

# 不同流态区盘卷软管阻力损失研究

李 振<sup>1,2</sup>, 朱德兰<sup>2,3</sup>, 巩兴晖<sup>2,3</sup>, 王昌伟<sup>2,3</sup>, 陈 昕<sup>1,2</sup>

(1. 西北农林科技大学水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 2. 西北农林科技大学中国旱区节水农业研究院, 陕西 杨凌 712100; 3. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100)

**摘 要:** 针对不同水流流态下的卷盘式喷灌机盘卷软管阻力损失计算问题, 构建了软管阻力损失试验装置。在一系列的管道流速条件下, 对卷盘式喷灌机(卷盘轴径为 1.28 m)几种常用内径(27.2、34.0、42.6 和 53.6 mm)的软管进行了盘卷软管阻力损失试验。结果表明: 软管管内流速相同时, 盘卷软管阻力损失均大于直铺软管的阻力损失; 随着管内流速的增加, 两者之间的阻力损失差值增大; 当雷诺数介于 29 630 和 159 208 之间, 水流形态属于湍流 I 区和湍流 II 区时, 盘卷软管阻力损失与管道内水流流态有关, 并得到了软管阻力损失系数和软管阻力损失计算公式, 为卷盘式喷灌机进水口压力计算提供参考。

**关键词:** 流态; 盘卷软管; 阻力损失

中图分类号: O351; TV134 文献标识码: A

## Research on Pressure Losses from Hose Coiling of Different Flow Patterns

LI Zhen<sup>1,2</sup>, ZHU De-lan<sup>2,3</sup>, GONG Xing-hui<sup>2,3</sup>, WANG Chang-wei<sup>2,3</sup>, CHEN Xin<sup>1,2</sup>

(1. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling 712100, Shaanxi Province, China; 2. Institute of Water Saving Agriculture in Arid Areas of China, Northwest A&F University, Yangling 712100, Shaanxi Province, China; 3. College of Water Resources and Architectural Engineering of China, Northwest A&F University, Yangling 712100, Shaanxi Province, China)

**Abstract:** In order to analyze the pressure loss from hose coiling on hard-hose travelers, a pressure loss test platform was built. Hose on hard-hose travelers (reel diameter is 1.28m) with different inner diameters (27.2, 34.0, 42.6 and 53.6 mm) were tested under a series of water flow velocities. The results showed that the pressure loss of coiled hose was greater than that of the straight hose when the water flow velocities of hose were the same; the difference of pressure loss between coiled hose and straight hose increased with the increase of flow velocities in the pipe; when Reynolds numbers were in the range of 29630 to 159208, in which the flow patterns were in the turbulent region I and turbulent region II, there was a relationship between pressure loss of coiled hose and flow patterns. Simultaneously, the formulas for hose pressure loss coefficient and pressure loss were presented, which would provide a reference for calculating water inlet pressure of hard-hose travelers.

**Key words:** flow pattern; coiling hose; pressure losses

卷盘式喷灌机机械化程度高, 具有操作管理简易, 适应性强, 灌水效果好等优点, 在我国使用推广发展迅速。卷盘式喷灌机工作时, 水流依次通过水涡轮、卷盘、软管和喷头, 水流通过这些组件时会产生阻力损失。其中主要阻力损失由软管造

成<sup>[1]</sup>。

国内外学者对卷盘式喷灌机盘卷软管阻力损失进行了大量研究。汤玲迪等<sup>[2]</sup>通过分析国外学者所建立的阻力系数公式的构造, 利用 CFD 对盘卷软管阻力损失进行模拟研究, 并对

