

# 径流小区尺度土壤入渗率影响因子与估算模型研究

黄俊<sup>1</sup> 金平伟<sup>1,2</sup> 李敏<sup>3</sup> 李岚斌<sup>1,2</sup> 姜学兵<sup>1,2</sup>

(1. 珠江水利委员会珠江水利科学研究所, 广州 510611; 2. 珠江水利委员会珠江流域水土保持监测中心站, 广州 510611;  
3. 萨斯喀彻温大学土壤科学系, 萨斯卡通 S7H2C5)

**摘要:** 基于次降雨水文过程, 确定了影响土壤平均入渗率( $i_m$ )的多个因子; 借助野外人工径流场观测资料, 研究  $i_m$  与多个因子间定量关系, 构建  $i_m$  估算模型。  $i_m$  与坡度之间呈二次抛物线关系, 随坡度增加呈先升后降的变化趋势。  $i_m$  随坡长、降雨强度的增加均呈线性增加规律, 随次降雨量增加呈指数增加趋势, 随土壤颗粒分形维数增加呈线性降低规律。  $i_m$  与地表植被盖度、前期土壤含水率之间均存在双曲函数关系, 随二者递增分别呈逐渐增加和降低规律。基于上述 7 个函数关系, 采用多元非线性回归法建立估算  $i_m$  的回归模型, 模型约 72% 的数据点相对误差不超过 10%。采用上述 7 个因子作为输入参数, 建立预测  $i_m$  的 BP 神经网络模型; 通过灰色关联度分析法确定了模型最优训练算法为 Levenberg - Marquardt、隐含层神经元结点最优个数为 15; 模型约 81% 的数据点相对误差不超过 10%。

**关键词:** 土壤入渗; 水文过程; 灰色关联度; 神经网络; 多元非线性

中图分类号: TV121; S152.7<sup>+</sup>2 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2016)08-0171-08

## Influencing Factors of Soil Infiltration Rate and Its Estimation Model at Runoff-plot Scale

Huang Jun<sup>1</sup> Jin Pingwei<sup>1,2</sup> Li Min<sup>3</sup> Li Lanbin<sup>1,2</sup> Jiang Xuebing<sup>1,2</sup>

(1. Pearl River Hydraulic Research Institute, Pearl River Water Resources Commission, Guangzhou 510611, China  
2. Soil and Water Conservation Monitoring Center of Pearl River Basin, Pearl River Water Resources Commission, Guangzhou 510611, China  
3. Department of Soil Science, University of Saskatchewan, Saskatoon S7H2C5, Canada)

**Abstract:** Based on the hydrological process, several factors affecting the mean soil infiltration rate ( $i_m$ ) under the individual rainfall event were determined, which were the slope gradient ( $S$ ), slope length ( $L$ ), rainfall intensity ( $R_i$ ), rainfall amount ( $R_{ain}$ ), vegetation cover of the land surface ( $V_c$ ), antecedent soil water content ( $A_{sw}$ ) and fractal dimension of soil particle ( $D$ ). Using the data obtained from the field runoff-plot under natural rainfall events, the quantitative relationships between  $i_m$  and the seven factors were analyzed, and the multi-parameter estimation model for  $i_m$  was established by means of multivariate nonlinear regression method and BP neural network model. Relationship between  $i_m$  and  $S$  was in accord with quadratic parabola, and  $i_m$  was firstly increased and then decreased with increase of  $S$ . The  $i_m$  was increased linearly with the increase of  $L$  and  $R_i$ , it was increased with the increase of  $R_{ain}$  by power function and linearly decreased with increase of  $D$ . Hyperbolic functions were obtained between  $i_m$  and  $V_c$ ,  $A_{sw}$ , and the  $i_m$  was increased with increase of  $V_c$  and decreased with increase of  $A_{sw}$ . On the strength of the seven functional relationships, the estimation model of  $i_m$  was built by multivariate nonlinear regression method. The relative error of around 72% data was within  $\pm 10\%$ . Using the seven factors as input parameters, a BP neural network model for prediction of  $i_m$  was established. The best training algorithm was Levenberg - Marquardt method and the ideal neurons nodes of the hidden layer

收稿日期: 2015-11-27 修回日期: 2015-12-21

基金项目: 水利部黄土高原水土流失过程与控制重点实验室开放课题基金项目(2016006)

作者简介: 黄俊(1983—), 男, 工程师, 博士, 主要从事水土保持与水土资源管理利用研究, E-mail: jie1002520@sina.cn

were determined as 15 by the grey relational degree method. The relative error of around 81% data was within  $\pm 10\%$ .

**Key words:** soil infiltration; hydrological process; grey relational degree; neural network; multivariate nonlinear

## 引言

土壤入渗是降雨、灌溉等水分经由地表进入土壤,在重力势、基质势等作用下运移、存储变为土壤水的动态过程,是地表水与地下水相互转化、消耗过程的重要环节,也是影响坡面产汇流的重要因素。土壤入渗研究对于降雨径流调控、水土保持、水资源评价管理、农田灌溉技术参数确定等具有重要意义。

作为土壤结构的基本特征,不同粒级土壤颗粒含量对土壤入渗性能具有最直接的影响作用。土壤颗粒分形维数( $D$ )直接反映土壤质地中粘粒、粉粒和砂粒含量变化<sup>[1]</sup>。表层土壤 $D$ 值变异度较小,与粘粒呈显著正相关关系,与粉粒和砂粒含量呈显著负相关关系<sup>[2]</sup>。 $D$ 值越大,土壤细颗粒含量越高,土壤渗透性能越差, $D$ 值与入渗率间呈显著负相关关系<sup>[3]</sup>。

