒲洼	115° 30′	39° 44′	276
苏庄	116° 45′	40° 04′	345
通县	116° 39′	39° 56′	368
榆林庄	116° 47′	39° 48′	308
南各庄*	116° 24′	39° 30′	234
三家店	116° 06′	39° 58′	274

注: * 号站点表示资料缺测,南各庄缺 1989 年、1994–1997 年,番字牌缺 2001–2004 年。其它均从 1980–2004 年。

2.2 EI_{30} 计算

一次降雨的降雨侵蚀力指标 EI_{30} 用下式计算^[22]:

$$R_{次} = E \cdot I_{30} \tag{1}$$

$$E = \sum_{r=1}^n (e_r \cdot P_r) \tag{2}$$

$$e_r = 0.29[1 - 0.72\exp(-0.054i_r)] \tag{3}$$

式中: $R_{次}$ ——次降雨侵蚀力($\text{MJ} \cdot \text{mm}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h})$); I_{30} ——次降雨最大 30 min 雨强(mm/h); E ——次降雨总动能(MJ/hm^2); i_r ——一次降雨过程中第 r 时段的断点雨强(mm/h),共分为 n 个时段; P_r ——第 r 时段的雨量(mm); e_r ——第 r 时段的单位降雨动能($\text{MJ}/(\text{hm}^2 \cdot \text{mm})$)。一日 EI_{30} 指标原则上利用上式计算,但实际情况下,一日降雨可包含一次降雨,或两次以上多次降雨,一次降雨也可跨两日或多日^[24]。因此计算日 EI_{30} 时,应考虑以下 3 种情况:(1) 一次降雨集中在一日内,此时日降雨侵蚀力等于该次降雨侵蚀力;(2) 一日包含多次降雨,则日降雨侵蚀力等于多次降雨侵蚀力之和;(3) 一次降雨跨多日,则将该次降雨侵蚀力进行分解,分解后的多日降雨侵蚀力之和应与该次降雨侵蚀力相等,这种情况下的日 EI_{30} 公式为

$$R_{日} = E' \cdot I_{30} \tag{4}$$

式中: E' ——一日降雨总动能(MJ/hm^2),为一次降雨总动能的一部分,利用式(2)和(3)计算; I_{30} ——次降雨的最大 30 min 雨强(mm/h)。

月 EI_{30} 是各月所有次降雨 EI_{30} 的累加值。年 EI_{30} 是各年所有次降雨 EI_{30} 的累加值。多年平均年降雨侵蚀力是各年降雨侵蚀力的多年平均值。

2.3 简易公式建立与误差分析

简易公式采用幂函数形式建立。将番字牌、卢沟桥、雁翅、蒲洼、凤河营 5 个站计算的逐年日、月、年 EI_{30} 值分别与日雨量、月雨量和年雨量,按以下公式建立回归关系:

$$(EI_{30})_{日} = a_d P_{日}^{\beta_d} \tag{5}$$

$$(EI_{30})_{月} = a_m P_{月}^{\beta_m} \tag{6}$$

$$(EI_{30})_{年} = a_y P_{年}^{\beta_y} \tag{7}$$

式中: $(EI_{30})_{日}$, $(EI_{30})_{月}$, $(EI_{30})_{年}$ ——计算的 5 个站各年的日、月、年 EI_{30} 值($\text{MJ} \cdot \text{mm}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h})$); $P_{日}$, $P_{月}$, $P_{年}$ ——日、月和年雨量(mm); α , β ——非线性回归分析确定的模型

参数。采用统计软件 SPSS 13.0 进行非线性回归分析。

为了分析简易模型回归效果,利用未参与回归分析的苏庄、通县、榆林庄、南各庄、三家店 5 个站 的资料对建立的简易模型进行检验。

检验日、月降雨侵蚀力简易模型时,分别利用日、月雨量,根据回归得到的公式(5),(6)计算日、月降雨侵蚀力估算值;以日、月 EI_{30} 值为横坐标,日、月侵蚀力估算值为纵坐标,建立 1:1 回归关系;根据回归系数与拟合曲线的决定系数,分析简易模型估算效果。