收稿日期: 2015-01-27

基金项目: 水利部“948”项目(201436); 国家工程技术研究中心再建项目(2011FU125Z27-1)。

作者简介: 李 振(1989-), 男, 硕士研究生, 从事节水灌溉新技术及水土保持工程方面的研究。E-mail: lzby1989@sina.com。

通讯作者: 朱德兰(1969-), 女, 教授, 博士生导师, 从事节水灌溉技术方面的研究。E-mail: dlzhu@126.com。

模拟数据进行统计分析,建立了一种物理意义明确的卷盘喷灌机阻力系数计算公式,但该研究缺乏相关试验验证。张敏等<sup>[3,4]</sup>对几种不同曲率半径的盘卷软管进行了阻力损失试验,推导出了一定流量范围内,特定管径和曲率半径下的软管阻力损失公式,并通过CFD模拟得到了盘卷软管可能的最佳弯曲参数,但试验软管管径和管内流量均较小,分别为32.0 mm和6 m<sup>3</sup>。Oakes等<sup>[1]</sup>对水力驱动机为水轮机和水压缸的两种不同型号的卷盘式喷灌机进行了能量利用效率的试验研究,得到卷盘式喷灌机的能量利用效率在50%~70%,其中,主要的能量损失是由软管造成的,但没有给出计算盘卷软管能量损失的计算方法。Rochester等<sup>[5]</sup>对卷盘直径为0.91 m和软管内径为41.1 mm的卷盘式喷灌机进行了软管全部盘卷和全部直铺的阻力损失试验,给出了单位长度软管的管径与曲率半径的最佳比值为0.09,同样没有得到计算盘卷软管阻力损失的计算方法。White<sup>[6]</sup>对雷诺数介于20~41 000,管道半径与盘卷半径之比为1/15.15、1/50、1/112和1/2 050的管道进行了阻力损失试验,发现盘卷管道保持层流的雷诺数要比直铺管道更高,最大达到7 590,并得到湍流情况下盘卷管道的阻力系数计算公式,但试验管径最大仅为10.3 mm。Ito<sup>[7]</sup>和Srinivasan<sup>[8]</sup>通过试验分别对多种曲率的盘卷管道进行了阻力损失研究,用试验数据建立了预测临界雷诺数的公式,对盘卷软管水流形态为湍流时的阻力损失情形仍待研究。

本文对卷盘式喷灌机常用管径软管进行盘卷阻力损失试验研究,将盘卷软管阻力损失与直铺软管阻力损失进行对比分析,并对盘卷软管水流运动形态进行流态分区,推导不同水流运动形态下,卷盘式喷灌机盘卷软管常用管径和喷灌常用流量范围内,具有一定适用性的盘卷软管阻力损失计算公式。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验设计

试验在西北农林科技大学中国旱区节水农业研究院灌溉水力学大厅进行。为开展不同流态区盘卷软管阻力损失研究,构建了如图1所示的软管阻力损失试验装置。试验卷盘直径为1.28 m;软管采用中密度PE管,软管外径、相应内径及盘卷软管曲率半径详细参数见表1;水泵选用单级单吸离心泵,扬程为40 m,最大流量60 m<sup>3</sup>/h,配用功率为7.5 kW;电磁流量计选用SLDG-Y50LOX-A型电磁流量计,量程0.71~70.68 m<sup>3</sup>/h;压差计选用浙江大学水利实验室研制的新一代压力智能数显仪,最大量程4 m;水温计量程0~50℃,精度0.1℃。

表1 软管尺寸参数 mm

参数	1	2	3	4
软管外径	32	40	50	63
软管内径	27.2	34.0	42.6	53.6
曲率半径	656	660	665	672

试验设定管道铺设方式、管径和管道流速3个因素。其中管道铺设方式包含直铺、盘卷2个水平,软管内径包含27.2、34.0、42.6和53.6 mm等4个因素,管内水流速度包含1.0、

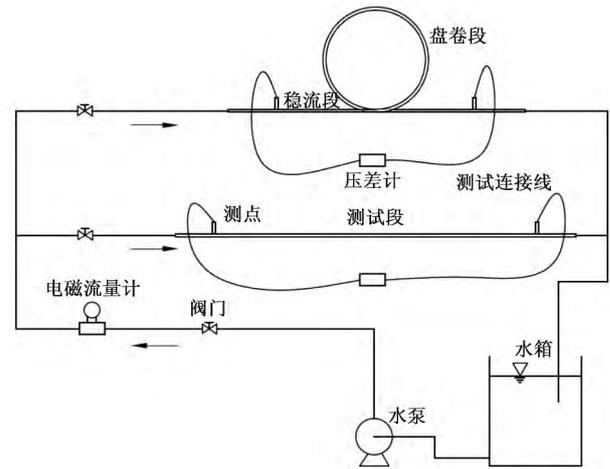


图1 软管阻力损失试验装置

1.3、1.5、1.8、2.0、2.3、2.5、2.8和3.0 m/s等9个因素。试验共72个处理,3个重复,216组。试验水温经测定为20℃。

盘卷软管水流运动复杂,流速分布不均匀,且盘卷软管对流态的影响向上下游直铺管段扩散一段距离。为提高试验数据的精确性,本试验盘卷软管测试段由上游稳流段、盘卷段及下游稳流段3部分组成,上下游稳流段长度均为40倍的软管内径<sup>[9,10]</sup>。盘卷软管上下游稳流段的阻力损失由直铺软管测试段阻力损失推算得出,盘卷段的阻力损失等于盘卷软管测试段总的阻力损失减去上下游稳流段的阻力损失。这种计算方法将由于盘卷软管的加入对直铺软管阻力损失的增加量全部计算在内,能够更好地反映实际情况。