除直接影响入渗性能的土壤质地、机械组成指标外,土壤含水率、降雨特征、植被地形等也对入渗率产生重要的间接影响作用。含水率变化导致土壤颗粒体积改变,使得土壤孔隙及连通性发生变化而影响土壤渗透特性<sup>[4]</sup>。前期含水率越低,基质势梯度越大,土壤渗透性能越好<sup>[5-6]</sup>。雨强及雨量作为反映降雨特征的两个重要指标,均对入渗率产生重要影响作用。高强度人工模拟降雨试验结果表明,土壤稳定入渗率随雨强增加而增大<sup>[7-8]</sup>,但雨强过大可能破坏土壤表层物理结构而导致入渗性能下降<sup>[9-10]</sup>。一般而言,次降雨量越大,土壤含水率增幅越大、影响土层越深<sup>[11]</sup>。与裸地相比,植被可明显削减雨滴对表土的打击作用<sup>[12]</sup>,保护表土物理结构,使土壤较长时间保持较高的渗透能力<sup>[13-14]</sup>。此外,植被覆盖改变了坡面水文过程<sup>[15]</sup>,延长了下渗时间、增加了入渗水量。石生新<sup>[7]</sup>研究发现次降雨累积入渗量随植被覆盖度增加呈指数递增,且随降雨历时延长其影响作用逐渐增强。坡度是地形因素中关键因子,通过改变坡面承雨量及径流水深而对入渗性能产生重要影响作用。FOX等<sup>[16]</sup>发现坡度变化改变了径流深而影响入渗性能,认为入渗率随坡度增加逐渐降低。但GOVERS<sup>[17]</sup>基于野外径流小区试验得出相反结论,指出坡长对坡面径流入渗量的影响作用随小区边界尺度增加而逐渐增强。也有研究表明在“入渗率与坡度”变化关系中的确存

在临界坡度这一现象,但入渗率随坡度复杂的变化规律仍未有统一研究结论<sup>[18-21]</sup>。

目前土壤入渗研究多为模拟降雨条件下斑块或更小尺度的成果,针对坡面或更大尺度自然降雨下研究成果仍相对较少。虽然土壤入渗数学物理模型较为成熟,但其复杂参数率定工作给实际使用带来诸多不便。本文从坡面次降雨水文过程出发,探明影响次降雨土壤平均入渗率的多个因子,研究多个因子与平均入渗率间的定量关系,采用多元非线性回归法和BP神经网络模型构建多因素影响作用下土壤平均入渗率的直接估算模型,为坡面尺度降雨径流调控及水土保持等相关基础研究与生产实践提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 数据来源

数据来源于《全国水土流失动态监测与公告项目》珠江流域4省5个野外人工径流场2014年的观测数据,各径流场基本信息如表1所示。5个野外人工径流场均位于北纬 $25^\circ$ 附近,以红壤及其相近土壤类型为主,土壤物理性质较为接近。田间持水量和凋萎系数变化范围分别为 $24\% \sim 37\%$ 和 $14\% \sim 23\%$ ,砂粒( $0.05 \sim 1 \text{ mm}$ )、粗粉粒( $0.01 \sim 0.05 \text{ mm}$ )和细黏粒(小于 $0.001 \text{ mm}$ )含量约为 $12.7\% \sim 14.7\%$ 、 $10.8\% \sim 22.9\%$ 和 $28.6\% \sim 36.1\%$ 。上述5个径流场除标准径流小区( $20 \text{ m} \times 5 \text{ m}$ )外,还包含简化的非标准径流小区(坡度为 $5^\circ \sim 35^\circ$ ,坡长为 $10 \sim 100 \text{ m}$ ,坡宽均为 $5 \text{ m}$ )。经过筛选使用上述5个野外界径流场384组自然降雨观测资料用于分析,其中,大黑管坝49组、石坝163组、龙贵102组、南雄46组、五华24组。384组观测资料约6%降雨事件前期含水率达饱和状态(约为 $40\%$ ),约70%降雨事件前期含水率为田间持水量状态(约为 $25\%$ );因此研究结果考虑了土壤不同水分状态,具有一定普适性。

### 1.2 观测指标与方法

人工径流小区次降雨地表径流量通过集流池和分流池水位计算得到。土壤含水率采用传统干燥法( $(105 \pm 2)^\circ\text{C}$ )测定,采样深度为 $0 \sim 50 \text{ cm}$ ,其中, $0 \sim 20 \text{ cm}$ 和 $20 \sim 50 \text{ cm}$ 各采1个土壤样点,每20 d取样1次,降雨发生后加测2次含水率。地表植被

表 1 各野外径流场相关基本信息  
Tab. 1 Related basic information of each field catchment

序号	径流场名称	地理坐标	主要土壤类型	土地利用类型	植物种	树高/m	地表覆盖度/%	灌草高度/cm	年均降水量/mm	树龄/a
1	大黑管坝	101.84°E 24.76°N	紫色土、红壤等	经果林	桔子	1.5 ~ 2.0	15 ~ 52	20	900	6
2	石坝	104.58°E 25.07°N	红壤等	乔木林 经果林	圆柏、 云南松、木梨	0.5 ~ 3.0	15 ~ 85	15	923	3
3	龙贵	104.77°E 26.62°N	黄壤、 红壤等	水保林 经果林	滇柏、柳杉、 花椒树	0.2 ~ 1.3	12 ~ 97	8 ~ 25	1 182	2
4	南雄	114.36°E 25.11°N	红壤、 黄壤等	经果林 灌草地	桃树、银合欢、 夹竹桃	0.5 ~ 2.2	19 ~ 100	8 ~ 27	1 555	2
5	五华	115.62°E 24.09°N	红壤等	水保林 经果林 灌草地	马尾松、桃树、柚树、 木荷、大叶相思	1.0 ~ 2.5	20 ~ 95	20 ~ 30	1 519	4

注: 桔子 (*Citrus reticulata* Blanco)、圆柏 (*Sabina chinensis* (L.) Antoine)、云南松 (*Pinus yunnanensis* Franch.)、木梨 (*Pyrus xerophila* T. T. Yu)、滇柏 (*Cupressus duclouxiana* Hichel)、柳杉 (*Cryptomeria fortunei* Hooibr. ex Otto & Dietrich)、花椒树 (*Zanthoxylum bungeanum* Maxim.)、桃树 (*Amygdalus persica* L.)、银合欢 (*Leucaena leucocephala* (Lam.) de Wit)、夹竹桃 (*Nerium indicum* Mill.)、马尾松 (*Pinus massoniana* Lamb.)、柚树 (*Citrus maxima* (Burm.) Merr.)、木荷 (*Schima khasiana* Dyer)、大叶相思 (*Acacia auriculiformis* A. Cunn. ex Benth.)。