日、月降雨侵蚀力均可以通过累加得到年降雨侵蚀力值,因此参与检验的年降雨侵蚀力简易模型包括 3 个:(1)利用日简易模型通过累加得到的年值;(2)利用月简易模型通过累加得到的年值;(3)利用年雨量模型直接计算的年值。然后采用与前述相同的方法,进行回归检验。

为了方便应用者在使用简易模型时,了解它们的计算精度,分别估计了各种简易模型的相对误差。计算公式为

$$R = \frac{R_{al} - R_{obs}}{R_{obs}} \times 100\%$$

(8)

式中: R ——相对误差(%); R_{cal} ——简易模型计算的降雨侵蚀力($\text{MJ} \cdot \text{mm}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h})$); R_{obs} ——降雨侵蚀力 EI_{30} 值($\text{MJ} \cdot \text{mm}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h})$)。估计日、月降雨侵蚀力相对误差时, R_{cal} 分别是用简易公式(5)和(6)计算的日、月降雨侵蚀力($\text{MJ} \cdot \text{mm}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h})$); R_{obs} 分别是日、月 EI_{30} 值($\text{MJ} \cdot \text{mm}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h})$)。估计年降雨侵蚀力相对误差时, R_{al} 分别是用简易公式(5)和(6)计算的日、月降雨侵蚀力累加的年值,以及用简易公式(7)计算的年值($\text{MJ} \cdot \text{mm}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h})$); R_{obs} 是年 EI_{30} 值($\text{MJ} \cdot \text{mm}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h})$)。此外,考虑到应用降雨侵蚀力简易模型时,很多情况下需要计算其多年平均值,估计了利用上述 3 种简易模型计算出的多年平均年降雨侵蚀力及其相对误差。

3 结果与分析

利用北京 5 个水文站点的日雨量、月雨量、年雨量建立的日、月、年降雨侵蚀力简易估算公式分别为:

$$R_{\text{日}} = 1.384P_{\text{日}}^{1.453} \quad R^2 = 0.72$$

(9)

$$R_{\text{月}} = 0.689P_{\text{月}}^{1.474} \quad R^2 = 0.72$$

(10)

$$R_{\text{年}} = 0.440P_{\text{年}}^{1.463} \quad R^2 = 0.58$$

(11)

3 个简易公式的回归指数 b 的值比较接近,变化于 1.453~1.474,回归系数 a 差异较大,最小为 0.440,最大为 1.384。日雨量模型和月雨量模型的决定系数为 0.72,年雨量的决定系数为 0.58。

对公式(9)–(11)的检验和误差分析表明,3 个模型估算的误差值相差较大。日雨量模型计算的日降雨侵蚀力与日 EI_{30} 值相比,计算值的相对误差绝对值小于 20% 的仅占 20.7%,其余 79.3% 的计算值偏大或偏小 20% 以上(表 2)。其中主要是对 EI_{30} 小值情况下的日降雨侵蚀力估算偏高,对 EI_{30} 大值情况下的日降雨侵蚀力估算偏低,对中间情形下的日降雨侵蚀力估算结果相对较好(图 2)。以日 EI_{30} 值小于 30 $\text{MJ} \cdot \text{mm}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h})$ 为例,5 站日 EI_{30} 小于 30 $\text{MJ} \cdot \text{mm}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h})$ 的降雨次数为 533 d,其中日雨量小于 12 mm 的有 235 d,占 44.1%。谢云^[21]曾经确定了黄土高原的侵蚀性雨强标准为 15 mm/h,若按照此标准,这些降雨有 92.5% 的 I_{30} 在 15 mm/h 以下。并且如果按照此侵蚀性雨强标准,本