### 1.2 试验方法

试验时,打开干管阀门和两支管之一阀门,分别测定直铺软管测试段阻力损失、盘卷软管测试段阻力损失,测试段阻力损失用压差计测量。

试验过程中,逐次调整电磁流量计的流量示数从管内流速 $v$ 为1.0 m/s所对应流量上升到管内流速 $v$ 为3.0 m/s所对应的流量,待水流稳定后,读取压差计示数,重复3次,取平均值计算阻力损失。9个速度因素依次进行,水温测定同时进行,72个试验处理逐步进行。

## 2 结果与分析

### 2.1 直铺软管和盘卷软管阻力损失比较

卷盘式喷灌机工作时,水流通过盘卷软管,管内水流运动复杂<sup>[11,12]</sup>,产生与相同长度直铺管道不同的阻力损失。

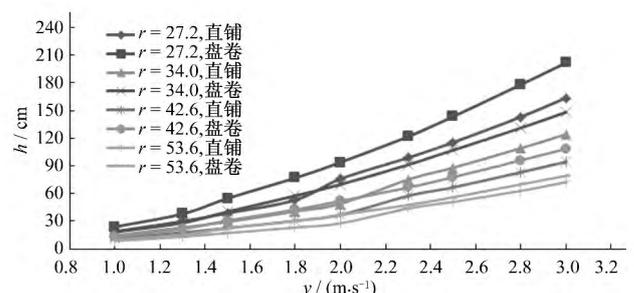


图2 不同管径软管阻力损失  $h-v$  关系

图 2 给出了不同管径单圈盘卷软管及相应长度直铺软管的阻力损失与管内流速的关系。从图 2 可以看出,当软管布置方式不同时,一方面,在软管内径相同的情况下,盘卷软管阻力损失均大于管内流速相同时的直铺软管阻力损失,并且这种因软管布置方式造成的阻力损失差随管内流速的增加而增加,软管内径  $r=27.2, 34.0, 42.6$  和  $53.6$  mm,管内流速  $v=1.0$  m/s 时阻力损失差为 5.0、4.0、2.0 和 1.0 cm,管内流速  $v=3.0$  m/s 时阻力损失差为 38.0、24.0、14.0 和 7.0 cm,前者为后者的 13.16%、16.67%、14.29% 和 14.29%;另一方面,在管内流速相同的情况下,盘卷软管阻力损失均大于软管内径相同时的直铺软管阻力损失,并且这种因软管布置方式造成的阻力损失差随软管内径的增加而减小,管内流速  $v=3.0$  m/s 时,  $r=34.0, 42.6$  和  $53.6$  mm 时阻力损失差为 24.0、14.0 和 7.0 cm,软管内径  $r=27.2$  mm 时阻力损失差为 38.0 cm,前者为后者的 63.16%、36.84% 和 18.42%。当软管布置方式相同时,盘卷软管阻力损失规律与直铺软管阻力损失规律相类似,阻力损失均随软管内径的增大而减小,随管内流速的增大而增大。

### 2.2 不同流态区盘卷软管阻力损失

盘卷软管阻力损失计算公式表达式如下:

$$h_c = f_c \frac{l}{d} \frac{v^2}{2g} \quad (1)$$

式中:  $h_c$  为单圈盘卷软管阻力损失, m;  $f_c$  为盘卷软管阻力系数;  $l$  为软管长度, m;  $d$  为软管内径, m;  $v$  为管内水流流速, m/s;  $g$  为重力加速度, m/s<sup>2</sup>。