盖度参照《径流小区和小流域水土保持监测手册》推荐的照相法结合目估法测定, 30 ~ 45 d 测定 1 次。

为估算植被截留水量 ( $I_{nt}$ ), 按照次雨量等级挑选 20 场降雨事件, 基于水量平衡方程得到植被截留水量平均值为  $(5.5 \pm 0.9)\%$ 。  $I_{nt}$  具体计算公式为  $I_{nt} = \zeta R_{ain}$ , 其中  $\zeta$  为植被截留系数, 有

$$\zeta = \begin{cases} 4.6\% & (R_{ain} \leq 20 \text{ mm}) \\ 5.0\% & (20 \text{ mm} < R_{ain} \leq 50 \text{ mm}) \\ 5.6\% & (50 \text{ mm} < R_{ain} \leq 70 \text{ mm}) \\ 6.5\% & (R_{ain} > 70 \text{ mm}) \end{cases} \quad (1)$$

式中  $R_{ain}$  ——次降雨量, mm

降雨过程中土壤蒸发量、填凹水量相对较小忽略不计。因此, 次降雨土壤平均入渗率 ( $i_m$ ) 计算公式为

$$i_m = (R_{ain} - R_{un} - I_{nt}) / T \quad (2)$$

式中  $R_{un}$  ——次降雨坡面径流深, mm

$T$  ——次降雨历时, h

$I_{nt}$  ——次降雨植被截流水量, mm

## 2 结果与讨论

### 2.1 坡面次降雨水文过程

图 1 为一次降雨坡面水文过程示意图。图中  $E_{va}$  和  $I_{nt}$  分别为次降雨土壤蒸发量和土壤入渗量, mm;  $\theta$  为坡面坡度, ( $^\circ$ )。由水量平衡方程可以得到

$$I_{nt} = R_{ain} \cos\theta - R_{un} - I_{nt} - E_{va} - F_{cw} \quad (3)$$

式中  $F_{cw}$  ——次降雨填凹水量, mm

对于一次持续时间为  $T$  的降雨事件, 坡面土壤平均入渗率可表示为

$$i_m = (R_{ain} \cos\theta - R_{un} - I_{nt} - E_{va} - F_{cw}) / T \quad (4)$$

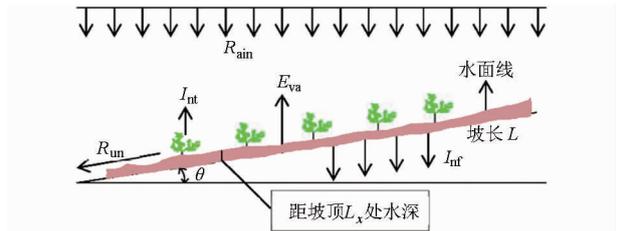


图 1 次降雨坡面水文过程示意图

Fig. 1 Slope hydrological process diagram for an individual rainfall event

距坡顶  $L_x$  处的水深可表示为

$$h = f(L_x) \quad (5)$$

降雨发生后某一时刻, 坡面径流量可沿坡长积分得到

$$V = \int h dx = \int f(L_x) dx \quad (x \in [0, L]) \quad (6)$$

所以持续时间为  $T$  的一次降雨事件径流量可对降雨历时积分得到

$$R_{un} = \int V dt = \int \left( \int f(L_x) dx \right) dt \quad (t \in [0, T]) \quad (7)$$

次降雨量可通过对降雨强度  $R_i$  积分得到, 即

$$R_{ain} = \int R_i dt \quad (t \in [0, T]) \quad (8)$$

植被截留量  $I_{nt}$  可表示为植被覆盖度 ( $V_c$ ) 的函数

$$I_{nt} = f(V_c) \quad (9)$$

土壤蒸发量和填凹水量相对较小而忽略不计。因此, 次降雨土壤平均入渗率可表示为

$$i_m = \left[ \int R_i \cos\theta dt - \int \left( \int f(L_x) dx \right) dt - f(V_c) \right] / T \quad (10)$$

由式 (10) 可以看出, 次降雨强度 ( $R_i$ )、坡度

( $\theta$ )、坡长( $L$ )、植被覆盖度( $V_c$ )均对土壤平均入渗率产生重要影响。此外,前期土壤含水率( $A_{sm}$ )、不同粒径土壤颗粒含量均是影响土壤入渗率的重要因素。本研究使用土壤颗粒分形维数( $D$ )反映不同粒径土壤颗粒含量及分布情况,其计算公式<sup>[1]</sup>为

$$D = 3 - \lg(w_i/w_0) / \lg(d_i/d_{max}) \quad (11)$$

式中  $d_i$ ——相邻粒级  $d_i$  与  $d_{i+1}$  间土壤颗粒平均直径, mm

$d_{max}$ ——最大粒级土壤颗粒直径, mm

$w_i$ ——小于  $d_i$  的累积质量, g

$w_0$ ——土壤样品总质量, g

## 2.2 土壤平均入渗率与各影响因子间定量关系

图2和表2分别为坡长( $L$ )、坡度( $S$ )、次降雨强度( $R_i$ )、次降雨量( $R_{ain}$ )、植被覆盖度( $V_c$ )、前期土壤含水率( $A_{sm}$ )和土壤颗粒分形维数( $D$ )7个因子与  $i_m$  间散点图与拟合方程结果。 $i_m$  随坡度( $S$ )增加呈先增后减变化趋势,可采用二次抛物线函数定量描述二者间动态变化关系,拟合方程达显著水平( $P=0.03$ )。对拟合方程求一阶导数可得到  $i_m$  最大值(26.8 mm/h)对应的临界坡度为  $16.8^\circ$ 。胡世雄等<sup>[22]</sup>在研究土壤侵蚀及坡度关系时指出的确存在临界坡度这一物理现象。当  $S$  较小时,  $S$  增加导致坡面水深降低<sup>[23]</sup>, 雨滴打击作用力增强促使土壤(非)毛管孔隙中部分静止水流变成入渗流动水而增加了土壤入渗率;此外,坡度增加后水流流速变大,其侵蚀携输沙能力增强,水流将表层土壤部分堵