文检验站的 1 643 日侵蚀性降雨将有 41.1% 的被剔除,这样将会提高估算精度。实际上,小雨产生的降雨动能会包括两种情况:一是历时短,但雨强大;二是历时相对较长,雨强小。因此仅依靠雨量估算降雨侵蚀力会造成较大的误差,需要深入研究。对 EI_{30} 值偏大的情形,日雨量模型估算偏低,如三家店 2000 年 7 月 4 日降雨量为 241.6 mm, I_{30} 为 133mm/h,日 EI_{30} 值为 8 271 $\text{MJ} \cdot \text{mm}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h})$,而根据日雨量模型公式估算的日降雨侵蚀力仅有 4 086 $\text{MJ} \cdot \text{mm}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h})$ 。苏庄 1987 年 7 月 1 号的降雨量 107 mm,最大 30 min 雨强达 204 mm/h,日雨量估算日降雨侵蚀力时低估 4 913 $\text{MJ} \cdot \text{mm}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h})$;对于大雨量小雨强的降雨,估计值会比 EI_{30} 值偏高,比如,榆林庄 1994 年 7 月 12 号,雨量 298 mm, I_{30} 为 52 mm/h,日 EI_{30} 为 3 492 $\text{MJ} \cdot \text{mm}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h})$,估计值为 5 457 $\text{MJ} \cdot \text{mm}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h})$,比实际值高估出 1 965 $\text{MJ} \cdot \text{mm}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h})$ 。诸如此类降雨虽然场次不多但对估算结果影响较大。此类降雨侵蚀力的准确估计还有待继续研究。

估算月降雨侵蚀力可以同时使用日雨量模型和月雨量模型,前者通过累加得到月值。月降雨侵蚀力的估计值误差较日降雨侵蚀力估计值的误差减少。与月 EI_{30} 值相比,用日雨量模型估计的月降雨侵蚀力相对误差绝对值小于 20% 的占 23.2%,用月雨量模型估计的相对误差绝对值小于 20% 的占 17.8%(表 2)。两个模型相比,用日雨量模型时,容易高估(表 2),尤其在月 EI_{30} 值偏小的情况下,明显较月雨量模型估计偏高(图 3)。

表 2 各种模型计算不同降雨侵蚀力时的相对误差

降雨侵蚀力	简易模型	相对误差分布*		
		相对误差	相对误差	相对误差
		< - 20%	- 20% ~ 20%	> 20%
日降雨侵蚀力	日雨量模型	22.2	20.7	57.1
	日雨量模型	19.9	23.2	56.9
月降雨侵蚀力	月雨量模型	31.0	17.8	51.2
	日雨量模型	17.4	45.6	37.0
年降雨侵蚀力	月雨量模型	30.0	42.3	26.7
	年雨量模型	25.8	46.7	27.5

* 指相对误差范围内的样本数占总样本数的百分比。

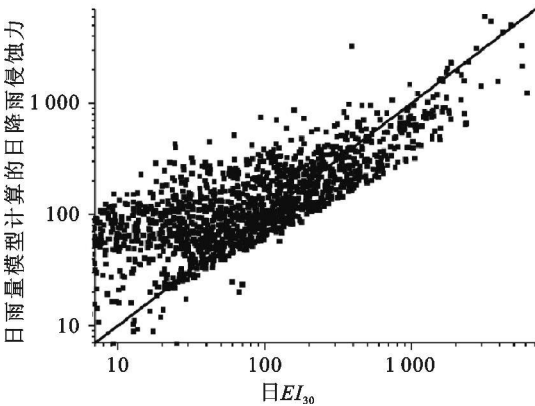


图 2 日雨量模型估算的日 R 值与日 EI_{30} 的 1:1 线图

估算年降雨侵蚀力可同时使用以上 3 种模型,分别对于日和月降雨侵蚀力累加获得。总体而言,3 种模型估计的年降雨侵蚀力值都好于日和月降雨侵蚀力估计值(图 4)。3 种模型估计的年降雨侵蚀力值与年 EI_{30} 值相比较,相对误差小

于 20% 的分别占总样本数的 45.6%, 42.3% 和 46.7% (表 2)。考虑到当雨量趋于 0 时, 降雨侵蚀力也应趋于 0, 因此估计值与相应的 EI_{30} 值之间的回归直线应通过原点^[23]。表

