

粉壤土条件下影响地下滴灌灌水器流量的因素分析

王晓愚,白 丹,李占斌,李 刚

(西安理工大学 西北水资源与环境生态教育部重点实验室, 陕西 西安 710048)

**摘 要:** 分别选取灌水器工作压力、土壤容重和土壤初始含水率为因素,采取混合水平均匀设计安排试验,对各因素实测数据进行相关、回归和通径分析,利用通径系数直接评价和比较各试验因素对地下滴灌灌水器流量的影响程度。结果表明:工作压力对灌水器流量的直接通径系数最大,土壤初始含水率和土壤容重通过工作压力对灌水器流量的间接通径系数次之,其它直接或间接通径系数很小,剩余通径系数较小。这说明试验所选的三个因素可反映地下滴灌灌水器水力要素之间的关系,其中地下滴灌中工作压力是决定灌水器流量的主要因素,土壤初始含水率和土壤容重通过工作压力对灌水器流量的作用不可忽略。

**关键词:** 地下滴灌;灌水器;影响因素;通径分析  
**中图分类号:** S275.4;S275.6   **文献标识码:** A   **文章编号:** 1000-7601(2009)01-0143-04

地下滴灌(Subsurface drip irrigation, 简称 SDI)灌水器由于受到土壤因素的制约,其流量比相同工作压力下的地表滴灌灌水器流量有所减小<sup>[1~9]</sup>。国内外学者从多个角度研究了地下滴灌灌水器的水力特性,分析了影响灌水器流量的因素,如仵峰等<sup>[3,4]</sup>通过正交试验,研究了灌水器类型、工作压力和土壤初始含水率等因素对灌水器流量的影响;Warrick 等<sup>[5]</sup>和 Shani 等<sup>[6]</sup>从土壤导水率角度分析了土壤对灌水器出流的影响;Shaviv 等<sup>[7]</sup>、Ben Gal 等<sup>[8]</sup>和 Lazarovitch 等<sup>[9]</sup>的试验研究和 Lazarovitch 等<sup>[10]</sup>建立的数学模型,从地下点源入渗角度分析土壤对灌水器出流的影响,认为当地下滴灌灌水器流量大于土壤水入渗率时,就会导致灌水器出流量减小。这些研究着重分析了土壤因素使灌水器流量减小的原因,但针对各因素尤其是土壤物理特性对灌水器流量影响程度的分析却较少。利用通径分析(Path analysis)可以分析各要素之间的关系,以正确评价各个因素对地下滴灌灌水器流量的影响,从而

为研究地下滴灌管网水力特性提供理论依据。  
通径分析是研究变量间相互关系、衡量自变量对因变量相对重要性的一种多元统计分析方法<sup>[11]</sup>。通径系数是表示相关变量间因果关系的一个统计量,是变量标准化、没有单位的偏回归系数;它是自变量与因变量之间带有方向的相关系数;通径分析的数学模型是偏回归系数标准化后的多元线性回归模型<sup>[12,13]</sup>。与回归分析和相关分析相比,通径系数使原因对结果的作用能直接进行比较,从而能够真实地反映各自变量和因变量的关系;同时,通径分析不仅能测定两变量间的关系,而且可以指出某一变量对因变量直接作用和通过其它变量对因变量的间接作用的影响程度,能全面地反映原因对结果的相对重要性。

1 材料与方法

1.1 试验材料  
供试土壤为粉壤土,土壤颗粒分析结果见表 1。

表 1 供试土壤颗粒分析  
Table 1 Particle-size analysis of soil samples

| 项目<br>Item     | 粒径 Soil particle-size(mm) |       |        |       |       |        |       |        |        |        |
|----------------|---------------------------|-------|--------|-------|-------|--------|-------|--------|--------|--------|
|                | <1.0                      | <0.50 | <0.250 | <0.10 | <0.05 | <0.025 | <0.01 | <0.005 | <0.002 | <0.001 |
| 含量 Content (%) | 99.60                     | 99.20 | 98.87  | 98.60 | 89.15 | 56.58  | 28.02 | 11.34  | 2.88   | 0.90   |

灌水器选取的是以色列 PLASSIM 公司制造的紊流迷宫内镶式滴灌管,试验测得该灌水器在地表滴灌(Drip irrigation, 简称 DI)时的流量( $q_{DI}$ )与工作压力( $h$ )之间符合如下关系式:

收稿日期:2008-07-02  
基金项目:国家自然科学基金(50549018)  
作者简介:王晓愚(1976—),女,四川成都人,博士研究生,主要从事节水灌溉理论与技术研究。E-mail:cxwxy1@163.com。  
通讯作者:白 丹(1960—),男,重庆开县人,教授,博导,主要从事节水灌溉理论与技术研究。E-mail:xautbd@sohu.com。

$$q_{DI} = 0.3610h^{0.5088} \quad R^2 = 0.9996 \quad (1)$$

式中： $q_{DI}$ 为地表滴灌灌水器流量(L/h)； $h$ 为工作压力(KPa)。

1.2 试验方法

试验系统由供水加压装置、管道、滴头、土桶和支架组成,采用高位水箱和水泵联合加压的方式供水,根据所需压力调节闸阀<sup>[14]</sup>。土桶外径 40 cm,试验设计装土深 40 cm,灌水器埋深 20 cm。试验中,为保证土桶内初始含水率均匀和密度均匀,将扰动土经风干、破碎和过 5 mm 筛,调整其含水率,达到设计水平后,按设计容重分层均匀装入土桶。试验过程中,利用地下滴灌灌水器流量测试系统<sup>[14]</sup>每 1 min 采集一组土桶重量和对应时刻的灌水器工作压力。随着灌水时间的增加,得到的是土桶初始重量与累积时间段内灌水量的重量之和,减去土桶重量便是每 1 min 对应的灌水器累积出水量,由此可计算出一定时段内灌水器的流量。

以灌水器工作压力、土壤容重和土壤初始含水率为因素,根据试验条件,确定这 3 个因素的变化范围,为减少试验次数并使各试验点具有代表性,采用混合水平均匀设计安排试验<sup>[15,16]</sup>。灌水器工作压力( $h$ ):50~400 KPa;考虑土壤的农业生产意义,土壤容重和土壤初始含水率都不能过小或过大,土壤容重  $\gamma$ :1.25~1.40 g/cm<sup>3</sup>;土壤初始含水率  $\theta_0$ :

12%~18%(重量)。本试验  $h$  取 8 个水平,  $\gamma$  与  $\theta_0$  分别取 4 个水平,水平设计与试验方案见表 2。

表 2 因素水平与均匀设计试验方案 U<sub>8</sub>(8×4<sup>2</sup>)

Table 2 Factor level and schemes of uniform design

| 水平<br>Level | 因素 Factors             |                                           |                                   |
|-------------|------------------------|-------------------------------------------|-----------------------------------|
|             | 工作压力 $h$               | 土壤容重 $\gamma$                             | 土壤初始含水率 $\theta_0$                |
|             | Work pressure<br>(KPa) | Soil bulk density<br>(g/cm <sup>3</sup> ) | Initial soil water content<br>(%) |
| 1           | 60                     | 1.35                                      | 18                                |
| 2           | 100                    | 1.25                                      | 16                                |
| 3           | 150                    | 1.35                                      | 14                                |
| 4           | 200                    | 1.25                                      | 12                                |
| 5           | 250                    | 1.40                                      | 18                                |
| 6           | 300                    | 1.30                                      | 16                                |
| 7           | 350                    | 1.40                                      | 14                                |
| 8           | 370                    | 1.30                                      | 12                                |

2 结果与分析

2.1 试验结果

按试验方案进行的各次试验中,地下滴灌灌水器流量在初期略大,随后减少并趋于恒定,这个变化过程时间很短,仅 1~2 min 左右。因此,可近似认为单位时间内灌入土中的水量即流量在整个灌水过程中是一个相对恒定的值,流量实测值见表 3。

表 3 各试验因素实测值与对数变换后的值

Table 3 Measured values of experiment factors and their logarithm transformation values