塞(非)毛管空隙的土颗粒侵蚀搬运,增加了(非)毛管空隙连通性。随  $S$  的持续增加,水深大幅降低,静水压力急剧下降导致有压入渗重力势分项变小,土壤渗透性能继续降低。

$i_m$  随坡长( $L$ )和次降雨强度( $R_i$ )增加均呈线性递增变化趋势,拟合方程均达显著水平( $P \leq 0.04$ )、决定系数达到0.9以上。对于次降雨而言,填凹、下渗等水量随坡长增加而变大,最终转化为入渗水量;且坡长变大导致径流量降低<sup>[24-26]</sup>, 表现为入渗量随坡长增大呈增加趋势。水分入渗主要依靠土壤中非毛管孔隙和部分毛管孔隙,当雨强增大后坡面水深增加,有压入渗重力势分项变大导致入渗率增加<sup>[27]</sup>;此外,雨滴打击作用使部分静止毛管水变成流动下渗水<sup>[8]</sup>, 也导致土壤入渗量得到一定提升。刘战东等<sup>[28]</sup>研究发现麦田土壤入渗率(量)与雨强间均存在显著正相关关系;但也有研究表明入渗率随雨强呈先增后减变化规律<sup>[19-20]</sup>, 这是因为雨强增加到一定值时,雨滴打击动能过大而破坏表层土壤结构或形成结皮<sup>[29]</sup>, 导致入渗率急剧降低。

$i_m$  随次降雨量( $R_{ain}$ )增加呈指数函数递增趋势,二者拟合方程达极显著水平( $P \leq 0.01$ )。当  $R_{ain} \leq 50$  mm 时  $i_m$  递增速率相对较小,二者线性拟合方程斜率  $K_1 = 0.16$  (图2b); 当  $R_{ain} > 50$  mm 时,拟合方程斜率增加至  $K_2 = 0.53$ , 为前者的3.3倍之多。对于一般情况自然坡面次降雨事件而言,土壤含水率均未达到饱和状态,因此,次降雨量越大,土壤含水

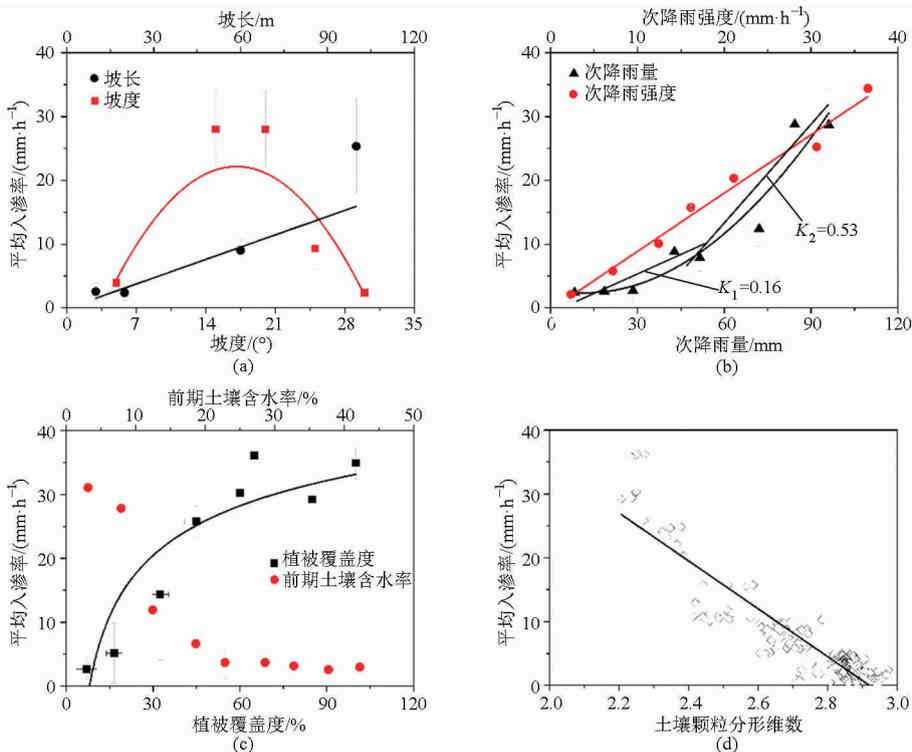


图2 土壤平均入渗率与各影响因子散点图

Fig. 2 Scatter diagrams between mean soil infiltration rate and its affecting factors

表 2 土壤平均入渗率拟合方程

Tab. 2 Fitted equations of mean soil infiltration rate

影响因子	拟合方程	决定系数 $R^2$	$P$	均方根误差/(mm·h <sup>-1</sup> )
坡度 $S$	$i_m = -0.158S^2 + 5.3S - 17.9$	0.894 4	0.03	3.703
坡长 $L$	$i_m = 0.253L - 2.19$	0.925 5	0.04	2.552
次降雨强度 $R_i$	$i_m = 0.914R_i - 0.29$	0.983 8	0.01	1.336
次降雨量 $R_{ain}$	$i_m = 1.79\exp(0.03R_{ain})$	0.998 1	0.01	0.585
地表植被覆盖度 $V_c$	$i_m = V_c / (0.22V_c - 0.75) - 8.12$	0.912 3	0.01	3.653
前期土壤含水率 $A_{sw}$	$i_m = A_{sw} / (0.17A_{sw} - 0.48)$	0.731 2	0.01	5.281
土壤颗粒分形维数 $D$	$i_m = -37.5D + 109.5$	0.851 1	0.01	2.249