4 给出了 3 种模型估算年降雨侵蚀力时, 估计值与年 EI_{30} 值之间通过原点的回归方程和决定系数。

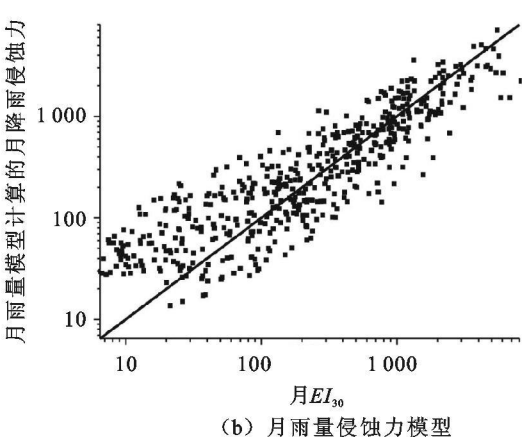
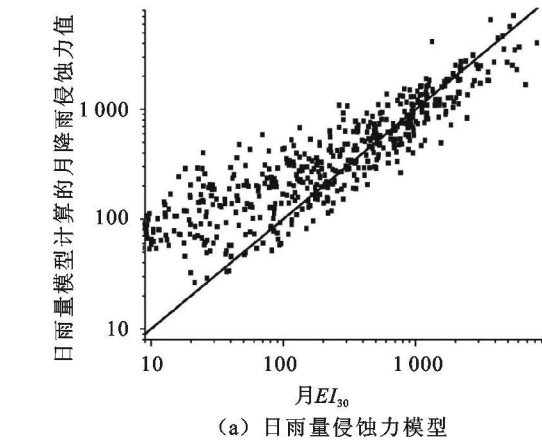


图 3 日、月雨量模型估算月 R 值与月 EI_{30} 的 1:1 线图

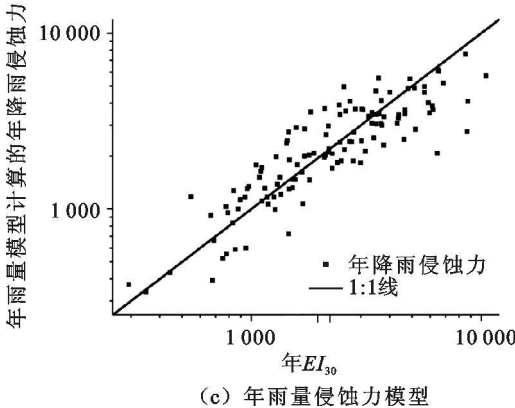
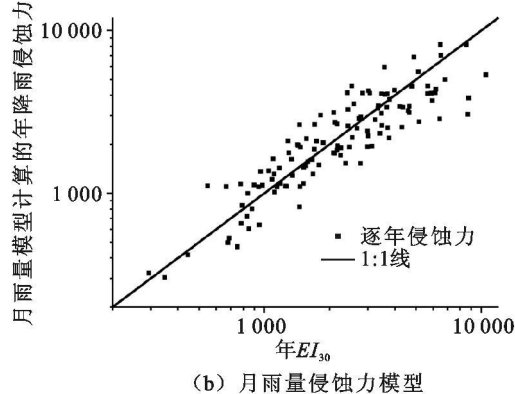
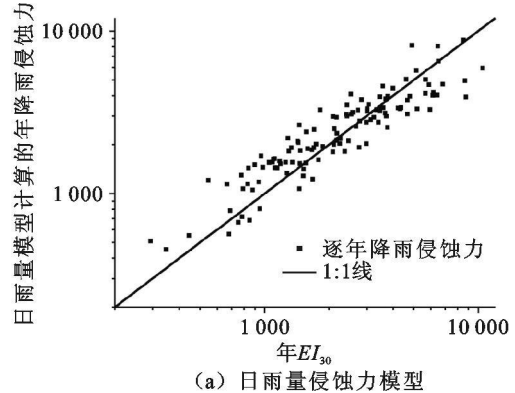