| 实测值 Measured values |                |                               |                 | 取对数值 Logarithm transformation values |                 |               |                |
|---------------------|----------------|-------------------------------|-----------------|--------------------------------------|-----------------|---------------|----------------|
| $h$ (KPa)           | $\theta_0$ (%) | $\gamma$ (g/cm <sup>3</sup> ) | $q_{SDI}$ (L/h) | $\log h$                             | $\log \theta_0$ | $\log \gamma$ | $\log q_{SDI}$ |
| 61.60               | 17.99          | 1.35                          | 2.435           | 1.79                                 | 1.25            | 0.13          | 0.39           |
| 102.63              | 16.02          | 1.25                          | 3.368           | 2.01                                 | 1.20            | 0.10          | 0.53           |
| 155.85              | 13.76          | 1.35                          | 4.193           | 2.19                                 | 1.14            | 0.13          | 0.62           |
| 201.35              | 11.73          | 1.25                          | 4.961           | 2.30                                 | 1.07            | 0.10          | 0.70           |
| 252.23              | 17.68          | 1.40                          | 5.331           | 2.40                                 | 1.25            | 0.15          | 0.73           |
| 305.05              | 16.15          | 1.30                          | 6.064           | 2.48                                 | 1.21            | 0.11          | 0.78           |
| 352.51              | 13.70          | 1.40                          | 6.706           | 2.55                                 | 1.14            | 0.15          | 0.83           |
| 368.80              | 12.03          | 1.30                          | 6.892           | 2.57                                 | 1.08            | 0.11          | 0.84           |

2.2 回归分析与偏相关系数的计算

考虑各试验因素及其之间存在的交互作用,首先假设地下滴灌灌水器流量( $q_{SDI}$ )与工作压力( $h$ )、土壤初始含水率( $\theta_0$ )以及土壤容重( $\gamma$ )之间符合如下关系式:

$$q_{SDI} = kh^x\theta_0^c\gamma^a \quad (2)$$

式中： $q_{SDI}$ 为地下滴灌灌水器流量(L/h)； $k$ ,  $x$ ,  $c$ ,  $a$ 为经验参数。

对式(2)两边取对数(见表 3),将其转换为一个多元线性回归问题:

$$\log q_{SDI} = \log k + x \log h + c \log \theta_0 + a \log \gamma \quad (3)$$

对于式(3),可将  $\log h$ 、 $\log \theta_0$ 、 $\log \gamma$  及  $\log q_{SDI}$  看作分别对应于  $h$ 、 $\theta_0$ 、 $\gamma$  及  $q_{SDI}$  的新变量,为便于分析,令自变量为  $z_i$ ,其中  $z_1 = \log h$ ,  $z_2 = \log \theta_0$ ,  $z_3 = \log \gamma$ ;令因变量为  $y$ ,  $y = \log q_{SDI}$ 。

通过回归分析,求出系数  $\log k$  和  $x$ 、 $c$ 、 $a$ ,并得

到回归方程如下:

$$y = -0.4883 + 0.5600z_1 - 0.0838z_2 - 0.1564z_3 \tag{4}$$

经方差分析可得,复相关系数  $R$  为 0.9997,显著性检验:  $F$  值  $= 2464.05 > F_{0.01}(3, 4) = 16.6944$ ,表明回归显著,说明建立  $y$  关于  $z_i$  的多元线性回归方程并进行通径分析是有意义的。此时  $\log k$ 、 $x$ 、 $c$ 、 $a$  也称为偏回归系数。

计算新变量组之间的偏相关系数见表 4。

表 4 变量之间的偏相关系数

Table 4 Partial correlation coefficients of variables

| 项目 Items | $z_1$   | $z_2$   | $z_3$  | $y$    |
|----------|---------|---------|--------|--------|
| $z_1$    | 1.0000  | —       | —      | —      |
| $z_2$    | -0.4904 | 1.0000  | —      | —      |
| $z_3$    | 0.1790  | 0.3638  | 1.0000 | —      |
| $y$      | 0.9986  | -0.5277 | 0.1425 | 1.0000 |

2.3 通径分析与通径系数的计算

由于各偏回归系数的量纲和各自变量本身变异程度的不同,使得偏回归系数绝对值并不能准确反映相应自变量对因变量相对贡献的大小。为此需将各偏回归系数标准化,即用相应自变量的标准差与因变量的标准差之比去乘各偏回归系数,所得标准化偏回归系数  $P_{iy}$  即为自变量  $z_i$  对因变量  $y$  的直接

通径系数,也是自变量对因变量直接作用的度量。通径系数的计算公式<sup>[12]</sup>为:

$$P_{iy} = b_i \frac{S_{z_i}}{S_{y_i}} \tag{5}$$

式中:  $P_{iy}$  为直接通径系数;  $b_i$  为偏回归系数;  $S_{z_i}$  为自变量  $z_i$  的标准差;  $S_{y_i}$  为结果变量  $y$  的标准差。