率增幅越大,入渗水量越大,平均入渗率越大<sup>[11]</sup>。

$i_m$  随地表植被盖度 ( $V_c$ ) 和前期土壤含水率 ( $A_{sw}$ ) 分别呈递增和递减变化趋势。当  $V_c$  和  $A_{sw}$  较低时,  $i_m$  变化速率较大; 随  $V_c$  和  $A_{sw}$  逐渐增大,  $i_m$  变化速率逐渐放缓并趋于稳定。可采用双曲函数对 2 种关系进行拟合, 拟合方程均达到极显著水平 ( $P = 0.01$ )。基于拟合方程, 对  $V_c$  和  $A_{sw}$  取极限分别得到  $i_m$  极大、极小值分别为  $\lim_{V_c \rightarrow \infty} i_m = 36.9 \text{ mm/h}$ 、 $\lim_{A_{sw} \rightarrow \infty} i_m = 5.8 \text{ mm/h}$ 。当  $V_c$  较小时,  $V_c$  增加能显著削减雨滴对表土打击作用, 而明显保护表土结构和保持表土的高入渗性能; 当  $V_c$  持续增加, 这种正效应作用对土壤入渗过程影响效果明显减弱。但也有研究表明随降雨历时增加  $V_c$  对累积入渗量影响作用逐渐增大<sup>[7]</sup>。土壤含水率越大基质势梯度越小, 水分在土壤中运移速率越低, 土壤渗透性能越差<sup>[5-6]</sup>。因此, 随  $A_{sw}$  增加入渗率呈逐渐降低变化趋势, 但当土壤含水率达到饱和时, 入渗率大致与饱和导水率相当, 其过程曲线基本趋于一条直线。

土壤颗粒分形维数 ( $D$ ) 越大土壤细颗粒含量越高, 土壤渗透性能越差<sup>[2-3]</sup>。 $i_m$  随  $D$  增加呈线性递减变化规律, 二者拟合方程达到极显著水平 ( $P = 0.01$ ), 决定系数达到 0.85 以上。

### 2.3 土壤平均入渗率估算模型

#### 2.3.1 多元非线性回归模型

采用多元非线性回归法构建  $i_m$  与 7 个因子间多元非线性函数关系, 用于估算复杂条件下土壤入渗

特征。 $i_m$  与 7 个因子间定量关系采用表 2 研究结果, 7 个因子间并无直接相互作用关系, 因此, 7 个因子作用项间采用线性叠加原则,  $i_m$  多元非线性回归模型表达式即为

$$i_m = a_1 + a_2 S^2 + a_3 S + a_4 L + a_5 R_i + a_6 \exp(a_7 R_{ain}) + V_c / (a_8 V_c + a_9) + A_{sw} / (a_{10} A_{sw} + a_{11}) + a_{12} D \quad (12)$$

式中  $a_1 \sim a_{12}$ ——模型待定参数

使用 384 组观测数据的 2/3 率定模型待定参数, 剩余 1/3 对模型进行检验。为降低 7 个因子量纲及数量级差异引起的误差, 先对原始数据进行极值化处理到  $[0, 1]$  区间内<sup>[30]</sup>。采用 1stOpt 综合优化软件包“麦夸特法 + 通用全局算法”求解模型 (12) 中待定参数, 得到  $i_m$  多元非线性回归模型表达式为

$$i_m = 0.68 - 0.099S^2 + 0.11S + 0.21L - 0.53R_i - 3.6\exp(0.099R_{ain}) + V_c / (9.3V_c + 26.4) + A_{sw} / (78.8A_{sw} + 8.5) - 0.16D \quad (13)$$

模型 (13) 决定系数和显著水平分别为 0.963 5 和  $P < 0.01$ , 表明该回归模型具有统计学意义。由图 3a 可以看出模型 (13) 模拟值与观测值变化趋势基本一致, 针对不同次降雨复杂条件能够较为准确地估算  $i_m$ ; 模拟值与观测值拟合方程为

$$i_{m\_sim} = 1.003i_{m\_obs} + 0.2 \quad (R^2 = 0.992, P < 0.01) \quad (14)$$

式中  $i_{m\_sim}$ ——土壤平均入渗率模拟值, mm/h  
 $i_{m\_obs}$ ——土壤平均入渗率观测值, mm/h

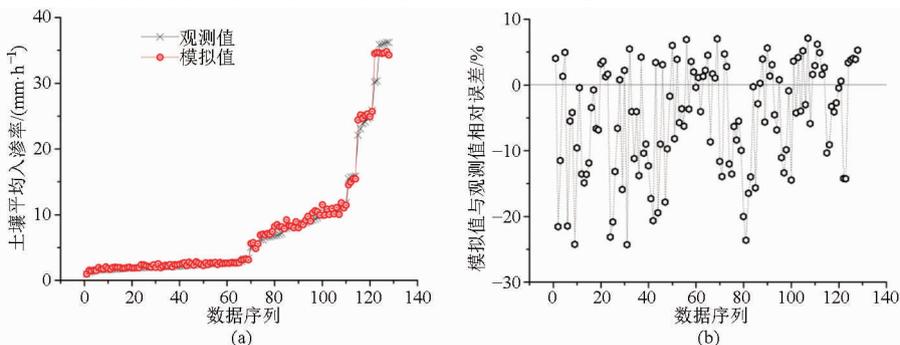


图 3 土壤平均入渗率多元非线性回归模型检验

Fig. 3 Test of mean soil infiltration rate using multivariate nonlinear model

这表明模型(13)是合适的。图3b为模型相对误差分布,128组数据点相对误差绝对值均未超过30%,约72%数据点的相对误差分布在 $\pm 10\%$ 内,说明模型(13)是实际可行的。

### 2.3.2 BP神经网络模型

BP神经网络具有较强的非线性映射能力,一般认为3层BP神经网络能够映射或逼近绝大多数有理函数<sup>[31-33]</sup>。以影响土壤入渗率的7个因子为输入参数,构建一个3层BP神经网络 $i_m$ 预测模型。为确定BP模型网络参数,采用3种训练算法(共轭梯度法、带动量项梯度下降法和Levenberg-Marquardt法)与13种神经元节点数(3,4,...,15),组合形成39种方案。基于各方案训练阶段网络平均标准偏差( $M_{se}$ )、迭代次数( $L_{opt}$ )、模拟值与观测值间纳什系数( $N_{se}$ )、皮尔逊相关系数( $R$ )、网络训练耗时( $T_{ime}$ )5个指标,采用灰色关联度分析确定BP神经网络最优参数。