经研究证明盘卷管道阻力损失系数  $f_c$  与 Dean 数有关<sup>[7,8]</sup>, Dean 数为 Dean<sup>[13]</sup> 在 1927 年提出的无量纲参数,部分学者对 Dean 数进行了发展,形成了 Dean 数的另一种形式,即:

$$De = Re \left( \frac{r}{R} \right)^{0.5} \quad (2)$$

盘卷软管阻力损失计算的过程就是推求盘卷软管阻力系数的过程。根据直铺软管实测数据得到的阻力系数  $\lambda$  及雷诺数  $Re$  查莫迪图,查得软管的绝对粗糙度  $\Delta$  为 0.035 mm。管道内径与绝对粗糙度的比值为相对光滑度,图 3 给出了不同相对光滑度条件下,盘卷软管阻力系数  $f_c$  与  $Re$  的关系曲线。盘卷软管阻力损失试验雷诺数范围介于 26 931~159 208。

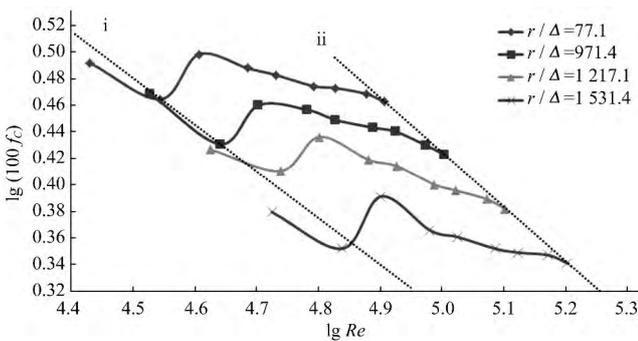


图 3 不同管径盘卷软管  $Re \sim f_c$  关系

从图 3 可以看出不同管径盘卷软管  $Re \sim f_c$  关系曲线具有相同的变化趋势,均为由沿横坐标方向向下倾斜转变为沿纵坐标方向向上倾斜,最后转变为沿横坐标方向向下倾斜。根据关

系曲线变化趋势本试验将湍流分区分为湍流 I 区和湍流 II 区,直线 i 及左下方区域为湍流 I 区,将直线 i 和直线 ii 之间范围定义为湍流 II 区。

#### 2.2.1 湍流 I 区

盘卷软管湍流 I 区对应图 3 中的直线 i 及其左下方区域,此时绝对粗糙度  $\Delta$  与黏性底层厚度  $\delta_0$  之比,即  $0.16 \leq \Delta/\delta_0 \leq 0.24, 29\ 630 \leq Re \leq 68\ 990, 27.2 \leq r \leq 53.6$  mm,对湍流 I 区数据进行处理,得到如图 4 所示的湍流 I 区盘卷软管  $f_c$  与  $Re(r/R)^{0.5}$  的关系。数据拟合公式为:

$$f_c = 2 \times 10^{-11} Re^2(r/R) - 10^{-6} Re(r/R)^{0.5} + 0.036\ 4 \quad (R^2 = 0.978) \quad (3)$$

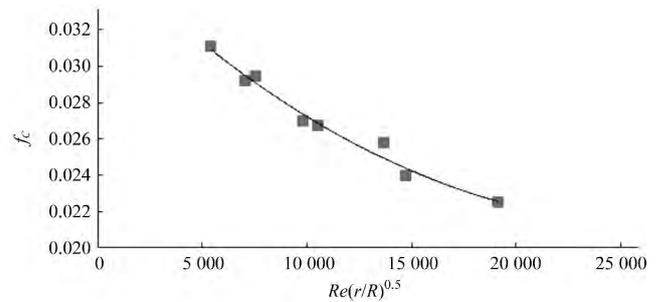


图 4 湍流 I 区盘卷软管  $f_c \sim Re(r/R)^{0.5}$  关系

采用式(3)计算得到的阻力系数与试验实测阻力系数结果基本相符,最大相对偏差不超过 5%,从而肯定可用式(3)对盘卷软管湍流 I 区阻力损失系数进行计算。盘卷软管湍流 I 区  $f_c$  与 Dean 数有关,而与  $\Delta$  及  $\delta_0$  无关。盘卷软管管内水流在软管外侧形成漩涡,形成漩涡损失,并且由于离心力的作用水流形成二次流,这两者是造成盘卷软管阻力损失的重要原因。