图 4 日、月、年雨量模型估算的年 R 值与年 EI_{30} 的 1:1 线图

表 3 各种模型计算年降雨侵蚀力的回归分析结果

简易模型	平均相对误差/%	平均相对误差的标准差	通过原点的回归方程	方程决定系数
日雨量模型	11.3	33.26	$R_y = 0.87 \cdot (EI_{30})_y$	0.60
月雨量模型	1.1	33.27	$R_y = 0.81 \cdot (EI_{30})_y$	0.54
年雨量模型	3.9	36.44	$R_y = 0.80 \cdot (EI_{30})_y$	0.49

在估计年降雨侵蚀力值时, 3 种模型估计误差的差异不十分明显。从相对误差看, 日、月、年雨量模型的平均相对误差分别为 11.3%, 1.1% 和 3.9%。从 1:1 线回归方程看, 上述 3 个模型的系数分别为 0.87, 0.81, 0.80, 方程的决定系数依次为 0.60, 0.54, 0.49(表 3)。日雨量模型估算结果精度相对略高。

多年平均年降雨侵蚀力亦可采用日、月、年雨量模型估算, 3 种模型的相对误差绝对值均小于 20%, 平均相对误差分别为 -0.8%, -6.9% 和 -6.6%(表 4), 仍以日雨量模型估算精度最高。与日、月降雨侵蚀力的估计值偏高相反, 年降雨侵蚀力估计值略微偏低。这是因为小侵蚀力值在年值中所占比例小, 主要由大值决定。估计较大值的降雨侵蚀力时, 由于没有考虑雨强的影响, 估计结果会偏低(图 4)。

表 4 各种模型计算多年平均年降雨侵蚀力的误差

简易模型	相对误差范围/%	平均相对误差/%
日雨量模型	-2.7~ -7.5	-0.8
月雨量模型	-12.7~ 0.4	-6.9
年雨量模型	-15.7~ 0.7	-6.6

4 结论与讨论

利用北京 5 个水文站 1980-2000 年共 1365 次降雨过程资料, 建立了利用日雨量、月雨量和年雨量估算日、月、年降雨侵蚀力的简易公式, 分别为:

$R_{\text{日}} = 1.384P_{\text{日}}^{0.453}$

$R_{\text{月}} = 0.689P_{\text{月}}^{1.474}$

$R_{\text{年}} = 0.440P_{\text{年}}^{0.463}$

利用另外 5 个水文站 1980-2000 年共 1529 次降雨过程, 对上述简易模型进行检验, 结果表明:

(1) 用日或月雨量资料直接估算日或月降雨侵蚀力时, 模型的误差较大, 仅有 20.7% 的样本相对误差绝对值小于 20%。

(2) 用日、月或年雨量估算年降雨侵蚀力时,模型的误差较小。约有一半的样本相对误差绝对值小于 20%,3 个模型相比,日雨量模型估算的平均相对误差最小。

(3) 用日、月或年雨量估算多年平均年降雨侵蚀力时,模型的误差最小,所有样本的相对误差绝对值均小于 20%,平均相对误差绝对值最小值只有 0.8%,最大值小于 7%。3 个模型相比,日雨量模型的估算精度最高。

综上,本研究基于长序列降雨过程资料确定降雨侵蚀力简易算法,十分适用于预报逐年或多年平均年降雨侵蚀力,预报误差绝对值一般小于 12%,无论从资料序列还是资料类型,都对以往研究是一个重要的补充。提出的日或月降雨侵蚀力简易模型,弥补了以往缺少该类模型的不足,为分析降雨侵蚀力的季节变化提供了依据。但在应用于小雨即 EI_{30} 值小的情况下,会出现高估的情形,应慎重使用。进一步研究小雨或大雨情况下的简易模型,对于提高降雨侵蚀力估算精度,十分必要。

致谢: 论文得以顺利完成首先要感谢恩师谢云、符素华、刘宝元老师的悉心指导。感谢北京水文总站各位老师的大力支持。同时更要感谢师兄曾宪勤,同学杨晓颖、张天宇、郭鹏飞在资料摘录和整理方面给予的大量帮助!