上述39种BP神经网络模型方案隐含层和输出层传递函数分别采用双曲正切Sigmoid型函数和线性函数,系统目标误差和最大迭代次数为 $10^{-4}$ 和 $10^4$ 。使用与回归模型(12)参数率定时相同的256组观测数据对BP神经网络进行训练,同样采用极值化方法将原始数据处理到 $[0,1]$ 区间。

图4为39种方案与最理想方案间灰色关联度系数(纵坐标轴中前段数字表示神经网络模型方案序号,中间英文符号表示网络训练算法,TC、TG、TL分别表示共轭梯度法、带动量项梯度下降法、Levenberg-Marquardt算法,末尾数字表示隐含层神经元节点数),灰色关联度系数越大表明该方案越优。方案“39-TL-15”灰色关联度系数最大,为0.9894,表明该方案为最优方案,该方案网络训练算法为Levenberg-Marquardt算法,隐含层神经元节点数为15。

使用“39-TL-15”方案,采用其余128组检验数据对BP神经网络 $i_m$ 预测模型进行检验,结果如图5所示,模拟值与观测值十分吻合,二者拟合方程为

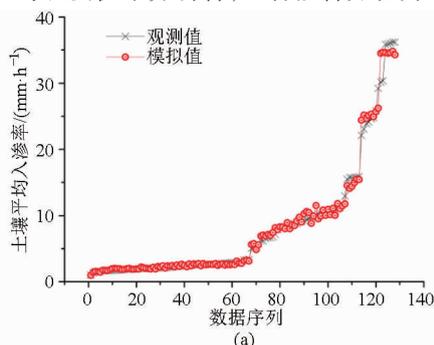


图5 次降雨平均入渗率BP神经网络预测模型检验

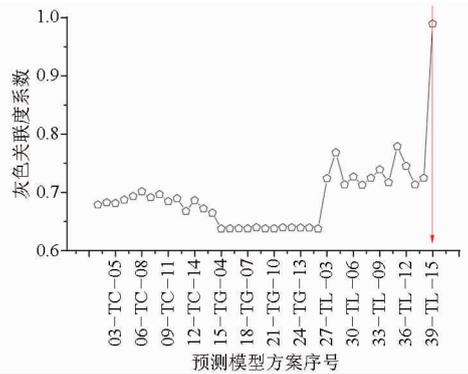


图4 土壤平均入渗率BP神经网络预测模型39种方案与最理想方案间灰色关联度系数

Fig.4 Grey correlation coefficient between 39 schemes of BP neural network prediction model for mean soil infiltration and the best ideal scheme

$$i_{m\_sim} = 0.996i_{m\_obs} + 0.091 \quad (R^2 = 0.998, P < 0.01) \quad (15)$$

这表明BP神经网络 $i_m$ 预测模型是合适的。128组检验数据模拟值与观测值相对误差在 $\pm 20\%$ 内,且约81%数据点相对误差绝对值不超过10%,模拟精度较高,具有实际可行性。

### 2.4 讨论

基于次降雨坡面水文过程探明了影响土壤平均入渗率的关键影响因子,研究了各因子与平均入渗率间的定量关系,采用多元非线性回归分析法与BP神经网络模型构建了次降雨土壤平均入渗率计算模型,可为其他区域复杂条件下降雨入渗预测预报模型建立提供一种思路与方法。平均入渗率多元非线性回归模型精度理想,相对误差绝对值控制在30%以内,约72%数据点相对误差不超过10%;而BP神经网络模型精度更优,相对误差分布在 $\pm 20\%$ 内,且81%数据点相对误差不超过10%。岳海晶等<sup>[34]</sup>采用双环法获取了大田土壤入渗参数,建立了Kostiakov三参数模型参数回归方程;模型效果理想,相对误差控制在15%内。但该模型为点尺度研究成果,未涉及影响入渗率的其他因素。刘战东等<sup>[28]</sup>采用非线性回归法建立了以冠层盖度、雨强及

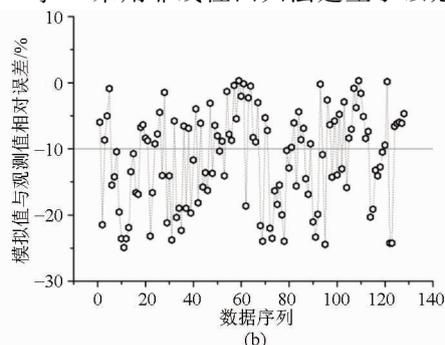


Fig.5 Test for BP neural network prediction model of mean soil infiltration rate under individual rainfall events

初始含水率为自变量的麦田降雨蓄积系数计算模型,但未对模型进行实例验证。刘继龙等<sup>[35]</sup>基于联合多重分形法建立了田间点尺度土壤稳定入渗率及 30 min 累积入渗量传递函数,也未考虑降雨、植被、坡度等对入渗过程的影响,且 30 min 累积入渗量传递函数预测误差较大。本研究所建立的坡面径流小区尺度平均入渗率估算模型充分考虑了降雨、土壤、植被、地形等多个因素的影响作用,精度良好,可为坡面尺度降雨径流调控、水土保持等基础研究与生产实践提供参考。

### 3 结论

(1) 土壤平均入渗率随坡度呈先增后减变化趋势,坡度为  $16.8^\circ$  时平均入渗率达到最大值为  $26.8 \text{ mm/h}$ ; 随坡长及次降雨强度均呈正相关线性递增趋势; 随次降雨量呈指数函数递增趋势; 随地表植被覆盖度和前期土壤含水率增加分别呈逐渐递增

和递减变化趋势,均可采用双曲函数对其关系进行定量描述; 随土壤颗粒分形维数增加呈显著线性递减变化趋势。

(2) 以坡长、坡度、次降雨强度、次降雨量、地表植被覆盖度、前期土壤含水率、土壤颗粒分形维数 7 个因子为自变量,基于 7 个因子与土壤平均入渗率间定量关系,采用多元非线性回归法构建了平均入渗率多元非线性回归估算模型。模型决定系数为  $0.9635 (P < 0.01)$ ,所有验证数据相对误差均分布在  $\pm 30\%$  范围内,约 72% 相对误差不超过 10%。