回归方程的误差  $e$  对结果变量  $y$  也产生作用,其大小以剩余通径系数  $P_{ye}$  表示,计算公式<sup>[12]</sup>为:

$$P_{ye} = \sqrt{1 - P_{1y}r_{1y} - P_{2y}r_{2y} - P_{3y}r_{3y}} \tag{6}$$

式中:  $P_{ye}$  为剩余通径系数;  $r_{iy}$  为各自变量与因变量之间的偏相关系数。计算得  $P_{ye} = 0.0233$ 。

式(6)中的  $P_{iy}r_{iy}$  分别表示 3 个自变量对回归方程估测可靠程度  $R^2$  的总贡献(其值见表 5)。如果一个自变量与其它自变量之间存在相关关系,则该自变量还可以通过其他自变量对因变量发生间接作用,其大小以间接通径系数衡量。自变量  $z_i$  通过其它相关变量对因变量  $y$  的间接通径系数等于相关变量的直接通径系数乘以二者的相关系数。如  $z_1$  通过  $z_2$  对  $y$  的间接通径系数为:  $r_{12}P_{2y} = (-0.4904) \times (-0.0384) = 0.0188$ ,  $z_1$  通过  $z_3$  对  $y$  的间接通径系数为:  $r_{13}P_{3y} = 0.1790 \times (-0.0196) = -0.0035$ ,同理可计算出  $z_1$ 、 $z_2$ 、 $z_3$  对  $y$  的各间接通径系数见表 5。

表 5 通径系数和各变量对  $R^2$  的总贡献

Table 5 Path coefficients and contribution values of independent variable to  $R^2$

| 自变量<br>Independent<br>variables | 与 $y$ 的相关系数<br>Correlation coefficients<br>with $y$ | 直接通径系数<br>Direct path<br>coefficients | 对 $R^2$ 的总贡献<br>Total contribution<br>to $R^2$ | 间接通径系数 Indirect path coefficients |                      |                      |                |
|---------------------------------|-----------------------------------------------------|---------------------------------------|------------------------------------------------|-----------------------------------|----------------------|----------------------|----------------|
|                                 |                                                     |                                       |                                                | 通过 $z_1$<br>By $z_1$              | 通过 $z_2$<br>By $z_2$ | 通过 $z_3$<br>By $z_3$ | 合计<br>Subtotal |
| $z_1$                           | 0.9986                                              | 0.9833                                | 0.9820                                         | —                                 | 0.0188               | -0.0035              | 0.0153         |
| $z_2$                           | -0.5277                                             | -0.0384                               | 0.0202                                         | -0.4822                           | —                    | -0.0071              | -0.4893        |
| $z_3$                           | 0.1425                                              | -0.0196                               | -0.0028                                        | 0.1760                            | -0.0140              | —                    | 0.1620         |

2.4 各因素对地下滴灌灌水器流量的影响

由表 5 可知,三个变量  $z_1$ 、 $z_2$  和  $z_3$  对  $y$  的影响程度按直接通径系数(绝对值)从大到小依次排列的顺序为  $z_1 > z_2 > z_3$ ,并且  $z_1$  的直接通径系数和它对回归方程  $R^2$  的总贡献(绝对值)明显大于其它两项变量的值。因为对数函数是单调递增的,所以可以认为在各因素对地下滴灌灌水器的直接影响效果中,工作压力对地下滴灌灌水器流量影响最大;土壤容重和土壤初始含水率对地下滴灌灌水器流量影响较小,二者的直接通径系数为负数,说明它们越大,灌水器流量越小。

间接通径系数中,  $z_2$  通过  $z_1$  对  $y$  的通径系数

为 -0.4822,此值较大,并起负作用,其次是  $z_3$  通过  $z_1$  对  $y$  的间接通径系数,为 0.1760。表明土壤初始含水率和土壤容重通过工作压力对灌水器流量发生一定的作用,总体上是起制约作用;其它变量对  $y$  的间接通径系数都较小,可以忽略不计。