参考文献:

[1] Wischmeier, W H, Smith D D. Rainfall energy and its relationship to soil loss [J]. Transactions of American Geophysical Union, 1958, 39(2): 285– 291.

[2] Wischmeier W H. A rainfall erosion index for Universal soil loss equation [J]. Soil Science Society Proceedings, 1959, 23(3): 246– 249.

[3] Wischmeier W H, Smith D D. Predicting rainfall erosion losses: A guide to conservation planning [M]. U. S. Dep. Agric., Agric. Handb. No. 537, 1978.

[4] 符素华, 段淑怀, 吴敬东, 等. 北京山区次降雨侵蚀力 [J]. 水土保持学报, 2002, 16(1): 37– 39, 57.

[5] Richardson C W, Foster G R, Wright D A. Estimation of erosion index from daily rainfall amount [J]. Transactions of the ASAE, 1983, 26(1): 153– 156.

[6] 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.

[7] 章文波, 谢云, 刘宝元. 降雨侵蚀力研究进展 [J]. 水土保持学报, 2002, 16(5): 43– 46.

[8] Ferro V, Porto P, Yu B A. Comparative study of rainfall erosivity estimation for southern Italy and south-

eastern Australia [J]. Hydrological Sciences Journal, 1999, 44(1): 3– 24.

[9] 黄炎和, 卢程隆, 郑添发, 等. 闽东南降雨侵蚀力指标 R 值 [J]. 水土保持学报, 1992, 6(4): 1– 5.

[10] 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.

[11] 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.

[12] Renard K G, Freimund J R. Using monthly precipitation data to estimate the R factor in the Revised USLE [J]. Journal of Hydrology, 1994, 157: 287– 306.

[13] Yu B, Rosewell C J. An assessment of a daily rainfall erosivity model for New South Wales [J]. Australian Journal of Soil Research, 1996, 34: 139– 152.

[14] 王万忠, 焦菊英, 郝小品, 等. 中国降雨侵蚀力 R 值的计算与分布 (I) [J]. 水土保持学报, 1995, 9(4): 5– 18.

[15] 章文波. 不同类型雨量资料估算降雨侵蚀力 [J]. 资源科学, 2003, 25(1): 35– 41.

[16] Arnoldus H M J. Methodology used to determine the maximum potential average annual soil loss due to sheet and rill erosion in Morocco [J]. FAO Soils Bulletin, 1977, 34: 39– 51.

[17] 叶芝菡, 刘宝元, 章文波, 等. 北京市降雨侵蚀力及其空间分布 [J]. 中国水土保持科学, 2003, 1(1): 16– 20.

[18] Mikhailova E A, Bryant R B, Schwager S J, et al. Predicting rainfall erosivity in honduras [J]. Soil Sci. Soc. Am. J., 1997, 61: 273– 279.

[19] 高克昌, 赵纯勇. 重庆市主城区降雨侵蚀力计算方法研究 [J]. 中国水土保持, 2002(6): 22– 24.

[20] Xie Y, Liu B. Practical thresholds for separating erosive and non-erosive storms [J]. American Society of Agricultural Engineers. 2002, 45(6): 1843– 1847.

[21] 谢云, 刘宝元, 章文波. 侵蚀性降雨标准研究 [J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 2000, 14(4): 6– 11.

[22] Renard K G, Foster G R, Weesies G A, et al. Prediction soil erosion by water: A guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) [M]. Agric Handb 703, Washington D C: USDA, 1997.

[23] 章文波. 中国降雨侵蚀力及土壤侵蚀计算机模型研究 [D]. 北京: 北京师范大学, 2001.

更正声明

《水土保持研究》2006 年第 13 卷第 6 期刊登的“黑河流域退耕还林还草工程社会评价调查研究”的作者简介中彭浩的性别为女,特此声明。