(3) 以上述 7 个因子为输入参数,构建了一个 3 层 BP 神经网络  $i_m$  预测模型。基于灰色关联度分析法确定了模型最优训练算法为 Levenberg - Marquardt 算法,隐含层神经元节点最优个数为 15。模型决定系数为  $0.998 (P < 0.01)$ ,约 81% 验证数据相对误差不超过 10%,且全部验证数据相对误差分布在  $\pm 20\%$  范围内。

### 参 考 文 献

- 1 黄冠华, 詹卫华. 土壤颗粒的分形特征及其应用[J]. 土壤学报, 2002, 39(4): 490 - 497.  
HUANG Guanhua, ZHAN Weihua. Fractal property of soil particle size distribution and its application[J]. Acta Pedologica Sinica, 2002, 39(4): 490 - 497. (in Chinese)
- 2 郭中领, 符素华, 王向亮, 等. 北京地区表层土壤分形特征研究[J]. 水土保持通报, 2010, 30(2): 154 - 158.  
GUO Zhongling, FU Suhua, WANG Xiangliang, et al. Fractal dimension characteristic of soil particle-size distribution in Beijing region[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2010, 30(2): 154 - 158. (in Chinese)
- 3 徐萍, 刘霞, 张光灿, 等. 鲁中山区小流域不同土地利用类型的土壤分形及水分入渗特征[J]. 中国水土保持科学, 2013, 11(5): 89 - 95.  
XU Ping, LIU Xia, ZHANG Guangcan, et al. Fractal features and infiltration characteristics of soil of different land uses in a small watershed of rocky mountainous area in the middle of Shandong Province[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2013, 11(5): 89 - 95. (in Chinese)
- 4 吕刚, 吴祥云. 土壤入渗特性影响因素研究综述[J]. 中国农学通报, 2008, 24(7): 494 - 499.  
LÜ Gang, WU Xiangyun. Review on influential factors of soil infiltration characteristics[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2008, 24(7): 494 - 499. (in Chinese)
- 5 沈紫燕, 王辉, 平李娜, 等. 前期土壤含水量对粘性红壤产流产沙及溶质运移的影响[J]. 水土保持学报, 2014, 28(1): 58 - 62.  
SHEN Ziyang, WANG Hui, PING Li'na, et al. Effect of antecedent soil moisture on characteristics of runoff, sediment loss and solute transport on red soil[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2014, 28(1): 58 - 62. (in Chinese)
- 6 张向炎, 史学正, 于东升, 等. 前期土壤含水量对红壤坡面产流产沙特性的影响[J]. 水科学进展, 2010, 21(1): 23 - 29.  
ZHANG Xiangyan, SHI Xuezheng, YU Dongsheng, et al. Effects of antecedent soil moisture on hillslope runoff-generation and soil erosion over red soil-mantled landscapes[J]. Advances in Water Science, 2010, 21(1): 23 - 29. (in Chinese)
- 7 石生新. 高强度人工降雨条件下影响入渗速率因素的试验研究[J]. 水土保持通报, 1992, 12(2): 49 - 54.  
SHI Shengxin. A testing study of factors affecting infiltration rate under artificial rainfall with high intensity[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 1992, 12(2): 49 - 54. (in Chinese)
- 8 吴发启, 赵西宁, 余雕. 坡耕地土壤水分入渗影响因素分析[J]. 水土保持通报, 2003, 23(1): 16 - 18, 78.  
WU Faqi, ZHAO Xining, SHE Diao. Analysis on affecting factors of soil infiltration in slope farmland[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2003, 23(1): 16 - 18, 78. (in Chinese)
- 9 MORIN J, VAN WINKEL J. The effect of raindrop impact and sheet erosion on infiltration rate and crust formation[J]. Soil Science Society of America Journal, 1996, 60(4): 1223 - 1227.
- 10 杨永辉, 赵世伟, 雷廷武, 等. 耕作对土壤入渗性能的影响[J]. 生态学报, 2006, 26(5): 1624 - 1630.  
YANG Yonghui, ZHAO Shiwei, LEI Tingwu, et al. Tillage on soil infiltration under simulated rainfall conditions[J]. Acta Ecologica Sinica, 2006, 26(5): 1624 - 1630. (in Chinese)
- 11 张常亮, 李萍, 李同录, 等. 黄土中降雨入渗规律的现场监测研究[J]. 水利学报, 2014, 45(6): 728 - 734.  
ZHANG Changliang, LI Ping, LI Tonglu, et al. In-situ observation on rainfall infiltration in loess[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2014, 45(6): 728 - 734. (in Chinese)
- 12 丛月, 张洪江, 程金花, 等. 华北土石山区草本植被覆盖度对降雨溅蚀的影响[J]. 水土保持学报, 2013, 27(5): 59 - 62.