#### 2.2.2 湍流 II 区

盘卷软管湍流 II 区对应图 3 中的直线 i 与直线 ii 之间区域,此时  $0.24 \leq \Delta/\delta_0 \leq 0.55, 40\ 396 \leq Re \leq 159\ 208, 27.2 \leq r \leq 53.6$  mm,对湍流 II 区数据进行处理,得到如图 5 所示的湍流 II 区盘卷软管  $f_c$  与  $Re(r/R)^{0.5}$  的关系。数据拟合公式为:

$$f_c = 6 \times 10^{-12} Re^2(r/R) - 6 \times 10^{-7} Re(r/R)^{0.5} + 0.036\ 1 \quad (R^2 = 0.944\ 3) \quad (4)$$

采用式(4)计算得到的阻力系数与试验实测阻力系数结果基本相符,最大相对偏差不超过 3%,从而肯定可用式(4)对盘卷软管湍流 II 区阻力损失系数进行计算。

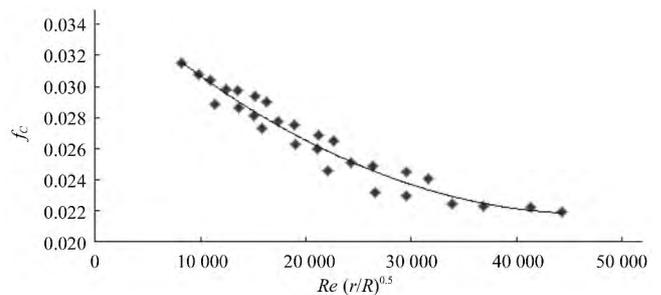


图 5 湍流 II 区盘卷软管  $f_c \sim Re(r/R)^{0.5}$  关系

从图 3 可以看出盘卷软管管内水流流态从湍流 I 区向湍流 II 区转变时,阻力系数有突然增大再逐渐减小的过程,并且

水流流态进入湍流Ⅱ区后阻力系数减小的趋势变的平稳。阻力系数的突然变化是判断盘卷软管管内水流流态发生变化的重要标志。盘卷软管湍流Ⅱ区  $f_c$  与 Dean 数有关,与  $\Delta$  及  $\delta_0$  无关。盘卷软管Ⅱ区阻力损失主要由水流在软管外侧形成的漩涡损失和离心力作用形成的二次流造成的损失组成。

### 3 结 语

(1)对卷盘式喷灌机盘卷软管阻力损失进行了试验研究,对平铺软管阻力损失和盘卷软管阻力损失进行了对比分析。盘卷软管阻力损失主要由水流在软管外侧形成的漩涡损失和离心力作用形成的二次流造成的损失组成。卷盘轴径为 1.28 m,  $27.2 \text{ mm} \leq r \leq 53.6 \text{ mm}$ , 管内流速相同的情况下,  $r$  越大盘卷软管阻力损失越小。

(2)本试验盘卷软管水流运动形态分为湍流Ⅰ区和湍流Ⅱ区,水流运动形态对盘卷软管阻力损失具有影响作用,  $27.2 \text{ mm} \leq r \leq 53.6 \text{ mm}$ ,  $0.16 \leq \Delta/\delta_0 \leq 0.55$ ,  $29\ 630 \leq Re \leq 159\ 208$  时,根据试验数据拟合得到了湍流Ⅰ区和湍流Ⅱ区的盘卷软管阻力损失计算公式。

(3)本试验仅进行了单圈盘卷软管阻力损失试验研究,对于卷盘式喷灌机工作情况下,多圈盘卷软管及不同分层的盘卷软管的阻力损失将在进一步的研究中继续完善。

#### 参考文献:

[1] Oakes PL, Rochester E. Energy utilization of hose towed traveler irrigators [J]. Transactions of the ASAE, 1980, 23(5): 1 131—1 134.  
 [2] 汤玲迪. 卷盘喷灌机螺旋输水盘管二次流特性与流动阻力数值模拟[D]. 江苏镇江:江苏大学, 2013.