剩余通径系数为  $P_{ye} = 0.0233$ ,该值较小,表明试验误差较小,且考虑的因素较全面。

3 结 论

根据地下滴灌灌水器试验数据,采用通径分析的结果表明,影响地下滴灌灌水器流量的主要因素是灌水器工作压力、土壤容重和土壤初始含水率,影

响程度依次为:灌水器工作压力 $>$ 土壤初始含水率 $>$ 土壤容重。地下滴灌灌水器流量随着工作压力的增加而增大;随着土壤初始含水率和土壤容重的增加而减小。但是,土壤初始含水率和土壤容重分别通过工作压力对灌水器流量的作用不可忽视。因此,在地下滴灌毛管水力计算与设计,除了考虑以系统工作压力和灌水器水力性能为主要因素外,还必须考虑土壤初始含水率和土壤容重等因素对地下滴灌灌水器水力要素之间关系的影响作用。

### 参考文献:

- [1] 胡笑涛,康绍忠,王晓燕,等.地下滴灌灌水器的筛选试验研究[J].沈阳农业大学学报,2004,35(5-6):483-485.
- [2] 张 昊,许 迪,程先军,等.几种地下滴灌(渗灌)灌水器性能的室内外试验研究[J].灌溉排水,1999,18(4):10-14.
- [3] 作 峰,李王成,李金山,等.地下滴灌灌水器水力性能试验研究[J].农业工程学报,2003,19(2):85-88.
- [4] 作 峰,李王成,范永申,等.地下滴灌灌水器出口正压试验研究[J].灌溉排水学报,2003,22(2):48-50,54.
- [5] Warrick A W, Shani U. Soil-limiting flow from subsurface emitters. II: Effect on uniformity[J]. Irrig Drain Eng ASCE, 1996, 122(5):296-300.
- [6] Shani U, Xue S, Gordin-Katz R, et al. Soil-limiting flow from subsurface emitters. I: pressure measurements[J]. Irrig Drain Eng ASCE, 1996, 122(5):291-295.
- [7] Shaviv A, Sinai G. Application of conditioner solution by subsurface emitters for stabilizing the surrounding soil[J]. J Irrig Drain Eng, 2004, 130(6):485-490.
- [8] Ben Gal A, Lazarovitch N, Shani U. Subsurface drip irrigation in gravel filled cavities[J]. Vadose Zone J, 2004, 3, 1407-1413.
- [9] Lazarovitch N, Simunek J, Shani U. System dependent boundary condition for water flow from subsurface source[J]. Soil Sci Soc Am J, 2005, 69(1):46-51.
- [10] Lazarovitch N, Shani U, Thompson T L, et al. Soil hydraulic properties affecting discharge uniformity of gravity-fed subsurface drip irrigation systems[J]. ASCE, Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2006, 132(6):531-536.
- [11] 何晓群.多元统计分析[M].北京:中国人民大学出版社,2004.
- [12] 何风华,李明辉.Excel在通径分析中的应用[J].中国卫生统计,2005,22(5):331-332.
- [13] 谢仲伦.相关性通径分析问题剖析[J].农业系统科学与综合研究,1996,12(3):161-167.
- [14] 王晓愚,白 丹,李占斌,等.地下滴灌田间管网室内试验测试系统[J].农业工程学报,2008,24(4):88-90.
- [15] 方开泰.均匀设计与均匀设计表[M].北京:科学出版社,1994.
- [16] 刘文卿.实验设计[M].北京:清华大学出版社,2005.

## Analysis on influence factors of subsurface drip irrigation emitter discharge under silt loam soil condition

WANG Xiao-yu, BAI Dan, LI Zhan-bin, LI Gang

(Key Lab of Northwest Water Resources and Environment Ecology, Ministry of Education, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China)

**Abstract:** The experiment scheme was arranged based on uniform design with mix levels of three factors which are respectively work pressure of emitter, soil bulk density and initial soil water content. The experiment data of three factors was made on correlation analysis, regression analysis and path analysis. Influence degree of these factors on emitter discharge under subsurface drip irrigation (SDI) could be directly estimated and compared through path coefficients. Analysis results show that the direct path coefficient of work pressure to SDI emitter discharge is the most. The indirect path coefficients of initial soil water content and soil bulk density to SDI emitter discharge are secondary. But the other direct or indirect path coefficients are very small, and residue path coefficient is also small. Therefore the relationship of hydraulic characteristics of SDI emitter might be reflected by these three experiment factors. Work pressure is the decisive factor to SDI emitter discharge, and the influences of initial soil water content and soil bulk density on SDI emitter discharge through work pressure can not be ignored. The results have important theoretical and practical application values to SDI hydraulic calculation and engineering design.

**Key words:** subsurface drip irrigation; emitter; influence factor; path analysis