- CONG Yue, ZHANG Hongjiang, CHENG Jinhua, et al. Effects of herbaceous plant coverage rate on rainfall splash in rock mountain area of northern China[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2013, 27(5): 59–62. (in Chinese)
- 13 GREENE R S B, HAIRSINE P B. Elementary processes of soil-water interaction and thresholds in soil surface dynamics: a review [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2004, 29(9): 1077–1091.
- 14 于国强, 李占斌, 李鹏, 等. 不同植被类型的坡面径流侵蚀产沙试验研究[J]. *水科学进展*, 2010, 21(5): 593–599.  
YU Guoqiang, LI Zhanbin, LI Peng, et al. Effects of vegetation types on hillslope runoff-erosion and sediment yield [J]. *Advances in Water Science*, 2010, 21(5): 593–599. (in Chinese)
- 15 LLORENS P, DOMINGO F. Rainfall partitioning by vegetation under Mediterranean conditions: a review of studies in Europe [J]. *Journal of Hydrology*, 2007, 335(1): 37–54.
- 16 FOX D M, BRYAN R B, PRICE A G. The influence of slope angle on final infiltration rate for interrill conditions [J]. *Geoderma*, 1997, 80(1–2): 181–194.
- 17 GOVERS G. A field study on topographical and topsoil effects on runoff generation [J]. *CATENA*, 1991, 18(1): 91–111.
- 18 陈正维, 刘兴年, 朱波. 基于 SCS-CN 模型的紫色土坡地径流预测 [J]. *农业工程学报*, 2014, 30(7): 72–81.  
CHEN Zhengwei, LIU Xingnian, ZHU Bo. Runoff estimation in hillslope cropland of purple soil based on SCS-CN model [J]. *Transactions of the CSAE*, 2014, 30(7): 72–81. (in Chinese)
- 19 傅斌, 王玉宽, 朱波, 等. 紫色土坡耕地降雨入渗试验研究 [J]. *农业工程学报*, 2008, 24(7): 39–43.  
FU Bin, WANG Yukuan, ZHU Bo, et al. Experimental study on rainfall infiltration in sloping farmland of purple soil [J]. *Transactions of the CSAE*, 2008, 24(7): 39–43. (in Chinese)
- 20 黄俊, 吴普特, 赵西宁. 坡面生物调控措施对土壤水分入渗的影响 [J]. *农业工程学报*, 2010, 26(10): 29–37.  
HUANG Jun, WU Pute, ZHAO Xining. Impact of slope biological regulated measures on soil water infiltration [J]. *Transactions of the CSAE*, 2010, 26(10): 29–37. (in Chinese)
- 21 王全九, 穆天亮, 王辉. 坡度对黄土坡面径流溶质迁移特征的影响 [J]. *干旱地区农业研究*, 2009, 27(4): 176–179.  
WANG Quanjiu, MU Tianliang, WANG Hui. The effects of slope on solute concentration in runoff on the loess slope [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2009, 27(4): 176–179. (in Chinese)
- 22 胡世雄, 靳长兴. 坡面土壤侵蚀临界坡度问题的理论与实验研究 [J]. *地理学报*, 1999, 54(4): 61–70.  
HU Shixiong, JIN Changxing. Theoretical analysis and experimental study on the critical slope of erosion [J]. *Acta Geographica Sinica*, 1999, 54(4): 61–70. (in Chinese)
- 23 刘青泉, 陈力, 李家春. 坡度对坡面土壤侵蚀的影响分析 [J]. *应用数学和力学*, 2001, 22(5): 449–457.  
LIU Qingquan, CHEN Li, LI Jiachun. Influences of slope gradient on soil erosion [J]. *Applied Mathematics and Mechanics*, 2001, 22(5): 449–457. (in Chinese)
- 24 DE GIESEN N V, STOMPH T J, AJAYI A E. Scale effects in hortonian surface runoff on agricultural slopes in west Africa: field data and models [J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2011, 142(1–2): 95–101.
- 25 POESEN J W, TORRI D, BUNTE K. Effects of rock fragments on soil erosion by water at different spatial scales: a review [J]. *Catena*, 1994, 23(1–2): 141–166.
- 26 SMETS T, POESEN J, BOCHET E. Impact of plot length on the effectiveness of different soil-surface covers in reducing runoff and soil loss by water [J]. *Progress in Physical Geography*, 2008, 32(6): 654–677.
- 27 刘汗, 雷廷武, 赵军. 土壤初始含水率和降雨强度对黏黄土入渗性能的影响 [J]. *中国水土保持科学*, 2009, 7(2): 1–6.  
LIU Han, LEI Tingwu, ZHAO Jun. Effects of initial soil water content and rainfall intensity on loess infiltration capacity [J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2009, 7(2): 1–6. (in Chinese)
- 28 刘战东, 刘祖贵, 秦安振, 等. 麦田降雨入渗特征及其计算模型 [J]. *水土保持学报*, 2014, 28(3): 7–13.  
LIU Zhandong, LIU Zugui, QIN Anzhen, et al. Rainfall infiltration characteristics and regression models in winter wheat field [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2014, 28(3): 7–13. (in Chinese)
- 29 王辉, 平李娜, 沈紫燕, 等. 雨滴动能对红壤地表溶质迁移特性影响试验 [J]. *农业机械学报*, 2014, 45(12): 165–170, 223.  
WANG Hui, PING Li'na, SHEN Ziyan, et al. Effects of raindrop energy on runoff, chemicals and sediment transport in red soil slope [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2014, 45(12): 165–170, 223. (in Chinese)
- 30 王吉权, 王福林, 邱立春. 基于 BP 神经网络的农机总动力预测 [J]. *农业机械学报*, 2011, 42(12): 121–126.  
WANG Jiquan, WANG Fulin, QIU Lichun. Prediction of total power in agriculture machinery based on BP neural network [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2011, 42(12): 121–126. (in Chinese)
- 31 ABDI H, VALENTIN D, EDELMAN B, et al. A Widrow-Hoff learning rule for a generalization of the linear auto-associator [J]. *Journal of Mathematical Psychology*, 1996, 40(2): 175–182.
- 32 JU Q, YU Z, HAO Z, et al. Division-based rainfall-runoff simulations with BP neural networks and Xin'anjiang model [J]. *Neurocomputing*, 2009, 72(13): 2873–2883.
- 33 刘雪, 李亚妹, 刘娇, 等. 基于 BP 神经网络的鲜鸡蛋货架期预测模型 [J]. *农业机械学报*, 2015, 46(10): 329–334.  
LIU Xue, LI Yamei, LIU Jiao, et al. BP neural network based prediction model for fresh egg's shelf life [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46(10): 329–334. (in Chinese)
- 34 岳海晶, 樊贵盛. 考虑土壤结构变形的备耕地入渗参数线性预报模型 [J]. *太原理工大学学报*, 2015, 46(5): 616–622.  
YUE Haijing, FAN Guisheng. The linear prediction model of soil infiltration parameters for preparation land considering of deformation of soil structure [J]. *Journal of Taiyuan University of Technology*, 2015, 46(5): 616–622. (in Chinese)
- 35 刘继龙, 马孝义, 张振华. 土壤入渗特性的空间变异性及土壤转换函数 [J]. *水科学进展*, 2010, 21(2): 214–221.  
LIU Jilong, MA Xiaoyi, ZHANG Zhenhua. Spatial variability of soil infiltration characteristics and its pedo-transfer functions [J]. *Advances in Water Science*, 2010, 21(2): 214–221. (in Chinese)