[3] 张 敏. 卷盘式移动节水喷灌机软管最佳弯曲参数的试验研究[D]. 长春:吉林农业大学, 2005.  
 [4] 张 敏, 王和平. 卷盘式喷灌机软管阻力损失的试验研究[J]. 中国农机化, 2005, (3): 58—59.  
 [5] Rochester E, Flood Jr C, Hackwell S. Pressure losses from hose coiling on hard—hose travellers [J]. Transactions of the ASAE, 1990, 33(3): 834—838.  
 [6] White C. Streamline flow through curved pipes [J]. Proceedings of the Royal Society of London Series A, 1929, 123(792): 645—663.  
 [7] Ito H. Friction factors for turbulent flow in curved pipes [J]. J Basic Eng, 1959, 81(2): 123—134.  
 [8] Srinivasan P S, Nandapurkar S S, Holland F A. Friction factors for coils [J]. Transactions of the Institute of Chemical Engineers, 1970, 48: 156—161.  
 [9] Mishra P, Gupta S. Momentum transfer in curved pipes. 1. Newtonian fluids [J]. Industrial & Engineering Chemistry Process Design and Development, 1979, 18(1): 130—137.  
 [10] 倪福生, 韩玉红, 顾 磊, 等. 管道水力输送水平弯管局部阻力实验研究[C]// 北京第十九届世界疏浚大会论文集, 2010: 363—369.  
 [11] Berger S, Talbot L, Yao L. Flow in curved pipes [J]. Annual Review of Fluid Mechanics, 1983, 15(1): 461—512.  
 [12] Dean W. Fluid motion in a curved channel [J]. Proceedings of the Royal Society of London Series A, 1928, 121(787): 402—420.  
 [13] Dean W XVI. Note on the motion of fluid in a curved pipe [J]. The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science, 1927, 4(20): 208—223.

#### (上接第 4 页)

[5] Wosten J H M, Pachepsky Y A, Rawls W J. Pedotransfer functions: bridging the gap between available basic soil data and missing soil hydraulic characteristic [J]. Journal of Hydrology, 2001, 251: 123—150.  
 [6] Vereecken H, Maes J, Feyen J, et al. Estimating the soil moisture retention characteristic from texture, bulk density, and carbon content [J]. Soil Science, 1989, 148: 389—403.  
 [7] 黄元仿, 李韵株. 土壤水力性质的估算—土壤转换函数[J]. 土壤学报, 2002, 39(4): 517—523.  
 [8] J A Sobieraj, H Elsenbeer, R A Vertessy. Pedotransfer function for estimating saturated hydraulic conductivity: implications for modeling storm flow generation [J]. Journal of Hydrology, 2001, 251: 202—220.  
 [9] Minasny B, McBratney A B, Bristow K L. Comparison of different approaches to the development of pedotransfer functions for water-retention curves [J]. Geoderma, 1999, 93: 225—253.  
 [10] 黄庆斌. BP 算法的改进及其应用研究[D]. 成都:西南交通大学, 2010.  
 [11] 李 卓, 冯 浩, 吴普特, 等. 砂粒含量对土壤水分蓄持能力影响

模拟试验研究[J]. 水土保持学报, 2009, 23(3): 204—208.  
 [12] 李 卓, 刘永红, 杨 勤. 土壤水分入渗影响机制研究综述[J]. 灌溉排水学报, 2011, 30(5): 124—130.  
 [13] 曹崇文. 利用土壤传输函数确定入渗参数的方法研究[D]. 太原:太原理工大学, 2007.  
 [14] 冯锦萍, 樊贵盛. 土壤入渗参数的线性传输函数研究[J]. 中国农村水利水电, 2014, (9): 8—11.  
 [15] 陈军锋, 郑秀清, 刘 萍, 等. 不同地表条件下季节性冻融土壤入渗能力的预报模型研究[J]. 灌溉排水学报, 2013, 32(4): 35—39.  
 [16] 樊贵盛, 郑秀清, 赵生义. 大田土壤冻融条件下入渗特性的试验研究[J]. 水土保持学报, 1997, 3(3): 31—37.  
 [17] 樊贵盛, 郑秀清, 贾宏骥. 季节性冻融土壤的冻融特点和减渗特性的研究[J]. 土壤学报, 2000, 37(1): 24—32.  
 [18] 王维汉, 陈晓东, 缴锡云, 等. 土壤入渗参数的估算方法及其变异性研究进展[J]. 中国农学通报, 2011, 27(6): 272—275.  
 [19] 李红星, 樊贵盛. 非饱和土壤有压入渗经验模型研究[J]. 太原理工大学学报, 2009, 40(4): 383—387.  
 [20] 汪 岚, 黄彩虹. 基于 MATLAB 色差预测多元回归模型的研究[J]. 计算机与应用化学, 2008, 25(8): 1 015—1 018.